APOSTILA

CONCURSO



PETROBRAS

CARGO:

ENGENHEIRO DE PETRÓLEO JÚNIOR

Fundamentos de Petróleo

Direitos Reservados
MAXSHOPPING10

ÍNDICE

Mecânica dos Fluidos 10
Propriedades dos Fluidos 23
Análise Dimensional e Transformação de Unidades 32
Hidrostática 36
Equilíbrio de Corpos Imersos e Flutuantes 41
Conservação de Massa 43
Quantidade de Movimento e Energia 45
Fundamentos de Geologia de Petróleo 51
Prospecção de Petróleo 58
Perfuração de Poços 66
Avaliação das Formações 73
Completação de Poços 74
Reservatórios de Petróleo 78
Elevação de Petróleo e Processamento Primário de Petróleo..... 84
Resistência dos Materiais 88
Tração e Compressão 93
Análise das Tensões e Deformações 97
Força Cortante e Momento Fletor 100
Momento de Inércia das Figuras Planas 111
Teoria da Elasticidade 117
Transferência de Calor e Massa 119
Condução de Calor em Regime Permanente 128
Fundamentos de Convecção e Radiação 155
Transferência de Massa 255

ATENÇÃO: A comercialização desta apostila é exclusiva de MAXSHOPPING10, caso você a tenha comprado através de outro vendedor, favor envie um e-mail para maxshopping10@gmail.com com uma denúncia. Esta medida visa coibir o plágio e dar início às medidas cabíveis contra aqueles que usam de má fé, utilizando nicks falsos para comprar e depois revender no site, passando-se por autor de meu material. OBRIGADO E BOA SORTE!

Introdução

A sociedade atual ou sociedade da informação é extremamente dependente da utilização de petróleo para o seu desenvolvimento. Como trata-se de um combustível fóssil e portanto, de uma fonte de energia não-renovável, suas reservas estão sendo esgotadas gradativamente. Apesar dos sérios impactos causados ao meio ambiente, sua alta viabilidade econômica faz com que ele continue sendo explorado.

Após a quebra do monopólio da PETROBRÁS surgiram diversos novos "players" atuando na exploração. Criou-se então, em 1998, Agência Nacional do Petróleo, que através do Ministério de Minas e Energia regulamenta todas as atividades de exploração, refino, armazenagem, transporte e consumo de petróleo.

O **petróleo** (do latim petroleum, *petrus*, pedra e *oleum*, óleo, do Grego πετρέλαιον (petrelaion) óleo da pedra, do grego antigo πέτρα (petra), pedra + έλαιον (elaion) óleo de oliva, qualquer substância oleosa.), no sentido de *óleo bruto*, é uma substância oleosa, inflamável, geralmente menos densa que a água, com cheiro característico e coloração que pode variar desde o incolor ou castanho claro até o preto, passando por verde e marrom (castanho).



Combinação complexa de hidrocarbonetos. Composta na sua maioria de hidrocarbonetos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. Também pode conter quantidades pequenas de nitrogênio (N), oxigênio (O), compostos de enxofre (S) e íons metálicos, principalmente de níquel (Ni) e vanádio (V). Esta categoria inclui petróleos ligeiros, médios e pesados, assim como os óleos extraídos de areias impregnadas de alcatrão. Materiais hidrocarbonatados que requerem grandes alterações químicas para a sua recuperação ou conversão em matérias-primas para a refinação do petróleo tais como óleos de xisto crus, óleos de xisto enriquecidos e combustíveis líquidos de hulha não se incluem nesta definição.

Em química, um **hidrocarboneto** é um composto químico constituído essencialmente por átomos de carbono e de hidrogénio.

Os hidrocarbonetos naturais são compostos químicos constituídos apenas por átomos de carbono (C) e de hidrogénio (H), aos quais se podem juntar átomos de oxigénio (O), azoto ou nitrogênio (N) e enxofre (S) dando origem a diferentes compostos de outros grupos funcionais. São conhecidos alguns milhares de hidrocarbonetos.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

As diferentes características físicas são uma conseqüência das diferentes composições moleculares. Contudo, todos os hidrocarbonetos apresentam uma propriedade comum: oxidam-se facilmente liberando calor. Os hidrocarbonetos naturais formam-se a grandes pressões no interior da terra (abaixo de 150 km de profundidade) e são trazidos para zonas de menor pressão através de processos geológicos, onde podem formar acumulações comerciais (petróleo, gás natural, carvão etc). As moléculas de hidrocarbonetos, sobretudo as mais complexas, possuem alta estabilidade termodinâmica. Apenas o metano, que é a molécula mais simples (CH_4), pode se formar em condições de pressão e temperatura mais baixas. Os demais hidrocarbonetos não são formados espontaneamente nas camadas superficiais da terra.

Quanto à forma das cadeias carbônicas, os hidrocarbonetos podem ser divididos, em:

hidrocarbonetos alifáticos: neles, a cadeia carbônica é acíclica (ou seja, aberta), sendo subdivido em:

- **alcanos**
- **alcenos**
- **alcinos**
- **alcadienos**

hidrocarbonetos cíclicos: possuem pelo menos uma cadeia carbônica fechada, subdivididos em:

- **cicloalcanos** ou **ciclanos**
- **cicloalcenos** ou **ciclenos**
- **cicloalcinos** ou **ciclinos**
- **aromáticos**, que possuem pelo menos um **anel aromático** (anel benzênico) além de suas outras ligações.

Quanto ao tipo de ligação entre os carbonos, os hidrocarbonetos podem ainda ser divididos, didaticamente, em:

1. **hidrocarbonetos saturados**, englobando **alcanos** e **cicloalcanos**, que não possuem ligações dupla, tripla ou aromática;
2. **hidrocarbonetos insaturados**, que possuem uma ou mais ligações dupla ou tripla entre átomos de carbono (entre eles os **alcenos**, **alcadienos** e **cicloalcenos** - com ligação dupla; **alcinos** - com ligações tripla -; e **aromáticos**)

O número de átomos de hidrogênio em hidrocarbonetos pode ser determinado, se o número de átomos de carbono for conhecido, utilizando as seguintes equações:

- Alcanos: C_nH_{2n+2}
- Alcenos: C_nH_{2n}
- Alcinos: C_nH_{2n-2}
- Ciclanos: C_nH_{2n}
- Ciclenos: C_nH_{2n-2}

Hidrocarbonetos líquidos geologicamente extraídos são chamados de petróleo (literalmente "óleo de pedra") ou óleo mineral, enquanto hidrocarbonetos geológicos gasosos são chamados de gás natural. Todos são importantes fontes de combustível. Hidrocarbonetos são de grande importância econômica porque constituem a maioria dos

combustíveis minerais (carvão, petróleo,gás natural, etc.) e biocombustíveis como o plásticos, ceras, solventes e óleos. Na poluição urbana, esses compostos - juntamente com NOx e a luz solar - contribuem para a formação do ozônio troposférico.

O petróleo é um recurso natural abundante, porém sua pesquisa envolve elevados custos e complexidade de estudos. É também atualmente a principal fonte de energia. Serve como base para fabricação dos mais variados produtos, dentre os quais destacam-se: benzinas, óleo diesel, gasolina, alcatrão, polímeros plásticos e até mesmo medicamentos. Já provocou muitas guerras, e é a principal fonte de renda de muitos países, sobretudo no Oriente Médio.

Além de gerar a gasolina que serve de combustível para grande parte dos automóveis que circulam no mundo, vários produtos são derivados do petróleo como, por exemplo, a parafina, gás natural, GLP, produtos asfálticos, nafta petroquímica, querosene, solventes, óleos combustíveis, óleos lubrificantes, óleo diesel e combustível de aviação.

Origem e História do Petróleo

A hipótese mais aceita leva em conta que, com o aumento da temperatura, as moléculas do querogênio começariam a ser quebradas, gerando compostos orgânicos líquidos e gasosos, num processo denominado catagênese. Para se ter uma acumulação de petróleo seria necessário que, após o processo de geração (cozinha de geração) e expulsão, ocorresse a migração do óleo e/ou gás através das camadas de rochas adjacentes e porosas, até encontrar uma rocha selante e uma estrutura geológica que detenha seu caminho, sobre a qual ocorrerá a acumulação do óleo e/ou gás em uma rocha porosa chamada rocha reservatório.

É de aceitação para a maioria dos geólogos e geoquímicos, que ele se forme a partir de substâncias orgânicas procedentes da superfície terrestre (detritos orgânicos), mas esta não é a única teoria sobre a sua formação.

Uma outra hipótese, datada do século XIX, defende que o petróleo teve uma origem inorgânica, a partir dos depósitos de carbono que possivelmente foram formados com a formação da Terra.

Registros históricos da utilização do petróleo remontam a 4000 a.C. devido a exsudações e afloramentos freqüentes no Oriente Médio. Os povos da Mesopotâmia, do Egito, da Pérsia e da Judéia já utilizavam o betume para pavimentação de estradas, calafetação de grandes construções, aquecimento e iluminação de casas, bem como lubrificantes e até laxativo. No início da era cristã, os árabes davam ao petróleo fins bélicos e de iluminação. O petróleo de Baku, no Azerbaijão, já era produzido em escala comercial, para os padrões da época, quando Marco Polo viajou pelo norte da Pérsia, em 1271.

A moderna indústria petrolífera data de meados do século XIX. Em 1850, na Escócia, James Young descobriu que o petróleo podia ser extraído do carvão e xisto betuminoso, e criou processos de refinação. Em agosto de 1859 o norte-americano Edwin Laurentine Drake, perfurou o primeiro poço para a procura do petróleo (a uma profundidade de 21m), na Pensilvânia. O poço revelou-se produtor e a data passou a ser considerada a do nascimento da moderna indústria petrolífera. A produção de óleo cru nos Estados Unidos,

de dois mil barris em 1859, aumentou para aproximadamente três milhões em 1863, e para dez milhões de barris em 1874.

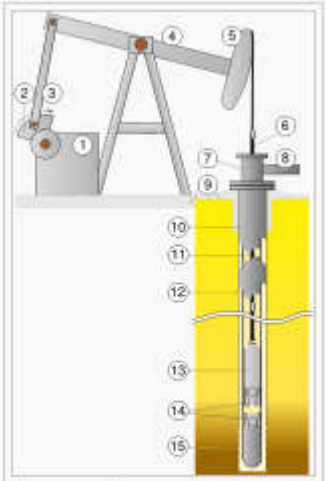
No Brasil, a primeira sondagem foi realizada no município de Bofete-São Paulo, entre 1892-1896, por Eugênio Ferreira de Camargo, quando ele fez a primeira perfuração na profundidade de 488 metros; contudo, o poço jorrou somente água sulfurosa. Em 1932 surgia a primeira refinaria de petróleo do Brasil, Refinaria Riograndense de Petróleo, localizada em Uruguaiana, a qual utilizava petróleo importado do Chile, entre outros países.

Foi somente no ano de 1939 que foi descoberto o óleo de Lobato (Salvador) na Bahia.

Geologia

O petróleo está associado a grandes estruturas que comunicam a crosta e o manto da terra, sobretudo nos limites entre placas tectônicas.

O petróleo e gás natural são encontrados tanto em terra quanto no mar, principalmente nas bacias sedimentares (onde se encontram meios mais porosos - reservatórios), mas também em rochas do embasamento cristalino. Os hidrocarbonetos, portanto, ocupam espaços porosos nas rochas, sejam eles entre grãos ou fraturas. São efetuados estudos das potencialidades das estruturas acumuladoras (armadilhas ou trapas), principalmente através de sísmica que é o principal método geofísico para a pesquisa dos hidrocarbonetos.



Esquema de uma bomba para extração de petróleo.

Durante a perfuração de um poço, as rochas atravessadas são descritas, pesquisando-se a ocorrência de indícios de hidrocarbonetos. Logo após a perfuração são investigadas as propriedades radioativas, elétricas, magnéticas e elásticas das rochas da parede do poço através de ferramentas especiais (perfilagem)as quais também permitem ler as propriedades físicas das rochas, identificar e avaliar a ocorrência de hidrocarbonetos.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Questões Políticas e Econômicas

Sendo a principal fonte de energia do planeta, uma riqueza distribuída de forma não igual entre os países e um recurso não-renovável, o **petróleo** se tornou provavelmente a mais importante substância negociada entre países e corporações, e tem sido, a partir do século XX, um fator político importante e causador de crises entre governos, levando explícita ou, na maior parte dos casos, implicitamente a guerras, massacres e extermínios.

Entre os eventos históricos mais importantes que podem ser diretamente ou parcialmente ligados ao **petróleo** estão:

- A Crise do petróleo na década de 1970
- A Primeira Guerra do Golfo
- Diferentes guerras entre os países árabes, inclusive a Guerra Irã-Iraque
- A luta pela independência da Chechênia
- Guerra Iraque-Estados Unidos (Invasão do Iraque)

Constituintes da Destilação do Petróleo

Nas refinarias, o petróleo é submetido a uma **destilação fracionada**, sendo o resultado desse processo separado em grupos. Nesta destilação encontramos os seguintes componentes:

- De 20 a 60 ℃ **-> éter de petróleo**
- De 60 a 90 ℃ **-> benzina**
- De 90 a 120 ℃ **-> nafta**
- De 40 a 200 ℃ **-> gasolina**
- De 150 a 300 ℃ -> **querosene**
- De 250 a 350 ℃ -> **gasóleo** (PT) ou diesel (BR)
- De 300 a 400 ℃ -> **óleos lubrificantes**
- Resíduos -> **asfalto, piche** e **coque**
- Subprodutos -> **parafina** e **vaselina**

Éter de petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que se obtém na destilação do petróleo. A sua composição pode variar, e o seu ponto de ebulição varia entre 60-75ºC.

Curiosamente, ao contrário do éter etílico e outros éteres, não contém oxigénio na sua estrutura química.

A **benzina** (também chamada de éter de petróleo) é um líquido obtido na destilação fraccionada do petróleo entre 35-90℃, constituído por hidrocarbonetos, geralmente alifáticos, de baixo peso molecular (pentano, heptano). A fracção de alto ponto de ebulição denomina-se *ligroína*. A benzina emprega-se como solvente e como extractante. Possui um caráter tóxico quando inalado causando câncer subcutâneo. Se ingerido alcançando os alvéolos pulmonares a morte torna-se um fato.

A **nafta** (do árabe, *naft*) é um derivado de petróleo utilizado principalmente como matéria-prima da indústria petroquímica (“nafta petroquímica” ou “nafta não-energética”) na produção de eteno e propeno, além de outras frações líquidas, como benzeno, tolueno e xilenos. A nafta energética é utilizada para geração de gás de síntese através de um

processo industrial (reformação com vapor d'água). Este gás é utilizado na produção do gás canalizado doméstico.

A **gasolina** é um combustível constituído basicamente por hidrocarbonetos e, em menor quantidade, por produtos oxigenados. Esses hidrocarbonetos são, em geral, mais "leves" do que aqueles que compõem o óleo diesel, pois são formados por moléculas de menor cadeia carbônica (normalmente de 4 a 12 átomos de carbono). Além dos hidrocarbonetos e dos oxigenados, a gasolina contém compostos de enxofre, compostos de nitrogênio e compostos metálicos, todos eles em baixas concentrações. A faixa de destilação da gasolina automotiva varia de 30 a 220 ℃.

Querosene é um líquido resultante da destilação do petróleo, com temperatura de ebulição entre 150 e 290 graus Celsius, fração entre a gasolina e o óleo diesel.

É uma combinação complexa de Hidrocarbonetos (hidrocarbonetos alifáticos, naftênicos e aromáticos) com um número de carbonos na sua maioria dentro do intervalo de C9 a C16, produzida por destilação do petróleo bruto, com faixa de destilação compreendida entre 150ºC e 239ºC. O produto possui diversas características específicas como uma ampla curva de destilação, conferindo a este um excelente poder de solvência e uma taxa de evaporação lenta, além de um ponto de inflamação que oferece relativa segurança ao manuseamento. É insolúvel em água.

O óleo **diesel** ou **gasóleo** (em Portugal) é um derivado da destilação do petróleo bruto usado como combustível nos motores Diesel, constituído basicamente por hidrocarbonetos. O óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O diesel é selecionado de acordo com suas características de ignição e de escoamento, adequadas ao funcionamento dos motores ciclo diesel. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. Recebeu este nome em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel que inventou um meio mecânico para explorar a reação química originada da mistura de óleo e do oxigênio presente no ar.

Os **óleos lubrificantes** são substâncias utilizadas para reduzir o atrito lubrificando e aumentando a vida útil das máquinas.

Os óleos lubrificantes podem ser de origem animal ou vegetal (óleos graxos), derivados de petróleo (óleos minerais) ou produzidos em laboratório (óleos sintéticos), podendo ainda ser constituído pela mistura de dois ou mais tipos (óleos compostos).

O **asfalto** é um betume espesso, de material aglutinante escuro e reluzente, de estrutura sólida, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular, além de substâncias minerais, resíduo da destilação a vácuo do petróleo bruto. Não é um material volátil, é solúvel em bissulfeto de carbono, amolece a temperaturas entre 150℃ e 200℃, com propriedades isolantes e adesivas. Também denomina a superfície revestida por este betume. É muito usado na pavimentação de ruas, estradas e aeroportos.

O **betume** (do latim 'bitumen') é a mistura sólida, pastosa ou mesmo líquida de compostos químicos (hidrocarbonetos) que pode aparecer na Natureza ou obtida em processo de destilação do petróleo. Sinônimo: **pez mineral**.

Substância facilmente inflamável, de cor escura e pegajosa. É constituído de carbono e hidrogênio, dentre outras substâncias.

Do betume são obtidos vernizes, massas de revestimento, bases para pintura. Para a pavimentação de ruas é utilizado o betume formado de resíduos do petróleo destilado.

O betume é popularmente conhecido como piche.

Dentre suas inúmeras utilidades é usado para tratar madeiras, como de curral por exemplo. Prolonga a vida útil e protege de cupim.

O **coque** é um tipo de combustível derivado do carvão betuminoso. Começou a ser utilizado na Inglaterra do século XVII. O coque obtém-se do aquecimento da hulha (ou carvão betuminoso), sem combustão, num recipiente fechado. Pode ser utilizado na produção de ferro gusa (alto forno), sendo adicionado junto com a carga metálica.



Coque

O coque também aparece como um subproduto do processamento do petróleo conhecido como coqueamento.

Além da utilização na liga do ferro gusa, o Coque de petróleo pode ser usado em várias outras formas possíveis, tais como: Pastilha de freio automotivo, Sapatas Ferroviárias, Alimentação de fornos refratários e Colorização de vidros.

Hoje em dia no Brasil o Coque tem origem nos poços de petróleo junto às Refinarias da Petrobrás que já comercializa o produto.

A **parafina** é um derivado do petróleo descoberto por Carl Reichenbach. Conhecida por sua alta pureza, excelente brilho e odor reduzido, também pode ser usada como combustível. Possui propriedades termoplásticas e de repelência à água e é usada amplamente para a proteção de diversas aplicações, como em embalagens de papelão para a indústria alimentícia e revestimento de queijos e frutas. Por sua propriedades de combustível, é a matéria prima essencial na fabricação de velas. Outras aplicações comuns à parafina incluem cosméticos, giz de cera, adesivos termofusíveis (hot melt), papel de carbono, tintas, pinturas etc.

A **vaselina** é uma parafina líquida: é oleaginosa, límpida, incolor, não fluorescente, inodoro quando frio, mas apresenta leve odor de petróleo quando aquecido, insípido. Insolúvel na água e no álcool, miscível com a exceção do óleo de rícino, solúvel no éter, clorofórmio, éter de petróleo e nos óleos essenciais.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Mecânica dos Fluidos

A **mecânica dos fluidos** é a parte da física que estuda o efeito de forças em fluidos. Os fluidos em equilíbrio estático são estudados pela hidrostática e os fluidos sujeitos a forças externas diferentes de zero são estudados pela hidrodinâmica.

Conceito de fluido

É uma substância que não apresenta forma própria e estando em repouso não resiste a esforços tangenciais por menores que estes se apresentem, o que equivale a dizer que a mesma se deforma continuamente.

Propriedades físicas dos fluidos

As propriedades dos fluidos relevantes para o estudo do escoamento dos fluidos são a **massa volúmica**, a **tensão superficial**, a **viscosidade,** e restantes **propriedades reológicas**.

A **massa volúmica** ou **massa volumétrica**, define-se como a propriedade da matéria correspondente à massa por volume, ou seja, a proporção existente entre a massa de um corpo e seu volume. Desta forma pode-se dizer que a massa volúmica mede o grau de concentração de massa em determinado volume.

Densidade é a relação entre a massa volúmica da matéria em causa e a massa volúmica de matéria de referência (a água é geralmente tomada como referência). É uma grandeza sem dimensões, devido ao quociente. Quando se diz que um corpo tem uma densidade de 5, quer dizer que tem uma massa volúmica 5 vezes superior à da água (no caso dos sólidos e líquidos).

As designações de densidade absoluta e densidade, por vezes utilizados na língua portuguesa como sinônimos de massa volúmica, devem ser evitadas, devido à confusão e ambigüidade que podem originar. Na língua inglesa, o nome *"density"* designa massa volúmica, pelo que não deve ser traduzido para *"densidade"*.

Massa volúmica da água à pressão normal e à temperatura de 4 ºC, nesta situação a massa volúmica da água é máxima e igual a 1,00 g/cm³.

O gelo ou, água no estado sólido, possui uma massa volúmica inferior àquela apresentada pela água em seu estado líquido.

Para definir a densidade nos gases utiliza-se como massa volúmica de referência o ar, que nas condições Condições Normais de Temperatura e Pressão ([[Condições Normais de Temperatura e Pressão|CNTP]]) (temperatura de 0 ℃ e pressão atmosférica 101 325 Pa) corresponde a 1,2928 kg/m^3.

Quando se aumenta a temperatura de um determinado fragmento de matéria, tem-se um aumento do volume fixo desta, pois haverá a dilatação ocasionada pela separação dos átomos e moléculas. Ao contrário, ao se diminuir a temperatura, tem-se uma diminuição deste volume fixo. A quantidade de massa existente num dado volume é chamada de massa volúmica.

Quando a matéria se expande, sua massa volúmica diminui e quando a matéria se contrai, sua massa volúmica aumenta. Com este conceito tem-se uma unidade de medida, que pode ser dada em gramas (g) por centímetros cúbicos(cm^3).

Por convenção:
1 centímetro cúbico de água, tem a massa de um grama, ou *1g/cm^3*.

Na física, a tensão superficial é um efeito que ocorre na camada superficial de um líquido que leva a sua superfície a se comportar como uma membrana elástica.

Este efeito permite que insetos caminhem sobre a água. Também permite que pequenos objetos de metal como agulhas ou lâminas flutuem na superfície da água..

A tensão superficial está relacionada com a diferença de pressão entre os dois lados de uma interface pela equação de Laplace:

$$\Delta P = \gamma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$$

Em que R1 e R2 são os raios de curvatura da interface.

A **viscosidade** é a propriedade dos fluidos correspondente ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular. Ou seja, quanto maior a viscosidade, menor a velocidade em que o fluido se movimenta. Define-se pela lei de Newton da viscosidade:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Onde a constante μ é o *coeficiente de viscosidade*, *viscosidade* ou *viscosidade dinâmica*. Muitos fluidos, como a água ou a maioria dos gases, satisfazem os critérios de Newton e por isso são conhecidos como fluidos newtonianos. Os fluidos não newtonianos têm um comportamento mais complexo e não linear.

Viscosidade é a medida da resistência de um fluido à deformação causada por um torque. É comumente percebida como a "grossura", ou resistência ao despejamento. Viscosidade descreve a resistência interna para fluir de um fluido e deve ser pensada como a medida do atrito do fluido. Assim, a água é "fina", tendo uma baixa viscosidade, enquanto óleo vegetal é "grosso", tendo uma alta viscosidade.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A **reologia** é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido.

A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida, e a única que caracteriza os fluidos newtonianos.

Definição

É o ramo da física que estuda a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria, ou seja, um estudo das mudanças na forma e no fluxo de um material, englobando todas estas variantes. Podemos então concluir que é a ciência responsável pelos estudos do fluxo e deformações decorrentes deste fluxo, envolvendo a fricção do fluido.

Esta fricção ocorre internamente no material, onde uma camada de fluido possui uma certa resistência ao se deslocar sobre outra. Tudo isto envolve uma complexidade de fatores. O tamanho e geometria de cadeia é um exemplo possível. Enquanto temos os solventes que possuem uma viscosidade desprezível, temos também as resinas, com uma viscosidade elevada, graças ao tamanho de sua cadeia polimerizada. Ambos são compostos orgânicos, mas seus comportamentos são totalmente diferentes.

- **Viscosidade Aparente**: É aquela medida em um único ponto e através de cisalhamento constante. É expressa por unidades de Poise ou centiPoise (mPa/s). Utilizada na leitura de viscosidade de fluidos pseudo-plásticos. Viscosímetros: Brookfield, Haake.

- **Viscosidade Cinemática**: é aquela medida por um sistema de geometria que utiliza-se da gravidade para sua obtenção de medida. Medida por copos, tem como método a contagem, através de um cronômetro, do tempo gasto para o fluido escorrer pelo orifício inferior destes copos.

- **Viscosidade Absoluta**: é aquela que é medida por um sistema de geometria que não sofre influência da gravidade para a obtenção desta medida.

Tipos de escoamentos

Os escoamentos podem ser classificados quanto à compressibilidade e quanto ao grau de mistura macroscópica.

Um escoamento em que a densidade do fluido varia significativamente é um escoamento compressível. Se a densidade não variar significativamente então o escoamento é incompressível.

O grau de mistura de um fluido em escoamento depende do regime de escoamento, que pode ser laminar, turbulento ou de transição

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Fluido como meio lubrificante

Para um corpo deslizar sobre outro, deve-se vencer uma força adversa denominada: força de atrito.

O atrito pode ser estático: os corpos permanecem imóveis, ou cinemático ou de deslizamento, que é devido basicamente a dois fatores:

• rugosidade da superfície;
• tendência das áreas mais planas das superfícies se soldarem, quando submetidas a condições severas de deslizamento.

Apesar do atrito apresentar uma série de aspectos positivos, já que sem o mesmo seria impossível andar, ou até mesmo frear um automóvel, em muitas outras aplicações ele é indesejável, pois se gasta uma certa quantidade de energia para vencê-lo, o que implica em perda, tanto da potência como do rendimento do sistema. Além disto, sabemos que o atrito pode acarretar em aumento da temperatura das partes que se encontram em contato, podendo até mesmo originar uma fusão das mesmas.

O que aconteceria com o motor de um veículo, se o mesmo operar sem o óleo lubrificante? Certamente iria fundir!

Uma das tarefas do engenheiro consiste em controlar o atrito, aumentá-lo onde o mesmo é necessário e reduzi-lo onde for inconveniente.

Desejando reduzi-lo, recorremos a **lubrificação**, que consiste em introduzir uma película fluida com a finalidade de transformar o atrito sólido x sólido em sólido x fluido.

Todos os fluidos, de um certo modo, são lubrificantes, sendo que alguns apresentam melhor desempenho do que outros. A escolha adequada de um fluido lubrificante é responsável por uma boa eficiência ou não do funcionamento do sistema.

O que aconteceria com o motor do veículo se fosse escolhida a água como fluido lubrificante? Com ela não apresenta as características apropriadas de um fluido lubrificante, o motor acabaria fundindo.

Certos derivados do petróleo mostraram ser excelentes fluidos lubrificantes, já que:

• apresentam elevada capacidade de umectação;
• apresentam capacidade de aderência, o que permite a formação de uma película “permanente” do fluido lubrificante.

Cálculo da força de resistência viscosa - (Fμ)

A figura mostra duas superfícies deslizantes que estão separadas por um fluido lubrificante, que geralmente apresenta um fluxo **laminar,** ou seja, a película é composta de camadas extremamente finas ou lâminas, cada uma movendo-se na mesma direção, porém com velocidades diferentes.

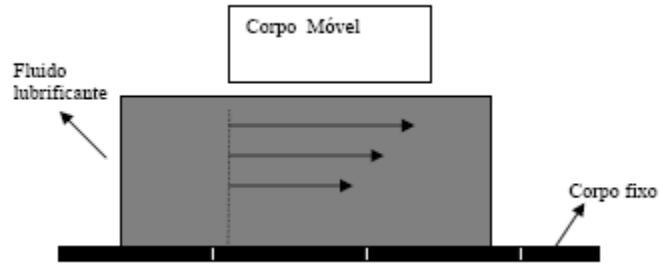


Figura 1

Com as lâminas se movendo com velocidades diferentes, cada lâmina deverá deslizar sobre a outra, o que comprova a existência de uma força entre elas.

A resistência a esta força, considerada por unidade de área é denominada de tensão de cisalhamento (τ).

Considerando a tensão de cisalhamento constante ao longo da película lubrificante, pode-se determinar a intensidade da força de resistência viscosa pela equação:

$$F\mu = \tau \cdot A$$

Equação 1

onde “A” é a área de contato entre a superfície em movimento e a película do lubrificante.

Cálculo da tensão de cisalhamento - (τ)

A tensão de cisalhamento é calculada pela lei de Newton da viscosidade.

Lei de Newton da viscosidade

Newton ao realizar a experiência das duas placas (figura 2) estabeleceu que:

“A tensão de cisalhamento é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade.”



Figura 2

Princípio de aderência

"As partículas fluidas em contato com uma superfície sólida apresentam a velocidade da superfície."

Ao considerar o princípio de aderência na figura 2, podemos concluir que ao longo da espessura (ε) do fluido a sua velocidade varia de zero, junto à placa fixa, até vp junto à placa móvel.

Cálculo do gradiente de velocidade

O gradiente de velocidade pode ser definido por uma derivada direcional da velocidade, através da qual estudamos a variação da velocidade segundo a direção mais rápida da sua variação.

Considerando a figura 2, pergunta-se qual a direção mais rápida da variação da velocidade? É a direção perpendicular entre as placas.

Denominando a direção mencionada anteriormente de y, isto porque estamos levando em conta a hipótese do **escoamento ser unidirecional,** o enunciado da lei de Newton pode ser representada pela expressão 1:

$$\tau \propto \frac{dv}{dy}$$

Expressão 1

Para calcular o gradiente de velocidade (*dv / dy*), devemos estabelecer a função da velocidade em relação ao eixo escolhido, no nosso caso v = f(y).

Pela hipótese de **escoamento laminar** esta função pode ser representada por uma parábola como mostra a figura 3:

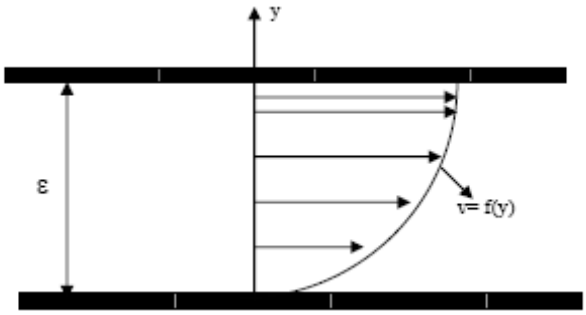


Figura 3

v = f(y) → v = ay2 + by + c

Devemos impor condições de contorno com o objetivo de determinar **a, b** e **c**:

$$1^a \text{ - para } y = 0 \quad \Rightarrow \quad v = 0 \quad \therefore \quad c = 0$$

$$2^a \text{ - para } y = \varepsilon \quad \Rightarrow \quad v = v_p \quad \therefore \quad v_p = a\,\varepsilon^2 + b.\varepsilon$$

$$3^a \text{ - para } y = \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \frac{dv}{dy} = 0 \quad \therefore \quad 0 = 2\,a\,\varepsilon + b$$

Resolvendo o sistema de equações especificado acima obtemos:

$$a = -\frac{VP}{\varepsilon^2} \qquad \text{e} \qquad b = \frac{2VP}{\varepsilon}$$

Portanto para o escoamento laminar v = f(y) pode ser representada pela equação 2:

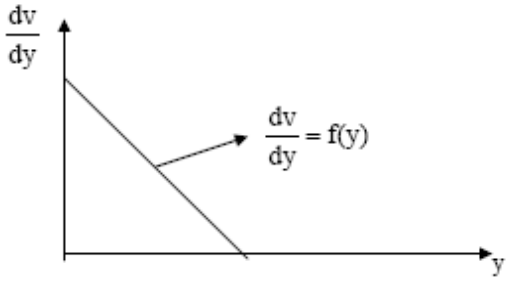
$$V = -\frac{VP}{\varepsilon^2} y^2 + \frac{2VP}{\varepsilon} y$$

Equação 2

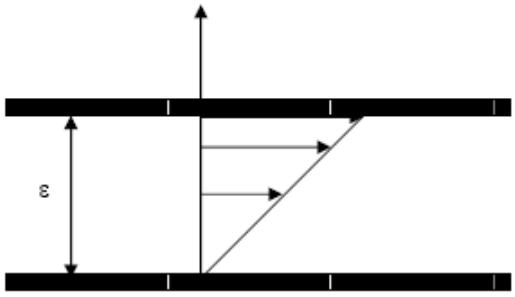
onde:

• vp- é a velocidade escalar constante da placa móvel
• ε - é a espessura do fluido lubrificante colocada entre as placas

Através da equação 2, podemos representar a variação do gradiente de velocidade em função de y, como mostra a figura abaixo.



Nos sistemas de lubrificação práticos, a espessura do fluido lubrificante é muito pequena, o que possibilita considerar a variação da velocidade em relação à espessura ε como sendo linear (figura abaixo).



$$v = f(y) \rightarrow v = ay + b$$

Devemos impor condições de contorno com o objetivo de determinar **a** e **b**:

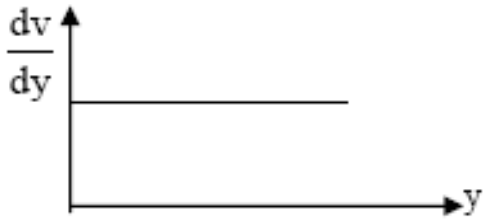
$$1^a \text{ - para } y = 0 \quad \Rightarrow \quad v = 0 \quad \therefore \quad b = 0$$

$$2^a \text{ - para } y = \varepsilon \quad \Rightarrow \quad v = v_p \quad \therefore \quad a = \frac{v_p}{\varepsilon}$$

Portanto, para o escoamento laminar com espessuras pequenas, v = f(y) pode ser representada pela equação :

$$v = \frac{v_p}{\varepsilon} y$$

A figura sbsixo, representa o gradiente de velocidade em função de y, que é obtido em sistemas onde a espessura do fluido lubrificante é pequena.



Constante de proporcionalidade da lei de Newton da viscosidade

Para viabilizar a utilização da expressão 1 na maioria das aplicações da Engenharia, deve-se introduzir uma constante de proporcionalidade.

Fisicamente esta constante classifica o fluido e foi denominada de viscosidade dinâmica ou simplesmente viscosidade (μ).

Através dela podemos transformar a expressão 1 em equação, que representa a lei de Newton da viscosidade.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

A viscosidade representa a medida da resistência que o fluido oferece ao escoamento e é geralmente função: da natureza do fluido, da temperatura, da pressão e da taxa de deformação angular, que é representada pelo gradiente de velocidade.

"Primeira" classificação dos fluidos

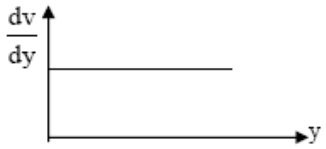
Esta primeira classificação é feita em relação à lei de Newton, onde temos:

• **fluidos Newtonianos** → aqueles que obedecem à lei de Newton da viscosidade. Exemplos: água, óleos lubrificantes ...

• **fluidos não Newtonianos** → aqueles que não obedecem à lei de Newton da viscosidade. Exemplos: sangue, misturas heterogêneas ...

Simplificação prática da lei de Newton da viscosidade

Através da figura abaixo, podemos concluir que para v = f(y) linear o gradiente de velocidade é constante e igual à relação entre a velocidade escalar da placa móvel (vp), que para as aplicações estudadas é constante, e a espessura do fluido lubrificante (ε).



A conclusão anterior dá origem a equação 10, que representa a simplificação prática da lei de Newton da viscosidade.

$$\tau = \mu \cdot \frac{v_p}{\varepsilon}$$

Propriedades básicas dos fluidos

Neste item, evocamos algumas das propriedades básicas dos fluidos com o objetivo de introduzir a nomenclatura adotada.

Massa específica → ρ

Define - se massa específica como sendo a massa do fluido (m) considerada por unidade de seu volume (V).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

“Segunda” classificação dos fluidos

Esta classificação é feita em relação a sua massa específica e origina:

• **fluidos incompressíveis** → são aqueles que para qualquer variação de pressão não ocorre variação de seu volume (ρ = constante);

• **fluidos compressíveis** → são aqueles que para qualquer variação de pressão ocorre variações sensíveis de seu volume (ρ ≠ constante).

Esta classificação é muito limitada, já que todos os fluidos são compressíveis, por este motivo, consideramos:

• **escoamentos incompressíveis** → que são aqueles provocados por uma variação de pressão que origina, tanto uma variação de temperatura como de volume desprezíveis (ρ = constante);

• **escoamentos compressíveis** → que são aqueles provocados por uma variação de pressão que origina, tanto uma variação de temperatura como de volume sensíveis (ρ não constante).

Observação - Evocando a equação $\rho = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{V}}$, podemos escrever que:

$$\rho = f(m, V) \text{ ou } \rho = f(m, p, \theta), \text{ onde:}$$

p → pressão e θ → temperatura.

Para os escoamentos incompressíveis consideramos ρ ≅ constante.

Na prática, esta condição pode ser observada nos seguintes casos:

• líquidos em instalações onde a variação da temperatura é desprezível:
• ar em projeto de ventilação;
• gases escoando com velocidades inferiores à cerca de 70 m/s e onde a variação da temperatura é considerada desprezível (geralmente em instalações de ar condicionado).

Peso específico → γ

Define - se peso específico como sendo o peso do fluido (G) considerado por unidade de volume (V).

$$\gamma = \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{V}}$$

Relação entre peso específico e massa específica

$$\gamma = \frac{G}{V} = g \cdot \frac{m}{V} = g \cdot \rho$$

Massa específica e peso específico relativo → ρr e γr

Define-se massa específica relativa (ρr), como sendo a relação da massa específica do fluido considerado e a massa específica padrão da água para líquidos e do ar para gases, respectivamente as equações:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \qquad \rho_r = \frac{\rho}{\rho_{ar}}$$

O peso específico relativo (γr) define-se de maneira análoga a massa específica relativa, porém considerando-se a relação entre os pesos específicos, respectivamente do fluido considerado e o peso específico padrão d'água se for líquido, ou o peso específico padrão do ar se for gás.

$$\gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} \qquad \gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_{ar}}$$

Demonstra - se facilmente que:

$$\gamma_r = \rho_r$$

Viscosidade cinemática → v

A viscosidade cinemática é geralmente obtida em laboratórios através dos viscosímetros e é definida como sendo a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido, ambas consideradas à mesma pressão e temperatura.

A viscosidade cinemática foi criada a partir da equação de Poiseuille, para a determinação da viscosidade em viscosímetros industriais. Esta lei é válida para escoamentos laminares e em regime permanente, desde que o fluido seja considerado Newtoniano e seu escoamento seja considerado incompressível. A equação relaciona o tempo necessário (t) para que um volume padrão (V) de um dado fluido a uma pressão "p", escoe em um capilar de comprimento "L" e raio "R".

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi}{8} \times \frac{p \times R^4}{V \times \rho \times L} \times t$$

Equações dimensionais

As equações dimensionais além de serem fundamentais para definir as unidades das grandezas, serão muito importantes para os estudos de semelhança.

As grandezas são classificadas em **grandezas fundamentais** e **grandezas derivadas,** sendo que estas devem ser definidas pelas grandezas fundamentais, caracterizando desta maneira o que denominamos de **equações dimensionais,** que são representadas por um produto de potências com bases formadas pelas grandezas fundamentais e expoentes que indicam a relação entre a grandeza derivada e a grandeza fundamental considerada.

Para Mecânica dos Fluidos geralmente adota-se como grandezas fundamentais a **força (F),** o **comprimento (L)** e o **tempo (T)**, todas as demais são consideradas derivadas e devem ser definidas em função de **F, L e T.**

- $F_\mu \rightarrow$ força de resistência viscosa $\rightarrow \{F_\mu\} = F$
- $\tau \rightarrow$ tensão de cisalhamento $\rightarrow \{\tau\} = F \cdot L^{-2}$
- $\frac{dv}{dy} \rightarrow$ gradiente de velocidade $\rightarrow \left\{\frac{dv}{dy}\right\} = T^{-1}$
- $\mu \rightarrow$ viscosidade, ou viscosidade dinâmica ou absoluta $\rightarrow \{\mu\} = F.L^{-2}.T$
- $\rho \rightarrow$ massa específica $\rightarrow \{\rho\} = F.L^{-4}.T^2$
- $\gamma \rightarrow$ peso específico $\rightarrow \{\gamma\} = F.L^{-3}$
- $\rho_r \rightarrow$ massa específica relativa $\rightarrow \{\rho_r\} = F^0 L^0 T^0$
- $\gamma_r \rightarrow$ peso específico relativo $\rightarrow \{\gamma_r\} = F^0 L^0 T^0$
- $\nu \rightarrow$ viscosidade cinemática $\rightarrow \{\nu\} = L^2 T^{-1}$

Unidades no Sistema Internacional e Principais Conversões

Grandezas fundamentais:

• **força:** N (Newton)
• **comprimento:** m (metro)
• **tempo:** s (segundo)
• **força de resistência viscosa:** N

- **tensão de cisalhamento:** $\frac{N}{m^2} = Pa$ (Pascal)
- **gradiente de velocidade:** $\frac{1}{s}$
- **viscosidade dinâmica:** $\frac{N \times s}{m^2} = \frac{10^5 \times dina \times s}{10^4 cm^2} = 10$ poise
  $= 10^3$ centipoise $= 1\ Pa \times s$
- **massa específica:** $\frac{N \times s^2}{m^4} = \frac{kg}{m^3} = \frac{10^3 g}{10^6 cm^3} = 10^{-3} \frac{g}{cm^3}$
- **peso específico:** $9{,}8 \frac{N}{m^3} = \frac{kgf}{m^3}$
- **viscosidade cinemática:** $\frac{m^2}{s} = 10^4 \frac{cm^2}{s} = 10^4 stoke = 10^6 centistoke$
- **velocidade escalar:** $\frac{m}{s} = 100 \frac{cm}{s}$

Nas indústrias de petróleo, comumente usa - se como unidade de massa específica o ºAPI (densidade API), que é uma escala expressa em graus e dada por números inteiros:

$$[\rho] = \frac{141{,}5}{\text{densidade a } {}^{60}\!/_{60^\circ F}} - 131{,}5$$

onde densidade a $^{60}\!/_{60^\circ F}$ representa um número que é obtido da relação entre a massa do produto e a massa de água, ambas a 60° F (ρ_r).

Informações adicionais sobre a viscosidade

Viscosidade dinâmica dos líquidos

A viscosidade dos líquidos aumenta em função da pressão aplicada. Isto é devido, provavelmente, a nenhum líquido ser completamente incompressível e ao diminuir seu volume haveria uma aproximação das moléculas, o que provocaria o aumento das forças de atrito entre as camadas de líquido.

A expressão matemática para tal variação, uma função exponencial proposta por Barns (1893), não é contudo, praticamente utilizada, pois além de ser pequena esta variação, só seria aplicada a poucas aplicações.

Nas aplicações usuais da Engenharia, a viscosidade dos líquidos pode ser considerada como sendo função do líquido e da sua temperatura.

Para os líquidos a viscosidade está diretamente relacionada com a coesão entre as moléculas e como esta coesão diminui com o aumento da temperatura, pode-se concluir que a sua viscosidade também diminui.

Pesquisadores concluíram que a viscosidade dos líquidos é uma função exponencial do inverso da temperatura e daí, através desta consideração obtiveram uma série de fórmulas empíricas para a determinação da viscosidade em função da temperatura.

Viscosidade dinâmica dos gases

Para os gases a viscosidade está diretamente relacionada com a energia cinética das moléculas e isto justifica os mesmos apresentarem comportamento contrário ao dos líquidos.

Para os gases a viscosidade é uma função crescente da temperatura, dependendo inclusive da pressão, com a qual também cresce.

PROPRIEDADE DOS FLUIDOS

Propriedades físicas dos fluidos

As propriedades dos fluidos relevantes para o estudo do escoamento dos fluidos são a **massa volúmica**, a **tensão superficial**, a **viscosidade**, e restantes **propriedades reológicas**.

Massa volúmica

A **massa volúmica** ou **massa volumétrica**, define-se como a propriedade da matéria correspondente à massa por volume, ou seja, a proporção existente entre a massa de um corpo e seu volume. Desta forma pode-se dizer que a **massa volúmica** mede o grau de concentração de massa em certo volume.

Densidade é a relação entre a massa volúmica da matéria em causa e a massa volúmica de matéria de referência (a água é geralmente tomada como referência). É uma grandeza sem dimensões, devido ao quociente. Quando se diz que um corpo tem uma densidade de 5, quer dizer que tem uma massa volúmica 5 vezes superior à da água (no caso dos sólidos e liquidos).

As designações de densidade absoluta e densidade, por vezes utilizados na língua portuguesa como sinónimos de massa volúmica, devem ser evitados, devido à confusão e ambiguidade que podem originar. Na língua inglesa, o nome ‘density’ designa massa volúmica, pelo que não deve ser traduzido para ‘densidade’.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Massa volumica da água à pressão normal e à temperatura de 4ºC, nesta situação a massa volúmica da água é máxima e igual a 1,00 g/cm3).

O gelo ou a água solidificada tem uma mass volúmica inferior, do água em estado líquido.

Para definir indicar a densidade nos gases utiliza-se como massa volumica de referência o ar, que nas condições PTN (temperatura de 0 ºC e pressão atmosférica 105 Pa) corresponde a 1,2928 kg/m3.

Quando aumentamos a temperatura de um determinado fragmento de matéria, temos um aumento do volume fixo desta, pois haverá a dilatação ocasionada pela separação dos átomos e moléculas. Ao contrário, ao diminuirmos a temperatura, teremos uma diminuição deste volume fixo. A quantidade de massa existente num dado volume é chamada de **massa volúmica**.

Quando a matéria se expande, sua **massa volúmica** diminui e quando a matéria se contrai, sua **massa volúmica** aumenta. Com este conceito temos uma unidade de medida, que pode ser dada gramas (g) por centímetros cúbicos(cm3).

Por convenção temos:
1 centímetro cúbico de água, tem a massa de um grama, ou ***1g/cm3***.

No caso dos gases, sua **massa volúmica** difere dos líquidos, e por conseqüência dos sólidos. Nos gases, suas moléculas estão separadas devido à temperatura que está acima da temperatura de ebulição do líquido correspondente. Microscopicamente, isto corresponde dizer que nos gases a atração entre as moléculas e/ou átomos que os compõem não são suficientemente intensas frente à **energia cinética** desses mesmos constituintes para mantê-los próximos. Nos líquidos e nos sólidos, contudo, as moléculas e átomos estão muitíssimo próximas.

Tomando-se como exemplo hidrogênio gasoso, comparado à água, nas condições normais de temperatura e pressão, temos uma **massa volúmica** de 9 x 10-5 g/cm³, e a água é 11000 vezes mais densa que o elemento. No espaço sideral, temos uma **massa volúmica** média aproximada de um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico, ou 17 x 10-25 g/cm³.

A **massa volúmica** depende da massa dos átomos ou moléculas individuais e do volume efetivo ocupado pelas mesmas, seja no sólido, no líquido ou no gás. Se uma dada substância, em qualquer estado físico, apresenta massa molecular cinco vezes maior que outra nas mesmas condições de temperatura, pressão e outras coordenadas, a **massa volúmica** da primeira será cinco vezes maior que a da segundo.

A densidade por ser medida indiretamente medindo-se o volume que uma dada substância apresenta (por meio de bequeres, provetas, picnometros e densímetros) e a massa correspondente.

A unidade mais conhecida é gramas por mililitro (g/ml, embora a densidade padrão pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) seja o quilograma por metro cúbico.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Tensão superficial



Uma moeda pode ficar acima da água graças a tensão superficial da água

Na física, a tensão superficial é um efeito que ocorre na camada superficial de um líquido que leva a sua superfície a se comportar como uma membrana elástica.

A tensão superficial está relacionada com a diferença de pressão entre os dois lados de uma interface pela equação de Laplace:

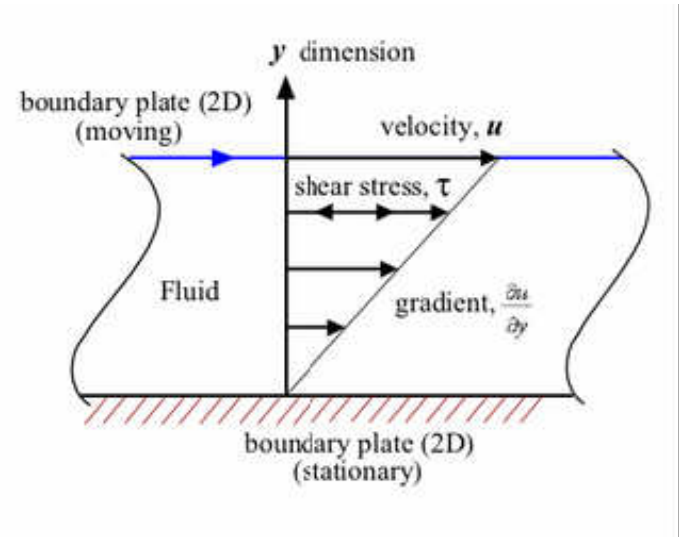
$$\Delta P = \gamma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$$

Em que R1 e R2 são os raios de curvatura da interface.

Viscosidade

A **viscosidade** é a propriedade dos fluidos correspondente ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular. Ou seja, quanto maior a viscosidade, menor a velocidade em que o fluido se movimenta. Define-se pela lei de Newton da viscosidade:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$



Pressão laminar de um fluido entre duas placas. Atrito entre o fluido e a superfície móvel causa a torsão do fluido. A força necessária para essa ação é a medida da viscosidade do fluido.

Onde a constante μ é o *coeficiente de viscosidade*, *viscosidade* ou *viscosidade dinâmica*. Muitos fluidos, como a água ou a maioria dos gases, satisfazem os critérios de Newton e por isso são conhecidos como fluidos newtonianos. Os fluidos não newtonianos têm um comportamento mais complexo e não linear.

Viscosidade é a medida da resistência de um fluido à deformação causada por um torque. É comumente percebida como a "grossura", ou resistência ao despejamento. Viscosidade descreve a resistência interna para fluir de um fluido e deve ser pensada como a medida do atrito do fluido. Assim, a água é "fina", tendo uma baixa viscosidade, enquanto óleo vegetal é "grosso", tendo uma alta viscosidade.

Viscosidade de alguns materiais comuns

Algumas viscosidades de fluidos newtonianos estão listadas abaixo:

Gases (à 0 ℃):

	viscosidade (Pa·s)
hidrogênio	8.4 × 10-6
ar	17.4 × 10-6
xenônio	21.2 × 10-6

Líquidos (à 20 ℃):

	viscosidade (Pa·s)
álcool etílico	0.248 × 10-3
acetona	0.326 × 10-3
metanol	0.597 × 10-3
álcool propílico	2.256 × 10-3
benzeno	0.64 × 10-3
água	1.0030 × 10-3
nitrobenzeno	2.0 × 10-3
mercúrio	17.0 × 10-3
ácido sulfúrico	30 × 10-3
óleo de oliva	81 × 10-3
óleo de castor	0.985
glicerol	1.485
polímero derretido	103
piche	107
vidro	1040

Reologia

A **reologia** é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido.

A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida, e a única que caracteriza os fluidos newtonianos.

Reologia e seus Segredos

Definição

É o ramo da física que estuda a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria, ou seja, um estudo das mudanças na forma e no fluxo de um material, englobando todas estas variantes. Podemos então concluir que é a ciência responsável pelos estudos do fluxo e deformações decorrentes deste fluxo, envolvendo a fricção do fluido.

Esta fricção ocorre internamente no material, onde uma camada de fluido possui uma certa resistência ao se deslocar sobre outra. Tudo isto envolve uma complexidade de fatores. O tamanho e geometria de cadeia é um exemplo possível. Enquanto temos os solventes que possuem uma viscosidade desprezível, temos também as resinas, com uma viscosidade elevada, graças ao tamanho de sua cadeia polimerizada. Ambos são compostos orgânicos, mas seus comportamentos são totalmente diferentes.

Viscosidade Aparente: É aquela medida em um único ponto e através de cisalhamento constante. É expressa por unidades de Poise ou centiPoise (mPa/s). Utilizada na leitura de viscosidade de fluidos pseudo-plásticos. Viscosímetros: Brookfield, Haake.

Viscosidade Cinemática: é aquela medida por um sistema de geometria que utiliza-se da gravidade para sua obtenção de medida. Medida por copos, tem como método a contagem, através de um cronômetro, do tempo gasto para o fluido escorrer pelo orifício inferior destes copos.

Viscosidade Absoluta: é aquela que é medida por um sistema de geometria que não sofre influência da gravidade para a obtenção desta medida.

Teoria

Os fluidos respeitam a conservação de massa, quantidade de movimento ou momentum linear e momentum angular, de energia, e de entropia. A conservação de quantidade de movimento é expressa pelas equações de Navier Stokes. Estas equações são deduzidas a partir de um balanço de forças/quantidade de movimento a um volume infinitesimal de fluido, também denominado de elemento representativo de volume.

Atualmente, o estudo, análise e compreensão da fenomenologia da maior parte dos problemas em dinâmica de fluidos e em transferência de calor, as macro-áreas que compõem a dinâmica de fluidos, são desenvolvidos através da Modelagem Computacional. Nesta, um modelo matemático é desenvolvido, com base na fenomenologia do problema considerado. A partir deste modelo, geralmente um sistema de equações diferenciais parciais ou equações diferenciais ordinárias, é desenvolvido um modelo computacional ou utilizado um código computacional comercial, para a execução de simulações numéricas, obtendo-se assim projeções temporais da solução do problema. Esta solução é condicionado pelas condições iniciais e condições de contorno do problema, que estabelecem as condições de evolução deste no tempo e no espaço.

A **Teoria do Contínuo** fundamenta a conceituação teórica que justifica a maior parte das análise em CFD. O fluido, um meio contínuo, é discretizado com base no modelo das partículas fluidas. Esta abstração conceitua um elemento representativo de volume, ou representative element of volume, REV. Neste elemento de volume, de micro ou nano dimensões, uma propriedade ou quantidade física mantem um valor médio, sob as mesmas condições, passível de reprodução em laboratório, sob as mesmas solicitações externas ao fluido. Assim uma partícula representativa de um volume de fluido, o REV, é o menor volume em que as propriedades do fluido se mantém. As moléculas de um contínuo vibram constantemente, cessando esta vibração somente no estado de repouso termodinâmico, o zero absoluto. Fisicamente em um REV o caminho médio percorrido pelas moléculas do fluido entre duas sucessivas é no mínimo da ordem de grandeza das próprias moléculas deste fluido.

Leis de Newton

As **leis de Newton** são como conhecidas as leis que modelam o comportamento de corpos em movimento, criadas por Isaac Newton.

História

Isaac Newton publicou essas leis em 1687, no seu trabalho de três volumes intitulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. As leis explicavam vários dos resultados observados quanto ao movimento de objetos físicos.

Newton também demonstrou em seu trabalho como as três leis, combinadas com a sua lei da gravitação universal, conseguiam explicar as consagradas Leis de Kepler sobre o movimento planetário. Essa demonstração foi a maior evidência a favor de sua teoria.

Formulação Original

A forma original na qual as leis foram escritas é a seguinte:

Lex I: *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.*

(Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.)

Lex II: *Mutationem motis proportionalem esse vi motrici impressae, etfieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

(A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.)

Lex III *Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sine corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.*

(A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.)

Princípio da Inércia

Primeira Lei de Newton ou Princípio da Inércia A partir das idéias de inércia de Galileu, Isaac Newton enunciou sua Primeira Lei com as palavras:

"Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas a ele."

A primeira lei de Newton pode parecer perda de tempo, uma vez que esse enunciado pode ser deduzido da Segunda Lei:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Se $\mathbf{F} = 0$, existem duas opções: Ou a massa do corpo é zero ou sua aceleração.

Obviamente como o corpo existe, ele tem massa, logo sua aceleração é que é zero, e consequentemente, sua velocidade é constante.

No entanto, o verdadeiro potencial da primeira lei aparece no quando se envolve o problema dos referenciais. Numa reformulação mais precisa:

"Se um corpo está em equilíbrio, isto é, a resultante das forças que agem sobre ele é nula, é possível encontrar ao menos um referencial, denominado inercial, para o qual este corpo está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme"

Essa reformulação melhora muito a utilidade da primeira lei de Newton. Para exemplificar tomemos um carro. Enquanto o carro faz uma curva, os passageiros têm a impressão de estarem sendo "jogados" para fora da curva. É o que chamamos de força centrífuga. Se os passageiros possuírem algum conhecimento de Física tentarão explicar o fenômeno com uma força. No entanto, se pararem para refletir, verão que tal força é muito suspeita. Primeiro: ela produz acelerações iguais em corpos de massas diferentes. Segundo: não existe lugar nenhum onde a reação dessa força esteja aplicada, contrariando a 3ª Lei de Newton. Como explicar a misteriosa força?

O erro dos passageiros foi simples. Eles não escolheram um referencial inercial.
Logo, obviamente as leis de Newton falhariam, pois estas só valem nestes referenciais. Se um referencial inercial fosse escolhido, como um observador do lado de fora do carro, nada de anormal seria visto, apenas os passageiros tentando manter sua trajetória em linha reta e o **carro** forçandos-os a virar. quem estava sob ação de forças era o carro.

Muitas outros exemplos existem de forças misteriosas que ocorrem por tomarmos referenciais não-inerciais, podemos citar, além da força centrifuga, as forças denominadas de Einstein, e a força de Coriolis.

Então é importante lembrar: A principal utilidade da primeira lei de Newton é estabelecer um referencial com o qual possamos trabalhar.

Princípio da física (dinâmica) enunciado pela primeira vez por Galileu Galilei e desenvolvido mais tarde por Isaac Newton, que descreve o movimento dos corpos desprezando o efeito do atrito. Pode ser formulado da seguinte forma:

Se um corpo se deslocar em linha recta com uma certa velocidade, continuará indefinidamente em movimento na mesma direcção e com a mesma velocidade se nenhuma força agir sobre ele.

A grande novidade deste princípio foi reconhecer pela primeira vez que o atrito é uma força a que todos os corpos estão sujeitos, excepto se se deslocam no vácuo, contrariando frontalmente as teorias de Aristóteles.

O principio da inércia explica o que acontece para que os copos e pratos sobre uma toalha possam continuar sobre a mesa se a toalha for puxada abruptamente. Entendemos que os pratos copos e talheres estejam em repouso sobre a mesa, estes vão permanecer eternamente em repouso até que algo aconteça para movê-los de lá. Com o puxão da toalha de maneira correta, não se consegue imprimir força suficiente para que os corpos entrem em movimento, então eles permanecem em seus lugares. O mesmo efeito pode ser observado quando estamos em pé dentro de um coletivo (trem, metrô ou ônibus) e este começa a se mover. Nosso corpo tende a "ir para trás" em relação ao ônibus, mas em relação ao chão, nosso corpo simplesmente tentará permanecer parado.

O princípio da inércia nasceu em experiências com bolas metálicas descendo por um plano inclinado, passando depois por uma superfície horizontal e finalmente subindo um outro plano inclinado. Ao diminuir a inclinação deste último, sucessivamente, Galileu notou que a esfera percorria distâncias cada vez maiores, atingindo quase a mesma altura. Inferiu então que, na ausência de atrito, se a inclinação do último plano fosse nula, ou seja, ele fosse horizontal, a esfera rolaria indefinadamente. Dessa forma Galileu mostrou a necessidade de se ir além da experiência, para buscar as leis mais gerais do movimento.

Segunda Lei de Newton (Lei Fundamental do Movimento)

Introdução

De acordo com o princípio da inércia, se a resultante das forças actuantes num corpo for nula, o corpo mantém, por inércia, a sua velocidade constante, ou seja não sofre aceleração. Logo a força consiste num agente físico capaz de produzir aceleração, alterando o estado de repouso ou de movimento dos corpos.

A Lei

Quando uma força resultante actua sobre uma partícula, esta adquire uma aceleração na mesma direcção e sentido da força, segundo um referencial inercial. A relação, neste caso, entre a causa (força resultante) e o efeito (aceleração) constitui o objetivo principal da Segunda Lei de Newton, cujo enunciado pode ser simplificado assim:

A resultante das forças que agem num corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração adquirida pelo mesmo.

Isso significa que, sendo a massa do corpo constante, a força resultante e aceleração produzida possuem intensidades directamente proporcionais.

Resumindo: O segundo princípio consiste em que todo corpo em repouso precisa de uma força para se movimentar e todo corpo em movimento precisa de uma força para

parar. O corpo adquire a velocidade e sentido de acordo com a força aplicada.
Ou seja, quanto mais intensa for a força resultante, maior será a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante aplicada a um corpo é directamente proporcional ao produto entre a sua massa inercial e a aceleração adquirida pelo mesmo $\vec{F} = m\vec{a}$.

Se a força resultante for nula (F = 0) o corpo estará em repouso (equilíbrio estático) ou em movimento retilíneo uniforme (equilíbrio dinâmico). A força poderá ser medida em Newton se a massa for medida em kg e a aceleração em m/s² pelo Sistema Internacional de Unidades de medidas (S.I).

A **Terceira Lei de Newton** também é conhecida como *Lei da Ação e Reação*.

Se um corpo A aplicar uma força sobre um corpo B, receberá deste uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto à força que A aplicou em B.

As forças de ação e reação têm as seguintes características:

-Estão associadas a uma única interação, ou seja, correspondem às forças trocadas entre apenas dois corpos;

-Têm sempre a mesma natureza (ambas de contato ou ambas de campo), logo, possuem o mesmo nome ("de contato" ou "de campo");

É indiferente atribuir a acção a cada uma das forças e a reacção à outra. Estas forças são caracterizadas por terem:

• a mesma direcção
• a mesma linha de acção
• sentidos opostos
• a mesma intensidade
• aplicadas em corpos diferentes, logo não se anulam

"Para cada ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade."

ANÁLISE DIMENSIONAL E TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES

ANÁLISE DIMENSIONAL

Grandezas Físicas

As **grandezas físicas** são as peças com as quais as leis físicas são montadas, isto é, para que as leis físicas possam ser expressas é necessário utilizar conceitos denominados grandezas físicas. Estas grandezas físicas devem possuir padrões e unidades, bem estabelecidos, para que as leis físicas possuam coerência.

Para atender aos requisitos físicos as grandezas físicas básicas devem ser bem definidas, isto é, suas definições devem ser precisas e claras. As grandezas físicas estão divididas em **grandezas fundamentais** e **grandezas derivadas**.

As **grandezas fundamentais** não podem ser definidas em função de outras grandezas, e são: **comprimento, ângulo, tempo, massa, diferença de temperatura e carga elétrica**.

As **grandezas derivadas** são definidas em função de grandezas fundamentais e ou outras grandezas derivadas, e são exemplos: força, velocidade, aceleração, densidade, suscetibilidade magnética, velocidade angular, torque, etc.

As grandezas físicas devem possuir unidades, e estas por sua vez são estabelecidas em função dos processos operacionais utilizados para fazer a medição de cada grandeza, em laboratório ou simplesmente no dia a dia. Desta forma em cada região da Terra foram desenvolvidas formas diferentes de fazer a medição de cada grandeza, originando unidades diferentes em cada região, o que estabeleceu diferentes sistemas de unidades. Embora, ainda hoje, continuem diversos sistemas de unidades em uso, houve uma tentativa criar se um sistema que todos utilizassem, que foi denominado **Sistema Internacional de Unidades** (**S.I.**), adotado por um grande número de países, entre os quais o Brasil, sendo adotado como **Sistema Legal de Unidades** do Brasil a partir da 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, realizada em outubro de 1960. As unidades das grandezas fundamentais são respectivamente: comprimento em metro (m), ângulo em radianos (rad) (embora seja usual utilizar graus$(^\circ)$), tempo (intervalo) em segundos (s), massa em quilogramas (kg), diferença de temperatura em Kelvin (K) e carga elétrica em Coulomb (C).

Obs.: A escala de diferenças de temperatura em Kelvin inicia com $0\,K$ (zero absoluto) a uma temperatura de $-273{,}16\,^\circ C$ da escala graus Celsius, cujo zero de escala $(0\,^\circ C)$ é a temperatura normal da fusão do gelo. Note-se ainda que o intervalo de $1K = 1\,^\circ C$. Desta forma é normal usar $^\circ C$ na prática, ao invés de K.

Análise dimensional

Cada grandeza física possui, além da unidade, uma dimensão. Estas dimensões são baseadas naquelas das grandezas fundamentais, isto é, comprimento $[L]$, massa $[M]$, tempo $[T]$ e carga elétrica $[Q]$. Note-se que diferença de temperatura e ângulo são grandezas adimensionais. Encontrar a dimensão de uma grandeza física é denominado **análise dimensional**.

Exemplo: Força é dado pela lei física $F = ma$ onde F representa a força, m a massa e a a aceleração, portanto a dimensão de F deve ser $\left[MLT^{-2}\right]$ pois a massa m possui a dimensão $[M]$ e a aceleração, que é corresponde à segunda derivada do espaço percorrido (comprimento) no tempo, isto é, $a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d\,v}{d\,t} = \frac{d}{d\,t}\left(\frac{d\,x}{d\,t}\right) = \frac{d^2x}{d\,t^2}$, onde v é a velocidade e $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{d\,x}{d\,t}$, possui a dimensão $\left[LT^{-2}\right]$. Assim, como a unidade de força no S.I. é Newton, dimensionalmente $1N$ corresponde a $\frac{(1kg)\cdot(1m)}{(1s)^2}$, isto é, $1N = 1\frac{kg \cdot m}{s^2}$.

Grandeza	Símbolo	Dimensões	Unidades
Comprimento (distância)	$\ell \ (s)$	L	$m \ (metro)$
Massa	m	M	$kg \ (qui\,log\,rama)$
Tempo (intervalo)	t	T	$s \ (segundo)$
Carga Elétrica	q	Q	$C \ (coulomb)$
Temperatura (diferença)	q	-	$K \ (kelvin)$
Ângulo (deslocamento angular)	θ	-	$rad \ (radiano)$
Área (superfície)	$A \ (S)$	L^2	m^2
Volume	V	L^3	m^3
Velocidade	v	LT^{-1}	m/s
Aceleração	a	LT^{-2}	m/s^2
Velocidade (freqüência) angular	ω	T^{-1}	rad/s
Aceleração angular	α	T^{-2}	rad/s^2
Massa específica (densidade)	ρ	ML^{-3}	kg/m^3
Quantidade de movimento	p	MLT^{-1}	$(kg \cdot m)/s$
Elongação (mola)	d	L	m
Raio (círculo, esfera)	r	L	m
Comprimento de onda	λ	L	m

Força	F	MLT^{-2}	$N=(kg\cdot m)/s^2 \quad (newton)$
Energia total	E	ML^2T^{-2}	$J=(kg\cdot m^2)/s^2 \quad (joule)$
Energia cinética	K	ML^2T^{-2}	$J=(kg\cdot m^2)/s^2$
Energia potencial (interna)	U	ML^2T^{-2}	$J=(kg\cdot m^2)/s^2$
Trabalho	W	ML^2T^{-2}	$J=(kg\cdot m^2)/s^2$
Calor	Q	ML^2T^{-2}	$J=(kg\cdot m^2)/s^2$
Torque (momento de uma força)	τ	ML^2T^{-2}	$N\cdot m=(kg\cdot m^2)/s^2$
Entropia	S	ML^2T^{-2}	$J/K=(kg\cdot m^2)/(s^2\cdot K)$
Freqüência	f	T^{-1}	$ciclos/s$
Aceleração gravitacional (Campo)	g	LT^{-2}	$N/kg=m/s^2$
Potencial gravitacional	V	L^2T^{-2}	$J/kg=m^2/s^2$
Potência	P	ML^2T^{-3}	$W=(kg\cdot m^2)/s^3 \quad (watt)$
Período	T	T	s
Pressão	p	$ML^{-1}T^{-2}$	$P=N/m^2 \quad (pascal)$ $P=kg/(m\cdot s^2) \quad (pascal)$
Momento de inércia	I	ML^2	$kg\cdot m^2$
Diferença de potencial elétrico	V	$ML^2T^{-2}Q^{-1}$	$V=(kg\cdot m^2)/(C\cdot s^2)(volt)$
Força eletromotriz	ε	$ML^2T^{-2}Q^{-1}$	$V=(kg\cdot m^2)/(C\cdot s^2)$

Transformação de unidades

Quando é necessário transformar uma unidade em outra, deve-se dividir esta pela unidade que deve desaparecer e multiplicar pelo valor correspondente daquela que irá substituir a primeira, ou seja , se uma unidade K vale a uma unidades P, isto é, $K=a\,P$, e b unidades K devem ser transformados para a unidade P, então procede-se como segue:

$$b\,K=b\left(K\cdot\frac{a\,P}{K}\right)=b\,(a\,P)=(b\cdot a)\,P$$

Exemplo: Um veículo está a $60\,km/h$, qual é sua velocidade no Sistema Internacional, S.I.?

$$v=60\,\frac{km}{h}=60\,\frac{km}{h}\cdot\frac{10^3\,m}{km}\cdot\frac{h}{3600\,s}=60\cdot\frac{10^3\,m}{3600\,s}=\frac{1}{6}\times10^2\;m/s=1{,}67\times10^2\;m/s\,.$$

Exercício: Uma caixa com volume de $30\,cm^3$, contém uma massa de $120\,gr$ qual é a densidade correspondente no Sistema Internacional, S.I.?

$$\rho = \frac{120\,gr}{30\,cm^3} = 4\cdot\frac{gr}{cm^3}\cdot\frac{(1\,cm)^3}{(10^{-2}\,m)^3}\cdot\frac{10^{-3}\,kg}{1\,gr} = 4\cdot\frac{10^{-3}\,kg}{10^{-6}\,m^3} = \frac{4}{10^{-3}}\,kg/m^3 = 4\times10^3\,kg/m^3\,.$$

Exercício: Uma roda gira a $1200\,rpm$ qual é a velocidade angular correspondente no Sistema Internacional, S.I.?

$$\omega = 1200\,rpm = 1200\cdot\frac{rotações}{min}\cdot\frac{2\pi\,rad}{1\,rotação}\cdot\frac{1\,min}{60\,s} = 1200\cdot\frac{2\pi\,rad}{60\,s} = 40\pi\,rad/s\,.$$

Exercício: O submarino ALVIN está mergulhando com velocidade de 36,5 braças por minuto.

a - Sabendo que $1\,fath\,(braça) = 6\,ft\,(pés)$ e $1m = 3{,}28\,feet\,(ft)$, expresse esta velocidade no sistema internacional S.I.

solução:

$$36{,}5\,\frac{braças}{min} = \left(36{,}5\,\frac{1\,braça}{1\,min}\right)\cdot\left(\frac{1\,min}{60\,s}\right)\cdot\left(\frac{6\cdot(1\,ft)}{1\,braça}\right)\cdot\left(\frac{1\,m}{3{,}28\cdot(1\,ft)}\right) = 1{,}11\,m/s$$

b - Sabendo que $1\,milha\,(mi) = 5280\,ft\,(pés)$, expresse esta velocidade em milhas por hora, isto é, em nós.

solução:

$$36{,}5\,\frac{braças}{min} = \left(36{,}5\,\frac{1\,braça}{1\,min}\right)\cdot\left(\frac{60\cdot(1\,min)}{1\,h}\right)\cdot\left(\frac{6\cdot(1\,ft)}{1\,braça}\right)\cdot\left(\frac{1\,mi}{3{,}28\cdot(1\,ft)}\right) = 2{,}49\,nós$$

Exercício: Quantos centímetros quadrados tem uma área de $6{,}0\,km^2$?

solução:

$$6{,}0\,km^2 = (6\,\cancel{km}\cdot\cancel{km})\cdot\left(\frac{1000\,m}{1\,\cancel{km}}\right)\cdot\left(\frac{1000\,m}{1\,\cancel{km}}\right)\cdot\left(\frac{100\,cm}{1\,\cancel{m}}\right)\cdot\left(\frac{100\,cm}{1\,\cancel{m}}\right) = 6{,}0\times10^{10}\,cm^2$$

Exercício: Qual deve ser a dimensão de k para que a relação $2\vec{F}\cdot\vec{r} = kx^2$ seja homogênea? Onde: $\vec{F}$ é força e $[F] = MLT^{-2}$; r é distância e $[r] = L$. e x é comprimento e $[x] = L$.

Solução:

$$[F\,r] = (MLT^{-2})\cdot(L) = ML^2T^{-2} \text{ e } 2F\,r = kx^2 \;\Rightarrow\; k = \frac{2F\,r}{x^2} \;\Rightarrow\; [k] = \left(\frac{ML^2T^{-2}}{L^2}\right) = MT^{-2}$$

Resposta: $[k] = MT^{-2}$.

HIDROSTÁTICA

A **hidrostática**, também chamada fluidostática (hidrostática refere-se a água, que foi o primeiro fluido a ser estudado, assim por razões históricas mantém-se o nome) é a parte da física que estuda as forças exercidas por e sobre fluidos em repouso.

É o ramo da Física que estuda as propriedades relacionadas aos líquidos em equilíbrio estático; tais propriedades podem ser estendidas aos fluidos de um modo geral.

• **Fluido**: Denominamos fluidos os corpos que não têm forma própria. Quando encerrados num recipiente, os fluidos adquirem a forma do recipiente. Os líquidos e os gases são considerados fluidos.

• Os líquidos têm volume praticamente invariável. Quando se transfere água de um recipiente para outro, seu volume permanece o mesmo.

• Os gases têm volume variável, ocupando totalmente o recipiente que o contém.

• Densidade: Se tivermos um corpo de massa m e volume v, definimos sua densidade através da relação:



A unidade de densidade no Sistema Internacional de unidades é o kg/m 3 . No entanto, usualmente são utilizados o g/cm 3 e o kg/l , que são unidades equivalentes. Por exemplo, a densidade da água vale: d = 1 000 kg/m 3 = 1 kg/l = 1 g/cm 3 .

Se o corpo for homogêneo, pode-se usar o termo massa específica ou densidade absoluta como sinônimo de densidade.

ATENÇÃO: Visto que a densidade absoluta d de um corpo de massa m depende do volume v, devemos lembrar que alterações de temperatura provocam variações no volume, modificando dessa forma a densidade.

O volume dos sólidos e dos líquidos pode ser alterado de forma sensível devido a variações de temperatura, o que ocasiona mudanças em sua densidade. No caso de gases, seu volume fica sujeito às variações de temperatura e pressão existentes; portanto, sempre que nos referimos à densidade de um gás, deveremos citar quais as condições de pressão e temperatura que nos levaram ao valor obtido.

• **Densidade Relativa:**

Dadas duas substâncias A e B, de densidades absolutas d A e d B , respectivamente, definimos densidade da substância A em relação à substância B (d A,B) através da relação:



Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Observe que o resultado final não pode apresentar unidades, ou seja, a grandeza densidade relativa é adimensional e constitui uma forma de compararmos a densidade de duas substâncias distintas.

Importante

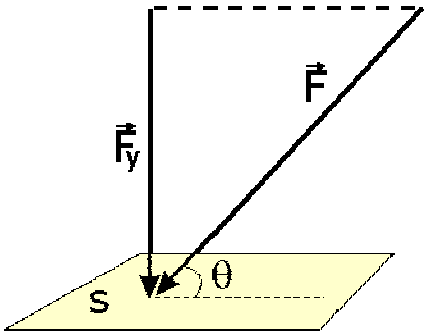
Densidade e densidade absoluta são grandezas físicas diferentes. Observe que podemos obter qualquer das duas grandezas utilizando a fórmula acima, porém, só teremos a densidade absoluta ou massa específica se o corpo em questão for maciço e homogêneo, de outra forma, o que estaremos obtendo é uma característica do corpo chamada densidade.

- Massa específica ou densidade absoluta: característica da substância que compõe o corpo.

- Densidade: caracteristica do corpo.

PRESSÃO

Pressão é uma grandeza física obtida pelo quociente entre a intensidade da força (F) e a área (S) em que a força se distribui.



$$p = \frac{\vec{F}_y}{S} = \frac{F.\text{sen}\theta}{S}$$

No caso mais simples a força (F) é perpendicular à superfície (S) e a equação fica simplificada

$$p = \frac{F}{S}$$

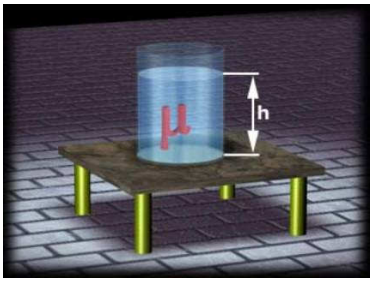
A unidade de pressão no SI é o N/m2, também chamado de Pascal.

Relação entre unidades muito usadas:

1 atm = 760 mmHg = 10(5) N/m2. (10 a quinta)

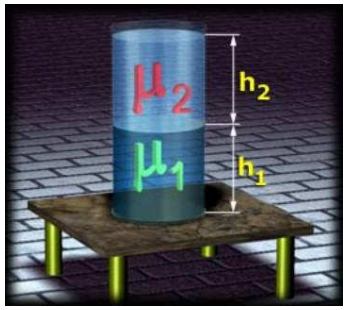
Pressão de uma coluna de líquido

A pressão que um líquido de massa específica m, altura h, num local onde a aceleração da gravidade é g exerce sobre o fundo de um recipiente é chamada de pressão hidrostática e é dada pela expressão:



$$p = \mu g h$$

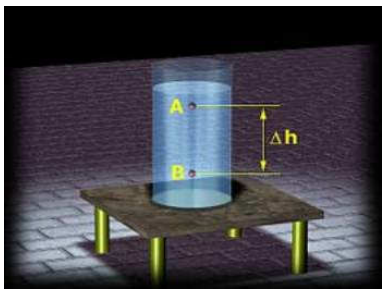
Se houver dois ou mais líquidos não miscíveis, teremos:



$$p = \mu_1 g h_1 + \mu_2 g h_2$$

Teorema de Stevin

A diferença de pressão entre dois pontos, situados em alturas diferentes, no interior de um líquido homogêneo em equilíbrio, é a pressão hidrostática exercida pela coluna líquida entre os dois pontos. Uma coseqüência imediata do teorema de Stevin é que pontos situados num mesmo plano horizontal, no interior de um mesmo líquido homogêneo em quilíbrio, apresentam a mesma pressão.



$$\Delta p = \mu g \Delta h \qquad\qquad \Delta p = p_B - p_A$$

Se o ponto A estiver na superfície do líquido, a pressão em A será igual à pressão atmosférica.

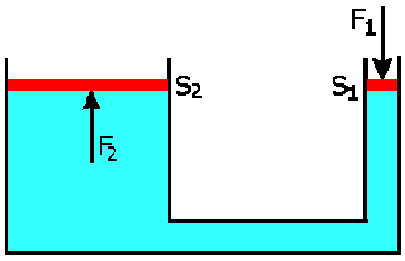
Então a pressão p em uma profundidade h é dada pela expressão:

$$p = p_{atm} + \mu g h$$

Princípio de Pascal

A pressão aplicada a um líquido em equilíbrio se transmite integralmente a todos os pontos do líquido e das paredes do recipiente que o contém.

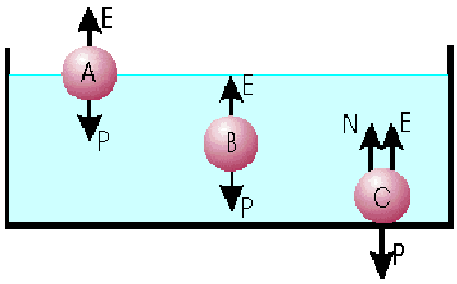
Prensa hidráulica



$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

Empuxo

Empuxo é uma força vertical, orientada de baixo para cima, cuja intensidade é igual ao peso do volume de fluido deslocado por um corpo total ou parcialmente imerso.



$$E = \mu_{líq} \cdot V_{líq} \cdot g$$

Esfera A)

E = P

A esfera A está em repouso, flutuando na superfície do líquido. Isto acontece quando a densidade do corpo é menor que a densidade absoluta do líquido e, neste caso, o empuxo recebido pelo corpo é igual ao seu peso.

Esfera B)

E = P

A esfera B está em repouso e totalmente imersa no líquido. Isto acontece quando a densidade do corpo é igual à densidade absoluta do líquido e, neste caso, o empuxo recebido pelo corpo é igual ao seu peso.

Esfera C)

E + N = P

A esfera C está em repouso, apoiada pelo fundo do recipiente. Isto acontece quando a densidade do corpo é maior que a densidade absoluta do líquido e, neste caso, o empuxo é menor que o peso do corpo.

Peso aparente

É a diferença entre o peso do corpo e o empuxo que ele sofreria quando imerso no fluido.

$$P_{ap} = P - E$$

EQUILÍBRIO DE CORPOS IMERSOS E FLUTUANTES

EMPUXO (E)

INTRODUÇÃO

Quando tentamos afundar uma bola de plástico num líquido verificamos que, quanto mais a bola afundar nele, maior será a força de resistência, isto é, maior a dificuldade oferecida pelo líquido.

Se levarmos a bola até o fundo e a soltarmos, veremos que a bola sobe rapidamente. Isto ocorre porque o líquido exerce sobre a bola uma força vertical de baixo para cima denominada *empuxo* (E). O empuxo representa a força resultante do líquido sobre a bola.

TEOREMA DE ARQUIMEDES

"Todo corpo imerso total ou parcialmente num líquido recebe uma força vertical de baixo para cima, igual ao peso da porção de líquido deslocado pelo corpo".

$$E = P_{liq.\ desl}$$

$$E = m_{liq.\ desl} \cdot g$$

$$E = d_{liq} \cdot V_{liq.\ desl} \cdot g$$

E ..... empuxo.

$P_{liq.\ desl}$ ..... peso do líquido deslocado.

$m_{liq.\ desl}$ ..... massa do líquido deslocado.

$V_{liq.\ desl}$ ..... volume do líquido deslocado.

g ..... aceleração da gravidade

$d_{liq.\ desl}$ ..... densidade do líquido deslocado

O peso **(P)** de um corpo, quando está total ou parcialmente submerso num fluido, diminui e, neste caso é chamado de *peso aparente*.

$$P_{ap} = P - E$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Vamos considerar um corpo mergulhado em um líquido. Sabemos que apenas duas forças agem sobre ele: o seu peso P e o empuxo E.

Distingem-se três casos.

1º caso: o peso é maior que o empuxo **(P > E)**

Neste caso, o corpo descerá com aceleração constante (condições idéias). Verificando-se as expressões de *P e E*, conclui-se que isso acontecerá se densidade do corpo for maior que a densidade do líquido, isto é, $d_C > d_L$.

2º caso: o peso é menor que o empuxo **(P < E).**

Neste caso, o corpo subirá com aceleração constante até ficar flutuando na superfície do líquido. Isso acontecerá quando a densidade do corpo for menor que a densidade do líquido, isto é, $d_C < d_L$.

Quando o corpo, na sua trajetória de subida, aflorar na superfície do líquido, o empuxo começará a diminuir, pois diminuirá a parte submersa e, portanto, o volume do líquido deslocado. O corpo subirá até que o empuxo fique igual ao peso do corpo, que é constante. Nessa condição (P = E) o corpo ficará em equilíbrio, flutuando no líquido.

3º caso: o peso é igual ao empuxo **(P = E)**

Neste caso, o corpo ficará em equilíbrio, qualquer que seja o ponto em que for colocado. Isto acontecerá quando a densidade do corpo for igual a densidade do líquido, isto é...

$$\mathbf{d_C = d_L}$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

CONSERVAÇÃO DE MASSA

A **Lei da Conservação das Massas** foi publicada pela primeira vez 1760, em um ensaio de Mikhail Lomonosov. No entanto, a obra não repercutiu na Europa Ocidental, cabendo ao francês Antoine Lavoisier o papel de tornar mundialmente conhecido o que hoje se chama **Lei de Lavoisier**.

Preocupado em utilizar métodos quantitativos, Lavoisier tinha a balança como um de seus principais instrumentos em atividades experimentais.

Por volta de 1774, o químico francês realizava experiências sobre a combustão e a calcinação de substâncias. Observou que, dessas reações, sempre resultavam óxidos cujo peso era maior que o das substâncias originalmente usadas.

Informado sobre as características do gás que ativava a queima de outras substâncias (que mais tarde foi denominado pelo próprio Lavoisier como *oxigênio*, que quer dizer gerador de ácidos), passou a fazer experiências com o mesmo e acabou por deduzir que a combustão e a calcinação nada mais eram que o resultado da combinação desse gás com as outras substâncias. E que a massa aumentada dos compostos resultantes correspondia à massa da substância inicialmente empregada, mais a massa do gás a ela incorporado através da reação.

Lei de Lavoisier

Os estudos experimentais realizados por Lavoisier levaram-no a concluir que, numa reação química que se processe num sistema fechado, a massa permanece constante, ou seja, a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos:

$$m_{(reagentes)} = m_{(produtos)}$$

Assim, por exemplo, quando 2 gramas de hidrogênio reagem com 16 gramas de oxigênio verifica-se a formação de 18 gramas de água; do mesmo modo, quando 12 gramas de carbono reagem com 32 gramas de oxigênio ocorre a formação de 44 gramas de gás carbônico.

Através de seus trabalhos, pôde enunciar uma lei que ficou conhecida como *Lei da Conservação das Massas* ou Lei de Lavoisier:

"Numa reação química que ocorre em sistema fechado, a massa total antes da reação é igual à massa total após a reação".

ou,

> *"Numa reação química a massa se conserva porque não ocorre criação nem destruição de átomos. Os átomos são conservados, eles apenas se rearranjam. Os agregados atômicos dos reagentes são desfeitos e novos agregados atômicos são formados".*

Ou ainda, filosoficamente falando,

"Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma".

O que hoje pode parecer evidente, nem sempre o foi. Queimando-se magnésio, cientistas anteriores a Lavoisier observavam um aumento de massa, enquanto que, queimando enxofre, notavam uma perda de massa. Coube a Lavoisier, percebendo que esses ensaios deveriam ser feitos em sistemas fechados, esclarecer que as diferenças de massas eram devidas à absorção ou liberação de gases durante as reações.

Atualmente sabemos que a lei de Lavoisier como inicialmente foi proposta nem se verifica. É possível a perda de massa no decurso de uma reacção libertando-se energia (fenômeno explicável pela teoria da relatividade). O que se deverá verificar sempre é a primeira lei da termodinâmica.

É bom frisar que, depois de Lavoisier enunciar esta lei, outros cientistas fizeram novos experimentos que visam *testar a hipótese* proposta por ele e, mesmo ao utilizarem balanças mais modernas, de grande sensibilidade, os testes confirmaram o enunciado proposto.

Quando um pedaço de ferro é abandonado ao ar, vai se "enferrujando", ou seja, vai sofrendo uma reação química. Se compararmos a massa do ferro inicial com a do ferro "enferrujado", notaremos que este último tem massa maior.

Será que neste caso a massa não se conserva?
O que acontece é que os reagentes dessa reação química são *ferro* (sólido) e material gasoso, proviniente do ar.

massa do ferro + massa dos gases (ar) = massa do ferro "enferrujado"

Como o sistema *inicial* é constituído por ferro e ar, e o sistema *final* por ferro "enferrujado", o aumento de massa efetivamente não existiu.

Por essa razão é necessário utilizarmos sistemas *fechados* para verificar a Lei de Lavoisier.

QUANTIDADE DE MOVIMENTO E ENERGIA

Que e quantidade de movimento? Quando um carro aumenta a sua velocidade, sua quantidade de movimento também aumenta. A quantidade de movimento de um corpo de pêso *P* e velocidade *v* é dada por

$\frac{P}{g} xv.$ Como $\frac{P}{g}$ é a massa do corpo, a quantidade de movimento é igual à massa do corpo multiplicada pela sua velocidade. Por exemplo, um menino de 30kg* patinando a uma velocidade de 2 metros por segundo, tem uma quantidade de movimento de

$$\frac{30kg*}{9,8m/s/s} x2m/s = 6,12kg*s$$

A Fig. 1 dá outros exemplos.

- a Terra em sua órbita	.....2,4 x 10kg*.s
- navios transatlânticos	.....4,3 x10kg*.s
- avião a jato a velocidade do som	.....17.000kg*.s
- bala de calibre 22	.....100kg*.s
- molécula de oxigênio, em média, a temperatura ambiente	.....2,6 x 10kg*.s

Fig. 1 - A quantidade de movimento de um corpo é igual a sua massa multiplicada por sua velocidade. Aqui estão algumas quantidades de movimento de vários corpos.

Um caminhão de 4 toneladas movendo-se a 5 quilômetros por hora, tem a mesma quantidade de movimento que um carro de 2 toneladas que se move a 10 quilômetros por hora.

Ao dobrar a velocidade de um corpo você dobra sua quantidade de movimento e quadruplica sua energia cinética. A quantidade de movimento é uma grandeza, como a fôrça e a velocidade, que tem direção. É uma grandeza vetorial. A quantidade de movimento pode ser positiva ou negativa. Se você, admitir que um corpo, movendo-se para leste, tem quantidade de movimento positiva, então um corpo que se move para oeste terá quantidade de movimento negativa. A energia cinética de um corpo é *sempre* positiva (ou nula).

- A quantidade de movimento não pode ser destruída. Sempre que um corpo ganha quantidade de movimento, algum outro corpo deve perder igual quantidade de movimento na mesma direção. Jogue uma bola de gude contra outra igual, em repouso. Se a segunda bola é atingida em chão, ela sai com tôda a quantidade de movimento, ficando a outra parada. Se você atinge uma bola de gôlfe com o taco, êste perde velocidade, enquanto a bola sai velozmente. A perda de quantidade de movimento do taco é igual à quantidade de movimento ganha pela bola.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Quantidade de movimento nunca é criada ou destruída. Sempre que um corpo ganha quantidade de movimento, outro corpo perde igual quantidade de movimento. Essa é a lei de conservação da quantidade de movimento. Os cientistas acreditam que existe atualmente no Universo a mesma quantidade de movimento que há um bilhão de anos.

Na Fig. 2, duas bolas de aço de igual pêso são suspensas por cordas de modo que possam colidir uma com a outra, em cheio. Se a bola vermelha fôr puxada para trás 15cm e, em seguida, sôlta, ela colidirá com a bola branca, dará a esta tôda a sua quantidade de movimento e ficará em repouso. A bola branca, então, se deslocará para a frente de aproximadamente 15cm antes de voltar e atingir a vermelha. A quantidade de movimento total das bolas branca e vermelha antes de cada colisão é igual à quantidade de movimento das duas bolas depois da colisão. Adicione um pouco de cêra à bola branca. Quando a bola vermelha atingir a cêra, as duas bolas ficarão juntas e juntas se moverão para a frente. Como seu pêso total é duas vêzes o de uma das bolas, sua velocidade, quando saírem juntas, será a metade da de uma só. Aqui, de nôvo, verifica-se que não há perda de quantidade de movimento.

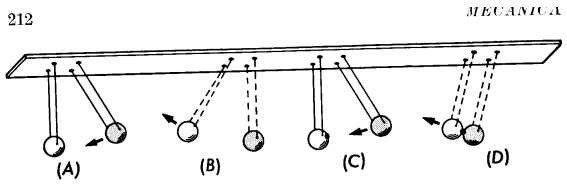


Fig. 2 - (A) A bola preta é impelida para trás e choca-se com a bola branca de pêso igual. (B) Ao parar, a bola preta transfere tôda a sua quantidade de movimento para a bola branca. A quantidade de movimento final de ambas as bolas iguala a quantidade de movimento original de ambas. (C) Põe-se um pedaço de cêra na bola branca. (D) Quando as bolas preta e branca se chocam, ficam agarradas e passam a possuir a quantidade de movimento. Assim, outra vez, nenhuma quantidade de movimento é destruída.

Quando você dá um tiro de espingarda, a quantidade de movimento para a frente, positiva, da bala, é igual à quantidade de movimento, para trás, negativa, da espingarda. A soma das duas, positiva e negativa, é nula, como era nula a quantidade de movimento antes do tiro. O tiro não produziu nenhuma quantidade de movimento. A quantidade de movimento positiva de um foguete é igual à quantidade de movimento negativa dos gases que são ejetados para trás. Nenhuma quantidade de movimento foi produzida. É impossível criar quantidade de movimento.

Exemplo: Um canhão de 10000kg* atira uma bola de 500kg* horizontalmente, do tôpo de um penhasco. Se a bala sair do canhão com uma velocidade de 600m/s, com qual velocidade recuará o canhão?
Pêso do canhão = 10000kg*
Pêso da bala = 500kg*
Velocidade da bala = 600m/s.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Ache a velocidade (*v*) do canhão.

Quantidade de movimento = $\frac{P}{g} xv.$

Quantidade de movimento para a frente da bala = Quantidade de movimento para trás do canhão;

$$\frac{500kg*}{9{,}80m/s^2} x600m/s = \frac{10000kg*}{9{,}80m/s^2} xv,$$

v = 30m/s (velocidade do caminhão para trás).

ENERGIA

Energia - Energia cinética e potencial

Energia é a capacidade de realizar trabalho.

Energia cinética está associada ao movimento do corpo (cine = movimento).

Quando a força resultante (*F*) que atua sobre o carro de massa *m* é não nula, esta imprime uma aceleração *a,* fazendo com que haja variação da velocidade do corpo. Quanto maior a velocidade do carro, maior a energia cinética.

Considerando um caminhão que tivesse a mesma velocidade do carro, mas possui maior massa, maior também será o trabalho realizado, ou seja , maior a energia cinética. Você pode observar esta situação em uma colisão do carro e do caminhão com um poste. Na colisão do caminhão com o poste, o trabalho é maior, do que o do carro com o poste. Obviamente o carro vai ficar mais danificado.

Vamos calcular o trabalho realizado por esta força quando há um deslocamento na direção (x), sobre uma superfície que não apresente atrito.

A equação da velocidade em um movimento uniformemente variado é:

$v = v_0 + a\,t \qquad a = (v - v_0) / t \qquad (1)$
e
$x = ((v + v_0) / 2)\, t \qquad (2)$

O trabalho realizado pela força F é dado como sendo o produto da força (F) pelo deslocamento (x):

T = F x

Como F = m a

T = m a x (3)

Substituindo 1 e 2 em 3, obtemos:

$T = m (v - v_0) / t ((v + v_0) / 2) t$

$T = m (v^2 - v_0^2)/2$

$T = ((m v^2/2) - (m v_0^2/2))$ (4)

A metade do produto da massa pelo quadrado da velocidade é a energia cinética (E_c) do corpo:

$E_c=(m v^2)/2$ (5)

Substituindo em (4), temos:

$T = E_{c\ (final)} - E_{c\ (inicial)}$ **(6)**

Temos que:

"O trabalho realizado pela força resultante F que desloca um corpo de uma posição para outra, é igual à variação de energia cinética".

Observe que a unidade de energia é a mesma de trabalho, ou seja no SI é o joule (J).

Exemplo: Qual o trabalho realizado pela força resultante sobre o carro da figura 8.4 em 3,0 s, considerando que o carro tem uma massa de 500,0 kg?

$T = E_{c\ (final)} - E_{c\ (inicial)}$

$E_{c\ (inicial)} = (m v_0^{2)} / 2 = 0$ J

$E_{c\ (final)} = (m v^2) / 2 = 500,0\ (15,0)^2 / 2 = (500,0\ 225,0)/2 = 56\ 250,0$ J

Substituindo em (7):

T = 56 250,0 - 0,0

T = 56 250,0 J

Energia potencial

Quando um objeto de massa m está a uma determinada altura em relação a um nível de referência, ele tem capacidade de realizar um trabalho; esta energia associada à posição que o objeto está que é denominada energia potencial gravitacional (E_p).

A energia potencial gravitacional (E_p) é calculada como sendo o produto do peso do objeto pela altura que ele está em relação a um nível de referência:

$E_p = p\ h = m\ g\ h$ **(7)**

Outro tipo de energia potencial é aquela associada à posição da mola quando ela está sendo comprimida ou esticada; esta energia potencial associada à deformação da mola é denominada energia potencial elástica ($E_{p\ elástica}$). Esta energia é calculada como sendo o produto da constante elástica (k) da mola pelo quadrado da deformação (x):

$E_{p\ elástica} = (k\ x^2)/2$ **(8)**

Não existe somente as energias potenciais gravitacional e elástica; há também as energias potenciais elétrica, química, nuclear.

Conservação da energia mecânica

A energia mecânica (E_{mec}) de um sistema é a soma da energia cinética e da energia potencial.

Quando um objeto está a uma altura h, como já foi visto, ele possui energia potencial; à medida que está caindo, desprezando a resistência do ar, a energia potencial gravitacional do objeto que ele possui no topo da trajetória vai se transformando em energia cinética e quando atinge o nível de referência a energia potencial é totalmente transformada em energia cinética (fig.1). Este é um exemplo de conservação de energia mecânica.

A energia mecânica (E_{mec}) de um sistema é a soma da energia cinética e da energia potencial.

Quando um objeto está a uma altura h, como já foi visto, ele possui energia potencial; à medida que está caindo, desprezando a resistência do ar, a energia potencial gravitacional do objeto que ele possui no topo da trajetória vai se transformando em energia cinética e quando atinge o nível de referência a energia potencial é totalmente transformada em energia cinética (fig.1). Este é um exemplo de **conservação de energia mecânica.**

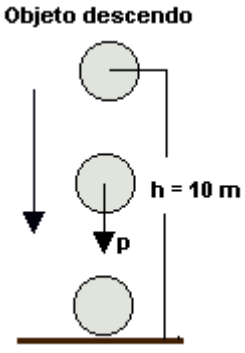


Figura 1 - Queda livre de um objeto

Na ausência de forças disssipativas, a energia mecânica total do sistema se conserva, ocorrendo transformação de energia potencial em cinética e vice-versa.
Podemos escrever:

$E_{mec} = E_p + E_c$ = constante **(9)**
onde $E_p = mgh$ e $E_c = (m\ v^2)/2$

Substituindo, obtemos:

$E_{mec} = mgh + (m v^2)/2 = constante$
ou
$E_{mec} / m = gh + v^2/2 = constante$ (10)

Exemplo: Considere que o objeto que está caindo na fig.1, posssui 10 kg de massa e está a uma altura de 10 m do nível de referência. No topo, o objeto possui uma energia potencial:

$E_{p\ (inicial)} = mgh = 10\ 9{,}8\ 10 = 980$ J (1)

e energia cinética:

$E_{c\ (inicial)}=(m v^2)/2 = 0$ J (v = 0 m/s) (2)

Quando chega ao nível de referência:

$E_{p\ (final)} = mgh = 0$ J (h = 0 m) (3)

Calculando o valor de v no nível de referência, obtemos:

v = 14 m/s

$E_{c\ (final)}= (m v^2)/2 = (10\ 14^2) / 2 = 980$ J (4)

De (1) e (2, obtemos:

$E_{mec\ (inicial)} = E_{p\ (inicial)} + E_{c\ (inicial)}= 980$ J

E de (3) e (4):

$E_{mec\ (final)} = E_{p\ (finall)} + E_{c\ (finall)}= 980$ J

Portanto obtivemos a conservação da energia mecânica do sistema:

$E_{mec\ (inicial)} = E_{mec\ (final)} = 980$ J

Para qualquer posição que fosse calculada a energia mecânica do sistema, esta permanece constante.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA DO PETRÓLEO

Formação, acumulação e prospecção do petróleo e do gás natural

O termo petróleo, a rigor, envolve todas as misturas naturais de compostos de carbono e hidrogênio, os denominados hidrocarbonetos, incluindo o óleo e o gás natural, embora seja também empregado para designar apenas os compostos líquidos.

O petróleo é formado em depressões da crosta terrestre após o acúmulo de sedimentos trazidos pelos rios das partes mais elevadas, ao seu redor, em ambiente aquoso. A imagem mais facilmente compreensível depressões, ou bacias sedimentares, dessas uma bacia sedimentar é a de uma ampla depressão coberta de água, seja um lago ou um mar que sofre rebaixamento contínuo no tempo geológico.

Dentre diversas teorias existentes para explicar a origem do petróleo, a mais aceita, atualmente, é a de sua origem orgânica, ou seja, tanto o petróleo como o gás natural, são combustíveis fósseis, da mesma forma que o carvão. Sua origem se dá a partir de matéria orgânica, animal e vegetal (principalmente algas), soterrada pouco a pouco por sedimentos caídos no fundo de antigos mares ou lagos, em condições de ausência de oxigênio, que, se ali existisse, poderia destruí-los por oxidação. Entretanto, mesmo assim a matéria orgânica desses tecidos passou por drásticas modificações, graças à temperatura e à pressão causada pelo soterramento prolongado, de modo que praticamente só restaram o carbono e o hidrogênio, que, sob condições adequadas, combinaram-se para formar o petróleo ou gás.

A grande diferença entre a formação do carvão mineral e dos hidrocarbonetos e a matéria-prima, ou seja, principalmente material lenhoso para o carvão e algas para os hidrocarbonetos, o que é definido justamente pelo ambiente de sedimentação. Normalmente, o petróleo e o gás coexistem, porém, dependendo das condições de pressão e temperatura, haverá maior quantidade de um ou de outro.

Para que grandes quantidades de petróleo se formem, é necessária a presença de três fatores: vida exuberante, contínua deposição de sedimentos, principalmente argilas, concomitante com a queda de seres mortos ao fundo da bacia e, finalmente, o rebaixamento progressivo desse fundo, para que possam ser acumulados mais sedimentos e mais matéria orgânica sobre o material já depositado.

Em Geologia, o tempo desempenha um papel importantíssimo. As condições acima descritas têm que perdurar por milhões de anos, e a própria transformação da matéria orgânica original em petróleo demanda outros milhões de anos, para que a temperatura e a pressão atuantes na crosta, além do tempo, possam interagir na formação do petróleo.

O petróleo e o gás, entretanto, não é encontrado nas rochas em que se formou. Durante o longo processo de sua formação, ocorre sua expulsão da chamada rocha geradora, formada por sedimentos finos que consistem de folhelhos, argilitos, sal, etc, que é

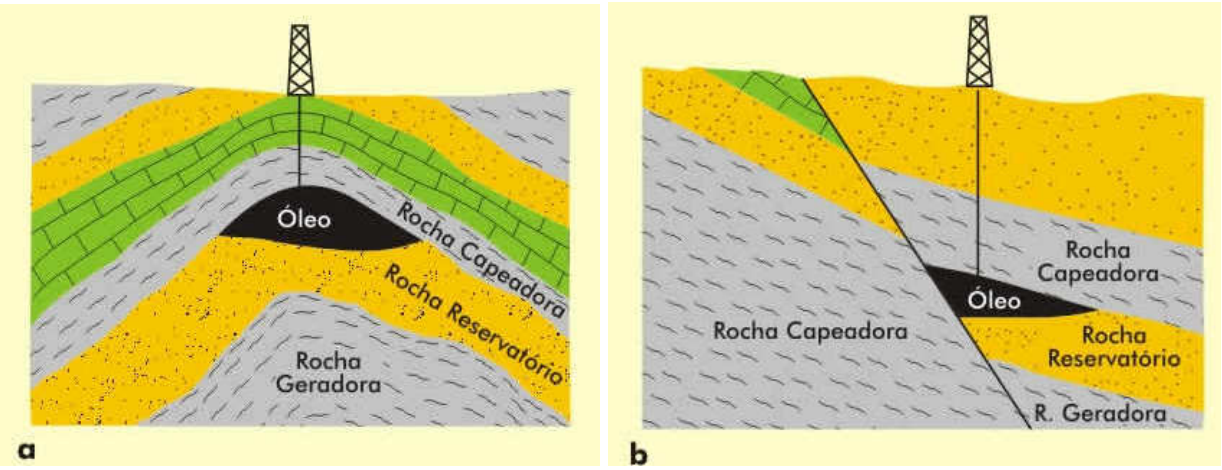
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

praticamente impermeável, para rochas porosas e permeáveis adjacentes (acima, abaixo ou ao lado), formadas normalmente por arenitos. Dessa maneira, o petróleo permanece sob altíssima pressão nas rochas porosas, denominadas rochas reservatório, até que seja eventualmente alcançado pela perfuração de um poço.

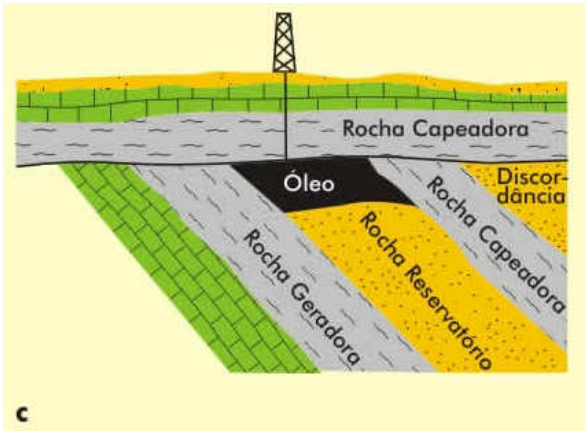
De um modo geral, a fase exploratória mais dispendiosa é a da perfuração de poços. A decisão de perfurá-los é antecedida de extensa programação e elaboração de estudos, que permitam um conhecimento tão detalhado quanto possível das condições geológicas presentes na região, tanto na superfície como em subsuperfície. As perfurações se orientarão, assim, para as áreas que tenham, de fato, as maiores possibilidades de conter acumulações de óleo ou gás.

Para localizar o petróleo ou gás numa bacia sedimentar, os especialistas firmam-se em dois princípios fundamentais: 1) o petróleo se aloja numa estrutura localizada na parte mais alta de um compartimento de rocha porosa, isolada por camadas impermeáveis.

Essa estrutura é denominada armadilha ou trapa (veja na figura abaixo); 2) essas estruturas são resultantes de modificações sofridas pelas rochas ao longo do tempo geológico, especialmente a sua deformação, através do desenvolvimento de dobras e falhas na crosta terrestre.



Os diversos estágios da pesquisa petrolífera orientam-se por fundamentos de duas ciências: a Geologia e a Geofísica.



Geologia do Petróleo

A aplicação da Geologia à pesquisa do petróleo e gás natural é de extrema importância, porque essa ciência explica o porque da ocorrência do hidrocarboneto em determina localidade. Explica também sua origem, a que tipo de rocha se associa e quais os eventos geológicos responsáveis pela formação de uma jazida economicamente aproveitável. Após minuciosos estudos geológicos é que se pode saber se há ou não conveniência na aplicação de grandes capitais destinados à procura e exploração do petróleo.

O geólogo especializado nessa área de atuação participa em todas as fases da pesquisa. Faz o reconhecimento da bacia sedimentar, localiza e estuda as estruturas mais potenciais ao acúmulo de petróleo ou gás e presta assessoria ao geofísico, com informações geológicas, necessárias à interpretação dos resultados sísmicos.

O geólogo do petróleo coordena, no campo, o conjunto de profissionais envolvidos nos trabalhos de exploração, supervisiona todas as fases do processo de pesquisa, mantém-se presente durante a perfuração do poço pioneiro, examina as amostras coletadas, verifica e elabora os testes pertinentes a cada indício de óleo em profundidades diferentes, que vão sendo atingidas através da perfuração. Após a consumação do poço pioneiro, o geólogo continua se fazendo presente junto ao agrupamento, até que seja demarcado definitivamente o campo de petróleo encontrado.

Um aspecto relevante na participação do geólogo do petróleo está no cuidado com o meio ambiente. Trata-se de um profissional que recebe, em sua formação, uma base muito bem fundamentada, relativa à questão ambiental. No campo, as equipes sob sua coordenação recebem as mais completas orientações no sentido de se manter uma convivência adequada e harmoniosa com o meio ambiente, recolhendo os rejeitos dos produtos utilizados, e preservando as espécies animais e vegetais presentes na região em que se desenvolvem os trabalhos.

Natureza e Origem do Petróleo

O Petróleo é uma substância viscosa, mais leve que a água, composta por grandes quantidades de Carbono e Hidrogênio (hidrocarboneto) e quantidades bem menores de Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre.

A natureza complexa do Petróleo é resultado de mais de 1200 combinações diferentes de hidrocarbonetos.

Ele pode ocorrer nos estados:

- Sólido - Asfalto
- Líquido - Óleo crú
- Gasoso - Gás natural

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O Petróleo é formado pelo processo decomposição de matéria orgânica, restos vegetais, algas, alguns tipos de plâncton e restos de animais marinhos - ocorrido durante centenas de milhões de anos da história geológica da Terra.

CONDIÇÕES PARA FORMAÇÃO DO PETRÓLEO:

- Inicialmente deve haver a matéria orgânica adequada à geração do Petróleo
- Este material orgânico deve ser preservado da ação de bactérias aeróbias
- O material orgânico depositado não deve ser movimentado por longos períodos
- A matéria orgânica em decomposição por bactérias anaeróbias deve sofrer a ação de temperatura e pressão por períodos longos

O início do processo de formação do Petróleo está relacionado com o início da decomposição dos primeiros vegetais que surgiram na Terra.

A maioria dos compostos identificados no petróleo são de origem orgânica, mas até que que a matéria chegue ao estado de petróleo são necessárias condições especiais. O ambiente marinho reúne tais condições.

No ambiente marinho é a *plataforma continental* a região que mais produz matéria orgânica. Os mares rasos também podem receber um grande aporte de matéria orgânica.

Embora semelhante ao carvão quanto à composição (hidrocarboneto) o petróleo possui certas características especiais: por ser fluido pode migrar para a além de sua fonte geradora e acumular-se em estruturas sedimentares. O Petróleo ocorre normalmente em rochas sedimentares depositadas sob condições marinhas.

As primeiras plantas apareceram a 400 milhões de anos, no período Devoniano, entretanto o primeiro grande desenvolvimento dessa flora deu origem aos depósitos de carvão do Período carbonífero. A principal fonte de matéria orgânica antes do período Devoniano deve ter sido de origem marinha.

Do período Pré-Cambriano até o Devoniano o maior produtor de matéria orgânica foi o fitoplâncton, que ao morrer se depositou no fundo dos oceanos, tornando-se parte dos sedimentos e formando os folhetos ricos em matéria orgânica.

Ao longo da história houve dois momentos de produção máxima de fitoplancton:

- Ordoviciano Þ Siluriano - 500 a 400 milhões de anos,
- Jurássico Þ Cretáceo -195 a 65 milhões de anos.

Estes dois períodos coincidiram com a elevação do nível dos mares, inundando grandes depressões territoriais, em que o fitoplâncton se desenvolveu associado a nutrientes marinhos. Ao morrer em ambiente anaeróbio formou leitos ricos em matéria orgânica, por isso são denominados rochas-fonte.

As rochas-fonte normalmente são folhedos e contém cerca de 90 % da matéria orgânica presente nos sedimentos. O maior volume de rochas-fonte são do período Jurássico-Cretáceo, períodos responsáveis por mais de 70% dos recursos mundiais de petróleo.

Do período Paleozóico, que não apresenta grandes diferenças em termos de abundância de fitoplâncton em relação ao Jurássico-Cretáceo, o nível de óleo crú é bem menor.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Pode-se dizer também que o petróleo tem uma origem mista devido a decomposição de matéria orgânica de origem animal e vegetal. O ambiente adequado para a formação do petróleo necessita condições de manutenção de vida intensa e posteriormente, elementos de proteção contra oxidação e a destruição bacteriana.

Os seres mais comuns encontrados nestes sedimentos são foraminíferos, pequenos crustáceos, partes de animais maiores. Entre os vegetais cita-se os dinoflagelados e as diatomáceas. A lama resultante dessa sedimentação é denominada SAPROPEL, cuja principal matéria prima são as substâncias graxosas (sapropelitos=formação de hidrocarboneto)

Denomina-se maturação a conversão de matéria orgânica em petróleo. Este processo pode ser dividido em três etapas:

- **Diagênese:** Logo após a deposição tem início a decomposição bioquímica da matéria orgânica, gerando o metano biogênico. Com o aumento de pressão e temperatura a matéria orgânica é convertida em em querogêno - matéria orgânica amorfa com C, H e O

- **Catagênese:** com o aumento da pressão o querogêno se altera e a maioria do óleo cru é formado. Durante essa fase as moléculas maiores irão se dividir em moléculas menores e mais simples - craqueamento.

- **Metagênese:** no estágio final de formação do querogêneo e do óleo cru produz-se gás natural, principalmente na forma de metano e o carbono residual é deixado na rocha-fonte.

A principal fonte de óleo cru é o fitoplâncton, mas também estão presentes restos de plantas terrestres, bactérias e zooplâncton. Dos três tipos de querogênio já identificados, cada qual produz diferentes compostos durante a maturação, com respectivas variações em C/H ou O/C.

A formação de petróleo e gás natural não depende apenas da composição da matéria orgânica original, mas também do aumento de temperatura, isto é, do gradiente geotérmico.

O petróleo é formado a partir do querogênio. Quando as temperaturas estão em torno de 50 ºC as quantidades formadas são muito pequenas, aumentando, sem apresentar alteração estrutural, em torno de 100 ºC. Mas ao atingir 150 ºC ocorre o craqueamento, mesmo que o aquecimento dê por um curto período.

O primeiro gás a ser produzido contém compostos entre C_4 -C_{10} , chamando de gás úmido (wet gas), mas com o aumento de temperatura e consequentemente o craqueamento, é gerado C_1 - C_3 - gasoso, dito gás seco (dry gas).

Em essência, o fator mais importante para a geração de petróleo é o gradiente geotérmico que pode variar de bacia para bacia sedimentar. As rochas-fonte que se localizam em zonas rasas não geram petróleo.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Além do gradiente geotérmico, o tempo também é fator importante na formação de petróleo. Assume-se que diferentes volumes de petróleo seriam gerados de rochas-fonte similares se elas estiverem sujeitas a mesma temperatura, mas em intervalos de tempo diferentes.

Considera-se que as rochas-fonte sujeitas a temperaturas de 50 ^{o}C por 30 Milhões de anos não seriam suficientemente aquecidas para gerar petróleo, mas sim somente "metano biogênico". Já as rochas aquecidas por um período similar a 190 ^{o}C poderiam gerar gás natural.

Devido a variações no gradiente geotérmico, profundidade e duração do soterramento pode haver variações de bacia sedimentar no tempo decorrido para gerar petróleo.

Bacias Sedimentares

As rochas sedimentares são derivadas de restos e detritos de outras rochas pré-existentes. O intemperismo faz com que as rochas Magmáticas, Metamórficas ou Sedimentares estejam constantemente sendo alteradas. O material resultante é transportado pela água, vento ou gelo e finalmente depositado como um sedimento. Deve haver então, uma compactação ou cimentação do material para ele se transformar em uma rocha sedimentar.

O Brasil possui 6.430.000 km^2 de bacias sedimentares, dos quais 4.880.000 km^2 em terra e 1.550.000 km^2 em plataforma continental. No entanto, para a formação de petróleo é necessário que as bacias tenham sido formadas em condições muito específicas. Normalmente, são áreas em que sucessões espessas de sedimentos marinhos foram soterrados à grandes profundidades.

A maioria dos hidrocarbonetos explorados no mundo inteiro provêm de rochas sedimentares. Em termos de idade, praticamente 60% provêm de sedimentos cenozóicos, pouco mais de 25% de depósitos mesozóicos e cerca de 15% de sedimentos paleozóicos. No Brasil, a maior parte da produção está ligada a sedimentos mesozóicos.

Existem dois tipos de bacias petrolíferas:

Onshore - Ocorre quando a bacia encontram-se em terra. São originadas de antigas bacias sedimentares marinhas;

Offshore - Ocorre quando a bacia está na plataforma continental ou ao longo da margem continental.

A maioria das bacias petrolíferas brasileiras encontram-se *offshore*. A exploração de petróleo *onshore* é muito reduzida no Brasil, devido ao baixo potencial de nossas bacias em terra.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Migração e Reservatórios

Chamamos de **migração** o caminho que o petróleo faz do ponto onde foi gerado até onde será acumulado. Devido a alta pressão e temperatura, os hidrocarbonetos são expelidos das rochas geradoras, e migram para as rochas adjacentes . A partir da migração é que o petróleo terá chances de se acumular em um reservatório e formar reservas de interesse econômico.

A migração ocorre em dois estágios:

- Migração primária: movimentação dos hidrocarbonetos do interior das rochas fontes e para fora destas;
- Migração secundária: em direção e para o interior das rochas reservatórios.

A próxima etapa é a **acumulação**. Devidos a falhas estruturais no subsolo, ou então devido a variações nas propriedades físicas das rochas, o processo de migração é interrompido e os hidrocarbonetos vão se acumulando nas rochas reservatórios.

As rochas reservatórios devem ser porosas e permeáveis, pois o petróleo pode ser encontrado nos espaços existentes nestas rochas, e ele só poderá ser extraído se a rocha for permeável. A rocha, ou conjunto de rochas que deverá ser capaz de aprisionar o petróleo após sua formação, evitando que ele escape, são as **armadilhas**.

Derivados do Petróleo

Todos **derivados do petróleo** passam por uns processos básicos de refinação que e um destilação atmosférica e a vácuo conhecida pela maioria como destilação fracionada.

Onde os produtos derivados de petróleo são divididos em em diversos categorias como:

- Lubrificantes à Através da betuminosa os Óleos: minarais, graxos, sintéticos;
- Combustíveis à Gasolina, Óleo diesel, Óleo combustível, Querosene de aviação, Gáses Naturais.
- Insumos para petroquímica: Nafta, Gasóleo.
- Outros: Solventes, Asfalto, Coque, Parafinas.

Armadilhas do Petróleo

Também conhecidas por trapas, são estruturas geológicas que permitem a acumulação de óleo ou gás. É a rocha ou conjunto de rochas que deverá ser capaz de aprisionar o petróleo após sua formação, evitando que ele escape.

A armadilha ideal deve apresentar:

1. Rochas-reservatório adequadas, ou seja, porosidade entre 15% e 30%

2. Condições favoráveis para a migração do petróleo das rochas fonte para as rochas-reservatório (Permeabilidade das rochas).

3. Um selante adequado para evitar a fuga do petróleo para a superfície.

Podem existir bacias sedimentares com rocha fonte sem petróleo, se não havia armadilha para armazenar o petróleo gerado. Veja os tipos de armadilha petrleo.

Tipos de armadilhas:

Estruturais **-** É a forma mais comum de acumulação de petróleo. Ocorre em regiões em que a crosta esteve sujeita a compressão horizontal.

Estratigráfica - Essas armadilhas ocorrem em regiões em que a crosta esteve sujeita a compressão vertical.

Combinadas - É quando temos uma combinação dos dois tipos anteriores, ou seja, estruturais e estratigráficas

PROSPECÇÃO DE PETRÓLEO

O ponto de partida na busca do petróleo é a exploração que realiza os estudos preliminares para a localização de uma jazida. Para identificar o petróleo nos poros das rochas e decidir a melhor forma de extraí-lo das grandes profundidades na terra e no mar, o homem utiliza os conhecimentos de duas ciências: a Geologia e a Geofísica.

A Geologia realiza estudos na superfície que permitem um exame detalhado das camadas de rochas onde possa haver acumulação de petróleo. A Geofísica, mediante o emprego de certos princípios da física, faz uma verdadeira radiografia do subsolo.

Um dos métodos mais utilizados por essa ciência é o da sísmica, que compreende verdadeiros terremotos artificiais, provocados, quase sempre, por meio de explosivos, produzindo ondas que se chocam contra a crosta terrestre e voltam a superfície, sendo captadas por instrumentos que registram determinadas informações sobre o subsolo.

Após o conhecimento adquirido por essas duas ciências, os pesquisadores montam um painel de conhecimentos sobre a espessura, profundidade e comportamento das camadas das rochas sedimentares que é o refúgio do petróleo e do gás. Esses conhecimentos levam à definição do melhor ponto para que possa haver a perfuração do solo, embora ainda não seja possível nesta fase afirmar com segurança se há petróleo no subsolo.

O Que é Geofísica?

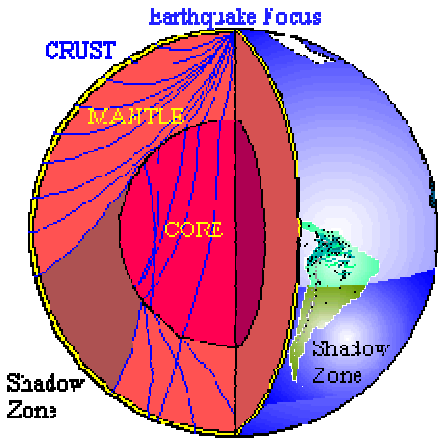
Geofísica é o estudo da Terra usando medidas físicas tomadas na sua superfície. Nem sempre é fácil estabelecer uma fronteira entre **Geologia** e **Geofísica**. A diferença fica, primariamente, no tipo de dados com os quais se manipula.

A **Geologia** envolve o estudo da Terra através de observações diretas de rochas que estão expostas na superfície ou de amostras retiradas de poços perfurados com esta finalidade e a conseqüente dedução de sua estrutura, composição e história geológica pela análise de tais observações.

A **Geofísica**, por outro lado, envolve o estudo daquelas partes profundas da Terra que não podemos ver através de observações diretas, medindo suas propriedades físicas com instrumentos sofisticados e apropriados, geralmente colocados na superfície. Também inclui a interpretação dessas medidas para se obter informações úteis sobre a estrutura e sobre a composição daquelas zonas inacessíveis de grandes profundidades.

A distinção entre estas duas linhas de ciências da Terra não é muito bem percebida. Perfís de Poços, por exemplo, são largamente usados em estudos geológicos, embora eles apresentem resultados meramente obtidos em observações instrumentais. O termo "Geofísica de Poço" geralmente é usado para designar tais medições.

De uma maneira geral, a **Geofísica** fornece as ferramentas para o estudo da estrutura e composição do interior da Terra. Quase tudo o que conhecemos sobre a Terra, abaixo de limitadas profundidades que os poços e as minas subterrâneas atingem, provém de observações geofísicas. A existência e as propriedades da crosta terrestre, do manto e do núcleo foram basicamente determinadas através de observações das ondas sísmicas geradas por terremotos (figura abaixo), assim como por medições das propriedades gravitacionais, magnéticas e térmicas da Terra.



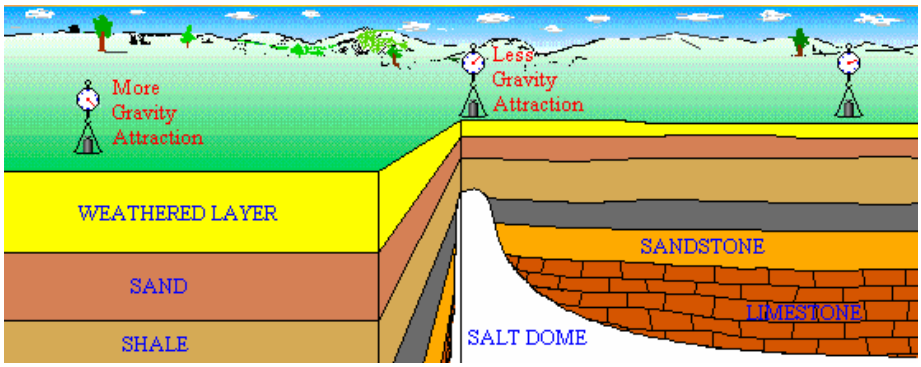
Muitas das ferramentas e técnicas desenvolvidas para tais estudos têm sido usadas na exploração de hidrocarbonetos e de minérios. Ao mesmo tempo, os métodos geofísicos usados nas aplicações de prospecção têm sido aplicados em pesquisas mais acadêmicas sobre a natureza do interior da Terra.

Dentre os diversos métodos geofísicos usados para prospecção e pesquisa, os principais são:

Gravitacional

Mede as variações do campo gravitacional terrestre provocadas por corpos rochosos dentro da crosta até poucos quilômetros de profundidade. Estas variações são influenciadas pelas diferentes densidades das rochas, tendo as mais densas, maior

influência no campo gravitacional. A figura abaixo serve para ilustrar a variação deste campo gravitacional: um mesmo corpo (massa constante) mostrará pesos diferentes para diferentes locais, se as rochas subjacentes tiverem densidades diferentes, o que normalmente acontecerá. Entretanto, estas variações são de uma magnitude muito pequena, podendo apenas serem quantificadas por aparelhos especiais, denominados gravímetros.



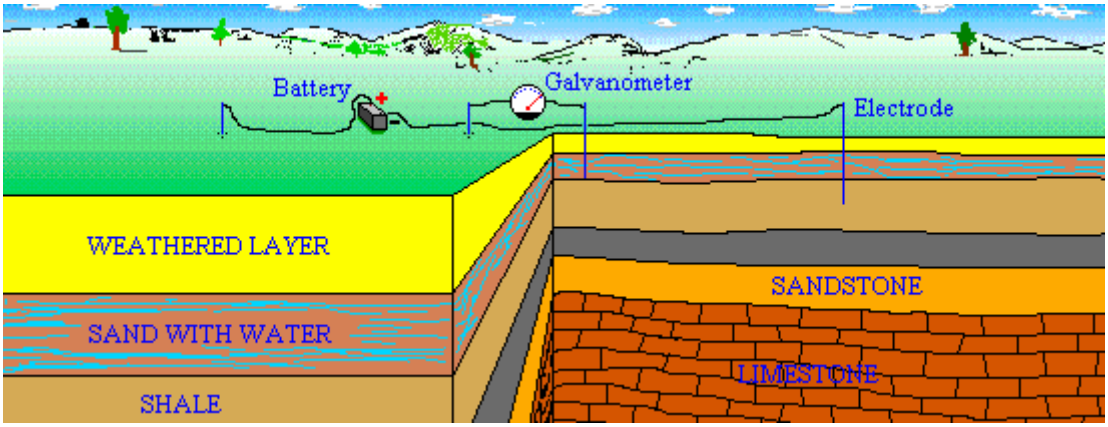
Magnético

Este método mede as variações do campo magnético da Terra, atribuídas a variações na estrutura da crosta ou na susceptibilidade magnética de certas rochas próximo à superfície. Emprega-se este método na prospecção de materiais magnéticos, como minérios de ferro, principalmente a magnetita.

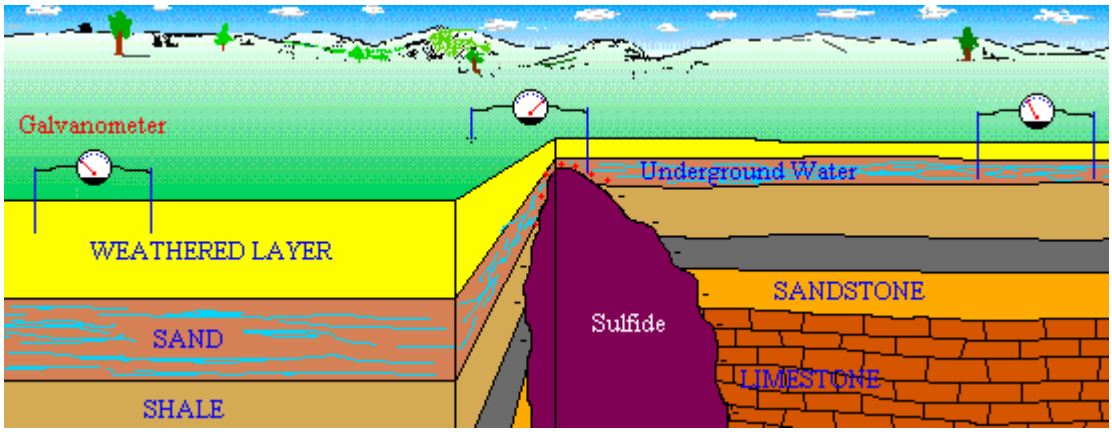
Elétricos

Os métodos elétricos fazem uso de uma grande variedade de técnicas, cada uma baseada nas diferentes propriedades elétricas e características dos materiais que compõem a crosta terrestre.

Resistividade: este método fornece informações sobre corpos rochosos que tenham condutividade elétrica anômala. É empregado pela engenharia para estudos de salinidade de lençóis de água subterrânea.



Potencial Espontâneo: é usado para detectar a presença de certos minerais que reagem com eletrólitos na subsuperfície de maneira a gerar potenciais eletroquímicos. Um corpo de sulfeto oxidado mais no seu topo do que na sua base dará origem a tais correntes elétricas, que são detectadas na superfície com o auxilio de eletrodos e galvanômetros.



Polarização Induzida: fornece leituras diagnósticas onde existem trocas iônicas na superfície de grãos metálicos, tal como acontece em sulfitos.

Magnetotelúrico: usa correntes naturais no interior da Terra e as anomalias são procuradas quando da passagem destas correntes através dos materiais. É bastante empregado na Rússia no mapeamento de bacias sedimentares no início de uma prospecção para petróleo.

Eletromagnético

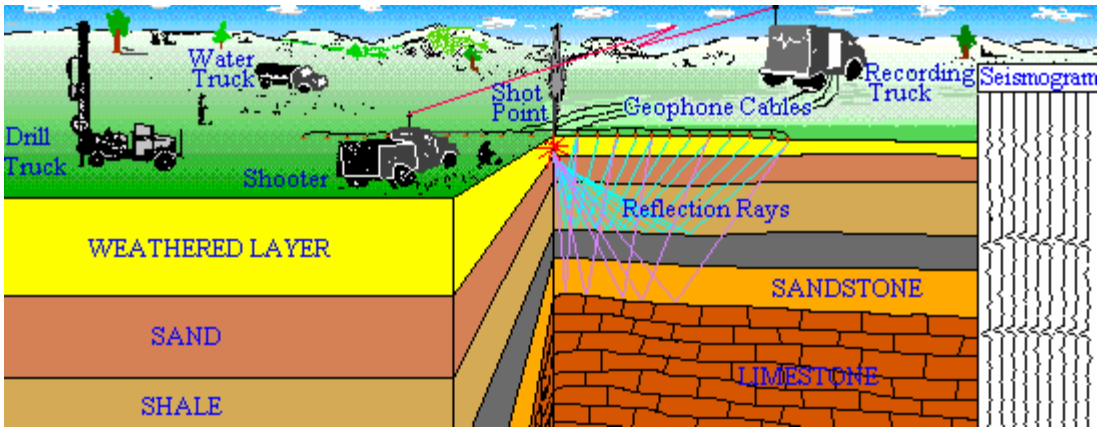
Como o nome sugere, este método baseia-se na propagação de campos eletromagnéticos de baixas freqüências que variam ao longo do tempo, de dentro para fora e de fora para dentro da Terra. Este método é mais comumente usado na prospecção mineral.

Sísmicos

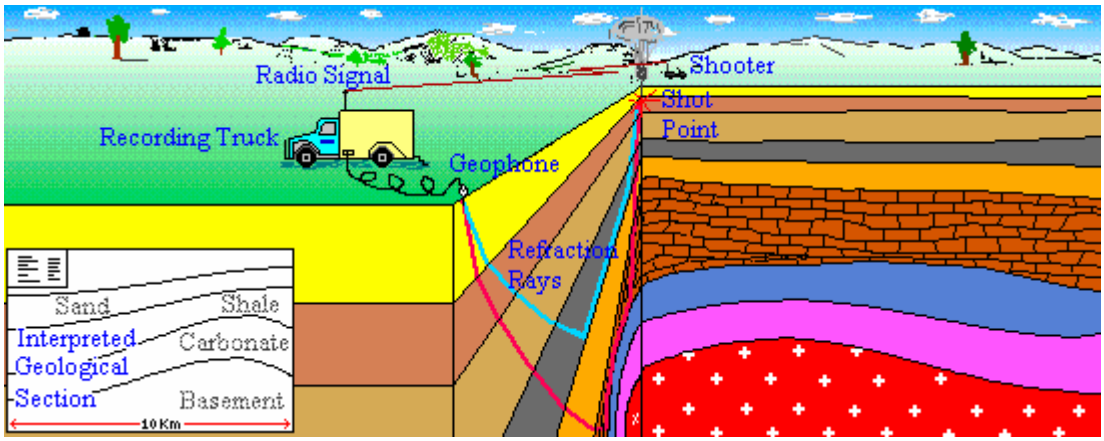
São os métodos que baseiam-se na emissão de ondas sísmicas artificiais em sub-superfície ou no mar (geradas por explosivos, ar comprimido, queda de pesos ou vibradores), captando-se os seus "ecos" depois de percorrerem determinada distância para o interior da crosta terrestre, serem refletidas e refratadas nas suas descontinuidades e então retornando à superfície. Distinguimos dois tipos de métodos sísmicos:

Reflexão: neste método, observa-se o comportamento das ondas sísmicas, após penetrarem na crosta, serem refletidas em contatos de duas camadas de diferentes propriedades elásticas e retornarem à superfície, sendo, então, detectadas por sensores (geofones ou hidrofones). É o principal método usado na prospecção de hidocarbonetos (petróleo e gás) por fornecerem detalhes da estrutura da crosta, bem como de propriedades físicas das camadas que a compõem

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

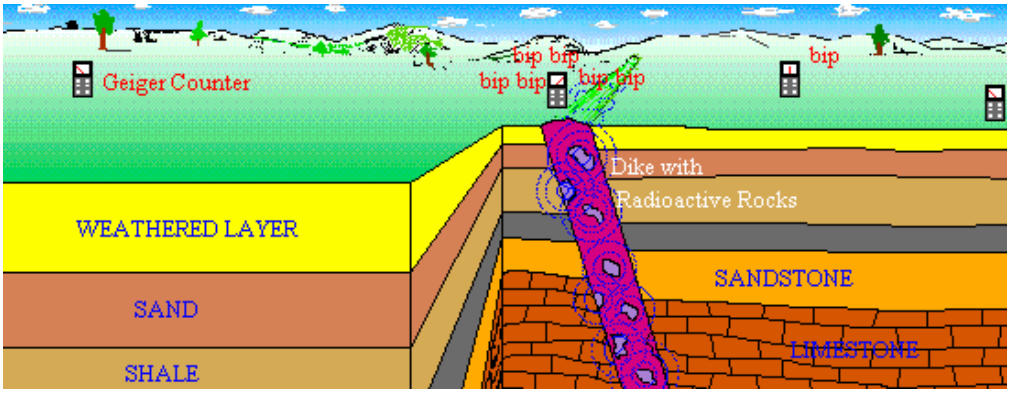


Refração: aqui as ondas sísmicas propagam-se em sub-superfície e viajam a grandes distâncias, sendo após captadas por sensores (geofones). As informações obtidas por este método geralmente são de áreas em grande escala, trazendo informações pouco detalhadas das regiões abaixo da superfície, situadas entre o ponto de detonação e o ponto de captação.



Radioativo

Este método baseia-se nas propriedades radioativas de certos minérios (minerais de urânio são bons exemplos). Através de aparelhos especiais (contadores geiger e cintilômetros) estes minérios podem ser detectados a partir da superfície da Terra.



Perfilagem de Poços

Os perfis de poços são usados principalmente na prospecção de petróleo e de água subterrânea.

Eles têm sempre como objetivo principal, a determinação da profundidade e a estimativa do volume da jazida de hidrocarboneto ou do aquífero.

Para fazer uma perfilagem em um poço, são usadas diversas ferramentas (sensores) acopladas a sofisticados aparelhos eletrônicos. Estes sensores são introduzidos poço adentro, registrando, a cada profundidade, as diversas informações relativas às características físicas das rochas e dos fluidos em seus insterstícios (poros).

As ferramentas utilizam diversas características e propriedades das rochas, que podem ser elétricas, nucleares ou acústicas. Com os sensores elétricos, detecta-se, por exemplo, a resistividade das rochas e a identificação das mesmas se dá através de comparações dos valores obtidos na perfilagem com os valores das resistividades de diversas rochas conhecidas e determinadas em testes de laboratório.

Com os sensores nucleares, detecta-se a intensidade de radioatividade das rochas e dos fluidos em seus poros, podendo-se inferir a composição mineralógica das mesmas. Com as ferramentas acústicas, ultra-sons são emitidos em uma ponta da ferramenta a intervalos regulares e detectados em sensores na outra ponta. O tempo que o sinal sonoro levou para percorrer esta distância fixa e conhecida (chamado de tempo de trânsito) através da parede do poço (ou seja, pela rocha) é medido e gravado no perfil. O geofísico, mais tarde, compara estes tempos de trânsito com os tempos determinados em laboratório para rochas de composições conhecidas, inferindo, desta maneira, as composições mineralógicas das rochas atravessadas pelo poço e determinando suas profundidades.

Tecnologia Sísmica Moderna: A Implementação dos levantamentos 4D

A tecnologia sísmica 4D abrange diversos levantamentos sísmicos de 3D efetuados durante a linha produtora de grandes campos de petróleo com o objetivo de maximizar o valor econômico em termos de redução de custos, aumento de produção, aumento na recuperação das reservas e melhoria no gerenciamento da segurança da produção.

A nomenclatura 4D é proveniente da variável tempo, ou seja, consiste em levantamentos sísmicos de 3D realizados em diferentes estágios da vida produtora do campo de petróleo. O levantamento base 3D, normalmente efetuado durante a fase de delineação ou de desenvolvimento do campo produtor, é utilizado como referência para posteriores levantamentos 3D efetuados em intervalos de tempo definidos em função da curva de produção ou depleção do campo de petróleo.

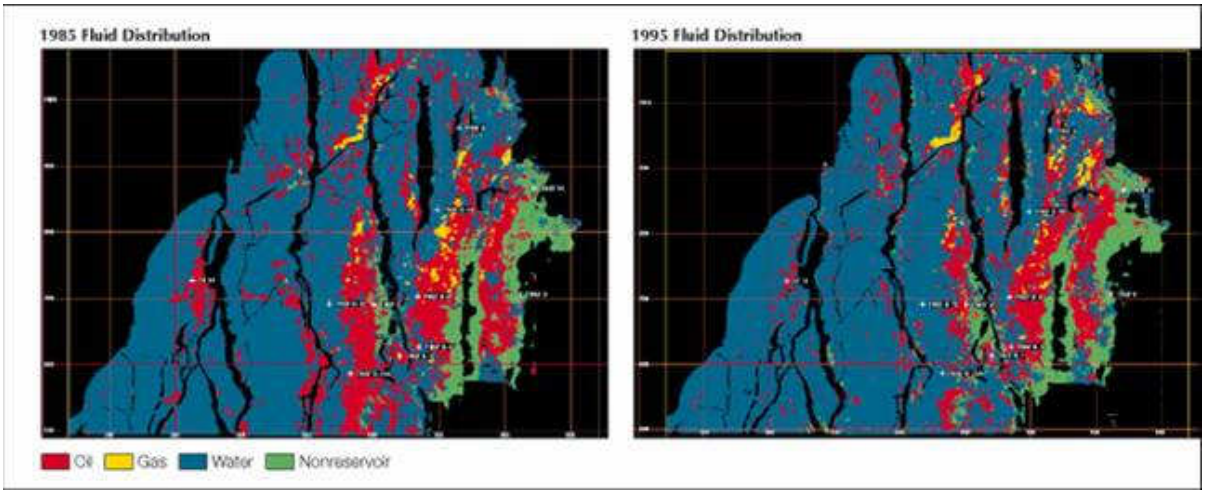
A grande aceitação do emprego da análise sísmica 4D pela indústria de petróleo é evidenciada pelo grande número de publicações recentes nas principais conferências e revistas científicas da área geofísica que testemunham casos de sucesso da aplicação da tecnologia 4D. Cabe ressaltar que as experiências bens sucedidas na região do Mar do Norte, cujos resultados, acima da expectativa e amplamente divulgados, foram fundamentais para que a tecnologia 4D fosse globalizada.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Definição dos Projetos Sísmicos de 4D

Na quase totalidade dos campos produtores de petróleo nosso conhecimento dos dados do reservatório de petróleo, de sua capacidade produtora e de seu comportamento durante a produção é geralmente incompleta. Na grande maioria dos casos, o reservatório não é muito bem conhecido, mesmo quando colocado em produção.

Existem sempre incertezas sobre as conectividades do reservatório, seus diversos compartimentos e no que concerne a invasão e gerenciamento da produção de águas. Mesmo quando a curva de produção de petróleo já é razoavelmente bem conhecida e os modelos de produção e depleção dos reservatórios amarrados ao histórico de produção de cada poço, o conhecimento continua incompleto e restrito às áreas em torno dos poços produtores e injetores. Portanto, os modelos geológicos dos reservatórios introduzidos nos simuladores de fluxo utilizados pela engenharia de petróleo podem não refletir fidedignamente características importantes de conectividade e de propriedades físicas do reservatório. Os levantamentos de 4D auxiliam a melhorar o conhecimento dos reservatórios no campo de petróleo, das propriedades físicas, da porosidade e da permeabilidade, da extensão lateral das rochas e dos fluídos, e, conseqüentemente, o gerenciamento da produção de óleo em termos de economia de escalas face os possíveis aumentos de produção e melhoria na recuperação das reservas (Fig. 1).



Implementação dos Projetos de 4D

Para a implementação de projetos de 4D vários fatores são importantes para sucesso:

- A existência de um levantamento 3D base obtido, de preferência, antes que o campo entre em produção.
- Repetição da geometria de aquisição do levantamento base. Entretanto, como isto nem sempre é possível, procura-se as melhores aproximações.
- Reprocessamento sísmico utilizando parâmetros comuns existentes entre o levantamento base e os levantamentos posteriores realizados durante a produção.
- As tecnologias modernas de 3D a serem utilizadas durante a aquisição, processamento, interpretação dos dados sísmicos e integração dos softwares modernos de modelagem na engenharia dos reservatórios.

Independente da forma utilizada para referenciar diferentes levantamentos sísmicos 3D defasados no tempo, a avaliação qualitativa e quantitativa do projeto 4D deve ser realizada através da análise das possíveis mudanças detectadas nos levantamentos 3D

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

que estão diretamente associadas a dados de produção e de simulação de produção do reservatório. Dentre as técnicas utilizadas, uma das mais promissoras é a que utiliza a análise conjunta de atributos sísmicos obtidos em cada levantamento sísmico 3D realizado ao longo do tempo, que intuitivamente, pode ser interpretada, como uma forma de análise da variação do comportamento de diferentes atributos relacionados às propriedades do reservatório ao longo do período de produção. Normalmente, a análise conjunta dos diferentes atributos sísmicos é realizada através de redes neurais.

Tecnologias de 3D no Brasil

Os esforços modernos de aquisição, processamento e interpretação de dados sísmicos no Brasil têm possibilitado um imageamento sísmico de alta qualidade de resolução dos principais reservatórios de petróleo na costa leste brasileira. Desta forma, houve uma melhoria relevante no mapeamento geofísico dos principais reservatórios de turbiditos que se encontram acima do sal nas seqüências do Terciário e do Cretáceo Superior em águas profundas.

Os levantamentos sísmicos modernos de 3D introduziram novas tecnologias como a aquisição de dados com cabos mais longos, atingindo até seis (6) a oito (8) quilômetros de extensão. Em processamento sísmico, a migração após o empilhamento, assim como, a migração pré-empilhamento, tanto em tempo (PSTM) como em profundidade (PSDM), também tem tido grande aceitação. Os levantamentos regionais de 3D adquiridos com estampa de 'foot-print' mais larga se tornaram também uma norma na costa brasileira e levaram a importantes descobertas na Bacia Norte de Campos nos últimos dois anos.

Ocorre que os investimentos em águas profundas requerem uma grande precisão na definição destes projetos devido ao grande risco econômico. Assim, devido ao elevado investimento 'up-front', o processo de definição e escolha de projetos de 3D é realizado levando em conta o risco geológico do investimento.

Uma das formas de melhorar significativamente o imageamento de turbiditos é a aplicação da mais moderna tecnologia de aquisição sísmica, a tecnologia de Q-3D, já por diversas vezes demonstrada como eficaz no Golfo do México (e.g. Mars, Diana) e que já está sendo aplicada com sucesso no Brasil.

Conclusões - A hora do 4D

Para o bom desenvolvimento e sucesso do emprego da tecnologia 4D, diferentes disciplinas da área de petróleo devem ser envolvidas, tais como a Análise Sísmica, a Análise Petrofísica e Geológica e a Engenharia de Produção, bem como a interação entre os profissionais das diferentes áreas de atuação deve ser garantida, apesar das diferenças de linguagem tradicionalmente existentes, pois deve sempre ser levado em conta o objetivo comum.

Atualmente, o Brasil está no limiar das aquisições sísmicas de 4D e podemos concluir que chegou a nossa hora dos levantamentos de 4D. Os maiores campos da Bacia de Campos serão os grandes beneficiários desta nova tecnologia, já utilizada com grande sucesso em vários importantes campos de petróleo, principalmente, no Mar do Norte (e.g. Gullfaks, Gannet, Alba, Nelson).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Considerando que estamos entrando nesta nova era com tecnologias contemporâneas de aquisição e processamento sísmico, da qual a tecnologia Q. para a aquisição de dados sísmicos é um expoente, este limiar será beneficiado pelas várias experiências anteriores e nos levará a uma nova era de compreensão do imageamento sísmico dos nossos reservatórios.

PERFURAÇÃO DE POÇOS

PERFURAÇÃO: SONDAS E PLATAFORMAS

A perfuração é a segunda etapa na busca de petróleo. Ela ocorre em locais previamente determinados pelas pesquisas geológicas e geofísicas. Para realizá-la, perfura-se um poço - o pioneiro - mediante o uso de uma sonda.

Comprovada a existência do petróleo, outros poços serão perfurados para se avaliar a extensão da jazida. Essa informação é que vai determinar se é comercialmente viável ou não, produzir o petróleo descoberto.

Caso a análise seja positiva, o número de poços perfurados forma um campo de petróleo - poço de desenvolvimento. Como o tempo de vida útil de um campo de petróleo é de cerca de 30 anos, a extração é feita de forma racional para que esse período não seja reduzido.

Para cada 100 poços exploratórios perfurados em busca de petróleo e gás natural, a Petrobras obteve no período 2003/2005 índices de sucesso maiores do que 40%, superiores à média mundial, que fica em torno de 20%.
O Brasil domina a tecnologia de perfuração submarina em águas profundas - acima de 400 metros- e ultraprofundas - acima de 2.000 metros-, sendo o recorde nacional um poço exploratório perfurado em lâmina d'água de 2.853 metros, no mar da Bacia de Campos.

SONDAS

As sondas utilizadas na perfuração de poços de petróleo são classificadas de acordo com sua utilização como terrestres ou marítimas.

Se a perfuração ocorrer em terra - conhecida como onshore -, o equipamento utilizado possui brocas que giram para romper a rocha, trazendo até a superfície o material extraído do subsolo.

As sondas de perfuração terrestres são muito semelhantes. Uma das variáveis é o transporte para chegar ao local a ser perfurado: nos de fácil acesso, é feito por estradas, enquanto que nos mais difíceis, como, por exemplo, ilhas ou florestas, há a necessidade de embarcações ou helicópteros.

O sistema de perfuração marítima, offshore, segue os mesmos moldes da terrestre, contudo, as sondas marítimas diferem entre si por se adequarem às diferentes profundidades em que atuam. Esses equipamentos são instalados em plataformas fixas, móveis ou sobre navios.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

PLATAFORMAS FIXAS

São instaladas em campos localizados em lâminas d'água de até 200 metros. Elas possuem a vantagem de serem completamente estáveis até nas piores condições do mar.

Em todo o mundo, essas plataformas utilizam, com maior freqüência, estruturas moduladas de aço - a outra opção é o concreto. A instalação dos equipamentos no local de operação é feita com estacas cravadas no solo marinho.

Estes verdadeiros "gigantes de aço" são projetados para receber todos os equipamentos de perfuração, estocagem de material, alojamento de pessoal e todas as instalações necessárias para a produção dos poços de petróleo.

PLATAFORMAS MÓVEIS

- **Auto-eleváveis:** Plataforma marítima com três ou mais pernas de tamanho variável, que pode ser posicionada em locais de diferentes profundidades, em lâminas d'água entre 5 e 130 metros - na zona situada entre a praia e o início dos abismos oceânicos.

O sistema é composto por uma balsa de casco chato e largo, triangular ou retangular, que suporta as pernas. O transporte da plataforma até o local de perfuração dos poços exploratórios é feito por rebocadores ou por propulsão própria.

Quando chegam ao local, suas pernas são arriadas lentamente, por meio de macacos hidráulicos ou elétricos, até o fundo do mar. Seu casco fica acima do nível da água, a uma altura segura e fora da ação das ondas.

- **Semi-submersíveis:** plataformas flutuantes constituídas de uma estrutura de um ou mais conveses. O apoio e feito por flutuadores submersos que sofrem movimentação devido à ação das ondas, ventos e correntezas.

Este tipo de plataforma fica situado na superfície do mar para que sofra menor impacto das condições impostas por ele. Além disso, possui um sistema de ancoragem ou de posicionamento dinâmico.

Ancoragem: esse sistema restaura o posicionamento original pela ação de 8 a 12 âncoras e cabos (e/ou correntes) fixados no fundo do mar e que funcionam como molas, produzindo esforço capaz de reagir ao efeito das ondas, ventos ou correntezas.

Posicionamento dinâmico: as plataformas que utilizam esse sistema não possuem ligação física com o fundo do mar, exceto pelos equipamentos de perfuração.

Elas possuem sensores acústicos que identificam a deriva. A restauração da sua posição flutuante é feita por propulsores presentes no seu casco, acionados por computador.

A profundidade de operação das plataformas que apresentam sistema de ancoragem é limitada, enquanto que as que utilizam o posicionamento dinâmico podem perfurar em águas de cerca de 500 metros de profundidade.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

- **Plataforma de pernas atirantadas:** unidades flutuantes que possuem estrutura semelhante à da plataforma semi-submersível. A diferença entre elas ocorre no sistema de ancoragem no fundo do mar.

A ancoragem é feita por meio de estruturas tubulares, com tendões fixos no fundo do mar por estacas e mantidos esticados pelo excesso de flutuação da plataforma. Esse sistema proporciona uma maior estabilidade da plataforma porque diminui drasticamente os seus movimentos. Com isso, as operações de perfuração e produção se assemelham às executadas em plataformas fixas.

NAVIOS-SONDA

São navios projetados para explorar poços submarinos situados em águas muito profundas. Eles possuem uma abertura no centro do casco por onde passa a coluna de perfuração.

Da mesma forma que as plataformas semi-submersíveis, os navios mais modernos são equipados com sistemas de posicionamento dinâmico. Por meio de sensores acústicos, propulsores e computadores, são anulados os efeitos do vento, ondas e correntezas, que geralmente deslocam o navio de sua posição.

A utilização dos navios-sonda em perfurações proporciona algumas vantagens em relação aos outros tipos de plataformas: grande capacidade de estocagem, perfuração de poços em qualquer profundidade e operação sem a necessidade de barcos de apoio ou de serviços.

Plataformas tipo FPSO - Os FPSOs (Floating, Production, Storage and Offloading) são navios com capacidade para processar e armazenar o petróleo, e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural. No convés do navio, é instalada um planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador de tempos em tempos.

O navio aliviador é um petroleiro que atraca na popa da FPSO para receber petróleo que foi armazenado em seus tanques e transportá-lo para terra. O gás comprimido é enviado para terra através de gasodutos e/ou reinjetado no reservatório. Os maiores FPSOs têm sua capacidade de processo em torno de 200 mil barris de petróleo por dia, com produção associada de gás de aproximadamente 2 milhões de metros cúbicos por dia.

EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO

A fase de extração do petróleo começa após a avaliação da extensão da jazida. Em cada poço é introduzida uma tubulação de aço na superfície até o fundo, chamada de revestimento.

O espaço entre as rochas perfuradas e o revestimento é preenchido com cimento para impedir a comunicação entre as várias zonas porosas que foram atravessadas pelo poço. O passo seguinte é descer o canhão pelo interior da tubulação de aço. Essa ferramenta perfura o revestimento e o cimento criando uma comunicação entre a jazida e o interior do poço.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Os fluidos que migram da rocha geradora são extraídos através de uma coluna de produção - tubulação de menor diâmetro introduzida no revestimento, enquanto que o controle da vazão espontânea desses fluidos é realizado pela árvore de natal - nome dado ao equipamento composto por um conjunto de válvulas instalado na superfície do poço.

Quando o óleo não consegue ser extraído dos poços pelos processos naturais (surgência) e artificiais (elevação artificial), é utilizada a recuperação secundária, cujo objetivo é também maximizar o volume de petróleo a ser produzido das jazidas (extraído).

Nos poços surgentes, o óleo chega à superfície espontaneamente, impelido pela pressão interna dos gases, em outros, como a pressão interna é reduzida, são necessários processos mecânicos que suprem a pressão dos gases no reservatório, isto é, eles elevam artificialmente a pressão interna dos gases.

Os processos de elevação artificial têm como objetivo maximizar o volume de petróleo a ser extraído. Os mais utilizados na indústria de petróleo são: bombeio mecânico, bombeio por cavidades progressivas, bombeio centrífugo submerso, bombeio hidráulico e elevação pneumática ou gás-lift.

A recuperação secundária pode ser realizada por técnicas tradicionais que são a injeção de água (ou de gás) ou através de técnicas mais sofisticadas, como por exemplo, a injeção de gás carbônico e de polímeros, entre outras.

Ao se descobrir petróleo, pode-se encontrar também gás natural. Isso acontece, principalmente nas bacias sedimentares brasileiras, na qual o gás aparece dissolvido no petróleo. Este duplo achado recebe o nome de gás associado ao petróleo.

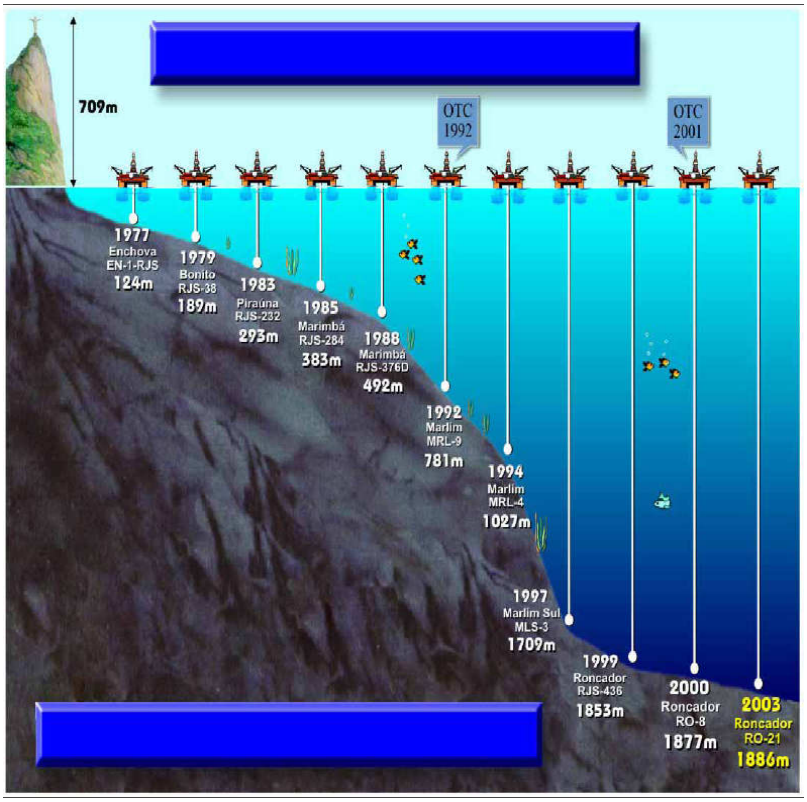
Dos campos de produção em terra ou no mar, o petróleo e o gás seguem para o parque de armazenamento, onde ficam estocados. Este parque é uma grande área na qual se encontram instalados diversos tanques que se interligam por meio de tubulações.

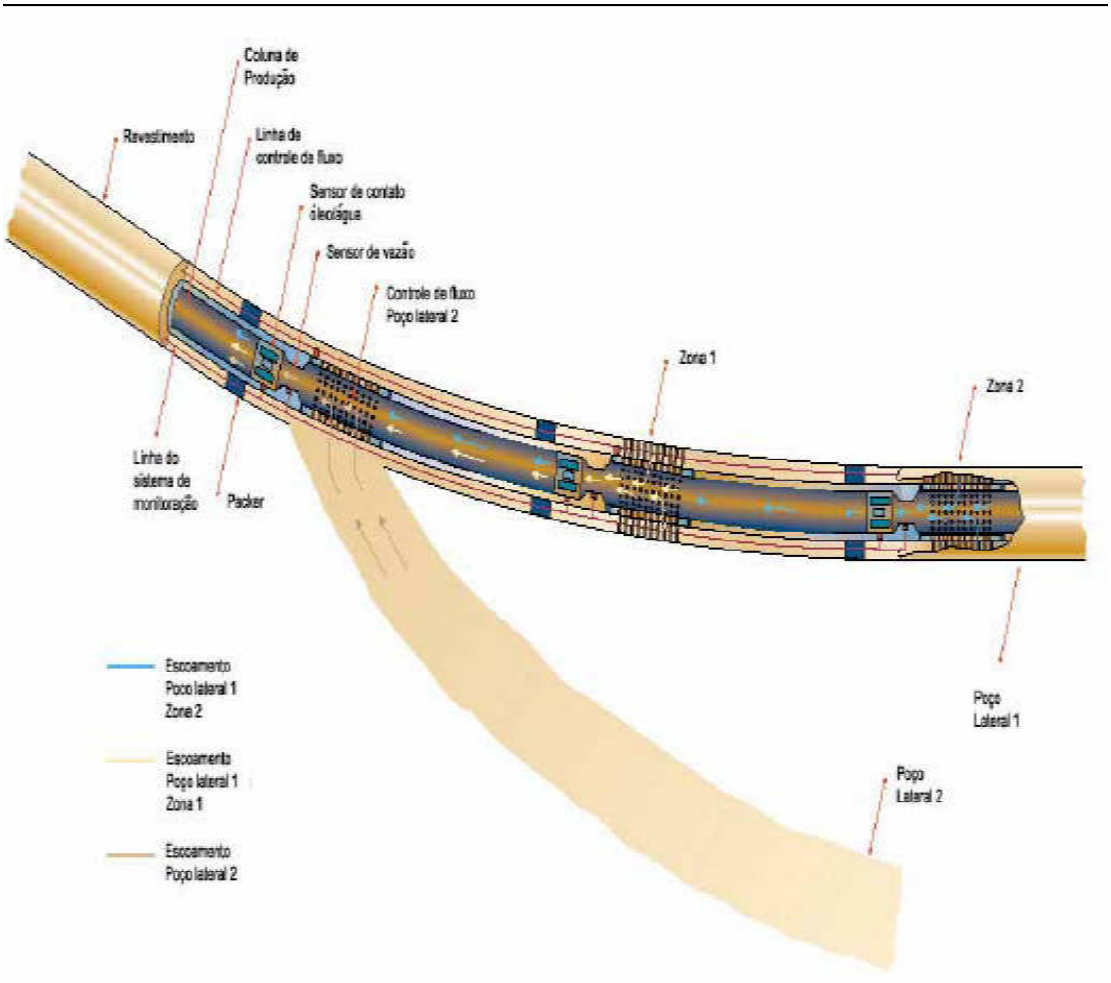
Engenharia de Poço

A construção de poços é uma das atividades mais importantes da indústria de petróleo. Entre outras, cabe a Engenharia de Poços a tarefa de perfurar, testar e equipar os poços para que esses atendam aos requisitos de exploração ou produção.

Os riscos envolvidos na construção de poços podem ser altos. Erupções descontroladas de gás ou óleo, os chamados “Blowouts”, já foram a causa de perdas de vidas humanas, destruição de plataformas e danos ao meio ambiente. Por isso, a construção de um poço é considerada uma atividade de risco e que conseqüentemente requer o desembolso de grandes somas de dinheiro.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com





Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

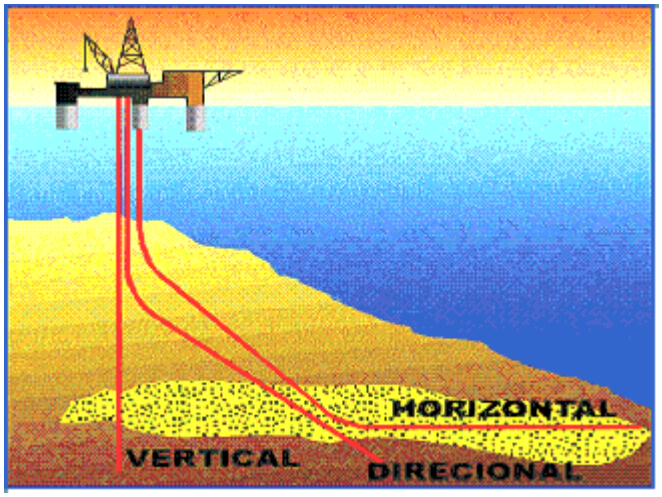
Existem várias classificações para os poços de petróleo. Dependendo da fase em que a área geográfica esteja, o poço a ser perfurado poderá ser classificado como Exploratório ou de Desenvolvimento (ou Explotatório). Por ser perfurado na fase exploratória, onde poucos dados da área geográfica estão disponíveis, o projeto de um poço exploratório pode ter características muito distintas de um projeto usado para perfurar um poço de desenvolvimento.

Os poços também podem ser terrestres (Onshore) ou marítimos (Offshore). Dependendo da profundidade de água da locação onde o poço irá ser perfurado, este pode ser classificado como sendo de água rasa (Shallow water), água profunda (Deepwater) ou água ultra-profunda (Ultra Deepwater).

Profundidade de Água (metros)	Classificação do Poço
0 até 300	Água Rasa
300 até 1500	Água Profunda
Acima de 1500	Água Ultra Profunda

Classificação dos Poços com Relação à Profundidade de Água

Como mostrado na figura abaixo, os poços podem ser classificados como verticais, direcionais e horizontais.



Classificação de Poços: Verticais, Direcionais e Horizontais

Ao terminar a perfuração de um poço, é necessário deixá-lo em condições de operar de forma segura e econômica. Ao conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir hidrocarbonetos ou injetar fluidos ns formações, denomina-se Completação.

São várias as formas de classificar a completação dos poços. Quanto ao posicionamento da cabeça do poço, isto é, se esta está localizada na superfície ou no fundo do mar, a completação pode ser classificada como seca ou molhada. A completação é classificada como sendo “A Poço Aberto”, se esta nenhum revestimento é colocado em frente da zona produtora. Por outro lado, ela é dita “A Poço Revestido” se um revestimento de produção é colocado em frente da zona produtora. Finalmente, a completação pode ser simples ou

múltipla, dependendo se a produção ocorrer de uma única zona produtora ou se for proveniente de vários intervalos produtores diferentes colocados para produzir independente de cada um.

Operação

DEFINIÇÃO BÁSICA DE OPERAÇÃO DE POÇOS

Consiste num conjunto de atividades que, uma vez observadas, permitirá o acompanhamento da vida útil do poço, tanto no que diz respeito a sua produção, quanto a eficiência do sistema constituído pelo poço propriamente dito, o aqüífero e o sistema de bombeamento.

O monitoramento de uma unidade de produção pode se dar de maneira manual ou automática, na dependência dos recursos disponíveis em termos de registro e transmissão de informações.

INFORMAÇÕES QUE DEVERÃO SER REGISTRADAS

Usualmente são objeto de registro diário, semanal, mensal ou mesmo em períodos maiores, (semestre ou ano), os seguintes parâmetros:

• Produção em m^3/hora
• Pressão na saída do poço
• Nível Estático e Dinâmico
• Nível de cloro e flúor (quando se tratar de águas de abastecimento público)
• Tempo de funcionamento dia
• Leituras de consumo de energia e dos parâmetros envolvidos (tensão, amperagem etc)
• Coleta e análise periódica de água do poço, segundo os padrões indicados pelos órgãos gestores de recursos hídricos.

PLANEJAMENTO E CONTROLE OPERACIONAL

O planejamento e controle operacional de sistemas de abastecimento de água, através de poços tubulares profundos têm por objetivos:

• Otimização do sistema, objetivando uma produção a menor custo;
• Redução de intervenções emergenciais
• Planejamento de substituições e redução do risco
• Obtenção de melhor condição de funcionamento com aumento da eficiência do sistema como um todo

Manutenção dos poços

Em vista dos parâmetros observados na operação dos poços, será possível se efetuar intervenções programadas nos poços, de tal maneira que se reduzirá os custos diretos e indiretos de tal procedimento.

Uma intervenção programada permitirá uma atuação direta na questão central do que estiver ocasionando uma perda de eficiência do sistema.
Assim, os indicadores observados no monitoramento, deverão possibilitar a intervenção

no conjunto ou parte dele, quando e onde for desejável para o usuário do sistema.
A intervenção poderá ocorrer isoladamente no poço, no conjunto de bombeamento e ainda no próprio aqüífero.

Para cada situação os indicadores obtidos e registrados durante a operação permitirá a identificação da provável causa e das soluções que poderão ser adotadas, bem como de ferramental mais adequado a cada caso.

Situações decorrentes de problemas em equipamento de bombeamento são as mais freqüentes e em nível de gravidade podem decorrer de problemas de incrustação, corrosão,
produção de areia, produção de pré filtro, assoreamento etc.
Não entraremos em detalhe neste manual sobre as principais causas e efeitos bem como sobre os métodos convencionais ou não mais utilizados nos procedimentos de manutenção, por merecerem um capítulo a parte.

Em resumo, a observação que se deve fazer é de que um poço deve ser permanentemente monitorado, assim como qualquer outra unidade de produção de água (seja fonte, tomada e estação de tratamento de água etc). O fato do poço ocupar local de pequena dimensão, acaba por fazer com o mesmo fique “escondido” dos responsáveis, e não em poucas vezes se trata de uma área que acaba “virando” espaço de guarda de materiais, inclusive alguns de alto risco para o poço e o sistema que ali funciona (caso de reservatórios de combustíveis,
defensivos agrícolas e outros).

AVALIAÇÃO DAS FORMAÇÕES

Perfilagem de poços

Os perfis de poços são usados principalmente na prospecção de petróleo e de água subterrânea. Têm sempre como objetivo principal a determinação da profundidade e das características de um reservatório com hidrocarbonetos ou um aqüífero. Para fazer a perfilagem em um poço são usadas diversas ferramentas (sensores) acopladas a sofisticados aparelhos eletrônicos. Estes sensores são introduzidos nos poços, registrando, a cada profundidade, as diversas informações relativas às características físicas das rochas e dos fluidos em seus poros. As ferramentas medem e registram propriedades que podem ser elétricas, radiativas ou acústicas. Com os sensores elétricos, por exemplo, detecta-se a condutividade (resistividade) das rochas. Este método é também conhecido como Geofísica de Poço.

Convém destacar que em função da complexidade faciológica em geral verificada em reservatórios de hidrocarbonetos, os estudos litológicos associados à avaliação de formação consistem em tarefa difícil, requerendo um minucioso trabalho de correlação rocha-perfil. Os resultados obtidos por vezes não retratam de maneira satisfatória a produção, ressaltando o grau de incerteza na quantificação de parâmetros como a porosidade efetiva e a saturação de fluidos.

O método de indução eletromagnética, para perfilagem de poços, é uma das técnicas de prospecção geofísica mais utilizadas atualmente na indústria do petróleo, pois ele proporciona a informação petrofísica necessária para o entendimento do ambiente de poço.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A perfilagem é caracterizada por descer um dispositivo de medição (chamado de ferramenta, sonda, *probe*) através de um cabo (*wireline*) dentro de um poço. Um guincho é utilizado para descer e levantar a ferramenta. As medições são transmitidas através do cabo até o equipamento de superfície. O *probe* é normalmente revestido por um invólucro de aço a prova d'água. É constituído por inúmeros componentes eletrônicos responsáveis por ligar a ferramenta, processar os dados medidos e transmitir o sinal através do cabo. O *probe* contém também alguns tipos de sensores: eletrodos, transdutores, detectores radioativos, etc. Muitas ferramentas possuem também um emissor de algum tipo (fontes radioativas, eletrodos, etc.).

A maior parte das ferramentas para perfilagem de poços de petróleo são construídas de tal maneira que se possa correr várias combinações de ferramentas de uma vez. Isto diminui o número de corridas de perfilagens a serem realizadas, salvando assim tempo de poço.

COMPLETAÇÃO DE POÇOS

Ao completar o poço para a produção, é preciso revesti-lo com tubos de aço. Coloca-se em torno dele uma camada de cimento, para impedir a penetração de fluidos indesejáveis e o desmoronamento de suas paredes. A operação seguinte é o canhoneio: um canhão especial desce pelo interior do revestimento e, acionado da superfície, provoca perfurações no aço e no cimento, abrindo furos nas zonas portadoras de óleo ou gás, permitindo o escoamento desses fluidos para o interior do poço. Outra tubulação, de menor diâmetro (coluna de produção), é introduzida no poço para conduzir os fluidos até a superfície. Instala-se na boca do poço um conjunto de válvulas conhecido como "árvore-de-natal", para controlar a produção.

Ao terminar a perfuração do poço existe a necessidade de equipá-lo para permitir uma operação econômica e segura de acordo com as premissas estabelecidas no projeto básico de construção do poço.

Denomina-se completação o conjunto de operações e atividades que têm como objetivo equipar o poço para a produção, instalando todos os acessórios e equipamentos que irão permitir a operação segura do poço de petróleo.

Apesar do termo "completação" derivar, provavelmente, do inglês *completion* e não existir na língua portuguesa formal, esta palavra descreve bem a atividade realizada nesta etapa.

Este termo é utilizado ao longo deste trabalho e consiste na **ação** de **completar** um poço de petróleo para a operação. A seqüência de etapas normalmente executada na completação de poços de petróleo *off shore* é resumida abaixo:

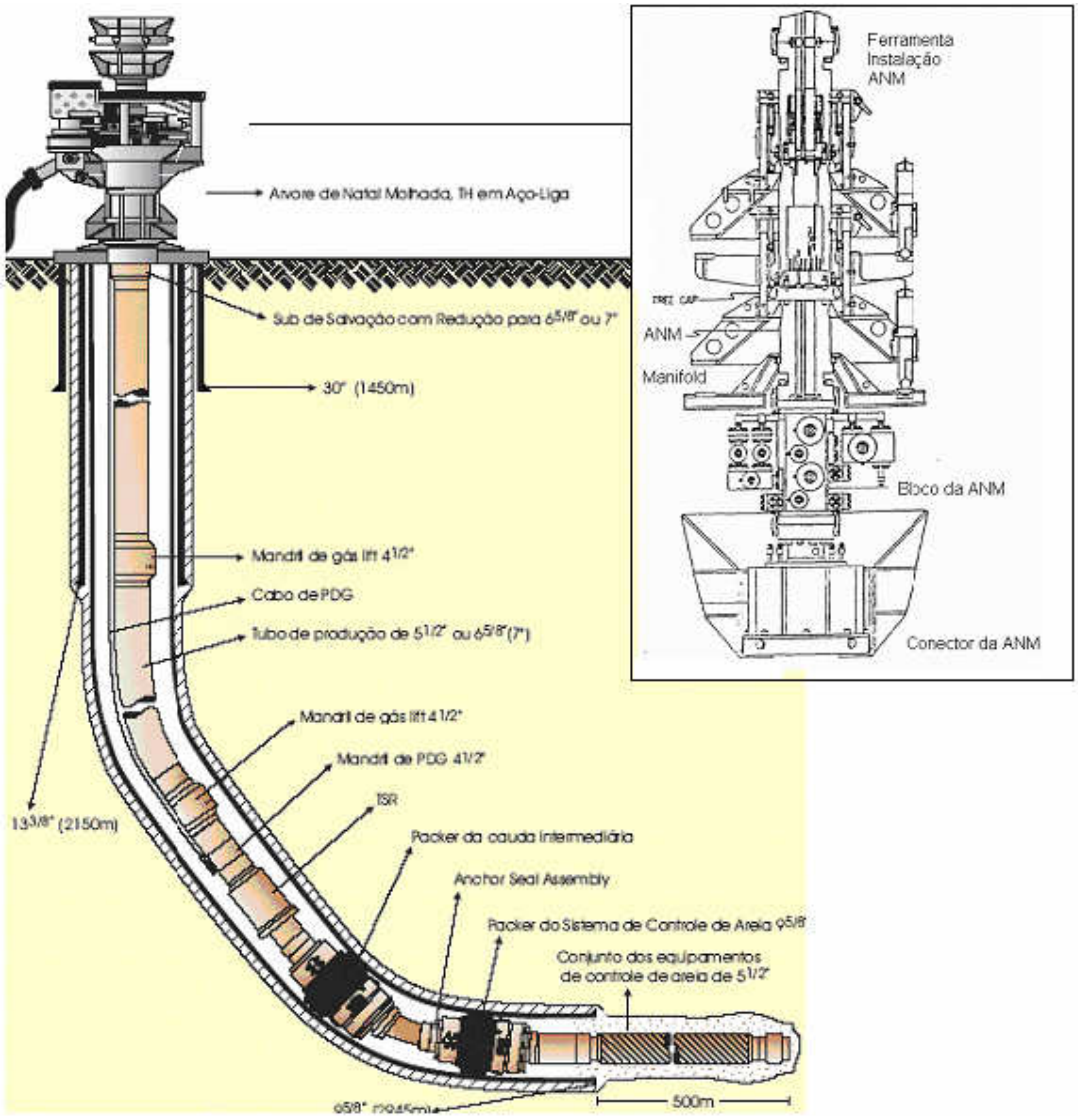
• Substituição do Fluido de Perfuração e Condicionamento do Poço;
• Instalação do sistema de contenção de areia:

- Gravel Packing (objeto de estudo deste trabalho), podendo ser também:
- Telas *Stand Alone*;
- Tela Expansíveis;

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

• Instalação da Cauda Intermediária;
• Instalação da Coluna de Produção e Suspensor de Coluna;
• Instalação da árvore de natal molhada;
• Realização de testes de formação;
• Instalação da tree Cap e abandono do poço.

O esquema de um poço tipo completado seguindo as fases acima é apresentado na figura abaixo.



Esquema de poço após completação e ANM convencional no detalhe.

A Contenção de Areia

A exclusão de sólidos por contenção mecânica tem sido o método rotineiramente utilizado pela indústria para controlar a produção de areia em campos *off shore*, sendo considerada uma das soluções mais seguras e eficientes para viabilizar a produção de óleo em arenitos friáveis, permitindo a produção do poço em vazões econômicas sem os inconvenientes associados à
produção de areia.

No entanto, deve-se ter em mente que controlar a produção de areia, não significa a exclusão total de sólidos em detrimento da vazão total de produção. As perdas de cargas

introduzidas devido à redução da malha de filtração podem levar à perda do volume de óleo que poderiam ser produzidos. Desta forma, a convivência com pequenos teores de sólidos pode ser justificada pelos ganhos de produção.

Seleção do Método de Contenção de Areia

O aspecto fundamental no projeto e dimensionamento de sistemas de exclusão de sólidos por contenção mecânica consiste em definir a granulometria do agente de contenção que será capaz de reter os grãos da formação com a menor interferência possível na produtividade do poço.

A metodologia mais difundida está baseada nos critérios estabelecidos por Saucier, Schwartz e Coberly (Tiffin, 1998). Nestes trabalhos, a definição da granulometria do agente de contenção (*gravel*) é feita a partir do conhecimento da razão entre o D50 do gravel e D50 da formação. A figura abaixo apresenta o gráfico desenvolvido por Saucier para determinação da granulometria ótima do gravel em função da granulometria da formação e da queda de permeabilidade do pacote de agente de contenção.

Outros critérios têm sido recentemente adotados para determinação da granulometria do gravel. A metodologia desenvolvida por Bennett (2000) e melhorada por Bianco (2003) se aproxima de um procedimento geral para seleção do método de contenção de areia. No trabalho de Benett (2000) são apresentados os resultados com o desempenho de diversos projetos de sistemas de contenção de areia, bem como, uma comparação entre poços construídos utilizando *gravel packing* e telas *stand alone*.



Avaliação de Saucier para definição da relação de diâmetros gravel/areia.

Telas Expansíveis

Em arenitos bem selecionados (onde o coeficiente de uniformidade é menor que 5) existe a possibilidade de utilização de telas expansíveis ou telas Premium *stand alone.* Estas são alternativas de mais simples execução que o *gravel packing* e são largamente utilizadas na completação de poços *off shore* e *on shore* no mundo (Bianco 2007).

As telas expansíveis são descidas e instaladas após a perfuração do poço aberto sendo posteriormente deformadas à frio até atingirem um diâmetro próximo ao diâmetro final do poço.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A vantagem imediata desta tecnologia é a possibilidade de construção de poços com maior diâmetro (próximo ao diâmetro da última fase perfurada) e a introdução de uma perda de carga reduzida no trecho horizontal. No entanto, esta é uma tecnologia ainda pouco testada no Brasil.



Exemplo de Telas Expansíveis (Manual de Telas Weatherford).

A Completação Stand Alone

As telas *stand alone* constituem uma alternativa de custo reduzido (quando comparada ao *gravel packing* ou expansíveis) para a instalação de sistemas de contenção de areia em arenitos moderadamente selecionados.

Este método consiste na descida e assentamento de um conjunto de telas Premium, similar as utilizadas no gravel *packing*, e no prosseguimento da completação sem a instalação do pacote de gravel.

Neste caso, quando do início da produção (ou indução de surgência) ocorreria o colapso da formação sobre o conjunto telado, preenchendo o espaço anular tela x formação com areia da formação. Bennet (2000) e Bianco (1998) recomendam a utilização deste tipo de completação inferior (completação realizada antes da instalação da coluna de produção ou injeção, ou seja, que está em contato direto com a formação) em poços onde o colapso da formação geraria um pacote com distribuição granulométrica uniforme, minimizando (ou evitando) os riscos de erosão do
conjunto telado.

Neste caso, a relação de diâmetros do poço aberto e da tela utilizada deve ser otimizada para minimizar a movimentação de finos e sua conseqüente produção e erosão dos equipamentos do poço.

O Gravel Packing Horizontal em Poço Aberto

O *gravel packing* horizontal em poço aberto é uma técnica largamente utilizada em projetos de completação *off shore.*

Está técnica consiste na instalação de um conjunto de telas no poço horizontal e do preenchimento do anular tela x formação com uma cerâmica (gravel) de granulometria selecionada. Esta tecnologia é bastante conhecida e utilizada na indústria de petróleo apresentando um baixo índice de falhas.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Segundo Tiffin (1998) o *gravel packing* apresenta um bom desempenho na contenção de sólidos da formação quando utilizado em arenitos com distribuição granulométrica uniforme, ou seja, com coeficiente de uniformidade inferior a 5.

Esta técnica também é utilizada associada á telas *Premium*, em formações onde a distribuição granulométrica é não uniforme com C variando entre 5 e 10 (Tiffin, 1998 e Bianco, 1998).

As principais desvantagens na utilização do *gravel packing* horizontal de contenção mecânica de sólidos são (Bianco, 2003):

• A grande sensibilidade à obstrução por finos, levando a perdas consideráveis de vazão durante a vida produtiva do poço (principalmente em arenitos não uniformes);

• A distribuição heterogênea de fluxo ao longo do trecho horizontal;

• A impossibilidade de retirada do conjunto telado no caso de falha durante a vida produtiva do poço.

• A impossibilidade de isolamento de intervalos devido ao aumento da RAO e RGO ao longo da vida produtiva do poço.

RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Na natureza quando encontrado está nos poros das rochas, chamadas de rochas reservatórios, cuja permeabilidade irá permitir a sua produção. Permeabilidade e porosidade são duas propriedades características de rochas sedimentares, motivo pelo qual as bacias sedimentares são os principais locais de ocorrência.

Porosidade é uma característica física, definida como o percentual entre volume vazio e o volume total das rochas. Permeabilidade é a característica física relacionada com a intercomunicação entre os espaços vazios, e permite que ocorra a vazão de fluidos no meio poroso. Na natureza as rochas sedimentares são as mais porosas, e quando possuem permeabilidade elevada, formam o par ideal para a ocorrência de reservatórios de petróleo economicamente exploráveis.

O Petróleo por possuir uma densidade média de 0,8, inferior a das rochas que constituem o subsolo, tende a migrar para a superfície provocando os clássicos casos de exudações (os egípcios utilizaram esse óleo como fonte de energia, como remédio e matéria prima para os processos de embalsamento). Se no caminho para a superfície encontra uma estrutura impermeável (armadilha), que faça o seu confinamento e impeça a sua migração, acaba formando um reservatório de petróleo. Vale salientar que esse processo ocorre lentamente (alguns milhares de anos), e gota a gota.

Essas armadilhas impermeáveis são estruturas de grande proporção, que podem ser anticlinais, falhas geológicas, derrame de basalto ou domos de sais, identificados por estudos sísmicos e geológicos, mas o mais importante é observar que devem existir várias camadas de solo, outro motivo pelo qual o petróleo é mais facilmente encontrado em bacias sedimentares. A origem do petróleo é bastante polêmica, existindo teorias

orgânicas e inorgânicas. As mais curiosas delas são a da formação principalmente pela decomposição da matéria orgânica do plâncton marinho, sobretudo o remanescente das plantas marinhas (fitoplâncton transformado em sedimentos no momento da deposição), e a da inversão da atmosfera da terra originalmente composta por gás carbônico (CO2), que explicaria o volume de petróleo existente no subsolo da terra.

Existem reservatórios de petróleo em diversas profundidades e os mais rasos (- 10 m que podem ser explorados por mineração) são os mais pastosos e com predominância na composição com hidrocarbonetos de cadeias carbônicas pesadas (graxas), e os mais leves em grandes profundidades (na faixa de - 2.500 m a - 5.000 m).
O petróleo ocorre em muitas partes do mundo: extensos depósitos têm sido encontrados no golfo Pérsico, nos Estados Unidos, no Canadá, na Rússia (nos Urais e na Sibéria ocidental), na Líbia, no delta do rio Níger, na Venezuela, no golfo do México e no mar do Norte.

Rochas sedimentares

"Por quê o petróleo é frequentemente encontrado em bacias sedimentares?
As bacias sedimentares preenchem áreas de depressão onde ocorreram falhas profundas, associadas a limites de placas (riftes, convergência por subducção ou colisão continental entre duas placas litosféricas). Os estratos sedimentares formam excelentes reservatórios (espaços porosos) e também rochas selantes que quando combinados podem formar armadilhas para hidrocarbonetos. Essas armadilhas estão conectadas com fontes profundas, através de falhas também muito profundas, havendo interações com o manto durante a evolução da bacia.

O petróleo também ocorre em rochas do embasamento, embora as acumulações sejam mais raras, pelo fato do desconhecimento da geologia desses terrenos, havendo ainda pouco esforço exploratório para perfuração de poços e pesquisas nesse contexto.

Os hidrocarbonetos (petróleo, gás) migrando de grandes profundidades para as rochas sedimentares alojam-se nas rochas reservatórios ou em rochas fraturadas. No entanto, é bastante comum a interação entre hidrocarbonetos alóctones com rochas interestratificadas e laminadas, como por exemplo folhelhos e ou alternância de folhelhos e rochas carbonáticas delgadas, havendo também interação de bactérias que se alimentam dos hidrocarbonetos primordiais. O não entendimento dessas relações conduz a equivocada interpretação de que esses litótipos seriam "rochas fonte" (geradoras) de petróleo. Por exemplo, a evidência de óleo e ou betume numa rocha, seja ela qual for, não significa que esses hidrocarbonetos são autóctones.
Eles podem ter migrado, através de estruturas profundas, para essa rocha muito tempo depois que ela se formou, mesmo soterrada há muitos milhões de anos, numa bacia sedimentar."

Classificação dos Tipos de Reservatórios

A classificação de um reservatório de petróleo é feita de acordo com o comportamento da mistura de hidrocarboneto. Apenas a composição da mistura não é suficiente para determinar o seu estado físico, e muito menos em que tipo de fluído vai resultar ao ser levada para a superfície. O Comportamento de uma determinada mistura vai depender

também das condições de pressão e temperatura a que estiver submetida. Em função das diferentes composições das misturas dos hidrocarbonetos e das diferentes condições de temperatura e pressão, existem três tipos de reservatórios a saber: Reservatório de líquido (chamados de Reservatório de óleo), Reservatório de gás e Reservatórios que possuem as duas fases em equilibrio.

Reservatório de Líquidos

De acordo com a posição que ocupa no diagrama de fases, uma mistura líquida de hidrocarboneto pode receber o nome de óleo saturado ou óleo subsaturado. Quando o ponto representativo da mistura se encontra exatamente em cima da curva dos pontos de bolha, diz-se que o óleo é saturado em gás ou simplesmente saturado. Qualquer redução da pressão, por menor que seja, acarretará vaporização de alguns componentes da mistura. Se a mistura está sujeita a uma pressão maior que a pressão dos pontos de bolha, diz-se que o óleo é subsaturado.

Quando começamos a produção, tanto o fluído que é produzido quanto o que permanece no reservatório sofrem alterações devido às mudanças das condições às quais estão submetidos. O fluído produzido passa das condições inicias de pressão e temperatura do reservatório (R) para as condições de pressão e temperatura da superfície (S). Para o fluído que permanece, a temperatura se mantém constante, enquanto a pessão diminui. A curva RS representa a transição do fluído desde as condições iniciais do reservatório, ponto R, até as condições da superficie, ponto S. Neste caso, podemos afirmar que : 60% dos hidrocarbonetos estão na fase líquida e 40% na fase gasosa.

Devido à liberação de gás, o óleo (parte líquida da mistura) reduz de volume quando levado para as condições de superfície. De acordo com o grau de redução de volume, o óleo pode ser classificado em baixa contração (óleo normal) e óleo de alta contração (óleo volátil). A contração se deve basicamente à liberação das frações mais leves (metano, etano, propano, etc), de onde se conclui que as misturas com grandes percentuais destes componentes apresentam maior contração, enquanto que as misturas com pequenos percentuais sofrem menor contração. Consequentemente, um óleo de baixa contração resulta em uma maior quantidade de líquido na superfície.

Reservatório de Gás

Chama-se reservatório de gás à jazida de petróleo que contém uma mistura de hidrocarbonetos que se encontra no estado gasoso nas condições de reservatório. No diagrama de fases, o ponto correspondente às condições de pressão e temperatura originais se localiza na região das misturas gasosas, isto é, à direita da curva dos pontos de orvalho. Dependendo do seu comportamento, quando sujeito a reduções de pressão dentro do reservatório e do tipo de fluído resultantes nos equipamentos de superfície, os reservatórios de gás podem ser classificados em: reservatórios de gás úmido, reservatórios de gás seco e reservatórios de gás retrógrado.

Reservatório de Gás Úmido e Gás Seco

A mistura gasosa, ao ser levada para a superfície, é submetida a processos nos quais os componentes mais pesados são separados dos mais leves. Se a mistura produzir uma

certa quantidade de líquidos, o reservatório recebe o nome de reservatório de gás úmido. Se não houver produção de líquido, recebe o nome de reservatório de gás seco. Esta classificação depende não só da composição original da mistura, mas também dos processos de separação. Um mesmo gás pode ser classificado como gás úmido para determinada condição de separação e considerado gás seco para outras condições de separação.

Reservatório de Gás Retrógrado

O reservatório de gás retrógrado recebe este nome devido a um fenômeno que pode ser descrito do seguinte modo.

Considere uma jazida de hidrocarboneto na qual, nas condições iniciais de temperatura e pressão, toda a mistura se encontra no estado gasoso. À medida que o fluido vai sendo produzido, a pressão no interior do reservatório diminui, enquanto a temperatura permanece constante. A certa altura da vida produtiva do reservatório começa a ocorrer uma condensação de certos componentes da mistura, ou seja, uma parte do gás se liquefaz. Com o prosseguimento da produção, a pressão continua a cair fazendo com que o gás que tinha se liquefeito volte para o estado gasoso.

Diminuindo mais a pressão, todo o gás liquefeito eventualmente voltará para o seu estado inicial. O ponto de interesse da questão é o fato de uma redução de pressão causar a condensação de um gás, quando o esperado é que reduções de pressão causem a vaporização de líquidos. Observe que o fenômeno retrógrado acontece no interior da rocha-reservatório. O reservatório de gás retrógrado também é conhecido como reservatório de gás condensado.

Mecanismos de recuperação

Os reservatórios, cujos mecanismos de recuperação são poucos eficientes e que por consequência retêm grandes quantidades de hidrocarbonetos após a exaustão da sua energia natural, são fortes candidatos ao emprego de uma série de processos que visam à obtenção de uma recuperação adicional. Os Métodos de Recuperação , tentam interferir nas características dos reservatórios que favorecem a retenção exagerada de óleo. A recuperação do óleo contido nos espaços porosos de uma rocha reservatório só é possível na medida em que o volume originalmente ocupado pelo óleo seja preenchido por algum outro material, que pode ser outro fluido ou mesmo a rocha em expansão.

Quase tão antigos quanto a indústria de petróleo, os métodos de recuperação foram desenvolvidos para se obter uma produção maior que aquela que se obteria, caso apenas a energia natural do reservatório fosse utilizada. A nomenclatura utilizada, baseia-se no seguinte critério : para os processos cujas tecnologias são bem conhecidas e cujo grau de confiança na aplicação é bastante elevado, como é o caso da injeção de água e da injeção de gás, dá-se o nome de Métodos Convencionais de Recuperação e para os processos mais complexos e cujas tecnologias ainda não estão satisfatoriamente desenvolvidas, Métodos Especiais de Recuperação (Métodos Térmicos, Métodos Miscíveis, Métodos Químicos, Recuperação Microbiológica e Ondas Eletromágneticas).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Não é necessário esperar o declínio total da produção para se começar a injeção de fluídos no reservatório. Ao contrário, a boa prática da engenharia recomenda que a injeção seja iniciada bem antes que isso aconteça. Existe uma prática, chamada “manutenção de pressão”, que consiste na injeção de água e/ou gás ainda no início da vida produtiva do reservatório, e tem por finalidade manter a pressão em níveis elevados, preservando razoavelmente as características dos fluídos e fluxo. Ao se injetar um fluído no reservatório com a finalidade única de deslocar o óleo para fora dos poros da rocha, num comportamento puramente mecânico, tem–se um processo classificado como Método Convencional de Recuperação.

O fluído injetado, ou fluído deslocante, deve empurrar o óleo, chamado de fluído descolado, para for a dos poros das rochas e ao mesmo tempo ir ocupando os espaços deixados à medida que este vai sendo expulso. Mesmo na porção do reservatório invadida pelo fluído deslocante, nem todo o óleo é deslocado. Ao óleo remanescente na zona invadida pelo fluído deslocante , denomimanos óleo residual e é consequencia da capilaridade.

Mecanismos de recuperação – Projetos de Injeção

Dentre os métodos convencionais de recuperação, existe uma grande diversidade na maneira de se executar a injeção de um fluido, a opção por um destes métodos, deve ser pautada pelos aspectos da sua viabilidade técnica e econômica. Uma etapa de grande importância no projeto de injeção é a definição do esquema de injeção, isto é, a maneira como os poços de injeção e de produção vão ser distribuídos no campo de petróleo. Além de levar em conta as características físicas do meio poroso e dos fluídos envolvidos, o modelo escolhido deve:

- proporcionar a maior produção possível de óleo durante um intervalo de tempo econômico e com o menor volume de fluído injetado possível;

- oferecer boas condições de injetividade para se obter boa produtividade resultando em vazões de produção economicamente atrativas; e,

-ainda visando ao aspecto econômico, fazer a escolha recair sobre um esquema em que a quantidade de poços novos a serem perfurados seja a menor possível principalmente no caso da apliçação do processo em um campo já desenvolvido.

Cada projeto é exclusivo para cada reservatório. Entretanto, existem aspectos que são comuns a todos os projetos, independente do reservatório ou até mesmo do fluído injetado, como é o caso da existência de poços de injeção e de poços de produção.

Os projetos devem especificar aspectos como quantidades e distribuição dos poços de injeção e de produção, pressões e vazões de injeção, estimativas de vazões de produção e volumes de fluídos a serem injetados e produzidos. Esses dados além de serem necessários para o dimensionamento dos eo projeto.quipamentos, são fundamentais para a viabilidade econômica do projeto.

Os esquemas de injeção dividem-se em três tipos principais: injeção na base, injeção no topo e injeção em malhas.

Para reservatórios planos, horizontais e de pouca espessura, pelo fato de não existirem pontos prefenrencias para injeção dos fluidos, os poços de injeção e produção são distribuidos de maneira homogênea em todo o reservatório (desenho p202).
Pela repetição de determinado padrão ou arranjo dos poços de injeção e produção, chamamos este esquema de padrão repetido ou injeção em malhas.

Se o reservatório tiver uma certa inclinação e se deseja injetar água, os poços que alcançam a parte mais baixa do reservatório são transformados em poços de injeção. À medida que a água vai penetrando no meio poroso o óleo vai sendo empurrado de baixo para cima, na diração dos poços de produção que se encontram situados na parte mais alta da estrutura. A este esquema dá-se o nome de injeção na base, se o fluído injetado fossem o gás, os poços de injeção seriam localizados no topo da formação, e os de produção, na base. Este esquema é chamado de injeção de topo.

Nos processos convencionais de recuperação utilizam-se a água e o gás natural como fluido de injeção. A água de injeção pode ter quatro origens diferentes:

1- água subterrânea, coletada em mananciais de subsuperfície por meio de poços perfurados, para este fim;

2- água de superfície, coletada em rios, lagos, etc.

3- água do mar; e

4- água produzida, isto é, a água que vem associada à produção de petróleo.
A água antes de ser injetada, recebe um tratamento, de modo a torná-la mais adequada ao reservatório e aos fluidos nele existente.

Os projetos de injeção de água, de uma maneira em geral, são composto das seguintes partes:

- Sistema de captação de água;
- Sistema de tratamento de água para injeção;
- Sistema de injeção; e
- Sistema de tratamento e descarte da água produzida.

Nos projetos de injeção de gás natural, o gás pode ser injetado com a mesma composição com a qual é produzido ou após ser processado.

O gás é injetado no meio poroso utilizando-se compressores que fornecem as pressões necessárias para o processo. Este processo não requer que o gás se misture com o óleo do reservatório para deslocá-lo para for a do meio poroso.
O papel do gás é de um simples agente mecânico de deslocamento. As instalações para injeção de gás se de diferenciam basicamente outros sistemas de produção pela presença de compressores e poços para injeção de gás.

A produção de hidrocarbonetos obtida de um projeto de injeção de fluidos pode ser avaliada numericamente, a qualquer época, através de parâmetros chamados Eficiência de Varrido Horizontal, Eficiência de Varrido Vertical e Eficiência de Deslocamento.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A Eficiência do Varrido Horizontal representa, em termos percentuais, a área em planta do reservatório que foi invadida pelo fluido injetado até um determinado instante e depende do esquema de injeção, da razão de mobilidade entre fluidos injetados e deslocados, do volume do fluido injetado.

A Eficiência do Varrido Vertical depende da variação vertical da permeabilidade, da razão de mobilidade e do volume injetado.

A Eficiência Volumétrica não é suficiente para a determinação da quantidade de óleo deslocado. O fluido pode penetrar grandes extensões do reservatório, poreém sua capacidade de retirar o óleo do interior dos poros é pequena. O parâmetro que mede a capacidade do fluido injetado de deslocar o óleo, chama-se Eficiência de Deslocamento. A Eficiência Volumétrica exprime quanto do reservatório foi alçançado pelo fluido injetado, a Eficiência de Deslocamento exprime que percentual do óleo que existia inicialmente dentro dos poros dessa região foi expulso por ele.

Para se obter boas recuperações, é necessário que todas as Eficiências sejam altas. Quando as eficiências de varrição são baixas, o fluido injetado simplesmente encontra caminhos preferenciais e se dirige rapidamente para os poços de produção, deixando grandes áreas do reservatório intactas. Quando a eficiência de deslocamento é baixa, mesmo que as eficiências do varrido sejam altas, o fluido injetado não desloca apropriadamente o óleo para for a da região invadida.

Estimativas feitas em diversos locais têm conduzido a um fator de recuperação médio de cerca de 30%, ou seja, de todo óleo já descoberto, cerca de 30 % pode ser recuperado por processos convencionais de recuperação.

ELEVAÇÃO DO PETRÓLEO E PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO

ELEVAÇÃO DO PETRÓLEO

A elevação do petróleo até a superfície, onde está instalada a árvore-de-natal (conjunto de válvulas de controle e de segurança do poço), dá-se através da coluna de produção, previamente instalada no poço. A partir daí, o petróleo segue até o separador, onde ocorre o seu primeiro tratamento (separa-se o óleo, o gás e a água). Após essa separação, o petróleo é bombeado para as estações coletoras e daí para as refinarias.

Em terra, a cabeça do poço fica na superfície e a coluna de produção (constituída de tubos metálicos), é descida pelo interior do revestimento. A surgência dos fluídos (petróleo) na superfície, geralmente vem de forma natural, pois o óleo está no reservatório sob forte pressão.
Porém, determinados casos, quando o poço não tem condições de produzir por surgência natural, torna-se necessário a utilização de métodos de **elevação artificial** do óleo.

Os métodos mais comuns são: **injeção dentro do poço de gás lift, bombeio centrífugo, bombeio hidráulico, bombeio por cavidade progressivas e bombeio mecânico** (conhecido como cavalo de pau), muito usado nos poços em terra do Norte do Estado do ES. Sua função é fornecer energia ao fluído(óleo) vindo da formação, elevando-o para a superfície. O ciclo de bombeio e dividido em curso ascendente e curso descendente.



bombeio mecânico

Na cabeça do poço fica a árvore de natal convencional, cuja finalidade é permitir de forma controlada, o fluxo de óleo do poço. Além destes equipamentos, existem outros inúmeros que são acoplados ao poço com a finalidade de garantir a vazão do fluxo do óleo, o controle e a segurança na produção.

GÁS LIFT - ELEVAÇÃO COM GÁS - Gás introduzido num poço, ou através de uma tubulação, para aliviar a coluna fluida e introduzir um fluxo de produção do reservatório a fluir.

A elevação artificial por injeção contínua de gás (ICG) consiste na introdução de gás de alta pressão na base do tudo de produção, gaseificando o fluido, diminuindo a pressão de fundo e permitindo o influxo de fluidos da formação em poços não surgentes.
ICG é amplamente empregado devido a sua robustez, podendo ser aplicado sob diversas condiçãoes operacionais. No Brasil cerca de 60% da produção é realizada utilizando-se ICG.

O gás é injetado no espaço anular revestimento-tubo de produção e entra no tubo de produção por uma válvula de gás-lift situada no fundo do poço, logo acima do packer de produção. Ao subir no tubo de produção gaseifica o fluido produzido diminuindo a contra pressão exercida na frente dos canhoneados. Isto permite a operação do poço mesmo com uma pressão estática de formação reduzida. Na superfície a produção passa por um ou mais separadores e por etapas de tratamento que incluem a retirada de condensado, a eliminação de umidade, etc., antes de entrar novamente na etapa de compressão. A unidade de compressão do gás alimenta um manifold para injeção de gás. A partir deste manifold saem linhas para cada poço.
Estas linhas passam por chokes de injeção e se conectam às válvulas wings da árvore de natal dando acesso ao anular dos diversos poços.

Bombeio Centrífugo submerso (BCS)

A utilização de bombeio centrífugo submerso está se expandindo na elevação artificial de petróleo pela crescente flexibilidade dos equipamentos disponíveis. Neste tipo de bombeio, a energia é transmitida para o fundo do poço através de um cabo elétrico. Lá, a energia é transformada em energia mecânica através de um motor de subsuperfície, o qual está diretamente conectado a uma bomba centrífuga. Esta transmite a energia para o fluido sob a forma de pressão, elevando-o para a superfície.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Atualmente poços com fluidos de alta viscosidade e poços com altas temperaturas estão sendo produzidos economicamente por esse método de bombeio. Este método aplicase a zonas urbanas, já que a cabeça de produção é o único equipamento colocado na superfície.

Bombeio Hidráulico (BH)

O bombeio hidráulico de fundo tem o mesmo princípio de funcionamento do bombeio mecânico com hastes. Ambos utilizam uma bomba alternativa para transmitir energia ao fluido, apenas que o bombeio mecânico a energia é transmitida à bomba por uma coluna de hastes e no bombeio hidráulico a energia é levada ao fundo do poço através de fluido a alta pressão. È um método muito versátil em termos de vazão de produção, além de ser o método de elevação artificial mais eficiente para poços profundos.

Aplicável em poços direcionais ou desviados, pois não possui partes móveis, a não ser no seu interior da bomba.Sua grande limitação é o bombeio de fluidos com sólidos ou bombeio de gás, este afetando sua eficiência volumétrica e os sólidos provocando desgaste muito rápido da bomba.

Bombeio por Cavidade Progressiva (BCP)

É um método de elevação artificial em que a transferência de energia ao fluido é feita através de uma bomba de cavidades progressivas. É uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em petróleo, constituída de rotor e estator.
O rotor ao girar no interior do estator origina um movimento axial das cavidades, no sentido da sucção para a descarga. O acionamento da bomba pode ser originado da superfície, por meio de uma coluna de hastes e um cabeçote de acionamento,

Processamento Primário de Petróleo

Durante o processo de produção de petróleo é comum o aparecimento de gás e água associados. A separação dessas fases faz-se necessária, pois o gás apresenta relevante interesse econômico para a indústria, e a água, por apresentar elevado teor de sal em sua composição e formar emulsões com viscosidades superiores à do petróleo desidratado, deve ser removida, pois afeta o dimensionamento do sistema de bombeio e transferência, compromete certas operações de processo nas refinarias, além de representar volume ocioso na transferência e tancagem do petróleo e gerar problemas de incrustação e corrosão nos oleodutos de exportação.

Portanto, o objetivo do **processamento primário do petróleo** é o de separar gás, sob condições controladas, e o de remover água, sais e outras impurezas,suficientemente para torná-lo estável e adequado para ser transferido.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O processo de separação

O processo primário de separação do gás apresenta-se relativamente fácil, devido a grande diferença de densidade apresentada entre as fases líquida e gasosa, bastando, apenas, uma fragmentação inicial do fluido, pelo emprego de dispositivos apropriados, seguido de um baixo tempo de separação. A separação da água do petróleo apresenta-se um pouco mais complexa, pois, embora ambos sejam imiscíveis, estes ascendem à superfície sob a forma de emulsões.

Geralmente, o petróleo e a água encontram-se no fundo do poço sob a forma de duas fases separadas. Ao escoarem através das tubulações de produção, essas fases são submetidas a agitação e ao cisalhamento, e, em função da presença de emulsificantes naturais no petróleo (asfaltenos, resinas, ácidos naftênicos, dentre outras espécies químicas), de caráter lipofílico dominante, ocorre a dispersão de uma fase em outra, dando origem a emulsões do tipo água-óleo (A/O), isto é, diminutas gotas de água dispersas no petróleo recobertas por uma fina camada da fase oleosa. Esses agentes migram para esta interface, formando uma barreira que impede o contato entre as gotas, estabilizando a emulsão. Adicionalmente, sabe-se que estas emulsões podem ser também estabilizadas pela presença de materiais insolúveis, finamente divididos na interface.

Normalmente, a separação da água do petróleo realiza-se em duas etapas operacionais: a desidratação e a dessalgação. A desidratação é realizada nas unidades operacionais de produção instaladas em campo, e consiste, basicamente, na separação e remoção de grande parte da água, reduzindo seu teor a valores aceitáveis. A dessalgação do petróleo é realizada nas refinarias, e consiste em lavar o petróleo com água doce para remover grande parte do sal residual presente.

Os métodos de desidratação combinam efeitos, com o objetivo de remover os agentes emulsionantes presentes na interface, e de permitir a coalescência das gotas e a segregação das fases líquidas. Assim, normalmente adiciona-se previamente determinado produto químico desestabilisante (desemulsificante) à corrente a ser processada, capaz de competir e deslocar os emulsificantes naturais presentes na interface. Em seguida, a emulsão é aquecida, e quando necessário, é fornecido ao sistema suficiente padrão de fluxo para que haja separação de fases.

Usualmente, no processamento primário de petróleo são empregados vasos separadores gravitacionais trifásicos para remover grande parte da água e do gás. Estes apresentam formato cilíndrico e são projetados para trabalharem a temperaturas e pressões razoavelmente elevadas, além de promoverem, em seu interior, o padrão de fluxo desejado para a segregação gravitacional.

De acordo com a designação API, um separador gravitacional trifásico é constituído de quatro seções distintas: a) seção de separação primária - localizada na entrada do vaso, onde o fluido choca-se com dispositivos defletores, ou passa por um difusor, fazendo com que grande parte do gás separe, e o líquido decante em direção à parte inferior do vaso; b) seção de separação secundária - constitui a porção superior do interior do vaso, ocupada pela fase gasosa. Nesta seção, grande parte do líquido arrastado, sob a forma de gotas, é separado por decantação, e pelo emprego de dispositivos mecânicos; c) seção de acúmulo de líquido - localizada imediatamente abaixo da região ocupada pela fase gasosa, é formada.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Separadores de fundo para óleo e gás são equipamentos utilizados para segregar e separar as fases em um escoamento bifásico. Sua aplicação é fundamental sempre que a co-existência das fases no escoamento implicar na operação inadequada de equipamentos ou incrementar processos indesejáveis, como a perda de carga ou a oscilação de variáveis operacionais (vazão, pressão, temperatura, etc) no sistema de transporte de fluidos.

Exemplos característicos, atuais, e de suma importância para o país, neste momento em que a produção de petróleo resulta em grande parte de reservas submarinas, é a ocorrência de escoamentos de gás e óleo em tubulações de completação e produção de petróleo, ou na sucção de bombas centrífugas submersas. Quando se produz um campo de petróleo, haverá sempre a ocorrência de escoamento bifásico (ou mesmo multifásico, com a presença de água e particulados sólidos) no poço e na tubulação de transporte da mistura entre a cabeça do poço e as facilidades de produção.

O gás, ou está naturalmente livre no reservatório e será produzido com o óleo, ou resultará da mudança de fase das frações mais leves do óleo, quando este perde pressão ao escoar para a superfície. Se a ocorrência simultânea de gás e óleo na tubulação, por um lado, diminui a energia hidrostática da coluna bifásica que se estabelece entre o reservatório e a superfície, por outro aumenta a energia dissipada no escoamento, induz oscilações de pressão e vazão neste escoamento e impede a instalação, entre o reservatório e a superfície, de equipamentos operacionalmente sensíveis à presença de gás misturado na corrente de óleo (como uma bomba centrífuga submersa referida acima, por exemplo).

RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

O estudo da Resistência dos Materiais tem por objetivo fornecer conhecimentos básicos das propriedades mecânicas de sólidos reais, visando utilizá-los no projeto, modelagem e cálculo de estruturas.

Por esta razão, em muitos cursos de Engenharia (Civil, Mecânica, Naval, Elétrica, etc) esta disciplina ´e intitulada Introdução à Mecânica dos Sólidos ou simplesmente Mecânica dos Sólidos.

A boa compreensão dos conceitos que envolvem a mecânicas de sólidos está intimamente ligada ao estudo de duas grandezas físicas: A tensão e a deformação.

Estas duas grandezas físicas são fundamentais nos procedimentos que envolvem o cálculo de uma estrutura. Mas o que ´e uma estrutura? Estrutura ´e a parte resistente de uma construção e é constituída de diversos elementos estruturais que podem ser classificados como:

blocos - os blocos são elementos estruturais nos quais tem-se as três dimensões (imaginando-se um retângulo envolvente) com valores significativos numa mesma ordem de grandeza. Alguns exemplos são mostrados nas figuras abaixo:



Sapata de fundação



Bloco de coroamento de estaca

placas - são elementos estruturais para os quais uma das dimensões (espessura) ´e bastante inferior às demais. Alguns exemplos são mostrados nas figuras abaixo:



Laje de uma edificação



(MASP)

As “placas ” curvas são denominadas de cascas. Exemplos nas figuras abaixo:





barras - s˜ao elementos estruturais para os quais duas das dimensões (largura e altura) são bastante inferiores à terceira (comprimento). Podem ser retas (vigas, pilares, tirantes e escoras) ou curvas (arcos).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Alguns exemplos são mostrados nas figuras abaixo:





- elementos de forma geométrica de difícil definição - estes elementos estruturais apresentam dificuldades na descrição de seu comportamento físico mas não são menos numerosos que os demais. Num conceito amplo de estrutura estes elementos podem fazer parte da estrutura de um motor, um esqueleto humano ou uma peça mecânica ou mesmo uma estrutura civil mais rebuscada.

Um conceito de cálculo estrutural

A idéia de cálculo estrutural pode ser dividida em três frentes de trabalho não independentes:

Fase 1 - **Ante-projeto da estrutura**: Nesta fase uma concepção inicial do projeto é criada. A estrutura pode ser um edifício, um navio, um avião, uma prótese óssea, uma ponte, etc. As dimensões das peças estruturais são arbitradas segundo critérios técnicos e empíricos.

Fase 2 - Modelagem. Modelar um fenômeno físico é descrever seu comportamento através de equações matemáticas. Neste processo parte-se normalmente de um modelo que reúne as principais propriedades do fenômeno que se deseja modelar. No caso de estruturas, os modelos estruturais são constituídos de elementos estruturais.

A partir do conhecimento do comportamento dos elementos estruturais e do carregamento envolvido são determinadas as deformações e tensões a que a estrutura está submetida. No caso de barras, uma boa parte desta tarefa pode ser realizada com o auxílio dos conhecimentos a serem obtidos nesta disciplina (Resistência dos Materiais) e na disciplina Análise Estrutural. Para outros tipos de elementos estruturais, devido à complexidade dos cálculos, serão necessários estudos mais aprofundados em mecânica dos sólidos e métodos numéricos que viabilizem a solução do problema. O método numérico mais conhecido na modelagem estrutural é o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Em alguns casos, por se tratarem de elementos estruturais complexos mas que ocorrem com bastante frequência nas estruturas, vários estudos já foram realizados e apontam aproximações de boa qualidade. Estas aproximações normalmente são apresentados em forma de tabelas ou ábacos, mas são restritas a uma série de hipóteses simplificadoras e atendem somente alguns casos específicos, como por exemplo as tabelas para cálculo de esforços em lajes retangulares.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Fase 3 - Dimensionamento das peças. Nesta fase é necessário o conhecimento de questões específicas de cada material que constituí a estrutura (aço, madeira, alumínio, compósito, concreto, etc). Este conhecimento será adquirido em cursos específicos como: Concreto I e II e Estruturas Metálicas. Nesta fase é possível que se tenha necessidade de retornar à Fase 1 pois os elementos estruturais podem ter sido sub ou super avaliados. Neste caso parte-se para um processo recursivo até que o grau de refinamento requerido para o projeto seja alcançado.

O cálculo de uma estrutura depende de três critérios:

• Estabilidade: Toda estrutura deverá atender às equações universais de equilíbrio estático.

• Resistência: Toda estrutura deverá resistir às tensões internas geradas pelas ações solicitantes.

• Rigidez: Além de resistir às tensões internas geradas pelas ações solicitantes, as estruturas não podem se deformar excessivamente.

Pressupostos e hipóteses básicas da Resistência dos Materiais

A Resistência dos Materiais é uma ciência desenvolvida a partir de ensaios experimentais e de análises teóricas.

Os ensaios ou testes experimentais, em laboratórios, visam determinar as características físicas dos materiais, tais como as propriedades de resistência e rigidez, usando corpos de prova de dimensões adequadas.

As análises teóricas determinam o comportamento mecânico das peças em modelos matemáticos idealizados, que devem ter razoável correlação com a realidade. Algumas hipóteses e pressupostos são admitidos nestas deduções e são eles:

1. Continuidade Física:

A matéria apresenta uma estrutura continua, ou seja, são desconsiderados todos os vazios e porosidades.

2. Homogeneidade:

O material apresenta as mesmas características mecânicas, elasticidade e de resistência em todos os pontos.

3. Isotropia:

O material apresenta as mesmas características mecânicas elásticas em todas as direções. Ex: As madeiras apresentam, nas direções das fibras, características mecânicas e resistentes distintas daquelas em direção perpendicular e portanto não é considerada um material isótropo.

4. Equilíbrio:

Se uma estrutura está em equilíbrio, cada uma de suas partes também está em equilíbrio.

5. Pequenas Deformaçãoes:

As deformações são muito pequenas quando comparadas com as dimensões da estrutura.

6. Saint-Venant:

Sistemas de forças estaticamente equivalentes causam efeitos idênticos em pontos suficientemente afastados da região de aplicação das cargas.

7. Seções planas:

A seção transversal, após a deformação, permanece plana e normal à linha média (eixo deformado).

8. Conservação das áreas:

A seção transversal, após a deformação, conserva as suas dimensões primitivas.

9. Lei de Hooke:

A força aplicada é proporcional ao deslocamento.

$F = kd$

onde: F é a força aplicada; k é a constante elástica de rigidez e d é o deslocamento;

10. Princípio da Superposição de efeitos:

Os efeitos causados por um sistema de forças externas são soma dos efeitos produzidos por cada força considerada agindo isoladamente e independente das outras.

A fim de compensar as incertezas na avaliação das cargas, na determinação das propriedades dos materiais, nos pressupostos ou nas simplificações, ´e previsto nas Normas Técnicas a adoção de coeficientes de segurança. Consiste em se majorar as cargas e se reduzir a resistência dos materiais. Os diversos critérios adotados para escolha dos coeficientes de segurança adequados são estudados ao longo do curso de Engenharia Civil.
Adota-se neste texto um coeficiente de segurança único que reduz a capacidade de carga da estrutura.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

TRAÇÃO E COMPRESSÃO

1) Esforços comuns

Materiais sólidos tendem a se deformarem (ou eventualmente se romperem) quando submetidos a solicitações mecânicas. A Resistência dos Materiais é um ramo da Engenharia que tem como objetivo o estudo do comportamento de elementos construtivos sujeitos a esforços, de forma que eles possam ser adequadamente dimensionados para suportá-los nas condições previstas de utilização.

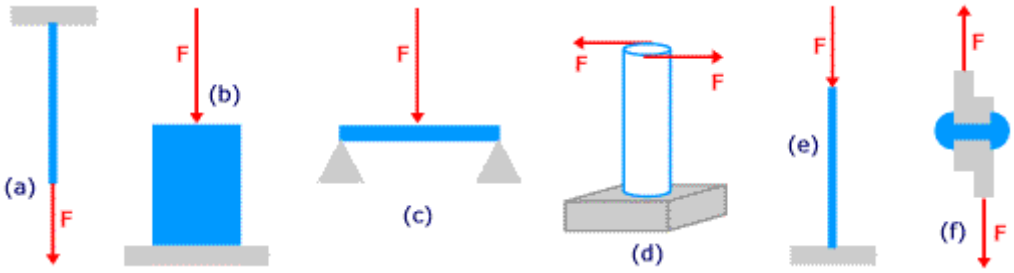


Fig 1.1

A Figura 1.1 dá formas gráficas aproximadas dos tipos de esforços mais comuns a que são submetidos os elementos construtivos:

(a) **Tração**: a força atuante tende a provocar um alongamento do elemento na direção da mesma.

(b) **Compressão**: a força atuante tende a produzir uma redução do elemento na direção da mesma.

(c) **Flexão**: a força atuante provoca uma deformação do eixo perpendicular à mesma.

(d) **Torção**: forças atuam em um plano perpendicular ao eixo e cada seção transversal tende a girar em relação às outras.

(e) **Flambagem**: é um esforço de compressão em uma barra de seção transversal pequena em relação ao comprimento, que tende a produzir uma curvatura na barra.

(f) **Cisalhamento**: forças atuantes tendem a produzir um efeito de corte, isto é, um deslocamento linear entre seções transversais.

Em muitas situações práticas ocorre uma combinação de dois ou mais tipos de esforços. Em alguns casos há um tipo predominante e os demais podem ser desprezados, mas há outros casos em que eles precisam ser considerados conjuntamente.

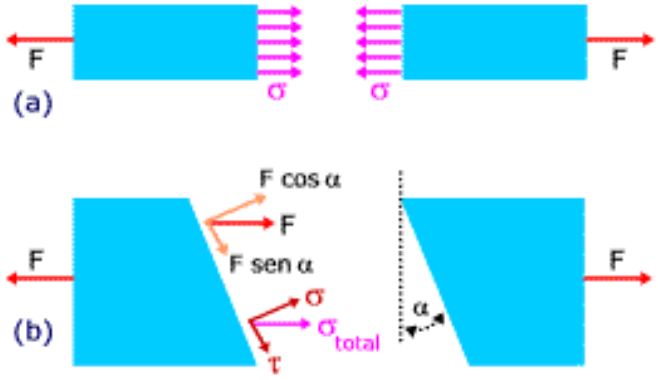
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

2) Tensão normal e tensão transversal

Seja, por exemplo, uma barra cilíndrica de seção transversal S submetida a uma força de tração F. É evidente que uma outra barra de seção transversal maior (por exemplo, 2S), submetida à mesma força F, trabalha em condições menos severas do que a primeira. Isto sugere a necessidade de definição de uma grandeza que tenha relação com força e área, de forma que os esforços possam ser comparados e caracterizados para os mais diversos materiais.

Tensão é a grandeza física definida pela força atuante em uma superfície e a área dessa superfície. Ou seja, tensão = força / área.

Pela definição, a unidade de tensão tem a mesma dimensão de pressão mecânica e, no Sistema Internacional, a unidade básica é a mesma: pascal (Pa) ou newton por metro quadrado (N/m^2).



Na Figura 2.1 (a) uma barra de seção transversal S é tracionada por uma força F. Supondo uma distribuição uniforme de tensões no corte hipotético exibido, a tensão **σ** transversal ao corte é dada por:

$$\sigma = F/S$$

Observação: no caso de barras lisas tracionadas, as tensões se distribuem de modo uniforme se os pontos de aplicação das forças estão suficientemente distantes. Em outros casos, as tensões podem não ser uniformes e o resultado desta fórmula é um valor médio.

Tensões podem ter componentes de modo análogo às forças. Na Figura 2.1 (b), é considerada uma seção hipotética, fazendo um ângulo α com a vertical, em uma barra tracionada por uma força F. E a força atuante nessa seção pode ser considerada como a soma vetorial da força normal ($F \cos \alpha$) e da força transversal ($F \text{ sen } \alpha$).

Portanto, a tensão nessa superfície é a soma dos componentes:

Tensão normal, em geral simbolizada pela letra grega *sigma* minúsculo **(σ)**..

Tensão transversal (ou de **cisalhamento**): em geral simbolizada pela letra grega *tau* minúsculo **(τ)**

3) Tração e compressão: generalidades

Consideramos, conforme Figura 3.1, uma barra redonda de diâmetro D e comprimento L na condição livre, isto é, sem aplicação de qualquer esforço.

Se aplicada uma força de tração F, o comprimento aumenta para L_1 (= L + ΔL) e o diâmetro diminui para D_1.

O **alongamento** (ou **deformação longitudinal**) □ da barra é a relação entre a variação de comprimento e o comprimento inicial:

$\varepsilon = \Delta L / L$ (adimensional).

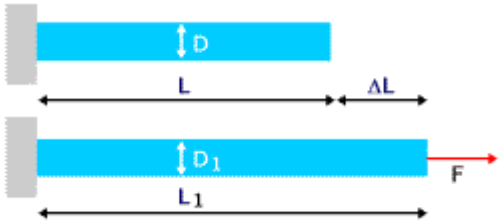


Fig 3.1

Ou em termos percentuais: $\varepsilon = 100\ \Delta L / L$

Paralelamente ao aumento de comprimento, ocorre uma redução do diâmetro, chamada **contração transversal**, dada por:

$\varepsilon_t = (D - D_1) / D$

A relação entre a contração transversal e o alongamento é dita **coeficiente de Poisson** μ:

$\mu = \varepsilon_t / \varepsilon$

Valores típicos de μ para metais estão na faixa de 0,20 a 0,40.

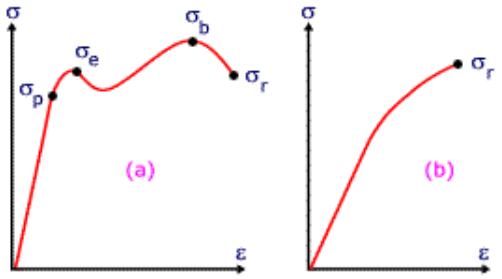


Fig 3.2

Os ensaios de tração determinam graficamente a relação entre a tensão aplicada e o alongamento em uma amostra de determinado material.

A Figura 3.2 (a) dá a curva aproximada para um aço estrutural típico.

Existe um valor limite de tensão até o qual a tensão aplicada é proporcional à deformação:

$\sigma = E\ \varepsilon$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Esta igualdade é chamada **Lei de Hooke** e o fator de proporcionalidade E é dito **módulo de elasticidade** do material (desde que ε é uma grandeza adimensional, ele tem a mesma unidade da tensão). O módulo de elasticidade também é conhecido por **módulo de Young** (homenagem ao cientista inglês Thomas Young).

Obs: para compressão, podemos considerar a mesma lei, considerando a tensão com sinal contrário (até, é claro, o valor absoluto igual ao limite de proporcionalidade). Entretanto, alguns materiais exibem valores de E diferentes para tração e compressão. Nesses casos, podemos usar as notações E_t e E_c para a distinção.

Abaixo valores típicos de E e μ para alguns metais.

Material	**Módulo de Elasticidade**
Aço	210 GPa
Aluminio	70 GPa
Bronze	100 GPa
Cobre	120 GPa
Fofo	100 GPa
Latão	65 GPa

Metal	Aços	Alumínio	Bronze	Cobre	Ferro fundido	Latão
μ	0,30	0,34	0,33	0,33	0,25	0,37

Voltando à Figura 3.2, σ_p é o **limite de proporcionalidade** do material, isto é, tensão abaixo da qual o material se comporta segundo a lei de Hooke.

A tensão σ_e é a **tensão de escoamento**, ou seja, o material entra na região plástica e as deformações são permanentes. σ_b é a **tensão máxima** e σ_r é a **tensão de ruptura**.

Em materiais pouco dúcteis como ferro fundido, esses limites não ocorrem e uma curva típica é parecida com a Figura 3.2 (b).

Para aços, o teor de carbono exerce significativa influência nas tensões máximas. Abaixo alguns valores típicos de tensões de escoamento e de ruptura para aços-carbono comerciais.

Em geral, para fins de dimensionamento, no caso de materiais dúcteis considera-se a tensão admissível igual à tensão de escoamento dividida por um coeficiente de segurança. No caso de materiais frágeis, a tensão de escoamento não é definida e é usada a de ruptura dividida pelo coeficiente de segurança.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Diagrama Tensão (s) x Deformação (e)

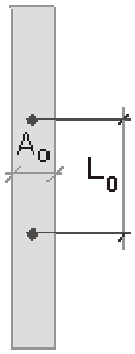
O diagrama s x **e** mostra uma relação entre estas duas grandezas através de uma linha definida em um gráfico **x/y** onde o eixo **x** representa as deformações e o eixo **y** representa as tensões.

A obtenção do diagrama tensão x deformação deve ser realizada para os diferentes tipos de material podendo ser feita através de um ensaio de tração.

Realização do ensaio de tração:

1. Toma-se uma barra circular de material homogêneo, com uma determinada seção transversal A_0. Sobre esta barra, marca-se dois pontos distantes L_0 um do outro.

Ensaio de Tração antes da Aplicação da Carga

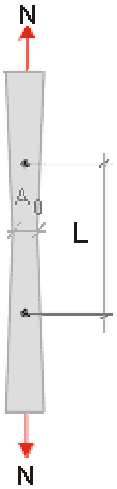


2.Submete-se esta barra a uma força normal **N** que **aumenta gradativamente.**

3. Para cada valor de N, calcula-se um d$\mathbf{L_P = L - L_0}$

4. Para cada valor de N, mede-se as modificações no diâmetro.

Ensaio de Tração após da Aplicação da Carga



5. Para cada valor de N, calcula-se a **tensão s = N / A_0**, ou seja, a medida que altera-se o valor da carga aplicada, altera-se o valor da tensão.

6. Para cada valor de N, calcula-se a **deformação específica e = dL_P/L_0**

7. Marca-se em gráfico os valores de s **x** e obtendo-se então o diagrama **tensão x deformação**.

O observação

O diagrama s **x** e varia de material para material e para um mesmo material, com diferentes composições.

A partir da relação entre tensão e deformação obtida com o ensaio anterior, pode-se definir dois tipos de materiais:

- Materiais dúteis
- Materiais frágeis

Materiais dúteis (aço estrutural e outros metais)

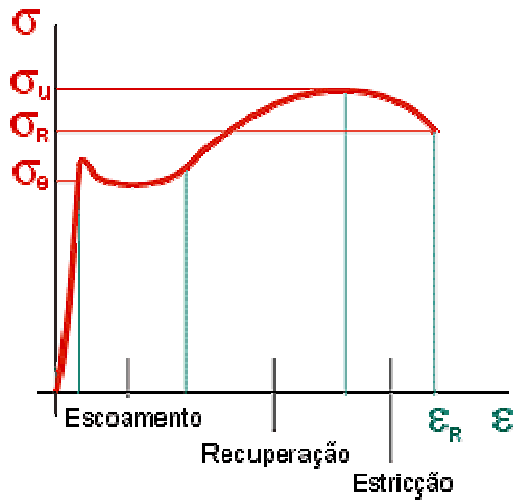


Diagrama tensão x deformação

s_u: tensão última (máxima tensão que se atinge)

s_R: tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca a ruptura do material)

s_e: tensão de escoamento

e_R: deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)

Fases de evolução do diagrama

1. Aumento lento do comprimento (pequena deformação), diretamente proporcional a uma grande carga aplicada (trecho reto da origem até a tensão de escoamento - **s_e**), com grande coeficiente angular (reta "quase" na vertical).

2. Longa deformação com pouco aumento da carga aplicada, ou seja, pequena variação da tensão (escoamento).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

3. Aumento da deformação proporcional ao aumento da carga aplicada, ou seja, da tensão. Este aumento ocorre até que a carga aplicada atinja um valor máximo, ou, uma tensão última - $\mathbf{s_u}$ (recuperação).

4. Diminuição do diâmetro do corpo (estricção). Uma diminuição da carga aplicada é suficiente para manter a deformação até a ruptura. ($\mathbf{s_R}$: tensão de ruptura; $\mathbf{e_R}$: deformação de ruptura).

Materiais frágeis (ferro fundido, vidro, pedra...)

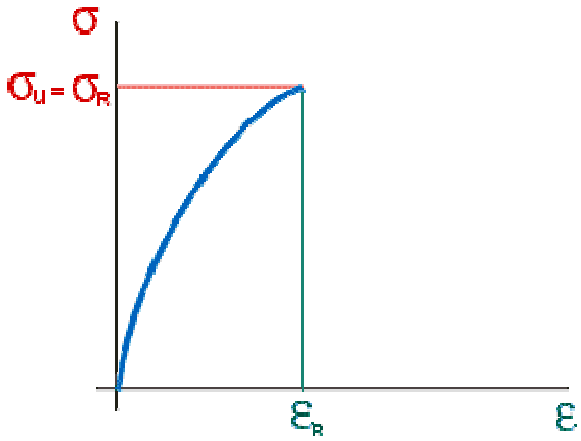


Diagrama tensão x deformação

$\mathbf{s_u}$: tensão última (máxima tensão que se atinge)

$\mathbf{s_R}$: tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca a ruptura do material)

$\mathbf{e_R}$: deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)

Fases da evolução do diagrama

Aumento da deformação proporcional ao aumento da carga aplicada até que se atinja a deformação de ruptura ($\mathbf{e_R}$) que corresponde à tensão de ruptura ($\mathbf{s_R}$) que é igual à tensão última ($\mathbf{s_u}$).

O observação

A deformação até a ruptura ($\mathbf{e_R}$) nos materiais frágeis é menor do que nos materiais rígidos, ou, para uma mesma tensão os materiais frágeis rompem antes que os dúteis.

O ensaio de compressão

Pergunta:

Será que o diagrama **s x e** obtido com ensaio de compressão, ao invés do ensaio de tração como foi visto até agora, seria o mesmo?

Resposta:

Para materiais dúteis: o ensaio de compressão poderia ser utilizado até a tensão última, mas a partir daí não, pois na compressão não ocorre a estricção (diminuição) do diâmetro da barra.

Para materiais frágeis: o ensaio de compressão não poderia ser utilizado pois a tensão última de compressão é muito maior do que a tensão última de tração (os materiais são mais resistentes ao esforço de compressão do que de tração), o que, provavelmente, causaria imperfeições nos resultados.

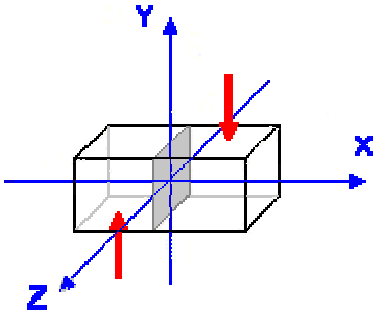
FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR



FORÇA CORTANTE

Definição:

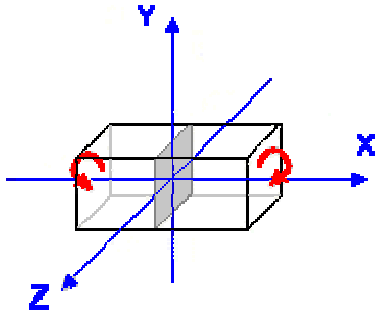
A Força Cortante representa a soma algébrica de todas forças contidas no plano YZ, perpendicular ao eixo da peça. Produzindo esforço que tende a deslizar uma seção em relação a outra, provocando tensões de cisalhamento.



MOMENTO FLETOR

Definição:

O Momento Fletor representa a soma algébrica dos momentos relativas a seção YX, contidos no eixo da peça, gerados por cargas aplicadas transversalmente ao eixo longitudinal. Produzindo esforço que tende a curvar o eixo longitudinal, provocando tensões normais de tração e compressão na estrutura.



Vigas

Quando dispomos de um elemento estrutural projetado para suportar diversas cargas em sua extensão, este elemento recebe o nome de viga. Estas vigas são normalmente sujeitas a cargas dispostas verticalmente, o que resultará em esforços de cisalhamento e flexão. Quando cargas não verticais são aplicadas a estrutura, surgirão forças axiais, o que tornará mais complexa a análise estrutural.

Vigas normalmente são barras retas e prismáticas, o que ocasiona maior resistência ao cisalhamento e flexão.

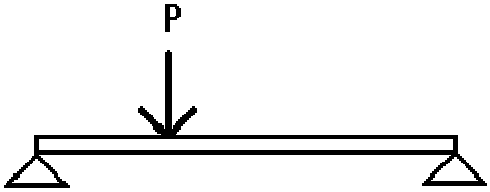
Quando se efetua o dimensionamento de uma viga, seja ela de qualquer material como aço, madeira, concreto, duas fases são definidas distintamente. A primeira fase é o cálculo dos esforços da estrutura, ou seja, o cálculo de momentos fletores e forças cortantes, ao qual a viga esta submetida aos vários tipos de carregamento. A segunda fase é o dimensionamento da peça propriamente dito, onde é verificada qual as dimensões necessárias da peça estrutural, que irá resistir aos esforços solicitados.

Tipos de Carregamento

Uma viga pode estar submetida a cargas concentradas, a cargas distribuídas ou combinação de ambas. Quando se trabalha com cargas distruibuídas, pode-se substituí-la por uma carga concentrada, e assim facilitar bastante os demais cálculos.

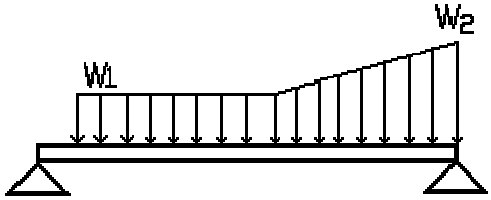
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

- **Carga Concentrada**



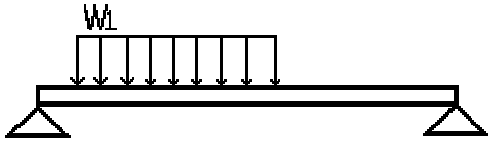
Este carregamento corresponde a aplicação de uma carga em um único ponto sobre a estrutura, sendo geralmente representado em kilograma-força(kgf) ou Newton(N).

- Carga Distribuída



Este carregamento corresponde a aplicação de uma carga por unidade de comprimento, geralmente representado em kilograma força por metro (kgf/m) ou Newton por centímetro (N/cm).

Quando a carga por unidade de comprimento possue valor constante, é atribuído o nome de *carga uniformemente distribuída.*



Exemplo de Carga Uniformemente Distruibuída

Tipos de Vinculações

Um vínculo é qualquer condição que restringe a possibilidade de deslocamento de um ponto do elemento ligado ao vínculo. O deslocamento de um ponto do elemento é determinado através das componentes segundo os eixos cartesianos ortogonais. As translações podem ser horizontais ou verticais e a rotação ocorre em torno do eixo perpendicular ao plano considerado.

As vinculações podem ser internos, também chamados de ligações internas, ou então externos, também chamados de apoios. A seguir será apresentado alguns tipos principais de apoios, por ser de fundamental importância para a compreensão de esforços em vigas. As demais vinculações serão vistas adiante.

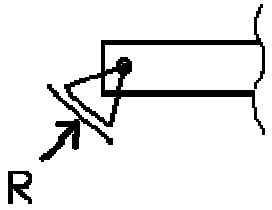
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Apoios (Vínculos Externos)

Apoio Articulado Móvel (Apoio Simples)

Este tipo de apoio restringe apenas uma translação, e a reação tem direção perpendicular ao plano de rolamento.

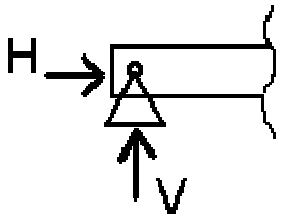




Apoio Articulado Fixo (Articulação)

Este tipo de apoio impede as duas translações no plano, e a direção da reação R é indeterminada, sendo comum a utilização de duas componentes, horizontal e vertical.

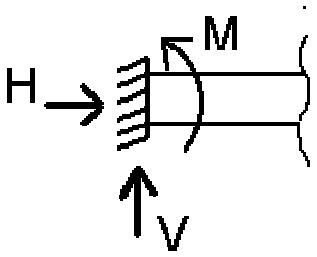




Apoio Engastado(Apoio de Engastamento Perfeito)

Este tipo de apoio impede todos os movimentos no plano, surgindo então três reações de apoio: a vertical (V), a horizontal (H) e momento (M).

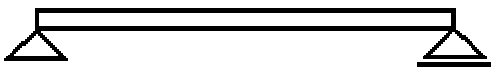




<u>Tipos de Vigas</u>

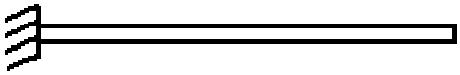
Viga Bi-apoiada

Consiste de uma viga apoiada em dois apoios articulados, sendo um fixo e o outro móvel.



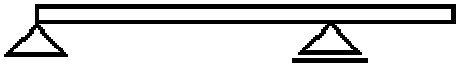
Viga em balanço

Consiste de uma viga que possue um apoio engastado, não sendo livre a sua rotação



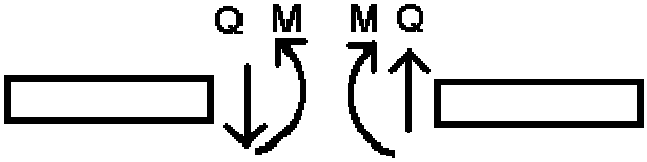
Viga com extremidade em balanço

Consiste de uma viga com extremidade em balanço, sendo articulada em um apoio fixo e um apoio móvel.



<u>Convenção de Sinais</u>

Para o cálculo de esforços internos a uma determinada estrutura, como será visto adiante, é necessário estabelecer uma convenção de sinais para cada parte da viga em análise



Positivo

<u>Cálculo de Momento Fletor e Força Cortante em uma viga submetida a uma carga concentrada</u>

Como exemplo, usaremos uma viga bi-apoiada de comprimento *L*, submetida a uma carga concentrada *P*, distante *a* e *b* dos apoios. Embora seja usada uma viga bi-apoiada, o entendimento pode se extendido para qualquer tipo de viga, e qualquer quantidade de forças aplicadas.

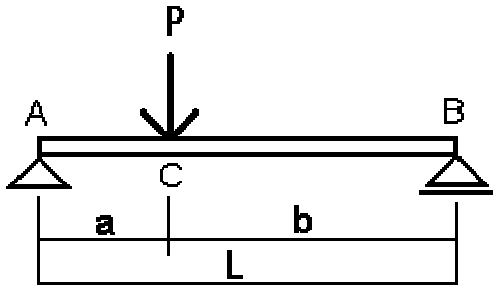
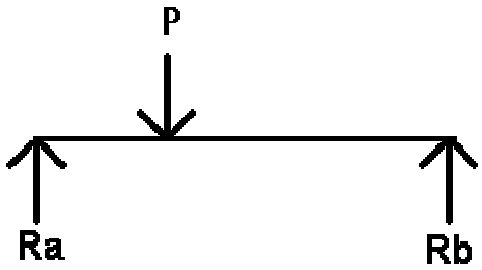


Diagrama de Corpo Livre



O primeiro passo é o cálculo das reações de apoio Ra e Rb, que são obtidos através do somatório dos momentos iguais a zero(corpo em equilíbrio) nos pontos A e B.

Ra = P. b / L

Rb = P. a / L

Para determinarmos por exemplo as forças internas em um ponto genérico C, uma maneira simples é primeiro desenharmos o diagrama de corpo livre da parte a ser estudada.

Diagrama de Corpo Livre (Esquerda do ponto C)

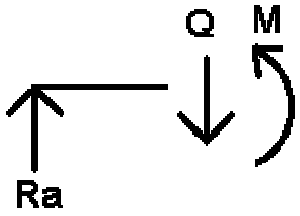
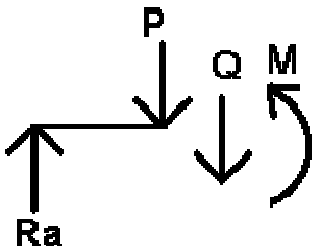


Diagrama de Corpo Livre (Direita do ponto C)



Cálculo da força cortante em C.

Com as reações já calculadas e analisando a figura, podemos facilmente encontrar o valor da força cortante no ponto C, através do somatório das forças verticais.

Como o ponto C, considerado para o cálculo dos esforços é exatamente o ponto de aplicação de uma força concentrada, teremos dois valores diferentes de força cortante, um a esquerda carga, ou seja, sem a plicação da carga P, e outra a direita, considerando a aplicação da carga P. Isto acontece porque o diagrama de forças cortantes ao passar no ponto onde existe uma carga concentrada, sofre uma descontinuidade, como será visto adiante, no diagrama.

$Q_{esq\ C} = Ra$

$Qdir_{C} = Ra - P$

Para o cálculo dos demais esforços cortantes ao longo da viga, procede-se com mesmo raciocínio.

Cálculo do Momento Fletor em C

Para o cálculo das forças cortantes em um determinado ponto, efetuou-se o somátorio das forças verticais de um corpo. Para o cálculo do momento fletor, procede de maneira análogo, porém faz-se o somatório dos momentos no ponto considerado, neste caso, o ponto C.

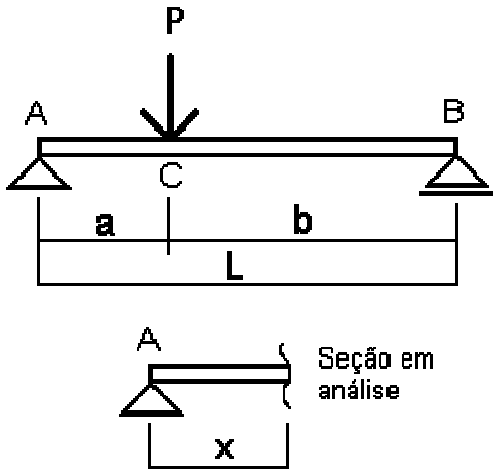
$M_C = Ra \ . \ a$

Para o cálculo dos demais momentos ao longo da viga, procede-se com mesmo raciocínio.

Diagrama de Momento Fletor e Força Cortante em uma viga submetida a uma carga concentrada

Se fosse calculados esforços de momento e força cortante em infinitas seções da viga em análise e após isso fosse traçado diagramas com esses valores, teríamos então representados os diagramas de momento fletor e força cortante da viga em análise. Na realidade não são efetuados infinitas seções, e sim algumas seções em locais apropriados, que permitam representam em sua totalidade os diagramas.

Para o traçado do diagrama, é usual, adotar-se para o diagrama de forças cortantes, positivo para cima e negativo para baixo, e o diagrama de momentos, positivo para baixo e negativo para cima, de maneira a salientar a tendência de flexão da viga.



Tendo como exemplo uma viga bi-apoiada de comprimento ***L***, submetida a uma carga concentrada, distanciada de ***a*** do apoio da esquerda, temos as seguintes equações para o traçado do diagrama:

Força Cortante

1) Para ***x*** variando entre **0** e **a**

Q = Ra

2) Para ***x*** variando entre **a** e **L**

Q = Ra - P = Rb

Momento Fletor

1) Para ***x*** variando entre **0** e **a**

M = Ra . x

2) Para ***x*** variando entre **a** e **L**

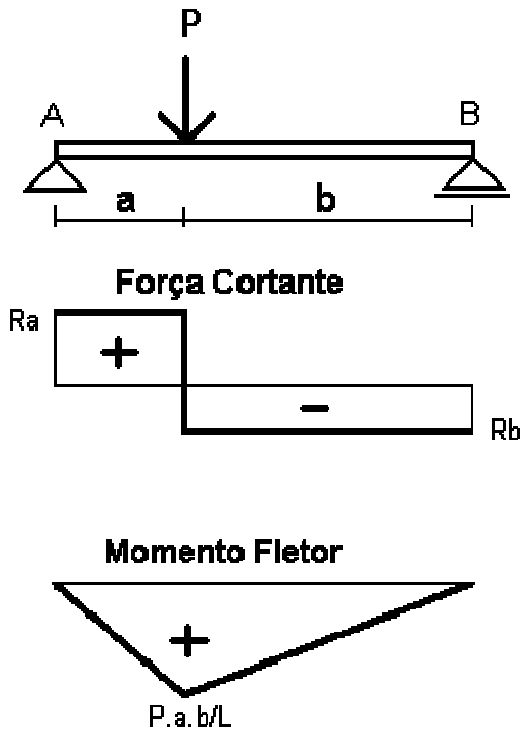
M = Ra . x - (x - a) . P

Momento Fletor Máximo

O momento fletor máximo ocorre no ponto onde temos a carga concentrada, então:

Mmáx = Ra . a - (a - a) . P = Ra . a = (P . b / L) . a = **P . a . b / L**

Diagrama



Quando uma viga suporta muitas cargas, o método de se fazer várias seções ao longo da barra, pode se tornar muito complicado. A construção do diagrama de força cortante e principalmente o de momento fletor pode ser bastante simplificado se

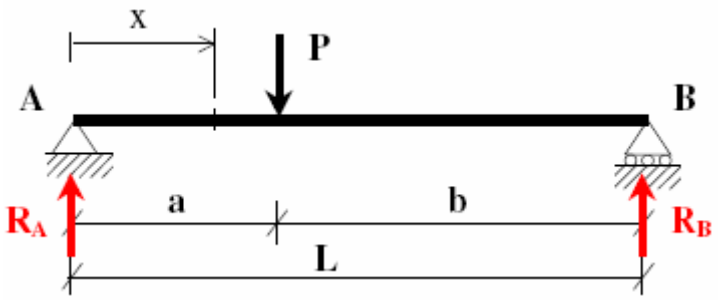
determinadas relações entre os diagramas de força cortante e momento fletor forem considerados.

Através de algumas deduções matemáticas, podemos chegar a seguinte conclusão:

$$\frac{dM}{dx} = Q$$

A derivada do momento fletor em relação a x é igual ao esforço cortante.
Com isso, basta simplesmente determinar as equações de qualquer um dos dois esforços, e através de simples derivação ou integração, podemos encontrar facilmente o outro esforço.

Nas vigas, força cortante e momento fletor normalmente variam de acordo com a distância, *x*, da posição da seção transversal em que ocorrem. Quando se projeta uma viga, é desejável que se conheçam os valores de *V* e *M* em todas as seções transversais e um modo adequado de obter essa informação é por meio de um gráfico que mostre a variação desses valores ao longo do eixo da viga. Para traçar esse gráfico, toma-se a posição da seção transversal como abscissa e os valores correspondentes da força cortante e do momento fletor como ordenadas. Tais gráficos são chamados *diagramas de forças cortantes e de momentos fletores.*



Como ilustração, considere-se uma viga simplesmente apoiada, **AB**, com uma carga concentrada **P** (acima). As reações dos apoios são:

$$R_A = \frac{Pb}{L}; \qquad R_B = \frac{Pa}{L}$$

Em qualquer seção transversal à esquerda de P, isto é, em qualquer seção em que 0<x<a, pode-se concluir, do equilíbrio, que:

$$V = \frac{Pb}{L}; \qquad M = \frac{Pb}{L}x \qquad \text{(a)}$$

Estas expressões mostram que a força cortante permanece constante do apoio A até o ponto de aplicação da carga, enquanto o momento fletor é função linear de *x*. Para *x* = 0, o momento é nulo; para *x*=*a*, é igual a Pab/L. Os diagramas correspondentes a essa parte, para a força cortante e para o momento fletor, encontram-se nas Figs. **a** e **b**, respectivamente.

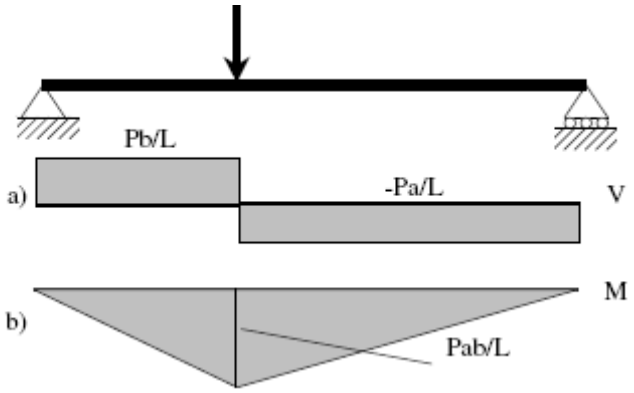


Figura 2

Para uma seção transversal à direita de P, isto é, para a<x<L, vem

$$V = \frac{Pb}{L} - P = -\frac{Pa}{L} \qquad M = \frac{Pb}{L}x - P(x-a) = Pa\left(1-\frac{x}{L}\right)$$

Verifica-se novamente que a força cortante é constante e que o momento fletor é função linear de *x*. Quando *x* = *a*, o momento fletor é Pab/L e quando *x* = *L* é nulo.

A Figs. 2a e b mostram os diagramas completos para a força cortante e momento fletor. Nota-se que a declividade dM/dx do diagrama de momentos fletores é igual a *V* e que a declividade dV/dx do diagrama de forças cortantes é -q (isto é, igual a zero). No ponto de aplicação de carga P, há uma variação brusca no diagrama de forças cortantes (igual a P) e uma variação correspondente no dos momentos fletores.

Ao estabelecer as expressões *b e c*, de forças cortantes e de momentos fletores, considerouse o equilíbrio da parte esquerda da viga, onde atuam duas forças, R_a e P. Teria sido mais simples, neste exemplo, considerar a parte da direita, onde age apenas a reação R_B (igual a Pa/L). Obter-seiam, diretamente, as equações:

$$V = -P\frac{a}{L} \qquad M = P\frac{a}{L}(L-x)$$

iguais às Eqs. (b) e (c), vistas anteriormente.

Nas aplicações práticas, é importante achar as seções transversais em que o momento fletor tem seus valores máximo e mínimo. No caso de cargas concentradas, como no exemplo precedente, o momento fletor máximo ocorrerá sempre num ponto de aplicação de carga. Sabe-se que a declividade do diagrama de momentos fletores, em qualquer ponto, é igual à força cortante. Assim, o momento fletor tem valores máximo ou mínimo nas seções transversais em que a força cortante muda de sinal. Se, percorrendo o eixo *x*,

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

a força cortante passar de positiva a negativa, a inclinação no diagrama de momentos fletores passará também de positiva a negativa e teremos, portanto, o momento fletor máximo nessa seção transversal. Inversamente, a passagem da força cortante de um valor negativo a outro positivo indica um momento fletor mínimo. No caso geral, o diagrama de forças cortantes pode interceptar o eixo horizontal em vários pontos. A cada um deles corresponde um máximo ou um mínimo no diagrama de momentos fletores. Os valores de todos esses máximos e mínimos devem ser investigados, para que se possa achar o momento fletor numericamente maior.

Considere-se, agora, o caso de uma viga simplesmente apoiada, com uma carga uniformemente distribuída (fig. 3 abaixo). As reações R_A e R_B são iguais a qL/2. Numa seção transversal, à distância *x* da extremidade esquerda A,

$$V = q\frac{L}{2} - qx \qquad\qquad M = q\frac{L}{2}x - q\frac{x^2}{2} \qquad \text{(j)}$$

Da primeira dessas equações, vê-se que o diagrama de forças cortantes consiste numa linha reta inclinada que tem nos pontos $x = 0$ e $x = L$ as ordenadas qL/2 e - qL/2, respectivamente. O diagrama de momentos fletores é uma parábola, simétrica em relação ao meio da viga. Os momentos fletores nas extremidades são nulos e o valor máximo ocorre no meio do vão, onde o diagrama de forças cortantes muda de sinal. Esse máximo é calculado fazendo $x = L/2$ na expressão (j), o que dá $M_{máx} = qL^2/8$.

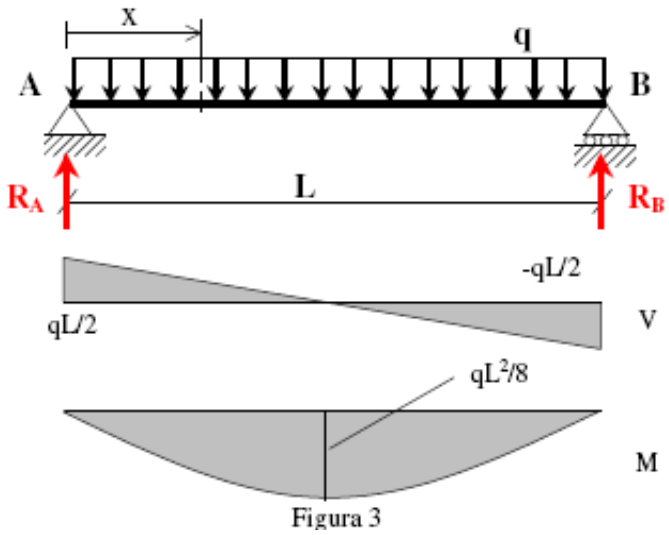


Figura 3

MOMENTO DE INÉRCIA DAS FIGURAS PLANAS

Momento de inércia de uma distribuição de massas pontuais

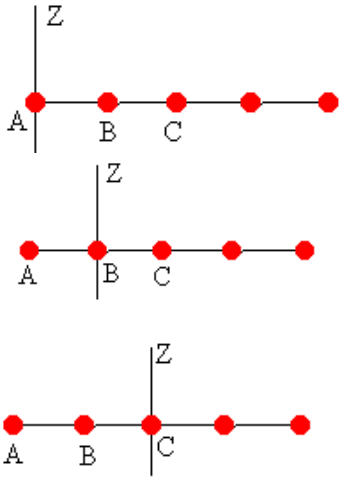
Temos que calcular a quantidade

$$I=\sum x_i^2 m_i$$

onde x_i é a distância da partícula de massa m_i ao eixo de rotação.

Uma varinha delgada de 1 m de comprimento tem uma massa desprezível. São colocados 5 massas de 1 kg cada uma, situadas a 0.0, 0.25, 0.50, 0.75, e 1.0 m de um dos extremos. Calcular o momento de inércia do sistema relativo a um eixo perpendicular a varinha que passa através de

- Um extremo
- Da segunda massa
- Do centro de massa



O momento de inércia relativo a um eixo perpendicular a varinha e que passa pela primeira partícula é

$I_A=1\cdot 0^2+1\cdot 0.25^2+1\cdot 0.5^2+1\cdot 0.75^2+1\cdot 1^2=1.875$ kgm^2

O momento de inércia relativo a um eixo perpendicular a varinha e que passa pela segunda partícula é

$I_B=1\cdot 0.25^2+1\cdot 0^2+1\cdot 0.25^2+1\cdot 0.5^2+1\cdot 0.75^2=0.9375$ kgm^2

O momento de inércia relativo a um eixo perpendicular a varinha e que passa pela terceira partícula (centro de massas) é

$I_C=1\cdot 0.5^2+1\cdot 0.25^2+1\cdot 0^2+1\cdot 0.25^2+1\cdot 0.5^2=0.625$ kgm^2

Em vez de calcular de forma direta os momentos de inércia, podemos calcular de forma indireta empregando o teorema de Steiner. Conhecido I_C podemos calcular I_A e I_B, sabendo as distâncias entre os eixos paralelos AC=0.5 m e BC=0.25 m.

A fórmula que temos que aplicar é

$$I=I_C+Md^2$$

- I_C é o momento de inércia do sistema relativo a um eixo que passa pelo centro de massa
- I é o momento de inércia relativo a um eixo paralelo ao anterior
- M é a massa total do sistema
- d é a distância entre os dois eixos paralelos.

$I_A=I_C+5\cdot 0.5^2=0.625+1.25=1.875$ kgm^2.

$I_B=I_C+5\cdot 0.25^2=0.625+0.3125=0.9375$ kgm^2.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Momento de inércia de uma distribuição contínua de massa

Passamos de uma distribuição de massas pontuais a uma distribuição contínua de massa. A fórmula que temos que aplicar é

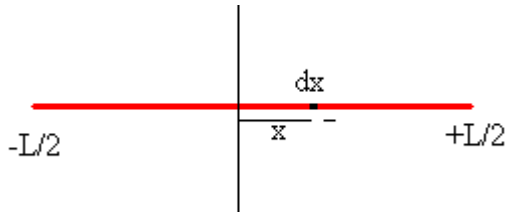
$$I = \int x^2 dm$$

dm é um elemento de massa situado a uma distância *x* do eixo de rotação

Resolveremos vários exemplos divididos em duas categorias

- Aplicação direta do conceito de momento de inércia
- Partindo do momento de inércia de um corpo conhecido

Momento de inércia de uma varinha



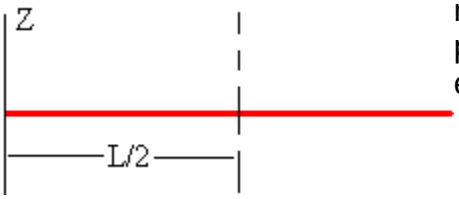
Vamos calcular o momento de inércia de uma varinha de massa *M*e comprimento *L* relativo a um eixo perpendicular a varinha que passa pelo centro de massas.

A massa *dm* do elemento de comprimento da varinha compreendido entre *x* e *x+dx* é

$$dm = \frac{M}{L} dx$$

O momento de inércia da varinha é

$$I_C = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{M}{L} x^2 dx = \frac{1}{12} ML^2$$



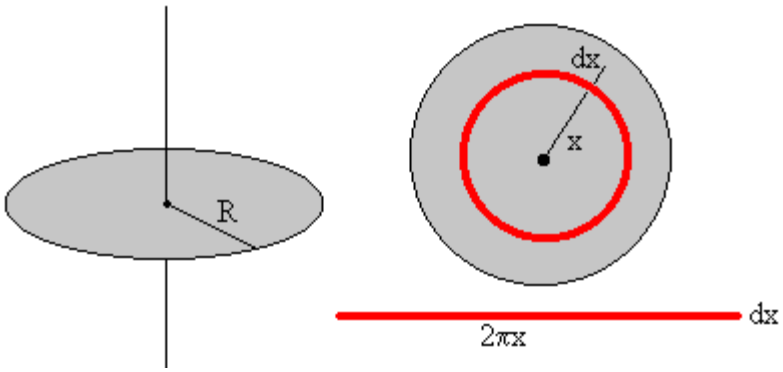
Aplicando o teorema de Steiner, podemos calcular o momento de inércia da varinha relativo a um eixo perpendicular a mesma que passa por um de seus extremos.

$$I = I_C + M\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} ML^2$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Momento de inércia de um disco

Vamos calcular o momento de inércia de um disco de massa *M* e raio *R* relativo a um eixo perpendicular ao plano do disco e que passa por seu centro.



Tomamos um elemento de massa que dista *x* do eixo de rotação. O elemento é um anel de raio *x* e de largura *dx*. Se recortamos o anel e o estendemos, é convertido em um retângulo de comprimento 2□*x* e largura *dx*, cuja massa é

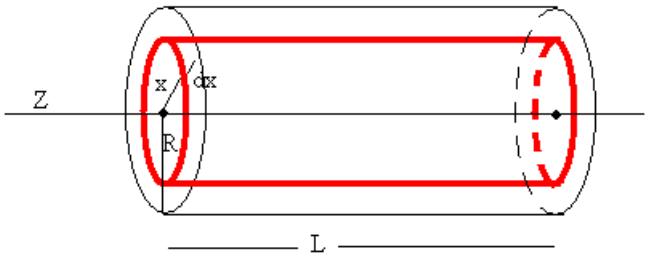
$$dm = \frac{M}{\pi R^2} 2\pi x dx = \frac{2M}{R^2} x dx$$

O momento de inércia do disco é

$$I_C = \int_0^R \frac{2M}{R^2} x^3 dx = \frac{1}{2} MR^2$$

Momento de inércia de um cilindro

Vamos calcular o momento de inércia de um cilindro de massa *M*, raio *R* e comprimento *L* relativo a seu eixo.



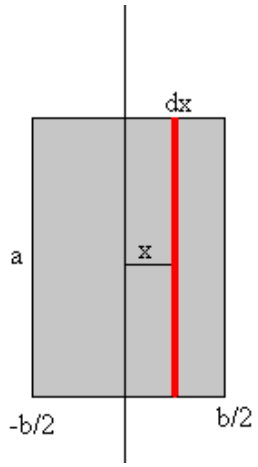
Tomamos um elemento de massa que dista *x* do eixo de rotação. O elemento é uma camada cilíndrica cujo raio interno é *x*, externo *x*+*dx*, e de comprimento *L*, tal como é mostrada na figura. A massa *dm* que contém esta camada é

$$dm = \frac{M}{\pi R^2 L} 2\pi x dx \cdot L = \frac{2M}{R^2} x dx$$

O momento de inércia do cilindro é

$$I_C = \int x^2 dm = \int_0^R \frac{2M}{R^2} x^3 dx = \frac{1}{2} MR^2$$

Momento de inércia de uma placa retangular



Vamos calcular o momento de inércia de uma placa retangular delgada de massa *M* de lados *a* e *b* relativo ao eixo que passa pela placa.

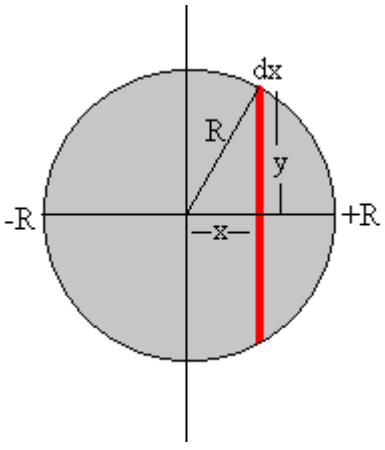
Tomamos um elemento de massa que dista *x* do eixo de rotação. O elemento é um retângulo de comprimento *a* de largura *dx*. A massa deste retângulo é

$$dm = \frac{M}{ab} a dx = \frac{M}{b} dx$$

O momento de inércia da placa retangular é

$$I_C = \int_{-b/2}^{b/2} \frac{M}{b} x^2 dx = \frac{1}{12} Mb^2$$

Momento de inércia de um disco



Vamos calcular o momento de inércia de um disco de massa *M* e raio *R*, relativo a um de seus diâmetros.

Tomamos um elemento de massa que dista *x* do eixo de rotação. O elemento é um retângulo de comprimento 2*y* de largura *dx*. A massa deste retângulo é

$$dm = \frac{M}{\pi R^2} 2y dx$$

O momento de inércia do disco é

$$I_y = \int_{-R}^{R} \frac{M}{\pi R^2} 2x^2 y dx$$

Fazendo a mudança de variável

$x=R\cdot\cos\theta$
$y=R\cdot\text{sen}\theta$

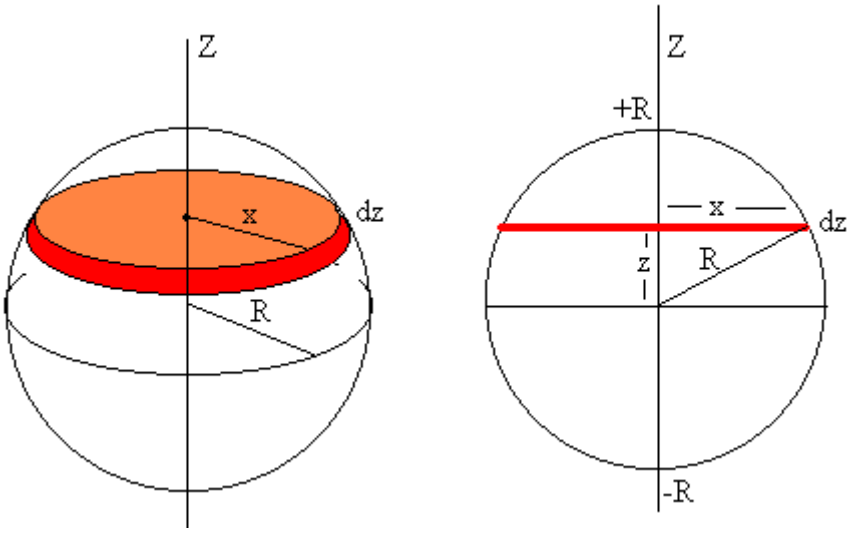
Chegamos a integral

$$I_C=\frac{2M}{\pi R^2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}R^4\text{sen}^2\theta\cos^2\theta\cdot d\theta=\frac{MR^2}{2\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\text{sen}^2 2\theta\cdot d\theta=$$

$$\frac{MR^2}{4\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}(1-\cos 4\theta)\cdot d\theta=\frac{1}{4}MR^2$$

Momento de inércia de uma esfera

Vamos calcular o momento de inércia de uma esfera de massa *M* e raio R relativo a um de seus diâmetros



Dividimos a esfera em discos de raio *x* e de espessura *dz*. O momento de inércia de cada um dos discos elementares é

$$\frac{1}{2}x^2dm$$

A massa de cada um dos discos é

$$dm=\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}\pi x^2dz=\frac{3M}{4R^3}x^2dz$$

O momento de inércia da esfera, é a soma dos momentos de inércia de todos os discos elementares.

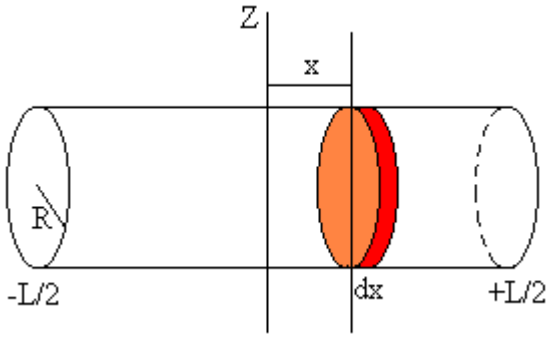
$$I_C = \int \frac{1}{2} x^2 dm = \int_{-R}^{R} \frac{1}{2} x^2 \frac{3M}{4R^3} x^2 dz = \frac{3M}{8R^3} \int_{-R}^{R} x^4 dz$$

Para resolver a integral temos que relacionar a variável *x* com a *z*. Como vemos na figura $x^2+z^2=R^2$

$$I_C = \frac{3M}{8R^3} \int_{-R}^{R} (R^2 - z^2)^2 dz = \frac{3M}{8R^3} \int_{-R}^{R} (R^4 + z^4 - 2R^2 z^2) dz = \frac{2}{5} MR^2$$

Momento de inércia de um cilindro

Vamos calcular o momento de inércia de um cilindro de massa *M*, raio *R* e comprimento *L*, relativo a um eixo perpendicular a sua geratriz e que passa por seu centro.



Dividimos o cilindro em discos de raio *R* e espessura *dx*. O momento de inércia de cada um dos discos relativo a um de seus diâmetros é

$$\frac{1}{4} R^2 dm = \frac{1}{4} R^2 \frac{M}{\pi R^2 L} \pi R^2 dx = \frac{M}{4L} R^2 dx$$

Aplicando o teorema de Steiner, calculamos o momento de inércia deste disco, relativo a um eixo paralelo situado a uma distância *x*.

$$\frac{1}{4} R^2 dm + x^2 dm = \left(\frac{1}{4} R^2 + x^2\right) \frac{M}{\pi R^2 L} \pi R^2 dx = \left(\frac{1}{4} R^2 + x^2\right) \frac{M}{L} dx$$

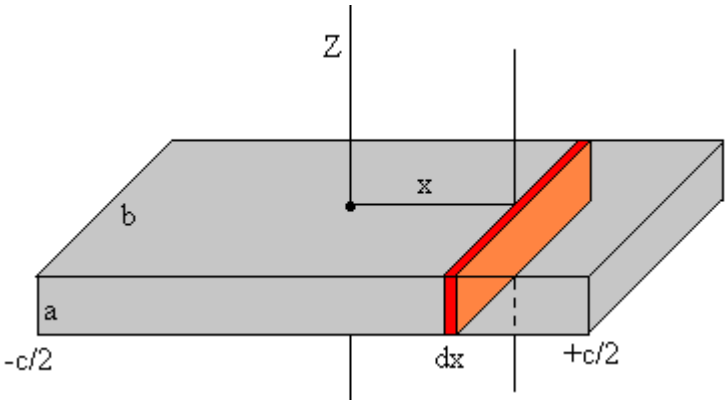
O momento de inércia do cilindro é

$$I_C = \int_{-L/2}^{L/2} \left(\frac{1}{4} R^2 + x^2\right) \frac{M}{L} dx = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Momento de inércia de um paralelepípedo

Vamos calcular o momento de inércia de um paralelepípedo de massa *M* e de lados *a*, *b* e *c* relativo a um eixo perpendicular a uma de suas faces.



Dividimos o paralelepípedo em placas retangulares de lados *a* e *b* e de espessura *dx*.

O momento de inércia de cada uma das placas relativo seu eixo de simetria é

$$\frac{1}{12}b^2 dm$$

Aplicando o teorema de Steiner, calculamos o momento de inércia desta placa relativo a um eixo paralelo situado a uma distância *x* é

$$\frac{1}{12}b^2 dm + x^2 dm = \left(\frac{1}{12}b^2 + x^2\right)\frac{M}{abc}ab\cdot dx = \left(\frac{1}{12}b^2 + x^2\right)\frac{M}{c}dx$$

O momento de inércia do sólido em forma de paralelepípedo é

$$\int_{-c/2}^{c/2}\left(\frac{1}{12}b^2 + x^2\right)\frac{M}{c}dx = \frac{M}{12}(b^2 + c^2)$$

TEORIA DA ELASTICIDADE

Elasticidade é o ramo da física que estuda o comportamento de corpos materiais que se deformam ao serem submetidos a ações externas (forças devidas ao contato com outros corpos, ação gravitacional agindo sobre sua massa, etc.), retornando à sua forma original quando a ação externa é removida.

Até um certo limite, dependente do material e temperatura, as tensões aplicadas são aproximadamente proporcionais às deformações. A constante de proporcionalidade entre elas é chamada módulo de elasticidade ou módulo de Young. Quanto maior esse módulo, maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, e portanto mais rígido é o material. A relação linear entre essas grandezas é conhecida como lei de Hooke.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A elasticidade linear, entretanto, é uma aproximação; os materiais reais exibem algum grau de comportamento não-linear.

A **teoria da elasticidade** estuda de forma rigorosa a determinação das tensões, deformações e da relação entre elas para um sólido tridimensional.

Aplicação

O projeto de estruturas na construção civil usa as equações derivadas da teoria da elasticidade para dimensionar as colunas, vigas e lajes. De acordo com o peso que esses elementos vão suportar, além de seu peso próprio, e dos materiais utilizados (concreto ou aço), as máximas tensões calculadas não podem exceder o seu **limite de escoamento**. Como ilustração, o módulo de elasticidade do aço comum, usado nas perfis estruturais é de 21000 kgf/mm2 e o limite de escoamento é de cerca de 36 kgf/mm2.Um fio de aço de 2 milímetros de diâmetro e 1 metro de comprimento, com uma pessoa pendurada a ele pesando 60 kg, fica aproximadamente 1 milímetro maior devido a esse peso, e não se rompe. Volta a ficar com 1m após ser liberado da carga.

Na construção mecânica, principalmente na aviação, onde não se pode abusar do recurso de superdimensionar os elementos estruturais para aumentar sua resistência, (o avião ficaria desnecessariamente pesado e portanto anti-econômico), o cálculo preciso é fundamental. Como as formas muitas vezes são complexas e difíceis de equacionar matematicamente, a solução é o uso da aproximação pelo método dos elementos finitos. Com o crescente poder de computação, esse método passou a ser largamente utilizado pela indústria a partir do final do século XX.

Inelasticidade

Acima de uma determinada tensão, conhecida como limite elástico ou **limite de escoamento**, a relação entre tensões e deformações se quebra. Além deste limite, o sólido pode deformar-se irreversivelmente, exibindo um comportamento plástico. O início da deformação plástica significa normalmente o colapso de uma estrutura.

Além disso, não só os sólidos exibem elasticidade. Alguns fluidos não-Newtonianos, como os fluidos viscoelasticos, também vão exibir elasticidade em certas condições.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

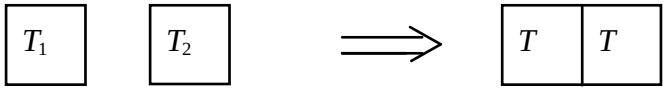
TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

1. INTRODUÇÃO

1.1. O QUE É e COMO SE PROCESSA?

Transferência de Calor (ou Calor) é energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor.

Por exemplo, se dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato direto, como mostra a figura 1.1, ocorrera uma transferência de calor do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura até que haja equivalência de temperatura entre eles. Dizemos que o sistema tende a atingir o equilíbrio térmico.



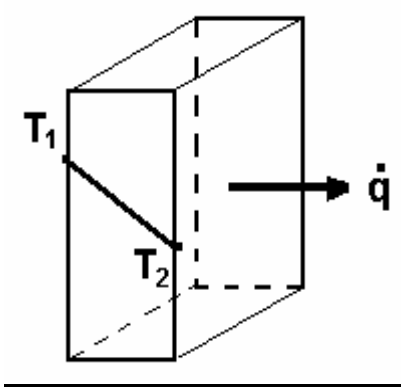
Se $T_1 > T_2$ ➔ $T_1 > T > T_2$

[figura 1.1]

Está implícito na definição acima que um corpo nunca contém calor, mas calor é indentificado com tal quando cruza a fronteira de um sistema. O calor é portanto um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura.

Os diferentes processos de transferência de calor são referidos como mecanismos de transferência de calor. Existem três mecanismos, que podem ser reconhecidos assim :

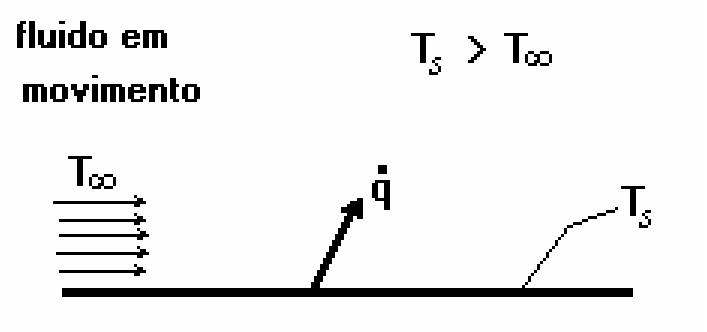
- Quando a transferência de energia ocorrer em um **meio estacionário**, que pode ser um sólido ou um fluido, em virtude de um gradiente de temperatura, usamos o termo transferência de calor por condução. A figura 1.2 ilustra a transferência de calor por condução através de uma parede sólida submetida à uma diferença de temperatura entre suas faces.



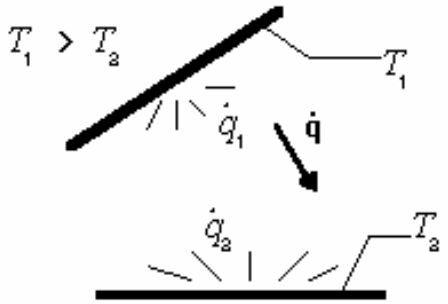
[figura 1.2]

- Quando a transferência de energia ocorrer entre uma **superfície e um fluido** em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles, usamos o termo transferência de calor por convecção. A figura 1.3 ilustra a transferência de calor de calor por convecção quando um fluido escoa sobre uma placa aquecida.

- Quando, na **ausência de um meio interveniente**, existe uma troca líquida de energia (emitida na forma de ondas eletromagnéticas) entre duas superfícies a diferentes temperaturas, usamos o termo radiação. A figura 1.4 ilustra a transferência de calor por radiação entre duas superfícies a diferentes temperaturas.



[figura 1.3]



[figura 1.4]

1.2. RELAÇÃO ENTRE A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E A TERMODINÂMICA

Termodinâmica trata da relação entre o calor e as outras formas de energia. A energia pode ser transferida através de interações entre o sistema e suas vizinhanças. Estas interações são denominadas calor e trabalho.

- A 1ª Lei da Termodinâmica governa quantitativamente estas interações

$$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

A 1ª Lei da Termodinâmica pode ser enunciada assim :

"A variação líquida de energia de um sistema é sempre igual a transferência líquida de energia na forma de calor e trabalho".

- A 2ª Lei da Termodinâmica aponta a direção destas interações

A 2ª Lei da Termodinâmica pode ser enunciada assim :

"É impossível o processo cujo único resultado seja a transferência líquida de calor de um região fria para uma região quente".

Porém existe uma diferença fundamental entre a transferência de calor e a termodinâmica.

Embora a termodinâmica trate das interações do calor e o papel que ele desempenha na primeira e na segunda leis, ela não leva em conta nem o mecanismo de transferência nem os métodos de cálculo da **taxa de transferência de calor**.

A termodinâmica trata com estados de equilíbrio da matéria onde inexiste gradientes de temperatura. Embora a termodinâmica possa ser usada para determinar a quantidade de energia requerida na forma de calor para um sistema passar de um estado de equilíbrio para outro, ela não pode quantificar a **taxa** (velocidade) na qual a transferência do calor ocorre.

A disciplina de transferência de calor procura fazer aquilo o que a termodinâmica é inerentemente incapaz de fazer.

1.3. RELEVÂNCIA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é fundamental para todos os ramos da engenharia. Assim como o engenheiro mecânico enfrenta problemas de refrigeração de motores, de ventilação, ar condicionado, etc., o engenheiro metalúrgico não pode dispensar a transferência de calor nos problemas relacionados aos processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, ou no projeto de fornos, regeneradores, conversores, etc.

Em nível idêntico, o engenheiro químico ou nuclear necessita da mesma ciência em estudos sobre evaporação , condensação ou em trabalhos em refinarias e reatores, enquanto o eletricista e o eletrônico a utiliza no cálculo de transformadores e geradores e dissipadores de calor em microeletrônica e o engenheiro naval aplica em profundidade a transferência de calor em caldeiras, máquinas térmicas, etc.

Até mesmo o engenheiro civil e o arquiteto sentem a importância de, em seus projetos, preverem o isolamento térmico adequado que garanta o conforto dos ambientes.

Como visto, a transferência de calor é importante para a maioria de problemas industriais e ambientais. Como exemplo de aplicação, consideremos a vital área de produção e conversão de energia :

- na geração de eletricidade (hidráulica, fusão nuclear, fóssil, geotérmica, etc) existem numerosos problemas que envolvem condução, convecção e radiação e estão relacionados com o projeto de caldeiras, condensadores e turbinas.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

- existe também a necessidade de maximizar a transferência de calor e manter a integridade dos materiais em altas temperaturas

- é necessário minimizar a descarga de calor no meio ambiente, evitando a poluição térmica através de torres de refrigeração e recirculação.

Os processos de transferência de calor afetam também a performance de sistemas de propulsão (motores a combustão e foguetes). Outros campos que necessitam de uma análise de transferência de calor são sistemas de aquecimento, incineradores, armazenamento de produtos criogênicos, refrigeração de equipamentos eletrônicos, sistemas de refrigeração e ar condicionado e muitos outros.

1.4. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De modo a se obter maior produtividade, a resolução de problemas de transferência de calor deve seguir um procedimento sistemático que evite a "tentativa-e-erro". Este procedimento pode ser resumido em 5 itens :

1. **Saber** : Leia cuidadosamente o problema

2. **Achar** : Descubra o que é pedido

3. **Esquematizar** : Desenhe um esquema do sistema. Anote o valor das propriedades

4. **Resolver** : Desenvolver a resolução mais completa possível antes de substituir os valores numéricos. Realizar os cálculos necessários para obtenção dos resultados.

5. **Analisar** : Analise seus resultados. São coerentes? Comente se necessário

2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor pode ser definida como a transferência de energia de uma região para outra como resultado de uma diferença de temperatura entre elas.

É necessário o entendimento dos mecanismos físicos que permitem a transferência de calor de modo a poder quantificar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo (taxa).

Os mecanismos são:

- Condução

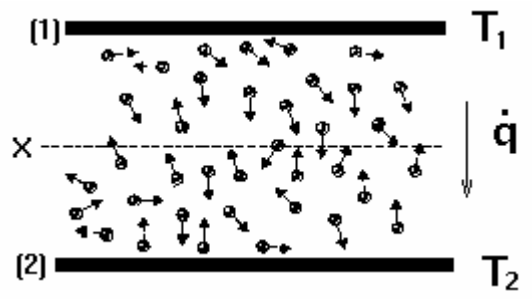
- Radiação } dependem somente de um ΔT

- Convecção $\Rightarrow$ depende de um ΔT e transporte de massa

2.1. CONDUÇÃO

A condução pode se definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser visualizado como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas.

O mecanismo da condução pode ser mais facilmente entendido considerando, como exemplo, um gás submetido a uma diferença de temperatura. A figura 2.1 mostra um gás entre duas placas a diferentes temperaturas :



[figura 2.1]

1. O gás ocupa o espaço entre 2 superfícies (1) e (2) mantidas a diferentes temperaturas de modo que $T_1 > T_2$ (o gás não tem movimento macroscópico);

2. Como altas temperaturas estão associadas com energias moleculares mais elevadas, as moléculas próximas à superfície são mais energéticas (movimentam-se mais rápido);

3. O plano hipotético X é constantemente atravessado por moléculas de cima e de baixo. Entretanto, as moléculas de cima estão associadas com mais energia que as de baixo.

➔Portanto existe uma transferência líquida de energia de (1) para (2) por condução

Para os líquidos o processo é basicamente o mesmo, embora as moléculas estejam menos espaçadas e as interações sejam mais fortes e mais freqüentes. Para os sólidos existem basicamente dois processos (ambos bastante complexos) :

- sólido mau condutor de calor : ondas de vibração da estrutura cristalina

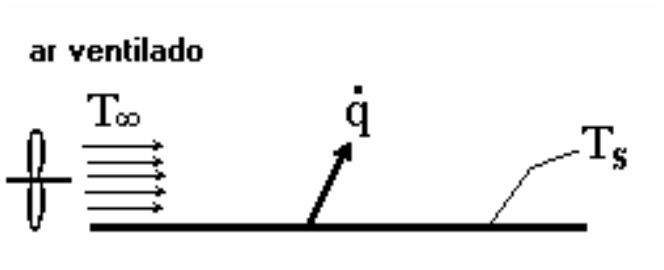
- sólido bom condutor de calor: movimento dos eletrons livres e vibração da estrutura cristalina.

2.2. CONVECÇÃO

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de : condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O mecanismo da convecção pode ser mais facilmente entendido considerando, por exemplo, um circuito impresso (chip) sendo refrigerado (ar ventilado), como mostra a figura 2.2 :



[figura 2.2]

1. A velocidade da camada de ar próxima à superfície é muito baixa em razão das forças viscosas (atrito).

2. Nesta região o calor é transferido por condução. Ocorre portanto um armazenamento de energia pelas partículas presentes nesta região.

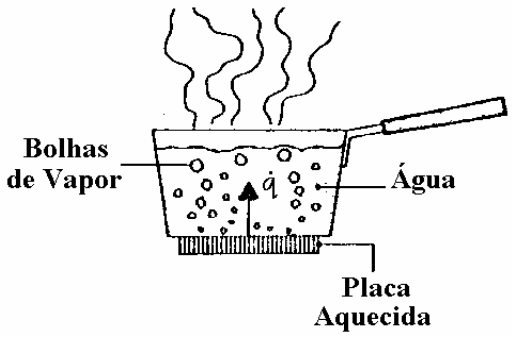
3. Na medida que estas partículas passam para a região de alta velocidade, elas são carreadas pelo fluxo transferindo calor para as partículas mais frias.

➔No caso acima dizemos que a convecção foi forçada, pois o movimento de mistura foi induzido por um agente externo, no caso um ventilador.

Suponhamos que o ventilador seja retirado. Neste caso, as partículas que estão próximas à superfície continuam recebendo calor por condução e armazenando a energia. Estas partículas tem sua temperatura elevada e, portanto a densidade reduzida. Já que são mais leves elas sobem trocando calor com as partículas mais frias (e mais pesadas) que descem.

➔Neste caso dizemos que a convecção é natural (é óbvio que no primeiro caso a quantidade de calor transferido é maior).

Um exemplo bastante conhecido de convecção natural é o aquecimento de água em uma panela doméstica como mostrado na figura 2.3. Para este caso, o movimento das moléculas de água pode ser observado visualmente.



[figura 2.3]

2.3. RADIAÇÃO

A radiação pode se definida como o processo pelo qual calor é transferido de um superfície em alta temperatura para um superfície em temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas.

O exemplo mais evidente que podemos dar é o próprio calor que recebemos do sol. Neste caso, mesmo havendo vácuo entre a superfície do sol (cuja temperatura é aproximadamente 5500 ^{o}C) e a superfície da terra, a vida na terra depende desta energia recebida. Esta energia chega até nós na forma de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raio-X, ondas de rádio e TV, microondas e outros tipos de radiações.

As emissões de ondas eletromagnéticas podem ser atribuídas a variações das configurações eletrônicas dos constituintes de átomos e moléculas, e ocorrem devido a vários fenômenos, porém, para a transferência de calor interessa apenas as ondas eletromagnéticas resultantes de uma diferença de temperatura (radiações térmicas). As suas características são:

- Todos corpos em temperatura acima do zero absoluto emitem continuamente radiação térmica

- As intensidades das emissões dependem somente da temperatura e da natureza da superfície emitente

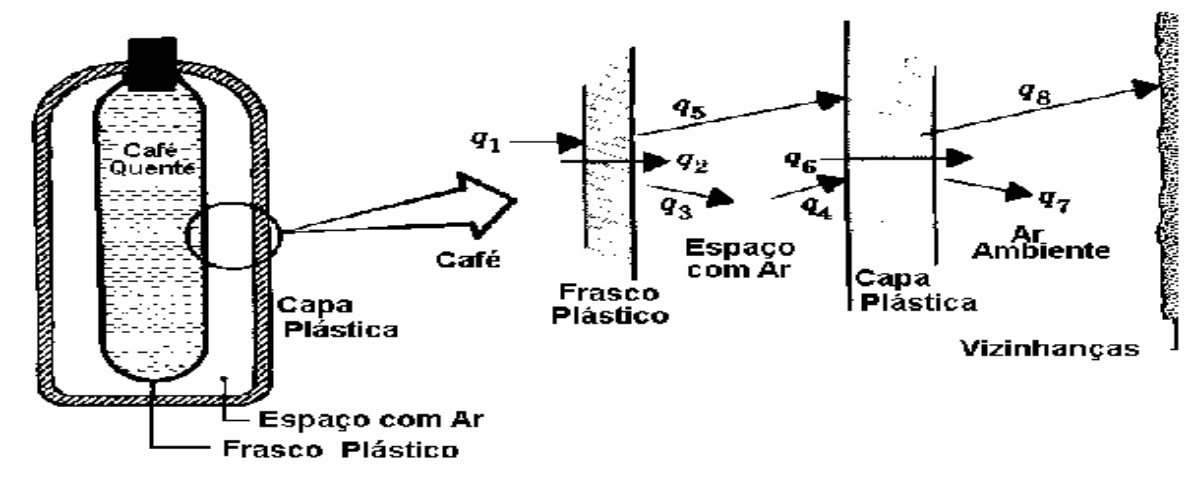
- A radiação térmica viaja na velocidade da luz (300.000 Km/s)

2.4. MECANISMOS COMBINADOS

Na maioria das situações práticas ocorrem ao mesmo tempo dois ou mais mecanismos de transferência de calor atuando ao mesmo tempo. Nos problemas da engenharia, quando um dos mecanismos domina quantitativamente, soluções aproximadas podem ser obtidas desprezando-se todos, exceto o mecanismo dominante. Entretanto, deve ficar entendido que variações nas condições do problema podem fazer com que um mecanismo desprezado se torne importante.

Como exemplo de um sistema onde ocorrem ao mesmo tempo vários mecanismo de transferência de calor consideremos uma garrafa térmica. Neste caso, podemos ter a atuação conjunta dos seguintes mecanismos esquematizados na figura 2.4 :

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com



[figura 2.4]

q_1 : convecção natural entre o café e a parede do frasco plástico

q_2 : condução através da parede do frasco plástico

q_3 : convecção natural do frasco para o ar

q_4 : convecção natural do ar para a capa plástica

q_5 : radiação entre as superfícies externa do frasco e interna da capa plástica

q_6 : condução através da capa plástica

q_7 : convecção natural da capa plástica para o ar ambiente

q_8 : radiação entre a superfície externa da capa e as vizinhanças

Melhorias estão associadas com (1) uso de superfícies aluminizadas (baixa emissividade) para o frasco e a capa de modo a reduzir a radiação e (2) evacuação do espaço com ar para reduzir a convecção natural.

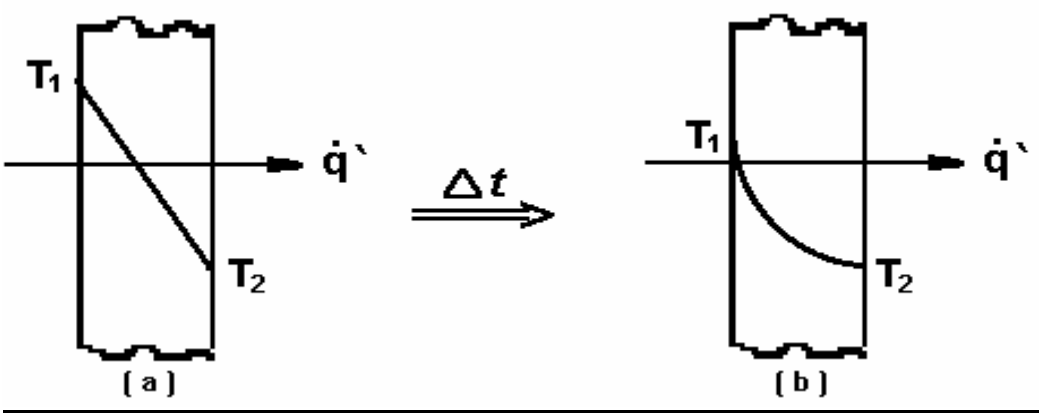
2.5. REGIMES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O conceito de regime de transferência de calor pode ser melhor entendido através de exemplos. Analisemos, por exemplo, a transferência de calor através da parede de uma estufa qualquer. Consideremos duas situações : operação normal e desligamento ou religamento.

Durante a operação normal, enquanto a estufa estiver ligada a temperatura na superfície interna da parede não varia. Se a temperatura ambiente externa não varia significativamente, a temperatura da superfície externa também é constante. Sob estas condições a quantidade de calor transferida para fora é constante e o perfil de temperatura

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

ao longo da parede, mostrado na figura 2.5.(a), não varia. Neste caso, dizemos que estamos no regime permanente.



[figura 2.5]

Na outra situação consideremos, por exemplo, o desligamento. Quando a estufa é desligada a temperatura na superfície interna diminui gradativamente, de modo que o perfil de temperatura varia com o tempo, como pode ser visto da figura 2.5.(b). Como consequência, a quantidade de calor transferida para fora é cada vez menor. Portanto, a temperatura em cada ponto da parede varia. Neste caso, dizemos que estamos no regime transiente.

Os problemas de fluxo de calor em regime transiente são mais complexos. Entretanto, a maioria dos problemas de transferência de calor são ou podem ser tratados como regime permanente.

2.6. SISTEMAS DE UNIDADES

As **dimensões** fundamentais são quatro : tempo, comprimento, massa e temperatura. **Unidades** são meios de expressar numericamente as dimensões.

Apesar de ter sido adotado internacionalmente o sistema métrico de unidades denominado sistema internacional (S.I.), o sistema inglês e o sistema prático métrico ainda são amplamente utilizados em todo o mundo. Na tabela 2.1 estão as unidades fundamentais para os três sistemas citados :

Tabela 2.1 - Unidades fundamentais dos sistemas de unidades mais comuns

SISTEMA	TEMPO, t	COMPRIMENTO, L	MASSA ,m	TEMPERATURA
S.I.	segundo,s	metro,m	quilograma,kg	Kelvin,k
INGLÊS	segundo,s	pé,ft	libra-massa,lb	Farenheit,^{o}F
MÉTRICO	segundo,s	metro,m	quilograma,kg	celsius,^{o}C

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Unidades derivadas mais importantes para a transferência de calor, mostradas na tabela 2.2, são obtidas por meio de definições relacionadas a leis ou fenômenos físicos :

- Lei de Newton : Força é igual ao produto de massa por aceleração (F = m.a), então :

  1 **Newton (N)** é a força que acelera a massa de 1 **Kg** a 1 **m/s^2**

- Trabalho (Energia) tem as dimensões do produto da força pela distância (τ = F.x), então :

  1 **Joule (J)** é a energia dispendida por uma força de 1 **N** em 1 **m**

- Potência tem dimensão de trabalho na unidade de tempo (P = τ / t), então :

  1 **Watt (W)** é a potência dissipada por uma força de 1 **J** em 1 **s**

Tabela 2.2 - Unidades derivadas dos sistemas de unidades mais comuns

SISTEMA	FORÇA,F	ENEGIA,E	POTÊNCIA,P
S.I.	Newton,N	Joule,J	Watt,W
INGLÊS	libra-força,lbf	lbf-ft (Btu)	Btu/h
MÉTRICO	kilograma-força,kgf	kgm (kcal)	kcal/h

As unidades mais usuais de energia (Btu e Kcal) são baseadas em fenômenos térmicos, e definidas como :

Btu é a energia requerida na forma de calor para elevar a temperatura de 1lb de água de 67,5 ^oF a 68,5 ^oF

Kcal é a energia requerida na forma de calor para elevar a temperatura de 1kg de água de 14,5 ^oF a 15,5 ^oF

Em relação ao calor transferido, as seguintes unidades que são, em geral, utilizadas :

$\dot{q}$ - fluxo de calor transferido (potência) : W, Btu/h, Kcal/h

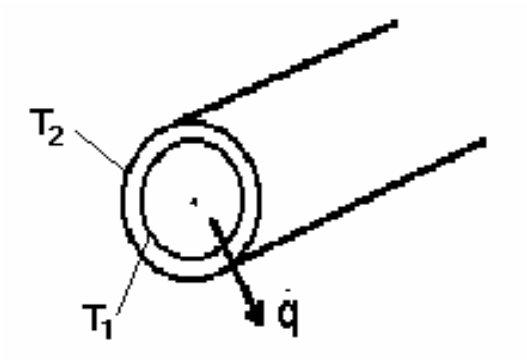
Q- quantidade de calor transferido (energia) : J, Btu, Kcal

CONDUÇÃO DE CALOR EM REGIME PERMANENTE

3. CONDUÇÃO DE CALOR UNIDIMENSIONAL EM REGIME PERMANENTE

No tratamento **unidimensional** a temperatura é função de apenas uma coordenada. Este tipo de tratamento pode ser aplicado em muitos dos problemas industriais. Por exemplo, no caso da transferência de calor em um sistema que consiste de um fluido que escoa ao longo de um tubo (figura 3.1), a temperatura da parede do tubo pode ser considerada

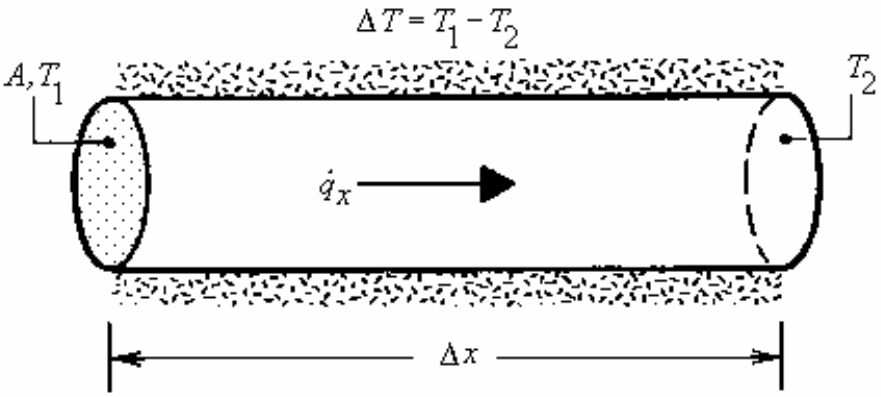
função apenas do raio do tubo. Esta suposição é válida se o fluido escoa uniformemente ao longo de toda a superfície interna e se o tubo não for longo o suficiente para que ocorram grandes variações de temperatura do fluido devido à transferência de calor.



[figura 3.1]

3.1. LEI DE FOURIER

A lei de Fourier é fenomenológica, ou seja, foi desenvolvida a partir da observação dos fenômenos da natureza em experimentos. Imaginemos um experimento onde o fluxo de calor resultante é medido após a variação das condições experimentais. Consideremos, por exemplo, a transferência de calor através de uma barra de ferro com uma das extremidades aquecidas e com a área lateral isolada termicamente, como mostra a figura 3.2 :



[figura 3.2]

Com base em experiências, variando a área da seção da barra, a diferença de temperatura e a distância entre as extremidades, chega-se a seguinte relação de proporcionalidade:

$$\dot{q} \alpha A. \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad \text{(eq. 3.1)}$$

A proporcionalidade pode se convertida para igualdade através de um coeficiente de proporcionalidade e a Lei de Fourier pode ser enunciada assim:

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

"A quantidade de calor transferida por condução, na unidade de tempo, em um material, é igual ao produto das seguintes quantidades:

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx} \qquad \text{(eq. 3.2)}$$

onde,

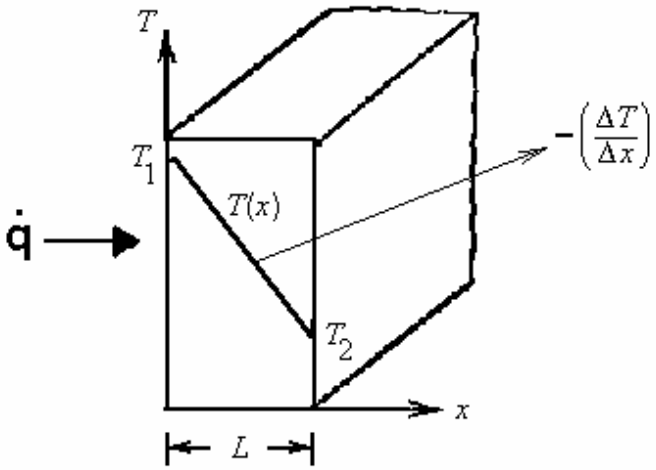
$\dot{q}$, fluxo de calor por condução (Kcal/h no sistema métrico);

k, condutividade térmica do material;

A, área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo (m^2);

dT/dx, gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão de variação da temperatura T com a distância, na direção x do fluxo de calor ($^oC/h$) ."

A razão do sinal menos na equação de Fourier é que a direção do aumento da distância x deve ser a direção do fluxo de calor positivo (figura 3.3). Como o calor flui do ponto de temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa (gradiente negativo), o fluxo só será positivo quando o gradiente for positivo (multiplicado por -1).



[figura 3.3]

O fator de proporcionalidade k (condutividade térmica) que surge da equação de Fourier é uma propriedade de cada material e vem exprimir a maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor. Sua unidade é facilmente obtida da própria equação de Fourier (equação 3.2), por exemplo no sistema prático métrico temos :

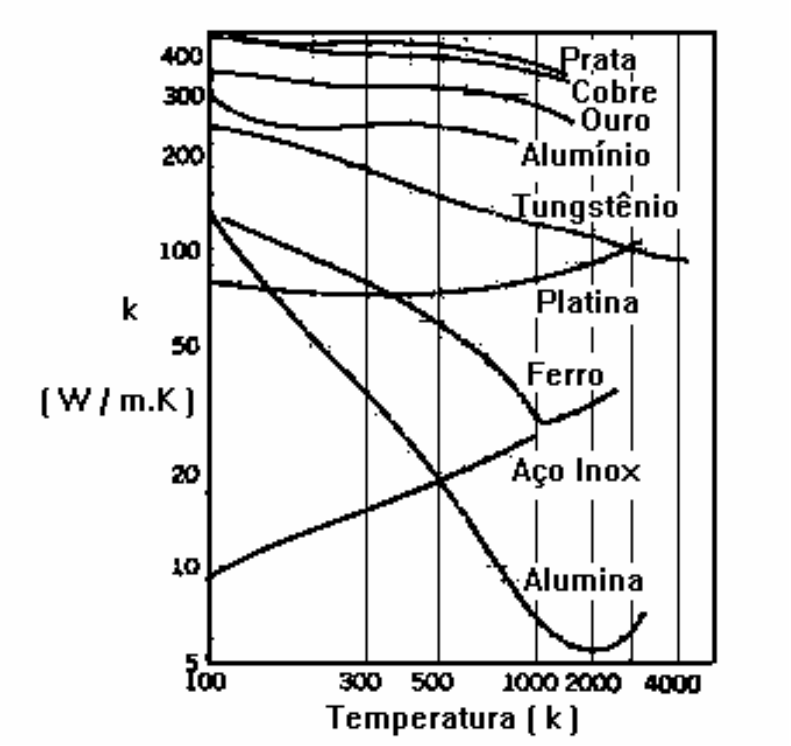
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx} \Rightarrow k = -\frac{\dot{q}}{A.\frac{dT}{dx}} \left(\frac{Kcal/h}{m^2 \frac{^oC}{m}} = \frac{Kcal}{h.m.^oC} \right) \qquad \text{(eq. 3.3)}$$

No sistema inglês fica assim : $\frac{Btu}{h.\,ft.^oF}$

No sistema internacional (SI), fica assim : $\frac{W}{m.K}$

Os valores numéricos de k variam em extensa faixa dependendo da constituição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de k é elevado o material é considerado **condutor térmico** e, caso contrário, **isolante térmico**. Com relação à temperatura, em alguns materiais como o alumínio e o cobre, o k varia muito pouco com a temperatura, porém em outros, como alguns aços, o k varia significativamente com a temperatura. Nestes casos, adota-se como solução de engenharia um valor médio de k em um intervalo de temperatura. A variação da condutividade térmica (no S.I.) com a temperatura é mostrada na figura 3.4 para algumas substâncias.

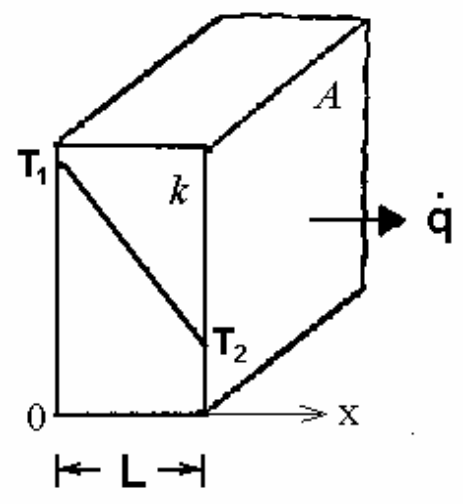


[figura 3.4]

3.2. CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA PAREDE PLANA

Consideremos a transferência de calor por condução através de uma **parede plana** submetida a uma diferença de temperatura. Ou seja, submetida a uma fonte de calor , de temperatura constante e conhecida, de um lado, e a um sorvedouro de calor do outro lado, também de temperatura constante e conhecida. Um bom exemplo disto é a transferência de calor através da parede de um forno, como pode ser visto na figura 3.5, que tem espessura **L**, área transversal **A** e foi construído com material de condutividade térmica **k**. Do lado de dentro a fonte de calor mantém a temperatura na superfície interna da parede

constante e igual a $\mathbf{T_1}$ e externamente o sorvedouro de calor (meio ambiente) faz com que a superfície externa permaneça igual a $\mathbf{T_2}$.



[figura 3.5]

Aplicado a equação de Fourier, tem-se:

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx}$$

Fazendo a separação de variáveis, obtemos :

$$\dot{q}.dx = -k.A.dT \qquad \text{(eq. 3.4)}$$

Na figura 3.5 vemos que na face interna (x=0) a temperatura é T_1 e na face externa (x=L) a temperatura é T_2. Para a transferência em regime permanente o calor transferido não varia com o tempo. Como a área transversal da parede é uniforme e a condutividade k é um valor médio, a integração da equação 3.4, entre os limites que podem ser verificados na figura 3.5, fica assim :

$$\dot{q}.\int_0^L dx = -k.A.\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{q}.(L-0) = -k.A.(T_2 - T_1)$$

$$\dot{q}.L = k.A.(T_1 - T_2) \qquad \text{(eq. 3.5)}$$

Considerando que (T_1 - T_2) é a diferença de temperatura entre as faces da parede (DT), o fluxo de calor a que atravessa a parede plana por condução é :

$$\boxed{\dot{q} = \frac{k.A}{L}.\Delta T} \qquad \text{(eq. 3.6)}$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Para melhor entender o significado da equação 3.6 consideremos um exemplo prático. Suponhamos que o engenheiro responsável pela operação de um forno necessita reduzir as perdas térmicas pela parede de um forno por razões econômicas. Considerando a equação 3.6, o engenheiro tem, por exemplo, as opções listadas na tabela 3.1 :

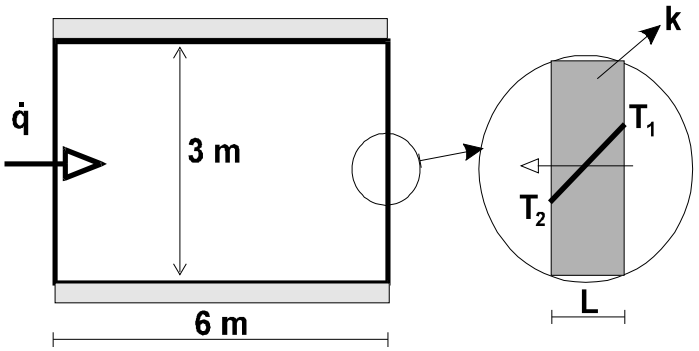
Tabela 3.1- Possibilidades para redução de fluxo de calor em uma parede plana.

OBJETIVO	VARIÁVEL	AÇÃO
$\dot{q}\downarrow$	k↓	trocar a parede por outra de menor condutividade térmica
	A↓	reduzir a área superficial do forno
	L↑	aumentar a espessura da parede
	ΔT↑	reduzir a temperatura interna do forno

Trocar a parede ou reduzir a temperatura interna podem ações de difícil implementação; porém, a colocação de isolamento térmico sobre a parede cumpre ao mesmo tempo as ações de redução da condutividade térmica e aumento de espessura da parede.

• **Exercício 3.1.** Um equipamento condicionador de ar deve manter uma sala, de 15 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de altura a 22 ^{o}C. As paredes da sala, de 25 cm de espessura, são feitas de tijolos com condutividade térmica de 0,14 Kcal/h.m.^{o}C e a área das janelas podem ser consideradas desprezíveis. A face externa das paredes pode estar até a 40 ^{o}C em um dia de verão. Desprezando a troca de calor pelo piso e pelo teto, que estão bem isolados, pede-se o calor a ser extraído da sala pelo condicionador (em HP).

OBS : 1 HP = 641,2 Kcal/h



$T_1 = 40\ ^oC \quad T_2 = 22\ ^oC$

$k = 0{,}14\ Kcal/h.m.^oC$

$L = 25cm = 0{,}25m$

sala : $6 \times 15 \times 3m$

Para o cálculo da área de transferência de calor desprezamos as áreas do teto e piso, onde a transferência de calor é desprezível. Desconsiderando a influência das janelas, a área das paredes da sala é :

$$A = 2 \times (6 \times 3) + 2 \times (15 \times 3) = 126m^2$$

Considerando que a área das quinas das paredes, onde deve ser levada em conta a transferência de calor bidimensional, é pequena em relação ao resto, podemos utilizar a equação 3.6 :

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$\dot{q} = \frac{k.A}{L}.(T_1 - T_2) = \frac{0{,}14(Kcal/h.m.^oC) \times 126m^2}{0{,}25m} \times (40 - 22)^oC = 1270 Kcal/h$$

$$\dot{q} = 1270\, Kcal/h \times \frac{1}{641{,}2} \frac{HP}{\frac{Kcal}{h}} = 1{,}979\, HP$$

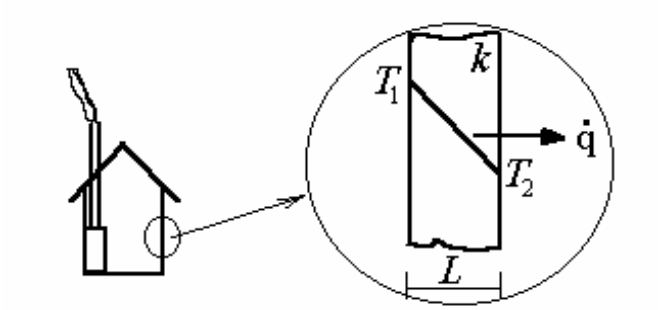
Portanto a potência requerida para o condicionador de ar manter a sala refrigerada é :

$$\boxed{\dot{q} \cong 2\, HP}$$

• **Exercício 3.2.** As superfícies internas de um grande edifício são mantidas a 20 ^oC, enquanto que a temperatura na superfície externa é -20 ^oC. As paredes medem 25 cm de espessura , e foram construidas com tijolos de condutividade térmica de 0,6 kcal/h m ^oC.

a) Calcular a perda de calor para cada metro quadrado de superfície por hora.

b) Sabendo-se que a área total do edifício é 1000 m^2 e que o poder calorífico do carvão é de 5500 kcal/Kg, determinar a quantidade de carvão a ser utilizada em um sistema de aquecimento durante um período de 10 h. Supor o rendimento do sistema de aquecimento igual a 50%.



$$T_1 = 20^oC \quad T_2 = -20^oC \quad k = 0{,}6\, Kcal/h.m.^oC \quad L = 25cm = 0{,}25m$$

a) Desprezando o efeito do canto das paredes e a condutividade térmica da argamassa entre os tijolos, aplica-se a equação de Fourier para paredes planas

$$\dot{q} = \frac{k.A}{L}.(T_1 - T_2)$$

$$\text{Para } A = 1m^2\text{, temos : } \dot{q} = \frac{0{,}6\,(Kcal/h.m.^oC) \times 1m^2}{0{,}25m} \times [20 - (-20)]^oC$$

Portanto, o fluxo de calor transferido por cada metro quadrado de parede é :

$$\boxed{\dot{q} = 96\, Kcal/h\ (\text{p/ } m^2 \text{ de área})}$$

b) Esta perda de calor deve ser reposta pelo sistema de aquecimento, de modo a manter o interior a 20 ºC. A perda pela área total do edifício é:

$A = 1000m^2$ então, $\dot{q}_t = 96 \times 1000 = 96000\,Kcal/h$

O tempo de utilização do sistema de aquecimento é 10 horas. Neste período a energia perdida para o exterior é:

$$\dot{q} = \frac{Q}{t} \Rightarrow Q = \dot{q}.t = 96000\,Kcal/h \times 10h = 960000Kcal$$

Com o rendimento do sistema é 50% a quantidade de calor a ser fornecida pelo carvão é :

$$Q_f = \frac{Q}{\eta} = \frac{960000}{0{,}5} = 1920000Kcal$$

Cada quilo de carvão pode fornecer 5500 Kcal, então a quantidade de carvão é:

$$QT_{carvão} = \frac{1920000Kcal}{5500\,Kcal/Kg} = 349Kg$$

3.3. ANALOGIA ENTRE RESISTÊNCIA TÉRMICA E RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Dois sistemas são análogos quando eles obedecem a equações semelhantes. Isto significa que a equação de descrição de um sistema pode ser transformada em uma equação para outro sistema pela simples troca dos símbolos das variáveis. Por exemplo, a equação 3.6 que fornece o fluxo de calor através de uma parede plana pode ser colocada na seguinte forma :

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{\frac{L}{k.A}} \qquad \text{(eq. 3.7)}$$

O denominador e o numerador da equação 3.7 podem ser entendidos assim :

- **(ΔT)** , a diferença entre a temperatura da face quente e da face fria, consiste no potencial que causa a transferência de calor
- **(L / k.A)** é equivalente a uma resistência térmica (R) que a parede oferece à transferência de calor

Portanto, o fluxo de calor através da parede pode ser expresso da seguinte forma :

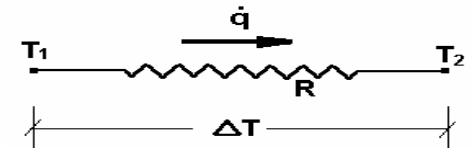
$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} \quad \text{onde,} \quad \Delta T \text{ é o potencial térmico e } R \text{ é a resistência térmica da parede} \qquad \text{(eq. 3.8)}$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Se substituirmos na equação 3.8 o símbolo do potencial de temperatura Δ**T** pelo de potencial elétrico, isto é, a diferença de tensão Δ**U**, e o símbolo da resistência térmica **R** pelo da resistência elétrica $\mathbf{R_e}$, obtemos a equação 3.9 (lei de Ohm) para **i**, a intensidade de corrente elétrica :

$$i = \frac{\Delta U}{R_e} \qquad \text{(eq. 3.9)}$$

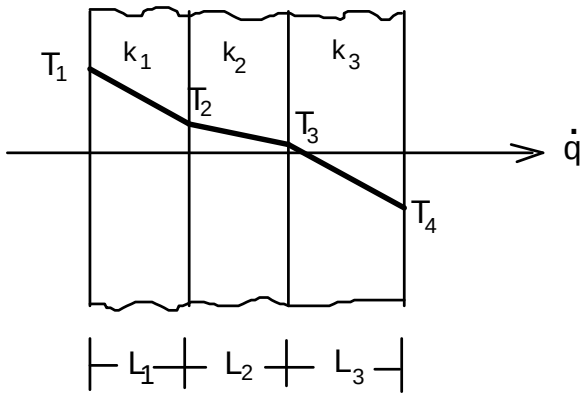
Dada esta analogia, é comum a utilização de uma notação semelhante a usada em circuitos elétricos, quando representamos a resistência térmica de uma parede ou associações de paredes. Assim, uma parede de resistência R, submetida a um potencial Δ T e atravessada por um fluxo de calor $\dot{q}$, pode ser representada assim :



[figura 3.6]

3.4. ASSOCIAÇÃO DE PAREDES PLANAS EM SÉRIE

Consideremos um sistema de paredes planas **associadas em série**, submetidas a uma fonte de calor , de temperatura constante e conhecida, de um lado e a um sorvedouro de calor do outro lado, também de temperatura constante e conhecida. Assim, haverá a transferência de um fluxo de calor contínuo no regime permanente através da parede composta. Como exemplo, analisemos a transferência de calor através da parede de um forno, que pode ser composta de uma camada interna de refratário (condutividade k_1 e espessura L_1), uma camada intermediária de isolante térmico (condutividade k_2 e espessura L_2) e uma camada externa de chapa de aço (condutividade k_3 e espessura L_3). A figura 3.7 ilustra o perfil de temperatura ao longo da espessura da parede composta :



[figura 3.7]

O fluxo de calor que atravessa a parede composta pode ser obtido em cada uma das paredes planas individualmente :

$$\dot{q} = \frac{k_1 . A_1}{L_1}.(T_1 - T_2); \quad \dot{q} = \frac{k_2 . A_2}{L_2}.(T_2 - T_3); \quad \dot{q} = \frac{k_3 . A_3}{L_3}.(T_3 - T_4) \qquad \text{(eq. 3.10)}$$

Colocando em evidência as diferenças de temperatura em cada uma das equações 3.10 e somando membro a membro, obtemos:

$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{q}.L_1}{k_1.A_1}$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{\dot{q}.L_2}{k_2.A_2}$$

$$(T_3 - T_4) = \frac{\dot{q}.L_3}{k_3.A_3}$$

$$T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = \frac{\dot{q}.L_1}{k_1.A_1} + \frac{\dot{q}.L_2}{k_2.A_2} + \frac{\dot{q}.L_3}{k_3.A_3}$$

$$T_1 - T_4 = \frac{\dot{q}.L_1}{k_1.A_1} + \frac{\dot{q}.L_2}{k_2.A_2} + \frac{\dot{q}.L_3}{k_3.A_3} \qquad \text{(eq. 3.11)}$$

Colocando em evidência o fluxo de calor $\dot{q}$ e substituindo os valores das resistências térmicas em cada parede na equação 3.1 , obtemos o fluxo de calor pela parede do forno :

$$T_1 - T_4 = \dot{q}.(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} \qquad \text{(eq. 3.12)}$$

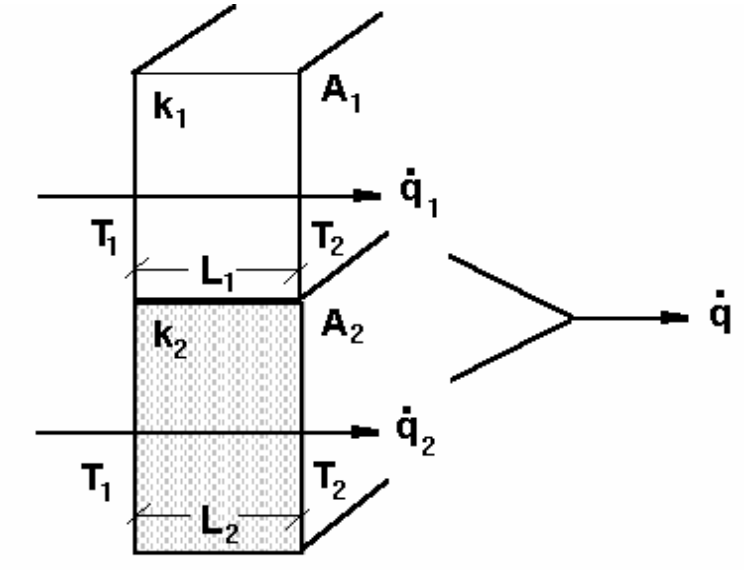
Portanto, para o caso geral em que temos uma associação de paredes **n** planas associadas em série o fluxo de calor é dado por :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}, onde R_t = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \qquad \text{(eq. 3.13)}$$

3.5. ASSOCIAÇÃO DE PAREDES PLANAS EM PARALELO

Consideremos um sistema de paredes planas **associadas em paralelo**, submetidas a uma fonte de calor , de temperatura constante e conhecida, de um lado e a um sorvedouro de calor do outro lado, também de temperatura constante e conhecida, do outro lado. Assim, haverá a transferência de um fluxo de calor contínuo no regime permanente através da parede composta. Como exemplo, analisemos a transferência de calor através da parede de um forno, que pode ser composta de uma metade inferior de refratário especial (condutividade k_2) e uma metade superior de refratário comum (condutividade k_1), como mostra a figura 3.8. Faremos as seguintes considerações :

- Todas as paredes estão sujeitas a mesma diferença de temperatura;
- As paredes podem ser de materiais e/ou dimensões diferentes;
- O fluxo de calor total é a soma dos fluxos por cada parede individual.



[figura 3.8]

O fluxo de calor que atravessa a parede composta pode ser obtido em cada uma das paredes planas individualmente :

$$\dot{q}_1 = \frac{k_1.A_1}{L_1}.(T_1 - T_2); \qquad \dot{q}_2 = \frac{k_2.A_2}{L_2}.(T_1 - T_2) \qquad \text{(eq. 3.14)}$$

O fluxo de calor total é igual a soma dos fluxos da equação 3.14 :

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 = \left[\frac{k_1.A_1}{L_1}.(T_1 - T_2)\right] + \left[\frac{k_2.A_2}{L_2}.(T_1 - T_2)\right] = \left[\frac{k_1.A_1}{L_1} + \frac{k_2.A_2}{L_2}\right].(T_1 - T_2) \qquad \text{(eq. 3.15)}$$

A partir da definição de resistência térmica para parede plana (equação 3.7), temos que :

$$R = \frac{L}{k.A} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{k.A}{L} \qquad \text{(eq. 3.16)}$$

Substituindo a equação 3.16 na equação 3.15, obtemos :

$$\dot{q} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right].(T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t} \quad \text{onde, } \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

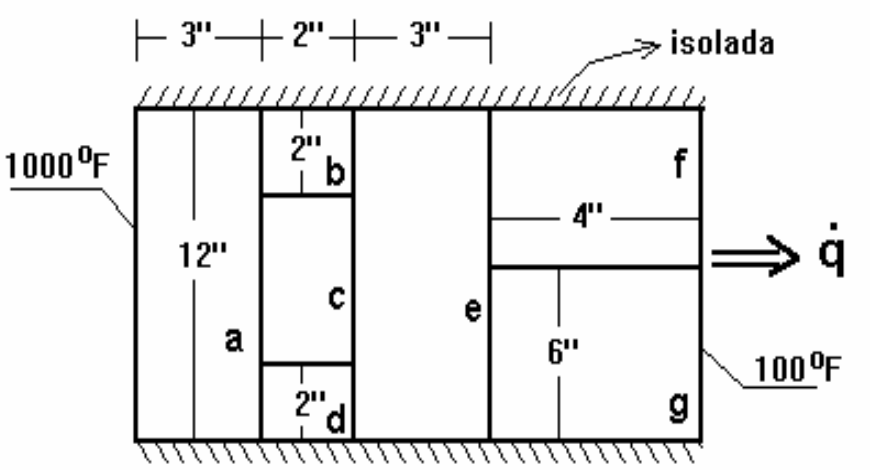
Portanto, para o caso geral em que temos uma associação de **n** paredes planas associadas em paralelo o fluxo de calor é dado por :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}, onde \frac{1}{R_t} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \qquad \text{(eq. 3.17)}$$

Em uma configuração em paralelo, embora se tenha transferência de calor bidimensional, é freqüentemente razoável adotar condições unidimensionais. Nestas condições, admite-se que as superfícies paralelas à direção **x** são isotérmicas. Entretanto, a medida que a

diferença entre as condutividades térmicas das paredes (k_1 - k_2) aumenta, os efeitos bidimensionais tornam-se cada vez mais importantes.

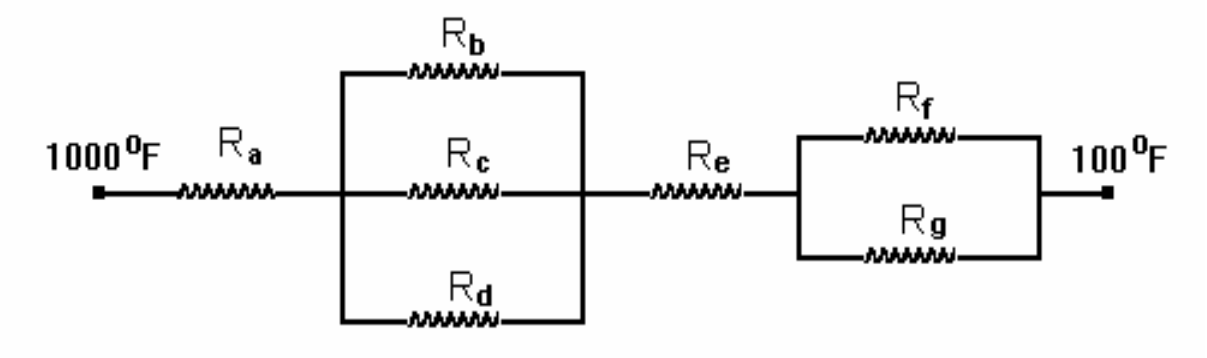
• **Exercício 3.3**. Calcular o fluxo de calor na parede composta abaixo :



onde,

material	a	b	c	d	e	f	g
k (Btu/h.ft.°F)	100	40	10	60	30	40	20

Usando a analogia elétrica, o circuito equivalente à parede composta é :



Para uma área unitária de transferência de calor (A = 1 ft^2), as resistências térmicas de cada parede individual são :

$$R_a = \frac{3/12\,(ft)}{100\left(\frac{Btu}{h.ft.^oF}\right)\times 1\,(ft^2)} = 0{,}0025\,h.^oF/Btu \qquad R_b = \frac{2/12}{40\times 2/12} = 1/40\,h.^oF/Btu$$

$$R_c = \frac{2/12}{10\times 8/12} = 1/40\,h.^oF/Btu \qquad R_d = \frac{2/12}{60\times 2/12} = 1/60\,h.^oF/Btu$$

$$R_e = \frac{3/12}{30 \times 1} = 0{,}00833\, h.^oF/Btu \qquad R_f = \frac{4/12}{40 \times 6/12} = 1/60\, h.^oF/Btu$$

$$R_g = \frac{4/12}{20 \times 6/12} = 1/30\, h.^oF/Btu$$

Para os circuitos paralelos :

$$\frac{1}{R_{bcd}} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} = 40 + 40 + 60 = 140 \Rightarrow R_{bcd} = 0{,}00714\, h.^oF/Btu$$

$$\frac{1}{R_{fg}} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_g} = 60 + 30 = 90 \Rightarrow R_{fg} = 0{,}01114\, h.^oF/Btu$$

Para os circuitos em série :

$$R_t = R_a + R_{bcd} + R_e + R_{fg} = 0{,}0025 + 0{,}00714 + 0{,}00833 + 0{,}0111 = 0{,}02907\, h.^oF/Btu$$

Portanto,

$$\boxed{\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{(1000 - 100)^oF}{0{,}02907\, h.^oF/Btu} = 30960\, Btu/h}$$

• **Exercício 3.4.** Uma parede de um forno é constituída de duas camadas : 0,20 m de tijolo refratário (k = 1,2 kcal/h.m.^{o}C) e 0,13 m de tijolo isolante (k = 0,15 kcal/h.m.^{o}C). A temperatura da superfície interna do refratário é 1675 ^{o}C e a temperatura da superfície externa do isolante é 145 ^{o}C. Desprezando a resistência térmica das juntas de argamassa, calcule :

a) o calor perdido por unidade de tempo e por m^2 de parede;

b) a temperatura da interface refratário/isolante.

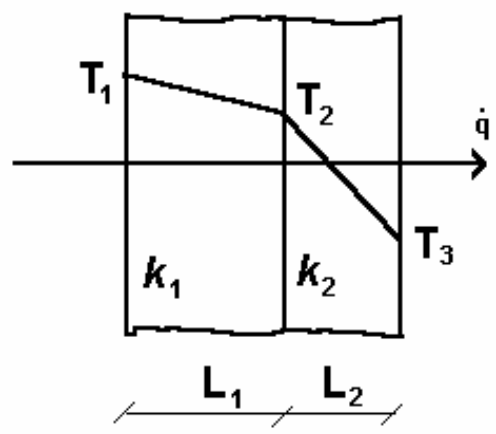
parede de refratário :

$L_1 = 0{,}20\, m \qquad k_1 = 1{,}2\ Kcal/h.m.^oC$

parede de isolante :

$L_2 = 0{,}13\, m \qquad k_2 = 0{,}15\ Kcal/h.m.^oC$

$T_1 = 1675^oC \qquad T_3 = 145^oC$



a) Considerando uma área unitária da parede ($A=A_1=A_2=1\ m^2$), temos :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_1 - T_3}{R_{ref} + R_{iso}} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L_1}{k_1.A} + \frac{L_2}{k_2.A}} = \frac{1675 - 145}{\frac{0,20}{1,2 \times 1} + \frac{0,13}{0,15 \times 1}}$$

$$\boxed{q = 1480,6 Kcal/h(p/m^2)}$$

b) O fluxo de calor também pode ser calculado em cada parede individual. Na parede de refratário, obtemos :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{ref}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_1}{k_1.A}} = \frac{k_1.A}{L_1}.(T_1 - T_2)$$

$$1480,6 = \frac{1,2 \times 1}{0,20} \times (1675 - T_2)$$

$$\boxed{T_2 = 1428,2^o C}$$

• **Exercício 3.5.** Obter a equação para o fluxo de calor em uma parede plana na qual a condutividade térmica (k) varia com a temperatura de acordo com a seguinte função : k = a + b.T

Partindo da equação de Fourier, temos :

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx}$$

$$\dot{q}.dx = -k.A.dT$$

Agora k é uma função da temperatura, portanto não pode ser retirada para fora da integral. A integração da equação acima, entre os limites que podem ser verificados na figura 3.5, fica assim :

$$\dot{q}.\int_0^L dx = -A.\int_{T_1}^{T_2} (a + b.T) dT$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$\dot{q}.\int_0^L dx = -A.\left[a\int_{T_1}^{T_2} dT + b\int_{T_1}^{T_2} TdT \right]$$

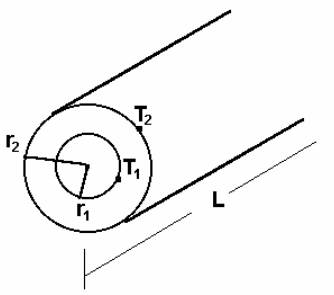
$$\dot{q}.(L-0) = -A.\left[a.(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}.(T_2^2 - T_1^2) \right]$$

$$\dot{q}.L = A.\left[a.(T_1 - T_2) + \frac{b}{2}.(T_1^2 - T_2^2) \right]$$

$$\boxed{\dot{q} = \frac{a.A}{L}.(T_1 - T_2) + \frac{b.A}{2.L}.(T_1^2 - T_2^2)}$$

3.6. CONDUÇÃO DE CALOR ATRAVÉS DE CONFIGURAÇÕES CILÍNDRICAS

Consideremos um cilindro vazado submetido à uma diferença de temperatura entre a superfície interna e a superfície externa, como pode ser visto na figura 3.9. Se a temperatura da superfície interna for constante e igual a T_1, enquanto que a temperatura da superfície externa se mantém constante e igual a T_2, teremos uma transferência de calor por condução no regime permanente. Como exemplo analisemos a transferência de calor em um tubo de comprimento L que conduz um fluido em alta temperatura :



[figura 3.9]

O fluxo de calor que atravessa a parede cilíndrica poder ser obtido através da equação de Fourier, ou seja :

$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dr}$ onde $\frac{dT}{dr}$ é o gradiente de temperatura na direção radial (eq. 3.18)

Para configurações cilíndricas a área é uma função do raio :

$A = 2.\pi r.L$ (eq. 3.19)

Levando a equação 3.19 na equação 3.18, obtemos :

$$\dot{q} = -k.(2.\pi.r.L).\frac{dT}{dr}$$

Fazendo a separação de variáveis e integrando entre T_1 em r_1 e T_2 em r_2, conforme mostrado na figura 3.9, chega-se a :

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{q}.\frac{dr}{r} = -\int_{T_1}^{T_2} k.2.\pi.L.dT$$

$$\dot{q}\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -k.2.\pi.L.\int_{T_1}^{T_2} .dT$$

$$\dot{q}.\left(\ln\ r\Big|_{r_1}^{r_2} \right) = -k.2.\pi.L.\left(T\Big|_{T_1}^{T_2} \right)$$

$$\dot{q}.[\ln r_2 - \ln r_1] = -k.2.\pi.L.(T_2 - T_1)$$

Aplicando-se propriedades dos logaritmos, obtemos :

$$\dot{q}.\left[\ln\frac{r_2}{r_1} \right] = k.2.\pi.L.(T_1 - T_2)$$

O fluxo de calor através de uma parede cilíndrica será então :

$$\dot{q} = \frac{k.2.\pi.L}{\left(\ln\frac{r_2}{r_1} \right)}.(T_1 - T_2)$$

(eq. 3.20)

Para melhor entender o significado da equação 3.20 consideremos um exemplo prático. Suponhamos que o engenheiro responsável pela operação de uma caldeira necessita reduzir o consumo energético através da redução das perdas térmicas na tubulação que conduz vapor até uma turbina. Considerando a equação 3.20, o engenheiro tem as seguintes opções listadas na tabela 3.2 :

Tabela 3.2 - Possibilidades para redução de fluxo de calor em uma parede cilíndrica.

OBJETIVO	VARIÁVEL	AÇÃO
$\dot{q}\downarrow$	k↓	trocar a parede cilíndrica por outra de menor condutividade térmica
	L↓	reduzir o comprimento da tubulação (menor caminho)
	$(r_2/r_1)\uparrow$	aumentar a espessura da parede cilíndrica
	ΔT↓	reduzir a temperatura do vapor

Trocar a parede ou reduzir a temperatura do vapor podem ações de difícil implementação; porém, a colocação de isolamento térmico sobre a parede cilíndrica cumpre ao mesmo tempo as ações de redução da condutividade térmica e aumento de espessura da parede.

ê **Resistência térmica** na parede cilíndrica :

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O conceito de resistência térmica também pode ser aplicado à parede cilíndrica. Devido à analogia com a eletricidade, um fluxo de calor na parede cilíndrica também pode ser representado como :

$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R}$ onde, ΔT é o potencial térmico; e R é a resistênci a térmica da parede

Então para a parede cilíndrica, obtemos :

$$\dot{q} = \frac{k.2.\pi.L}{\left(\ln \frac{r_2}{r_1}\right)}.\Delta T = \frac{\Delta T}{R} \qquad \text{(eq. 3.21)}$$

Eliminado o ΔT na equação 3.21, obtemos a resistência térmica de uma parede cilíndrica :

$$R = \frac{\ln\left(r_2 / r_1\right)}{k.2.\pi.L} \qquad \text{(eq. 3.22)}$$

Para o caso geral em que temos uma associação de paredes **n** cilíndricas **associadas em paralelo**, por analogia com paredes planas, o fluxo de calor é dado por :

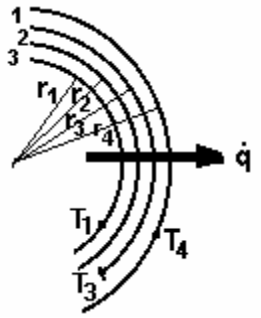
$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} \quad \text{onde, } R_t = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \qquad \text{(eq. 3.23)}$$

• **Exercício 3.6.** Um tubo de aço (k=22 Btu/h.ft.^{o}F) de 1/2" de espessura e 10" de diâmetro externo é utilizado para conduzir ar aquecido. O tubo é isolado com 2 camadas de materiais isolantes : a primeira de isolante de alta temperatura (k=0,051 Btu/h.ft.^{o}F) com espessura de 1" e a segunda com isolante à base de magnésia (k=0,032 Btu/h.ft.^{o}F) também com espessura de 1". Sabendo que estando a temperatura da superfície interna do tubo a 1000 ^{o}F a temperatura da superfície externa do segundo isolante fica em 32 ^{o}F, pede-se :

a) Determine o fluxo de calor por unidade de comprimento do tubo

b) Determine a temperatura da interface entre os dois isolantes

c) Compare os fluxos de calor se houver uma troca de posicionamento dos dois isolantes



T_1=1000 ^oF r_1= 5" - 1/2" = 4,5" = 4,5/12 ft

T_4= 32 ^oF r_2 = 5" = 5/12 ft

r_3 = 5" + 1" = 6" = 6/12 ft

k_1= 22 Btu/h.ft.^oF r_4 = 6" + 1" = 7" = 7/12 ft

k_2= 0,051 Btu/h.ft.^oF

k_3= 0,032 Btu/h.ft.^oF L= 1 ft

$$a)\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2.\pi.L.k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2.\pi.L.k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2.\pi.L.k_3}} = \frac{1000 - 32}{\frac{\ln(5/4,5)}{2\times\pi\times1\times22} + \frac{\ln(6/5)}{2\times\pi\times1\times0,051} + \frac{\ln(7/6)}{2\times\pi\times1\times0,032}}$$

$$\boxed{\dot{q} = 722,4\text{Btu/h}\ (p/\ ft)}$$

$$b)\dot{q} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln(r_4/r_3)}{2.\pi.L.k_3}} \qquad 724,5 = \frac{T_3 - 32}{\frac{\ln(7/6)}{2\times\pi\times1\times0,032}}$$

$$\boxed{T_3 = 587,46\ ^oF}$$

$$c)\dot{q}' = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2.\pi.L.k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2.\pi.L.k_3} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2.\pi.L.k_2}} = \frac{1000 - 32}{\frac{\ln(5/4,5)}{2\times\pi\times1\times22} + \frac{\ln(6/5)}{2\times\pi\times1\times0,032} + \frac{\ln(7/6)}{2\times\pi\times1\times0,051}}$$

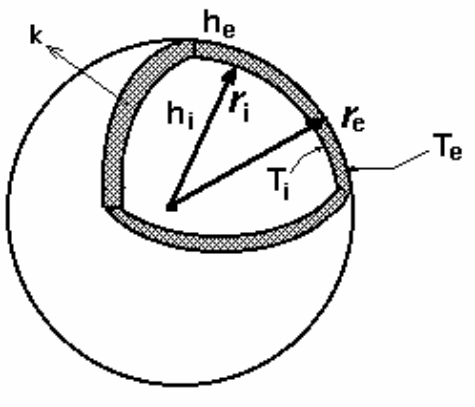
$\boxed{\dot{q}' = 697,09\text{Btu/h}}$ (o fluxo diminui em relação ao caso anterior)

3.7. CONDUÇÃO DE CALOR ATRAVÉS DE UMA CONFIGURAÇÃO ESFÉRICA

Uma das utilizações mais freqüentes de configurações esféricas na indústria é na armazenagem de fluidos em baixa temperatura. Devido a uma maior relação volume/superfície da esfera, os fluxos de calor são minimizados.

Consideremos uma esfera oca submetida à uma diferença de temperatura entre a superfície interna e a superfície externa, como pode ser visto na figura 3.10. Se a temperatura da superfície interna for constante e igual a T_1, enquanto que a temperatura da superfície externa se mantém constante e igual a T_2, teremos uma transferência de

calor por condução no regime permanente. Como exemplo analisemos a transferência de calor em um reservatório esférico de raio r que contém um fluido em alta temperatura :



[figura 3.10]

O fluxo de calor que atravessa a parede esférica poder ser obtido através da equação de Fourier, ou seja :

$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dr}$ onde $\frac{dT}{dr}$ é o gradiente de temperatura na direção radial (eq. 3.24)

Para configurações cilíndricas a área é uma função do raio :

$A = 4.\pi.r^2$ (eq. 3.25)

Levando a equação 3.25 na equação 3.24, obtemos :

$$\dot{q} = -k.\left(4.\pi.r^2\right).\frac{dT}{dr}$$

Fazendo a separação de variáveis e integrando entre T_1 em r_1 e T_2 em r_2, conforme mostrado na figura 3.10, chega-se a :

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{q}.\frac{dr}{r^2} = -\int_{T_1}^{T_2} k.4.\pi.dT$$

$$\dot{q}\int_{r_1}^{r_2} r^{-2}.dr = -4.k.\pi.\int_{T_1}^{T_2}.dT$$

$$\dot{q}.\left(-r^{-1}\Big|_{r_1}^{r_2}\right) = -4.k.\pi.\left(T\Big|_{T_1}^{T_2}\right)$$

$$\dot{q}.\left[-\frac{1}{r_1}-\left(-\frac{1}{r_2}\right)\right] = -4.k.\pi.\left(T_2 - T_1\right)$$

$$\dot{q}.\left[\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right]=4.k.\pi.(T_1-T_2)$$

O fluxo de calor através de uma parede esférica será então :

$$\dot{q}=\frac{4.k.\pi}{\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)}.(T_1-T_2) \qquad \text{(eq. 3.26)}$$

Para melhor entender o significado da equação 3.26 consideremos um exemplo prático. Suponhamos que o engenheiro responsável por um reservatório esférico necessita reduzir as perdas térmicas pela parede por razões econômicas. Considerando a equação 3.26, o engenheiro tem as seguintes opções listadas na tabela 3.3 :

Tabela 3.3 - Possibilidades para redução de fluxo de calor em uma parede esférica.

OBJETIVO	VARIÁVEL	AÇÃO
$\dot{q}\downarrow$	k↓	trocar a parede esférica por outra de menor condutividade térmica
	$(1/r_1 - 1/r_2)\uparrow$	aumentar a espessura da parede cilíndrica
	$\Delta T\downarrow$	reduzir a temperatura interna do reservatório

Trocar a parede ou reduzir a temperatura interna do reservatório podem ações de difícil implementação; porém, a colocação de isolamento térmico sobre a parede esférica cumpre ao mesmo tempo as ações de redução da condutividade térmica e aumento de espessura da parede.

► **Resistência térmica** na parede esférica :

O conceito de resistência térmica também pode ser aplicado à parede esférica. Devido à analogia com a eletricidade, um fluxo de calor na parede esférica também pode ser representado como :

$\dot{q}=\frac{\Delta T}{R}$ onde, ΔT é o potencial térmico; e R é a resistência térmica da parede

Então para a parede esférica, obtemos :

$$\dot{q}=\frac{4.k.\pi}{\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)}.\Delta T=\frac{\Delta T}{R} \qquad \text{(eq. 3.27)}$$

Eliminado o ΔT na equação 3.27, obtemos a resistência térmica de uma parede esférica :

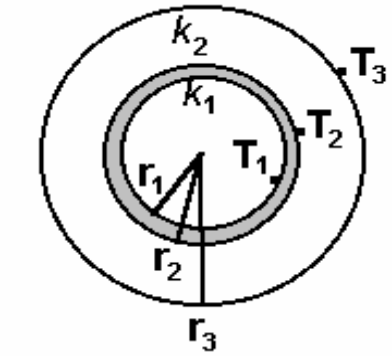
$$R = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4.k.\pi}$$ (eq. 3.28)

Para o caso geral em que temos uma associação de paredes **n** esféricas **associadas em paralelo**, por analogia com paredes planas, o fluxo de calor é dado por :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} \qquad \text{onde, } R_t = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$ (eq. 3.29)

• **Exercício 3.7.** Um tanque de aço (k = 40 Kcal/h.m.^{o}C), de formato esférico e raio interno de 0,5 m e espessura de 5 mm, é isolado com 1½" de lã de rocha (k = 0,04 Kcal/h.m.^{o}C). A temperatura da face interna do tanque é 220 ^{o}C e a da face externa do isolante é 30 ^{o}C. Após alguns anos de utilização, a lã de rocha foi substituída por outro isolante, também de 1½" de espessura, tendo sido notado então um aumento de 10% no calor perdido para o ambiente (mantiveram-se as demais condições). Determinar :

a) fluxo de calor pelo tanque isolado com lã de rocha;
b) o coeficiente de condutividade térmica do novo isolante;
c) qual deveria ser a espessura (em polegadas) do novo isolante para que se tenha o mesmo fluxo de calor que era trocado com a lã de rocha.



$r_1 = 0,5\ m$

$r_2 = 0,5 + 0,005 = 0,505\ m$

$r_3 = 0,505 + 1,5\ x\ 0,0254 = 0,5431\ m$

$k_1 = 40\ Kcal/h.m.^{o}C \qquad k_2 = 0,04\ Kcal/h.m.^{o}C$

$T_1 = 220\ ^{o}C \qquad T_3 = 30\ ^{o}C$

a) $\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}$

$$R_t = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k_1.4\pi} + \frac{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right)}{k_2.4\pi} = \frac{\frac{1}{0,5} - \frac{1}{0,505}}{40 \times 4\pi} + \frac{\frac{1}{0,505} - \frac{1}{0,5431}}{0,04 \times 4\pi} = 0,000039 + 0,276364 = 0,2764\, h.^{o}C/Kcal$$

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{220 - 30}{0,2764} = 687,41 Kcal/h$$

b) Levando em conta a elevação do fluxo de calor :

$$\dot{q}' = 1,1 \times \dot{q} = 1,1 \times 687,41 = 756,15\, Kcal/h$$

Desprezando a resistência térmica da parede de aço ($T_2 = T_1 = 30\ ^{o}C$), temos :

$$\dot{q} = 756{,}15 = \frac{T_2 - T_3}{\dfrac{\left(\dfrac{1}{r_2} - \dfrac{1}{r_3}\right)}{k_{iso}.4\pi}} = \frac{220 - 30}{\dfrac{\left(\dfrac{1}{0{,}505} - \dfrac{1}{0{,}5431}\right)}{k_{iso} \times 4\pi}}$$

$$\boxed{k_{iso} = 0{,}044\, Kcal/h.m.^oC}$$

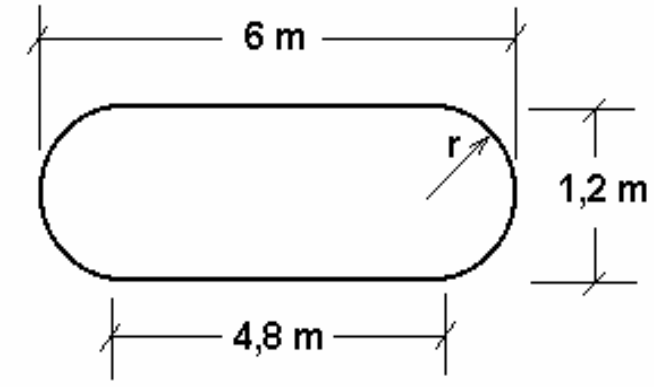
c) Para manter o fluxo de calor deve ser usada uma maior espessura isolante :

$$\dot{q} = 687{,}41 = \frac{T_2 - T_3}{\dfrac{\left(\dfrac{1}{r_2} - \dfrac{1}{r_3}\right)}{k_{iso}.4\pi}} = \frac{220 - 30}{\dfrac{\left(\dfrac{1}{0{,}505} - \dfrac{1}{r_3'}\right)}{0{,}044 \times 4\pi}} \Rightarrow r_3' = 0{,}5472m$$

$$e = r_3' - r_2 = 0{,}5472 - 0{,}505 = 0{,}0422\, m = 4{,}22\, cm$$

$$\boxed{e = 4{,}22\, cm = 1{,}66''}$$

• **Exercício 3.8.** Um tanque de oxigênio líquido tem diâmetro de 1,20 m, um comprimento de 6 m e as extremidades hemisféricas. O ponto de ebulição do oxigênio é -182,8 ^oC. Procura-se um isolante térmico que reduza a taxa de evaporação em regime permanente a não mais que 10 Kg/h. O calor de vaporização do oxigênio é 51,82 Kcal/Kg. Sabendo que a temperatura ambiente varia entre 15 ^oC (inverno) e 40 ^oC (verão) e que a espessura do isolante não deve ultrapassar 75 mm, qual deverá ser a condutividade térmica do isolante ? (Obs : não considerar as resistências devido à convecção).



$r = 0{,}6m \qquad e = 75mm = 0{,}075m$

$r_{iso} = r + e = 0{,}6 + 0{,}075 = 0{,}675m$

$T_i = -182{,}8^oC \qquad T_e = 40^oC(máximo \Delta T)$

$\dot{m} = 10\, Kg/h \qquad \Delta H_{vap} = 51{,}82\, Kcal/Kg$

O máximo fluxo de calor para o interior do tanque deve ser :

$$\dot{q} = \dot{m}.\Delta H_{vap} = 10(Kg/h) \times 51{,}82(Kcal/Kg) = 518{,}2\, Kcal/h$$

Este fluxo de calor atravessa a camada isolante por condução, uma parte através da camada esférica e outra através da camada cilíndrica. Então :

$$\dot{q} = \frac{(T_e - T_i)}{\frac{\ln\left(r_{iso}/r\right)}{k.2.\pi.L}} + \frac{(T_e - T_i)}{\frac{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{iso}}\right)}{k.4.\pi}} = \frac{[40-(-182{,}8)]}{\frac{\ln\left(0{,}675/0{,}6\right)}{k.2.\pi.4{,}8}} + \frac{[40-(-182{,}8)]}{\frac{\left(\frac{1}{0{,}6} - \frac{1}{0{,}675}\right)}{k.4.\pi}}$$

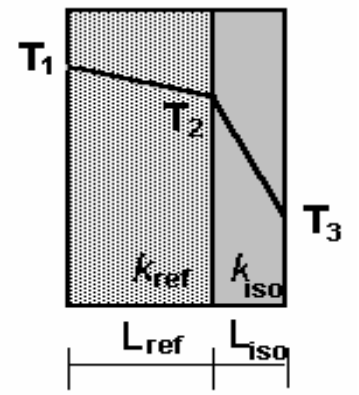
$$518{,}2 = \frac{222{,}8}{\frac{1}{k} \times \frac{0{,}118}{30{,}16} + \frac{1}{k} \times \frac{0{,}185}{12{,}6}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{k = 0{,}0072\, Kcal/h.m.^oC}$$

• **Exercício 3.9.** A parede de um forno industrial é composta com tijolos refratários (k = 0,3 Btu/h.ft.^{o}F) por dentro, e tijolos isolantes por fora (k = 0,05 Btu/h.ft.^{o}F). A temperatura da face interna do refratário é 1600 ^{o}F e a da face externa do isolante é 80 ^{o}F. O forno tem formato de prisma retangular (8,0 X 4,5 X 5,0 ft) e a espessura total da parede é 1,3 ft. Considerando uma perda de calor de 36000 Btu/h apenas pelas paredes laterais, pede-se :

a) a espessura de cada um dos materiais que compõem a parede;

b) colocando-se uma janela de inspeção circular de 0,5 ft de diâmetro, feita com vidro refratário de 6" de espessura (k = 0,65 Btu/h.ft.^{o}F) em uma das paredes do forno, determinar o novo fluxo de calor

c) qual deveria ser a espessura dos tijolos isolantes, no caso do item anterior, para que o fluxo de calor fosse mantido em 36000 Btu/h.



$$T_1 = 1600\ ^oF \qquad T_2 = 80\ ^oF$$
$$k_{iso} = 0{,}3 Btu/h.ft.^oF \qquad k_{ref} = 0{,}05\, Btu/h.ft.^oF$$
$$L = L_1 + L_2 = 1{,}3\, ft$$
$$A(lateral) = 2 \times (8 \times 5) + 2 \times (4.5 \times 5) = 125\, ft^2$$

a) A resistência térmica da parede composta a partir do fluxo de calor perdido pelas paredes e da diferença de temperatura total :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} \Rightarrow 36000 = \frac{(1600 - 80)}{R_t} \Rightarrow \qquad R_t = 0{,}042\, h.^oC/Kcal$$

Em associação em série a resistência total é igual à soma das resistências individuais :

$$R_t = R_{ref} + R_{iso} = \frac{L_{ref}}{k_{ref}.A} + \frac{L_{iso}}{k_{iso}.A} = \frac{L_{ref}}{0{,}3 \times 125} + \frac{L_{iso}}{0{,}05 \times 125} \quad \Rightarrow \quad 0{,}0422 = 0{,}0267 \times L_{ref} + 0{,}16 \times L_{iso}$$

Como existem 2 incógnitas, é necessário outra equação. Como a soma das espessuras das paredes individuais é igual à espessura da parede composta, temos o seguinte sistema de equações :

$$\begin{cases} 0{,}0422 = 0{,}0267 \times L_{ref} + 0{,}16 \times L_{iso} \\ 1{,}3 = L_{ref} + L_{iso} \end{cases} \qquad \text{donde,} \qquad \boxed{\begin{array}{l} L_{ref} = 1{,}243\ ft \\ L_{iso} = 0{,}057\ ft \end{array}}$$

b) A janela de inspeção é uma parede que está associada em paralelo com os tijolos. As áreas de cada parede são :

área de vidro $\rightarrow \quad A_{vid} = 0{,}45 \times 0{,}30 = 0{,}135\ ft^2$

área de tijolo $\rightarrow \quad A_{tij} = 125 - 0{,}135 = 124{,}865\ ft^2$

DADOS : $k_{vid} = 0{,}65\ Btu/h.\ ft.^oC \qquad L_{vid} = 0{,}4'' = 0{,}0333\ ft$

A resistência total equivalente à esta associação é :

$$\frac{1}{R'_t} = \frac{1}{R_{vid}} + \frac{1}{R_{tij}} = \frac{1}{\dfrac{L_{vid}}{k_{vid}.A_{vid}}} + \left[\frac{1}{\dfrac{L_r}{k_r.A_{tij}} + \dfrac{L_i}{k_i.A_{tij}}} \right] = \frac{1}{\dfrac{0{,}0333}{0{,}65 \times 0{,}135}} + \left[\frac{1}{\dfrac{1{,}243}{0{,}3 \times 124{,}865} + \dfrac{0{,}057}{0{,}05 \times 124{,}865}} \right]$$

$$R'_t = 0{,}0381 h.^oF/Btu$$

O fluxo de calor pela parede com janela de inspeção é :

$$\dot{q}' = \frac{(\Delta T)_{total}}{R'_t} = \frac{1600 - 80}{0{,}0381} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{q}' = 39928{,}8\ Btu/h}$$

c) Para que o fluxo de calor seja o mesmo, após a colocação da janela de inspeção, deve haver um aumento do isolamento.

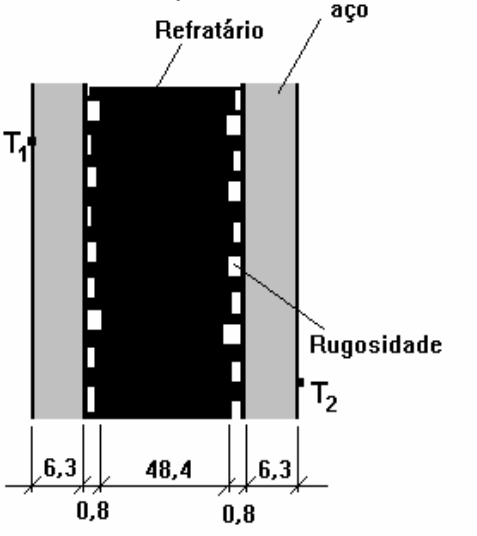
$$\dot{q} = 36000\ Btu/h \qquad \Rightarrow \qquad R_t = 0{,}0422\ h.^oF/Btu$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{vid}} + \frac{1}{R'_{tij}} = \frac{1}{\dfrac{L_{vid}}{k_{vid}.A_{vid}}} + \left[\frac{1}{\dfrac{L_r}{k_r.A_{tij}} + \dfrac{L'_i}{k_i.A_{tij}}} \right] = \frac{1}{\dfrac{0{,}0333}{0{,}65 \times 0{,}135}} + \left[\frac{1}{\dfrac{1{,}243}{0{,}3 \times 124{,}865} + \dfrac{L'_i}{0{,}05 \times 124{,}865}} \right]$$

$$\frac{1}{0{,}0422} = 2{,}63514 + \frac{1}{0{,}03318 + 0{,}16017 \times L'_i} \qquad \text{Þ} \qquad \boxed{L_i = 0{,}089\ ft}$$

• **Exercício 3.10.** Uma camada de material refratário (k=1,5 kcal/h.m.^{o}C) de 50 mm de espessura está localizada entre duas chapas de aço (k = 45 kcal/h.m^{o}C) de 6,3 mm de espessura. As faces da camada refratária adjacentes às placas são rugosas de modo que

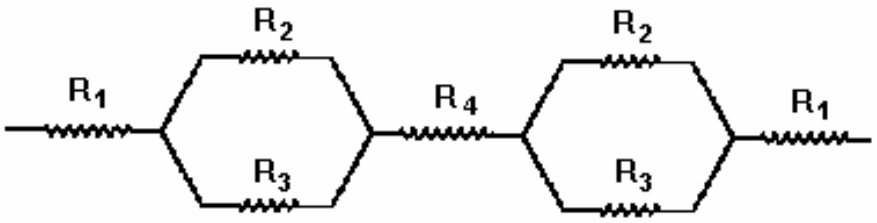
apenas 30 % da área total está em contato com o aço. Os espaços vazios são ocupados por ar (k=0,013 kcal/h.m.^{o}C) e a espessura média da rugosidade de 0,8 mm. Considerando que as temperaturas das superfícies externas da placa de aço são 430 ^{o}C e 90 ^{o}C, respectivamente; calcule o fluxo de calor que se estabelece na parede composta.



$$k_{aço} = 45 Kcal/h.m.^{o}C$$
$$k_{ref} = 1{,}5 Kcal/h.m.^{o}C$$
$$k_{ar} = 0{,}013 Kcal/h.m.^{o}C$$
$$L_{ref} = 50mm$$
$$L_{aço} = 6{,}3mm = 0{,}0063m \quad L_{rug} = 0{,}8mm = 0{,}0008m$$
$$L'_{ref} = 50 - (2 \times 0{,}8) = 48{,}4mm = 0{,}0483m$$
$$T_1 = 430\,^{o}C \qquad T_2 = 90^{o}C$$

OBS : Na rugosidade, o ar está parado (considerar apenas a condução)

O circuito equivalente para a parede composta é :



Cálculo das resistências térmicas (para uma área unitária) :

$$R_1 = \frac{L_{aço}}{k_{aço}.A} = \frac{0{,}0063}{45 \times 1} = 0{,}00014 h.^{o}C/Kcal$$

$$R_2 = \frac{L_{rug}}{k_{ar}.A} = \frac{0{,}0008}{0{,}013 \times (0{,}7 \times 1)} = 0{,}08791 h.^{o}C/Kcal$$

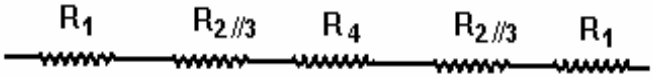
$$R_3 = \frac{L_{rug}}{k_{ref}.A} = \frac{0{,}0008}{1{,}5 \times (0{,}3 \times 1)} = 0{,}0018 h.^{o}C/Kcal$$

$$R_1 = \frac{L_{ref}}{k_{ref}.A} = \frac{0{,}0484}{1{,}5 \times 1} = 0{,}0323 h.^{o}C/Kcal$$

A resistência equivalente à parede rugosa (refratário em paralelo com o ar) é :

$$\frac{1}{R_{2//3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0{,}08791} + \frac{1}{0{,}0018} \Rightarrow R_{2//3} = 0{,}00176\ h.^{o}C/Kcal$$

A resistência total, agora, é obtida por meio de uma associação em série :



$$R_t = R_1 + R_{2//3} + R_4 + R_{2//3} + R_1 = 0{,}0361\ h.^{o}C/Kcal$$

Um fluxo de calor é sempre o $(DT)_{total}$ sobre a R_t , então :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_1 - T_2}{R_t} = \frac{430 - 90}{0{,}0361} \quad \text{Þ} \quad \boxed{\dot{q} = 9418\, Kcal/h}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

• **Exercício 3.11.** Um tubo condutor de vapor de diâmetro interno 160 mm e externo 170 mm é coberto com duas camadas de isolante térmico. A espessura da primeira camada é 30 mm e a da segunda camada é 50 mm. As condutividades térmicas R_1, R_2, R_3 do tubo e das camadas isolantes são 50, 0,15 e 0,08 kcal/h.m.^{o}C, respectivamente. A temperatura da superfície interna do tubo de vapor é 300 ^{o}C e a da superfície externa do segundo isolante é 50 ^{o}C. Calcular :

a) O fluxo de calor por unidade de comprimento do tubo.

b) A temperatura nas interfaces das camadas.

• **Exercício 3.12.** Um reservatório esférico destinado a encerrar oxigênio líquido, tem raio interno igual a 1,5 m e é feito de vidro com espessura igual a 0,03 m (k = 0,6 kcal/h.m.^{o}C). O reservatório é revestido externamente por uma camada de lã de vidro de espessura igual a 0,35 m (k = 0,03 kcal/h.m.^{o}C). A temperatura na face interna do vidro é -180 ^{o}C e na face externa do isolamento é 10^{o}C. Calcular :

a) fluxo de calor através da parede

b) temperatura na interface vidro/isolante

• **Exercício 3.13.** Em uma indústria farmacêutica, pretende-se dimensionar uma estufa. Ela terá a forma cúbica de 1 m de lado e será construída de aço (k = 40 kcal/h.m^{o}C), com 10 mm de espessura, isolada com lã de vidro (k= 0,08 kcal/h.m^{o}C) e revestida com plástico (k= 0,2 kcal/h.m^{o}C) de 10 mm de espessura. O calor será inteiramente gerado por resistências elétricas de 100 W, pelas quais passará uma corrente de 10 A . Não pode ser permitida uma perda de calor superior a 10 % do calor gerado. Sabendo-se que as temperatura nas faces das paredes, interna e externa, são respectivamente 300 ^{o}C e 20 ^{o}C, pede-se :
a) a resistência térmica exigida;
b) a espessura da lã de vidro.

• **Exercício 3.14.** Um forno de formato cúbico, com altura de 5 ft, está isolado com 4" de um material isolante (k=1 Btu/h.ft^{o}F). Nele são inseridas 1500 Ib/h de uma liga metálica, que se funde a 1100 ^{o}F, com calor latente de fusão da liga de 300 Btu/Ib. O forno se encontra em um ambiente onde a temperatura é 75 ^{o}F e o coeficiente de película é 2 Btu/h.ft.^{o}F. Desprezando-se a resistência térmica do forno e admitindo-se que a liga já entre a 1100 ^{o}F, pede-se :

a) o fluxo de calor pelas 6 faces do forno
b) quantos HP são necessários para fundir a liga e compensar as perdas ?

• **Exercício 3.15.** Um forno de 6 m de comprimento, 5m de largura e 3 m de altura tem sua parede constituída de 3 camadas. A camada interna de 0,4 m é de tijolos refratários (k=1,0 kcal/h.m.^{o}C). A camada intermediária de 0,30 m tem a metade inferior de tijolos especiais (k=0,20 kcal/h.m^{o}C) e a metade superior de tijolos comuns (k=0,40 kcal/h.m.^{o}C). A camada externa de 0,05m é de aço (k=30 kcal/hm C). Sabendo-se que a superfície interna está a 1700 ^{o}C e a superfície externa está a 60 ^{o}C . Pede-se :
a) o fluxo de calor pela parede
b) considerando que após, alguns anos o fluxo de calor aumentou 10 % devido ao desgaste da camada de refratários. Calcular este desgaste supondo que o mesmo foi uniforme em todo o forno.

• **Exercício 3.16.** Duas substancias são misturadas, reagindo entre si e liberando calor dentro de um tubo de diâmetro interno 7,62 cm e espessura igual a 0,5 cm (k= 32 kcal/h.m.^{o}C). O comprimento do tubo é 10 m. Todo o calor gerado na reação é cedido ao ambiente, de modo que a temperatura da mistura, 180 ^{o}C, permanece constante. Por motivo de segurança, será necessário isolar a tubulação, de modo que a temperatura na face externa do isolante (k = 0,06 kcal/h.m^{o}C) não ultrapasse 50 ^{o}C. O ar externo está a 25 ^{o}C, com coeficiente de película 12 kcal/h.m^{2}.^{o}C. O coeficiente de película da mistura é 90 kcal/h.m^{2}.^{o}C. Pede-se a espessura mínima necessária do isolante, para atender a condição desejada.

• **Exercício 3.17.** A parede de um forno é constituída de uma camada de 30 cm de um refratário cuja condutividade térmica é uma função da temperatura (**k** = 0,15 + 0,0001**T**) . A temperatura na face interna do refratário é 1050 ^{o}C e na face externa é 250 ^{o}C. Calcular o fluxo de calor através da parede.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

4. FUNDAMENTOS DA CONVECÇÃO

4.1. LEI BÁSICA PARA CONVECÇÃO

O calor transferido por convecção, na unidade de tempo, **entre uma superfície e um fluido**, pode ser calculado através da relação proposta por Isaac Newton :

$$\dot{q} = h.A.\Delta T \qquad \text{(eq. 4.1)}$$

onde, $\dot{q}$ = fluxo de calor transferido por convecção (kcal/h);

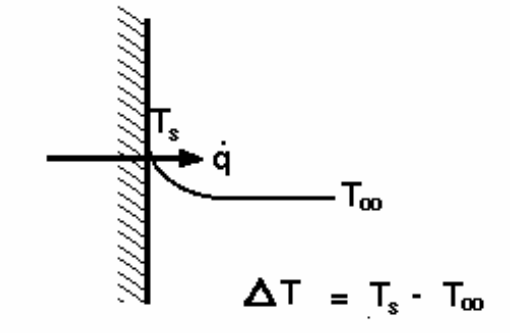
A = área de transferência de calor (m^2);

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície (T_S) e a do fluido em um local bastante

afastado da superfície (T_T) (^oC). A figura 4.1 ilustra o perfil de temperatura e ¦T para o caso

de um fluido escoando sobre uma superfície aquecida;

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película.



[figura 4.1]

A simplicidade da equação de Newton é ilusória, pois ela não explícita as dificuldades envolvidas no estudo da convecção, servindo apenas como uma definição do coeficiente de película (h). O coeficiente de película é, na realidade, uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio fluido e da geometria do sistema. Seu valor numérico não é, em geral, uniforme sobre a superfície. Por isto utiliza-se um valor médio para a superfície. A partir da equação 4.1 , podem ser obtidas as unidades do coeficiente de película. No sistema prático métrico, temos :

$$h = \frac{\dot{q}}{A.\Delta T} \qquad \left[\frac{Kcal/h}{m^2.^oC} = \frac{Kcal}{h.m^2.^oC}\right] \qquad \text{(eq. 4.2)}$$

Analogamente, nos sistemas Inglês e Internacional, temos :

Sistema Inglês $\rightarrow \quad \frac{\text{Btu}}{\text{h.ft}^2.^oF}$

Sistema Iinternacional $\rightarrow \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2.K}$

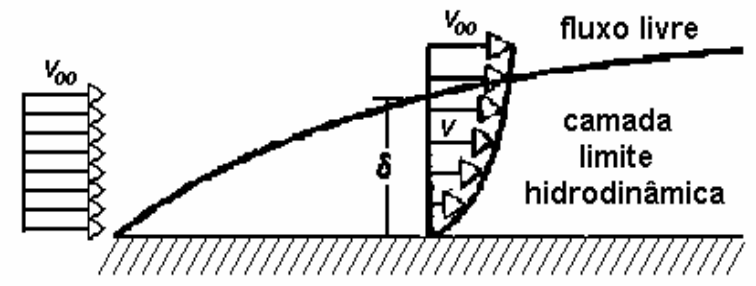
A tabela 4.1 mostra, para diversos meios, ordens de grandeza do coeficiente de película em unidade do sistema prático métrico :

Tabela 4.1 - Ordens de grandeza do coeficiente de película (h)

Meio	kcal/h.m^2.^{o}C
Ar, convecção natural	5-25
Vapor, convecção forçada	25-250
Óleo, convecção forçada	50-1500
Água, convecção forçada	250-10000
Água convecção em ebulição	2500-50000
Vapor, em condensação	5000-100000

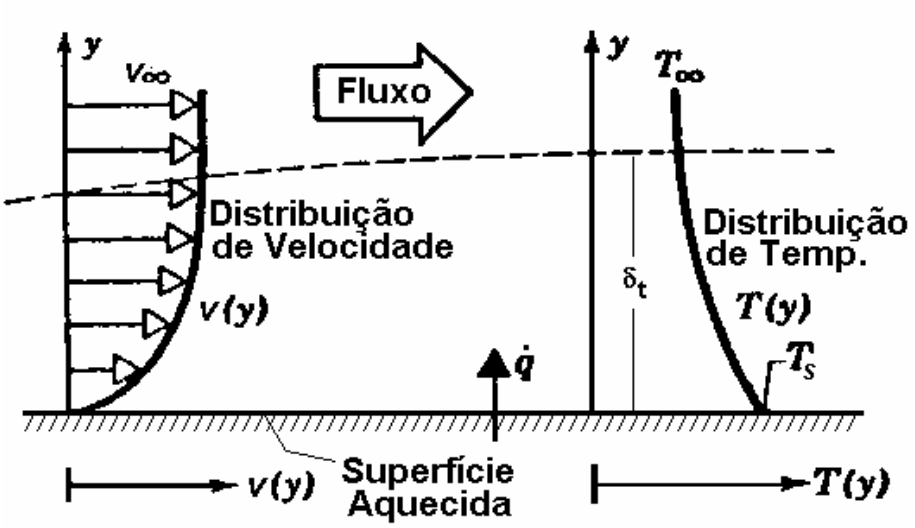
4.2. CAMADA LIMITE

Quando um fluido escoa ao longo de uma superfície, seja o escoamento em regime laminar ou turbulento, as partículas na vizinhança da superfície são desaceleradas em virtude das forças viscosas. A porção de fluido contida na região de variação substancial de velocidade, ilustrada na figura 4.2, é denominada de camada limite hidrodinâmica.



[figura 4.2]

Consideremos agora o escoamento de um fluido ao longo de uma superfície quando existe uma diferença de temperatura entre o fluido e a superfície. Neste caso, O fluido contido na região de variação substancial de temperatura é chamado de camada limite térmica. Por exemplo, analisemos a transferência de calor para o caso de um fluido escoando sobre uma superfície aquecida, como mostra a figura 4.3. Para que ocorra a transferência de calor por convecção através do fluido é necessário um gradiente de temperatura (camada limite térmica) em uma região de baixa velocidade (camada limite hidrodinâmica).



[figura 4.3]

O mecanismo da convecção pode então ser entendido como a ação combinada de condução de calor na região de baixa velocidade onde existe um gradiente de temperatura e movimento de mistura na região de alta velocidade. Portanto :

- região de baixa velocidade ➔ a **condução** é mais importante
- região de alta velocidade ➔ a **mistura** entre o fluido mais quente e o mais frio contribui substancialmente para a transferência de calor

Na camada limite térmica tem-se portanto elevados gradientes de temperatura e pode-se dizer que o estudo do fenômeno da convecção se reduz ao estudo da condução através da mesma. Portanto, considerando a camada limite térmica como uma "parede" hipotética de espessura d_t e condutividade térmica k_t, temos :

$$\dot{q} = \frac{k_t.A}{\delta_t}(T_s - T_\infty) \rightarrow \text{fluxo de calor por condução na camada limite térmica} \qquad \text{(eq. 4.3)}$$

Pela equação de Newton temos que :

$$\dot{q} = h.A.(T_S - T_\infty) \rightarrow \text{fluxo de calor por convecção} \qquad \text{(eq. 4.4)}$$

Igualando as equação 4.3 e 4.4, obtemos :

$$\frac{k_t.A}{\delta_t}(T_s - T_\infty) = h.A.(T_s - T_\infty)$$

$$h = \frac{k_t}{\frac{\delta}{t}} \qquad \text{(eq. 4.5)}$$

Embora essa imagem seja consideravelmente simplificada, a equação 4.5 mostra que o coeficiente de película é inversamente proporcional à espessura da camada limite térmica.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Desta forma, pode entendida, por exemplo, a ação de um ventilador. O aumento da velocidade do fluido causado pela rotação das pás resulta aumento da velocidade de escoamento e, como consequência, em redução da camada limite térmica sobre a nossa pele. A equação 4.5 mostra que isto resulta em uma elevação do coeficiente de película. Esta elevação do coeficiente de película é responsável pelo aumento da transferência de calor por convecção (equação 4.1) e pela conseqüente sensação de alívio do calor.

4.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA (h)

Como visto anteriormente, o coeficiente h é uma função complexa de uma série de variáveis relacionadas com as seguintes características:

1. Dimensão Característica (D)

D: é a dimensão que domina o fenômeno da convecção. Ex: diâmetro de um tubo, altura de uma placa, etc

2. Propriedades Físicas do Fluido ($\mu, \rho, c_p, k, \delta$)

μ: viscosidade dinâmica do fluido;

ρ: densidade do fluido;

c_p: calor específico do fluido;

k : condutividade térmica do fluido;

δ : coeficiente de expansão volumétrica

3. Estado de Movimento do Fluido (V,*g*,ΔT)

V : velocidade do fluido;

g : aceleração da gravidade;

ΔT : diferença de temperatura entre a superfície e o fluido

Logo, h é uma função do tipo :

$$h = f\left(D, \mu, \rho, c_p, k, \delta, V, g, \Delta T\right) \qquad \text{(eq. 4.6)}$$

Uma fórmula que levasse em conta todos estes parâmetros seria extremamente complexa. O problema é, então, contornado dividindo-se o estudo em casos particulares. Por exemplo, o estudo da convecção em gases pode ser subdividido assim :

$$convecção\,em\,gases\begin{cases} natural\begin{cases} parede\,plana\begin{cases} horizontal \\ vertical \end{cases} \\ parede\,cilíndrica\begin{cases} horizontal \\ vertical\begin{cases} interna \\ externa \end{cases} \end{cases} \end{cases} \\ forçada\{etc \end{cases}$$

Para cada caso particular são obtidas equações empíricas através da técnica de análise dimensional combinada com experiências, onde os coeficientes de película são calculados a partir de equações empíricas obtidas correlacionando-se os dados experimentais com o auxílio da análise dimensional. O desenvolvimento desta técnica foge ao escopo deste curso, entretanto, podemos afirmar que os resultados são obtidos na forma de equações dimensionais como mostrado nos exemplos a seguir :

- Para **Convecção Forçada** a equação é do tipo :

$$Nu = \Phi(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$$
$$\text{onde}, Nu = \frac{h.D}{k}; \mathrm{Re} = \frac{D.V.\rho}{\mu} \mathrm{Pr} = \frac{c_p.\mu}{k} \qquad \text{(eq. 4.7)}$$

Exemplo : Escoamento de um fluido no interior de um tubo de diâmetro D no regime de escoamento turbulento (Re > 3300). Neste caso, usamos a seguinte equação :

$$Nu = 0{,}023.\mathrm{Re}^{0,8}.\mathrm{Pr}^{n}$$
$$\text{onde}, \begin{cases} n = 0{,}3 p/\ fluidoesfriando \\ n = 0{,}4 p/\ fluidoaquecendo \end{cases} \qquad \text{(eq. 4.8)}$$

- Para **Convecção Natural** a equação é do tipo :

$$Nu = \Phi(Gr, \mathrm{Pr})$$
$$\text{onde}, Gr = \frac{D^3.\delta.g.\Delta T}{\mu^2} \qquad \text{(eq. 4.9)}$$

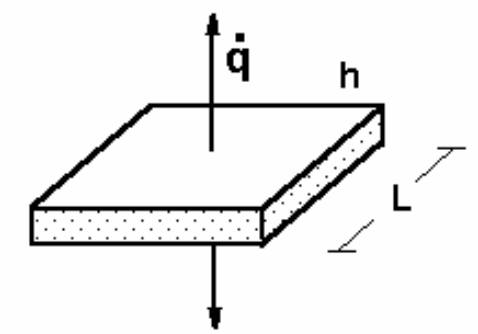
Exemplo : Convecção natural sobre placas verticais de altura D e e cilindros de grande diâmetro e altura D (p/ Gr.Pr < 10^8). Neste caso, usamos a seguinte equação :

$$Nu = 0{,}56(Gr.\Pr)^{0{,}25} \qquad \text{(eq. 4.10)}$$

• **Exercício 4.1.** Em uma placa plana de 150 X 100 mm, eletricamente aquecida, a máxima temperatura permissível no centro da placa é 135 ^{o}C. Para este caso específico o número de Grashof é 2,2 x 10^{7} e o número de Prandt é 0,7. Sabendo que a equação empírica, obtida com o auxílio da análise dimensional, que descreve a convecção natural (regime laminar) em uma placa plana é dada pela equação 4.11 :

$$\text{Nu} = 0{,}555 \times \text{Gr}^{1/4} \times \text{Pr}^{1/4} \qquad \text{onde,} \quad \text{Nu} = \frac{h.L}{k} \qquad \text{(eq. 4.11)}$$

Calcular o fluxo de calor por transferido por convecção, por ambos lados da placa, para o ar atmosférico a 25 ^{o}C (k_{ar} = 0,026 Kcal/h.m.^{o}C).



A dimensão característica (L) é comprimento da placa : L =0,15 m
O de coeficiente de película do ar em volta da placa é calculado a partir da equação 4.11 :

$$\text{Nu} = \frac{h.L}{k_{ar}} = 0{,}555 \times \text{Gr}^{1/4} \times \text{Pr}^{1/4}$$

$$\frac{h \times 0{,}15}{0{,}026} = 0{,}555 \times \left(2{,}2 \times 10^{7}\right)^{1/4} \times (0{,}7)^{1/4} \Rightarrow h = 6{,}03 Kcal/h.m^{2}.^{o}C$$

O fluxo de calor por convecção é dado pela equação de Newton (equação 4.1) :

$$\dot{q} = h.A.\Delta T = 6{,}03 \times [2 \times (0{,}10 \times 0{,}15)] \times (135 - 25)$$

$$\boxed{\dot{q} = 19{,}86\ Kcal/h}$$

4.4. RESISTÊNCIA TÉRMICA NA CONVECÇÃO

Como visto anteriormente, a expressão para o fluxo de calor transferido por convecção é :

$$\dot{q} = h.A.\Delta T \qquad \text{(eq. 4.12)}$$

Um fluxo de calor é também uma relação entre um potencial térmico e uma resistência :

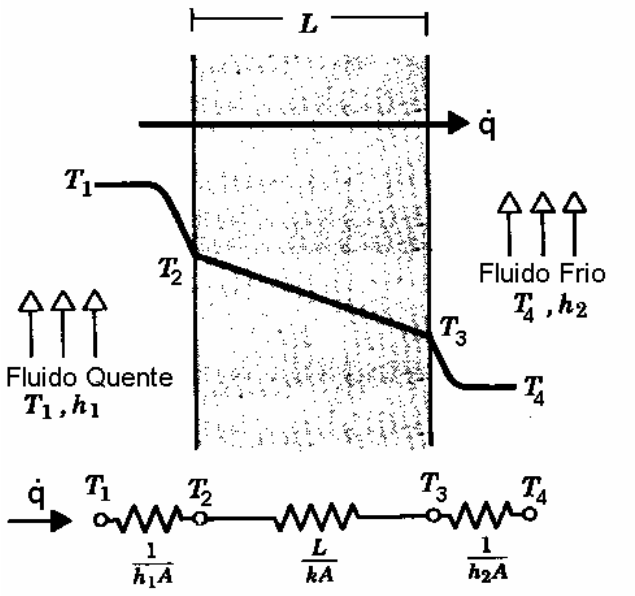
$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R}$$ (eq. 4.13)

Igualando as equações 4.11 e 4.12, obtemos a expressão para a resistência térmica na convecção :

$$R = \frac{1}{h.A}$$ (eq. 4.14)

4.5. MECANISMOS COMBINADOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CONDUÇÃO E CONVECÇÃO)

Consideremos uma parede plana situada entre dois fluidos a diferentes temperaturas. Se as temperaturas T_1 e T_4 dos fluidos são constantes, será estabelecido um fluxo de calor único e constante através da parede (regime permanente). Um bom exemplo desta situação é o fluxo de calor gerado pela combustão dentro de um forno, que atravessa a parede por condução e se dissipa no ar atmosférico.



Utilizando a equação de Newton (equação 4.1) e a equação para o fluxo de calor em uma parede plana (equação 3.6), podemos obter as seguintes equações para o fluxo de calor transferido pelo forno :

$$\dot{q} = h_1.A.(T_1 - T_2)$$ (eq. 4.15)

$$\dot{q} = \frac{k.A}{L}(T_2 - T_3)$$ (eq. 4.16)

$$\dot{q} = h_2.A.(T_3 - T_4)$$ (eq. 4.17)

Colocando as diferenças de temperatura nas equações 4.14 a 4.16 em evidência e somando membro a membro, obtemos :

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{q}}{h_1.A}$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{\dot{q}.L}{k.A}$$

$$(T_3 - T_4) = \frac{\dot{q}}{h_2.A}$$

$$T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = \dot{q}.\left(\frac{1}{h_1.A} + \frac{L}{k.A} + \frac{1}{h_2.A}\right)$$

Substituindo as expressões para as resistências térmicas à convecção e à condução em parede plana na equação acima, obtemos fluxo de calor transferido pelo forno :

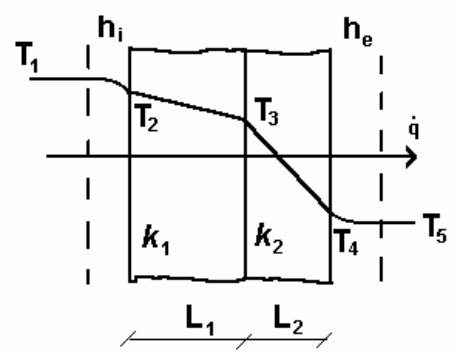
$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_1.A} + \frac{L}{k.A} + \frac{1}{h_2.A}} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} \Rightarrow \dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} \qquad \text{(eq. 4.18)}$$

Portanto, também quando ocorre a ação combinada dos mecanismos de condução e convecção, a analogia com a eletricidade continua válida; sendo que a resistência total é igual à soma das resistências que estão em série, não importando se por convecção ou condução.

• **Exercício 4.2.** Uma parede de um forno é constituída de duas camadas : 0,20 m de tijolo refratário (k =1,2 kcal/h.m.^{o}C) e 0,13 m de tijolo isolante (0,15 kcal/h.m.^{o}C). A temperatura dos gases dentro do forno é 1700^{o}C e o coeficiente de película na parede interna é 58 kcal/h.m^{2}.^{o}C. A temperatura ambiente é 27 ^{o}C e o coeficiente de película na parede externa é 12,5 kcal/h m^{2} ^{o}C. Desprezando a resistência térmica das juntas de argamassa, calcular :

a) o fluxo de calor por m^{2} de parede;

b) a temperatura nas superfícies interna e externa da parede.



parede de refratário :

$L_1 = 0,20\,m \qquad k_1 = 1,2\ Kcal/h.m.^{o}C$

parede de isolante :

$L_2 = 0,13\,m \qquad k_2 = 0,15\ Kcal/h.m.^{o}C$

$h_i = 58\,Kcal/h.m^2.^{o}C \qquad h_e = 12,5\,Kcal/h.m^2.^{o}C$

$T_1 = 1700\ ^{o}C \qquad T_3 = 27\ ^{o}C$

a) Considerando uma área unitária da parede ($A=A_1=A_2=1\ m^2$), temos :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_1 - T_5}{R_i + R_{ref} + R_{iso} + R_e} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{1}{h_i.A} + \frac{L_1}{k_1.A} + \frac{L_2}{k_2.A} + \frac{1}{h_e.A}} = \frac{1700 - 27}{\frac{1}{58 \times 1} + \frac{0,20}{1,2 \times 1} + \frac{0,13}{0,15 \times 1} + \frac{1}{12,5 \times 1}}$$

$$\boxed{q = 1480,6\ Kcal/h \quad \text{p / } m^2 \text{ de prede}}$$

b) O fluxo de calor também pode ser calculado através de cada resistência individual. Na película interna, obtemos :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{ref}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_i.A}} = h_i.A.(T_1 - T_2)$$

$$1480,6 = 58 \times 1 \times (1700 - T_2)$$

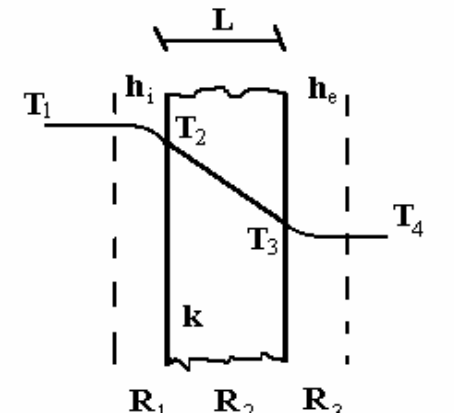
$$\boxed{T_2 = 1675\ ^oC}$$

Analogamente na película externa, obtemos :

$$1480,6 = 12,5 \times 1 \times (T_4 - 27)$$

$$\boxed{T_4 = 145\ ^oC}$$

• **Exercício 4.3.** A parede de um edifício tem 30,5 cm de espessura e foi construída com um material de k = 1,31 W/m.K. Em dia de inverno as seguintes temperaturas foram medidas : temperatura do ar interior = 21,1 ^{o}C; temperatura do ar exterior = -9,4 ^{o}C; temperatura da face interna da parede = 13,3 ^{o}C; temperatura da face externa da parede = -6,9 ^{o}C. Calcular os coeficientes de película interno e externo à parede.



$T_1 = 21,1\ ^0C$ $\qquad$ $k = 1,31 W/m.K$

$T_2 = 13,3\ ^0C$ $\qquad$ $A = 1\ m^2$

$T_3 = -6,9\ ^0C$ $\qquad$ $L = 0,305\ m$

$T_4 = -9,4\ ^0C$

O fluxo de calor pode ser obtido considerando a condução através da parede :

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_2} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L}{k.A}} = \frac{13{,}3 - (-6{,}9)}{\frac{0{,}305}{1{,}31 \times 1}}$$

$$\dot{q} = 86{,}76\, W \quad p/m^2$$

Considerando agora a convecção na película externa :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_i.A}} \quad \Rightarrow \quad 86{,}76 = \frac{21{,}1 - 13{,}3}{\frac{1}{h_1 \times 1}}$$

$$\boxed{h_i = 11{,}12\, W/m^2.k}$$

Agora, na película externa :

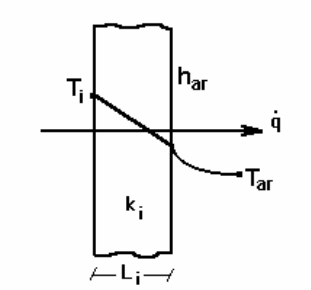
$$86{,}76 = \frac{-6{,}9 - (-9{,}4)}{\frac{1}{h_e \times 1}}$$

$$\boxed{h_e = 34{,}72\, W/m^2.K}$$

• **Exercício 4.4.** Um forno de formato cúbico, com altura de 6 ft, está isolado com 4" de um material isolante de condutividade térmica 1,0 Btu/h.ft.^{o}F. Nele são inseridos 1000 lb/h de uma liga que se funde a 1200 ^{o}F (admite-se que a liga já entre a 1200 ^{o}C). O coeficiente de convecção do ar externo é 3 BTU/h.ft^2.^{o}F e a temperatura do ar externo de 77 ^{o}F. Desprezando-se a resistência térmica da parede do forno e conhecendo-se o calor latente de fusão da liga de 300 BTU/lb, calcular :

a) o fluxo de calor transferido pelas paredes do forno;
b) quantos KW são necessários para manter o forno em operação.

DADO : 1 KW = 3413 Btu/h



$h_{ar} = 3 Btu/h.ft^2.^oF$ $\quad k_i = 0{,}05 Btu/h.ft.^oF$

$A = 6 \times (6 \times 6) = 216\, ft^2$ $\quad L_i = 4'' = (4/12)\, ft = 0{,}3333\, ft$

$T_i = 1200\, ^oF$ $\quad T_{ar} = 77\, ^oF$

$\Delta H_{fusão} = 300 Btu/lb$ $\quad \dot{m}_{liga} = 1000 lb/h$

a) Cálculo do fluxo de calor :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_i - T_{ar}}{R_i + R_{ar}}$$

$$R_i = \frac{L_i}{k_i.A} = \frac{0{,}333(ft)}{1(Btu/h.ft.^oF) \times 216(ft^2)} = 0{,}001543 h.^oF/Btu$$

$$R_{ar} = \frac{1}{h_{ar}.A} = \frac{1}{3(Btu/h.ft^2.^oF) \times 216(ft^2)} = 0{,}003086 h.^oF/Btu$$

$$\dot{q} = \frac{1200 - 77}{0{,}001543 + 0{,}001543} \quad \text{Þ} \quad \boxed{\dot{q} = 363901{,}5\ Btu/h}$$

b) Para manter o forno em operação é necessário repor as perdas pelas paredes e fornecer o calor necessário para a fusão da liga:

$$\dot{q}_{op} = \dot{q} + \dot{q}_f$$

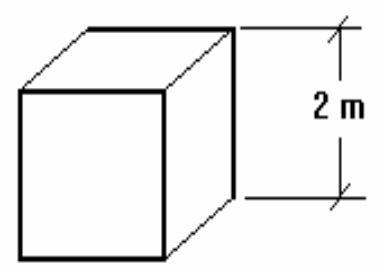
$$\text{calor para fusão} \rightarrow \dot{q}_f = \dot{m}_{liga}.\Delta H_{fusão} = 1000\,(lb/h) \times 300\,(Btu/lb) = 300000\ Btu/lb$$

$$\dot{q}_{op} = 363901{,}5 + 300000 = 663901{,}5\ Btu/h$$

Como 1 KW = 3413 Btu/h , obtemos :

$$\dot{q}_{op} = \frac{663901{,}5}{3413} \quad \text{Þ} \quad \boxed{\dot{q}_{op} = 194{,}5\ KW \ \text{(potência do forno)}}$$

• **Exercício 4.5.** Um reator de paredes planas foi construído em aço inox e tem formato cúbico com 2 m de lado. A temperatura no interior do reator é 600 ^{o}C e o coeficiente de película interno é 45 kcal/h.m^2.^{o}C. Tendo em vista o alto fluxo de calor, deseja-se isola-lo com lã de rocha (k= 0,05 kcal/h.m.^{o}C) de modo a reduzir a transferência de calor. Considerando desprezível a resistência térmica da parede de aço inox e que o ar ambiente está a 20^{o}C com coeficiente de película 5 kcal/h.m^2.^{o}C, calcular :
a) O fluxo de calor antes da aplicação da isolamento;
b) A espessura do isolamento a ser usado, sabendo-se que a temperatura do isolamento na face externa deve ser igual a 62 ^{o}C;
c) A redução (em %) do fluxo de calor após a aplicação do isolamento.



$h_{ar} = 5 Kcal/h.m^2.^oC$ $\quad h_i = 45 Kcal/h.m^2.^oC$

$k_{iso} = 0{,}05 Kcal/h.m.^oC$ $\quad A = 6 \times (2 \times 2) = 24 m^2$

$T_i = 600\, ^oC$ $\quad T_{ar} = 20\, ^oC$ $\quad T_s = 62\, ^oC$

a) Desprezando a resistência do inox e a variação da área devido à espessura do isolante, o fluxo antes do isolamento é dado por :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta)_{total}}{R_t} = \frac{T_i - T_{ar}}{\frac{1}{h_i.A} + \frac{1}{h_{ar}.A}} = \frac{600 - 20}{\frac{1}{45.24} + \frac{1}{5.24}} \quad \text{Þ} \quad \boxed{\dot{q} = 62640,4\ Kcal/h}$$

b) Após o isolamento o fluxo pode ser calculado na camada limite externa :

$$\dot{q}' = \frac{T_s - T_{ar}}{\frac{1}{h_{ar}.A}} = \frac{62 - 20}{\frac{1}{5.24}} = 5040\ Kcal/h$$

A espessura do isolamento pode ser calculada levando em conta as resistências térmicas da película interna e do isolante :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_s}{\frac{1}{h_i.A} + \frac{L}{k_{iso}.A}} \quad \Rightarrow \quad 5040 = \frac{600 - 62}{\frac{1}{45.24} + \frac{L}{0,05.24}}$$

$$\boxed{L = 0,1273\ m = 12,73\ cm}$$

c) %Redução $= \frac{\dot{q} - \dot{q}'}{\dot{q}} \times 100 = \frac{62640,4 - 5040}{62640} \times 100$ Þ $\boxed{\%\text{Redução} = 91,95\,\%}$

• **Exercício 4.6.** No interior de uma estufa de alta temperatura os gases atingem 650 ^{o}C. A parede da estufa é de aço, tem 6 mm de espessura e fica em um espaço fechado em que há risco de incêndio, sendo necessário limitar a temperatura da superfície em 38 ^{o}C. Para minimizar os custos de isolação, dois materiais serão usados: primeiro um isolante de alta temperatura (mais caro), aplicado sobre o aço e, depois, magnésia (menos caro) externamente. A temperatura máxima suportada pela magnésia é 300 ^{o}C. Conhecendo os dados abaixo, pede-se:

a) Especifique a espessura (em cm) de cada material isolante.

b) Sabendo que o custo por cm de espessura colocado do isolante de alta temperatura é duas vezes que o da magnésia, calcule a elevação percentual de custo se fosse utilizado apenas o isolante de alta temperatura.

DADOS:

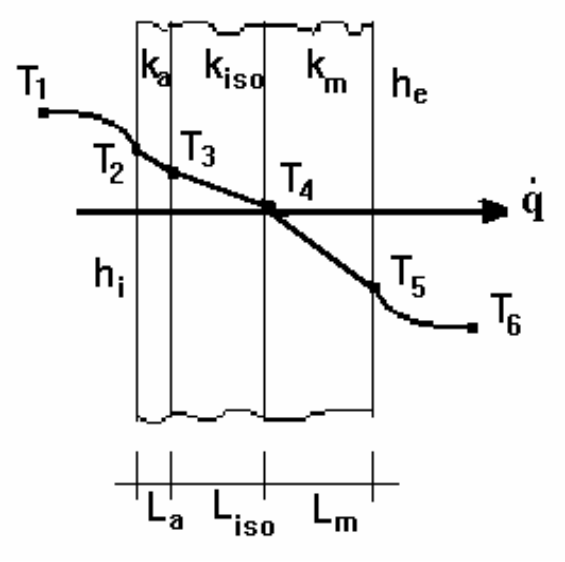
temperatura ambiente : 20 ^{o}C

coeficiente de película interno : 490 Kcal/h.m^{2}.^{o}C

coeficiente de película interno : 20 Kcal/h.m^{2}.^{o}C

condutividade térmica do aço : 37,25 Kcal/h.m.^{o}C

condutividade térmica do isolante de alta temperatura : 0,0894 Kcal/h.m.^{o}C



$A = 1\ m^2$

$h_i = 490\ Kcal/h.m^2.^oC$

$h_e = 20\ Kcal/h.m^2.^oC$

$k_a = 37,25\ Kcal/h.m.^oC$

$k_{iso} = 0,0894\ Kcal/h.m.^oC$

$k_m = 0,0670\ Kcal/h.m.^oC$

$T_4 = 300\ ^oC \quad T_5 = 38\ ^oC \quad T_6 = 20\ ^oC$

$L_a = 6\ mm = 0,006\ m$

a) O fluxo de calor que atravessa a parede pode ser calculado na película externa :

$$\dot{q} = \frac{T_5 - T_6}{R_e^{conv}} = \frac{T_5 - T_6}{\frac{1}{h_e.A}} = \frac{38-20}{\frac{1}{20\times 1}} = 360\ Kcal/h$$

Cálculo da espessura do isolante de magnésia :

$$\dot{q} = 360 = \frac{T_4 - T_5}{R_m^{cond}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{L_m}{k_m.A}} = \frac{300-38}{\frac{L_m}{0,067\times 1}} \quad \Rightarrow \quad L_m = 0,0488m = 4,88cm$$

Cálculo da temperatura T_3 :

$$\dot{q} = 360 = \frac{T_1 - T_2}{R_i^{conv}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_i.A}} = \frac{650 - T_2}{\frac{1}{490\times 1}} \quad \Rightarrow \quad T_2 = 649,26^oC$$

$$\dot{q} = 360 = \frac{T_2 - T_3}{R_a^{cond}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_a}{k_a.A}} = \frac{649,26 - T_3}{\frac{0,006}{37,25\times 1}} \quad \Rightarrow \quad T_3 = 649,20^oC$$

Cálculo da espessura do isolante de alta temperatura :

$$\dot{q} = 360 = \frac{T_3 - T_4}{R_{iso}^{cond}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{L_{iso}}{k_{iso}.A}} = \frac{649,2 - 300}{\frac{L_{iso}}{0,0894 \times 1}}$$

$$\boxed{L_{iso} = 0,0867m = 8,67cm}$$

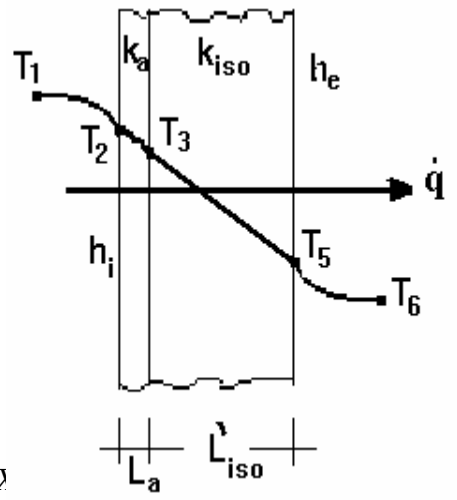
b) Se for usado apenas o isolante de alta temperatura, mantendo as demais condições, a nova espessura isolante pode ser calculada assim:

$$\dot{q} = \frac{T_3 - T_5}{\frac{L'_{iso}}{k_{iso}.A}} \quad \Rightarrow \quad 360 = \frac{649,2 - 38}{\frac{L'_{iso}}{0,0894 \times 1}}$$

$$\boxed{L'_{iso} = 0,1518m = 15,18cm}$$

Cálculo da elevação percentual de custo :

Custo da isolante de magnésia = X



Custo da isolante de alta temperatura = $2X$

O custo de cada caso será :

$$Custo(a) = 4,88.(X) + 8,67.(2X) = 22,22X$$
$$Custo(b) = 15,18.(2X) = 30,36X$$

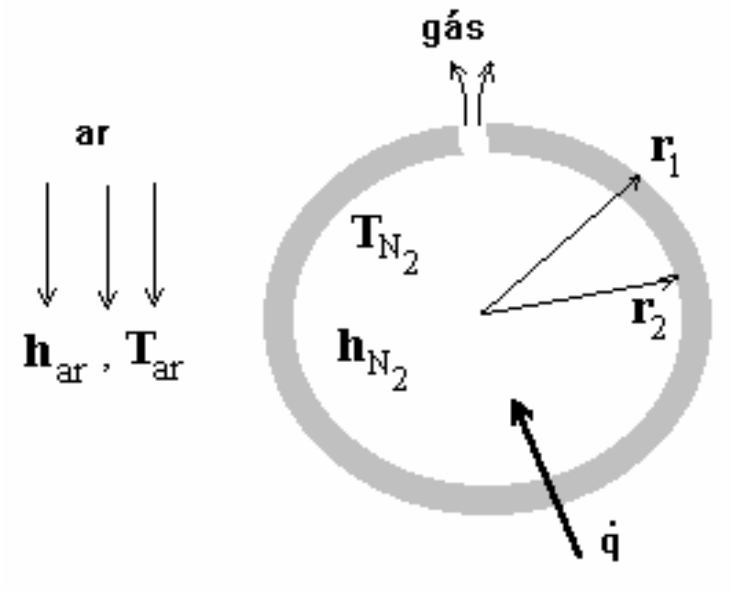
$$\%de elevação de custo = \frac{Custo(b) - Custo(a)}{Custo(a)} = \frac{(30,36 - 22,22)X}{22,22X} \times 100$$

$$\boxed{\%\ \ de\ \ elevação\ \ de\ \ custo = 36,6\%}$$

• **Exercício 4.7.** Um recipiente esférico é usado para armazenar nitrogênio líquido a 77 K (ponto de ebulição). O recipiente tem 0,5m de diâmetro interno e é isolado com uma camada de pó de sílica (k = 0,0017 W/m.K). A isolação tem 25 mm de espessura e sua superfície externa está exposta ao ar a 300 K. O coeficiente de película externo é 20 W/m^2.K. O calor latente de vaporização e a densidade do nitrogênio são 2x10^5 J/Kg e 804 Kg/m^3, respectivamente. Desprezando as resistências térmicas da película interna e das paredes metálicas do recipiente, calcular :

a) Fluxo de calor transferido para o nitrogênio

b) Taxa de evaporação do nitrogênio em litros/dia (existe um respiro para a saída dos gases)



$T_{N_2} = 77K \;\; T_{ar} = 300K$

$k_{si} = 0{,}0017 W/m^2 .K$

$\Delta H_v = 2 \times 10^5 \, J/Kg$

$\rho_{N_2} = 804 Kg/m^3$

$r_1 = 0{,}25m$

$r_2 = 0{,}25 + 0{,}025 = 0{,}275m$

a) O fluxo de calor transferido pode ser calculado assim :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_{ar} - T_{N_2}}{R_{ar}^{conv} + R_{Si}^{cond} + R_{aço}^{cond} + R_{N_2}^{conv}}$$

Desprezando : $R_{aço}^{cond} \approx 0 e R_{N_2}^{conv} \approx 0$, temos :

$$\dot{q} = \frac{T_{ar} - T_{N_2}}{\frac{1}{h_{ar} \times 4 \times \pi \times r_2^2} + \frac{1}{4 \times \pi}\left[\frac{1}{k_{Si}}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right]}$$

$$\boxed{\dot{q} = 13{,}06 \, W}$$

b) A energia recebida pelo N_2 , utilizada na evaporação, é o produto da massa pelo calor latente de vaporização :

$$Q = m . \Delta H_v$$

Conhecendo a taxa de transferência de energia (calor), podemos obter a taxa de evaporação :

$$\dot{q} = \dot{m} . \Delta H_v \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{q}}{\Delta H_v} = \frac{13{,}06 J/s}{2 \times 10^5 \, J/Kg} = 6{,}53 \times 10^{-5} \, Kg/s$$

$$\dot{m} = 6{,}53 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s} \times 3600 \frac{s}{h} \times 24 \frac{h}{dia} = 5{,}64 \, Kg/dia$$

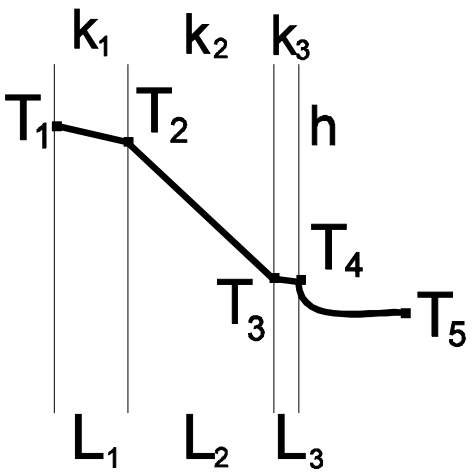
$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{5{,}64 \, Kg/dia}{804 \, Kg/m^3} = 0{,}007 \, m^3/dia$$

$$\boxed{\dot{V} = 7 \; litros/dia}$$

• **Exercício 4.8.** A parede plana de um tanque para armazenagem de produtos químicos é constituída de uma camada interna à base de carbono (k = 10 Kcal/h.m.^{o}C) de 40 mm de espessura, uma camada intermediária de refratário (k = 0,14 Kcal/h.m.^{o}C) e um invólucro de aço (k =45 Kcal/h.m.^{o}C) com 10 mm de espessura. Com a superfície interna da camada carbono a 190 ^{o}C e o ar ambiente a 30 ^{o}C, a temperatura da superfície externa do aço não deve ser maior que 60 ^{o}C por motivos de segurança do trabalhadores. Considerando que o coeficiente de película no ar externo é 12 Kcal/h.m^{2}.^{o}C, determine :

a) a espessura mínima do refratário;

b) a temperatura da superfície externa do aço se a camada de refratário for trocada por uma de isolante (k = 0,03 Kcal/h.m.^{o}C) de mesma espessura.



$$L_1 = 40mm = 0,04m$$
$$L_2 = 10mm = 0,01m$$
$$k_1 = 10\,Kcal/h.m.^oC$$
$$k_2 = 0,14\,Kcal/h.m.^oC$$
$$k_3 = 45\,Kcal/h.m.^oC$$
$$h = 12\,Kcal/h.m^2.^oC$$
$$T_1 = 190\ ^oC$$
$$T_5 = 30\ ^oC$$

a) A mínima espessura de refratário será obtida quando a temperatura externa do aço for a máxima permitida. Para uma área unitária de parede (A = 1 m^{2}), o fluxo de calor poder ser calculado na película externa :

$$\dot{q} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{1}{h.A}} = \frac{60-30}{\frac{1}{12\times 1}} = 360Kcal/h\ \left(p/m^2\right)$$

De posse do fluxo, e considerando as resistências térmicas das três camadas, podemos fazer :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{k_1.A} + \frac{L_2}{k_2.A} + \frac{L_3}{k_3.A}} \quad \Rightarrow \quad 360 = \frac{190-60}{\frac{0,04}{10\times 1} + \frac{L_2}{0,14\times 1} + \frac{0,01}{45\times 1}}$$

$$\boxed{L_2 = 0,05m = 50mm}$$

b) O novo fluxo de calor, menor devido ao uso do isolante de baixa condutividade (k = 0,03 Kcal/h.m.^{o}C), é obtido considerando as duas únicas temperaturas que não variam :

$$\dot{q}' = \frac{T_1 - T_5}{\frac{L_1}{k_1.A} + \frac{L_2}{k_2'.A} + \frac{L_3}{k_3.A} + \frac{1}{h.A}} = \frac{190 - 30}{\frac{0,04}{10 \times 1} + \frac{0,05}{0,03 \times 1} + \frac{0,01}{45 \times 1} + \frac{1}{12 \times 1}} = 91,2 Kcal/h \ \left(p/m^2\right)$$

Novamente, na película externa, podemos obter a temperatura da superfície do aço :

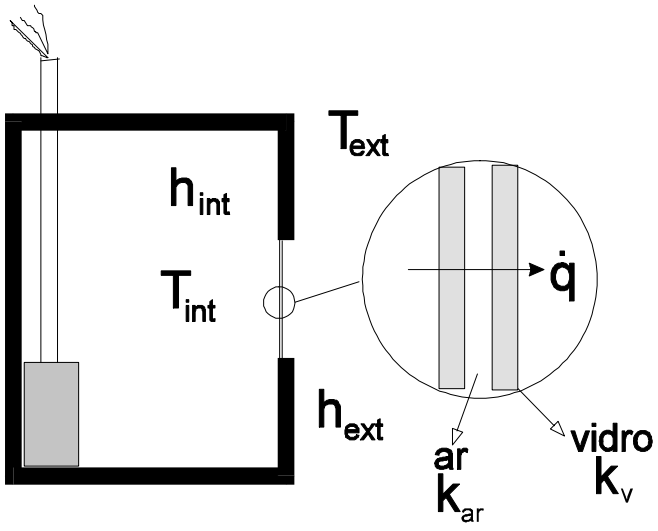
$$\dot{q}' = \frac{\frac{T_4' - T_5}{1}}{h.A} \quad \Rightarrow \quad 91,2 = \frac{\frac{T_4' - 30}{1}}{12 \times 1} \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_4' = 37,6\ ^oC}$$

• **Exercício 4.9.** Em uma região fria, uma casa possui janelas "termoisolantes". As janelas, de 10 ft x 4 ft, consistem de duas lâminas de vidro (k = 0,5 Btu/h.ft.^{o}F), cada uma com 1/4" de espessura, separadas por uma camada de ar estagnado (k = 0,015 Btu/h.ft.^{o}F), também de 1/4" de espessura. No interior da casa a temperatura do ar é 84,4 ^{o}F e o coeficiente de película é 1,0 Btu/h.ft^2.^{o}F, enquanto que externamente a temperatura do ar é 20,5 ^{o}F e o coeficiente de película é 1,4 Btu/h.ft^2.^{o}F. O sistema de aquecimento da casa tem um rendimento de 50% e utiliza carvão com poder calorífico de 13200 Btu/lb. Determine :

a) as perdas de calor, por hora, através de cada janela "termoisolante";

b) o consumo mensal de carvão devido as perdas por cada janela "termoisolante";

c) o consumo mensal de carvão devido à substituição da janela "termoisolante" por uma janela comum, de vidro, com 3/8" de espessura e mesma condutividade térmica.



$T_{int} = 84,4\ ^oF$ $\quad T_{ext} = 20,5\ ^oF$

$h_{int} = 1,0\ Btu/h.\ ft^2.^oF$ $\quad h_{ext} = 1,4\ Btu/h.\ ft^2.^oF$

Área da janela $\rightarrow$ $\quad A = 10\ ft \times 4\ ft = 40\ ft^2$

$L_{vid} = 1/4'' = 1/4 \times 12 = 0,021\ ft$

$L_{ar} = 1/4'' = 1/4 \times 12 = 0,021\ ft$

$k_{vid} = 0,5\ Btu/h.\ ft.^oF$ $\quad h_{ar} = 0,015\ Btu/h.\ ft.^oF$

$PCI_{carvão} = 13200\ Btu/lb$ $\quad \eta_{sist} = 50\%$

a) No cálculo das perdas pela janela, devem ser consideradas 5 resistências. Para a camada de ar estagnado entre os vidros, somente se processa a condução :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)}{R_t} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_i^{conv} + R_v^{cond} + R_{ar}^{cond} + R_v^{cond} + R_e^{conv}}$$

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\frac{1}{h_{\text{int}}.A} + \frac{L_{vid}}{k_{viv}.A} + \frac{L_{ar}}{k_{ar}.A} + \frac{L_{vid}}{k_{viv}.A} + \frac{1}{h_{\text{ext}}.A}} = \frac{84,4 - 20,5}{\frac{1}{1,0 \times 40} + \frac{0,021}{0,5 \times 40} + \frac{0,021}{0,015 \times 40} + \frac{0,021}{0,5 \times 40} + \frac{1}{1,4 \times 40}}$$

$$\boxed{\dot{q} = 799,2\, Btu/h}$$

b) No cálculo do consumo de carvão deve ser levado em conta que o sistema de aquecimento tem um rendimento de 50% :

$$M_{carvão} = \frac{\dot{q}/\eta}{PCI} = \frac{799,2/0,5\,(Btu/h)}{13200(Btu/lb)} = 0,121 lb/h$$

$$M_{carvão} = 0,121\left(\frac{lb}{h}\right) \times 24\left(\frac{h}{dia}\right) \times 30\left(\frac{dia}{mês}\right) \Rightarrow \boxed{M_{carvão} = 87,12\ lb/mês}$$

c) Ao substituir a janela "termoisolante" por uma janela comum de vidro, com 3/8" de espessura, passamos a ter três resistências :

$$L'_{vid} = 3/8'' = 3/8 \times 12 = 0,031\, ft$$

$$\dot{q}' = \frac{(\Delta T)}{R_t} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_i^{conv} + R_{vid}^{cond} + R_e^{conv}}$$

$$\dot{q}' = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\frac{1}{h_{\text{int}}.A} + \frac{L'_{vid}}{k_{viv}.A} + \frac{1}{h_{\text{ext}}.A}} = \frac{84,4 - 20,5}{\frac{1}{1,0 \times 40} + \frac{0,031}{0,5 \times 40} + \frac{1}{1,4 \times 40}} = 1439,2\, Btu/h$$

$$M_{carvão} = \frac{\dot{q}'/\eta}{PCI} = \frac{1439,2/0,5\,(Btu/h)}{13200(Btu/lb)} = 0,218 lb/h$$

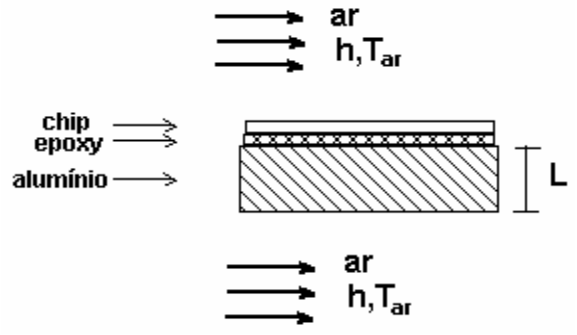
$$M_{carvão} = 0,.218\left(\frac{lb}{h}\right) \times 24\left(\frac{h}{dia}\right) \times 30\left(\frac{dia}{mês}\right) \Rightarrow \boxed{M_{carvão} = 156,96 lb/mês}$$

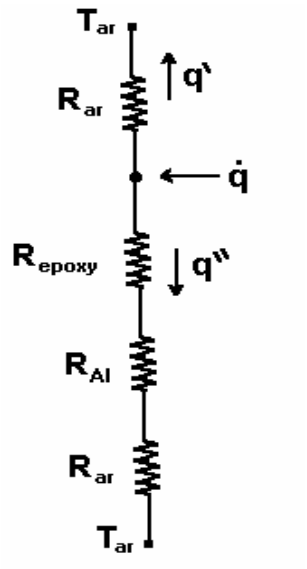
• **Exercício 4.10.** Um delgado chip de silício de resistência térmica desprezível e uma base de alumínio de 8 mm de espessura (k = 238 W/m.K) são separados por uma cola de epoxy de resistência térmica 0,9 x 10^{-4} K/W. A face superior do chip e a face inferior da base de alumínio estão expostas ao ar na temperatura de 298 K e com coeficiente de película de 100 W/m^2.K. O chip dissipa calor na razão de 10^4 W por m^2 de superfície (

inferior e superior) e sua temperatura deve ser mantida abaixo de 358 K (desprezar a transferência de calor pelas áreas laterais).

a) responda se a temperatura do chip ficará abaixo da máxima temperatura permitida.

b) Calcule qual deveria ser a resistência da cola para que o limite de temperatura do chip seja ultrapassado em 1 K.





$k_{Al} = 238\, W/m.K$

$h_{ar} = 100\, W/m^2.K$

$T_{ar} = 298\, K$

$\dot{q} = 10^4\, W$

$A = 1\, m^2$

$T_{chip} = ?$

a) O chip dissipa calor pelas faces superior e inferior, então :

$$\dot{q} = \dot{q}' + \dot{q}''$$

$$\dot{q} = \frac{T_{chip} - T_{ar}}{\frac{1}{h.A}} + \frac{T_{chip} - T_{ar}}{R_{cola} + \frac{L}{k_{Al}.A} + \frac{1}{h.A}}$$

$$\dot{q} = \left(T_{chip} - T_{ar}\right).\left[h.A + \frac{1}{R_{cola} + \frac{L}{k_{Al}.A} + \frac{1}{h.A}}\right]$$

$$10^4 = \left(T_{chip} - 298\right)\left[100 \times 1 + \frac{1}{0{,}9 \times 10^{-4} + \frac{0{,}008}{238 \times 1} + \frac{1}{100 \times 1}}\right]$$

$$10^4 = \left(T_{chip} - 298\right) \times 198{,}78 \Rightarrow T_{chip} = 348K$$

$\rightarrow$ A temperatura do chip ficará abaixo do limite de segurança

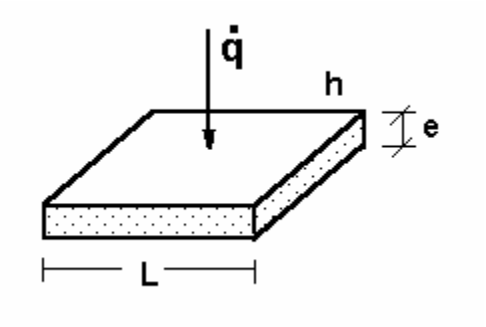
b) O limite de temperatura do chip será :

$$T'_{chip} = 358 + 1 = 359 \ \ K$$

$$10^4 = \left(359 - 298\right)\left[100 + \frac{1}{R'_{cola} + \frac{0{,}008}{238} + \frac{1}{100}}\right]$$

$$\boxed{R'_{cola} = 5{,}607 \times 10^{-3} \ K/W}$$

• **Exercício 4.11.** Uma placa de gelo com 10 mm de espessura e 300 mm em cada lado é colocada sobre uma superfície bem isolada. Na superfície superior, a placa está exposta ao ar ambiente em um local onde a temperatura é 25 ^{o}C e o coeficiente de película é 30 kcal/h.m^2.^{o}C. Desprezando a transferência de calor pelas laterais da placa e supondo que a mistura gelo-água permanece a 0 ^{o}C, quanto tempo é necessário para a fusão completa da placa? A densidade e o calor latente de fusão do gelo são 935 kg/m^3 e 80,3 kcal/kg, respectivamente.



$e = 10mm = 0{,}01m \quad L = 300mm = 0{,}3m$

$T_{ar} = 25\,^{o}C \qquad h = 30Kcal/h.m^2.{}^{o}C$

temp. da mistura gelo/água $\rightarrow T_p = 0\,^{o}C$

$\rho_g = 935Kg/m^3 \quad \Delta H_f = 80{,}3Kcal/Kg$

Volume da placa ® $V = e.(L)^2 = 0{,}01 \times 0{,}3 \times 0{,}3 = 0{,}0009m^3$

Massa da placa ® $m = \rho_g.V = 935\left(Kg/m^3\right) \times 0{,}0009m^3 = 0{,}8415Kg$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Cálculo do calor necessário para a fusão do gelo :

$$Q = \Delta H_f .m = 80Kcal/Kg \times 0{,}8415Kg = 67{,}57Kcal$$

Cálculo do fluxo de calor para a placa (desprezando as áreas laterais da placa) :

Área de transferência de calor ® $A = L.L = 0{,}3 \times 0{,}3 = 0{,}09\,m^2$

$$\dot{q} = h.A.(T_{ar} - T_p) = 30 \times 0{,}09 \times (25 - 0) = 67{,}5Kcal/h$$

$$\dot{q} = \frac{Q}{t} \Rightarrow t = \frac{Q}{\dot{q}} = \frac{67{,}57Kcal}{67{,}5(Kcal/h)} = 1{,}001h \qquad \text{Þ} \qquad \boxed{t \cong 1\text{hora}}$$

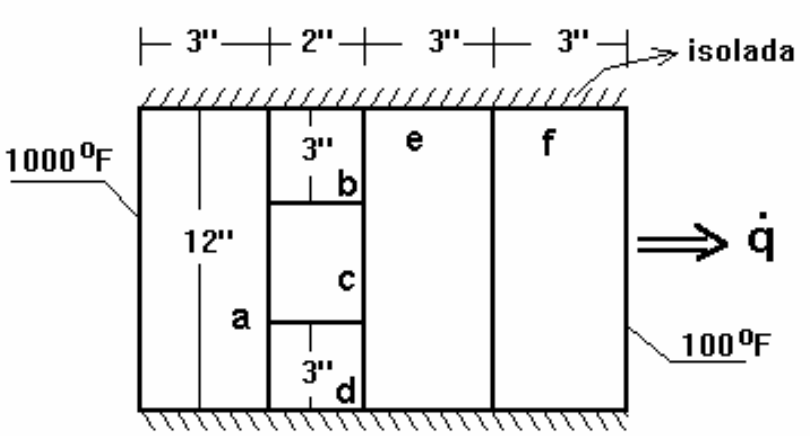
• **Exercício 4.12.** Dada a parede composta abaixo, determinar :

a) O fluxo de calor, considerando a largura da parede igual a 12";

b) A temperatura da interface entre os materiais "f" e "e";

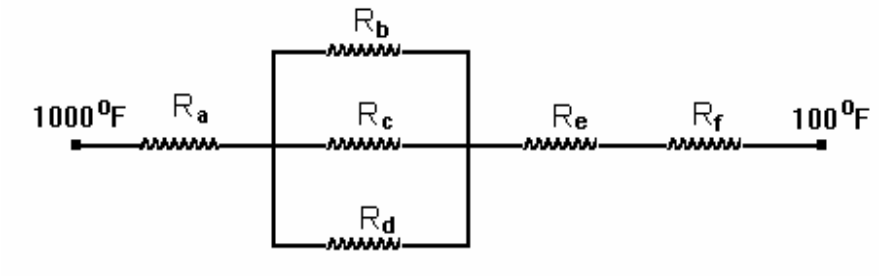
c) O coeficiente de película entre o material "f" e o ambiente, considerando que a temperatura ambiente é 60 ^{o}F;

d) Mantendo a temperatura da face externa do material "f" em 100 ^{o}F e reduzindo o fluxo de calor em 20%, qual deverá ser a nova espessura da parede "f".



material	a	b	c	d	e	f
k (Btu/h.ft.^{o}F)	100	40	50	40	30	40

Usando a analogia elétrica, o circuito equivalente à parede composta é :



a) Para a área unitária de transferência de calor (A = 12"x12" = 1 ft^2), as resistências térmicas de cada parede individual são :

$$R_a = \frac{3/12\,(ft)}{100\left(\frac{Btu}{h.ft.^oF}\right)\times 1\left(ft^2\right)} = 0{,}0025\,h.^oF/Btu \qquad R_b = \frac{2/12}{40\times 3/12} = 0{,}0167\,h.^oF/Btu$$

$$R_c = \frac{2/12}{50\times 6/12} = 0{,}0067\,h.^oF/Btu \qquad R_d = \frac{2/12}{40\times 3/12} = 0{,}0167\,h.^oF/Btu$$

$$R_e = \frac{3/12}{30\times 1} = 0{,}0083\,h.^oF/Btu \qquad R_f = \frac{3/12}{40\times 1} = 0{,}0063\,h.^oF/Btu$$

Para o circuito em paralelo :

$$\frac{1}{R_{bcd}} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} = \frac{1}{0{,}0167} + \frac{1}{0{,}0067} + \frac{1}{0{,}0167} \quad \Rightarrow \quad R_{bcd} = 0{,}0037\,h.^oF/Btu$$

Para o circuito em série :

$$R_t = R_a + R_{bcd} + R_e + R_f = 0{,}0025 + 0{,}0037 + 0{,}0083 + 0{,}0063 = 0{,}0208\,h.^oF/Btu$$

Portanto,

$$\boxed{\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{(1000-100)^oF}{0{,}0208\,h.^oF/Btu} = 43269{,}23\,Btu/h}$$

b) Conhecendo-se o fluxo de calor e a resistência da parede "f", temos que :

$$\dot{q} = \frac{T_i - 100}{R_f} \qquad \Rightarrow \qquad 43269{,}23 = \frac{T_i - 100}{0{,}0063}$$

$$\boxed{T_i = 372{,}6\ ^oF}$$

c) Entre a parede "f" e ambiente a transferência de calor se dá por convecção :

$$\dot{q} = h.A.\Delta T \Rightarrow h = \frac{\dot{q}}{A.\Delta T} = \frac{43269,23 Btu/h}{1\,ft^2.(100-60)^o F}$$

$$\boxed{h = 1082\ Btu/h.\ ft^2.^o F}$$

d) O novo fluxo de calor é :

$$\dot{q}' = 0,8 \times \dot{q} = 0,8 \times 43269,23 = 34615,38\ Btu/h$$

Mantendo o mesmo ΔT, a nova espessura da parede "f" pode ser obtida assim :

$$\dot{q}' = \frac{\Delta T}{R_a + R_{bcd} + R_e + \frac{L'_f}{k.A}} \Rightarrow 34615,38 = \frac{1000-100}{0,0025 + 0,0037 + 0,0083 + \frac{L'_f}{40.1}}$$

$$\boxed{L'_f = 0,46\ ft = 5,5''}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

• **Exercício 4.13.** Um forno retangular de uma fábrica de cerâmica está isolado com duas camadas, sendo a primeira , que está em contato com a carga do forno, de refratário especial (k= 0,6 kcal/h.m.^{o}C) e a outra de um bom isolante (k= 0,09 kcal/h.m.^{o}C). Sabe-se que a temperatura da face interna do forno é 900 ^{o}C e que a temperatura do ar ambiente é 20 ^{o}C (h = 20 kcal/hm C). O fluxo de calor através da parede do forno, de 40 cm de espessura, é igual a 800 kcal/h m . Pede-se :
a) A espessura de cada camada que forma a parede do forno
b) A temperatura da interface das camadas
c) Se for especificada uma temperatura máxima de 30 C na parede externa do forno, qual a nova espessura isolante necessária?

• **Exercício 4.14.** Em uma fábrica, uma grande folha de plástico (k=1,94 kcal/h.m.^{o}C), com 12 mm de espessura, deve ser colada a uma folha de cortiça (k=0,037 kcal/h.m.^{o}C) de 25 mm de espessura. Para obter ligadura, a cola deve ser mantida a 50 ^{o}C por um considerável período de tempo. Isto se consegue aplicando uniformemente um fluxo de calor sobre a superfície do plástico. O lado de cortiça , exposto ao ar ambiente a 25 ^{o}C, tem um coeficiente de película de 10 kcal/h.m^2.^{o}C. Desprezando a resistência térmica da cola, calcule :
a) o fluxo de calor por m^2 aplicado para se obter a temperatura na interface com cola;
b) as temperaturas nas superfícies externas do plástico e da cortiça.

• **Exercício 4.15.** Um tubo de aço de 10" de diâmetro interno e 0,375" de espessura, transporta vapor a 500^{o}F. O tubo é coberto por 2" de isolação para reduzir as perdas de calor para a atmosfera ambiente a 80 ^{o}F. Sabe-se que os coeficientes de película para a superfície interna do tubo e para superfície externa da isolação são respectivamente 2500 Btu/h.ft.^{o}F e 1,6 Btu/h.ft.^{o}F. Para proteção de pessoal a temperatura da superfície externa não deve exceder 140 ^{o}F. Calcular :

a) O fluxo de calor por unidade de comprimento;

b) Se a condutividade térmica do aço é 26 Btu/h.ft.^{o}F e a da isolação 0,045 Btu/h.ft.^{o}F, irá as duas polegadas de espessura satisfazer as exigências.

• **Exercício 4.16.** Um forno retangular de uma fábrica de cerâmica está isolado com duas camadas, sendo a primeira, que está em contato com a carga do forno, de refratário especial (k= 0,6 kcal/h.m^{2}.^{o}C) e a outra de um bom isolante (k= 0,09 kcal/h.m.^{o}C). Sabe-se que a temperatura da face interna do forno é 900 ^{o}C e que a temperatura do ar ambiente é 20 ^{o}C, com coeficiente de película de 20 kcal/h.m^{2}.^{o}C. O fluxo de calor através da parede do forno, de 40 cm de espessura, é igual a 800 kcal/h.m^{2}. Pede-se:
a)A espessura de cada camada que forma a parede do forno;
b)A temperatura da interface das camadas;
c)Se for especificada uma temperatura máxima de 30^{o}C na parede externa do forno, qual a nova espessura isolante necessária?

• **Exercício 4.17.** O interior de um refrigerador, cujas dimensões são 0,5 x 0,5 m de área da base e 1,25 m de altura, deve ser mantido a 4 ^{o}C. As paredes do refrigerador são construidas de duas chapas de aço (k= 36 kcal/h.m.^{o}C) de 3 mm de espessura, com 65 mm de material isolante (k=0,213 kcal/h.m.^{o}C) entre elas. O coeficiente de película da superfície interna é 10 kcal/h.m.^{o}C, enquanto que na superfície externa varia de 8 a 12,5 kcal/h.m.^{o}C. Calcular :
a) A potência (em HP) do motor do refrigerador para que o fluxo de calor removido do interior da geladeira mantenha a temperatura especificada, numa cozinha cuja temperatura pode variar de 20 a 30 ^{o}C;
b) As temperatura das superfícies interna e externa da parede.

DADO : 1 HP = 641,2 Kcal/h

• **Exercício 4.18.** Um reservatório esférico de aço (k=40 kcal/h.m.^{o}C) com 1 m de diâmetro interno e 10 cm de espessura, é utilizado para armazenagem de um produto a alta pressão, que deve ser mantido a 160 ^{o}C. Para isto o reservatório deve ser isolado termicamente, com um material isolante (k=0,3 kcal/h.m.^{o}C). Sabendo-se que os coeficiente de película do produto e do ar são 80 kcal/h.m.^{o}C e 20 kcal/h.m.^{o}C, respectivamente, e que a temperatura do ar ambiente é 20 ^{o}C, pede-se :
a) o fluxo de calor antes do isolamento;
b) espessura de isolante necessária, para que o fluxo de calor através do conjunto seja igual a 30 % do anterior;
c) as temperaturas , na interface aço-isolante e na superfície externa do isolante.

• **Exercício 4.19.** Duas substâncias são misturadas reagindo entre si e liberando calor dentro de um tubo de diâmetro interno 7,62 cm e espessura igual a 0,5 cm (k= 32 kcal/h.m.^{o}C). O comprimento do tubo é 10 m . Todo calor gerado na reação é cedido ao ambiente de modo que a temperatura da mistura (180 ^{o}C) permanece constante. Por motivo de segurança, será necessário isolar a tubulação, de modo que a temperatura na face externa do isolante (k= 0,065 kcal/h.m.^{o}C) não ultrapasse 50 ^{o}C. O ar externo está a 25 ^{o}C, com coeficiente de película 12 kcal/h.m^{2}.^{o}C. O coeficiente de película da mistura é 90 kcal/h.m^{2}.^{o}C. Pede-se a espessura mínima necessária do isolante, para atender a condição desejada.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

• **Exercício 4.20.** Um longo cilindro (k= 0,35 kcal/h.m.^{o}C) de diâmetro externo 64 mm e interno 60 mm é aquecido internamente por resistência elétrica de modo a manter a temperatura da superfície externa a 90 ^{o}C. Quando água a 25 ^{o}C e velocidade 1 m/s flui transversalmente ao cilindro a potência requerida na resistência é 28 KW por metro de comprimento do cilindro. Quando ar a 25 ^{o}C e velocidade de 10 m/s flui do mesmo modo a potência requerida é 400 W por metro de comprimento do cilindro.
a) Calcular os coeficiente de película para os fluxos de água e ar
b) Calcular a temperatura da superfície interna do cilindro em ambos casos.

DADO : 1 W = 0,86 kcal/h

• **Exercício 4.21.** Após dois anos de trabalho, o isolamento térmico de um forno retangular deverá ser substituído. Um dos engenheiros do setor, recomenda um isolante de condutividade igual a 0,045 kcal/h.m.^{o}C, vendido em placas de 2 cm de espessura; outro engenheiro é de opinião que poderia ser usado um outro isolante de k igual a 0.055 kcal/h.m.^{o}C em placas de 4 cm de espessura. Sabe-se que por razões de ordem técnica, o fluxo de calor através da parede do forno deve ser mantido constante e igual a 350 kcal/h.m^{2} e que as temperaturas de trabalho são 800 ^{o}C e 25 ^{o}C, respectivamente, face interna do isolante e no ambiente. Sabendo-se que o coeficiente de película do ar no ambiente é 20 Kcal/h.m^{2}.^{o}C, pede-se :
a) o número de placas de isolante em cada caso;
b) o tipo de isolante que você recomendaria sabendo que o isolante de maior espessura tem preço por m^{2} 35% maior.

• **Exercício 4.22.** Um submarino deve ser projetado para proporcionar uma temperatura agradável à tripulação não inferior a 20 ^{o}C. O submarino pode ser idealizado como um cilindro de 10 m de diâmetro e 70 m de comprimento. O coeficiente de película interno é cerca de 12 kcal/h.m^{2}.^{o}C, enquanto que, no exterior , estima-se que varie entre 70 kcal/h.m^{2}.^{o}C (submarino. parado) e 600 kcal/h.m^{2}.^{o}C (velocidade máxima). A construção das paredes do submarino é do tipo sanduíche com uma camada externa de 19 mm de aço inoxidável (k=14 Kcal/h.m.^{o}C), uma camada de 25 mm de fibra de vidro (k=0,034 Kcal/h.m.^{o}C) e uma camada de 6 mm de alumínio (k=175 Kcal/h.m.^{o}C) no interior. Determine a potência necessária (em kW) da unidade de aquecimento requerida se a temperatura da água do mar varia entre 7 ^{o}C e 12 ^{o}C.

DADO : 1 KW = 860 Kcal/h

• **Exercício 4.23.** O proprietário de uma casa resolveu fazer o acabamento interno do salão de festas com mármore branco (k = 2,0 Kcal/h.m.^{o}C). As paredes do salão, de tijolo de alvenaria (k = 0,6 Kcal/h.m.^{o}C), de 20 cm de espessura, medem 5 m x 4 m (altura) e o teto está bem isolado. A temperatura interna do salão será mantida a 20 ^{o}C, com coeficiente de película de 20 Kcal/h.m^{2}.^{o}C, através de ar condicionado. Em um dia de sol intenso a temperatura do ar externo chega a 40 ^{o}C com coeficiente de película de 30 Kcal/h.m^{2}.^{o}C. Sabendo que a temperatura da interface tijolo/mármore é 24 ^{o}C, pede-se :
a) o fluxo máximo de calor para o interior do salão;
b) as temperaturas das faces interna do mármore e externa do tijolo;
c) o custo de colocação do mármore.

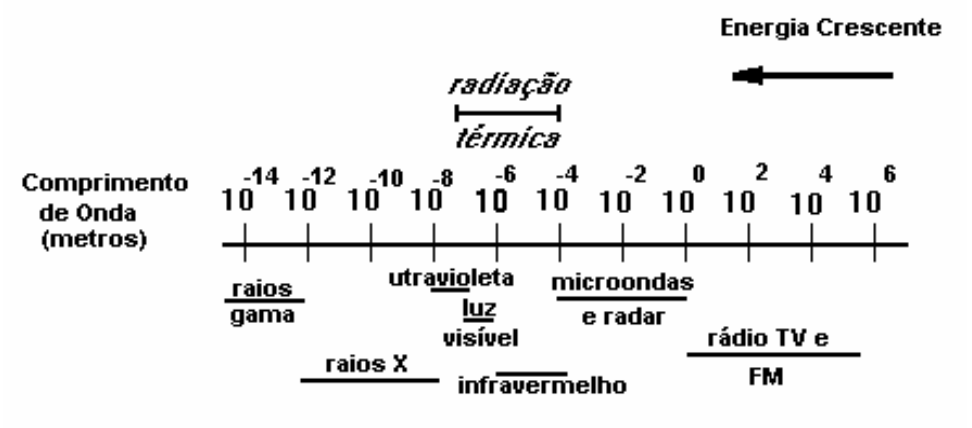
DADO : Custo do mármore = $ 2.000,00 (por m^{2} e por cm de espessura)

5. PRINCÍPIOS DA RADIAÇÃO TÉRMICA

Radiação Térmica é o processo pelo qual calor é transferido de um corpo sem o auxílio do meio interveniente, e em virtude de sua temperatura. Ao contrário dos outros dois mecanismos a radiação não necessita da existência de um meio interveniente :

- condução ➔ colisão entre as partículas
- convecção ➔ transferência de massa
- radiação ➔ ondas eletromagnéticas

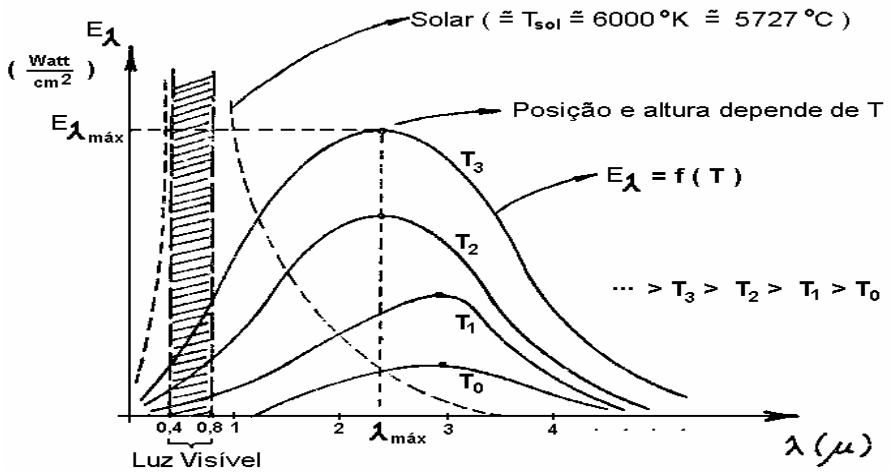
A radiação térmica ocorre perfeitamente no vácuo, não havendo, portanto, necessidade de um meio material para a colisão de partículas ou transferência de massa. Isto acontece porque a radiação térmica se propaga através de ondas eletromagnéticas. A radiação térmica é, portanto, um fenômeno ondulatório semelhante às ondas de rádio, radiações luminosas, raio-X, raios-g, etc, diferindo apenas no comprimento de onda (l). Este conjunto de fenômenos de diferentes comprimentos de ondas, representado simplificadamente na figura 5.1, é conhecido como espectro eletromagnético.



[figura 5.1]

A análise espectroscópica revelou que a intensidade das **radiações térmicas** variam como mostrado na figura 5.2. Existe um pico máximo de emissão para um determinado comprimento de onda (l_{max}) cuja posição é função da temperatura absoluta do emissor (radiador).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com



[figura 5.2]

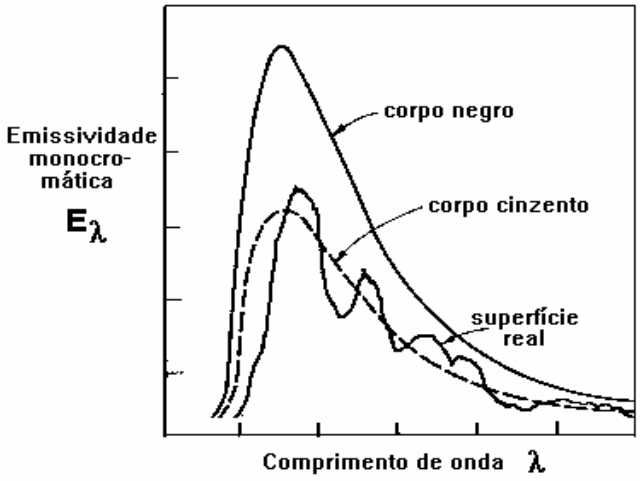
A intensidade de radiação térmica é comandada pela temperatura da superfície emissora. A faixa de comprimentos de onda englobados pela radiação térmica fica aproximadamente entre 0,1 e 100 m (1 m = 10^{-6} m). Essa faixa é subdividida em ultravioleta, visível e infravermelho. O sol, com temperatura de superfície da ordem de 6000 K, emite a maior parte de sua energia abaixo de 3 m, enquanto que um filamento de lâmpada, a 1000 ^oC, emite mais de 90 % de sua radiação entre 1 m e 10 m.

Todo material com temperatura acima do zero absoluto emite continuamente radiações térmicas. Poder de emissão (E) é a energia radiante total emitida por um corpo, por unidade de tempo e por unidade de área (Kcal/h.m^2 - sistema métrico).

5.1. CORPO NEGRO e CORPO CINZENTO

Corpo Negro, ou irradiador ideal, é um corpo que emite e absorve, a qualquer temperatura, a máxima quantidade possível de radiação em qualquer comprimento de onda. O irradiador ideal é um conceito teórico que estabelece um limite superior de radiação de acordo com a segunda lei da termodinâmica. É um conceito teórico padrão com o qual as características de radiação dos outros meios são comparadas.

Corpo Cinzento é o corpo cuja energia emitida ou absorvida é uma fração da energia emitida ou absorvida por um corpo negro. As características de radiação dos corpos cinzentos se aproximam das características dos corpos reais, como mostra esquematicamente a figura 5.3.



[figura 5.3]

Emissividade é a relação entre o poder de emissão de um corpo real e o poder de emissão de um corpo negro.

$$\varepsilon = \frac{E_c}{E_n} \qquad \text{(eq. 5.1)}$$

onde, E_c = poder de emissão de um corpo cinzento

E_n = poder de emissão de um corpo negro

Para os corpos cinzentos a emissividade (e) é, obviamente, sempre menor que 1. Pertencem à categoria de corpos cinzentos a maior parte dos materiais de utilização industrial, para os quais em um pequeno intervalo de temperatura pode-se admitir e = constante e tabelado em função da natureza do corpo. Para os metais, em virtude de suas características atômicas, isto não ocorre. Entretanto, para pequenos intervalos de temperatura, as tabelas fornecem valores constantes de emissividade aplicáveis aos metais.

5.2. LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

A partir da determinação experimental de Stefan e da dedução matemática de Boltzmann, chegou-se a conclusão que a quantidade total de energia emitida por unidade de área de um corpo negro e na unidade de tempo, ou seja, o seu poder de emissão (E_n), é proporcional a quarta potência da temperatura absoluta

$$E_n = \sigma . T^4 \qquad \text{(eq. 5.2)}$$

onde, $\sigma = 4,88 \times 10^{-8}\ Kcal/h.m^2.K^4$ (constante de Stefan-Boltzmann)

T = temperatura absoluta (em graus Kelvin)

Nos outros sistemas de unidades a constante de Stefan-Boltzmann fica assim :

Sist. Inglês $\rightarrow$ $\sigma = 0,173 \times 10^{-8}\ Btu/h.ft^2.R^4$;

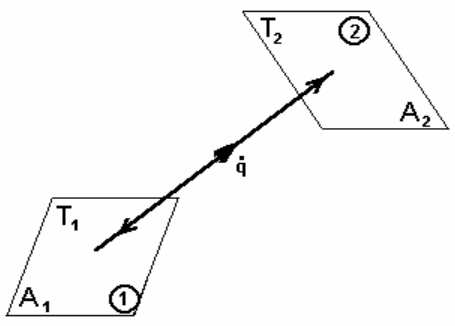
Sist. Internacional $\rightarrow$ $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}\ W/m^2 K^4$

5.3. FATOR FORMA

Um problema-chave no cálculo da transferência de calor por radiação entre superfícies consiste em determinar a fração da radiação total difusa que deixa uma superfície e é interceptada por outra e vice-versa.

A fração da radiação distribuída difusamente que deixa a superfície **Ai** e alcança a superfície $\mathbf{A_j}$ é denominada de **fator forma para radiação** $\mathbf{F_{ij}}$. O primeiro índice indica a superfície que emite e o segundo a que recebe radiação.

Consideremos duas superfícies negras de áreas A_1 e A_2, separadas no espaço (figura 5.4) e em diferentes temperaturas ($T_1 > T_2$) :



[figura 5.4]

Em relação às superfícies A_1 e A_2 temos os seguintes fatores forma :

$F_{12} =$ fração da energia que deixa a superfície (1) e atinge (2)

$F_{21} =$ fração da energia que deixa a superfície (2) e atinge (1)

A energia radiante que deixa A_1 e alcança A_2 é :

$$\dot{q}_{1\to 2} = E_{n1}.A_1.F_{12} \qquad \left[\frac{Kcal}{h.m^2}.m^2.(-) = \frac{Kcal}{h}\right] \qquad \text{(eq. 5.3)}$$

A energia radiante que deixa A_2 e alcança A_1 é :

$$\dot{q}_{2\to 1} = E_{n2}.A_2.F_{21} \qquad \left[\frac{Kcal}{h.m^2}.m^2.(-) = \frac{Kcal}{h}\right] \qquad \text{(eq. 5.4)}$$

A troca líquida de energia entre as duas superfícies será :

$$\dot{q} = \dot{q}_{12} - \dot{q}_{21} = E_{n1}.A_1.F_{12} - E_{n2}.A_2.F_{21} \qquad \text{(eq. 5.5)}$$

Consideremos agora a situação em que as duas superfícies estão na mesma temperatura. Neste caso, o poder de emissão das duas superfícies negras é o mesmo ($E_{n1}=E_{n2}$) e não pode haver troca líquida de energia ($\dot{q}=0$). Então a equação 5.5 fica assim :

$$0 = E_{n1}.A_1.F_{12} - E_{n2}.A_2.F_{21}$$

Como $E_{n1}=E_{n2}$, obtemos :

$$A_1.F_{12} = A_2.F_{21} \qquad \text{(eq. 5.6)}$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Como tanto a área e o fator forma não dependem da temperatura, a relação dada pela equação 5.6 é válida para qualquer temperatura. Substituindo a equação 5.6 na equação 5.5, obtemos :

$$\dot{q} = E_{n1} . A_1 . F_{12} - E_{n2} . A_1 . F_{12}$$

$$\dot{q} = A_1 . F_{12} . \left(E_{n1} - E_{n2} \right)$$

Pela lei de Stefan-Boltzmann, temos que :

$E_{n1} = \sigma . T_1^4$ e $E_{n2} = \sigma . T_2^4$, portanto :

$$\dot{q} = A_1 . F_{12} \left(\sigma . T_1^4 - \sigma . T_2^4 \right)$$

Obtemos assim a expressão para o fluxo de calor transferido por radiação entre duas superfícies a diferentes temperaturas :

$$\dot{q} = \sigma . A_1 . F_{12} . \left(T_1^4 - T_2^4 \right) \qquad \text{(eq. 5.7)}$$

O Fator Forma depende da geometria relativa dos corpos e de suas emissividades (ε). Nos livros e manuais, encontramos para diversos casos, tabelas e ábacos para o cálculo do fator forma para cada situação (placas paralelas, discos paralelos, retângulos perpendiculares, quadrados, círculos, etc). Exemplos de Fator Forma para algumas configurações geométricas são mostrados a seguir :

- Superfícies negras paralelas e de grandes dimensões :

$$F_{12} = 1 \qquad \text{(eq. 5.8)}$$

- Superfícies cinzentas grandes e paralelas

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \qquad \text{(eq. 5.9)}$$

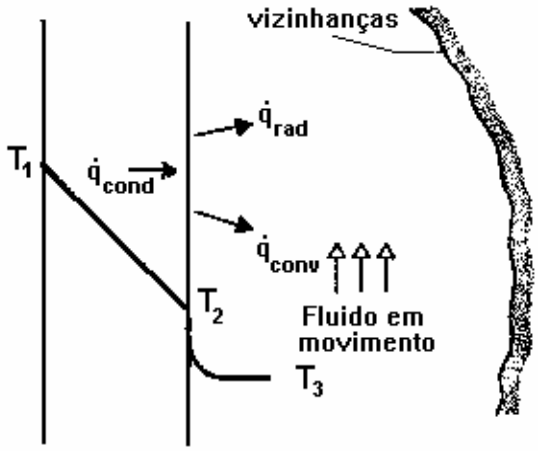
- Superfície cinzenta (1) muito menor que superfície cinzenta (2)

$$F_{12} = \varepsilon_1 \qquad \text{(eq. 5.10)}$$

5.5. EFEITO COMBINADO CONDUÇÃO - CONVECÇÃO - RADIAÇÃO

Suponhamos, como exemplo, uma parede plana qualquer submetida à uma diferença de temperatura. Na face interna a temperatura é T_1 e na face externa tem-se uma temperatura T_2 maior que a temperatura do ar ambiente T_3, como mostra a figura 5.5. Neste caso, através da parede ocorre uma transferência de calor por condução até a superfície externa. A superfície transfere calor por convecção para o ambiente. Porém

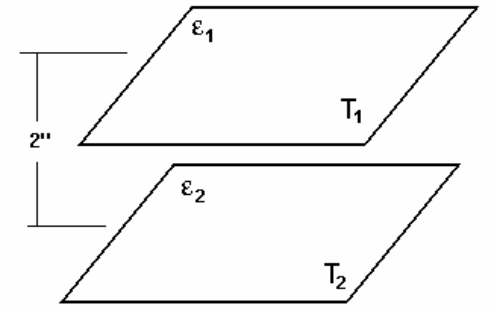
existe também uma parcela de transferência de calor por radiação da superfície para as vizinhanças. Portanto, a transferência global é a soma das duas parcelas :



[figura 5.5]

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}$$ (eq. 5.11)

Exercício 5.1. Duas placas grandes de metal, separadas de 2" uma da outra, são aquecidas a 300^{o}C e 100^{o}C, respectivamente. As emissividades são 0,95 e 0,3 respectivamente. Calcular a taxas de transferência de calor por radiação através do par de placas.



distância entre placas = 2"

$T_1 = 300\ ^oC = 573\,K$

$T_2 = 100\ ^oC = 373\,K$

$\varepsilon_1 = 0,95 \qquad \varepsilon_2 = 0,3$

Para o cálculo do fator forma utilizaremos a equação 5.9 (2 superfícies cinzentas grandes e paralelas) :

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,3} - 1} = 0,3$$

Como T_1 é maior que T_2, existe um fluxo de calor líquido de (1) para (2). Para uma área unitatária, temos :

$$\dot{q} = \sigma . A_1 . F_{12} . \left(T_1^4 - T_2^4\right) = 4,88 \times 10^{-8} \times 1 \times 0,3 \times \left[(573)^4 - (373)^4\right]$$

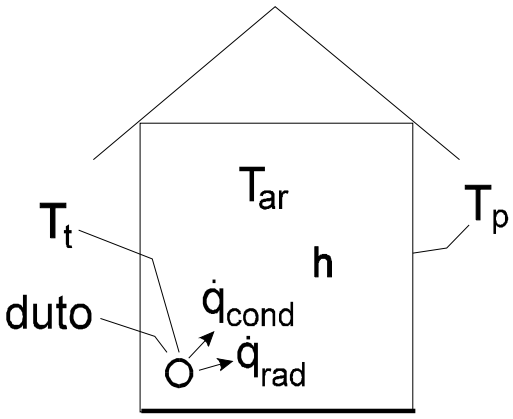
$$\dot{q} = 1295 Kcal/h \left(\text{por } m^2\right)$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Exercício 5.2. Um duto de ar quente, com diâmetro externo de 22 cm e temperatura superficial de 93 ^{o}C, está localizado num grande compartimento cujas paredes estão a 21^{o}C. O ar no compartimento está a 27^{o}C e o coeficiente de película é 5 kcal/h.m^{2}.^{o}C. Determinar a quantidade de calor transferida por unidade de tempo, por metro de tubo, se :

a) o duto é de estanho ($\varepsilon = 0,1$)

b) o duto é pintado com laca branca ($\varepsilon = 0,9$)



$T_t = 93\ ^oC = 366\,K$

$T_{ar} = 27\ ^oC$

$T_p = 21\ ^oC = 294\,K$

$h = 5\,Kcal/h.m^2.^oC$

$\varnothing = 22\,cm = 0,22\,m \ \Rightarrow \ r = 0,11m$

a) Para um comprimento unitário do duto de estanho (sem pintura), temos :

$L = 1m \qquad \varepsilon = 0,1$

Como o tubo atravessa um grande compartimento, ou seja, a superfície do tubo é muito menor que a superfície do compartimento, o fator forma é calculado através da equação 5.10, assim :

$F_{12} = \varepsilon_1 = 0,1 \ \left(\text{superf.}1 \lll \text{superf.}\,2\right)$

O fluxo de calor é composto de duas parcelas :

$$\dot{q} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{cond}$$

$$\dot{q}_{cond} = h.A.\left(T_t - T_{ar}\right) = h.\left(2.\pi.r.L\right).\left(T_t - T_{ar}\right) = 5 \times \left(2 \times \pi \times 0,11 \times 1\right) \times \left[93 - 27\right] = 228,1 Kcal/h\left(p/m\right)$$

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.AF_{12}\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) = \sigma.\left(2.\pi.r.L\right).\varepsilon.\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) = 4,88 \times 10^{-8} \times 0,1 \times \left(2 \times \pi \times 0,11 \times 1\right) \times \left[\left(366\right)^4 - \left(294\right)^4\right] = 35 Kcal/h\left(p/m\right)$$

$$\boxed{\dot{q} = 228,1 + 35 = 263,1 Kcal/h\left(p/m\right)}$$

b) Quando o tubo é pintado com laca branca (e = 0,9) apenas a transferência de calor por radiação é afetada :

$$F_{12} = \varepsilon_1 = 0{,}9 \ \left(\text{superf.}1 \lll \text{superf.}\,2\right)$$

$$\dot{q} = \dot{q}'_{rad} + \dot{q}_{cond}$$

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.A.F_{12}\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) = \sigma.(2.\pi.r.L).\varepsilon'.\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) = 4{,}88\times10^{-8}\times(2\times\pi\times0{,}11\times1)\times0{,}.9\times\left[(366)^4 - (294)^4\right] = 315 Kcal/h(p/m)$$

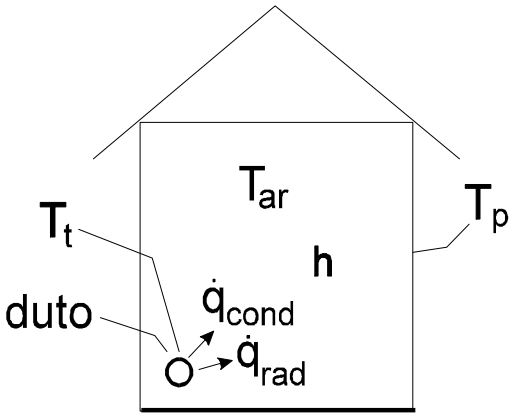
$$\boxed{\dot{q} = 228{,}1 + 315 = 543{,}1 Kcal/h(p/m)}$$

Exercício 5.3. Em uma indústria, vapor d'água saturado a 44 Kgf/cm^2 e 255 ^{o}C escoa por um tubo de parede fina de diâmetro externo igual a 20 cm. A tubulação atravessa um amplo recinto de 10m de comprimento e cujas paredes estão à mesma temperatura de 25^{o}C do ambiente (h_{ar}= 5 kcal/h.m^2.^{o}C). Deseja-se pintar a superfície externa do tubo de maneira que ao sair do recinto, o vapor no interior do tubo se encontre com apenas 5% de sua massa não condensada. No almoxarifado da indústria dispõe-se de 3 tintas cujas emissividade são : tinta A - e_a=1; tinta B - e_b=0,86 e tinta C - e_c= 0,65. Sabendo que o calor latente de vaporização nestas condições é 404 Kcal/Kg, determinar :

a) a tinta com a qual devemos pintar o tubo, sabendo-se que a vazão de vapor é 55,2 kg/h

b) a energia radiante por unidade de comprimento após a pintura

c) a vazão de vapor se utilizarmos a tinta A



$$\text{tubo} \rightarrow L = 10m \quad r = \varnothing/2 = 10cm = 0{,}1m$$
$$T_t = 255\,^oC \quad T_{ar} = T_p = 25\,^oC$$
$$h_{ar} = 5 Kcal/h.m^2.{}^oC$$
$$\Delta H_v = 404 Kcal/Kg$$

a) Como o tubo atravessa um grande recinto, temos :

$$F_{12} = \varepsilon_1 \ \left(\text{superf.}1 \lll \text{superf.}\,2\right)$$

A área superficial do tubo dentro do recinto é :

$$A = 2.\pi r.L = 2\times\pi\times0{,}1\times10 = 6{,}28 m^2$$

Considerando que 5% da massa permanece como vapor, a quantidade de calor liberada na condensação, na unidade de tempo, é o produto da vazão mássica de vapor condensado pelo calor latente de vaporização :

$$\dot{q} = [\dot{m}.0{,}95].\Delta H_V = [55{,}2(Kg/h) \times 0{,}95] \times 404(Kcal/Kg) = 21186 Kcal/h$$

Este fluxo de calor é transferido para o ambiente por convecção e radiação :

$$\dot{q} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{cond}$$

$$\dot{q} = \sigma.A.F_{12}\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) + h.A.\left(T_t - T_{ar}\right)$$

$$21186 = 4.88 \times 10^{-8} \times 6{,}28 \times \varepsilon \times \left[(255+273)^4 + (25+273)^4\right] + 5 \times 6{,}28 \times (255-25)$$

Resolvendo a equação acima obtemos o valor da emissividade necessária para o tubo, e podemos comparar com as tintas existentes no almoxarifado :

$\varepsilon = 0{,}65 \Rightarrow$ Usar a Tinta C

b) A parcela emitida por radiação por unidade de comprimento do tubo (L= 1 m) é :

$$\dot{q}_{rad}^{unit} = \sigma.A_{unit}.\varepsilon.\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) = 4{,}88 \times 10^{-8} \times (2 \times \pi \times 0{,}1 \times 1) \times 0{,}65 \times \left(528^4 - 298^4\right)$$

$$\dot{q}_{rad}^{unit} = 1392 Kcal/h \ (p/m)$$

c) Utilizando uma tinta de maior emissividade (e = 1), elevando a transferência por radiação, a vazão mássica de vapor de ser elevada para se manter a mesma percentagem de condensação :

$$\dot{q} = \dot{q}'_{rad} + \dot{q}_{cond}$$

$$[\dot{m}'.0{,}95].\Delta H_V = \sigma.A.\varepsilon'.\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right) + h.A.\left(T_t - T_{ar}\right)$$

$$[\dot{m}' \times 0{,}95] \times 404 = 4.88 \times 10^{-8} \times 6{,}28 \times 1 \times \left[(528)^4 + (298)^4\right] + 5 \times 6{,}28 \times (255-25)$$

$$\dot{m}' = 74{,}6 \, Kg/h$$

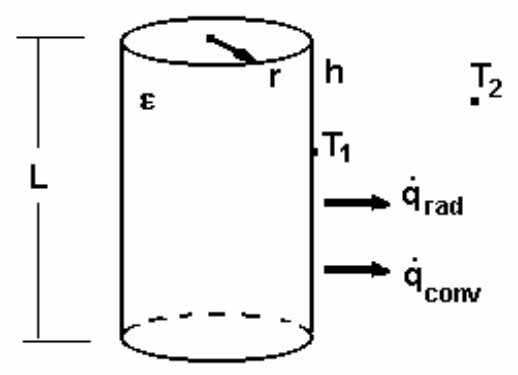
Exercício 5.4. Um reator em uma indústria trabalha a 600 ^oC em um local onde a temperatura ambiente é 27 ^oC e o coeficiente de película externo é 40 Kcal/h.m^2.^oC. O reator foi construído de aço inox (ε = 0,06) com 2 m de diâmetro e 3 m de altura. Tendo em vista o alto fluxo de calor, deseja-se aplicar uma camada de isolante (k= 0,05 kcal/h m^oC e ε = 0,65) para reduzir a transferência de calor a 10 % da atual. Desconsiderando as resistências térmicas que não podem ser calculadas, pede-se :

a) O fluxo de calor antes da aplicação do isolamento;

b) A parcela transferida por convecção após o isolamento;

b) A espessura do isolante a ser usada nas novas condições sabendo-se que a temperatura externa do isolamento deve ser 62 ^{o}C.

Desprezando as resistências térmicas de convecção interna e condução na parede de aço do reator, a temperatura da base das aletas pode ser considerada a mesma do fluido.



$T_1 = 600\,^oC \qquad T_2 = 27\,^oC$

$\varepsilon = 0{,}06(inox) \qquad h = 40\,Kcal/h.m^2.^oC$

$L = 3m \qquad \varnothing = 2m \Rightarrow r = 1m$

a) Cálculo da área de transferência de calor :

$$A = 2.\pi.r.L + 2.(\pi.r^2) = 2\times\pi\times1\times3 + 2\times(\pi\times1^2) = 25{,}14m^2 .$$

O fluxo de calor total é a soma das parcelas transferidas por convecção e por radiação. A parcela por convecção é :

$$\dot{q}_{conv} = h.A.(T_1 - T_2) = 40\times25{,}14\times(600-27) = 576208{,}80Kcal/h$$

A parcela transferida por radiação, considerando a superfície do reator bem menor que o ambiente, é :

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.A_1.F_{12}.(T_1^4 - T_2^4) \text{ , onde } F_{12} = \varepsilon(\text{superf.}1 \lll \text{superf.}2)$$

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.A_1.\varepsilon.(T_1^4 - T_2^4) = 4{,}88\times10^{-8}\times25{,}14\times0{,}06\times\left[(600+273)^4 - (27+273)^4\right]$$
$$\dot{q}_{rad} = 42159{,}39Kcal/h$$

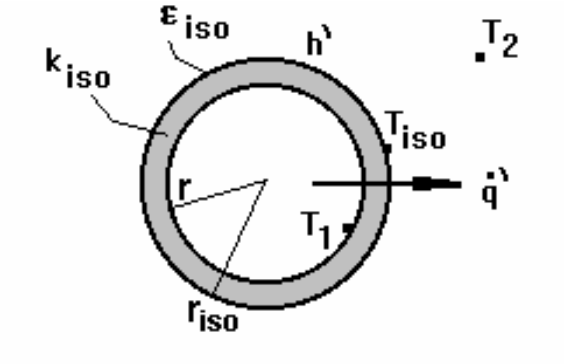
Portanto, $\dot{q} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = 576208{,}80 + 42159{,}39$

$$\boxed{\dot{q} = 618368{,}19\ Kcal/h}$$

b) O isolamento deve reduzir a transferência de calor a 10% da atual :

$$\dot{q}' = 0{,}1\times\dot{q} = 0{,}1\times618368{,}19 = 61836{,}82\ Kcal/h$$

Além disto, a temperatura externa do isolamento deve ser 62 ^{o}C, então :



$$T_1 = 600\ ^oC$$
$$T_{iso} = 62\ ^oC$$
$$k_{iso} = 0,05\ Kcal/h.m^2.^oC$$
$$\dot{q}' = 61813,92\ Kcal/h$$
$$\varepsilon_{iso} = 0,65$$

O novo fluxo de calor continua sendo composto das parcelas de convecção e radiação :

$$\dot{q}' = \dot{q}'_{conv} + \dot{q}'_{rad}$$

A parcela transferida por radiação foi alterada devido à emissividade do isolante ser diferente da emissividade do inox e também devido à nova temperatura externa do isolamento. Desprezando a variação da área externa devido ao acréscimo da espessura isolante, temos :

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.A_1.\varepsilon.\left(T_1^4 - T_2^4\right) = 4,88\times10^{-8}\times25,14\times0,75\times\left[(62+273)^4 - (27+273)^4\right]$$

$$\dot{q}_{rad} = 4135,4\ Kcal/h$$

A parcela que pode ser transferida por convecção, devido à restrição dos 10% de redução do fluxo de calor, é obtida por diferença e permite o cálculo da espessura do isolante :

$$\dot{q}'_{conv} = \dot{q}' + \dot{q}'_{rad} = 61836,82 - 4135,4 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{q}' = 57701,4\ Kcal/h}$$

c) Devido à limitação de temperatura externa, a resistência térmica do isolamento pode ser obtida assim :

$$\dot{q}' = \frac{(T_1 - T_{iso})}{R_{iso}} \Rightarrow R_{iso} = \frac{(T_1 - T_{iso})}{\dot{q}'} = \frac{(600-62)}{61836,82} = 0,0087\ h.^oC/Kcal$$

Como se trata de uma resistência térmica de parede cilíndrica, temos :

$$R_{iso} = \frac{\ln\left(r_{iso}/r\right)}{k_{iso}.2.\pi.L} = \frac{\ln r_{iso} - \ln 1}{0,05\times2\times\pi\times3} = 1,06\times\ln r_{iso}$$

$$0,0087 = 1,06 \times \ln r_{iso} \quad \Rightarrow \quad \ln r_{iso} = 0,00821$$

$$r_{iso} = e^{0,00821} = 1,0082 \quad \Rightarrow \quad e = r_{iso} - r = 1,0082 - 1,0 = 0,0082\,m$$

$$\boxed{e = 8,2\,mm}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 5.5. Duas superfícies planas negras e de grandes dimensões são mantidas a 200 ^{o}C e 300 ^{o}C. Determine :

a) Determine o fluxo líquido de calor entre as placas, por unidade de área;

b) Repita para o caso em as temperaturas de ambas placas são reduzidas em 100 ^{o}C e calcule a percentagem de redução da transferência de calor.

Exercício 5.6. Repetir o exercício 5.5 (itens a e b) considerando que as superfícies são cinzentas com emissividades 0,73 e 0,22, respectivamente.

Exercício 5.7. Os gases quentes do interior de uma fornalha são separados do ar ambiente a 25 ^{o}C (h = 17,2 Kcal/h.m.^{o}C) por uma parede de tijolos de 15 cm de espessura. Os tijolos tem uma condutividade térmica de 1,0 kcal/h.m.^{o}C e uma emissividade de 0,8 . No regime permanente mediu-se a temperatura da superfície externa da parede da fornalha como sendo 100 ^{o}C. Considerando que a fornalha está em um grande compartimento cuja temperatura da superfície interna é igual a temperatura ambiente, qual é a temperatura da superfície interna da parede da fornalha ?

Exercício 5.8. Um reator de uma indústria trabalha à temperatura de 600 ^{o}C. Foi construído de aço inoxidável (e = 0,06) com 2,0 m de diâmetro e 3,0 m de comprimento. Tendo em vista o alto fluxo de calor, deseja-se isola-lo com uma camada de lã de rocha (k = 0,05 Kcal/h.m.^{o}C e e = 0,75) para reduzir a transferência de calor a 10% da atual. Calcular :

a) o fluxo de calor (radiação e convecção) antes do isolamento;

b) a espessura de isolante a ser usada nas novas condições, sabendo que a temperatura externa do isolamento deve ser igual a 62 ^{o}C.

Exercício 5.9. Um amplo recinto de 34 ft de comprimento é atravessado por uma tubulação de ferro fundido oxidado (ε = 0,71) de 9,5" de diâmetro externo. Considerando que a temperatura superficial do tubo é 680 ^{o}C e a temperatura das paredes do recinto é 80 ^{o}C. Determinar :

a) a perda de energia radiante para o recinto;

b) a redução da perda quando se utiliza um tubo de alumínio oxidado (ε = 0,08).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

6. ALETAS

6.1. DEFINIÇÃO

Para um melhor entendimento do papel desempenhado pelas aletas na transferência de calor consideremos um exemplo prático. Quando se quer resfriar ou aquecer um fluido, o modo mais freqüente é fazê-lo trocar calor com outro fluido, separados ambos por uma parede sólida de resistência baixa (metal de pequena espessura). Então, como exemplo, analisemos a transferência calor entre dois fluidos separados por uma parede cilíndrica. O fluxo de calor entre eles pode ser calculado assim :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i.A_i} + \frac{\ln\left(r_2 / r_1\right)}{k.2\pi.L} + \frac{1}{h_e A_e}} \qquad \text{(eq. 6.1)}$$

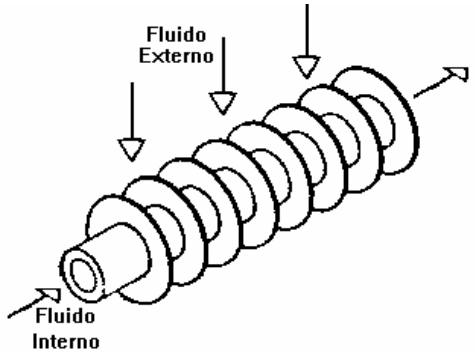
Analisemos os meios de elevar a transferência de calor através da redução das resistências térmicas

$$R_1 = \frac{1}{h_i.A_i} \begin{cases} \text{aumentar } A_i \rightarrow \text{necessário mudança de dimensões} \\ \text{aumentar } h_i \rightarrow \text{necessário aumento de velocidade de escoamento} \end{cases}$$

$$R_1 = \frac{\ln\left(r_1 / r_2\right)}{k.2.\pi.L} \begin{cases} \text{reduzir}\left(r_1 / r_2\right) \rightarrow \text{necessário reduzir a espessura da parede} \\ \text{aumentar } k \rightarrow \text{necessário troca do material da parede} \end{cases}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_i.A_i} \begin{cases} \text{aumentar } h_e \rightarrow \text{necessário aumento de velocidade de escoamento} \\ \text{aumentar } A_e \rightarrow \text{mudança de dimensões ou COLOCAÇÃO DE ALETAS} \end{cases}$$

O aumento da superfície externa de troca de calor pode ser feito através de expansões metálicas denominadas **aletas**, como mostra a figura 6.1.

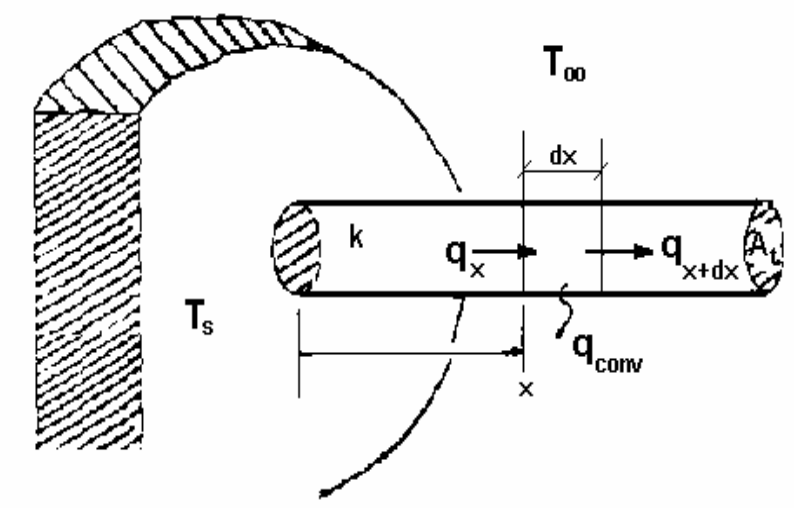


[figura 6.1]

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

6.2. CÁLCULO DO FLUXO DE CALOR EM ALETAS DE SEÇÃO UNIFORME

Considerando uma aleta em formato de um barra (pino) circular, como mostra a figura 6.2, afixada em uma superfície com temperatura T_S e em contato com um fluido com temperatura T_∞ é possível derivar uma equação para a distribuição de temperatura, fazendo um balanço de energia em um elemento diferencial da aleta. Sob as condições de regime permanente temos:



[figura 6.2]

$$\begin{bmatrix}\text{fluxo de calor por condução}\\ \text{para dentro do elemento em } x\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{fluxo de calor por condução para}\\ \text{para fora do elemento em } x+dx\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{fluxo de calor por convecção}\\ \text{da superfície entre x e } (x+dx)\end{bmatrix}$$

Na forma simbólica esta equação torna-se :

$$\dot{q}_x = \dot{q}_{x+dx} + \dot{q}_{conv}$$

$$-k.A_t.\frac{dT}{dx} = \left[-k.A_t.\frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx}\left(-k.A_t.\frac{dT}{dx}\right)dx\right] + h.(P.dx)(T - T_\infty) \qquad \text{(eq. 6.2)}$$

Onde P é o perímetro da aleta, A_t é a área da seção transversal da aleta e (P.dx) a área entre as seções x e (x+dx) em contato com o fluido. Se h e k podem ser considerados constantes a equação 6.2 pode ser simplificada para :

$$h.P.dx.(T - T_\infty) = \frac{d}{dx}\left(-k.A_t.\frac{dT}{dx}\right)dx$$

$$h.P.(T - T_\infty) = k.A_t.\frac{d^2T}{dx^2}$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = m^2.(T - T_\infty)$$ (eq. 6.3)

onde ; $m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$, é o coeficiente da aleta (m^{-1})

A equação 6.3 é uma equação diferencial linear ordinária de segunda ordem, cuja solução geral é :

$$T - T_\infty = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$ (eq. 6.4)

onde C_1 e C_2 são constantes para serem determinadas através das condições de contorno apropriadas. A primeira das condições de contorno é que a temperatura da base da barra é igual à temperatura da superfície na qual ela está afixada, ou seja :

- $em \quad x = 0 \quad \rightarrow \quad T = T_S$

De acordo com a segunda condição de contorno, que depende das condições adotadas, teremos três casos básicos :

Caso (a) $\rightarrow$ Barra infinitamente longa

Neste caso, sua temperatura se aproxima da temperatura do fluido quando x $\rightarrow$ T, ou T=T $_T$ em x $\rightarrow$ T. Substituindo essa condição na equação 6.4, temos :

$$T - T_\infty = 0 = C_1 e^{m.\infty} + C_2 e^{-m.\infty}$$ (eq. 6.5)

Como o segundo termo da equação 6.5 é zero, a condição de contorno é satisfeita apenas se C_1=0. Substituindo C_1 por 0, na equação 6.4, temos :

$$C_2 = T_s - T_\infty$$

e a distribuição de temperatura torna-se :

$$T - T_\infty = T_s - T_\infty e^{-m.\infty}$$ (eq. 6.6)

Como o calor transferido por condução através da base da aleta deve ser transferido por convecção da superfície para o fluido, temos :

$$\dot{q}_{aleta} = -k.A.\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0}$$ (eq. 6.7)

Diferenciando a equação 6.6 e substituindo o resultado para x=0 na equação 6.7, obtemos :

$$\dot{q}_{aleta} = -k.A.\left[-m.(T_s - T_\infty).e^{(-m).0}\right]_{x=0} = -k.A.\left[-\sqrt{\frac{h.P}{k.A}}.(T_s - T_\infty)\right]$$

$$\dot{q}_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.(T_s - T_\infty)$$ (eq. 6.8)

A equação 6.8 fornece uma aproximação razoável do calor transferido, na unidade de tempo, em uma aleta finita, se seu comprimento for muito grande em comparação com a área de sua seção transversal.

Caso (b) $\rightarrow$ Barra de comprimento finito, com perda de calor pela extremidade desprezível

Neste caso, a segunda condição de contorno requererá que o gradiente de temperatura em x=L seja zero, ou seja, $dT/dx = 0$ em x=L. Com estas condições :

$$C_1 = \frac{T_s - T_\infty}{1 + e^{2.m.l}} \qquad \text{e} \qquad C_2 = \frac{T_s - T_\infty}{1 + e^{-2.m.l}}$$ (eq. 6.9)

levando as equações 6.9 na equação 6.4, obtemos :

$$T - T_\infty = (T_s - T_\infty).\left(\frac{e^{m.x}}{1 + e^{2.m.l}} + \frac{e^{-m.x}}{1 + e^{-2.m.l}} \right)$$ (eq. 6.10)

Considerando que o coseno hiperbólico é definido como $\cosh x = \left(e^x + e^{-x}\right)/2$, a equação 6.10 pode ser colocada em uma forma adimensional simplificada :

$$\frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} = \frac{\cosh m(l - x)}{\cosh(m.l)}$$

A transferência de calor pode ser obtida através da equação 6.7, substituindo o gradiente de temperatura na base :

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = (T_s - T_\infty).m.\left(\frac{1}{1 + e^{2.m.l}} + \frac{1}{1 + e^{-2.m.l}} \right) = (T_s - T_\infty).m.\left(\frac{e^{m.l} - e^{-m.l}}{e^{m.l} + e^{-m.l}} \right)$$

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = (T_s - T_\infty).m.tagh(m.l)$$ (eq. 6.11)

O calor transferido, na unidade de tempo, é então :

$$q_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.(T_s - T_\infty).tagh(m.l)$$ (eq. 6.12)

Caso (c) $\rightarrow$ Barra de comprimento finito, com perda de calor por convecção pela extremidade

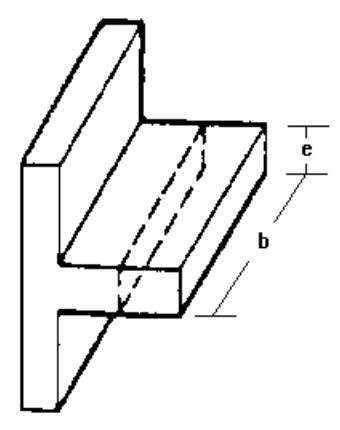
Neste caso, a álgebra envolvida é algo mais complicado, entretanto o princípio é o mesmo e o fluxo de calor transferido é :

$$q_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.(T_s - T_\infty).\left(\frac{\operatorname{senh}(m.l) + (h/m.k).\cosh(m.l)}{\cosh(m.l) + (h/m.k).\operatorname{senh}(m.l)}\right) \qquad \text{(eq. 6.13)}$$

6.3. TIPOS DE ALETAS

Vários tipos de aletas estão presentes nas mais diversas aplicações industriais. A seguir veremos alguns dos tipos mais encontrados industrialmente.

- Aletas de Seção Retangular



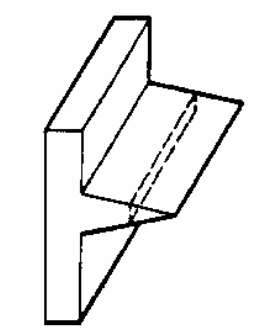
[figura 6.3]

Na figura 6.3 observamos uma aleta de seção retangular assentada longitudinalmente em uma superfície plana. Considerando que a aleta tem espessura **b** e largura **e** (espessura pequena em relação à largura), o coeficiente da aleta **m** pode ser calculado assim :

$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}} \qquad P = 2 \times b + 2 \times e \cong 2 \times b \qquad A_t = b \times e$$

$$m = \sqrt{\frac{h \times 2 \times b}{k \times b \times e}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{m = \sqrt{\frac{2 \times h}{k \times e}}} \qquad \text{(eq. 6.14)}$$

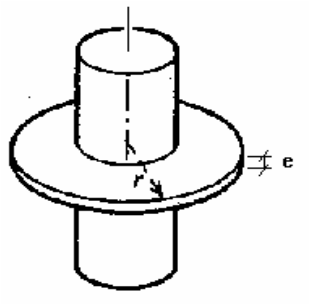
- Aletas de Seção Não-Retangular



[figura 6.4]

Neste caso, temos uma aleta de seção triangular mostrada na figura 6.4. Aletas de seção parabólica, trapezoidal, etc, também são comuns. O cálculo do coeficiente **m** pode ser feito de modo similar ao caso anterior, considerando uma área transversal média.

- Aletas Curvas



[figura 6.5]

As aletas colocadas sobre superfícies curvas podem ter colocação radial (transversal) como na figura 6.5 ou axial (longitudinal), assentando aletas do tipo retangular mostrado na figura 6.3. O assentamento radial ou axial de aletas sobre superfícies cilídricas depende da direção do escoamento do fluido externo, pois a aletas devem prejudicar o mínimo possível o coeficiente de película, ou seja, não podem provocar estagnação do fluido. O cálculo do coeficiente **m** para a aleta da figura 6.5 é feito da seguinte forma :

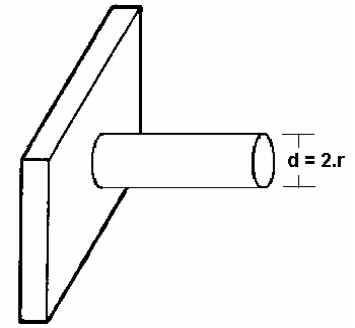
$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$$

$$P = 2 \times (2 \times \pi \times r) + 2 \times e \cong 4 \times \pi \times r$$

$$A_t = 2 \times \pi \times r \times e$$

$$m = \sqrt{\frac{h \times 4 \times \pi \times r}{k \times 2 \times \pi \times r \times e}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{m = \sqrt{\frac{2 \times h}{k \times e}}} \qquad \text{(eq. 6.15)}$$

- Aletas Pino



[figura 6.6]

Em certas aplicações aletas tipo pino são necessárias para não prejudicar demasiadamente o coeficiente de película. A figura 6.6 mostra uma aleta pino de seção circular. Neste caso o cálculo do coeficiente **m** é feito assim :

$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$$

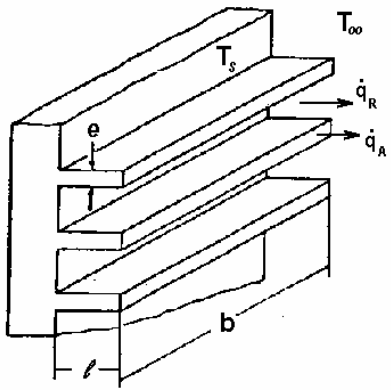
$$P = 2 \times \pi \times r$$

$$A_t = \pi \times r^2$$

$$m = \sqrt{\frac{h \times 2 \times \pi \times r}{k \times \pi \times r^2}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{m = \sqrt{\frac{2 \times h}{k \times r}}} \qquad \text{(eq. 6.16)}$$

6.4. EFICIÊNCIA DE UMA ALETA

Consideremos uma superfície base sobre a qual estão fixadas aletas de seção transversal uniforme, como mostra a figura 6.7. As aletas tem espessura **e**, altura **l** e largura **b**. A superfície base está na temperatura T_S maior que a temperatura ambiente T_∞.



[figura 6.7]

O fluxo de calor total transferido através da superfície com as aletas é igual ao fluxo transferido pela área exposta das aletas (A_A) mais o fluxo transferido pela área exposta da superfície base (A_R) :

$$\dot{q} = q_R + q_A \text{ , onde } \begin{cases} \dot{q}_R = h.A_R.(T_S - T_\infty) \\ \dot{q}_A = h.A_A.(T_? - T_\infty) \end{cases} \qquad \text{(eq. 6.17)}$$

A diferença de temperatura para a área das aletas ($T_? - T_\infty$) é desconhecida. A temperatura T_S é da base da aleta, pois à medida que a aleta perde calor, a sua temperatura diminui, ou seja, A_A não trabalha com o mesmo potencial térmico em relação ao fluido.

Por este motivo $\dot{q}_A$, calculado com o potencial ($T_S - T_\infty$), deve ser corrigido, multiplicando este valor pela eficiência da aleta (η). A eficiência da aleta pode ser definida assim :

$$\eta = \frac{\text{calor realmente trocado pela aleta}}{\text{calor que seria trocado se } A_A \text{ estivesse na temperatura } T_S}$$

Portanto,

$$\eta = \frac{\dot{q}_A}{h.A_A.(T_S - T_\infty)} \qquad \text{(eq. 6.18)}$$

Da equação 6.18 obtemos o fluxo de calor trocado pela área das aletas :

$$\dot{q}_A = h.A_A.(T_S - T_\infty).\eta \qquad \text{(eq. 6.19)}$$

O fluxo de calor em uma aleta cuja troca de calor pela extremidade é desprezível é obtido através da equação 6.12, obtida anteriormente :

$$\dot{q}_A = \sqrt{h.P.k.A_t}.(T_s - T_\infty).tagh(m.l)$$

É óbvio que desprezar a transferência de calor pela extremidade da aleta é simplificação para as aletas de uso industrial. Entretanto, como as aletas tem espessura pequena, a área de troca de calor na extremidade é pequena; além disto, a diferença de temperatura entre a aleta e o fluido é menor na extremidade. Portanto, na maioria dos casos, devido à pequena área de troca de calor e ao menor potencial térmico, a transferência de calor pela extremidade da aleta pode ser desprezada

Igualando as duas equações para o fluxo de calor (eq. 6.19 e eq. 6.12), temos :

$$h.A_A.(T_s - T_\infty).\eta = \sqrt{h.P.k.A_t}.(T_s - T_\infty).tagh(m.l)$$

Isolando a eficiência da aleta, obtemos :

$$\eta = \frac{\sqrt{h.Pk.A_t}}{h.A_A}.tagh(m.l) \qquad \text{(eq. 6.20)}$$

A área de troca de calor da aleta pode ser aproximada para :

$$A_A = P.l \qquad \text{(eq. 6.21)}$$

Substituindo a equação 6.21 na equação 6.3, obtemos :

$$\eta = \frac{h^{1/2}.P^{1/2}.\sqrt{k.A_t}}{h.(P.l)}.tagh(m.l) = \frac{\sqrt{k.A_t}}{\sqrt{h.P.l}}.tagh(m.l) = \frac{tagh(m.l)}{\frac{\sqrt{h.P}}{\sqrt{k.A_t}}.l} \qquad \text{(eq. 6.22)}$$

O coeficiente da aleta (**m**) pode ser introduzido na eq. 6.22 para dar a expressão final da eficiência da aleta :

$$\boxed{\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l}} \qquad \text{(eq. 6.23)}$$

onde, $m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$ (coeficiente da aleta)

e $tagh(m.L) = \frac{e^{m.L} - e^{m.L}}{e^{m.L} + e^{m.L}}$

A equação 6.23 mostra que a eficiência da aleta é uma função do produto "**m**.**l**". Observando uma tabela de funções hiperbólicas nota-se que a medida que o produto "**m**.**l**" aumenta a eficiência da aleta diminui, pois o numerador aumenta em menor proporção. Portanto, quanto maior o coeficiente da aleta e/ou quanto maior a altura, menor é a eficiência. Em compensação quanto maior a altura, maior é a área de transferência de calor da aleta (A_A).

De volta à equação 6.17, o fluxo de calor trocado em uma superfície aletada por ser calculado assim :

$$\dot{q} = \dot{q}_R + \dot{q}_A$$

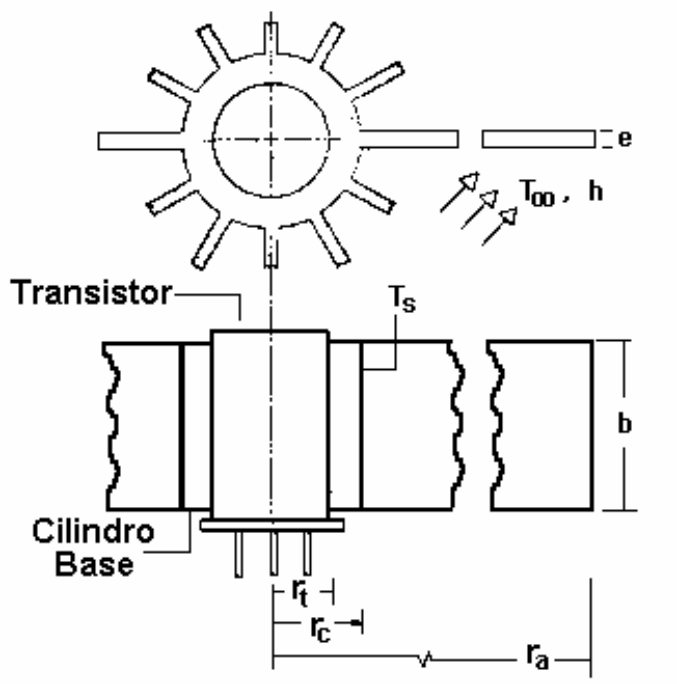
$$\dot{q} = h.A_R.(T_s - T_\infty) + h.A_A.(T_s - T_\infty).\eta$$

Colocando o WT e o coeficiente de película em evidência, obtemos :

$$\boxed{\dot{q} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_s - T_\infty)} \qquad \text{(eq. 6.24)}$$

A eficiência da aletas é obtida a partir da equação 6.23 e as áreas não-aletada (A_R) e das aletas (A_A) são obtidas através de relações geométricas, como veremos nos exercícios.

2 **Exercício 6.1.** A dissipação de calor em um transistor de formato cilindrico pode ser melhorada inserindo um cilindro vazado de alumínio (k = 200 W/m.K) que serve de base para 12 aletas axiais. O transistor tem raio externo de 2 mm e altura de 6 mm, enquanto que as aletas tem altura de 10 mm e espessura de 0,7 mm. O cilindro base, cuja espessura é 1 mm, está perfeitamente ajustado ao transistor e tem resistência térmica desprezível. Sabendo que ar fluindo a 20 ^{o}C sobre as superfícies das aletas resulta em um coeficiente de película de 25 W/m^2.K, calcule o fluxo de calor dissipado quando a temperatura do transistor for 80 ^{o}C.



n = 12 aletas

$k_{Al} = 200\,W/m.K$

$l = 10mm = 0{,}01m$

$r_t = 2\,mm = 0{,}002\,m$

$e_c = 1mm = 0{,}001m$

$r_c = r_t + e_c = 2 + 1 = 3mm = 0{,}003m$

$b = 6mm = 0{,}006m$

$e = 0{,}7mm = 0{,}0007m$

$T_S = 20^oC \qquad T_\infty = 80^oC$

$h = 25\,W/m^2.K$

Cálculo de A_R :

$$A_S = 2.\pi r_c.b = 2 \times \pi \times 0{,}003 \times 0{,}006 = 1{,}13 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_t = b.e = 0{,}006 \times 0{,}0007 = 0{,}42 \times 10^{-5} m^2$$

$$A_R = A_S - n.A_t = 1{,}13 \times 10^{-4} - 12 \times 0{,}42 \times 10^{-5} = 6{,}26 \times 10^{-5} m^2$$

Cálculo de A_A (desprezando as áreas laterais) :

$$A_A = n.(l.b).2 = 12 \times (0{,}01 \times 0{,}006) \times 2 = 0{,}00144 m^2$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Cálculo da eficiência da aleta :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 25}{200 \times 0,0007}} = 18,898 m^{-1}$$

$$m.l = 18,898 \times 0,01 = 0,18898$$
$$tgh(m.l) = tgh(0,18898) = 0,18676$$

$$\eta = \frac{tgh(m.l)}{m.l} = \frac{0,18676}{0,18898} = 0,9883 \quad (98,83\%)$$

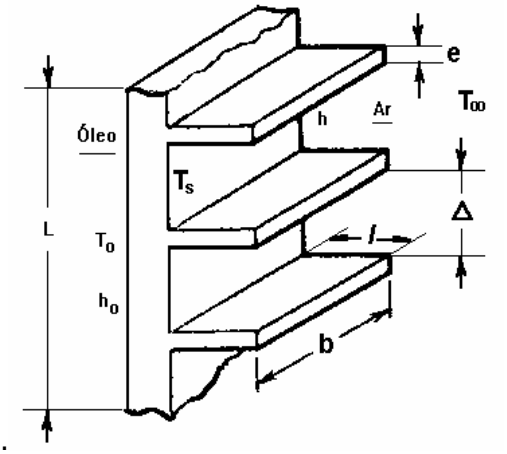
Cálculo do fluxo de calor :

Desprezando as resistências de contato entre o transistor e o cilindro e do próprio cilindro, a temperatura da base das aletas pode ser considerada como 80 ^{o}C.

$$\dot{q} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 25 \times (6,26 \times 10^{-5} + 0,9883 \times 0,00144) \times (80 - 20)$$

$$\boxed{\dot{q} = 2,22\, W}$$

2 **Exercício 6.2.** Uma placa plana de alumínio (k = 175 Kcal/h.m.^{o}C) de resistência térmica desprezível tem aletas retangulares de 1,5 mm de espessura e 12 mm de altura, espaçadas entre si de 12 mm, ocupando toda a largura da placa. O lado com aletas está em contato com ar a 40 ^{o}C e coeficiente de película 25 Kcal/h.m^2.^{o}C. No lado sem aletas escoa óleo a 150 ^{o}C e coeficiente de película 225 Kcal/h.m^2.^{o}C. Calcule por unidade de área da placa :
a) Fluxo de calor pela placa aletada desprezando a resistência da película de óleo;
b) Idem item anterior levando em conta a resistência a convecção na película de óleo.



$$Placa \rightarrow 1\,m^2 \Rightarrow L = 1\,m \quad e \quad b = 1\,m$$
$$e = 1,5\,mm = \mathbf{0,0015}\,m$$
$$\Delta = 12\,mm = \mathbf{0,012}\,m$$
$$h_o = 225\ Kcal/h.m^2.^o C \qquad h = 25\ Kcal/h.m^2.^o C$$
$$T_0 = 150\ ^o C \qquad T_{ar} = 40\ ^o C$$
$$k = 175\ Kcal/h.m.^o C$$

a) Desprezando a resistência da película do óleo (T_S = 150 ^{o}C)

Cálculo do número de aletas :

$$L = (e + \Delta).n \Rightarrow n = \frac{L}{e + \Delta} = \frac{1}{0,0015 + 0,012} \cong 74 aletas$$

Cálculo da eficiência da aleta :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 25}{175 \times \mathbf{0.0015}}} = 13,8\mathbf{0}1$$

$$m.l = 13,8\mathbf{0}1 \times \mathbf{0},012 = \mathbf{0},1\mathbf{6}5\mathbf{6}$$

$$tagh(m.l) = tagh(0,1656) = \frac{e^{0,1656} - e^{-0,1656}}{e^{0,1656} + e^{-0,1656}} = 0,1641$$

$$\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l} = \frac{0,1641}{0,1656} = 0,9909 \quad (99,09\%)$$

Cálculo da área não aletada :

$$A_R = A_S - n.A_t = A_S - n.(b.e) = 1 - 74 \times (1 \times 0,0015) = 0,889m^2$$

Cálculo da área das aletas (desprezando as áreas laterais) :

$$A_A = 2.(b.l).n = 2 \times (1 \times 0,012) \times 74 = 1,776m^2$$

Cálculo do fluxo de calor :

$$\dot{q} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 25 \times (0,889 + 0,99 \times 1,776) \times (150 - 40) = 7279,91Kcal/h$$

b) O novo fluxo pode ser obtido considerando a resistência da película do óleo (a resistência da placa é desprezível). Neste caso, a temperatura da base é T'_S < T_S

$$\dot{q}' = \frac{T_o - T'_S}{R_o} = \frac{T_o - T'_S}{\frac{1}{h.A}} = \frac{150 - T'_S}{\frac{1}{225 \times 1}} = 33750 - 225 \times T'_S$$

Este é também o fluxo pela placa aletada :

$$\dot{q}' = h.(A_R + \eta.A_A).(T'_S - T_\infty) = 25 \times (0,889 + 0,99 \times 1,776) \times (T'_S - 40) = 66,181 \times T'_S - 2647,24$$

Igualando as equações acima obtemos a temperatura da base (T'_S) :

$$33750 - 225 \times T'_S = \mathbf{66},181 \times T'_S - 2\mathbf{6}47,24 \quad \Rightarrow \quad T'_S = 125\ ^oC$$

Portanto, o fluxo de calor considerando a resistência da película de óleo será :

$$\dot{q}' = 33750 - 225 \times T'_S = 33750 - 225 \times 125 = 5625Kcal/h$$

Exercício 6.3. Um tubo de diâmetro 2" e 1,2 m de comprimento transporta um fluido a 150 ^{o}C, com coeficiente de película de 1800 kcal/h.m^2.^{o}C. Para facilitar a troca de calor com o ar ambiente foi sugerido o aletamento do tubo, com aletas longitudinais de 2 mm de espessura e 19 mm de altura, montadas com espaçamento aproximado de 6 mm (na base). O tubo e as aletas de aço tem coeficiente de condutividade térmica igual a 40

kcal/h.m.^{o}C e emissividade 0,86. O ar ambiente está a 28^{o}C, com coeficiente de película 15 kcal/hm ^{2} ^{o}C. Desprezando a resistência da película interna, pede-se :

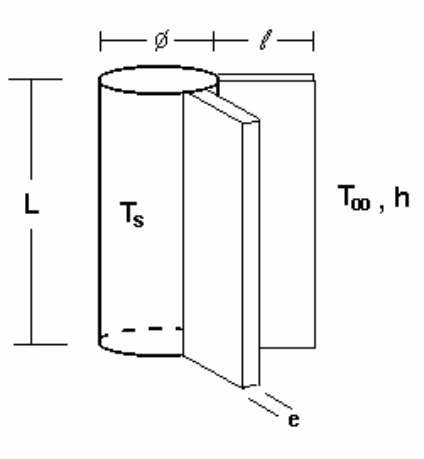
a) o calor transferido por convecção pelo tubo sem as aletas

b) o calor transferido por radiação pelo tubo sem as aletas

c) o número de aletas

d) o calor transferido por convecção pelo tubo aletado

e) o calor transferido por radiação pelo tubo aletado



$\varnothing = 2'' \Rightarrow r = 1'' = 0{,}0254\,m \qquad L = 1{,}2\,m$

$e = 2\,mm = 0{,}002\,m \qquad l = 19\,mm = 0{,}019\,m$

espaçamento entre aletas $\rightarrow$ = $6\,mm = 0{,}006\,m$

$k = 40\,Kcal/h.m.^{o}C \qquad h = 15\,Kcal/h.m^{2}.^{o}C$

emissividade $\rightarrow$ = 0,86

$T_S = 150\,^{o}C \qquad T_\infty = 28\,^{o}C$

a) Cálculo do fluxo de calor por convecção sem as aletas :

A área base do tubo é : $A_S = 2.\pi r.L = 2 \times \pi \times 0{,}0254 \times 1{,}2 = 0{,}1915 m^2$

$\dot{q}_c = h.A_S.(T_S - T_\infty) = 15 \times 0{,}1915 \times (150 - 28) \Rightarrow \boxed{\dot{q}_c = 350{,}3\,Kcal/h}$

b) Cálculo do fluxo de calor por radiação sem as aletas :

$\dot{q}_r = \sigma.A_S.F_{12}.(T_s^4 - T_\infty^4)$, onde $F_{12} = \varepsilon = 0{,}86 (\text{superf.}1 \langle\langle\langle \text{ superf.}2)$

$\dot{q}_r = 4{,}88 \times 10^{-8} \times 0{,}1915 \times 0{,}86 \times \left[(150 + 273)^4 - (28 + 273)^4\right] \Rightarrow \boxed{\dot{q}_r = 191{,}2\,Kcal/h}$

c) Cálculo do número de aletas :

Perímetro do tubo : $P = 2.\pi r = 2 \times \pi \times 0{,}0254 = 0{,}159\,m$

$$P = (e + \Delta).n \Rightarrow n = \frac{P}{e + \Delta} = \frac{0{,}159}{0{,}002 \times 0{,}006}$$

$\boxed{n = 20 \text{ aletas}}$

d) Cálculo do fluxo de calor por convecção pelo tubo com as aletas :

Cálculo de A_R :

$$A_R = A_S - n.A_t = A_S - n.(e.L) = 0{,}1915 - 20 \times (0{,}019 \times 1{,}2) = 0{,}143 m^2$$

Cálculo de A_A (desprezando as áreas laterais) :

$$A_A = 2.(l.b).n = 2 \times (0{,}019 \times 1{,}2) \times 20 = 0{,}912 m^2$$

Cálculo da eficiência da aleta :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 15}{40 \times 0{,}002}} = 19{,}4 m^{-1}$$

$$m.l = 19{,}4 \times 0{,}019 = 0{,}368 \qquad tgh(m.l) = tgh(0{,}368) = 0{,}352$$

$$\eta = \frac{tgh(m.l)}{m.l} = \frac{0{,}352}{0{,}368} = 0{,}957 \quad (95{,}7\%)$$

Cálculo do fluxo de calor :

Desprezando as resistências a convecção no interior do tubo e a condução no tubo, a temperatura da base das aletas pode ser considerada como 150 ^oC.

$$\dot{q} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 15 \times (0{,}143 + 0{,}957 \times 0{,}912) \times (150 - 28)$$

$$\boxed{\dot{q} = 1859\ Kcal/h}$$

e) Cálculo do fluxo de calor por radiação pelo tubo com as aletas :

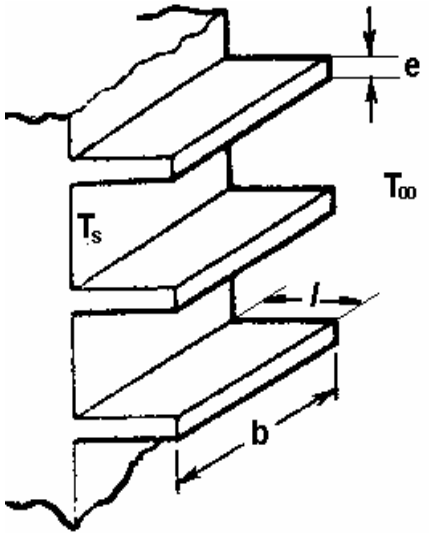
Como a eficiência da aleta é elevada (95,7 %), podemos considerar que praticamente toda a superfície da aleta está na temperatura da base (T_S). Neste caso, para o cálculo do fluxo de calor por radiação será utilizado o mesmo potencial da base para a área total ($A_A + A_R$).

$$\dot{q}_r = \sigma.(A_R + A_A).F_{12}.(T_s^4 - T_\infty^4) \ , \text{ onde } \quad F_{12} = \varepsilon = 0{,}86 (\text{superf.} 1 \langle\langle\langle \text{ superf.} 2)$$

$$\dot{q}_r = 4{,}88 \times 10^{-8} \times (0{,}143 + 0{,}912) \times 0{,}86 \times \left[(150 + 273)^4 - (28 + 273)^4 \right]$$

$$\boxed{\dot{q}_r = 1054\ Kcal/h}$$

Exercício 6.4. Determine a porcentagem de aumento da transferência de calor associada com a colocação de aletas retangulares de alumínio (k=200 W/m.K) em uma placa plana de 1m de largura. As aletas tem 50 mm de altura e 0,5 mm de espessura e a densidade de colocação é 250 aletas por unidade de comprimento da placa (as aletas são igualmente espaçadas e ocupam toda a largura da placa). O coeficiente de película do ar sobre a placa sem aletas é 40 W/m2.K, enquanto que o coeficiente de película resultante da colocação de aletas é 30 W/m2.K. (OBS: desprezar as áreas laterais das aletas)



$n = 250\ aletas$

$l = 50\ mm = 0,05\ m$

$e = 0,5\ mm = 0,0005\ m$

Consideremos uma placa de : $1m \times 1m \ \rightarrow \ b = 1m$

sem aletas $\rightarrow \ h = 40\ W/m^2.K$

com aletas $\rightarrow \ h = 30\ W/m^2.K$

$k_{aletas} = 200\ W/m.K$

Cálculo da área não aletada :

$$A_R = A_s - n.A_t = 1 \times 1 - 250 \times (1 \times 0,0005) = 0,875 m^2$$

Cálculo da área das aletas :

$$A_A = 2.(b.l).n = 2 \times (1 \times 0,05) \times 250 = 25 m^2$$

Cálculo da eficiência da aleta :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.A_t}} = \sqrt{\frac{2 \times 30}{200 \times 0,0005}} = 24.49\ m^{-1}$$

$$m.l = 24,49 \times 0,05 = 1,2245$$

$$tgh(m.l) = \frac{e^{1,2245} - e^{-1,2245}}{e^{1,2245} + e^{-1,2245}} = 0,841$$

$$\eta = \frac{tgh(m.l)}{m.l} = \frac{0,841}{1,2245} = 0,6868$$

Cálculo do fluxo de calor através da superfície com as aletas :

$$\dot{q} = h.(A_R - \eta.A_A).(T_s - T_\infty) = 30 \times (0{,}875 + 0{,}6868 \times 25) \times \Delta T = 541{,}35 \times \Delta TW$$

Cálculo do fluxo de calor através da superfície sem as aletas :

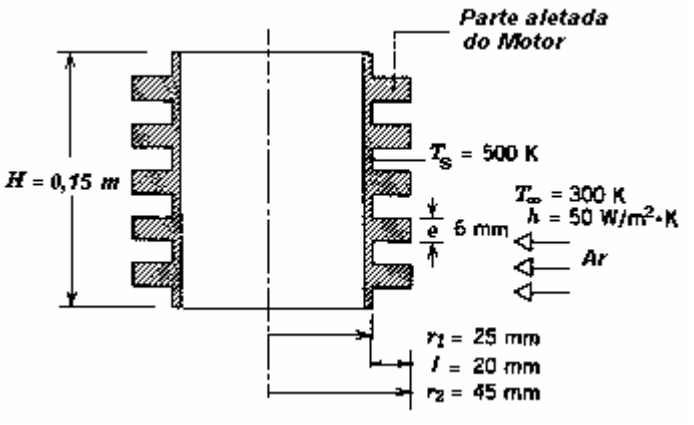
$$\dot{q} = h.A.(T_s - T_\infty) = 40 \times (1 \times 1) \times \Delta T = 40 \times \Delta TW$$

Cálculo da percentagem de aumento do fluxo de calor :

$$\%aumento = \frac{\dot{q}_{c/a} - \dot{q}_{s/a}}{\dot{q}_{s/a}} \times 100 = \frac{541{,}35 \times \Delta T - 40 \times \Delta T}{40 \times \Delta T} \times 100 = 1253{,}4\%$$

$\boxed{\%\ aumento\ = 1253{,}4\%}$

Exercício 6.5. A parte aletada do motor de uma motocicleta é construída de uma liga de alumínio (k=186 W/m.K) e tem formato que pode ser aproximado como um cilindro de 15 cm de altura e 50 mm de diâmetro externo. Existem 5 aletas transversais circulares igualmente espaçadas com espessura de 6 mm e altura de 20 mm. Sob as condições normais de operação a temperatura da superfície externa do cilindro é 500 K e está exposta ao ambiente a 300 K, com coeficiente de película de 50 W/m^2.K quando a moto está em movimento. Quando a moto está parada o coeficiente cai para 15 W/m^2.K. Qual é a elevação percentual da transferência de calor quando a moto está em movimento. (OBS : desprezar as áreas laterais)



$H = 15\,cm = 0{,}15\,m \qquad \not{x}_e = 50\,mm \rightarrow r_e = 0{,}025\,m$

$n = 5\,aletas \qquad l = 20\,mm = 0{,}02\,m$

$e = 6\,mm = 0{,}006\,m$

$k_{aleta} = 186\,W/m.K \qquad T_S = 500\,K \qquad T_\infty = 300\,K$

$h_m = 50 W/m^2.K \qquad h_p = 15 W/m^2.K$

Cálculo da área não aletada :

$$A_R = A_s - n.A_t = 2 \times \pi \times 0{,}025 \times 0{,}15 - 5 \times (2 \times \pi \times 0{,}025 \times 0{,}006) = 0{,}01885 m^2$$

Cálculo da área das aletas :

$$r_a = r_e + l = 0{,}025 + 0{,}02 = 0{,}045\,m$$

$$A_A = 2.[\pi.r_a^2 - \pi.r_e^2]n = 2 \times [\pi.(0{,}045)^2 - \pi.(0{,}025)^2] \times 5 = 0{,}04398 m^2$$

Cálculo da eficiência da aleta (para a moto em movimento) :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 50}{186 \times 0{,}006}} = 9{,}466\, m^{-1} \qquad \rightarrow \qquad m.l = 9{,}466 \times 0{,}02 = 0{,}1893$$

$$\eta = \frac{tgh(m.l)}{m.l} = \frac{tgh(0{,}1893)}{0{,}1893} = \frac{0{,}1871}{0{,}1893} = 0{,}9884 \quad (98{,}84\%)$$

Cálculo da eficiência da aleta (para a moto parada) :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 15}{186 \times 0{,}006}} = 5{,}1848\, m^{-1} \qquad \rightarrow \qquad m.l = 5{,}1848 \times 0{,}02 = 0{,}1037$$

$$\eta = \frac{tgh(m.l)}{m.l} = \frac{tgh(0{,}1037)}{0{,}1037} = \frac{0{,}1036}{0{,}1037} = 0{,}999 \qquad (99{,}90\%)$$

Cálculo do fluxo de calor (para a moto em movimento) :

$$\dot{q}_m = h_m.(A_R - \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 50 \times (0{,}01885 + 0{,}9884 \times 0{,}04398) \times (500 - 300) = 623{,}198W$$

Cálculo do fluxo de calor (para a moto parada) :

$$\dot{q}_p = h_p.(A_R - \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 15 \times (0{,}01885 + 0{,}999 \times 0{,}04398) \times (500 - 300) = 188{,}358W$$

Cálculo da percentagem de elevação do fluxo de calor para a moto em movimento :

$$\%Elev = \frac{\dot{q}_m - \dot{q}_p}{\dot{q}_p} \times 100 = \frac{623{,}198 - 188{,}358}{188{,}358} \times 100 = 230{,}86\%$$

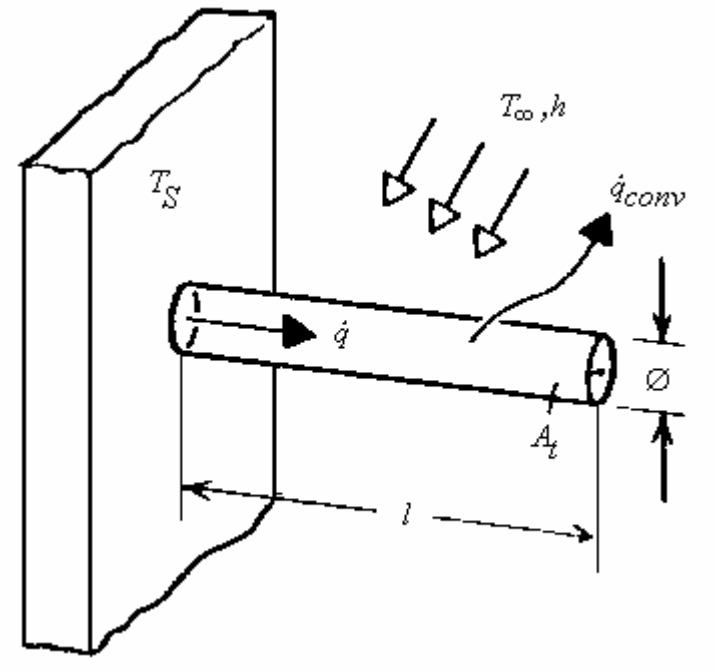
$$\boxed{\%Elev = 230{,}86\%}$$

Exercício 6.6. Determinar o aumento do calor dissipado por unidade de tempo que poderia ser obtido de uma placa plana usando-se por unidade de área 6400 aletas de alumínio (k = 178 Kcal/h.m.^{o}C), tipo pino, de 5 mm de diâmetro e 30 mm de altura. Sabe-se que na base da placa a temperatura é 300 ^{o}C, enquanto que o ambiente está a 20 ^{o}C com coeficiente de película de 120 Kcal/h.m^{2}.^{o}C.

Cálculo da eficiência :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.r}} = \sqrt{\frac{2 \times 120}{178 \times 0.0025}} = 23{,}17\, m^{-1}$$

$$m.l = 23{,}17 \times 0{,}03 = 0{,}6951$$



$n = 6400$ aletas

$k = 178\,Kcal/h.m.^oC$

$\varnothing = 5mm = 0{,}005m$

$r = \dfrac{\varnothing}{2} = 0{,}0025m$

$l = 30mm = 0{,}03m$

$T_S = 300\,^oC \quad T_\infty = 20\,^oC$

$h = 120\,Kcal/h.m^2.^oC$

$$tagh(m.l) = \frac{e^{0,695} - e^{-0,695}}{e^{0,695} + e^{-0,695}} = 0{,}6012$$

$$\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l} = \frac{0{,}6012}{0{,}6951} = 0{,}8649 \quad (86{,}49\%)$$

Cálculo da área não aletada :

$$A = A_S - n.A_t = A_S - n.(\pi.r^2) = 1 - [\pi \times (0{,}0025)^2] = 0{,}875m^2$$

Cálculo da área das aletas (desprezando as áreas laterais) :

$$A_A = 2.\pi r.l.n = 2 \times \pi \times 0{,}0025 \times 0{,}03 \times 6400 = 3{,}015m^2$$

Cálculo do fluxo de calor :

$$\dot{q}_{c/a} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 12 \times (0{,}875 + 0{,}8649 \times 3{,}015) \times (300 - 20) = 116926Kcal/h$$

Antes da colocação das aletas o fluxo é :

$$\dot{q}_{s/a} = h.A_S.(T_S - T_\infty) = 120 \times 1 \times (300 - 20) = 33600Kcal/h$$

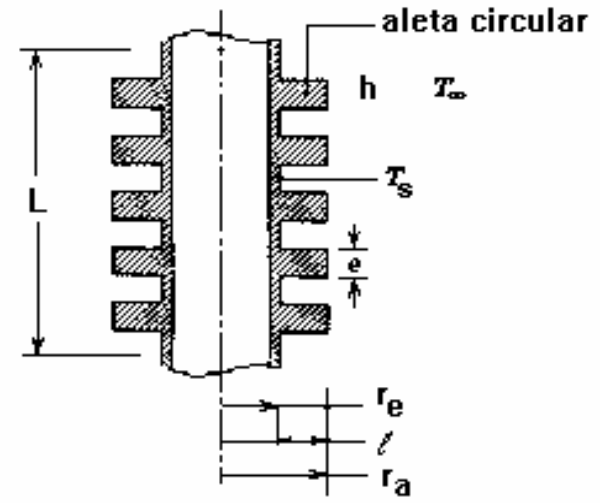
$$\%\text{Aumento} = \frac{\dot{q}_{c/a} - \dot{q}_{s/a}}{\dot{q}_{s/a}} \times 100 = \frac{116926 - 33600}{33600} \times 100$$

$\%$ Aumento $= 248\%$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

2 **Exercício 6.7.** Um tubo de aço (k = 35 kcal/h.m.^{o}C e ε = 0,55) com diâmetro externo 5,1 cm e 2,2 m de comprimento conduz um fluido a 600 ^{o}C, em um ambiente onde o ar está a 35 ^{o}C, com coeficiente de película 20 kcal/h.m^2.^{o}C. Existem duas opções elevar a transferência de calor : o tubo pode receber 10 aletas de aço de 5 mm de espessura e 10,2 cm de diâmetro (aletas circulares) ou ser pintado com uma tinta de emissividade (ε) igual a 0,83. Determinar :

a) O fluxo de calor por convecção pelo tubo com aletas;
b) O fluxo de calor por radiação pelo tubo com aletas;
c) O fluxo de calor por convecção pelo tubo pintado com a tinta especial;
d) O fluxo de calor por radiação pelo tubo pintado com a tinta especial;
e) A opção que produz o maior fluxo de calor (aletamento ou pintura ?).



$n = 10$ aletas $\quad L = 2,2\ m \quad \varepsilon = 0,55$

$\varnothing_e = 5,1\ cm \Rightarrow r_e = 2,55\ cm = 0,0255\ m$

$\varnothing_a = 10,2\ cm \Rightarrow r_a = 5,1\ cm = 0,51\ m$

$e = 5\ mm = 0,005\ m$

$l = r_a - r_e = 0,051 - 0,0255 = 0,0255\ m$

$h = 20\ Kcal/h.m^2.^oC \quad k = 35\ Kcal/h.m.^oC$

$T_s = 600\ ^oC \quad T_\infty = 35\ ^oC$

a) Fluxo de calor por convecção :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.e}} = \sqrt{\frac{2 \times 20}{35 \times 0.005}} = 15,1186\ m^{-1}$$

$$m.l = 15,1186 \times 0,0255 = 0,385$$

$$tagh(m.l) = \frac{e^{0,385} - e^{-0,385}}{e^{0,385} + e^{-0,385}} = 0,367$$

$$\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l} = \frac{0,367}{0,385} = 0,9532 \quad (95,32\%)$$

$$A_S = 2.\pi.r_e.L = 2 \times \pi \times 0,0255 \times 2,2 = 0,352\ m^2$$

$$A_R = A_S - n.A_t = A_S - n.(2.\pi.r_e.e) = 0,352 - 10(2 \times \pi \times 0,0255 \times 0,005) = 0,344 m^2$$

$$A_A = 2.[\pi.r_a^2 - \pi.r_e^2]n = 2 \times [\pi \times (0,051)^2 - \pi \times (0,0255)^2] \times 10 = 0,1226 m^2$$

$$\dot{q}^a_{conv} = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty) = 20 \times (0,344 + 0,9532 \times 0,1226) \times (600 - 35)$$

$$\boxed{\dot{q}^a_{conv} = 5207,74\ Kcal/h}$$

b) Uma elevada eficiência para a aletas significa que sua temperatura é próxima da temperatura da base, Então, podemos considerar para a radiação :

$\eta = 95,32\% \quad \Rightarrow$ temperatura de A_R e $A_A \approx T_S$

$$\dot{q}^a_{rad} = \sigma.(A_R + A_A).\varepsilon.(T_S^4 - T_\infty^4)$$

$$\dot{q}^a_{rad} = 4,88\times10^{-8}\times(0,344+0,1226)\times 0,55.\left[(600+273)^4 - (35+273)^4\right]$$

$$\dot{q}^a_{rad} = 7161,49\ Kcal/h$$

c) Fluxo de calor por convecção pelo tubo pintado :

$$\dot{q}^p_{conv} = h.A_S.(T_S - T_\infty) = 20\times 0,352\times(600-35)$$

$$\boxed{\dot{q}^p_{conv} = 3977,60\ Kcal/h}$$

d) Fluxo de calor por radiação pelo tubo pintado :

$$\dot{q}^p_{rad} = \sigma.A_S.\varepsilon.(T_S^4 - T_\infty^4) = 4,88\times10^{-8}\times 0,354\times 0,83.\left[(600+273)^4 - (35+273)^4\right]$$

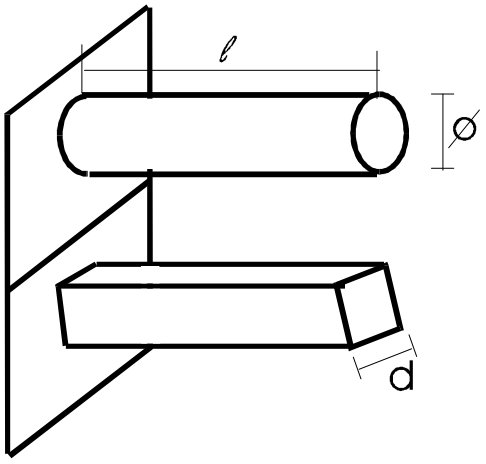
$$\boxed{\dot{q}^p_{rad} = 8199,30\ Kcal/h}$$

e) O fluxo total, em ambos casos, é a soma dos fluxo por convecção e radiação :

$$\dot{q}^{\text{aletas}} = \dot{q}^a_{conv} + \dot{q}^a_{rad} = 5207,74 + 7161,49 = 12369,23\ Kcal/h$$
$$\dot{q}^{\text{pintura}} = \dot{q}^p_{conv} + \dot{q}^p_{rad} = 3977,60 + 8199,30 = 12176,90\ Kcal/h$$

$\boxed{\dot{q}^{\text{aletas}} > \dot{q}^{\text{pintura}} \quad \Rightarrow \text{ O aletamento resulta em maior transferência de calor}}$

Exercício 6.8. A transferência de calor em um reator de formato cilíndrico deve ser elevada em 10 % através da colocação de aletas de aço (k = 40 Kcal/h.m.^{o}C). Dispõe-se de 2 tipos de aletas pino, ambas com 25 mm de altura. Um tipo tem seção circular com 5 mm de diâmetro e o outro tem seção quadrada com 4 mm de lado. O reator, que tem 2 m de altura de 50 cm de diâmetro, trabalha a 250 ^{o}C e está localizado em um local onde a temperatura é 25 ^{o}C e o coeficiente de película é 12 Kcal/h.m^2.^{o}C.
a) Calcular o número de pinos de seção circular necessários;
b) Calcular o número de pinos de seção quadrada necessários.



reator $\rightarrow$ $L = 2m$ $\quad r = 50/2\ cm = 0,25m$

circular$\rightarrow$ $r_p = \dfrac{\varnothing}{2} = 2,5mm = 0,0025m$ $\quad l = 25mm = 0,025m$

qradrada $\rightarrow$ $d = 3mm = 0,003m$ $\quad l = 25mm = 0,025m$

$k = 40\,Kcal/h.m.^oC$ $\quad h = 12\,Kcal/h.m^2.^oC$

$T_S = 250\,^oC$ $\quad T_\infty = 25\,^oC$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O fluxo de calor através da superfície do reator antes do aletamento é :

$$A_S = 2.\pi r.L = 2 \times \pi \times 0,25 \times 2 = 3,14\, m^2$$
$$\dot{q} = h.A_S.(T_s - T_\infty) = 12 \times 3,14 \times (250 - 25) = 8482,3 Kcal/h$$

Uma elevação de 10% neste fluxo, através da colocação de aletas, equivale :

$$\dot{q}' = 1,1 \times \dot{q} = 1,1 \times 8482,3 = 9330,5\, Kcal/h$$

a) Cálculo do número de aletas pinos de seção circular (n_C)

Eficiência das aletas pino de seção circular :

$$m = \sqrt{\frac{2.h}{k.r_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 12}{40 \times 0,0025}} = 15,49\, m^{-1}$$
$$m.l = 15,49 \times 0,025 = 0,3873$$
$$tagh(m.l) = tagh(0,3873) = 0,369$$
$$\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l} = \frac{0,369}{0,3873} = 0,9528 \quad (95,28\%)$$

Cálculo da áreas não aletada e a área das aletas (desprezando a área do topo) :

$$A_R = A_S - (\pi.r_p^2).n_c = 3,14 - 0,00002 \times n_c$$
$$A_A = (2.\pi.r_p.l).n_c = (2 \times \pi \times 0,0025 \times 0,025) \times n_c = 0,0004 \times n_c$$

Cálculo do número de aletas pino de seção circular :

$$\dot{q}' = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty)$$
$$9330,5 = 12 \times [(3,14 - 0,00002 \times n_c) + 0,9528 \times 0,0004 \times n_c] \times (250 - 25)$$
$$3,456 = 3,14 + 0,00036 \times n_c$$
$$\boxed{n_c = 878 \text{ aletas}}$$

b) Cálculo do número de aletas pinos de seção quadrada (n_q)

Eficiência das aletas pino de seção quadrada :

$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}} = \sqrt{\frac{h.(4.d)}{k.(d^2)}} = \sqrt{\frac{4.h}{k.d}} = \sqrt{\frac{4 \times 12}{40 \times 0,003}} = 20 m^{-1}$$
$$m.l = 20 \times 0,025 = 0,5$$
$$tagh(m.l) = tagh(0,5) = 0,4621$$
$$\eta = \frac{tagh(m.l)}{m.l} = \frac{0,4621}{0,5} = 0,9242 \quad (92,42\%)$$

Cálculo da áreas não aletada e a área das aletas (desprezando a área do topo) :

$$A_R = A_S - (d^2).n_c = 3,14 - 0,000009 \times n_c$$
$$A_A = (l.d.4).n_c = (0,025 \times 0,003 \times 4) \times n_c = 0,0003 \times n_c$$

Cálculo do número de aletas pino de seção circular :

$$\dot{q}' = h.(A_R + \eta.A_A).(T_S - T_\infty)$$
$$9330,5 = 12 \times [(3,14 - 0,000009 \times n_c) + 0,9242 \times 0,0003 \times n_c] \times (250 - 25)$$
$$3,456 = 3,14 + 0,000268 \times n_c$$
$$\boxed{n_c = 1179 \text{ aletas}}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 6.9. Numa indústria deseja-se projetar um dissipador de calor para elementos transistores em um local onde o coeficiente de película é 3 Kcal/h.m^2.^{o}C. A base do dissipador será uma placa plana, de 10 x 10 cm, sobre a qual estarão dispostas 8 aletas, de seção transversal retangular, com espaçamento constante, de 2 mm de espessura e 40 mm de altura. Sob a placa deve ser mantida uma temperatura de 80 ^{o}C, com temperatura ambiente de 30 ^{o}C. Considerando a condutividade térmica das aletas igual a 35 Kcal/h.m.^{o}C, pede-se :

a) a eficiência da aleta;

b) calor dissipado pela placa aletada;

c) razão percentual entre os fluxos de calor dissipado pelas aletas e o total.

Exercício 6.10. Um tubo horizontal de diâmetro 4" conduz um produto a 85^{o}C, com coeficiente de película 1230 Kcal/h.m^2.^{o}C. O tubo é de aço, de coeficiente de condutibilidade térmica 40 kcal/h.m.^{o}C; tem 0,8 m de comprimento e está mergulhado num tanque de água a 20 ^{o}C, com coeficiente de película 485 Kcal/h.m^2.^{o}C. O tubo deve ter 1,5 aletas por centímetro de tubo. As aletas, circulares são feitas de chapa de aço, de 1/8 " de espessura e 2 " de altura. Pede-se:

a) o fluxo de calor pelo tubo, sem aletas;

b) a temperatura da superfície externa do tubo , sem aletas;

c) o fluxo de calor pelo tubo aletado, considerando a mesma temperatura calculada anteriormente na superfície externa.

Exercício 6.11. Um tubo de diâmetro 4" e 65 cm de comprimento deve receber aletas transversais , circulares, de 1,5 mm de espessura, separadas de 2 mm uma da outra. As aletas tem 5 cm de altura. No interior do tubo circula um fluido a 135^{o}C. O ar ambiente está a 32 ^{o}C, com coeficiente de película 12 kcal/h.m^2.^{o}C. A condutividade térmica do material da aleta é 38 kcal/hm^2 ^{o} C. Determinar o fluxo de calor pelo tubo aletado.

Exercício 6.12. No laboratório de uma indústria pretende-se testar um novo tipo de aletas, na forma de prisma reto, de seção transversal triangular (eqüilátera) com 1 cm de lado. Essas aletas tem altura de 5 cm e serão colocadas, durante o teste, sobre placas de 10 cm x 10 cm, submetidas a uma temperatura de 150 ^{o}C na base e expostas ao ar a 40 ^{o}C.

Por razões técnicas, no máximo 30 % da área das placas poderá ser aletada. Sabendo que a condutividade térmica do material do aleta é 130 kcal/hm C e o coeficiente de película do ar é 5 Kcal/h.m^2.^{o}C, pede-se o fluxo de calor pela placa aletada.

Exercício 6.13. Em uma indústria, deseja-se projetar um dissipador de calor para elementos transístores. O base do dissipador será uma placa plana de 10 x 10 cm , sobre a qual estarão dispostas 8 aletas retangulares (k = 35 Kcal/h.m.^{o}C) de 2 mm de espessura e 40 mm de altura, com espaçamento constante. Na superfície da placa deve ser mantida uma temperatura de 80 ^{o}C, com temperatura ambiente de 30 ^{o}C e coeficiente de película de 3 Kcal/h.m^2.^{o}C. Nestas condições, pede-se :
a) a eficiência das aletas;
b) o calor dissipado pela placa aletada.

Exercício 6.14. Um tubo de aço de 0,65 m de comprimento e 10 cm de diâmetro, com temperatura de 60 ^{o}C na superfície externa, troca calor com o ar ambiente a 20 ^{o}C e com coeficiente de película de 5 Kcal/h.m^2.^{o}C, a uma razão de 40 kcal/h. Existem 2 propostas para aumentar a dissipação de calor através da colocação de aletas de condutividade térmica 40 Kcal/h.m.^{o}C. A primeira prevê a colocação de 130 aletas longitudinais de 0,057 m de altura e 0,002 m de espessura. A segunda prevê a colocação de 185 aletas circulares de 0,05m de altura e 0,0015 m de espessura. Calculando o fluxo de calor para os dois casos, qual das propostas você adotaria, considerando os custos de instalação iguais.

Exercício 6.15. Um tubo horizontal de diâmetro 4" conduz um produto a 85^{o}C, com coeficiente de película 1230 kcal/h.m^2.^{o}C. O tubo é de aço, de condutividade térmica 40 kcal/h.m.^{o}C, tem 0,8 m de comprimento e está mergulhado em um tanque de água a 20 ^{o}C, com coeficiente de película 485 Kcal/h.m^2.^{o}C. O tubo deve ter 1,5 aletas por centímetro de tubo. As aletas circulares são feitas de chapa de aço de 1/8" de espessura e 2" de altura. Pede-se :
a) o fluxo de calor pelo tubo sem considerar as aletas;
b) o fluxo de calor pelo tubo aletado.

Exercício 6.16. Um tubo de 10 cm de diâmetro externo tem 130 aletas longitudinais de aço (k = 40 kcal/h.m.^{o}C) com 5,8 cm de altura e 0,2 cm de espessura. O ar ambiente está a 20 ^{o}C, com coeficiente de película igual a 5 Kcal/h.m^2.^{o}C. A temperatura da superfície do tubo é 60 ^{o}C. Calcular :
a) A eficiência da aleta;
b) O fluxo de calor, por unidade de comprimento, pelo tubo aletado.

7- TROCADORES DE CALOR

O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações da engenharia. Os equipamentos usados para implementar esta troca são denominados **trocadores de calor**, e aplicações específicas podem ser encontradas em aquecimento e condicionamento de ambiente, recuperação de calor, processos químicos, etc. Como aplicações mais comuns deste tipo de equipamento temos : Aquecedores, resfriadores, condensadores, evaporadores, torres de refrigeração, caldeiras, etc.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O projeto completo de trocadores de calor pode ser subdividido em três fases principais :

- a análise térmica;
- o projeto mecânico preliminar;
- o projeto de fabricação;

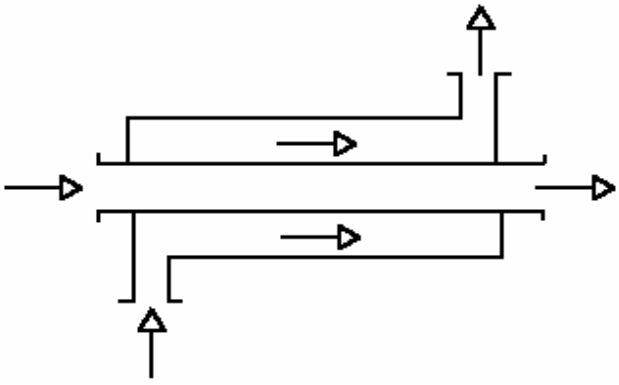
Neste curso será enfocada a análise térmica, que consiste na determinação da área de troca de calor requerida, dadas as condições de escoamento e temperaturas dos fluidos. O projeto mecânico envolve considerações sobre pressões e temperaturas de operação, características de corrosão, etc. Finalmente, o projeto de fabricação requer a tradução das características e dimensões físicas em uma unidade que possa ser construída a um baixo custo.

7.1 TIPO DE TROCADORES

Existem trocadores de calor que empregam a mistura direta dos fluidos, como por exemplo torres de refrigeração e aquecedores de água de alimentação, porém são mais comuns os trocadores nos quais os fluidos são separados por uma parede ou partição através da qual passa o calor. Alguns dos tipos mais importantes destes trocadores são vistos a seguir :

1. **Duplo Tubo**

São formados por dois tubos concêntricos, como ilustra a figura 7.1. Pelo interior do tubo do primeiro (mais interno) passa um fluido e, no espaço entre as superfícies externa do primeiro e interna do segundo, passa o outro fluido. A área de troca de calor é a área do primeiro tubo.



[figura 7.1]

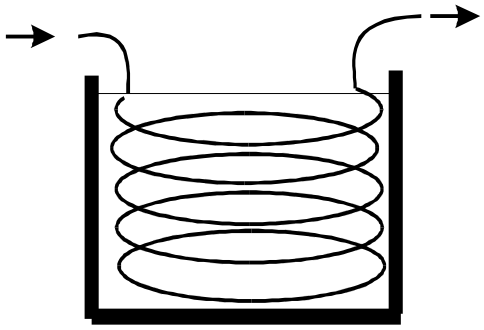
- tem as vantagens de ser simples, ter custo reduzido e de ter facilidade de desmontagem para limpeza e manutenção.

- o grande inconveniente é a pequena área de troca de calor.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

2. **Serpentina**

São formados por um tubo enrolado na forma de espiral, formando a serpentina, a qual é colocada em uma carcaça ou recipiente, como mostra a figura 7.2. A área de troca de calor é área da serpentina.

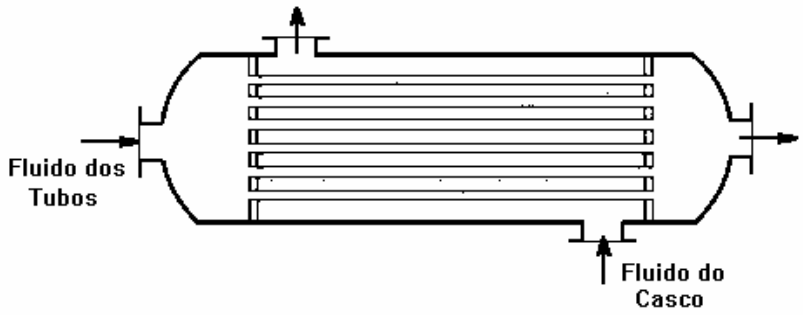


[figura 7.2]

- permite maior área de troca de calor que o anterior e tem grande flexibilidade de aplicação
- usado principalmente quando se quer aquecer ou resfriar um banho.

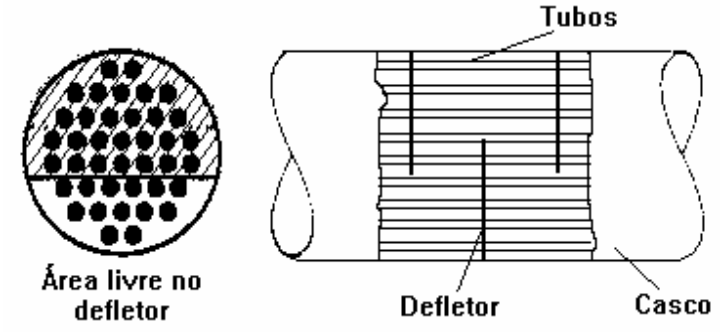
3. **Multitubular**

São formados por um feixe de tubos paralelos contidos em um tubulão cilíndrico denominado de casco, como mostra a figura 7.3. Um dos fluidos (fluido dos tubos) escoa pelo interior dos tubos, enquanto que o outro (fluido do casco) escoa por fora dos tubos e dentro do casco.



[figura 7.3]

Defletores (ou chicanas), mostrados na figura 7.4, são normalmente utilizados para aumentar o coeficiente de película do fluido do casco pelo aumento da turbulência e da velocidade de escoamento deste fluido.



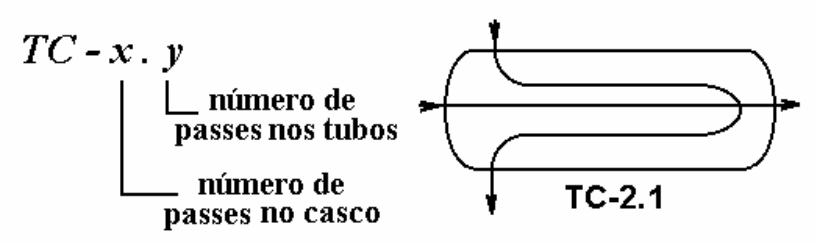
[figura 7.4]

- também conhecidos como tipo casco-tubos, são os mais usados na indústria porque oferecem uma grande área de troca de calor

- se um dos fluidos do trocador condensa ou evapora, o trocador é também denominado condensador ou evaporador, respectivamente

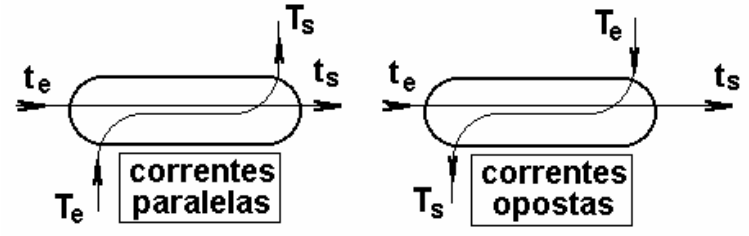
7.2. MÉDIA LOGARÍTMICA DAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS

Um fluido dá um passe quando percorre uma vez o comprimento do trocador. Aumentando o número de passes, para a mesma área transversal do trocador, aumenta a velocidade do fluido e portanto o coeficiente de película, com o conseqüente aumento da troca de calor. Porém, isto dificulta a construção e limpeza e encarece o trocador. A notação utilizada para designar os números de passes de cada fluido é exemplificada na figura 7.5.



[figura 7.5]

Com relação ao tipo de escoamento relativo dos fluidos do casco e dos tubos, ilustrados na figura 7.6, podemos ter escoamento em *correntes paralelas* (fluidos escoam no mesmo sentido) e *correntes opostas* (fluidos escoam em sentidos opostos).

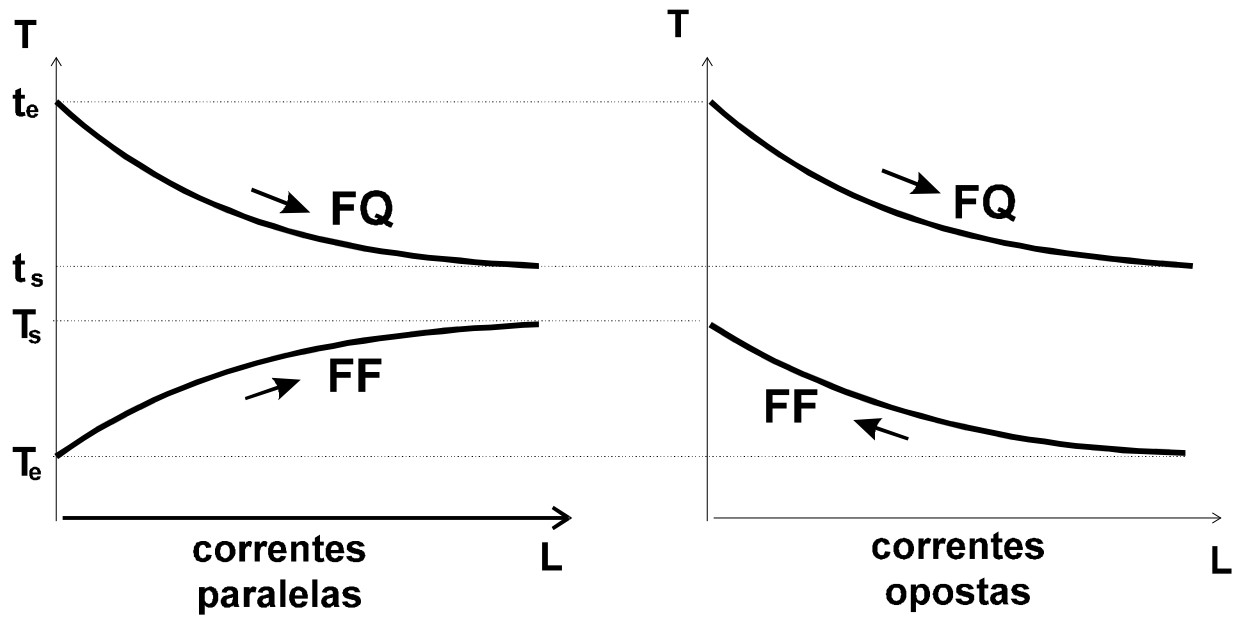


[figura 7.6]

Para cada um destes casos de escoamento relativo a variação da temperatura de cada um dos fluidos ao longo do comprimento do trocador pode ser representada em gráfico, como mostra a figura 7.7.

As diferenças de temperatura entre os fluidos nas extremidades do trocador, para o caso de *correntes paralelas*, são : (t_e - T_e) que é sempre máxima (DT_{max}) e (t_s - T_s) que é sempre mínima (DT_{min}). No caso de *correntes opostas*, as diferenças de temperatura nas extremidades (t_e - T_s) e (t_s - T_e) podem ser máxima (DT_{max}) ou mínima (DT_{min}) dependendo das condições específicas de cada caso.

O fluxo de calor transferido entre os fluidos em um trocador é diretamente proporcional à diferença de temperatura média entre os fluidos. No trocador de calor de correntes opostas a diferença de temperatura entre os fluidos não varia tanto, o que acarreta em uma diferença média maior. Como consequência, mantidas as mesmas condições, o trocador de calor trabalhando em correntes opostas é mais eficiente.



[figura 7.7]

Como a variação de temperatura ao longo do trocador não é linear, para retratar a diferença média de temperatura entre os fluidos é usada então a **Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura** (MLDT), mostrada na equação 7.1.

$$MLDT = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \qquad \text{(eq. 7.1)}$$

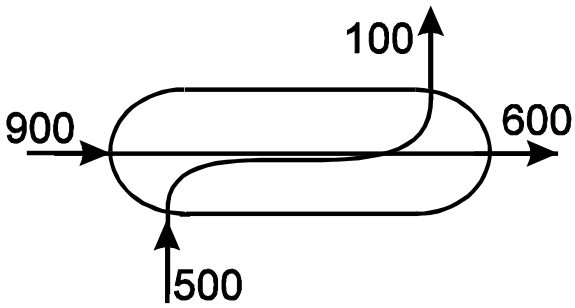
A utilização da média aritmética para situações onde a relação ($\Delta T_{max} / \Delta T_{min}$) é menor que 1,5 corresponde a um erro de apenas 1%.

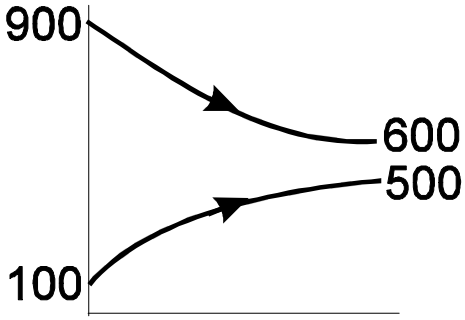
Exercício 7.1. Num trocador de calor TC-1.1 onde o fluido quente entra a 900 ^{o}C e sai a 600 ^{o}C e o fluido frio entra s 100 ^{o}C e sai a 500 ^{o}C, qual o MLDT para :

a) correntes paralelas;

b) correntes opostas.

a) correntes paralelas :

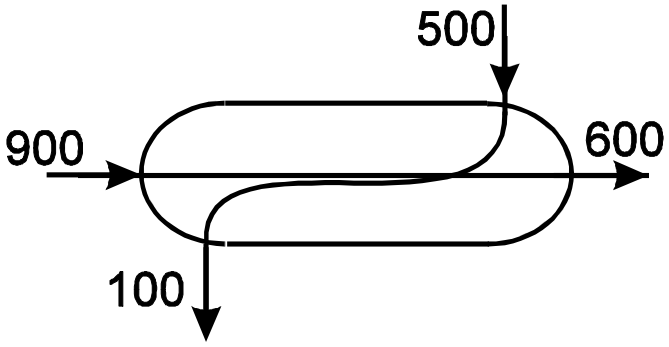


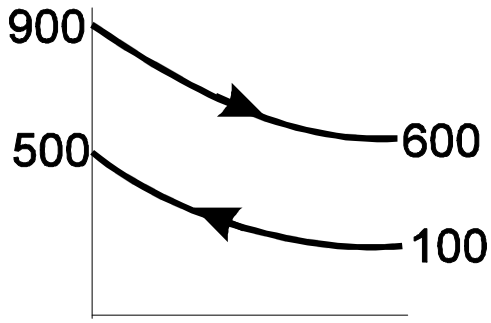


$$\left.\begin{array}{l}\Delta T_{\max} = 900 - 100 = 800\ ^oC \\ \Delta T_{\min} = 600 - 500 = 100\ ^oC\end{array}\right\} \Rightarrow MLDT = \frac{\left(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{800 - 100}{\ln\left(\frac{800}{100}\right)}$$

$$\boxed{MLDT = 336{,}6\ ^oC}$$

b) correntes opostas :



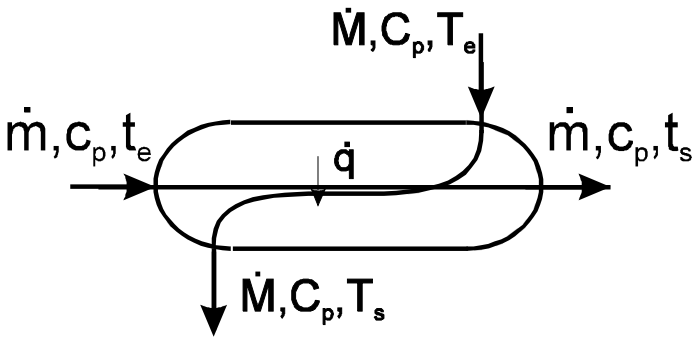


$$\left.\begin{array}{l}\Delta T_{\max} = 600 - 100 = 500\ ^oC \\ \Delta T_{\min} = 900 - 500 = 400\ ^oC\end{array}\right\} \Rightarrow MLDT = \frac{\left(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{500 - 400}{\ln\left(\frac{500}{400}\right)}$$

$$\boxed{MLTD = 448{,}2\ ^oC}$$

7.3. BALANÇO TÉRMICO EM TROCADORES DE CALOR

Fazendo um balanço de energia em um trocador de calor, considerado como um sistema adiabático, temos, conforme esquema mostrado na figura 7.8, que :



[figura 7.8]

Calor cedido pelo fluido quente = Calor recebido pelo fluido frio

$$-\dot{q}_{ced} = \dot{q}_{rec}$$

$$-\left[\dot{m}.c_p.(t_s - t_e)\right] = \dot{M}.C_p.(T_s - T_e)$$

$$\boxed{\dot{q} = \dot{m}.c_p.(t_e - t_s) = \dot{M}.C_p.(T_s - T_e)} \qquad \text{(eq. 7.2)}$$

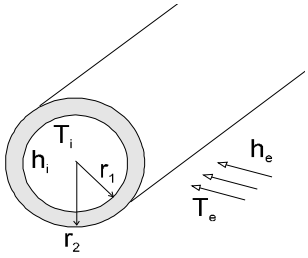
Quando um dos fluidos é submetido a uma mudança de fase no trocador, a sua temperatura não varia durante a transformação. Portanto, o calor trocado será :

$$\boxed{\dot{q} = \dot{m}.\Delta H_{transformação}} \qquad \text{(eq. 7.3)}$$

onde, $H_{transformação}$: calor latente da transformação

7.4. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Consideremos a transferência de calor entre os fluidos do casco e dos tubos nos feixes de tubos de um trocador multitubular, como mostra a figura 7.9. O calor trocado entre os fluidos através das superfícies dos tubos pode ser obtido considerando as resistências térmicas :



[figura 7.9]

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{(\Delta T)_{total}}{\frac{1}{h_i.A_i} + R_{cond} + \frac{1}{h_e.A_e}}$$, onde : (eq. 7.4)

$(\Delta T)_{total}$ = diferença de temperatura entre os fluidos

h_i, h_e = coeficientes de película dos fluidos interno e extern

A_i, A_e = áreas superficiais interna e externa dos tubos

R_{cond} = resistência térmica a condução nos tubos

Considerando que a resistência térmica a convecção na parede dos tubos de um trocador é desprezível (tubos de parede fina e de metal), a equação 7.4 pode ser rescrita da seguinte forma :

$$\dot{q} = \frac{A_e.(\Delta T)_{total}}{\frac{A_e}{h_i.A_i} + \frac{1}{h_e}}$$ (eq. 7.5)

Como o objetivo do equipamento é facilitar a troca de calor, os tubos metálicos usados são de parede fina (r_i @ r_e). Portanto, as áreas da superfícies interna e externa dos tubos são aproximadamente iguais, ou seja, A_i @ A_e. Assim, temos que :

$$\dot{q} = \frac{A_e.(\Delta T)_{total}}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}}$$ (eq. 7.6)

O coeficiente global de transferência de calor em um trocador (U_C) é definido assim :

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}}$$ (eq. 7.7)

A equação 7.7 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$ (eq. 7.8)

Levando a equação 7.7 na equação 7.6 a expressão para a transferência de calor em um trocador fica assim :

$$\dot{q} = U_C.A_e.(\Delta T)_{total}$$ (eq. 7.9)

Como visto anteriormente, o ΔT em um trocador de calor é representado pela média logarítmica das diferenças de temperatura (MLDT). Portanto, a equação 7.6 pode ser rescrita da seguinte maneira :

$$\dot{q} = U_C . A_e . (\text{MLDT})$$ (eq. 7.10)

7.5. FATOR DE FULIGEM (INCRUSTAÇÃO)

Com o tempo, vão se formando incrustações nas superfícies de troca de calor por dentro e por fora dos tubos. Estas incrustações (sujeira ou corrosão) vão significar uma resistência térmica adicional à troca de calor. Como o fluxo é dado por

$$\dot{q} = \frac{potencial\,térmico}{soma\ das\,resistências}$$

é evidente que esta resistência térmica adicional deve aparecer no denominador da equação 7.4. Esta resistência térmica adicional (simbolizada por R_d) é denominada fator fuligem. Desenvolvendo raciocínio similar, obtemos :

$$\dot{q} = \frac{A_e . (\Delta T)_{total}}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_d}$$ (eq. 7.11)

$$\text{onde, } R_d = R_{di} + R_{de} \text{ e } \quad R_d = \text{fator fuligem} \begin{cases} R_{di} = \text{fator fuligem interno} \\ R_{de} = \text{fator fuligem externo} \end{cases}$$

Não se pode prever a natureza das incrustações e nem a sua velocidade de formação. Portanto, o fator fuligem só pode ser obtido por meio de testes em condições reais ou por experiência. No sistema métrico, a unidade de fator fuligem, que pode ser obtida a partir da equação 7.10, é dada em ($h.m^2.^oC/Kcal$). Entretanto é comum a não utilização de unidades ao se referir ao fator fuligem. A tabela 7.1 ilustra, no sistema métrico, fatores fuligem associados com alguns fluidos utilizados industrialmente.

Tabela 7.1. Fatores fuligem normais de alguns fluidos industriais

Tipo de Fluido	Fator Fuligem ($h.m^2.^oC/Kcal$)
Água do mar	0,0001
Vapor d'água	0,0001
Líquido refrigerante	0,0002
Ar industrial	0,0004
Óleo de têmpera	0,0008
Óleo combustível	0,001

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

O coeficiente global de transferência de transferência de calor, levando em conta o acumulo de fuligem, ou seja "sujo", é obtido por analogia :

$$U_D = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_d} = \frac{1}{\frac{1}{U_C} + R_d} \qquad \text{(eq. 7.12)}$$

A equação 7.12 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_d = \frac{1}{U_C} + R_{di} + R_{de} \qquad \text{(eq. 7.13)}$$

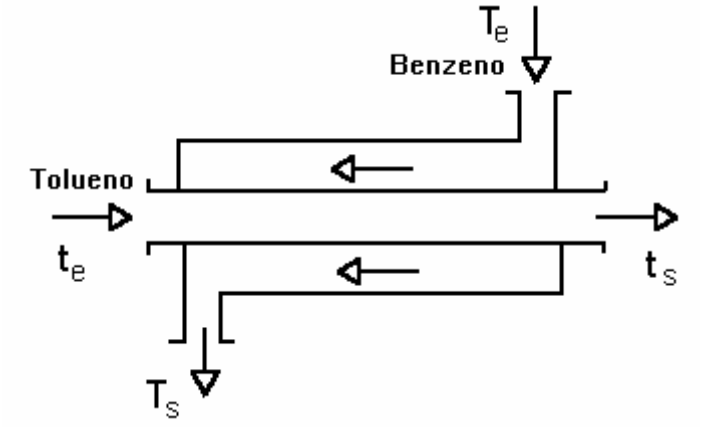
Portanto, a transferência de calor em um trocador, considerando o coeficiente global "sujo" (U_D) é dada pela seguinte expressão :

$$\boxed{\dot{q} = U_D . A_e . (\text{MLTD})} \qquad \text{(eq. 7.14)}$$

Exercício 7.2. É desejável aquecer 9820 lb/h de benzeno (c_p = 0,425 Btu/lb.^{o}F) de 80 a 120 ^{o}F utilizando tolueno (c_p = 0,44 Btu/lb.^{o}F), o qual é resfriado de 160 para 100 ^{o}F. Um fator de fuligem de 0,001 deve ser considerado para cada fluxo e o coeficiente global de transferência de calor "limpo" é 149 Btu/h.ft^2.^{o}F. Dispõe-se de trocadores bitubulares de 20 ft de comprimento equipados com tubos área específica de 0,435 ft^2/ft.

a) Qual a vazão de tolueno necessária?

b) Quantos trocadores são necessários?



Fluido Quente: Tolueno

$c_{p_t} = 0,44\ Btu/lb.^oF \quad R_{d_i} = 0,001$

$t_e = 160\ ^oF \quad t_S = 100\ ^oF$

Fluido Frio: Benzeno

$c_{p_t} = 0,425\ Btu/lb.^oF \quad R_{d_i} = 0,001$

$T_e = 80\ ^oF \quad T_S = 120\ ^oF$

$U = 149\ Btu/h.\ ft^2.^oF \quad A_{esp} = 0,435\ ft^2/ft$

a) A vazão de tolueno pode ser obtida realizando um balanço térmico :

Calor cedido = Calor recebido

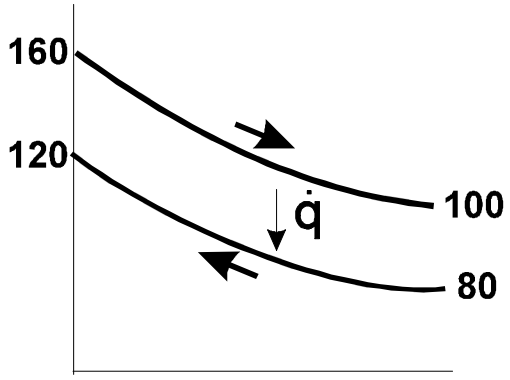
$$\dot{m}_t.c_{p_t}.(t_e - t_S) = \dot{m}_b.c_{p_b}.(T_S - T_e)$$

$$\dot{m}_t \times 0,44 \times (160 - 100) = 167000$$

$$\dot{m}_t \times 0,44 \times (160 - 100) = 9820 \times 0,425 \times (120 - 80)$$

$$\boxed{\dot{m}_t = 6330\ lb/h}$$

b) Para obter o número de trocadores é necessário calcular a área de troca de calor necessária. O MLDT do trocador é obtido assim :



$$\Delta T_{max} = 160 - 120 = 40\ ^oC$$

$$\Delta T_{min} = 100 - 80 = 20\ ^oC$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)} = \frac{40 - 20}{\ln\left(\frac{40}{20}\right)}$$

$$MLDT = 28,8\ ^oC$$

Cálculo do coeficiente global considerando o fator fuligem (sujo) :

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_{d_i} + R_{d_e} = \frac{1}{149} + 0,001 + 0,001 \quad \Rightarrow \quad U_D = 115\ Btu/h.\ ft^2.^oF$$

Cálculo da área de troca de calor :

$$\dot{q} = U_D.A_e.(MLTD) \ \Rightarrow \ A_e = \frac{\dot{q}}{U_D.(MLDT)}$$

O calor trocado é igual ao calor recebido pelo benzeno, portanto :

$$A_e = \frac{167000}{115 \times 28,8} = 50,5 m^2$$

São necessários 50,5 m^2 de área de troca de calor. Como os tubos do trocador dispõem de uma área por unidade de comprimento conhecida, é possível calcular o comprimento de tubo necessário :

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

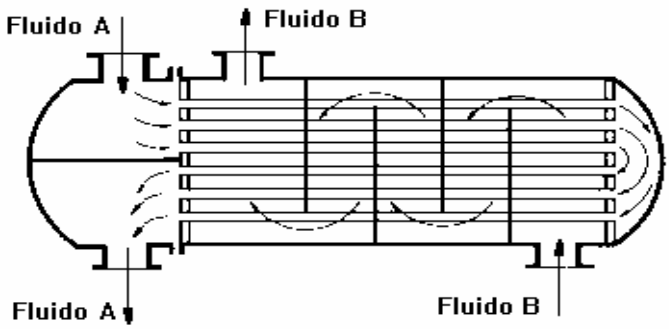
$$L = \frac{A_e}{A_{esp}} = \frac{50{,}5\ ft^2}{0{,}435\ ft^2/ft} = 116\ ft$$

Como cada trocador tem tubos de 20 ft de comprimento, o número de trocadores é :

$$n = \frac{116}{20} = 5{,}8 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{n = 6 \text{ trocadores}}$$

7.6. FLUXO DE CALOR PARA TROCADORES COM MAIS DE UM PASSE

Em trocadores tipo TC-1.1 é fácil identificar a diferença de temperatura entre fluidos nos terminais. No entanto, não é possível determinar estes valores em trocadores com mais de um passe nos tubos e/ou casco. A figura 7.10 mostra um trocador do tipo TC-1.2



[figura 7.10]

Neste caso as temperaturas das extremidades nos passes intermediários são desconhecidas. Em casos assim, o MLDT deve ser calculada como se fosse para um TC 1-1, trabalhando em correntes opostas, e corrigida por um fator de correção (F_T).

$$MLDT^C = MLDT.F_T \qquad \text{(eq. 7.15)}$$

Assim, a equação do fluxo de calor em um trocador "sujo", torna-se :

$$\dot{q} = U_D . A_e . MLDT . F_T \qquad \text{(eq. 7.16)}$$

Os valores do fator F_T são obtidos em ábacos em função das razões admensionais S e R. Para cada configuração de trocador existe um ábaco do tipo mostrado na figura 7.11.

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \qquad \text{e} \qquad R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \qquad \text{(eq. 7.17)}$$

onde, t_1 = temperatura de entrada do fluido dos tubos

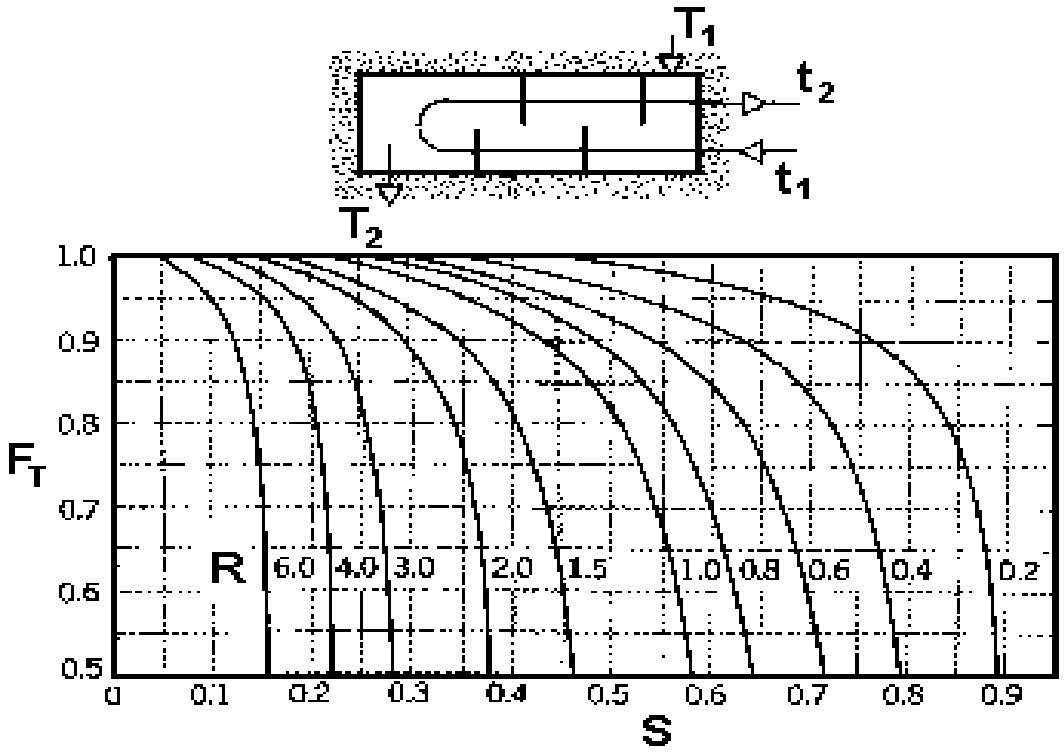
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

t_2 = temperatura de saída do fluido dos tubos

T_1 = temperatura de entrada do fluido do casco

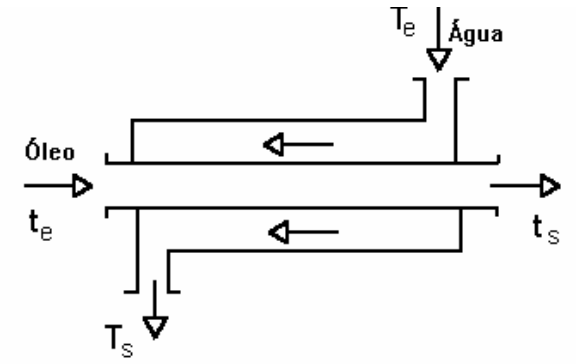
T_2 = temperatura de saída do fluido do casco

Para cada valor calculados de S (em abcissas) e cada curva R (interpolada ou não), na figura 7.11, obtém-se um valor para F_T (em ordenadas). O valor máximo de F_T é igual a 1, ou seja, a diferença média de temperatura corrigida ($MLDT^C$) pode ser no máximo igual ao MLDT calculado para um TC-1.1. Isto se deve a menor eficiência da troca de calor em correntes paralelas, pois quando se tem mais de um passe ocorrem simultaneamente os dois regimes de escoamento. Deve-se portanto conferir (no projeto) se esta queda de rendimento na troca de calor é compensada pelo aumento dos valores do coeficiente de película nos trocadores multipasse.



[figura 7.11]

Exercício 7.3. Em um trocador de calor duplo tubo 0,15 Kg/s de água (c_p=4,181 KJ/Kg.K) é aquecida de 40 ^oC para 80 ^oC. O fluido quente é óleo e o coeficiente global de transferência de calor para o trocador é 250 W/m^2.K . Determine a área de troca de calor, se o óleo entra a 105 ^oC e sai a 70 ^oC.



Fluido Quente : Óleo

$t_e = 105^oC \qquad t_s = 70^oC$

Fluido Frio : Água

$T_e = 40^oC \qquad T_s = 80^oC$

$m_{H_2O} = 0{,}15\ Kg/s$

$c_p = 4{,}181\ KJ/Kg.K$

$U = 250\ W/m^2.K$

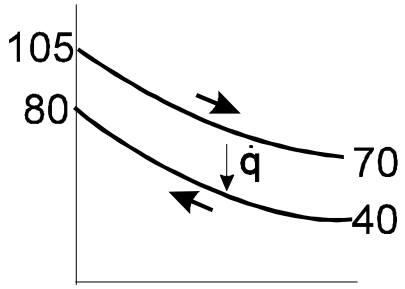
Balanço Térmico :

O calor recebido pela água é :

$$\dot{q} = m_{H_2O}.c_p.(T_s - T_e) = 0{,}15(Kg/s) \times 4{,}181(KJ/Kg.K) \times [(80-40)K]$$

$$\dot{q} = 25{,}1KJ/s = 25{,}1KW = 25100W$$

Cálculo do MLDT :



$\Delta T_{\min} = 105 - 80 = 25\ K$

$\Delta T_{\max} = 70 - 40 = 30\ K$

$$MLDT = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{30-25}{\ln\left(\frac{30}{25}\right)} = 27{,}42K$$

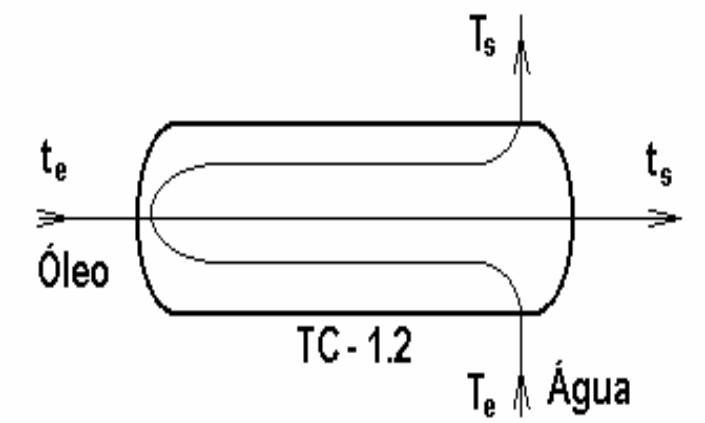
Cálculo da Área de Troca de Calor :

$$\dot{q} = U_c.A_e.(MLDT) \Rightarrow A_e = \frac{\dot{q}}{U_c.(LMTD)} = \frac{25100W}{250\left(\frac{W}{m^2.K}\right) \times 27{,}42K}$$

$$\boxed{A_e = 3{,}66\ m^2}$$

Exercício 7.4. Em um trocador casco-tubos (TC- 1.2), 3000 lb/h de água (c_p=1 Btu/lb.^{o}F) é aquecida de 55 ^{o}F para 95^{o}F, em dois passes pelo casco, por 4415 lb/h de óleo (c_p=0,453 Btu/lb.^{o}F) que deixa o trocador a 140^{o}F, após um passe pelos tubos. Ao óleo está associado um coef. de película de 287,7 Btu/h.ft^2.^{o}F e um fator fuligem de 0,005 e à

água está associado um coef. de película de 75 Btu/h.ft^2.^{o}F e um fator fuligem de 0,002. Considerando que para o trocador o fator de correção é F_T=0,95, determine o número de tubos de 0,5" de diâmetro externo e 6 ft de comprimento necessários para o trocador.



Fluido Frio (água) : $h_e = 75\ Btu/h.\ ft^2.^oF$

$T_e = 55\ ^oF \qquad T_s = 95^oF \qquad R_{de} = 0,002$

$\dot{m}_a = 3000\ lb/h \qquad c_{p_a} = 1\ Btu/lb.^oF$

Fluido Quente (óleo) : $h_i = 287,7\ Btu/h.\ ft^2.^oF$

$t_e = ? \qquad t_s = 140^oF \qquad R_{di} = 0,005$

$\dot{m}_o = 4415\ lb/h \qquad c_{p_o} = 0,453\ Btu/lb.^oF$

$TC-1.2 \ \rightarrow \ F_T = 0,95$

Balanço Térmico :

O calor recebido pela água é :

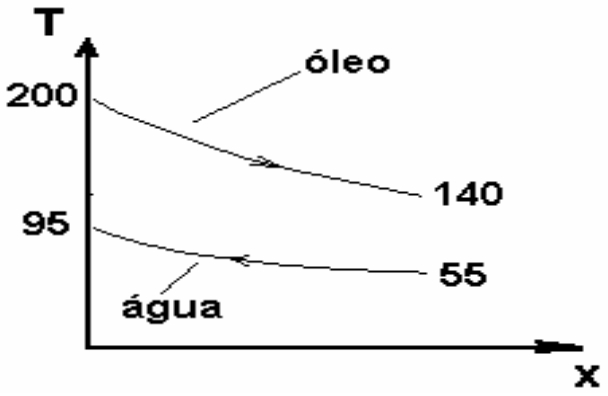
$$\dot{q} = \dot{m}.c_{p_a}.(T_s - T_e) = (3000 lb/h) \times (1 Btu/lb.^oF) \times \left[(95-55)^oF\right] = 120000 Btu/h$$

Este calor é fornecido pelo óleo :

$$\dot{q} = \dot{m}.c_{p_o}.(t_e - t_s) \Rightarrow \ 120000 = (4415 lb/h) \times (0,453 Btu/lb.^oF) \times \left[(t_e - 140)^oF\right]$$

$$\text{de onde obtemos: } t_e = 200^oF$$

Cálculo do MLDT :



$$\Delta T_{\max} = 200^oF - 95^oF = 105^oF$$

$$\Delta T_{\min} = 140^oF - 55^oF = 85^oF$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{105-85}{\ln\left(\frac{105}{85}\right)} = 94,65^oF$$

Cálculo do Coeficiente Global :

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{di} + R_{de} = \frac{1}{287,7} + \frac{1}{75} + 0,005 + 0,002 = 0,02381 \quad \Rightarrow \quad U_d = 42\ Btu/h.\ ft^2.^oF$$

Cálculo da Área de Troca de Calor e Número de Tubos Necessários :

$$\dot{q} = U_d.A_e.(LMTD).F_T \quad \Rightarrow \quad A_e = \frac{\dot{q}}{U_d.(LMTD).F_T} = \frac{120000}{42 \times 94,65 \times 0,95} = 31,77 m^2$$

tubos disponíveis $\rightarrow \quad r_e = \frac{0,5''}{2} = \frac{0,25}{12}\ ft = 0,02083\ ft$ e $L = 6\ ft$

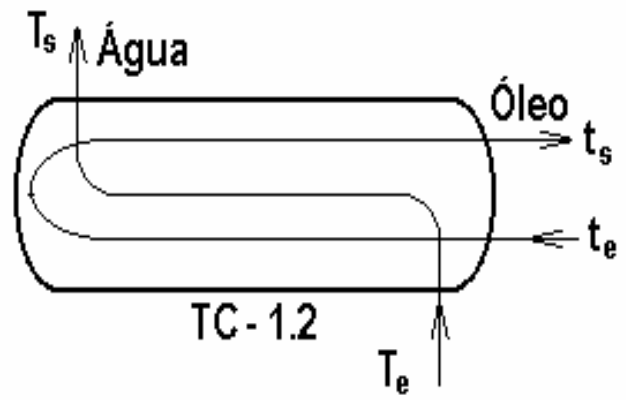
Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

$$n = \frac{\text{área necessária}}{\text{área por tubo}} = \frac{A_e}{2.\pi r_e.L} = \frac{31,77}{2\times\pi\times 0,02083\times 6} = 40,51$$

$\boxed{n = 41 \text{ tubos}}$

Exercício 7.5. Em um trocador de calor multitubular (TC-1.2 com F_T=0,95), água (c_p=4,188 KJ/Kg.K) com coef. de película 73,8 W/m^2.K passa pelo casco em passe único, enquanto que óleo (c_p= 1,897 KJ/Kg.K) com coef. de película 114 W/m^2.K dá dois passes pelos tubos. A água flui a 23 Kg/min e é aquecida de 13 ^{o}C para 35^{o}C por óleo que entra a 94^{o}C e deixa o trocador a 60^{o}C. Considerando fator fuligem de 0,001 para a água e de 0,003 para o óleo, pede-se :

a) A vazão mássica de óleo
c) A área de troca de calor necessária para o trocador
d) O número de tubos de 0,5" de diâmetro externo e 6 m de comprimento necessários



Fluido Frio(água) : $h_e = 73,8\, W/m^2.K$

$T_e = 13\ ^oC \qquad T_s = 35^oC \qquad R_{de} = 0,001$

$\dot{m}_a = 23\, Kg/min \qquad c_{p_a} = 4,188\, KJ/Kg.K$

Fluido Quente(óleo) : $h_i = 114 W/m^2.K$

$t_e = 94^oC \quad t_s = 60^oC \quad R_{di} = 0,003$

$\dot{m}_o = ? \qquad c_{p_o} = 1,897\ KJ/Kg.K$

$TC-1.2 \ \rightarrow \ F_T = 0,95$

a) Balanço Térmico :

O calor recebido pela água é :

$$\dot{q} = \dot{m}.c_{p_a}.(T_s - T_e) = [23(Kg/min)\times 1/60(min/s)]\times(4,188 KJ/Kg.K)\times[(35-13)K] = 35,319 KW = 35319 W$$

Do calor fornecido pelo óleo, obtemos :

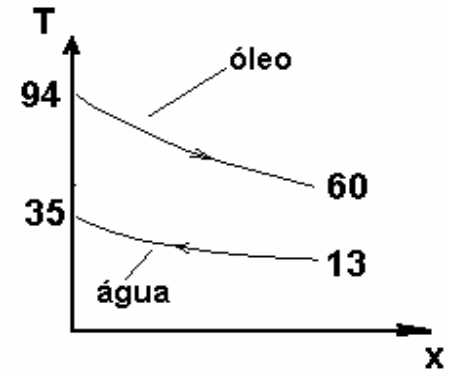
$$\dot{q} = \dot{m}_o.c_{p_o}.(t_e - t_s) \Rightarrow \ m_o = \frac{\dot{q}}{c_{p_o}.(t_e - t_s)} = \frac{35,319 KJ/s}{1,897\left(\frac{KJ}{Kg.K}\right)\times[(94-60)K]} = 0,5476 Kg/s$$

$\boxed{\dot{q} = 32,856\ Kg/min}$

b) Cálculo do MLDT (calculado como se fosse um TC-1.1 em correntes opostas) :

$$\Delta T_{\max} = 90 - 35 = 59 K$$
$$\Delta T_{\min} = 60 - 13 = 47 K$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)} = \frac{59 - 47}{\ln\left(\frac{59}{47}\right)} = 52{,}77K$$



Cálculo do Coeficiente Global :

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{di} + R_{de} = \frac{1}{114} + \frac{1}{73{,}8} + 0{,}003 + 0{,}001 \quad \Rightarrow \quad U_d = 38\,W/m^2.K$$

Cálculo da Área de Troca de Calor e Número de Tubos Necessários :

$$\dot{q} = U_d.A_e.(LMTD).F_T \quad \Rightarrow \quad A_e = \frac{\dot{q}}{U_d.(LMTD).F_T} = \frac{35319}{38 \times 52{,}77 \times 0{,}95}$$

$\boxed{A_e = 18{,}54\,m^2}$

c) Cálculo do número de tubos :

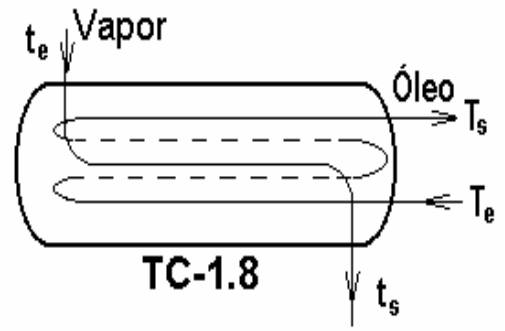
tubos disponíveis $\rightarrow$ $r_e = \frac{0{,}5''}{2} = 0{,}25 \times 0{,}0254\ m = 0{,}00635\,m$ e $L = 6\,m$

$$n = \frac{\text{área necessária}}{\text{área por tubo}} = \frac{A_e}{2.\pi r_e.L} = \frac{18{,}54}{2 \times \pi \times 0{,}00635 \times 6} = 77{,}44$$

$\boxed{n = 78 \text{ tubos}}$

Exercício 7.6. O aquecimento de um óleo leve (c_p=0,8 Kcal/Kg.^{o}C) de 20^{o}C até 120^{o}C está sendo feito usando um trocador multitubular tipo **TC-1.8** (F_T=0,8) com um total de 80 tubos (Æ$_i$=1,87" e Æ$_e$=2") de 3m de comprimento. Vapor d'água a 133 ^{o}C (D H_V=516 Kcal/Kg) e vazão de 2650 Kg/h está sendo usado para aquecimento, condensando no interior do casco. Considerando coeficientes de película de 2840 Kcal/h.m^2.^{o}C para o óleo e de 5435 Kcal/h.m^2.^{o}C para o vapor e que a densidade do óleo é 0,75 Kg/dm^3, pede-se :

a) O fator fuligem do trocador;
b) A velocidade do óleo nos tubos do trocador.



a) No trocador os tubos dão 8 passes. Portanto, em cada passe existe um feixe de 10 tubos :

Fluido Quente: Vapor em condensação

$t_e = 133^oC \quad t_s = 133^oC \quad \dot{m}_{vapor} = 2650\,Kg/h$

$\Delta H_v = 516\,Kcal/Kg \quad h_{vapor} = 5435\,Kcal/h.m^2.^oC$

Fluido Frio : Óleo leve

$T_e = 20^oC \quad T_s = 120^oC$

$c_{p_{oleo}} = 0{,}8\,Kcal/Kg.^oC \quad h_{óleo} = 2840\,Kcal/h.m^2.^oC$

$\rho_{óleo} = 0{,}75\,Kg/dm^3 = 0{,}75 \times 10^3\,Kg/m^3$

$n = 80$ tubos $\qquad n' = \frac{80}{8} = 10$ tubos por passe

$r_i = 1{,}87''/2 = 0{,}935'' = 0{,}0237\ m$

$r_e = 2''/2 = 1'' = 0{,}0254\ m$

$L = 3m$

Balanço Térmico :

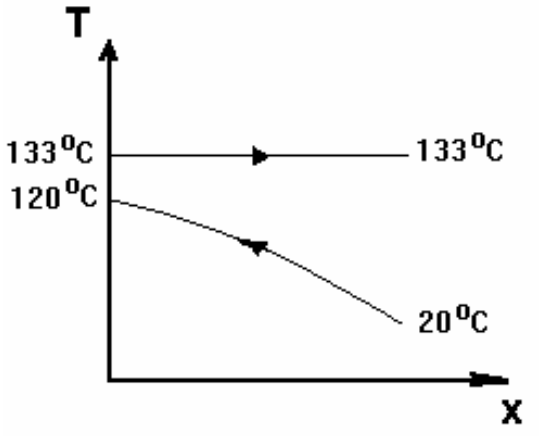
$\dot{q}_C = \dot{q}_r$

$\dot{m}_{vapor}.\Delta H_V = \dot{m}_{óleo}.c_{p_{óleo}}.(T_S - T_e)$

$1367400 = \dot{m}_{óleo} \times 0{,}8 \times (120 - 20)$

$\dot{m}_{óleo} = 17092{,}5\ Kg/h$

Cálculo do MLDT :



$\Delta T_{\max} = 133 - 20 = 113\ ^oC$

$\Delta T_{\min} = 133 - 120 = 13\ ^oC$

$MLDT = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{113 - 13}{\ln\left(\frac{113}{13}\right)} = 46{,}2\ ^oC$

Cálculo do U_D :

$A_e = (2.\pi.r_e.L).n = 2 \times \pi \times 0{,}0254 \times 3 \times 80 = 38{,}3m^2$

$\dot{q} = U_D.A_e.LMTD.F_T \Rightarrow U_D = \frac{\dot{q}}{A_e.LMTD.F_T} = \frac{1367400}{38{,}3 \times 46{,}2 \times 0{,}8} = 966 Kcal/h.m^2.^oC$

$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_d \quad \Rightarrow \quad R_d = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_e} = \frac{1}{966} - \frac{1}{2840} - \frac{1}{5435}$

$\boxed{R_d = 0{,}0005}$

b) Cálculo da velocidade do óleo :

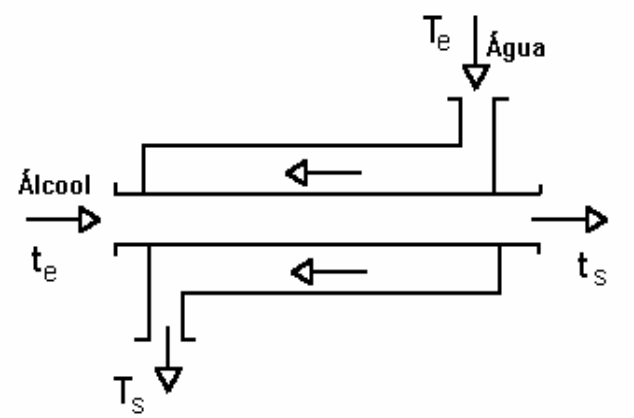
Área transversal dos tubos por onde passa o óleo :

$A_t = (\pi.r_i^2)n' = [\pi \times (0{,}0237)^2] \times 10 = 0{,}0176m^2$

$\dot{m}_{óleo} = \rho_{óleo}.v_{óleo}.A \Rightarrow v_{óleo} = \frac{\dot{m}_{óleo}}{\rho_{óleo}.A} = \frac{17092{,}5(Kg/h)}{0{,}75 \times 10^3 (Kg/m^3) \times 0{,}0176} = 1294{,}9 m/h$

$\boxed{v_{óleo} = 1294{,}9\ m/h = 21{,}6\ m/min = 0{,}36 m/s}$

Exercício 7.7. Um trocador de calor deve ser construído para resfriar 25000 Kg/h de álcool (c_p = 0,91 Kcal/Kg.^oC) de 65 ^oC para 40 ^oC, utilizando 30000 Kg/h de água (c_p = 1 Kcal/Kg.^oC) que está disponível a 15 ^oC. Admitindo coeficiente global (sujo) de transferência de calor de 490 Kcal/h.m^2.^oC, determinar :
a) O comprimento do trocador tipo duplo tubo necessário, considerando que o diâmetro externo do tubo interno é 100 mm;
b) O número de tubos ($\varnothing_e$ = 25 mm) necessários para um trocador multitubular tipo **TC-1.2** com F_T = 0,9 e 7 m de comprimento.



Fluido Quente : Álcool $\left(c_p = 0{,}91 Kcal/Kg.^oC\right)$

$t_e = 65^oC \quad t_s = 40^oC \;\; \dot{m}_{alcool} = 25000 Kg/h$

Fluido Frio : Água $\left(c_p = 1{,}0 Kcal/Kg.^oC\right)$

$T_e = 15^oC \quad T_s = ? \;\; m_{água} = 30000 Kg/h$

$U_D = 490 Kcal/h.m^2.^oC$

Duplo tubo : $\varnothing_e = 100mm = 0{,}1m$

TC -1.2 : $\varnothing_e = 25mm = 0{,}025m$

a) A área de troca de calor é a área externa do tubo interno do trocador duplo tubo

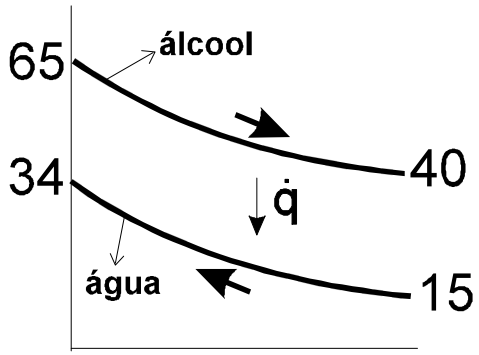
Cálculo do calor trocado :

$$\dot{q} = \dot{m}_{alcool}.c_p.\left(T_e - T_s\right) = 25000 \times 0{,}91 \times \left(65 - 40\right) = 568750 Kcal/h$$

Cálculo da temperatura de saída da água :

$$\dot{q} = \dot{m}_{agua}.c_p.\left(t_e - t_s\right) \;\Rightarrow\; 568750 = 30000 \times 1{,}0 \times \left(t_s - 15\right) \;\Rightarrow\; t_s = 34\,^oC$$

Cálculo do LMTD :



$$\Delta T_{\max} = 65 - 34 = 31\,^oC$$

$$\Delta T_{\min} = 40 - 15 = 25\,^oC$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{31 - 25}{\ln\left(\frac{31}{25}\right)} = 27{,}9\,^oC$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Cálculo da área de troca de calor :

$$\dot{q} = U_D . A_e . LMTD \quad \Rightarrow \quad A_e = \frac{\dot{q}}{U_D . LMTD} = \frac{568750}{490 \times 27,9} = 41,6 m^2$$

Esta área é a área externa do tubo interno. Portanto, seu comprimento é :

$$A_e = 2.\pi r . L \quad \Rightarrow \quad L = \frac{A_e}{2.\pi r} = \frac{A_e}{2.\pi \varnothing_2} = \frac{41,6}{2 \times \pi \times 0,1/2}$$

$$\boxed{L = 132,4\, m}$$

b) No caso de se utilizar um TC-1.2 o LMTD, como calculado anteriormente deve ser corrigido através do fator F_T :

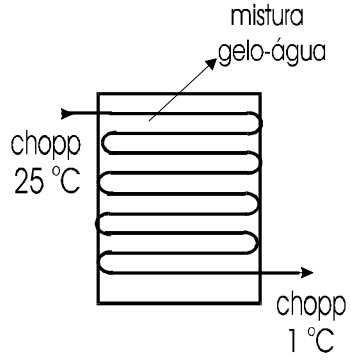
$$A_e = \frac{\dot{q}}{U_D . LMTD . F_T} = \frac{568750}{490 \times 27,9 \times 0,9} = 46,2\, m^2$$

O número de tubos de 7 m de comprimento é :

$$A_e = (2.\pi . r . L).n \Rightarrow n = \frac{A_e}{2.\pi . r . L} = \frac{A_e}{2.\pi . \varnothing_e/2 . L} = \frac{46,2}{2 \times \pi \times 0,025/2 \times 7}$$

$$\boxed{n = 84 \text{ tubos}}$$

Exercício 7.8. Uma "máquina de chope" simplificada foi construída a partir de um trocador tipo serpentina. Este trocador consiste de uma caixa cúbica de 50 cm de lado, perfeitamente isolada externamente , onde foram dispostos 50 m de serpentina de 10 mm de diâmetro externo. A serpentina, por onde passa a chope, fica em contato com uma mistura gelo-água a 0 ^{o}C. Considerando os coef. de película interno e externo à serpentina iguais a 75 e 25 kcal/h.m^2.^{o}C, respectivamente, determinar :
a) o fluxo de calor transferido para a mistura água-gelo considerando que o chope entra a 25 ^{o}C e sai a 1 ^{o}C;
b) o número de copos de 300 ml que devem ser tirados em 1 hora para que a temperatura do chope se mantenha em 1 ^{o}C , considerando que o calor específico e a densidade do chope são iguais a 0,78 kcal/kg.^{o}C e 1 Kg/dm^3, respectivamente;
c) o tempo de duração do gelo, sabendo que, inicialmente, seu volume corresponde a 10 % do volume da caixa. A densidade e o calor latente de fusão do gelo são, respectivamente, 0,935 kg/l e 80,3 kcal/kg.



Trocador Serpentina $\rightarrow L = 50m \quad \varnothing_e = 10mm = 0,01m$

Em caixa cúbica de $0,5m$ de lado $\rightarrow V_{caixa} = (0,5)^3 = 0,125m^3$

Fluido Quente: Chopp

$t_e = 25\,^oC \quad t_s = 1\,^oC \quad h_i = 75Kcal/h.m^2.\,^oC$

$c_{p_{chopp}} = 0,78Kcal/Kg.\,^oC \quad \rho_{chopp} = 1,0Kg/dm^3 = 1,0Kg/l$

Fluido Frio: Mistura água/gelo

$T_e = T_s = 0\,^oC \quad h_e = 25Kcal/h.m^2.\,^oC$

$\rho_{gelo} = 935Kg/m^3 \quad \Delta H_{f\,gelo} = 80,3Kcal/Kg$

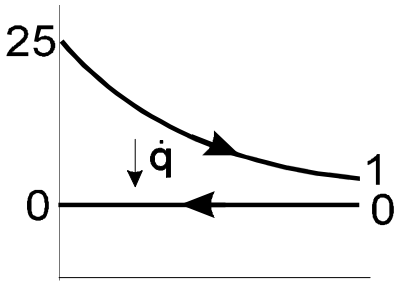
a) O fluxo de calor do chope para a mistura água/gelo, considerando a serpentina um trocador de calor de passes únicos e "limpo", é :

$$\dot{q} = U_C . A_e . MLDT$$

A determinação do coeficiente global transferência de calor "limpo" (U_C), da área de transferência de calor (A_e) e do MLDT é feita a partir dos dados fornecidos :

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{75} + \frac{1}{25} \quad \Rightarrow \quad U_C = 18,75\, Kcal/h.m^2.^oC$$

$$A_e = \left(2.\pi.r_e.L\right) = \left(2.\pi.\frac{\varnothing_e}{2}.L\right) = \left[2 \times \pi \times \left(\frac{0,01}{2}\right) \times 50\right] = 1,57 m^2$$



$$\Delta T_{máx} = 25 - 0 = 25\,^oC$$
$$\Delta T_{mín} = 1 - 0 = 1\,^oC$$
$$MLDT = \frac{\Delta T_{máx} - \Delta T_{mín}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{máx}}{\Delta T_{mín}}\right)} = \frac{25 - 1}{\ln\left(\frac{25}{1}\right)} = 7,46\,^oC$$

Portanto, o fluxo de calor trocado entre o chope e a mistura água/gelo é :

$$\dot{q} = U_C . A_e . MLDT = 18,75 \times 1,57 \times 7,46$$

$$\boxed{\dot{q} = 219,6\, Kcal/h}$$

b) O fluxo de calor trocado é cedido pelo chope. Então :

$$\dot{q} = \dot{m}.c_p.\left(t_e - t_s\right) \quad \Rightarrow \quad 219,6 = \dot{m} \times 0,78 \times \left(25 - 1\right) = 11,73 Kg/h$$

Como a densidade do chope é igual à da água, temos que : $\dot{q} = 11,73 l/h$

A passagem desta vazão de chope pelo trocador garante que a temperatura de saída do chope seja 1 ^{o}C.

O volume de cada copo é : $V_{copo} = 300\, ml/copo = 0,3 l/copo$

Conhecendo a vazão horária de chope no trocador, obtemos o número de copos horários :

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}}{V_{copo}} = \frac{11,73(l/h)}{0,3(l/copo)} = 39,1$$

$$\boxed{\dot{n} = 39\, copos}$$

c) O trocador é uma caixa cúbica e, inicialmente, 10 % do volume da mesma é gelo, então :

$$V_{gelo} = 0{,}1 \times V_{caixa} = 0{,}1 \times (0{,}5)^3 = 0{,}0125 m^3$$

Utilizando a densidade do gelo podemos obter a massa de gelo :

$$M_{gelo} = \rho_{gelo} . V_{gelo} = 935 Kg/m^3 \times 0{,}0125 m^3 = 11{,}68 Kg$$

A quantidade de calor que esta massa de gelo é capaz de absorver do chope é obtida a partir do calor latente de fusão do gelo :

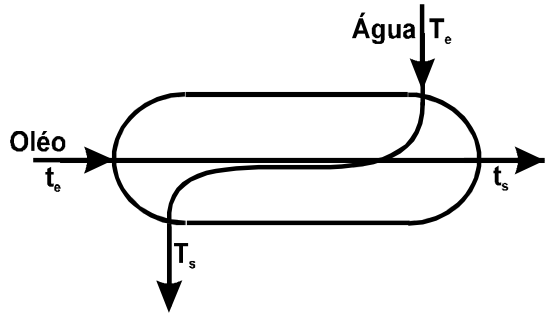
$$Q = \Delta H_{f_{gelo}} . M_{gelo} = 80{,}3 Kcal/Kg \times 11{,}68 Kg = 938{,}71 Kcal$$

Dispondo do fluxo de calor horário cedido pelo chope, obtemos o tempo de duração do gelo :

$$\dot{q} = \frac{Q}{t} \qquad \Rightarrow \qquad t = \frac{Q}{\dot{q}} = \frac{938{,}71 Kcal}{219{,}6 Kcal/h}$$

$$\boxed{t = 4{,}27 h}$$

Exercício 7.9. Em um trocador **TC-1.1**, construído com 460 tubos de 6 m de comprimento e diâmetro externo de 3/4", 5616 Kg/h de óleo (c_p = 1,25 Kcal/Kg.^{o}C) é resfriado de 80 ^{o}C para 40 ^{o}C, por meio de água (c_p = 1,0 Kcal/Kg.^{o}C) cuja temperatura varia 25 ^{o}C ao passar pelo trocador. O óleo passa pelos tubos e tem coeficiente de película de 503,6 Kcal/h.m^2.^{o}C e a água, que passa pelo casco, tem coeficiente de película de 200 Kcal/h.m^2.^{o}C. Esta previsto um fator fuligem de 0,013. Pede-se as temperaturas de entrada e saída da água.



Para o cálculo do MLDT devemos ter todas as temperaturas de entradas e saída dos fluidos. Entretanto, para a água temos apenas a sua variação de temperatura no trocador :

$$T_s - T_e = 25\ ^oC$$

Esta equação permite eliminar uma temperatura incógnita, porém o MLDT ainda ficará em função da outra temperatura incógnita.

Fluido Quente: Óleo

$c_{p_o} = 1{,}25 Kcal/Kg.^oC \quad \dot{m}_o = 5616 Kg/h$

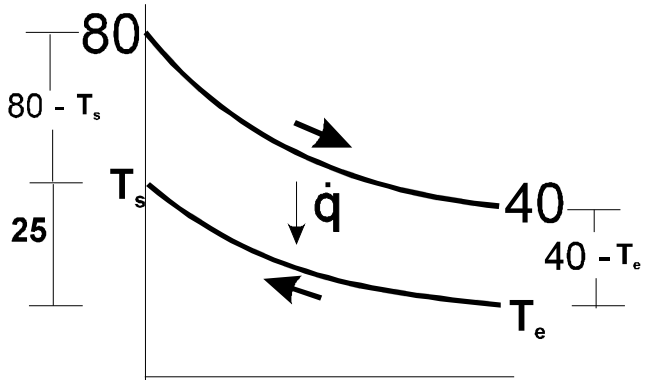
$t_e = 80\ ^oC \quad t_s = 40\ ^oC \quad h_i = 503{,}6 Kcal/h.m^2.^oC$

Fluido Frio : Água

$c_{p_a} = 1{,}0 Kcal/Kg.^oC \quad h_e = 200 Kcal/h.m^2.^oC$

ΔT da água no trocador = $25\ ^oC$

$R_d = 0{,}013 \quad n = 460$ tubos $\quad L = 6m$



$\Delta T_{máx} = 80 - T_s \qquad \Delta T_{mín} = 40 - T_e$

A variação de temp. da água é conhecida:

$T_s - T_e = 25 \;\Rightarrow\; T_s = 25 - T_e$

Colocando $\Delta T_{máx}$ em função de T_e:

$\Delta T_{máx} = 80 - T_s = 80 - (25 - T_e) = 55 - T_e$

O MLDT agora ficará em função da temperatura de entrada da água no casco (T_e) :

$$MLDT = \frac{\Delta T_{máx} - \Delta T_{mín}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{máx}}{\Delta T_{mín}}\right)} = \frac{(55 - T_e) - (40 - T_e)}{\ln\left(\frac{55 - T_e}{40 - T_e}\right)} = \frac{15}{\ln\left(\frac{55 - T_e}{40 - T_e}\right)}$$

Cálculo da área de transferência de calor :

$$r_e = \frac{3}{4 \times 2}'' = \frac{3}{8} \times 0{,}0254 = 0{,}0095m$$

$$A_e = (2.\pi.r_e.L).n = (2 \times \pi \times 0{,}0095 \times 6) \times 460 = 164{,}7m^2$$

Cálculo do calor cedido pelo óleo :

$$\dot{q} = \dot{m}_o.c_{p_o}.(t_e - t_s) = 5616 \times 1{,}25 \times (80 - 40) = 280800Kcal/h$$

Cálculo do coeficiente global "sujo" :

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_d = \frac{1}{503{,}6} + \frac{1}{200} + 0{,}013 \quad \Rightarrow \quad U_D = 50\,Kcal/h.m^2.^oC$$

Agora, levamos estes resultados na expressão do fluxo de calor em um trocador :

$$\dot{q} = U_D.A_e.MLDT \quad \Rightarrow \quad 280800 = 50 \times 164{,}7 \times \frac{15}{\ln\left(\frac{55 - T_e}{40 - T_e}\right)}$$

$$\ln\left(\frac{55 - T_e}{40 - T_e}\right) = \frac{123525}{280800} = 0{,}4399$$

Aplicado as propriedades dos logaritmos, obtemos :

$$e^{0{,}4399} = \frac{55 - T_e}{40 - T_e} \quad \Rightarrow \quad 1{,}5526 = \frac{55 - T_e}{40 - T_e} \quad \Rightarrow \quad 62{,}102 - 1{,}5526 \times T_e = 55 - T_e$$

$$\boxed{T_e = 12{,}8\,^oC}$$

Através da variação da temperatura da água obtemos a sua temperatura de saída (T_S) :

$$T_s = 25 + T_e \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{T_s = 37{,}8\ ^oC}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 7.10. Um resfriador de óleo deve operar com uma entrada de 138 ^oF e uma saída de 103 ^oF, com a água de refrigeração entrando a 88 ^oF e saindo no máximo a 98 ^oF. Qual o MLDT para esta unidade considerando :

a) trocador de calor bitubular com fluxos em correntes opostas;

b) trocador de calor bitubular com fluxos em correntes paralelas;

c) trocador casco-tubo tipo **TC-1.2**.

Exercício 7.11. Um trocador de calor multitubular, tipo **TC-1.1** deve ser construído para resfriar 800 kg/h de glicerina de calor específico 0,58 kcal/kg.^oC e densidade 0,92 kg/dm^3 de 130 ^oC para 40 ^oC. Dispõe-se de 2 m^3/h de água (c_p = 1,0 kcal/kg.^oC) a 25 ^oC. O coeficiente de película da glicerina é igual a 42 kcal/h.m^2.^oC e o da água, que circula dentro do tubos, tem valor de 30 kcal/h.m^2.^oC. O trocador de calor vai ser feito com tubos de 1" de diâmetro externo e 6 m de comprimento. É previsto um fator de incrustação de 0,025. Pede-se :
a) a temperatura de saída da água;
b) o número de tubos necessários.

Exercício 7.12. Em uma indústria 100 trocadores de calor casco-tubo (**TC-1.1**), cada um com 300 tubos de 25 mm de diâmetro interno, são utilizados para condensar um vapor a 50 ^oC, utilizando-se 1,08 x 10^8 kg/h de água de refrigeração (c_p = 1 Kcal/Kg.^oC) que entra nos trocadores a 20 ^oC. Sabendo-se que a taxa de transferência de calor nos trocadores é 1,72 x 10^9 kcal/h e que o coeficiente global de transferência de calor é 3851,4 Kcal/h.m^2.^oC, calcule :
a) a temperatura de saída da água de refrigeração;
b) o comprimento dos trocadores.

Exercício 7.13. Em um trocador casco-tubos (**TC-2.1**), 3000 Ib/h de água (c_p = 1 Btu/lb.^oF) é aquecida de 55 ^oF para 95 ^oF, em dois passes pelo casco, por 4415 lb/h de óleo (c_p = 0,453 Btu/lb.^oF) que deixa o trocador a 140 ^oF, após um passe pelos tubos. Ao óleo está associado um coeficiente de película de 287,7 Btu/h.ft^2.^oF e um fator fuligem de 0,005 e à água está associado um coeficiente de película de 75 Btu/h.ft^2.^oF e um fator fuligem de 0,002. Considerando que para o trocador o fator de correção é F_T = 0,95, determine o número de tubos de 0,5" de diâmetro externo e 6 ft de comprimento necessários para o trocador.

Exercício 7.14. Necessita-se projetar uma unidade capaz de resfriar 180000 lb/h de um óleo leve (c_p = 0,48 Btu /lb.^oF) a 200 ^oF, utilizando 130000 lb/h de água (c_p = 1,0 Btu/lb.^oF) que se aquece de 65 ^oF a 118 ^oF. São disponíveis diversos trocadores multitubulares tipo **TC-1.1**, cada um deles com 25 ft de comprimento contendo 40 tubos de 1,05" de diâmetro externo. Considerando um coeficiente global limpo de 82 Btu/h.ft.^oF e um fator de fuligem de 0,001 tanto para o óleo como para a água, calcular o número de trocadores necessários.

Exercício 7.15. Um trocador tipo **TC-1.1** é utilizado para pré-aquecimento de água. Para isto, o trocador utiliza 1650 kg/h de vapor em condensação total no casco a 250 ^oC (WH_V = 412,81 kcal/kg). A carcaça do trocador tem 0,6 m de diâmetro e 9 m de comprimento e está localizada em um grande galpão cujas paredes e o ar estão a 30 ^oC e o coeficiente de película é 5 kcal/h.m^2.^{o}C. Verificou-se que as perdas pela carcaça correspondem a 10 % do calor cedido pelo vapor. Para reduzir estas perdas para 5%, os engenheiros optaram por atuar na emissividade (e) da carcaça através de pintura.
a) Dispondo de 3 tintas (tinta **A** : e = 0,28; tinta **B**: e = 0,37 e tinta **C**: e = 0,49), qual foi a tinta escolhida?
b) Qual era a emissividade original da carcaça antes da pintura?

Exercício 7.16. Determinar a área de troca térmica requerida para um trocador construído para resfriar 25000 kg/h de álcool (cp= 0,91 kcal/kg.^oC) de 65 ^oC para 40 ^oC, usando 22700 kg/h de água (cp = 1 kcal/kg.^oC), disponível a 10 ^oC. Admitir coeficiente global (sujo) de transferência de calor (U_D) de 490 kcal/h.m^2.^{o}C, e considerar as seguintes configurações :

a) trocador tipo **TC-1.1**, fluxos em correntes paralelas;

b) trocador tipo **TC-1.1**, fluxos em correntes opostas (qual o comprimento do trocador, considerando que o mesmo tem 99 tubos de diâmetro externo 25 mm ?);

c) trocador tipo **TC-1.2** com F_T = 0,88 (qual o número de tubos, considerando um trocador de 7 m de comprimento e U_D = 600 kcal/h.m^2.^{o}C ?).

Exercício 7.17. Em uma instalação industrial, um trocador de calor casco-tubos tipo **TC-1.1** aquece 135000 kg/h de água (c_p = 1,0 Kcal/Kg.^oC) de 60 ^oC a 112 ^oC, por meio de vapor d'água condensando a 115 ^oC no exterior dos tubos. O trocador tem 500 tubos de aço ($\varnothing_e$ = 2,1 cm), de 10 m de comprimento. Admitindo que o coeficiente global de transferência de calor não se altera significativamente quando a vazão de água aumenta e que existe disponibilidade para elevação da vazão de vapor, calcular :
a) o coeficiente global de transferência de calor;

b) a temperatura da água na saída se sua vazão mássica for elevada em 50 %

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

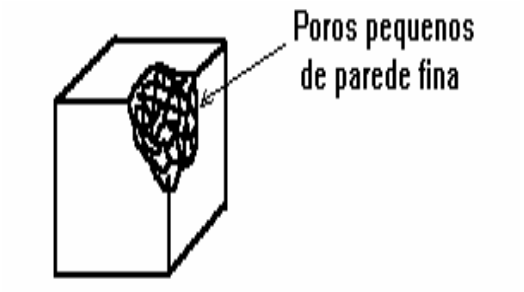
8.- ISOLAMENTO TÉRMICO

8.1. DEFINIÇÃO

O isolamento térmico consiste em proteger as superfícies aquecidas, como a parede de um forno, ou resfriadas, como a parede de um refrigerador, através da aplicacão de materiais de baixa condutividade térmica (k).

OBJETIVO ➔ Minimizar os fluxos de calor, quer por problemas técnico (segurança, evitar condensação), quer por problemas econômicos (economizar energia), ou a busca de estado de conforto.

FUNDAMENTO ➔ Normalmente aprisionam ar (k = 0,02 kcal/h.m.^{o}C, quando parado) em pequenas cavidades de um material sólido de modo a evitar sua movimentação (diminui a convecção). Por isto, materiais porosos com poros pequenos e paredes finas de materiais de baixo valor de k, ilustrados na figura 8.1, dão bons isolantes térmicos.

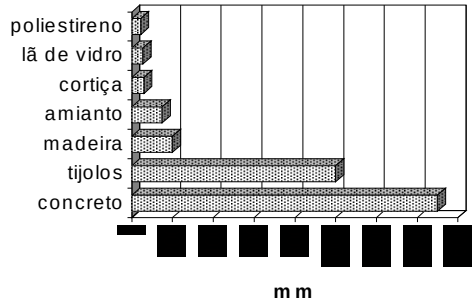


[figura 8.1]

8.2. CARACTERÍSTICAS DE UM BOM ISOLANTE

- **Baixo Valor de k**

Quanto menor o k, menor será a espessura necessária para uma mesma capacidade isolante. Apenas a título ilustrativo, a figura 8.2 mostra algumas espessuras (em mm) de alguns materiais que tem a mesma capacidade isolante.



[figura 8.2]

- **Baixo Poder Higroscópico**

A água que penetra nos poros, substitui o ar, aumentando o valor de k. Além disto, quando se tratar de isolamento de ambientes cuja temperatura seja inferior a 10 ^{o}C, existe a

possibilidade da água absorvida passar para o estado sólido com conseqüente aumento de volume, o que causará ruptura das paredes isolantes.

- **Baixa Massa Específica**

Em certas aplicações, um bom isolante deve ser leve de modo a não sobrecarregar desnecessariamente o aparelho isolado, principalmente no caso de aviões, barcos, automóveis, ou ainda no caso de forros ou outras partes de fábricas e edifícios onde o material terá de ficar suspenso.

- **Resistência Mecânica Compatível com o Uso**

De maneira geral, quanto maior a resistência mecânica do material isolante, maior será o número de casos que ele poderá resolver, além do que apresentará menor fragilidade, o que é conveniente nos processos de transportes e no tocante à facilidade de montagem.

- **Incombustibilidade, Estabilidade Química e Outros.**

Uma série de outras características serão necessárias, dependendo da aplicação a que o material isolante se destina.

8.3. MATERIAIS ISOLANTES BÁSICOS

A maioria dos isolantes usados industrialmente são feitos dos seguintes materiais : amianto, carbonato de magnésio, sílica diatomácea, vermiculita, lã de rocha, lã de vidro, cortiça, plásticos expandidos, aglomerados de fibras vegetais, silicato de cálcio.

O **amianto** é um mineral que possui uma estrutura fibrosa, do qual se obtém fibras individuais. O amianto de boa qualidade deve possuir fibras longas e finas e além disto, infusibilidade, resistência e flexibilidade.

O **carbonato de magnésio** é obtido do mineral "dolomita", e deve sua baixa condutividade ao grande número de microscópicas células de ar que contém.

A **sílica diatomácea** consiste de pequenos animais marinhos cuja carapaça se depositou no fundo dos lagos e mares.

A **vermiculita** é uma "mica" que possui a propriedade de se dilatar em um só sentido durante o aquecimento. O ar aprisionado em bolsas entre as camadas de mica torna este material um bom isolante térmico.

A **lã de rocha** ou **lã mineral,** assim como a **lã de vidro**, são obtidas fundindo minerais de sílica em um forno e vertendo a massa fundida em um jato de vapor a grande velocidade. O produto resultante, parecido com a lã, é quimicamente inerte e incombustível, e apresenta baixa condutividade térmica devido aos espaços com ar entre as fibras.

A **cortiça** é proveniente de uma casca de uma árvore e apresenta uma estrutura celular com ar encerrado entre as células.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Os **plásticos expandidos** são essencialmente poliestireno expandido e poliuretano expandido que são produzido destas matérias plásticas, as quais durante a fabricação sofrem uma expansão com formação de bolhas internas microscópicas.

8.4. FORMAS DOS ISOLANTES

Os isolantes térmicos podem ser adquiridos em diversas formas, dependendo da constituição e da finalidade à qual se destinam. Alguns exemplos comumente encontrados são :

Calhas

São aplicados sobre paredes cilíndricas e fabricados a partir de cortiça, plásticos expandidos, fibra de vidro impregnadas de resinas fenólicas, etc.

Mantas

São aplicados no isolamento de superfícies planas, curvas ou irregulares, como é o caso de fornos, tubulações de grande diâmetro, etc.

Placas

São normalmente aplicados no isolamento de superfícies planas, como é o caso de câmaras frigoríficas, estufas, fogões, etc.

Flocos

São normalmente aplicados para isolar locais de difícil acesso ou ainda na fabricação de mantas costuradas com telas metálicas e fabricados a partir de lãs de vidro e de rocha.

Cordas

São aplicados no isolamento de registros, válvulas, juntas, cabeçotes, etc, principalmente em locais sujeitos a desmontagem para manutenção periódica.

Pulverizados ou Granulados

São aplicados no isolamento de superfícies com configurações irregulares ou aindas no preenchimento de vãos de difícil acesso.

8.5. APLICAÇÃO DE ISOLANTES

- Isolação de Equipamentos ou Dependências Cuja Temperatura Deve ser Mantida Inferior à Temperatura Ambiente Local.

Exemplo:- câmaras frigoríficas, refrigeradores, trocadores de calor usando fluidos a baixa temperatura, etc .

Principal problema ⇨ migração de vapores

O fenômeno da migração de vapores em isolamento de superfícies resfriadas é resultante de uma depressão interna causada pelas baixas temperaturas e pode ser esquematizado assim :

redução da temp. interna ➔ depressão ➔ tendência a equalização ➔ migração do ar + umidade ➔ elevação do valor de k (redução da capacidade isolante) e possíveis danos físicos ao isolamento.

A aplicação de "barreiras de vapor" consiste em usar materiais impermeáveis para evitar que vapores d'água atinjam o isolamento. Um tipo de barreira de vapor, comumente utilizado para proteger o isolamento de tubulações que transportam fluidos em baixas temperaturas, consiste de folhas de alumínio (normalmente com 0,15 mm) coladas com adesivo especial no sentido longitudinal e com uma superposição de 5 cm no sentido transversal para completa vedação.

- Isolamento de Equipamentos ou Dependências Cuja Temperatura Deve Ser Mantida Superior à Temperatura Ambiente Local.

Exemplo : estufas, fornos, tubulações de vapor, trocadores de calor usando fluidos a altas temperaturas.

Principal problema ⇨ dilatações provocadas pelas altas temperaturas.

Neste caso, não existe o problema da migração de vapores, porém devem ser escolhidos materiais que passam suportar as temperaturas de trabalho.

8.6. CÁLCULO DE ESPESSURAS DE ISOLANTES

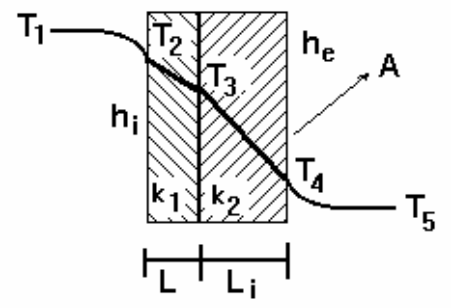
O cálculo leva em conta as limitações de temperatura e questões econômicas:

- Limitação da Temperatura

Tanto externamente (caso de um forno no qual a temperatura externa não deve ser maior do aquela que causa queimaduras nos trabalhadores) quanto interiormente (como em um recinto onde devemos ter a temperatura superior a de orvalho, de modo a evitar a condensação e gotejamento de água), o cálculo da espessura isolante poderá ser feito fixando as temperaturas envolvidas e calculando a espessura isolante necessária.

Como exemplo, o cálculo da espessura isolante $\mathbf{L_i}$ de um forno, pode ser feito considerando que a temperatura $\mathbf{T_4}$ da superfície é fixada por razões de segurança. Conhecendo-se as temperaturas dos ambientes e os coeficiente de película dos ambientes interno e externo e ainda as condutividades térmicas dos materiais das paredes, o cálculo pode ser feito como mostrado na equação 8.1.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com



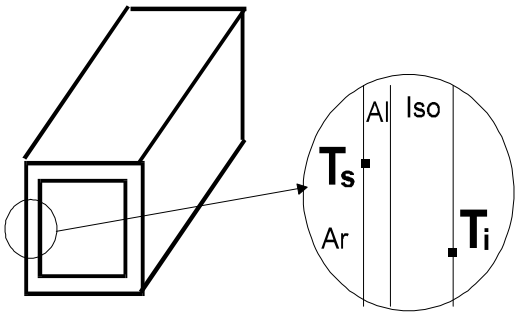
[figura 8.3]

Considerando as resistências térmicas entre T_1 e T_4 e entre T_4 e T_5, obtemos as seguintes expressões para o fluxo de calor :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_i + h_e} + \frac{L}{k.A} + \frac{L_i}{k_i.A}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{1}{h_e.A}} \qquad \text{(eq. 8.1)}$$

Exercício 8.1. Ar condicionado para um centro de processamento de dados é distribuído em um duto retangular de alumínio (k = 200 Kcal/h.m.^{o}C) de espessura 0,5 mm. A temperatura no ambiente deve ser mantida em 25 ^{o}C e o coeficiente de película é 8 Kcal/h.m^2.^{o}C. Sabendo-se que a temperatura na superfície interna do duto é 12 ^{o}C, calcular a espessura do isolante térmico (k = 0,028 kcal/h.m^{o}C) a usar, para que não ocorra condensação na

superfície externa do duto isolado, com segurança de 2 ^{o}C, considerando que a temperatura de orvalho local é 19,3 ^{o}C.



$$T_S = T_{orvalho} + 2\ ^oC = 19,3 + 2 = 21,3\ ^oC$$
$$A = 1m^2 \quad l = 0,5mm = 0,0005m$$
$$T_i = 12\ ^oC \qquad T_{ar} = 25\ ^oC$$
$$k_{iso} = 0,028\ Kcal/h.m.^oC$$
$$k_{Al} = 200\ Kcal/h.m.^oC$$
$$h = 8\ Kcal/h.m^2.^oC$$

Utilizando a equação 8.1 , obtemos a espessura do isolante :

$$\frac{T_s - T_i}{\frac{L_{Al}}{k_{Al}.A} + \frac{L_{iso}}{k_{iso}.A}} = \frac{T_{ar} - T_s}{\frac{1}{h_e.A}}$$

Substituindo os dados fornecidos, podemos obter a espessura do isolante :

$$\frac{21,3-12}{\frac{L_{iso}}{0,028\times 1}+\frac{0,0005}{200\times 1}}=\frac{25-21,2}{\frac{1}{8\times 1}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{L_{iso}=0,0088\,m=8,8\,mm}$$

- Espessura Isolante Mais Econômica

A medida que se aumenta a espessura de isolante de qualquer superfície, o regime de perda de calor da superfície diminui, porém, aumenta em contraposição o custo do isolamento.

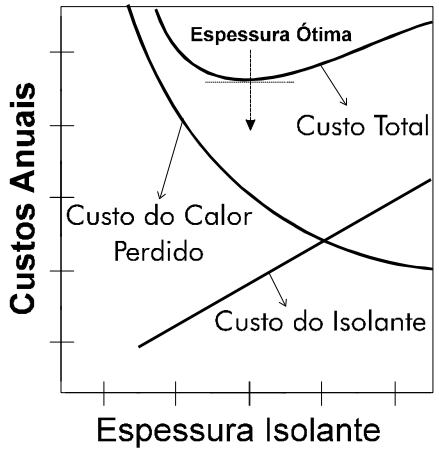
A espessura mais econômica do isolamento é aquela para a qual a soma do custo anual da perda de calor e do custo anual do isolamento seja mínimo.

O processo de cálculo consiste em determinar as quantidades de calor perdidas considerando a aplicação de várias espessuras de isolamento, obtendo-se a quantidade de calor anual, considerando o tempo de utilização do equipamento. O valor em quilocalorias deve ser convertido em cruzeiros por ano, considerando o custo da produção do calor.

A seguir, considerando o custo do isolamento nas várias espessuras calculadas, determinam-se os custos anuais do isolamento desde que se considere o tempo de amortização em anos para a instalação.

Colocando em um gráfico tendo em abcissa a espessura do isolamento e em ordenadas o custo anual, obtém-se uma curva decrescente para o custo do calor perdido, e uma curva ascendente para o custo do isolamento. Evidentemente a soma dos custos (custo do calor perdido mais custo do isolamento) resultará em uma curva que deverá passar por um mínimo, ou seja, para determinada espessura de isolante haverá um custo mínimo anual.

A espessura ótima do isolante é aquela que apresenta um custo total (custo do calor perdido + custo do isolante) mínimo, como pode ser observado na figura 8.4.

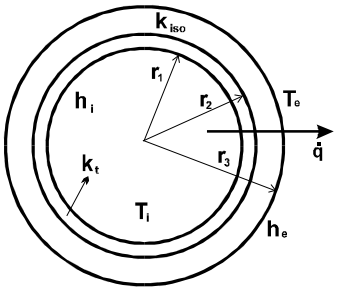


[figura 8.4]

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

8.7. ISOLAMENTO DE TUBOS - CONCEITO DE RAIO CRÍTICO

O aumento da espessura isolante de paredes cilíndricas de pequenos diâmetros nem sempre leva a uma redução da transferência de calor, podendo até mesmo a vir aumenta-la. Vejamos a expressão para o fluxo de calor através de uma parede cilíndrica, de comprimento L, composta pela parede de um tubo metálico e de uma camada isolante, como pode ser visto na figura 8.5.



[figura 8.5]

Considerando as quatro resistências térmicas entre T_i e T_e (duas a convecção e duas a condução), a expressão para o fluxo de calor é :

$$\dot{q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i.A_i} + \frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{k_t.2.\pi.L} + \frac{\ln\left(r_3/r_2\right)}{k_{iso}.2.\pi.L} + \frac{1}{h_e.A_e}} \qquad \text{(eq. 8.2)}$$

As áreas interna e externa da parede cilindrica dependem dos raios r_1 e r_2, portanto :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i.(2.\pi.r_1.L)} + \frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{k_t.2.\pi.L} + \frac{\ln\left(r_3/r_2\right)}{k_{iso}.2.\pi.L} + \frac{1}{h_e.(2.\pi.r_3.L)}} \qquad \text{(eq. 8.3)}$$

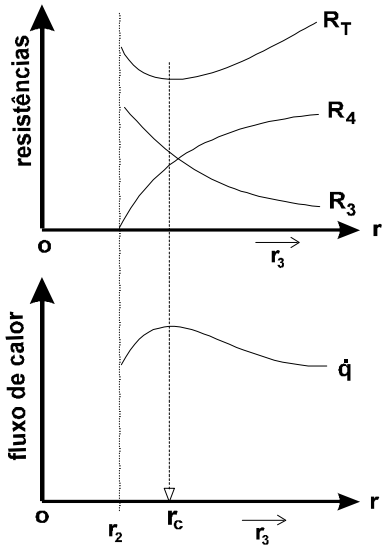
Observando a equação 8.3, podemos analisar o efeito da elevação da espessura do isolante, ou seja, elevação do raio r_3 na figura 8.5, nas resistências térmicas. A tabela 8.1 sintetiza o efeito da elevação de r_3 em cada resistência :

RESISTÊNCIA	EXPRESSÃO	EFEITO
R_1	$\frac{1}{h_i.(2.\pi.r_1.L)}$	inalterada
R_2	$\frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{k_t.2.\pi.L}$	inalterada

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

R_3	$\frac{\ln\left(r_3/r_2\right)}{k_{iso}.2.\pi.L}$	aumenta
R_4	$\frac{1}{h_e.(2.\pi.r_3.L)}$	diminui

A representação gráfica da variação de cada resistência e do fluxo de calor resultante em função do aumento da espessura isolante (aumento de r_3) é mostrada na figura 8.6 :

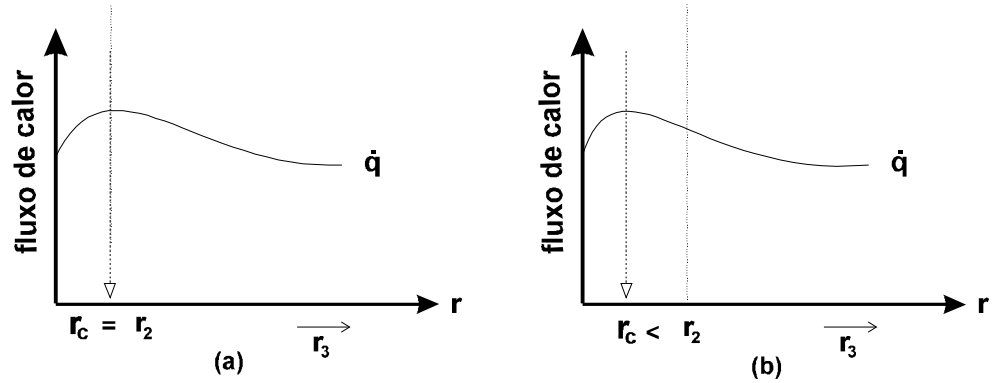


[figura 8.6]

Observamos que existe um raio crítico (r_C) que propicia um fluxo de calor maior inclusive do que sem nenhum isolamento. Este raio crítico é comumente usado para o cálculo de condutores elétricos, em que se quer isolamento elétrico e, ao mesmo tempo, uma dissipação do calor gerado.

No caso de isolamento de tubos, de uma maneira geral, é desejável manter o raio crítico o menor possível, tal que a aplicação da isolação resultará em redução da perda de calor. Isto pode ser conseguido utilizando-se uma isolação de baixa condutividade térmica, tal que o raio crítico seja pouco maior, igual ou até mesmo menor que o raio da tubulação. A figura 8.7.(a) ilustra a situação onde o raio crítico é igual ao raio do tubo e a figura 8.7.(b) a situação onde o raio crítico é menor que o raio do tubo.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com



[figura 8.7]

Consideremos que a temperatura da superfície externa de um tubo a ser isolado seja fixada em T_S, enquanto que a temperatura no ambiente externo é T_e. Neste caso, a equação 8.3 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{\frac{\ln\left(r_3 / r_2\right)}{k_{iso}.2.\pi.L} + \frac{1}{h_e.(2.\pi.r_3.L)}} \qquad \text{(eq. 8.4)}$$

A condição para que o fluxo de calor expresso pela equação 8.4 seja máximo é :

$$\frac{d\dot{q}}{dr_3} = 0 \qquad \text{(eq. 8.5)}$$

Neste caso, temos que o raio r_3 é igual ao raio crítico (r_{cr}). Através de alguma manipulação a equação 8.5 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\frac{-2.\pi.L.(T_s - T_e).\left(\frac{1}{k_{iso}.r_{cr}} - \frac{1}{h.r_{cr}^2}\right)}{\left[\frac{\ln\left(r_{cr} / r_2\right)}{k_{iso}} + \frac{1}{r_{cr}.h}\right]} = 0 \qquad \text{(eq. 8.6)}$$

Da equação 8.6 obtemos que :

$$\frac{1}{k_{iso}.r_{cr}} - \frac{1}{h.r_{cr}^2} = 0 \qquad \text{(eq. 8.7)}$$

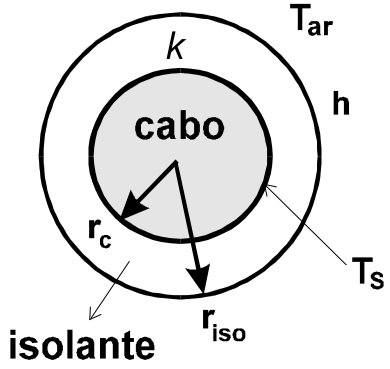
A expressão para o raio crítico fica assim :

$$\boxed{r_{cr} = \frac{k_{iso}}{h}} \qquad \text{(eq. 8.8)}$$

A equação 8.8 expressa o conceito de raio crítico de isolamento. Se o raio externo do isolante (r_3) for menor que o valor dado pela equação, então a transferência de calor será elevada com a colocação de mais isolante. Para raios externos maiores que o valor

crítico, um aumento da espessura isolante causará um decréscimo da transferência de calor. O conceito central é que para valores de coeficiente de película (h) constantes, quanto menor o valor de condutividade térmica do isolante (k_{iso}), ou seja, quanto melhor o isolante utilizado, menor o raio crítico. Deve também ser ressaltado que para valores de h e k_{iso} normalmente encontrados nas aplicações mais comuns o raio crítico é pequeno. Portanto, somente tubulações de pequeno diâmetro serão afetadas.

Exercício 8.2. Um cabo elétrico de alumínio com 15 mm de diâmetro deverá ser isolado com borracha (k = 0,134 kcal/h.m.^{o}C). O cabo estará ao ar livre (h = 7,32 Kcal/h.m^{2}.^{o}C) a 20 ^{o}C. Investigue o efeito da espessura da isolação na dissipação de calor, admitindo que a temperatura na superfície do cabo é de 65 ^{o}C.



$$\varnothing_c = 15mm \quad \Rightarrow \quad r_c = 7{,}5mm = 0{,}0075m$$
$$k = 0{,}134\ Kcal/h.m.^{o}C$$
$$h = 7{,}32\ Kcal/h.m^{2}.^{o}C$$
$$T_s = 65\ ^{o}C \qquad T_{ar} = 20\ ^{o}C$$
$$L = 1m$$

Cálculo do raio crítico :

$$r_{cr} = \frac{k}{h} = \frac{0{,}134\left(Kcal/h.m.^{o}C\right)}{7{,}32\left(Kcal/h.m^{2}.^{o}C\right)} = 0{,}0183m = 18{,}3mm$$

A dissipação de calor é dada pela seguinte expressão :

$$\dot{q} = \frac{T_s - T_{ar}}{\frac{\ln\left(r_{iso}/r_c\right)}{k_{iso}.2.\pi.L} + \frac{1}{h.\left(2.\pi.r_{iso}.L\right)}}$$

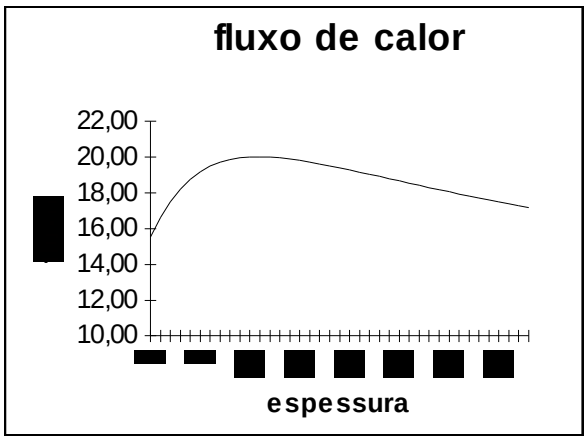
Para um comprimento unitário de cabo (L = 1 m), o fluxo de calor dissipado é função do raio do isolante :

$$\dot{q} = \frac{65 - 20}{\frac{\ln\left(r_{iso}/0{,}0075\right)}{0{,}134 \times 2 \times \pi \times 1} + \frac{1}{7{,}32 \times \left(2 \times \pi \times r_{iso} \times 1\right)}}$$

Dando valores para r_{iso} na equação acima, podemos observar o efeito da espessura isolante na dissipação de calor :

Raio Isolante	Espessura	Fluxo	Comentário
7,5 mm	0,0 mm	15,52 Kcal/h	sem isolação
12,9 mm	5,4 mm	19,31 Kcal/h	raio menor que o crítico
18,3 mm	10,8 mm	20,02 Kcal/h	raio crítico : fluxo máximo

Observamos que, quando o cabo está isolado com espessura correspondente ao raio crítico, o fluxo de calor dissipado é 22% maior do que sem nenhuma isolação. A figura abaixo mostra graficamente a variação do fluxo de calor dissipado com a espessura isolante



Notamos também na figura que, para valores de espessura correspondente a raios maiores que o crítico, o fluxo de calor dissipado tende a se reduzir novamente.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 8.3. Queremos determinar a condutividade térmica de um material à base de borracha. Para isto, construímos uma caixa em forma de cubo, de dimensões 1 m x 1 m, com placas do referido material com 10 cm de espessura. Dentro da caixa, colocamos uma resistência elétrica de dissipação 1 KW. Ligada a resistência e aguardado o equilíbrio térmico, mediram-se as temperaturas nas superfícies interna e externa do material e achamos, respectivamente, 150 e 40 ^{o}C. Qual é o valor da condutividade térmica do material :

a) em unidades do sistema métrico;

b) em unidades do sistema inglês.

DADO : 1 KW = 3413 Btu/h = 860 Kcal/h

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Exercício 8.4. Uma parede de um tanque de armazenagem de ácido deve ser construída com revestimento de chumbo 1/8" de espessura (k= 20 Btu/h.ft.^{o}F), uma camada de tijolo isolante de sílica (k=0,5 Btu/h.ft.^{o}F) e um invólucro de aço de 1/4" de espessura (k= 26 Btu/h.ft.^{o}F). Com a superfície interna do revestimento de chumbo a 190 ^{o}F e meio ambiente a 80 ^{o}F, a temperatura da superfície externa do aço não deve ser maior que 140 ^{o}F de modo a evitar queimaduras nos trabalhadores. Determinar a espessura do tijolo refratário de sílica se o coeficiente de película do ar é 2 Btu/h.ft^{2}.^{o}F.

Exercício 8.5. Qual é a espessura de isolamento de fibra de vidro (k = 0,02 kcal/h.m.^{o}C) necessária para permitir uma garantia de que a temperatura externa de um forno de cozinha não excederá 43 ^{o}C? A temperatura máxima na superfície interna do forno a ser mantida pelo tipo convencional de controle termostático é 190 ^{o}C, a temperatura da cozinha pode variar de 15 ^{o}C (inverno) a 32 ^{o}C (verão) e o coeficiente de película entre a superfície do forno e o ambiente pode variar entre 10 kcal/h.m^{2}.^{o}C (cozinha fechada) e 15 kcal/h.m^{2}.^{o}C (cozinha arejada).

RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Capítulo 3 :

Exercício 3.11 :

a) 240,6 Kcal/h

b) 299,95 ^{o}C e 222,79 ^{o}C

Exercício 3.12 :

a) 585,69 Kcal/h

b) 178,98 ^{o}C

Exercício 3.13 :

a) 1,95 h.^{o}C/Kcal
b) 152,1 mm

Exercício 3.14 :

a) 184573,8 Btu/h
b) 249,5 HP

Exercício 3.15 :

a) 77222,097 Kcal/h
b) 12,74 cm

Exercício 3.16 :

a) aproximadamente 2,1 cm

Exercício 3.17 :

a) 573,3 Kcal/h

Capítulo 4 :

Exercício 4.13 :

a) 0,359 m e 0,0405 m

b) 420 ^{o}C

c) 0,337 m

Exercício 4.14 :

a) 32,23 Kcal/h por m^2

b) 50,2 ^{o}C e 28,2 ^{o}C

Exercício 4.15 :

a) 328,1 Btu/h (p/ m^2)

b) 133 ^{o}F

Exercício 4.16 :

a) 0,36 m e 0,04 m

b) 420 ^{o}C

c) 730 Kcal/h (p/ m^2)

Exercício 4.17 :

a) 0,5 HP

b) 25,7 ^{o}C e 9,4 ^{o}C

Exercício 4.18 :

a) 8917 Kcal/h

b) 84,3 %

c) R_1 Þ inalterada; R_2 Þ inalterada; R_3 Þ reduz; R_4 Þ aumenta

Exercício 4.19 :

a) @ 2,1 cm

Exercício 4.20 :

a) 1843 Kcal/h.m^2.^{o}C e 26,3 Kcal/h.m^2.^{o}C

b) 797 ^{o}C e 100 ^{o}C

Exercício 4.21 :

a) 9,74 cm e 11,90 cm

b) a placa de 4 cm de espessura é mais vantajosa

Exercício 4.22 :

a) 40.18 KW

Exercício 4.23 :

a) 3491 Kcal/h

b) 22,2 ^{o}C e 38,5 ^{o}C

c) $ 1.334.400,00

Capítulo 5 :

Exercício 5.5 :

a) 3276,78 W/m^2

b) 1742,31 W/m^2 (47% de redução)

Exercício 5.6 :

a) 665,19 W/m^2

b) 353,69 W/m^2 (47% de redução)

Exercício 5.6 :

a)360,7 ^{o}C

Exercício 5.7 :

a) 42400 Kcal/h

b) 12,8 cm

Exercício 5.8 :

a) 166271 Btu/h

b) 89 %

Capítulo 6 :

Exercício 6.9 :

a) 95,68 %

b) 10,44 Kcal/h

c) 87,9 %

Exercício 6.10 :

a) 5773,4 Kcal/h

b) 66,6 ^{o}C

c) 32857,3 Kcal/h

Exercício 6.11 :

a) 8369,2 Kcal/h

Exercício 6.12 :

a) 59,5 Kcal/h

Exercício 6.13 :

a) 95,68 %

b) 10,4 Kcal/h

Exercício 6.14 :

a) A 1ª proposta (1708 Kcal/h) é mais vantajosa que a 2ª proposta (1563 Kcal/h)

Exercício 6.15 :

a) 5773 Kcal/h

b) 32857 Kcal/h

Exercício 6.16 :

a) 87,8 %
b) 2659 Kcal/h.m

Capítulo 7 :

Exercício 7.10 :

a) 25,5 ^{o}F;

b) 19,5 ^{o}F;

c) 23,1

Exercício 7.11 :

a) 45,9 ^{o}C
b) 179 tubos

Exercício 7.12 :

a) 35,9 ^{o}C;

b) 9 m;

Exercício 7.13 :

a) 41 tubos;

Exercício 7.14 :

a) 6 trocadores;

Exercício 7.15 :

a) 0,28 (tinta **A**)

b) 0,90

Exercício 7.16 :

a) 55 m^2;

b) 38,7 m^2 e 5 m;

c) 44 m^2 e 80 tubos;

Exercício 7.17 :

a) 1190,1 Kcal/h.m^2.^{o}C

b) 102 ^{o}C

Capítulo 8 :

Exercício 8.3 :

a) 0,13 Kcal/h.m.^{o}C

b) 0,087 Btu/h.ft.^{o}F

Exercício 8.4 :

a) 0,207 ft ≈ 2,5"

Exercício 8.5 :

a) 0,027 m = 2,7 cm

TRANSFERÊNCIA DE MASSA

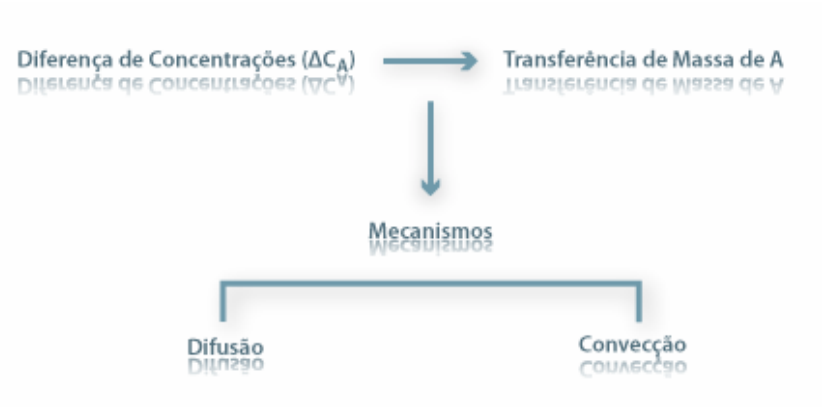
A **transferência de massa** é o processo de transporte onde existe a migração de uma ou mais espécies químicas em um dado meio, podendo esse ser sólido, líquido ou gasoso. O transporte das espécies químicas pode ser feito por dois mecanismos: difusão e/ou convecção. A difusão deve-se à diferença de potenciais químicos das espécies, ou seja, á diferença de concentrações entre dois locais num dado sistema. A convecção deve-se às condições de escoamento de um sistema, por exemplo, líquido em movimento sobre uma placa.

Alguns exemplos de aplicação deste fenômeno são o endurecimento de aços, o tempo total para ocorrer uma dada reação química em um leito reativo e a operação de filtragem utilizando membranas.

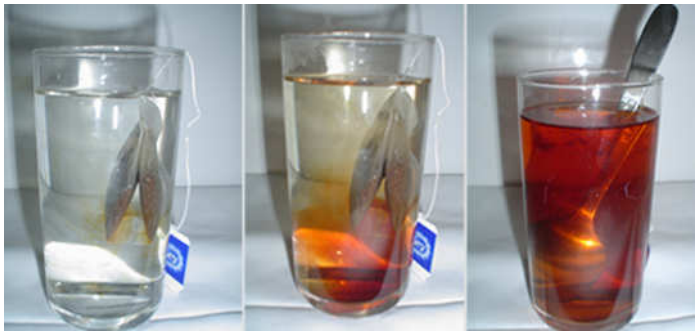
O QUE É A TRANSFERÊNCIA DE MASSA? COMO OCORRE?

A transferência de massa em sentido lato poderá ser entendida como o movimento espacial da matéria. Como exemplos, refira-se o movimento de um fluido numa conduta ou em torno de corpos. No entanto, “transferência de massa” é geralmente entendida no seu sentido mais estrito, referindo-se ao movimento de um componente específico (*A, B*…) num sistema de vários componentes. Existindo regiões com diferentes concentrações, ocorrerá transferência de massa no sentido das zonas onde a concentração desse componente é mais baixa. Essa transferência pode ocorrer pelo mecanismo da difusão molecular ou da convecção . Recorde-se que a concentração é geralmente definida como a quantidade de substância (em moles ou massa) por unidade de volume ($[C_A]$=mol.m^{-3}; $[\rho_A]$=kg.m^{-3} sendo $\rho_A=C_A.M_A$ em que M_A é a massa molar de *A*). Em gases perfeitos, a concentração de cada gás individual pode ser calculada a partir da sua pressão parcial, p_A: $C_A=p_A/(R.T)$, onde *T* é a temperatura absoluta (K) e *R* a constante dos gases perfeitos (8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}). Da mesma forma, a concentração total de todas as espécies (*C*) está relacionada com a pressão total, P na forma $C=P/(R.T)$. Por sua vez, a fracção molar de um componente A numa mistura é o quociente entre o número de moles de A, n_A, e o número total de moles, n_{total}, *isto é,*

$x_A = n_A/n_{total}$ e $y_A = n_A/n_{total}$, num líquido e num gás, respectivamente. Num gás a fracção molar pode ser relacionada com a pressão parcial através da lei de Dalton $y_A = p_A/P$ e é também igual à percentagem volumétrica (%V/V). Por exemplo, existindo 20% (V/V) de NH_3 no ar, então



Muitas ocorrências do dia-a-dia envolvem transferência de massa: processo de solubilização de açúcar no chá, favorecido pela agitação de uma colher, solubilização de sal em água, preparação de um chá por infusão (Figura), evaporação de água na superfície de uma piscina e transporte através do ar envolvente, secagem de um tronco de madeira após o corte e correspondente transporte da humidade através dos poros da madeira até à sua superfície, solubilização de oxigénio em água num aquário para consumo dos peixes, arejamento de reservatórios de água, solubilização de oxigénio num meio nutriente para consumo de microorganismos num processo de fermentação aeróbia, transferência de reagentes para a superfície de um catalisador, onde ocorre uma reacção…



Preparação de chá por infusão (extracção sólido/líquido seguido de difusão). O processo de transferência de massa é favorecido pela agitação da colher (convecção).

LEIS DE EQUILÍBRIO ENTRE FASES

A transferência de massa através de uma fase ou entre duas fases passando a fronteira entre elas (líquida-líquida, líquida-sólida, gás-líquida ou gás-sólida) requer um afastamento das condições de equilíbrio. Por exemplo, poder-se-á dissolver sal numa panela com água até a concentração de sal na água atingir o valor máximo, designado

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

por solubilidade, a qual depende da temperatura da água. Outro exemplo, é a secagem da roupa, que ocorrerá mais rapidamente se o ar estiver mais seco (isto é, quando a pressão parcial de vapor de água no ar estiver mais afastada do seu valor máximo, sendo este dado pela pressão de vapor correspondente à temperatura considerada). Os valores das concentrações de equilíbrio entre fases (C_A^{F1}, C_A^{F2}, respectivamente na fase 1 e fase 2) são apresentados na literatura sob variadas formas: tabelas, gráficos, coeficientes de distribuição ou partição e equações do tipo $C_A^{F1}=m.C_A^{F2}$. Nalguns casos é possível obter uma expressão analítica simples como os equilíbrios líquido-gás descritos pela Lei de Henry, válida para misturas diluídas (eq. 19), ou os descritos pela lei de Raoult (eq. 20) onde p_A é a pressão parcial do componente A na mistura gasosa em equilíbrio com o líquido cuja concentração em A é C_A:

$$p_A = H.C_A$$

(lei de Henry, com [H]=Pa.m^3/mol ou J/mol)

$$p_A = p^*_{A,\sigma}.x_A$$

(lei de Raoult com $x_A=C_A/C$, sendo $p^*_{A,\sigma}$ a pressão de vapor de A puro e C a concentração total - válida para misturas ideais)

As figuras 12 a 14 ilustram situações onde ocorre transferência de massa, mostrando a forma de calcular o valor da concentração do componente A na fronteira entre fases (dado pelo valor de equilíbrio).

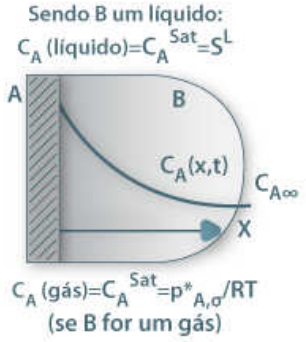


Figura 12: Solubilização de A (sólido) num líquido B ou sublimação de A num gás B. A concentração de A à superfície é dada pela solubilidade (S^L) e pressão de vapor ($p^*_{A,\sigma}$), respectivamente.

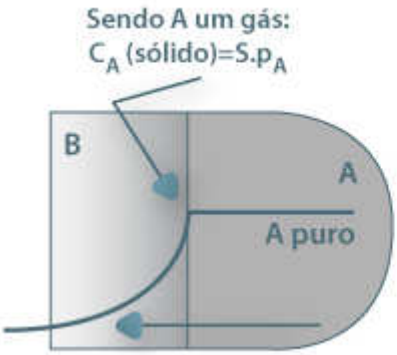


Figura 13: Solubilização de A (gás) num sólido B. A concentração de A no sólido, junto da superfície é dada pela solubilidade [S]=mol/(m^3 sólido.Pa); [C_{AS}]=mol/(m^3 sólido).

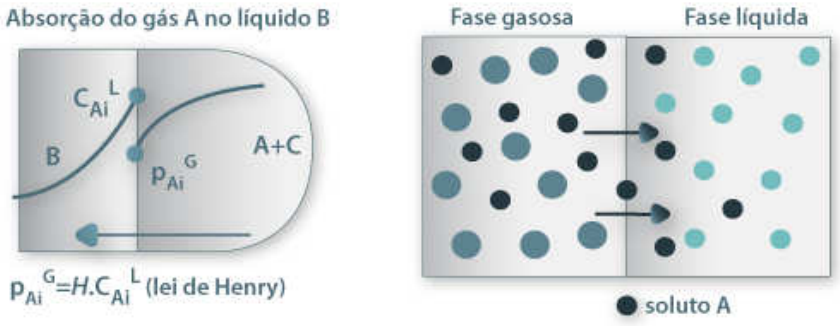


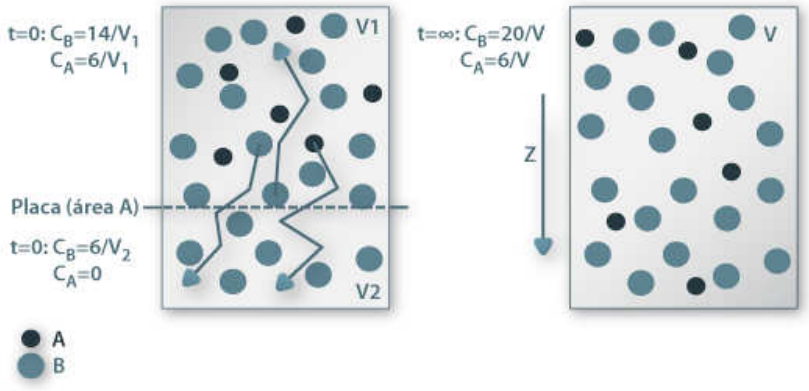
Figura 14: Absorção de um gás soluto A num líquido B. Se A for pouco solúvel em B (solução diluída) é, em geral, aplicável a Lei de Henry e C_{AS}(líquido) =C_{Ai}^L=ρ_{Ai}^G/H, *[H]*=Pa.m^3/mol ou J/mol.

DIFUSÃO MOLECULAR

A transferência de massa por difusão molecular em consequência de uma diferença de concentrações espacial é análoga à transferência de calor por condução embora seja um fenómeno mais complexo pois ocorre numa mistura com pelo menos duas espécies químicas. Começando com o caso dos gases, o estabelecimento da igualdade de concentrações ao fim de um determinado tempo resulta do movimento molecular aleatório em todas as direcções do espaço (este movimento de natureza estatístico é explicado pela teoria cinética dos gases a baixas pressões). Na Fig. 4 está representado um recipiente dividido por uma placa de área *A*; uma das partes contém moléculas *A* e *B* enquanto a outra divisão só contém moléculas *B*, sendo C_A=*0 mol/m^3*. Se a placa que divide o recipiente for retirada, o movimento molecular aleatório permite que moléculas *A* e *B* possam frequentar o espaço anteriormente definido por *V2*. Contudo, a probabilidade de uma molécula A entrar nesse espaço é maior do que a de sair do mesmo, uma vez que aí a sua concentração inicial era 0. Ao fim de algum atempo, todo o espaço conterá moléculas *A* e a concentração será uniforme.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

A velocidade de transferência de massa do componente *A* (*mol de A/s*) num meio em repouso contendo uma mistura binária *A* e *B* é proporcional à área de transferência perpendicular ao movimento (*A*) e ao gradiente de fracções molares (dx_A/dz), sendo conhecida pela 1ª lei de Fick **(eq. 21). A constante de proporcionalidade é designada por difusividade mássica ou coeficiente de difusão de A no meio B (D_{AB}, m^2/s) que tem as mesmas unidades da difusividade térmica α apresentada na secção de transferência de calor.**



$$\dot{N}_{Adiff} = -C.A.D_{AB}\frac{dx_A}{dz}, (mol/s)$$

Se a concentração total (*C, moles de (A+B)/m*^{3}) for constante, ou aproximadamente constante como em soluções diluídas,

$$C.dx_A = d(C.x_A) = dC_A$$

$$\Rightarrow \dot{N}_{Adiff} = -D_{AB}.A\frac{dC_A}{dz}, (mol/s)$$

Cuja integração, no caso de gases, resulta em:

$$\Rightarrow \dot{N}_{Adiff} = \frac{D_{AB}.A.(p_{A1}-p_{A2})}{R.T(z_2-z_1)} \qquad (23)$$

Onde p_{A1} e p_{A2} são, respectivamente, as pressões parciais de A mantidas constantes nas fronteiras z_1 e z_2 (isto é, nos extremos do percurso de difusão), considerando o gás como perfeito ($C_A=p_A/(RT)$).

No caso de difusão em líquidos e sólidos é comum usar, por analogia, equações idênticas à eq. 23 (usando, obviamente, concentrações em vez de pressões parciais).

Numa mistura gasosa binária, o coeficiente de difusão $D_{AB} = D_{BA} \sim 10^{-5}$ m^2/s sendo dependente da temperatura e da pressão na forma geral D□$T^{2/3}$/P (como previsto pela teoria cinética dos gases). Em líquidos, a velocidade de difusão molecular é menor pois as moléculas estão mais próximas, aumentando as colisões e a resistência à difusão. Assim, D_{AB} depende da concentração de A em B e toma valores ~ 10^{-9} m^2/s; globalmente, $D_{sólidos} \leq D_{líquidos} \ll D_{gases}$. Se a área de transferência de massa for

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

constante é comum associá-la à velocidade molar, obtendo-se o fluxo molar ($\dot{J}_A$, em mol.m^{-2}.s^{-1}):

$$\Rightarrow \dot{J}_{Adiff} = \dot{N}_{Adiff} / A$$

::: INÍCIO :::

TRANSFERÊNCIA DE MASSA POR CONVECÇÃO

O mecanismo de transferência de massa através de um fluido em movimento é designado por convecção sendo esta natural (se o movimento for provocado por diferenças de densidades) ou forçada (se o movimento for provocado por acção de agentes externos, como uma ventoinha, bomba centrifuga, ou outros).

Considere-se uma mistura binária (A+B) a deslocar-se devido a diferenças de pressão, como um fluido a escoar no interior de uma conduta (figura 16). Se não houver gradientes de concentração, a velocidade média de deslocamento do componente A é igual à velocidade média molar do fluido e a velocidade de difusão molecular prevista pela 1ª lei de Fick é nula ($\dot{N}_{Adiff} = 0$). Contudo, se houver gradientes de concentração, um observador exterior verá que a velocidade de deslocamento de A será maior que a velocidade média do fluido uma vez que A se vai difundir no sentido do gradiente negativo. Assim, a velocidade de transferência de A (mol A/s) é o resultado da contribuição do movimento convectivo (devido ao movimento global do fluido) e do movimento difusivo (devido ao gradiente de concentrações, dado pela 1ª lei de Fick) – eq. 24.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

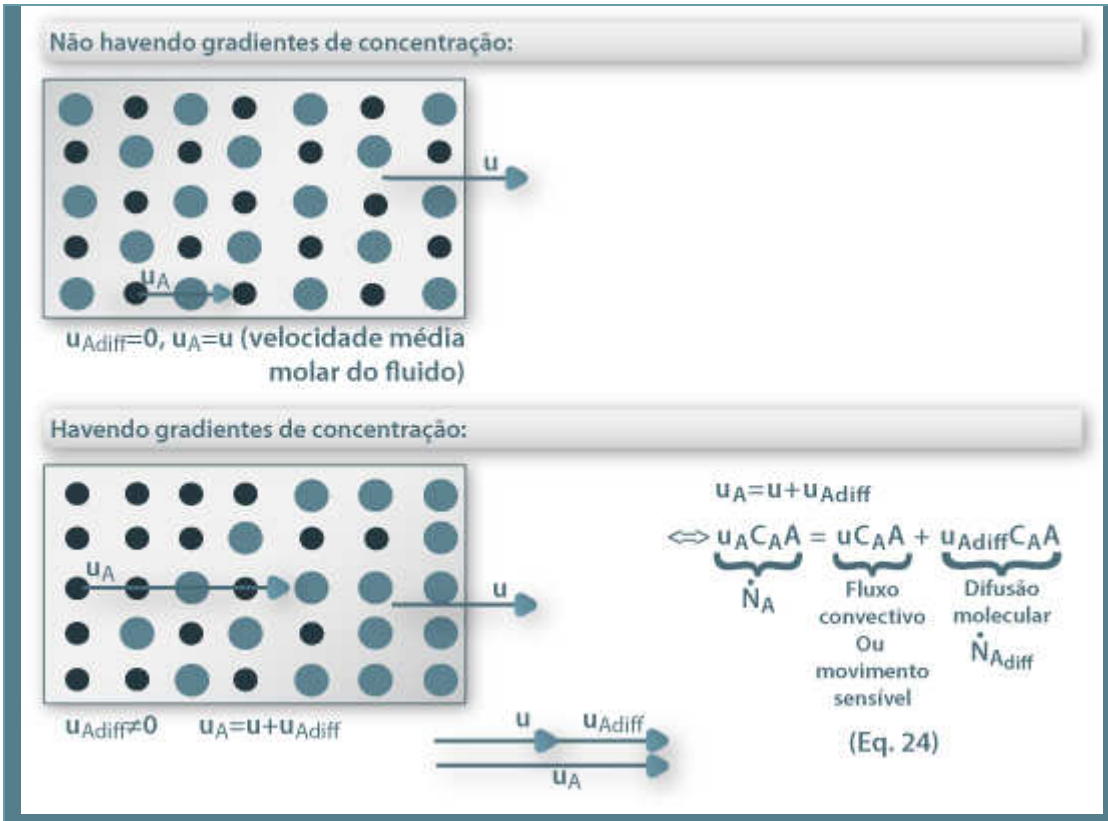


Figura 16: Representação do processo de transferência de massa de A na ausência de variações espaciais de concentração (escoamento global de um fluido) ou na presença destas.

Sendo a velocidade total de transferência de massa $\dot{N}=\dot{N}_A+\dot{N}_B=u.C.A$, retirando o valor da velocidade média molar u e substituindo-a na eq. 24 obtém-se a eq. 25 que, rearranjada, dá lugar à eq. 26, conhecida como a equação geral da difusão:

$$\dot{N}_A=\frac{C_A}{C}(\dot{N}_A+\dot{N}_B)+\dot{N}_{Adiff} \qquad (25)$$

$$\therefore \dot{N}_A\,C_B-\dot{N}_B\,C_A=-D_{AB}.A.C\frac{dC_A}{dz} \qquad (26)$$

Existem casos em que o fluxo de B é nulo, como, por exemplo, se um gás B for muito pouco solúvel num líquido A, e o vapor A se difundir através de B – é o caso da evaporação de água no ar ou da absorção de amoníaco em água a partir de uma mistura gasosa. Nestes casos, a integração da eq. 26 dá origem à eq. 27:

$$\dot{N}_A=\frac{D_{AB}.A.P}{R.T(z_2-z_1)}\,ln\,\frac{P-p_{A2}}{P-p_{A1}}=\frac{D_{AB}.A.P}{R.T.\delta}\,\frac{p_{A1}-p_{A2}}{p_{Bml}} \qquad (27)$$

No entanto, quando o fluxo de A é igual mas em sentido contrário ao de B como em alguns processos de destilação ($N_A = -N_B$, denominada contradifusão molecular), ou ainda para misturas diluídas (líquidas ou gasosas) e na transferência de massa através de sólidos, em que $p_{Bml} \approx P$ (pressão total) ou $C_{Bml} \approx C$ (concentração total), a eq. 27 resume-se à equação de Fick (eq. 23).

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

Em muitos casos, o escoamento é turbulento sendo caracterizado pela formação de turbilhões que se movimentam rápida e aleatoriamente. Estes turbilhões ou “pacotes” de fluido permitem transportar as moléculas A, por exemplo de um sólido que se dissolve num líquido, em maior quantidade e rapidez do que a difusão molecular. Assim, poder-se-á escrever a eq. 24 na forma

$$\dot{N}_{Aturb} = u.C_A.A - (D_{AB} + E_M).A\frac{dC_A}{dz} \qquad (28)$$

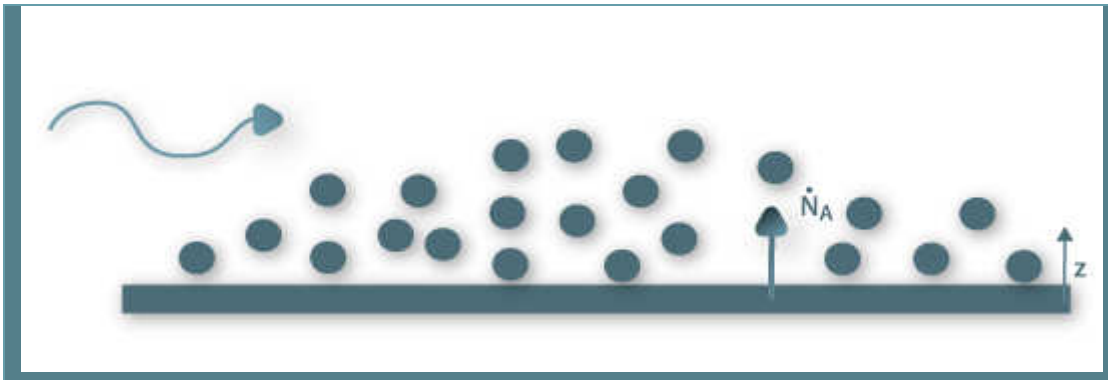


Figura 17: Evaporação ou sublimação no seio de um fluido em movimento.

em que E_M é a difusividade turbilhonar sendo esta dependente do padrão de escoamento do fluido e variável com a posição (toma o valor zero junto à superfície e aumenta com a distância à parede). Como geralmente E_M não é conhecido, bem como a profundidade z , é comum definir um coeficiente de transferência de massa, $k_{G,L}$, à semelhança da definição de coeficiente de transferência de calor. Este coeficiente leva o índice *G* quando a transferência é efectuada no seio de um gás e o índice *L* quando se trata de um líquido, e depende da geometria da superfície, das propriedades do fluido e das condições de escoamento do fluido.

Assim, a velocidade de transferência de massa será obtida através da eq. 29 sendo *A*, a área de transferência de massa perpendicular ao fluxo de massa, e ΔC_A a *driving-force*, isto é, a causa para ocorrer a transferência de massa (p.e. pode ser (C_{AS}-$C_{A\infty}$) em que C_{AS} é a concentração de A junto à superfície e $C_{A\infty}$ é a concentração de A no fluido que a envolve - Fig. 18). Consoante se trate de um gás ou de um líquido, poder-se-á definir outros coeficientes de transferências de acordo com as *driving-forces* consideradas – eq.30 a 32.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

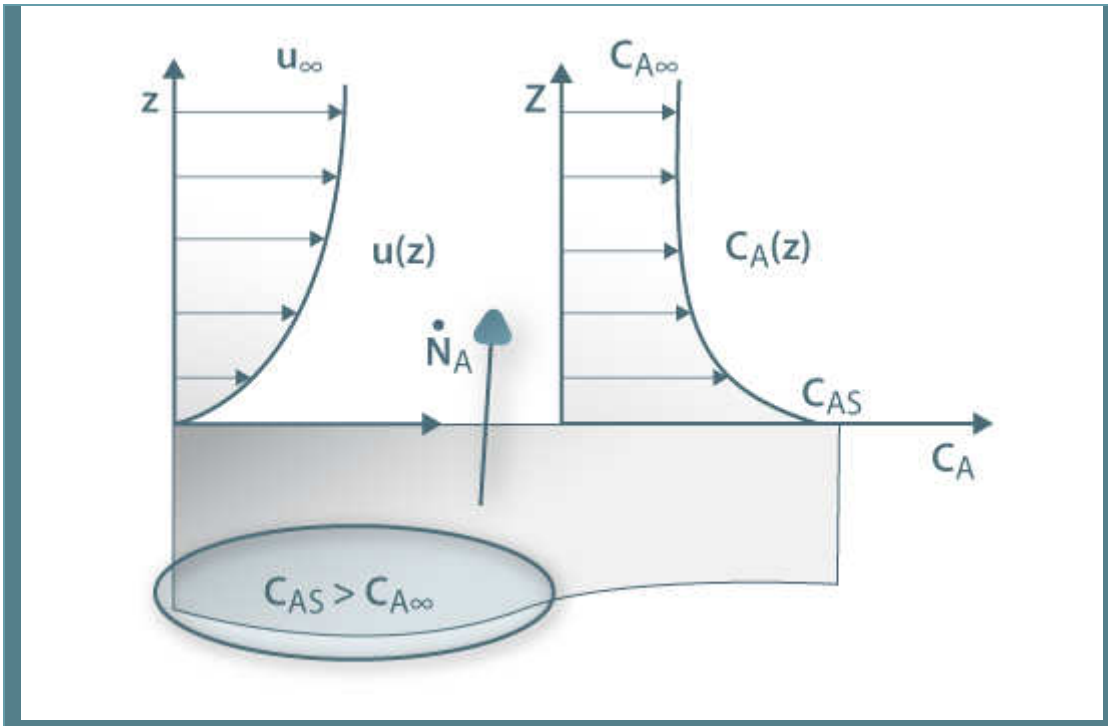


Figura 18: Transferência de massa no seio de um fluido em movimento – perfis de velocidade e concentração.

$$\dot{N}_{Aconv} = k_{G,L}.A.\Delta C_A = k_{G,L}.A(C_{AS} - C_{A\infty}) \quad [k_G] = [k_L] = m/s \qquad (29)$$

$$\dot{N}_{Aconv} = \frac{k_G.A.(p_{AS} - p_{A\infty})}{RT} = k_{GP}.A(p_{AS} - p_{A\infty}) \quad [k_{GP}] = mol/(m^2 s Pa) \qquad (30)$$

$$\dot{N}_{Aconv} = \frac{k_G.AP(y_{AS} - y_{A\infty})}{RT} = k_y.A(y_{AS} - y_{A\infty}) \quad [k_y] = mol/(m^2 s) \qquad (31)$$

$$\dot{N}_{Aconv} = k_L.AC(x_{AS} - x_{A\infty}) = k_x.A(x_{AS} - x_{A\infty}) \quad [k_x] = mol/(m^2 s) \qquad (32)$$

Comparando a eq.30 com a equação 27, e re-arranjando, conclui-se que

$$\therefore k_{G,L} = \frac{D_{AB}.C}{\delta.C_{Bml}} = \frac{D_{AB}}{\delta.x_{Bml}} = \frac{D_{AB}.P}{\delta.p_{Bml}} = \frac{D_{AB}}{\delta.y_{Bml}} \qquad (33)$$

no caso de contradifusão molecular ou misturas diluídas (eq.23),

$$\therefore k'_{G,L} = \frac{D_{AB}}{\delta} \qquad (34)$$

2.4 ALGUMAS APLICAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

a) Difusão de A através de corpos porosos

Em sólidos porosos com os poros cheios de fluido (p.e. catalisadores) o movimento sensível é desprezável, pelo que é válida a lei de Fick. No entanto, como mostra a

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

figura 19, o percurso real de difusão é superior à espessura do sólido, sendo o percurso effectivo $Z_{eff}=\tau(z_2-z_1)$ onde τ é a tortuosidade (para sólidos inertes τ =1,5 a 5). Sendo ε a porosidade do sólido, virá, por integração da Eq. 22:

$$\dot{N}_A=\dot{N}_{Adiff}= D_{ABeff}A\frac{C_{A1}-C_{A2}}{(z_2-z_1)} \;\; com \;\; D_{ABeff}=\frac{\varepsilon}{\tau}D_{AB} \qquad (35)$$

Para muitos catalisadores granulados, em que o fluido é gasoso, o coeficiente de difusão efectivo do componente A no interior do catalisador é 10 vezes mais pequeno do que o coeficiente de difusão de A no exterior ($D_{eff} \cong (1/10)\, D_{fluido\ livre}$).

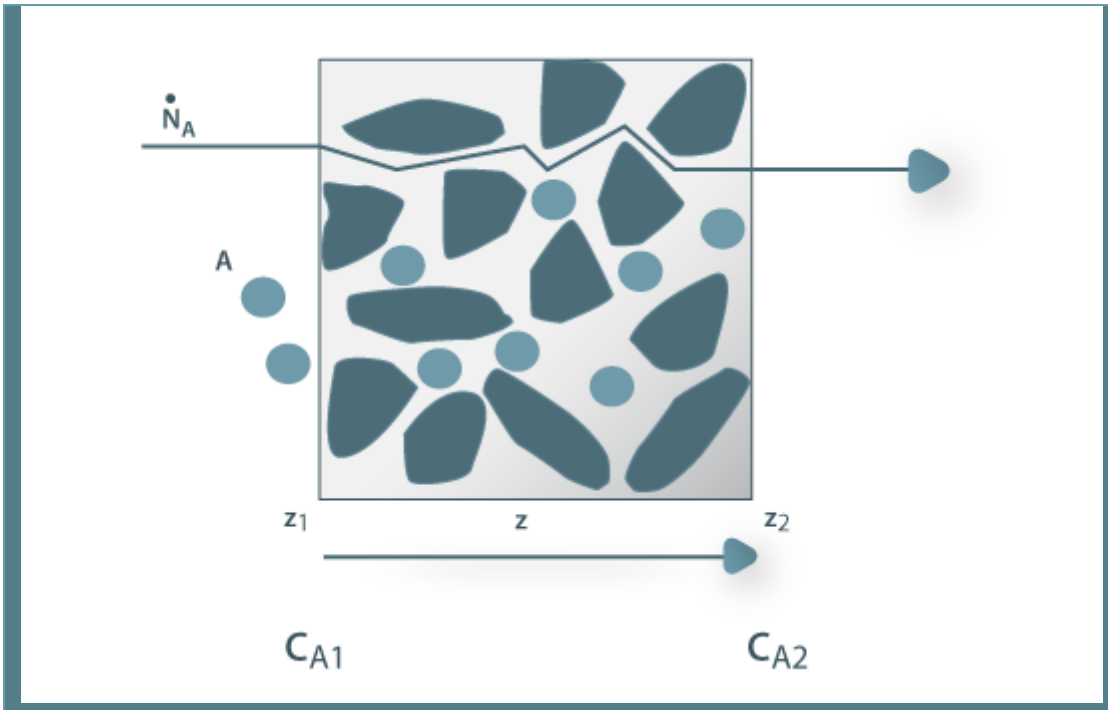


Figura 19: Difusão de A através de um corpo poroso.

b) Difusão de A através de membranas (M)

Considere-se dois fluidos (F1 e F2) separados por uma membrana (como, por exemplo, a parede de um tubo de diálise). Através de uma membrana o movimento sensível é também desprezável, pelo que é aplicável a lei de Fick. Por integração da Eq. 22, obtém-se, atendendo às condições fronteira definidas na Fig. 20:

$$\dot{N}_A=\dot{N}_{Adiff}= D_{AB}A\frac{C^M_{A1}-C^M_{A2}}{(z_2-z_1)} = D_{AB}A\frac{C^M_{A0}-C^M_{AL}}{L} \qquad (36)$$

Se a área de transferência for constante, atendendo à lei de equilíbrio apresentada na Fig. 20 e definindo Permeabilidade da membrana ($m^2.s^{-1}$) $P_M=m.D_{AB}$, o fluxo molar será

$$\dot{J}_{Adiff}= (C^{F1}_A - C^{F2}_A)\frac{m.D_{AB}}{L} = (C^{F1}_A - C^{F2}_A)\frac{P_M}{L} \qquad (37)$$

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

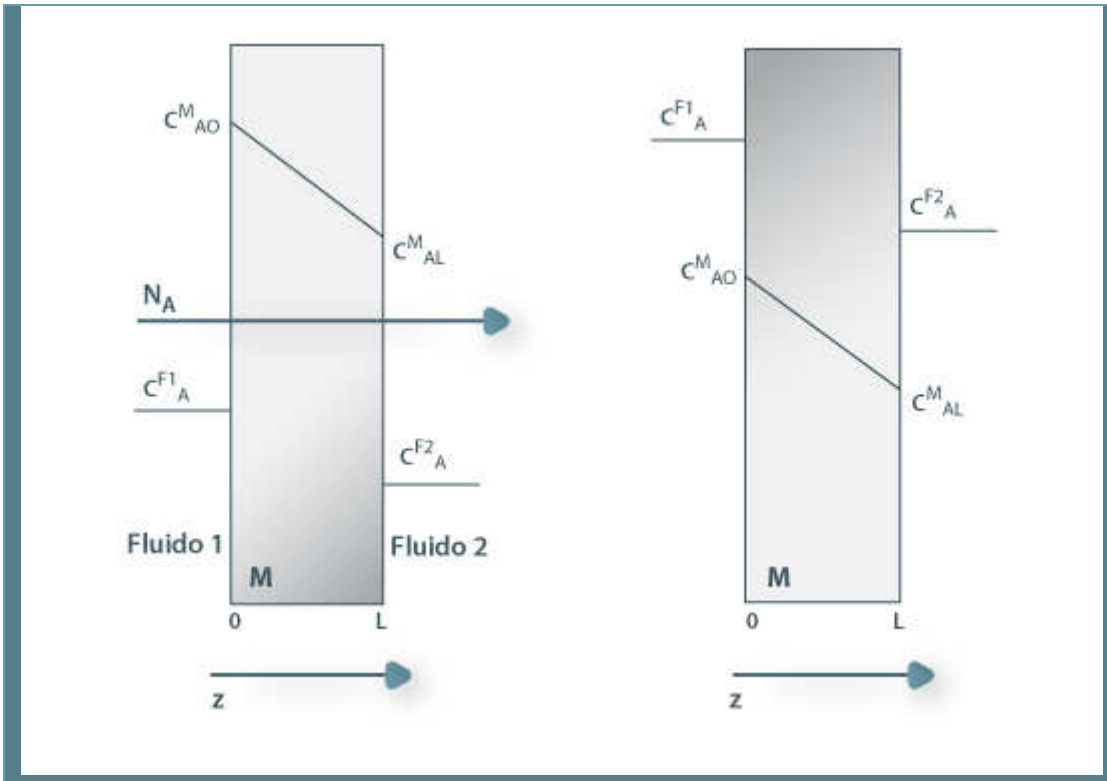


Figura 20: Difusão de A através de uma membrana a descontinuidade dos perfis (isto é, a relação entre a concentração de A dentro e fora da membrana) depende da lei de equilíbrio: $C_{Ai}^{M} = m.C_{A}^{fluido}$ podendo *m* ser superior à unidade (como na imagem da esquerda), igual a um, ou inferior à unidade (como na imagem da direita).

c) Exemplo de aplicação: difusão de H_2 através da parede de um tubo cilíndrico

Um tubo de borracha (neopreno vulcanizado), com 3,0 mm de diâmetro interno, 11 mm de diâmetro externo, e 1 m de comprimento é utilizado para transportar hidrogénio gasoso a 2 atm e 27 ºC.

a) Calcule a perda de hidrogénio através da parede de borracha, em mol/h.
b) Discuta como varia essa perda com as condições de pressão e temperatura do hidrogénio.

A solubilidade do hidrogénio na borracha a 27ºC é $S = 2{,}28 \times P$ *mol* H_2/m^3 de sólido, onde *P* é a pressão do hidrogénio gasoso em atm. A difusividade do hidrogénio na borracha a 27ºC é $1{,}8 \times 10^{-10}$ m^2/s.

Pressupostos: condições estacionárias; simetria cilíndrica; $N_B=0$ e fluxo convectivo desprezável, pelo que é aplicável a lei de Fick (eq. 22); concentração de H_2 no exterior é ≈0.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com



C_{A1} = 2,28x2 mol H_2/m^3
= 4,56 mol/m^3

$$\dot{N}_{Adiff} = -D_{AB}.A\frac{dC_A}{dr}$$
$$\Rightarrow \int_{r_1}^{r_2} \dot{N}_{Adiff}\ \frac{dr}{r} = -\int_{CA1}^{CA2} D_{AB}.2\pi L dC_A$$

$$\dot{N}_{Adiff} = \frac{D_{AB}.2\pi L(C_{A1}-C_{A2})}{ln(r_2/r_1)}$$
$$= 2\pi \times 1 \times 1,8.10^{-10}\frac{(4,56-0)}{ln(5,5/1,5)}$$
$$= 3,969.10^{-9} mol/s = 1,429.10^{-5} mol/h$$

::: INÍCIO :::

2.5 TRANSFERÊNCIA DE MASSA ATRAVÉS DE INTERFACES

Considere-se novamente o caso de dois fluidos separados por uma membrana, como mostra a Fig. 21, conhecendo-se a concentração do componente A, ou soluto, em ambos os fluidos ($C_{\infty 1}$ e $C_{\infty 2}$); junto à superfície da membrana as concentrações são respectivamente C^F_{S1} e C^F_{S2}, enquanto no interior da membrana, também junto à superfície, são C^M_{S1} e C^M_{S2}. À transferência de massa do soluto A estão associadas três resistências mássicas em série, correspondentes à convecção através do fluido mais concentrado, à difusão através da membrana e à convecção através do fluido menos concentrado. Esta situação é análoga a uma já apresentada anteriormente onde ocorria transferência de calor, como ilustrado na Fig.21 e Tabela 4.

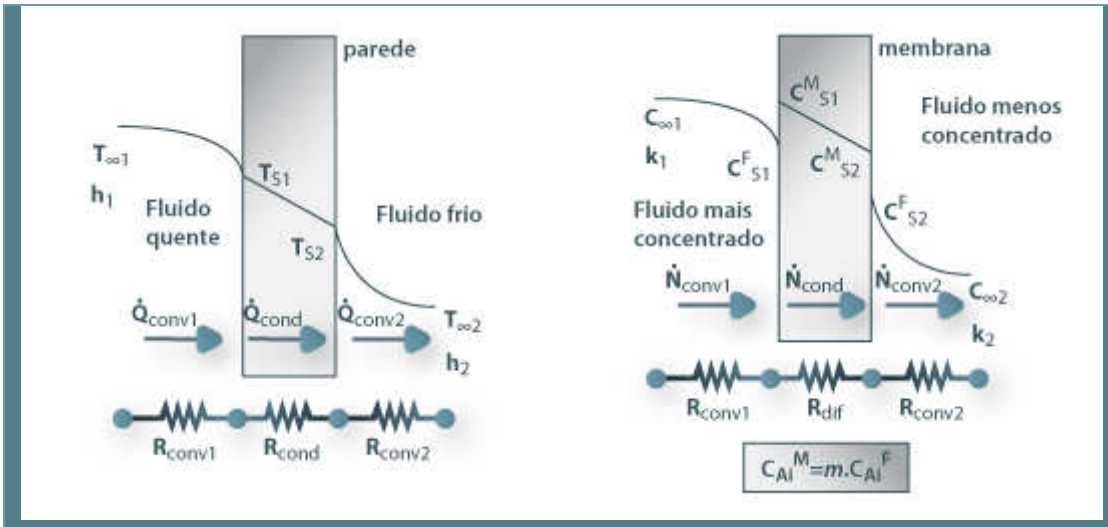


Figura 21: Analogia entre resistências térmicas em série e resistências mássicas em série.

Tabela 4 – Analogia entre os processos de transferência de calor e de massa ilustrados na Fig21

Mecanismo	Transferência de calor	Transferência de massa
Convecção no fluido (face esquerda)	$\dot{q}_{conv1}=h_1(T_{\infty 1}-T_{S1})$	$\dot{J}_A^{F1}=k_1(C^F_{\infty 1}-C^F_{S1})$
Condução/Difusão no interior da parede/membrana	$\dot{q}_{cond}=\frac{k(T_{S1}-T_{S2})}{L}$	$\dot{J}_A^{M}=\frac{D_{AB}(C^M_{S1}-C^M_{S2})}{L}$ $=\frac{D_{AB}.m(C^F_{S1}-C^F_{S2})}{L}$
Convecção no fluido (face direita)	$\dot{q}_{conv2}=h_2(T_{S2}-T_{\infty 2})$	$\dot{J}_A^{F2}=k_2(C^F_{S2}-C^F_{\infty 2})$

Aplicando as Eq. 29 e 22, obtém-se:

$$C^F_{\infty 1}-C^F_{S1}=\dot{J}_A^{F1}\ /k_1$$

$$C^F_{S1}-C^F_{S2}=\dot{J}_A^{M}\ /(P_M/L)\qquad (D_{AB}.m=P_M)$$

$$C^F_{S2}-C^F_{\infty 2}=\dot{J}_A^{F2}\ /k_2$$

$$C^F_{\infty 1}-C^F_{\infty 2}=\dot{J}_A\left(\frac{1}{k_1}+\frac{L}{P_M}+\frac{1}{k_2}\right)\iff \dot{J}_A=K_F(C^F_{\infty 1}-C^F_{\infty 2}) \qquad (38)$$

sendo K_F o coeficiente global de transferência de massa. Neste portal, na secção de "Processos Biológicos/Processos de Separação/Membranas", são exemplificadas algumas aplicações envolvendo membranas .

Seguindo o mesmo raciocínio, pode-se estabelecer o coeficiente global de transferência de massa para o caso da transferência de um soluto A de uma fase gasosa, G, para uma fase líquida, L, como acontece no processo de Absorção. Este caso será mais desenvolvido na secção "Absorção" deste portal.

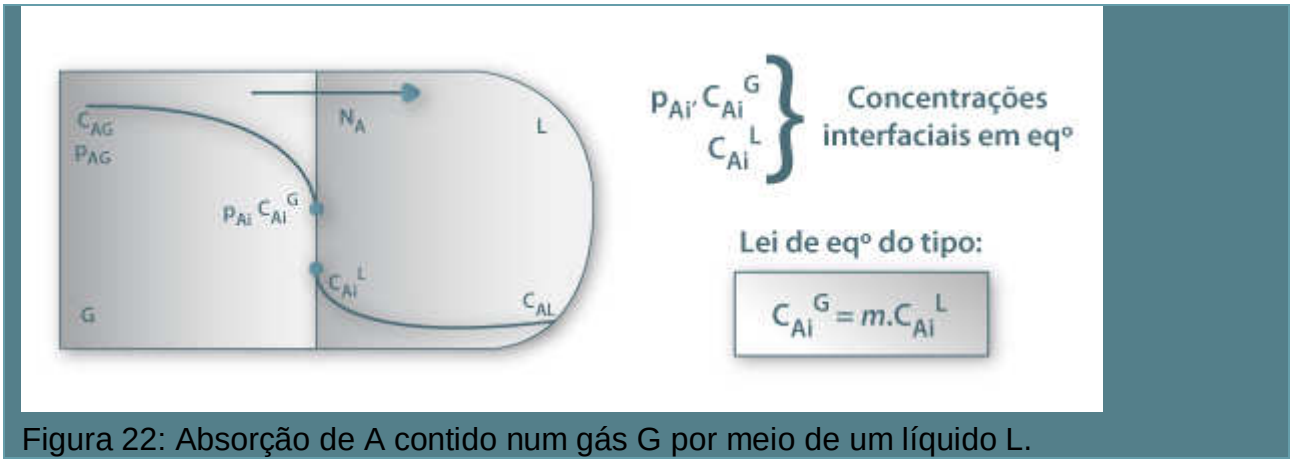


Figura 22: Absorção de A contido num gás G por meio de um líquido L.

$$\dot{N}_A^G = k_G.A(C_{AG} - C_{Ai}^G) \iff \dot{N}_A^G = \frac{\Delta C_A^G}{R_G} \quad (39)$$

$$\dot{N}_A^L = k_L.A(C_{Ai}^L - C_{AL}) \iff \dot{N}_A^L = \frac{\Delta C_A^L}{R_L} \quad (40)$$

multiplicando a Eq. 40 por *m*, ter-se-á:

$$(C_{AG} - m.C_{Ai}^L) + m.(C_{Ai}^L - C_{AL}) = \dot{N}_A \left(\frac{1}{k_G.A} + \frac{m}{k_L.A}\right) \quad (41)$$

definindo agora K_G pela Eq. 42 e comparando-a com a Eq. 41, tem-se, finalmente:

$$\dot{N}_A = K_G.A(C_{AG} - m.C_{AL}) \quad (42)$$

$$\Longrightarrow \frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (43)$$

onde K_G (m/s) representa o coeficiente global de transferência de massa baseado na diferença de concentrações entre duas fases gasosas, uma real, de concentração C_{AG} e outra fictícia cuja concentração é $m.C_{AL}$.

Em vez de multiplicar a Eq. 40 por *m*, poder-se-ia multiplicar a Eq. 39 por 1/*m*, obtendo-se:

$$\frac{1}{m}(C_{AG} - C_{Ai}^G) + \left(\frac{C_{Ai}^G}{m} - C_{AL}\right) = \dot{N}_A \left(\frac{1}{m.k_G.A} + \frac{m}{k_L.A}\right) \quad (44)$$

definindo K_L pela Eq. 45 e comparando-a com a Eq. 44, obtém-se:

$$\dot{N}_A = K_L.A(\frac{C_{AG}}{m} - C_{AL}) \quad (45)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{m.k_G} + \frac{1}{k_L} \quad (46)$$

sendo K_L (m/s) o coeficiente global de transferência de massa baseado na diferença de concentrações entre duas fases líquidas, uma fictícia de concentração C_{AG}/m e outra real de concentração C_{AL}. Comparando a Eq. 46 com a Eq. 43, conclui-se que

$$\Longrightarrow \frac{1}{K_G} = \frac{m}{K_L} \quad (47)$$

:

2.6 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS

Tal como no caso de transferência de calor , também é comum agrupar as variáveis associadas aos processos de transferência de massa sob a forma de números adimensionais e estabelecer correlações entre eles usando dados experimentais. Os coeficientes de transferência de massa dependem das propriedades físicas do fluido (viscosidade, μ, massa volúmica, ρ, coeficiente de difusão, D_{AB}), da sua velocidade, u, e das dimensões da superfície por onde este se escoa, sendo L a sua dimensão característica: $k_{G,L}=f(\mu, \rho, D_{AB}, u, L)$.

Usando uma técnica de análise das dimensões das várias variáveis, é possível obter os números adimensionais característicos de um processo de transferência de massa por convecção forçada:
- o número de Reynolds, $Re=\rho.u.L/\mu$ que caracteriza o escoamento do fluido
- o número de Schmidt, $Sc=\mu./(\rho.D_{AB})$ que relaciona propriedades físicas do fluido
- o número de Sherwood, $Sh=k_{G,L}.L/D_{AB}$ que representa o aumento da transferência de massa como resultado do movimento do fluido (“convecção”) relativamente à transferência de massa apenas ao nível molecular (difusão)

Existem ainda outros números adimensionais possíveis que resultam da combinação destes:
- o número de Stanton para transferência de massa, $St_m = Sh/(Re.Sc) = k_{G,L}./u$
- o número de Peclet para transferência de massa, $Pe_m = Re.Sc = u.L/D_{AB}$
- o factor de Colburn, $j_D=St_m. Sc^{2/3} = (k_{G,L}./u).Sc^{2/3}$

Seguem-se alguns exemplos de correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de transferência de massa.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

- Escoamento de fluidos em torno de esferas

$$Sh = \frac{k_G.D}{D_{AB}} = 2 + 0,552.Re^{0,53}Sc^{1/3}$$

válida quando o fluido é gasoso e 1<Re<48000; 0,6<Sc<2,7; notar que Sh→2 quando u→0.

No caso de líquidos:

$$Sh = \frac{k_L.D}{D_{AB}} = 2 + 0,95.Re^{0,50}Sc^{1/3}$$ Se 2<Re<2000

$$Sh = 0,347.Re^{0,62}Sc^{1/3}$$ Se 2000<Re<17000

2.7 PERFIS DE CONCENTRAÇÃO TEMPORAIS E/OU ESPACIAIS

Quando a concentração do componente A de uma mistura binária (A e B) varia no tempo (regime não estacionário, ou transiente) ou no espaço por haver produção interna do componente A por reacção química (R_A - velocidade de produção de A/volume, mol $A.m^{-3}.s^{-1}$), ou ainda quando este é consumido por reacção química, é necessário efectuar um balanço molar ao componente A num volume diferencial *dV=dx.dy.dz*, como mostra a figura 23, para conhecermos a evolução espacial e/ou temporal da sua concentração. Neste portal, na secção de "Reacção Química ", são exemplificados processos que envolvem reacção e onde estes assuntos são mais aprofundados.

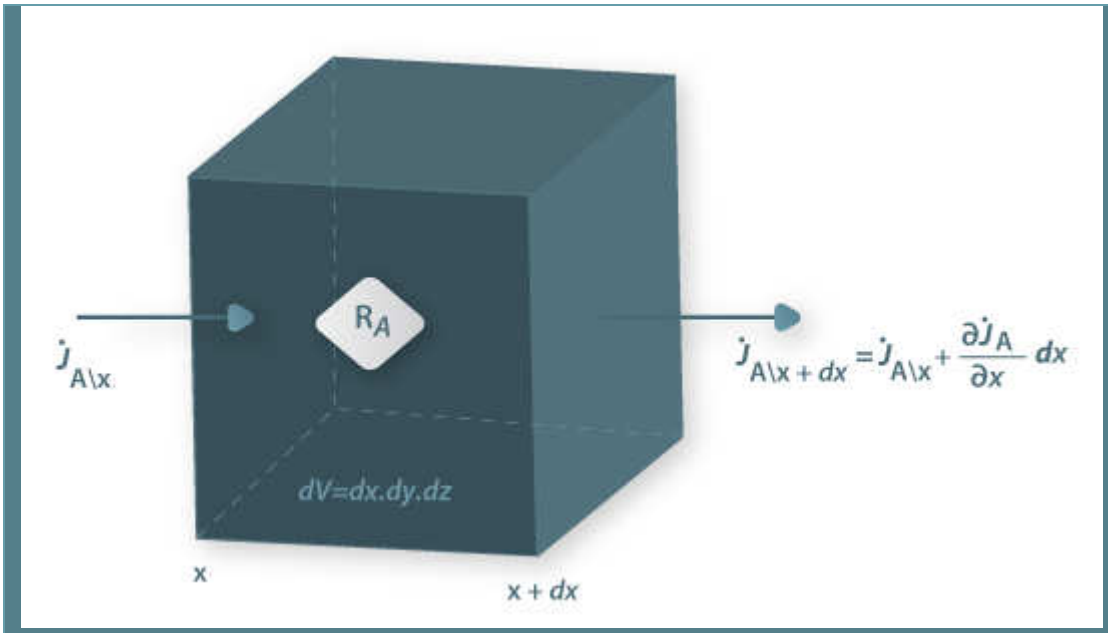


Figura 23: Volume de controlo diferencial no interior do qual ocorre uma reacção química que envolve o componente A.

Aplicando a lei da conservação da massa para a espécie A (moles) no intervalo de tempo dt e considerando haver transporte de A apenas na direcção x:

$$\frac{\partial N_A}{\partial t} = \dot{N}_{Aentra} + R_A dV - \dot{N}_{Asai} \quad (48)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial C_A}{\partial t} dx.dy.dz = \dot{J}_{A|x}\, dy.dz + R_A dx.dy.dz - (\dot{J}_{A|x} + \frac{\partial J_A}{\partial x} dx) dy.dz$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial C_A}{\partial t} = R_A - \frac{\partial J_A}{\partial x} \quad (49)$$

sendo

$$\dot{J}_A = \dot{J}_{Adiff} + \dot{J}_{Aconv} = -D_{AB}\frac{\partial C_A}{\partial x} + u.C_A \;\; \frac{mol}{m^2 s} \quad (50)$$

A eq. 49 descreve genericamente um processo de transferência de massa unidireccional em regime transiente. Existindo variação da concentração de A no tempo (regime transiente) e no espaço, é necessário, para resolver estas equações diferenciais, conhecer uma condição inicial (para t=0) e duas condições fronteira (visto haver uma derivada de 2ª ordem em x). Existem soluções analíticas para geometrias simples e condições fronteira simples, que permitem conhecer os perfis temporais e espaciais da concentração de A. Essas soluções envolvem as variáveis *x* (distância genérica), *L* (metade da espessura da placa), *t* (tempo), D_{AB} (difusividade mássica de A em B), C_{A0} (concentração do componente A no interior do volume de controlo para t=0), C_{AS} (concentração de A na fronteira do corpo) ou $C_{A\infty}$ (concentração de A no fluido envolvente do corpo). Para reduzir o número de parâmetros utilizam-se números adimensionais, tais como os apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Números adimensionais associados a processos de transferência de massa em estado transiente e/ou onde ocorre reacção química.

	Nº adimensional	
concentração adimensional	$\frac{C_{AS}-C_A(x,t)}{C_{AS}-C_{A0}}$	$C_A(x,t)$ – concentração de A no corpo (função da distância e do tempo)
distância adimensional	$X = \frac{x}{L}$	
tempo adimensional (número de Fourier para transferência de massa)	$Fo_m = \frac{D_{AB}.t}{L^2}$	
Módulo de Thiele	$\phi = \left(\frac{k_R.L^2}{D_{AB}}\right)^{1/2}$	k_R – constante cinética, s^{-1}

Número de Biot para transferência de massa	$Bi_m = \frac{m.k_{GL}.L}{D_{AB}}$	$C_A^F = m.C_{AS}$

a) caso da difusão unidimensional de pequenas quantidades de A através de B na ausência de reacção química (R_A=0) e de movimento sensível (u=0) com D_{AB} constante (2ª lei de Fick)

Substituindo a eq.50 na 49, obtém-se, respectivamente para coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}\right)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial C_A}{\partial r}\right) \qquad (51)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\left[\frac{1}{r^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C_A}{\partial r}\right)\right]$$

Para qualquer sistema de coordenadas e várias dimensões, a expressão genérica é

$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\nabla^2 C_A$ e $\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\nabla^2 C_A + R_A$ no caso de haver reacção.

A solução da eq. 51 é uma série infinita, sendo o 1º termo o mais significativo se Fo>0,2:

$$\frac{C_A(x,t)-C_{AS}}{C_{A0}-C_{AS}} = \frac{4}{\pi}\left(\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}e^{-n^2\lambda_1^2 Fo}sin(n.\lambda_1.x/L)\right) \qquad (52)$$
$$n = 1,3,5... \;\; \lambda_1 = \frac{\pi}{2}$$

Após o tempo t_F, a concentração média na placa é dada por:

$$\bar{C}_A(t) = \frac{1}{L}\int_0^L C_A(x,t)dx$$

$$\Rightarrow \frac{\bar{C}_A(t)-C_{AS}}{C_{A0}-C_{AS}} = \frac{8}{\pi^2}\left(\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}e^{-n^2\lambda_1^2 D_{AB}t_F/L^2}\right) n = 1,3,5...$$

A figura 24 mostra a variação da concentração média de A no interior da placa ao longo do tempo, quando a superfície da placa sobre uma alteração brusca de concentração desde C_{A0} (t=0) para o valor de C_{AS}. Para comparação são igualmente representadas na mesma figura as evoluções temporais no caso das geometrias cilíndrica e esférica. Como se pode ver, a forma esférica é a que permite maior rapidez na evolução dessa concentração.

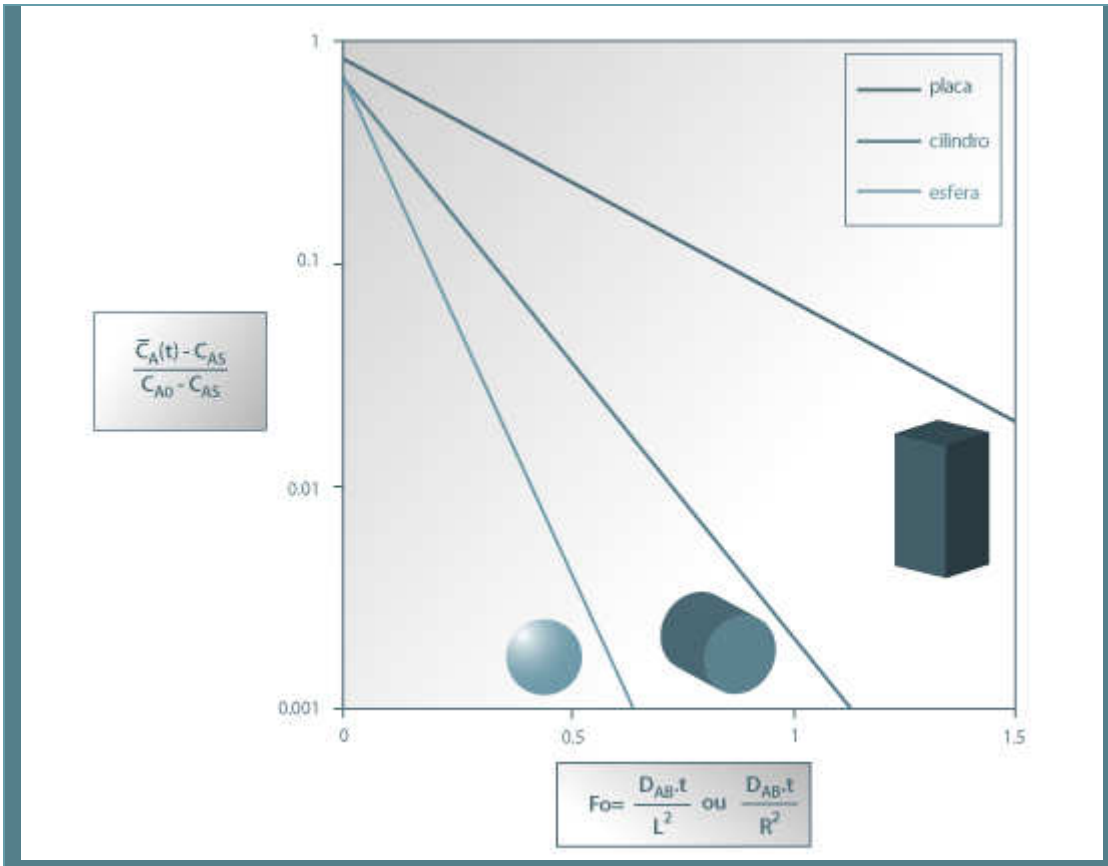


Figura 24: Evolução da concentração média espacial de A ao longo do tempo – comparação entre três formas geométricas (placa, cilindro infinito e esfera).

b) caso da difusão de A unidimensional num meio homogéneo onde ocorre reacção química de 1ª ordem, irreversível (R_A= -$k_R.C_A$), em estado estacionário, na ausência de movimento sensível e sendo D_{AB} constante.

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = \frac{k_R}{D_{AB}} C_A$$ C_A=C_{AS} para x=0 ; dC_A/dx=0 para x=L (eixo de simetria)

$$\frac{C_A(x,t)}{C_{AS}} = \frac{cosh(\phi - \phi(x/L))}{cosh(\phi)} \qquad \phi = \left(\frac{k_R - L^2}{D_{AB}}\right)^{1/2}$$

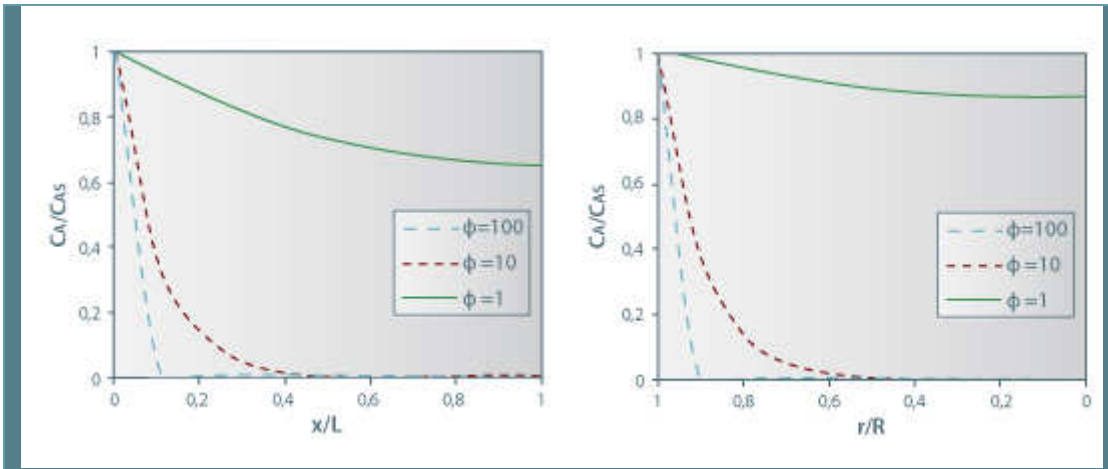


Figura 25: Evolução espacial da concentração de A para diferentes valores do módulo de Thiele (simetria plana, à esquerda, e esférica, à direita).

A figura 25 mostra a evolução espacial da concentração de A para diferentes valores do módulo de Thiele. Quando a velocidade da reacção é elevada (por exemplo, Φ=100) o componente A é totalmente consumido a uma curta distância da fronteira (x/L=0,1), ao contrário do caso em que a reacção é lenta (por exemplo, Φ=1).

c) Difusão radial de A através dos poros de um catalisador esférico onde ocorre reacção química de 1ª ordem (R_A= -k_R.C_A), em estado estacionário, na ausência de movimento sensível e sendo D_{eff} constante

$$D_{eff}\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C_A}{\partial r}\right)-k_R C_A=0$$

C_A=C_{AS} para r=R ; dC_A/dr=0 para r=0

A solução é:

$$\frac{C_A(r,t)}{C_{AS}}=\frac{R}{r}\frac{sinh(\phi.r/R)}{sinh(\phi)} \qquad \phi=\left(\frac{k_R-R^2}{D_{eff}}\right)^{1/2}$$

A figura 25 mostra, também para este caso, a evolução espacial da concentração de A para diferentes valores do módulo de Thiele. Na secção de “Reacção Química ”, são apresentados casos de aplicação destes processos que envolvem reacção.

d) Exemplo de aplicação:

Uma placa sólida porosa de agar (gel) a 278 K, com 10 mm de espessura, contém uma concentração uniforme de ureia igual a 0,1 kmol/m^3. A placa é subitamente imersa em água pura agitada de tal forma que a resistência superficial à transferência de massa possa ser desprezada ($k_L \rightarrow \infty$). A difusividade da ureia em agar é $4{,}72\times10^{-10}$ m^2/s. Supondo que a difusão ocorre na direcção perpendicular às faces de maior área, e que as concentrações de um lado e de outro da interface água/agar são iguais, desenhe o perfil de concentração de A após 10h.

Aplica-se a eq. 52, considerando apenas o 1º termo da série (o erro cometido é pequeno se Fo>0,2) e sendo C_{AS}=0 e C_{A0}=100 mol/m^3:

$$\frac{C_A(x,t)-C_{AS}}{C_{A0}-C_{AS}}=\frac{4}{\pi}\left(e^{-\lambda_1^2 Fo}.sin(\lambda_1 x/L)\right) \quad se\ \ Fo>0,2\ \ (\lambda_1=\tfrac{\pi}{2})$$

O perfil de concentrações está representado na Figura 26.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

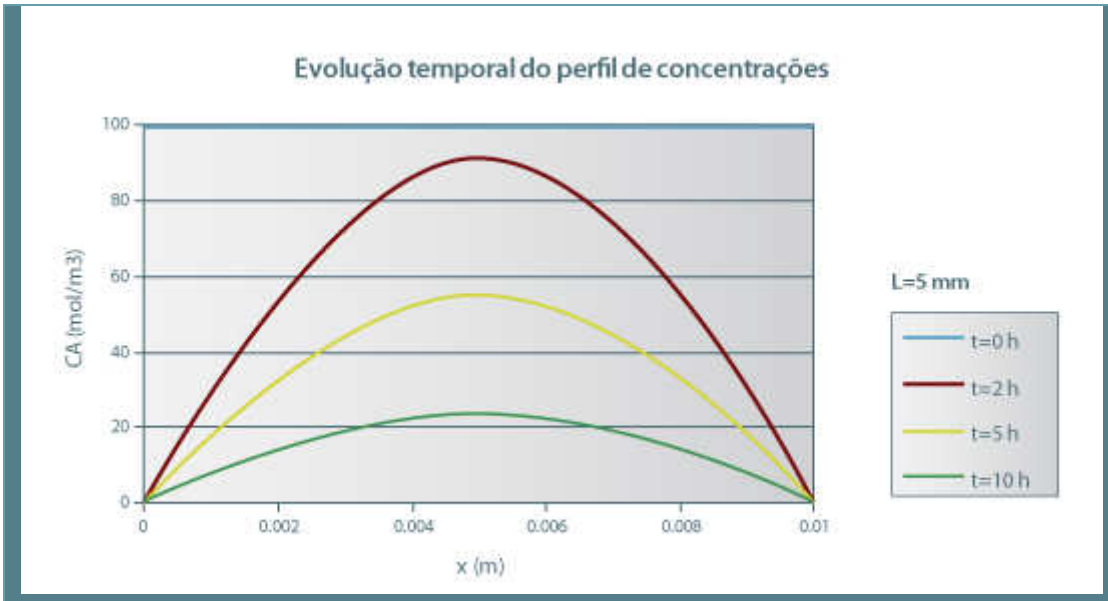


Figura 26: Evolução temporal do perfil de concentrações de ureia numa placa de agar com 10 mm de espessura, colocada em água pura para t=0.

2.8 SEMELHANÇAS ENTRE PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA

Os vários Processos de Separação existentes, não só com a finalidade de purificar correntes mas também para produzir compostos, podem ser agrupados quanto ao processo de transferência predominante: transferência de quantidade de movimento, transferência de calor e transferência de massa. Nalguns, como a secagem, ocorre mais do que um processo de transferência em simultâneo (Fig.27). Operações que envolvem transferência de quantidade de movimento são, por exemplo, o escoamento de fluidos, o processo de mistura, a sedimentação, ou a filtração. Como operações que envolvem transferência de calor pode-se referir a transferência de calor nos permutadores de calor, a evaporação, a destilação, a secagem. Como exemplo de operações que envolvem transferência de massa, refira-se a destilação, a secagem, a absorção, a extracção, a adsorção, os processos com membranas.

Os três processos são caracterizados pelo mesmo tipo de equação geral:

$$velocidade\ de\ transferência = \frac{driving-force}{resistência}$$

A Tabela 6 mostra as semelhanças entre os diferentes processos, respectivas *driving-forces* e equações básicas.

Tabela 6 – Semelhanças entre os processos de transferência.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

fluxo	*Driving-force (d.f.)*	Transporte molecular (gradientes numa parede)	Coeficientes
Escoamento de um fluido	ΔP	$\tau_s = -\nu\left(\frac{d(u.\rho)}{dy}\right)_S = \left(\frac{D}{4}\right)\left(-\frac{\Delta P}{L}\right)$	$\tau_s = \frac{c_f.\rho.u^2}{2}$
T. calor	ΔT	$\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_S = -k\left(\frac{dT}{dy}\right)_S = -\alpha\left(\frac{d(\rho.c_p.T)}{dy}\right)_S$	$\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_S = h\Delta T$
T. massa	ΔC_A	$\left(\frac{\dot{N}_A}{A}\right)_S = -D_{AB}\left(\frac{dC_A}{dy}\right)_S, C_{total}\,cte$	$\left(\frac{\dot{N}_A}{A}\right)_S = k_{G,L}\Delta C_A$

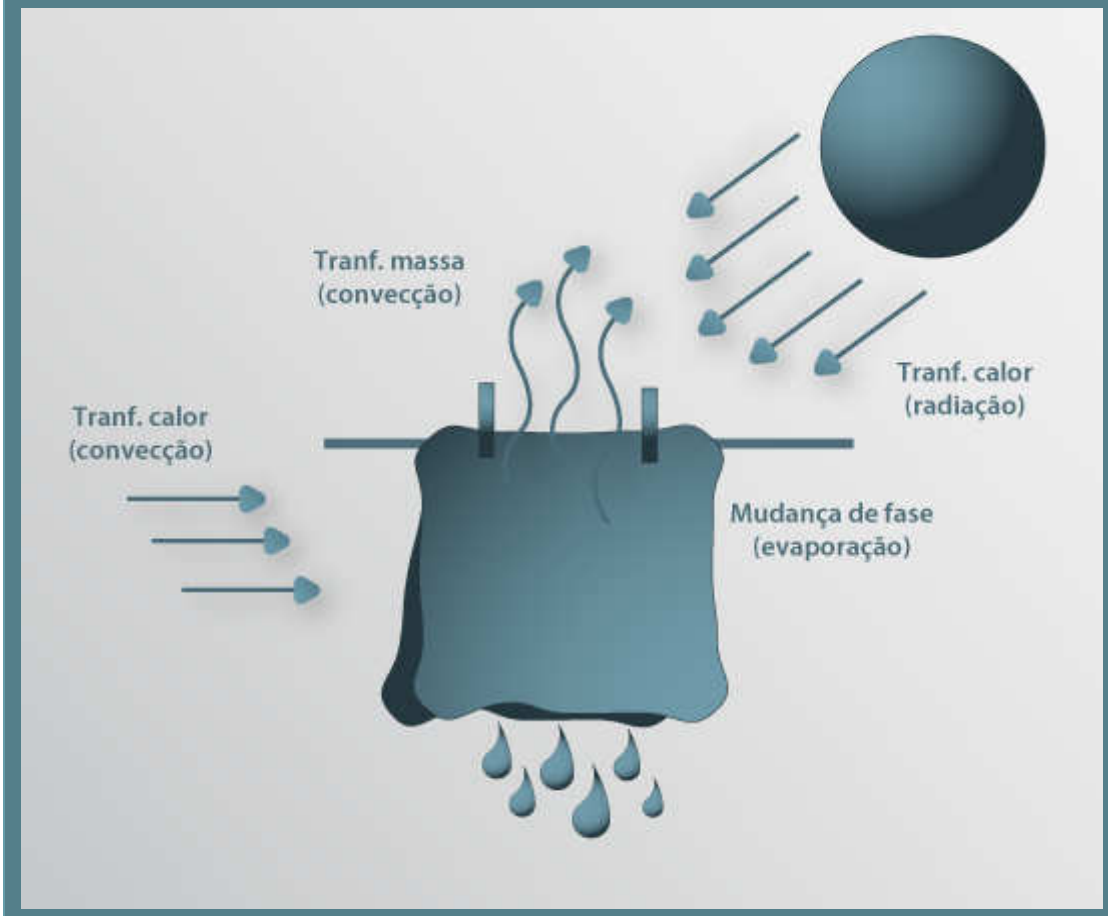


Figura 27: Processo de secagem de roupa, mostrando os diversos processos de transferência e respectivos mecanismos.

Maxshopping10 – Direitos Reservados
maxshopping10@gmail.com

ATENÇÃO: **A comercialização desta apostila é exclusiva de MAXSHOPPING10, caso você a tenha comprado através de outro vendedor, favor envie um e-mail para maxshopping10@gmail.com com uma denúncia. Esta medida visa coibir o plágio e dar início às medidas cabíveis contra aqueles que usam de má fé, utilizando nicks falsos para comprar e depois revender no site, passando-se por autor de meu material.**

OBRIGADO E BOA SORTE!