Patologia das Fundações

Alexandre Duarte Gusmão, D.Sc.

POLI-UPE, CEFET-PE

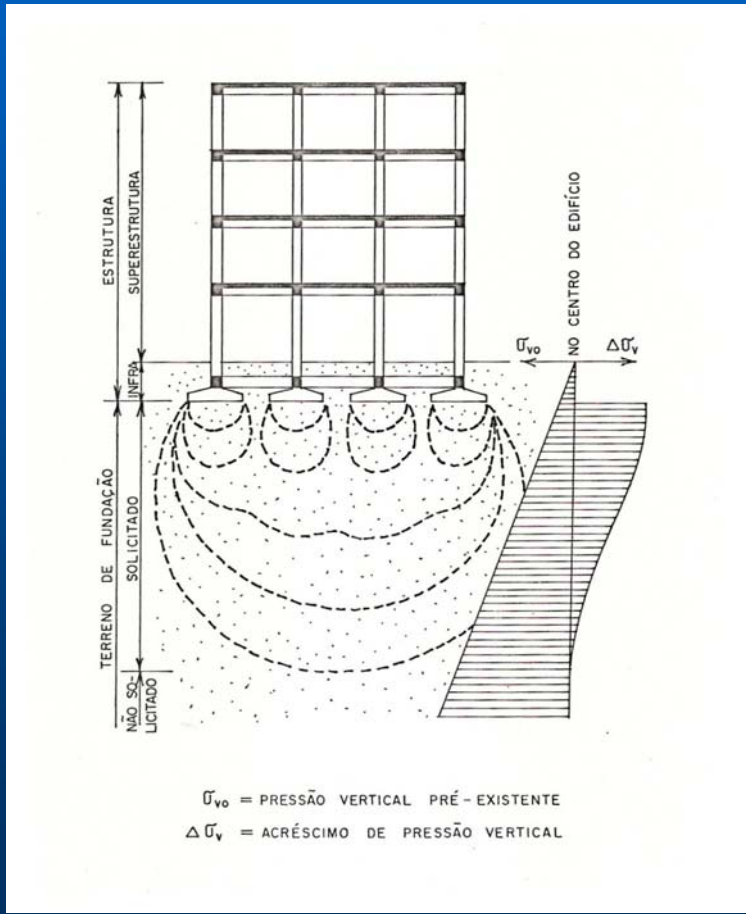
Gusmão Engenheiros Associados

Apresentação

- Introdução
- Segurança das fundações
- Movimentos da fundação
- Recalque da fundação
- Tipos de Danos
- Levantamento de Danos
- Diagnóstico
- Movimentos Admissíveis
- Monitoramento de Obras

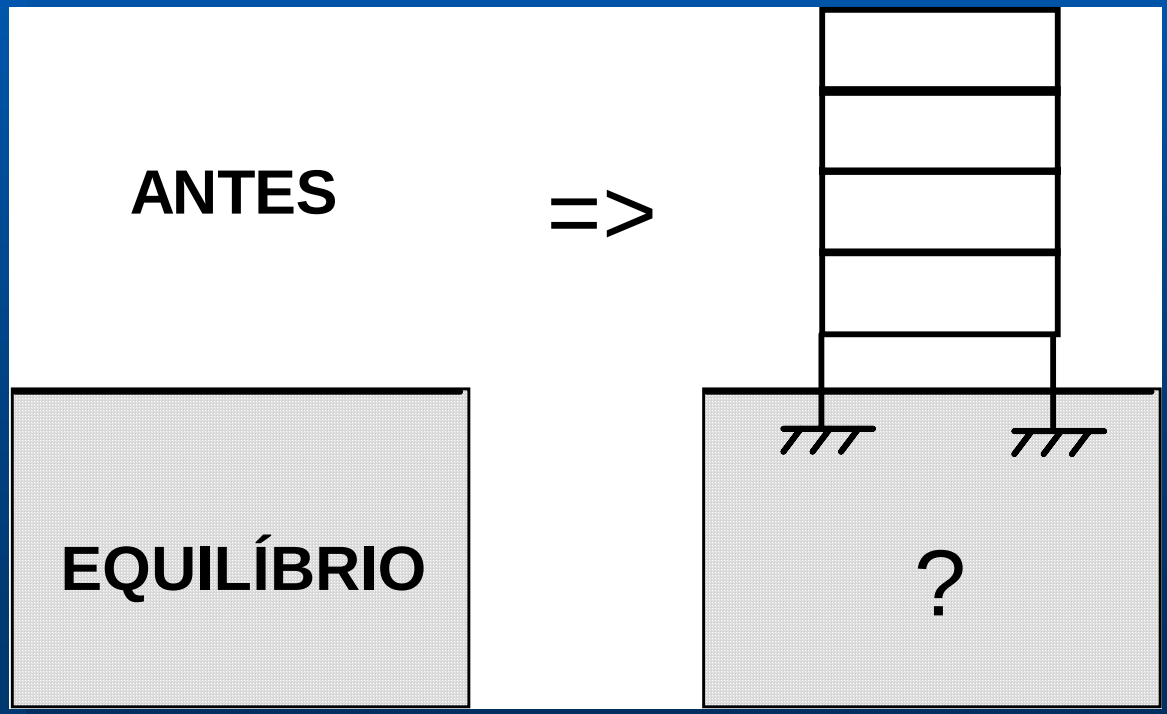
Introdução

Partes de uma edificação

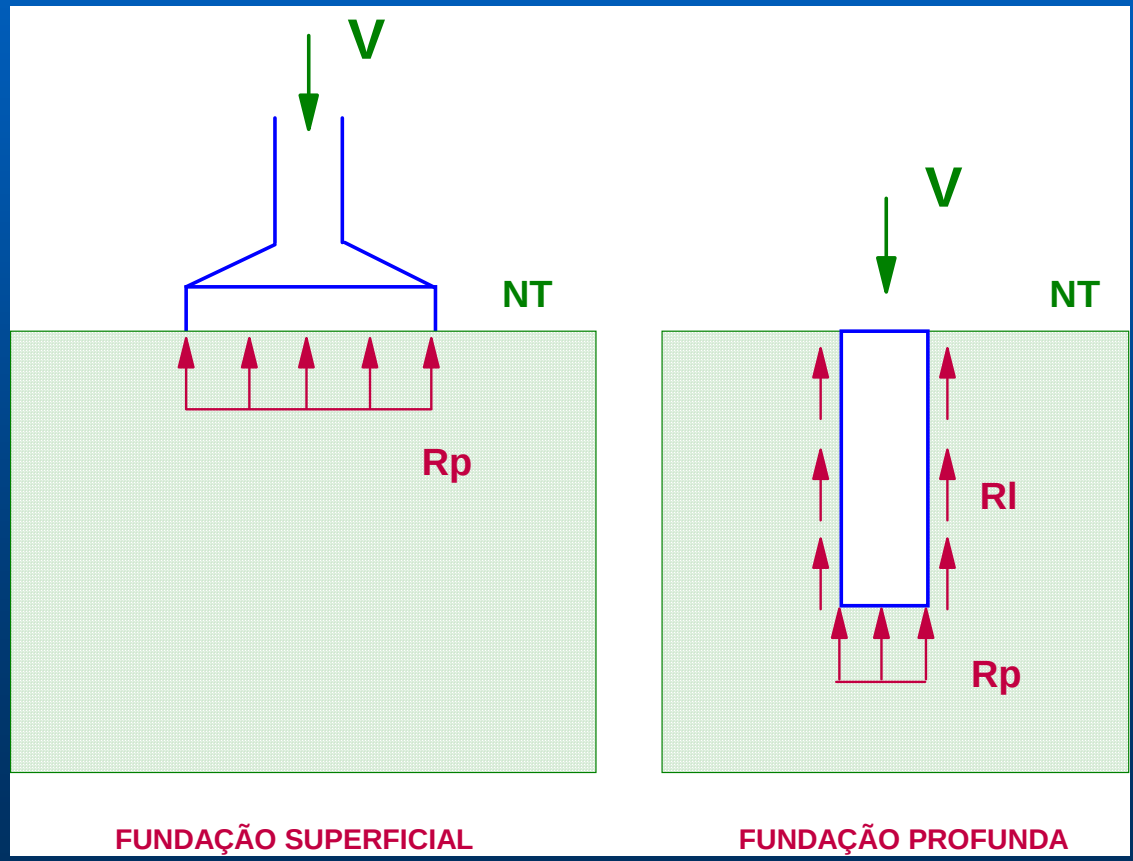


Conceito de Fundações

- **A fundação é responsável pela transferência das cargas ao terreno**

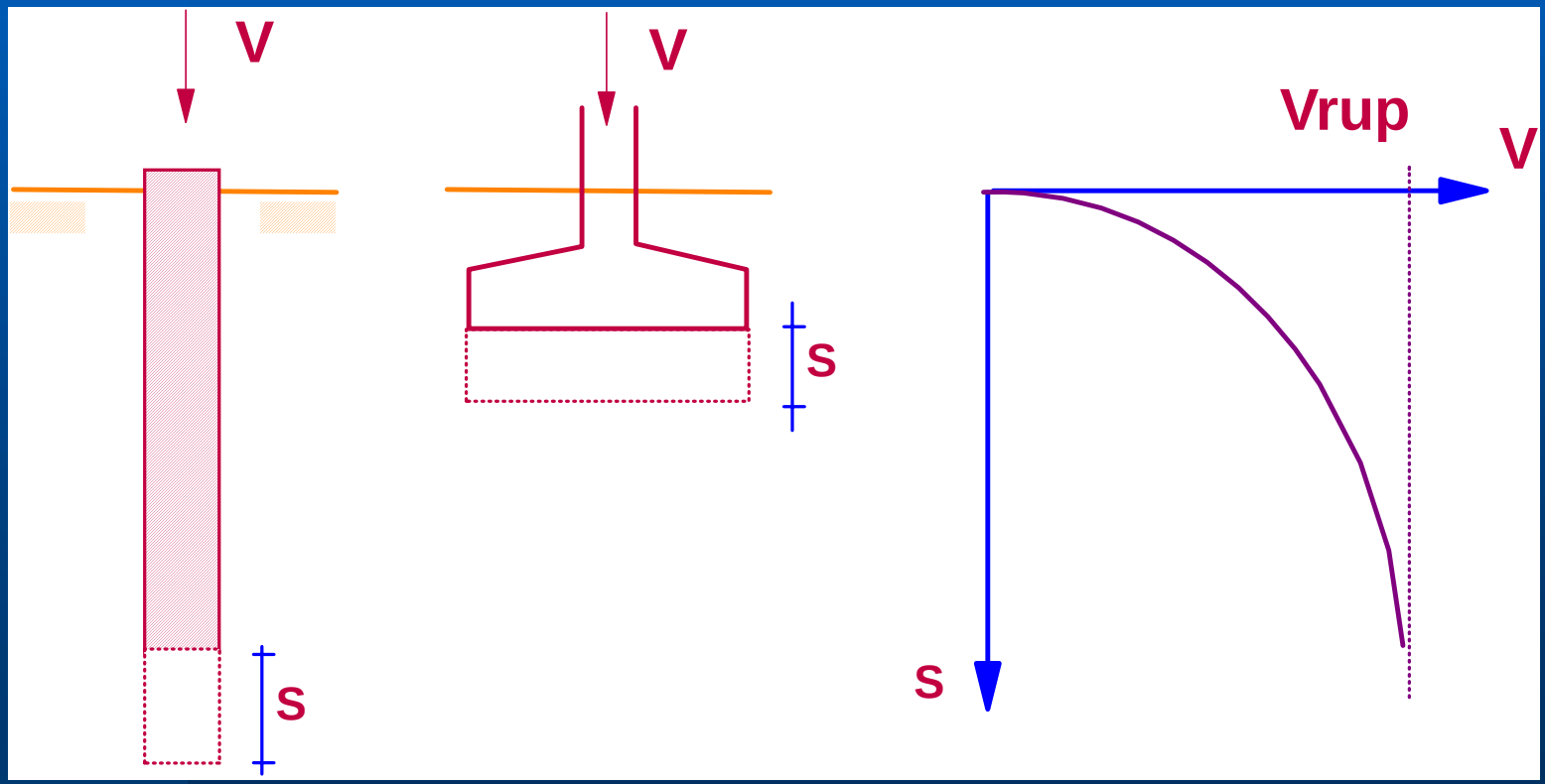


Tipos de Fundações



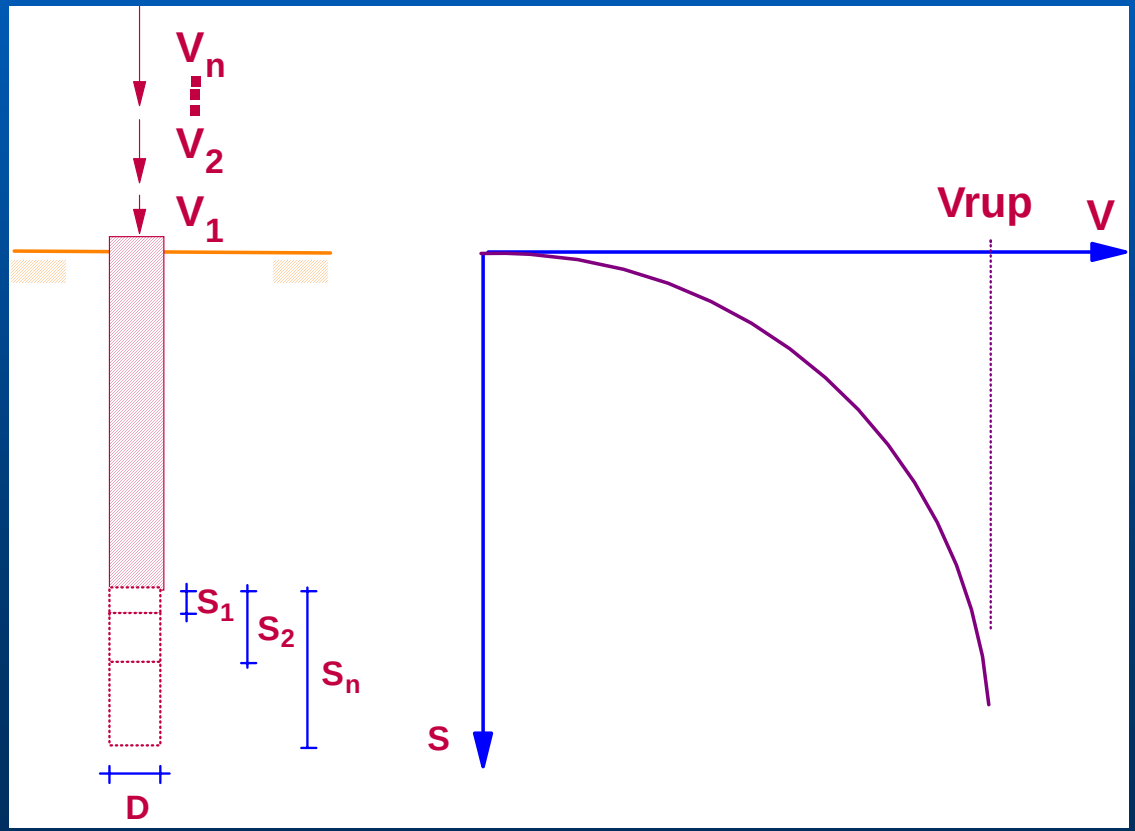
Comportamento das Fundações

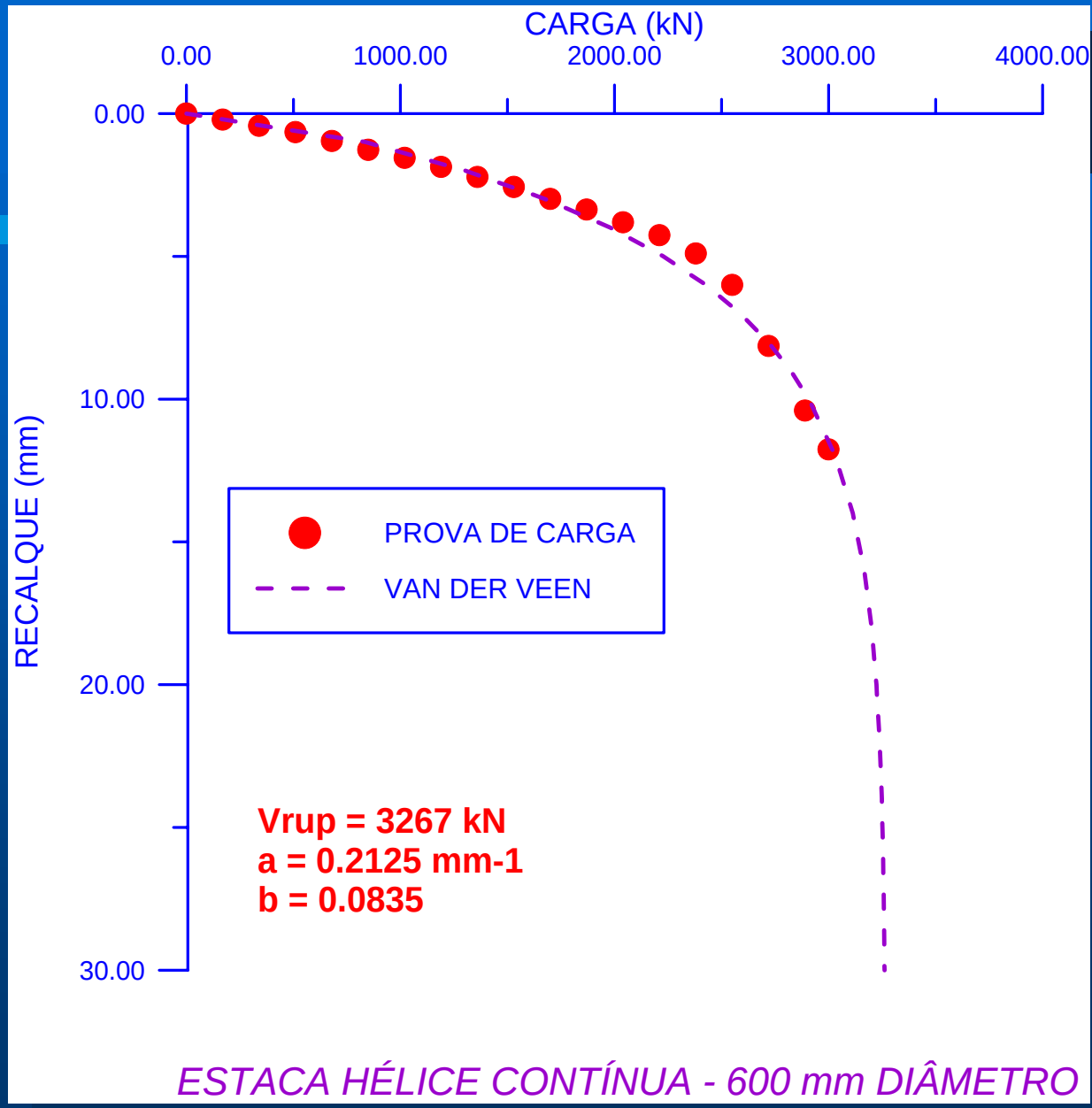
- **Transferência de carga**



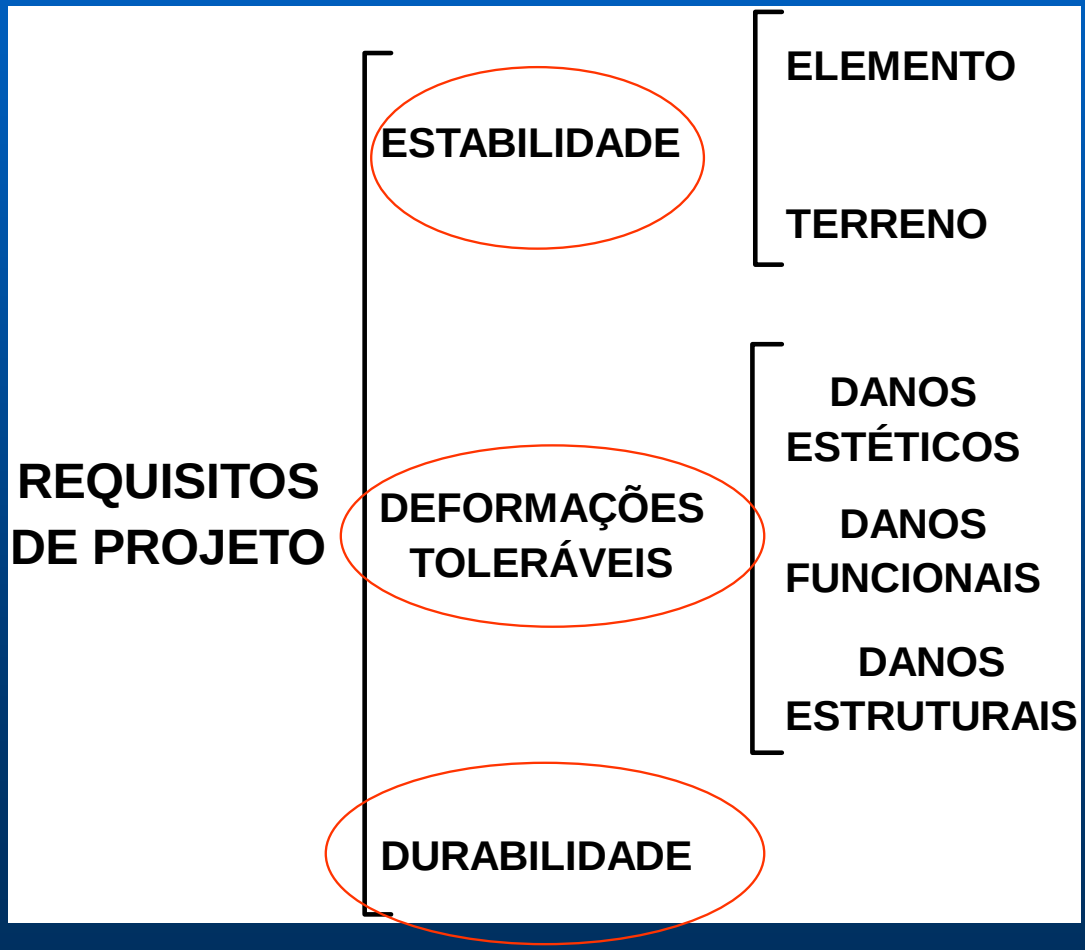
Comportamento das Fundações

- **Prova de carga estática em estaca**




CARGA (kN)
0.00
1000.00
2000.00
3000.00
4000.00
0.00
10.00
20.00
30.00
RECALQUE (mm)
PROVA DE CARGA
VAN DER VEEN
Vrup = 3267 kN
a = 0.2125 mm-1
b = 0.0835
ESTACA HÉLICE CONTÍNUA - 600 mm DIÂMETRO

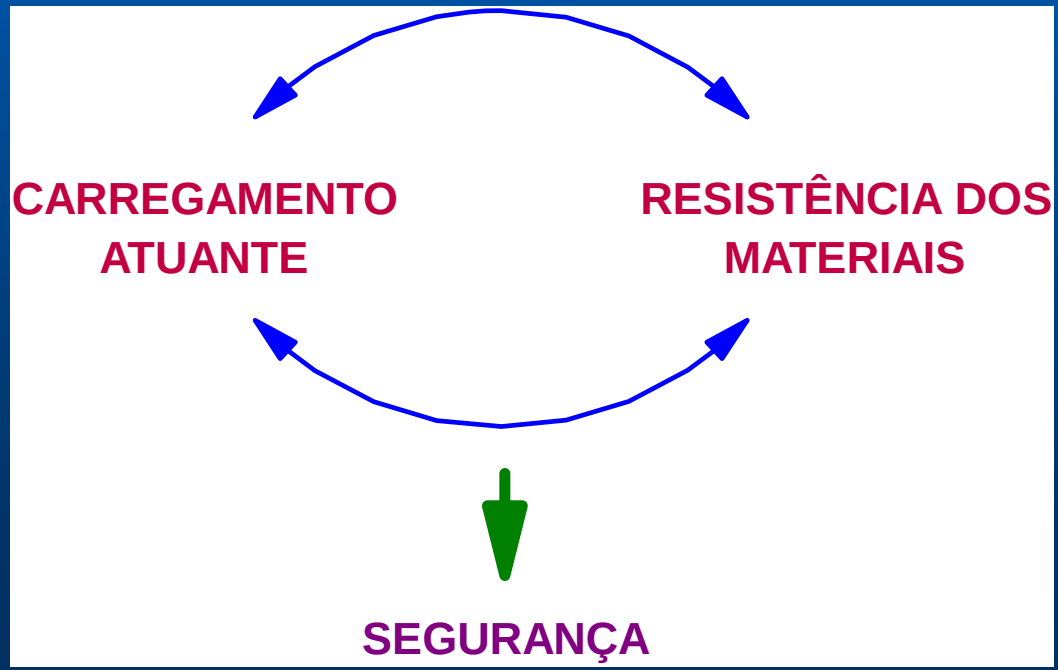
Requisitos de Projeto



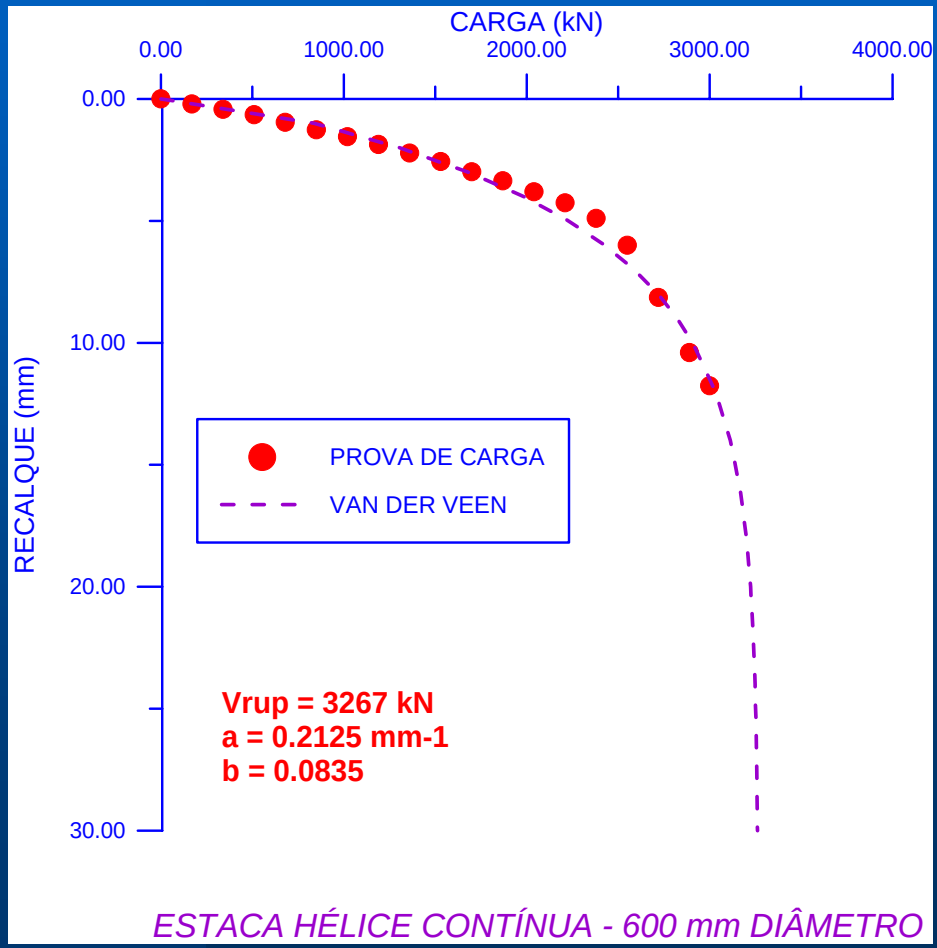
Segurança das Fundações

Conceito

- **A segurança está sempre relacionada ao binômio carga-resistência dos materiais.**



Análise Determinística

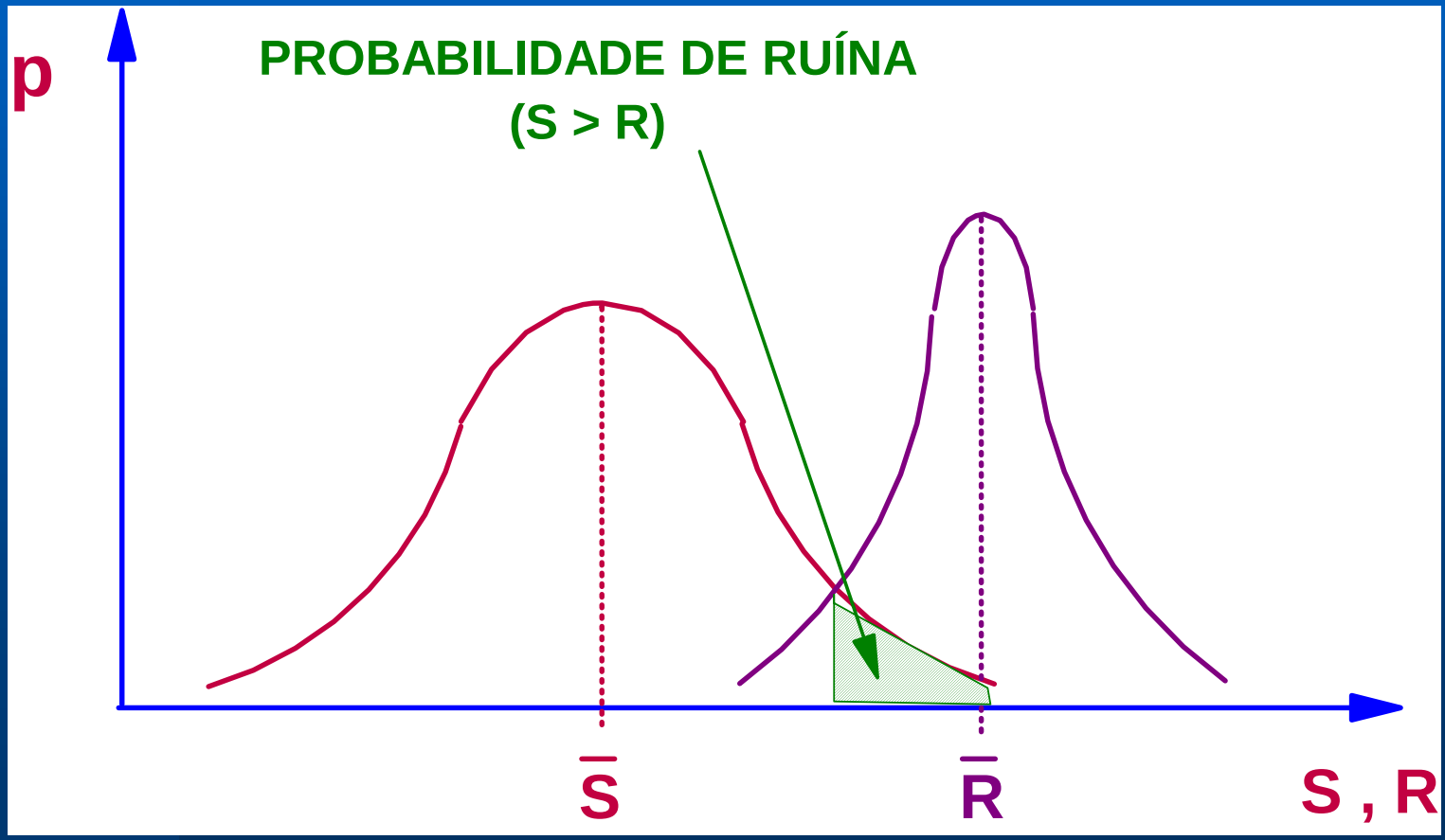


- **FS = ?**
- **Vadm = ?**
- **Custos ?**
- **Segurança ?**

CUSTOS

SEGURANÇA

Análise Probabilística



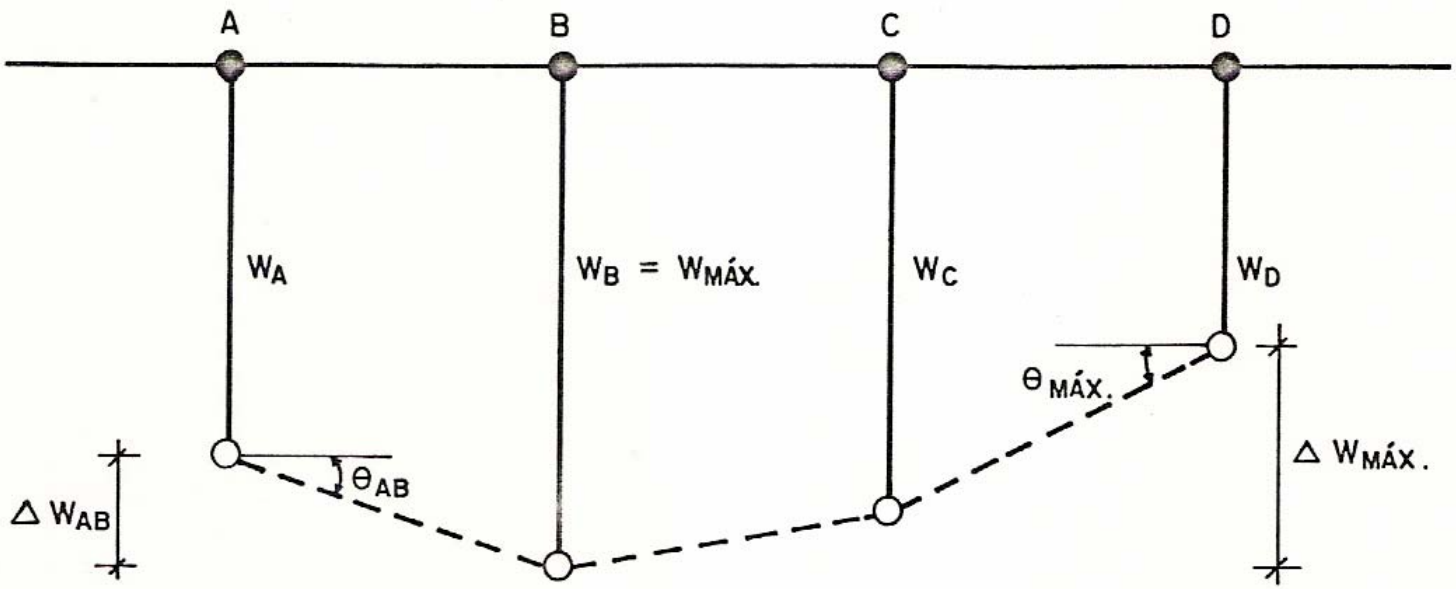
Exercício Profissional

- **Insucesso ?**
- **Seguro profissional ?**

“O exercício profissional é um grande desafio”

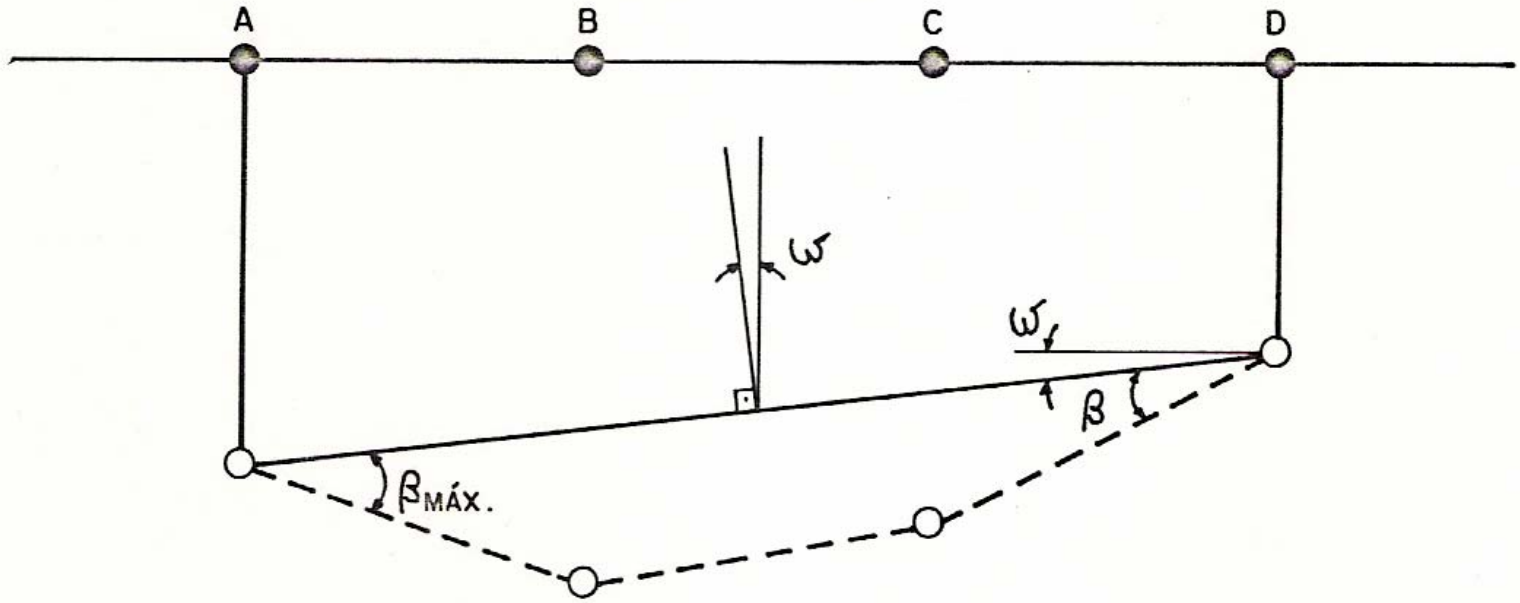
Movimentos da Fundação

Terminologia



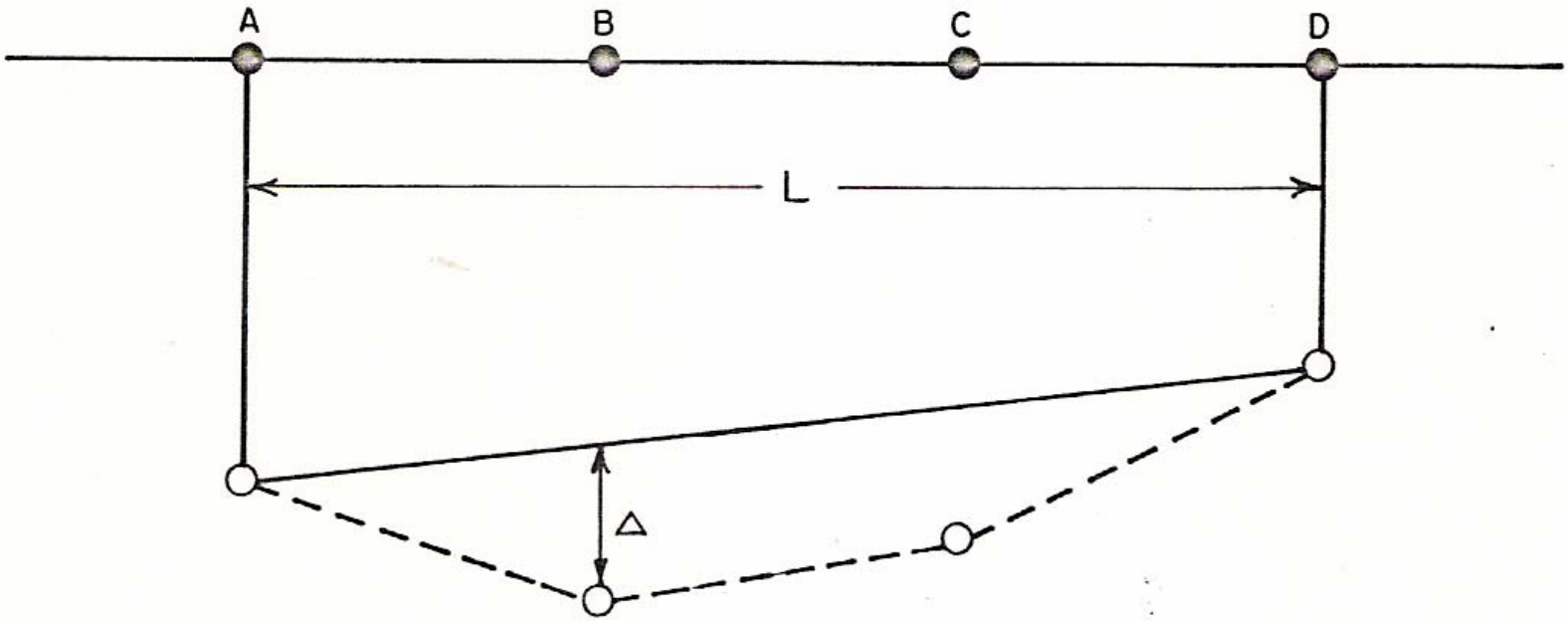
a) DEFINIÇÕES DE RECALQUE ABSOLUTO, RECALQUE DIFERENCIAL E ROTAÇÃO.

Terminologia



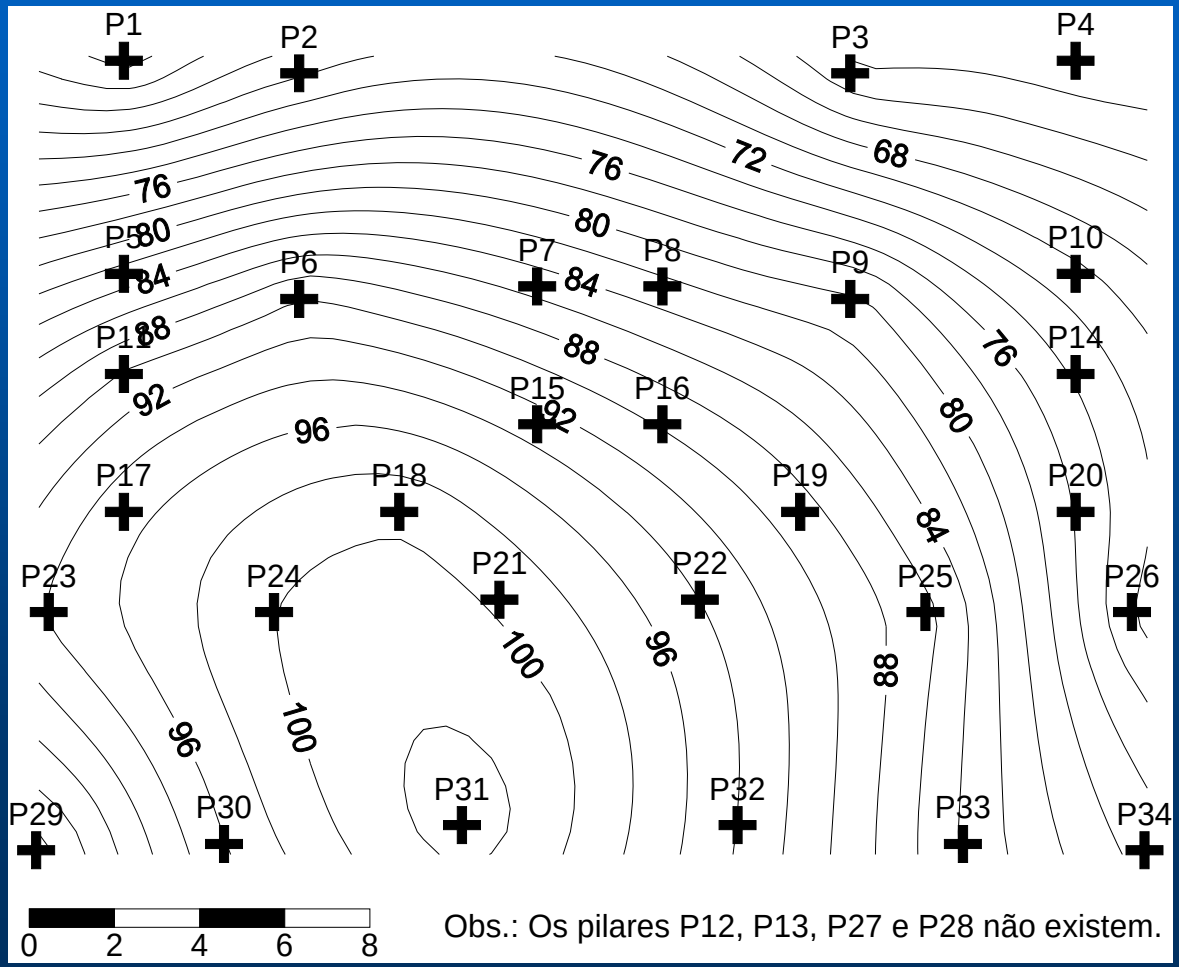
b) DEFINIÇÕES DE INCLINAÇÃO E ROTAÇÃO RELATIVA .

Terminologia



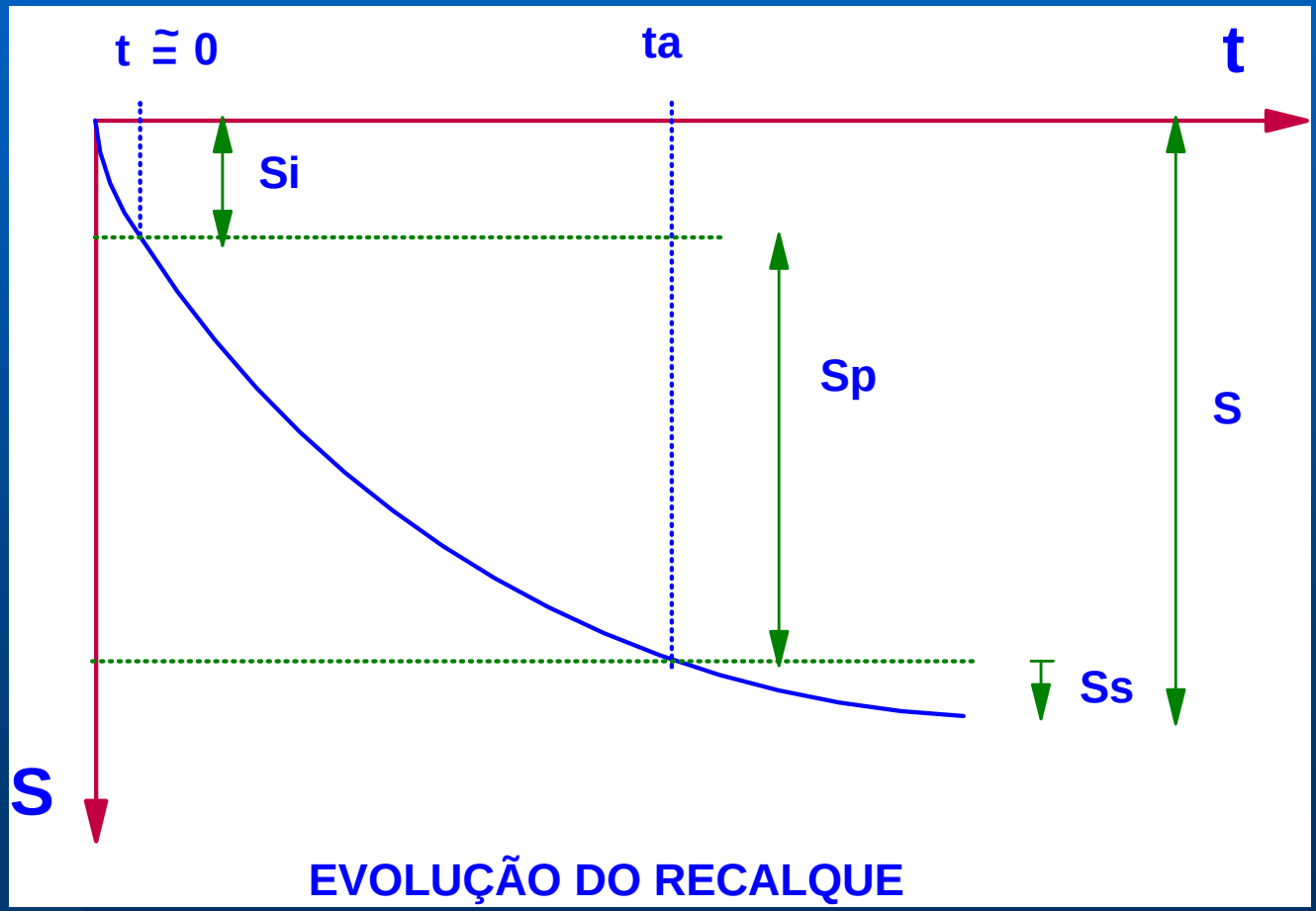
c) DEFINIÇÃO DE DEFLEXÃO RELATIVA .

Caso de Obra


P1
P2
P3
P4
P5
P6
P7
P8
P9
P10
P14
P15
P16
P17
P18
P19
P20
P21
P22
P23
P24
P25
P26
P29
P30
P31
P32
P33
P34
76
72
68
80
84
88
92
96
100
0
2
4
6
8
Obs.: Os pilares P12, P13, P27 e P28 não existem.

Recalque da Fundação

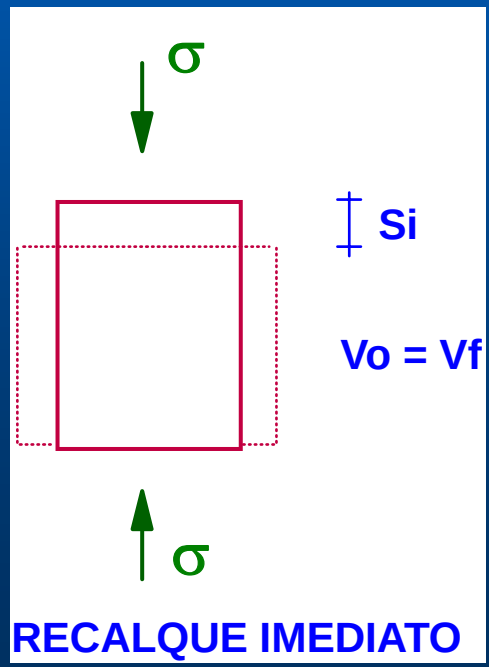
Tipos de Recalques



EVOLUÇÃO DO RECALQUE

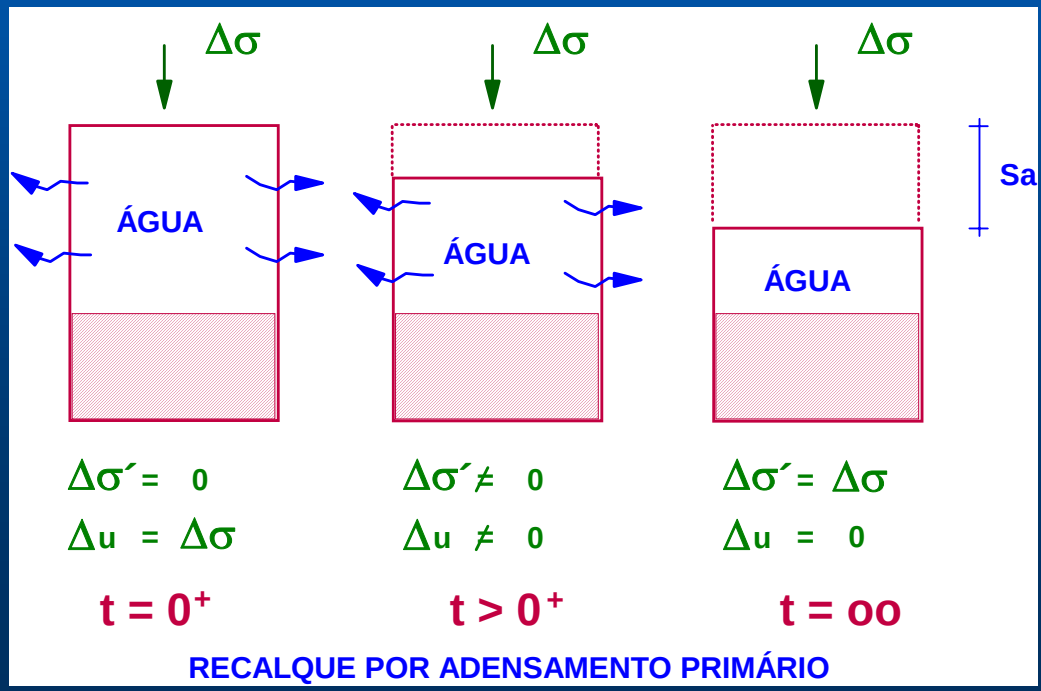
Recalque Imediato

- **Ocorre logo após o carregamento**
- **Mais importante em solos arenosos**



Recalque por Adensamento Primário

- **Expulsão da água dos vazios**
- **Mais importante em solos argilosos**





PONTE TORRE-PARNAMIRIM

Recalque por Adensamento Secundário

- **Compressão visco-plástica do esqueleto sólido**
- **Mais importante em solos orgânicos**

Importância Relativa

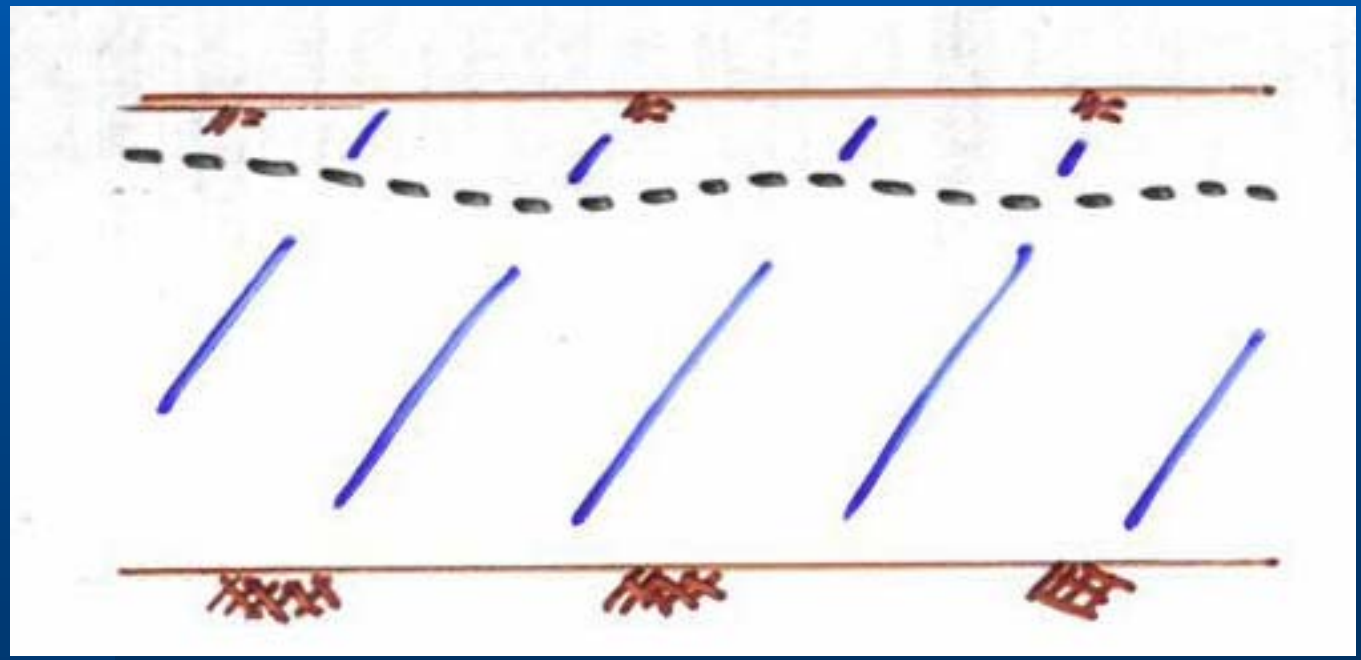
TIPO DE SOLO	RECALQUE IMEDIATO	ADENSAMENTO PRIMÁRIO	ADENSAMENTO SECUNDÁRIO
Areias	SIM	NÃO	NÃO
Argilas	POSSÍVEL (NÃO)	SIM	POSSÍVEL (SIM)
Solos Orgânicos	POSSÍVEL (SIM)	POSSÍVEL (NÃO)	SIM

Causas dos Recalques

Tipo	Discriminação	Exemplo
Carregamento	Estático Dinâmico	Própria obra e obras vizinhas Máquinas, veículos, etc.
Variação de umidade	Variação sazonal Drenagem Cortes no relevo Barragem	Chuva Seca prolongada Absorção por plantas Evaporação Regularização rios e canais Rebaixamento do NA
Métodos de construção	Escavação Rebaixamento do NA Cravação de estacas Execução aterros Ruptura de peças	Cavas superficiais, túneis e galerias Camada mole, erosão interna e gradiente crítico
Condições ambientais	Fatores geológicos Erosão Elementos biológicos Deterioração do elem. estrutural	

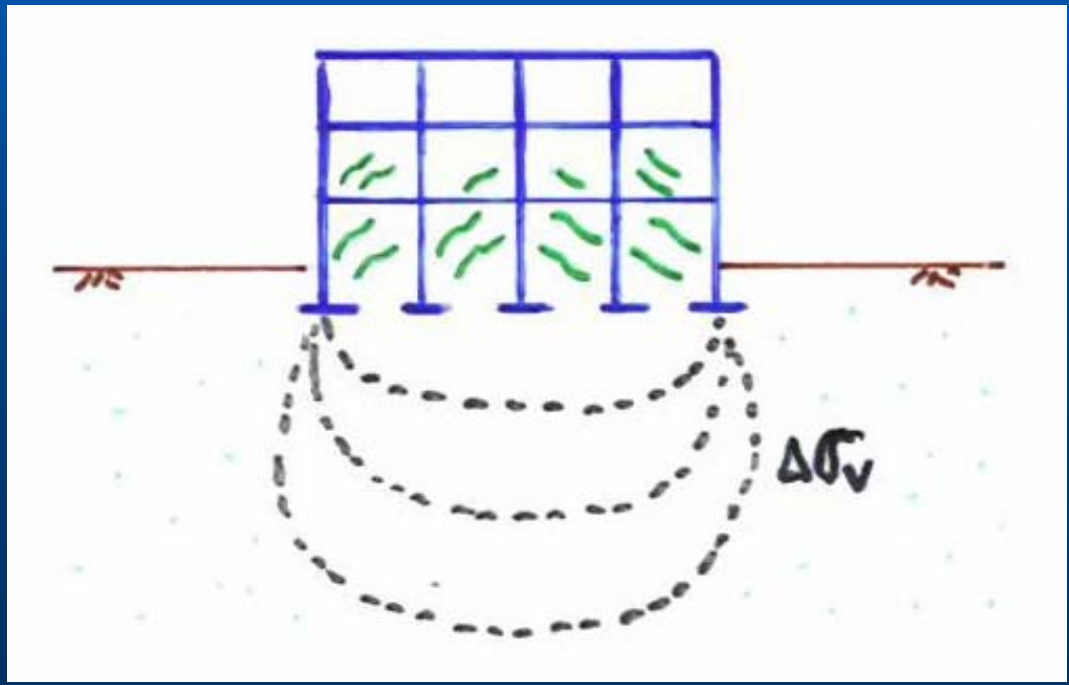
Carga Estática

- **Peso próprio do solo: argilas parcial-mente adensadas**



Carga Estática

- **Pressões transmitidas pelas fundações: edifícios**





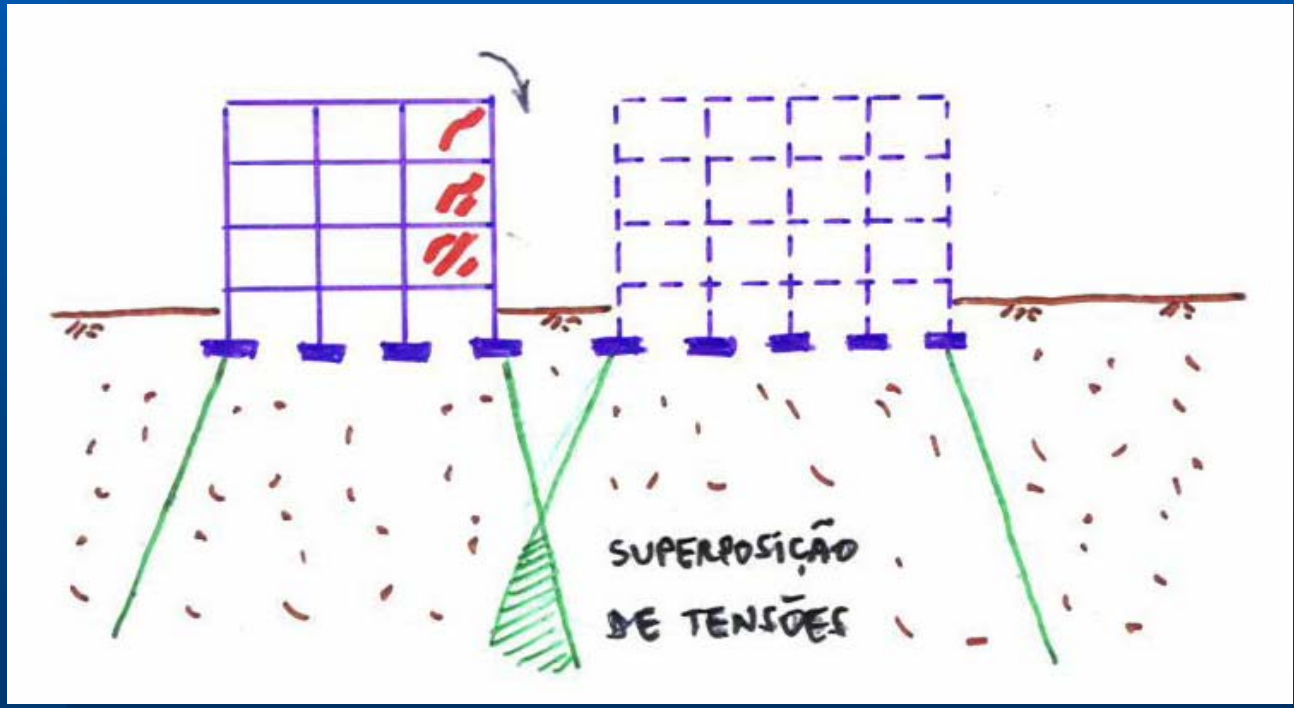
EDIFÍCIO EM JABOATÃO / PE



EDIFÍCIO EM JABOATÃO / PE

Carga Estática

- **Pressões transmitidas pelas fundações: edifícios vizinhos**

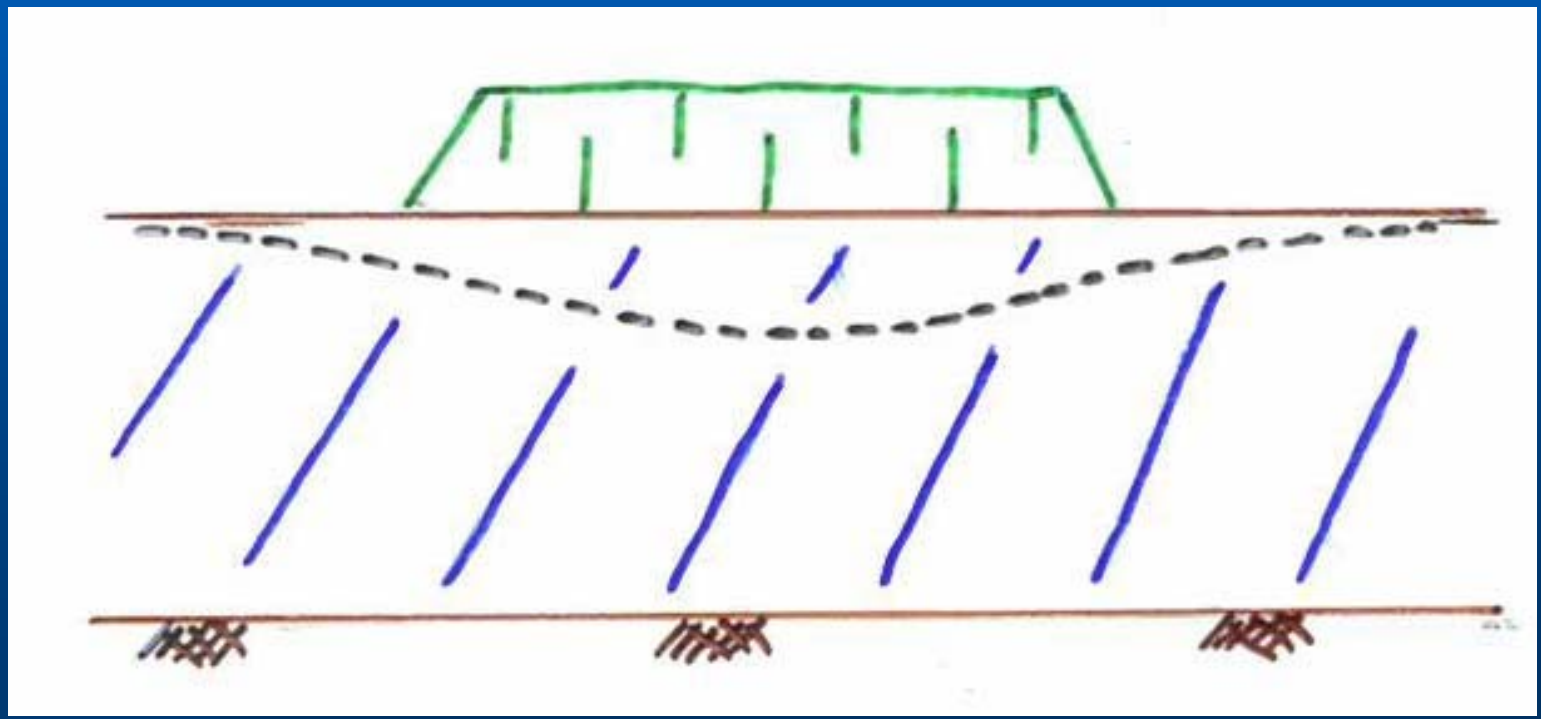


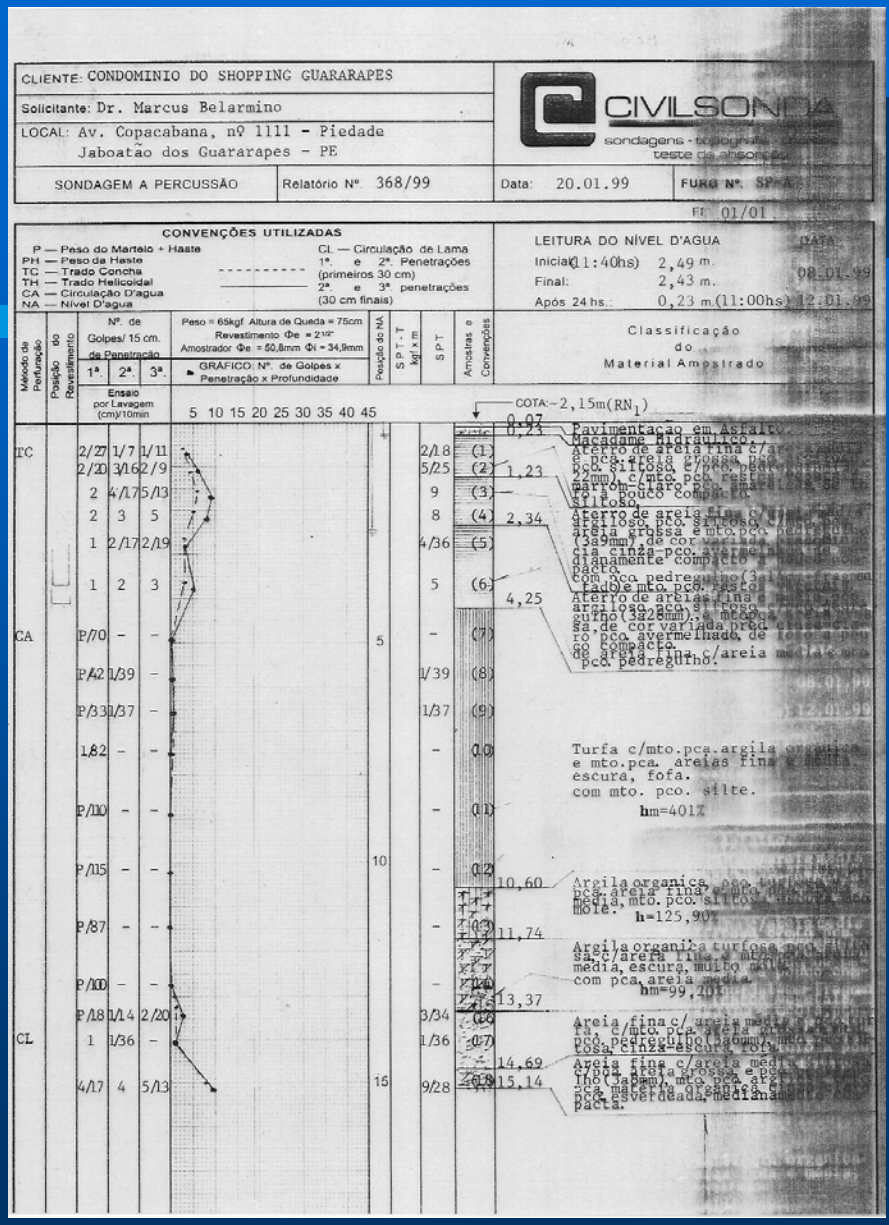


EDIFÍCIOS EM SANTOS / SP

Carga Estática

- **Aterros:** **Shopping Guararapes**





CLIENTE: CONDOMINIO DO SHOPPING GUARARAPES

Solicitante: Dr. Marcus Belarmino

LOCAL: Av. Copacabana, nº 1111 - Piedade
Jaboatão dos Guararapes - PE

CIVILSONDA
sondagens - topografia
teste de absorção

SONDAGEM A PERCUSSÃO | Relatório Nº 368/99 | Data: 20.01.99 | FURO Nº SP-A

Fl. 01/01

CONVENÇÕES UTILIZADAS

P — Peso do Martelo + Haste
PH — Peso da Haste
TC — Trado Concha
TH — Trado Helicoidal
CA — Circulação D'agua
NA — Nível D'agua
CL — Circulação de Lama
1ª. e 2ª. Penetrações (primeiros 30 cm)
2ª. e 3ª. penetrações (30 cm finais)

LEITURA DO NÍVEL D'AGUA — DATA

Inicial (11:40hs) 2,49 m 08.01.99
Final: 2,43 m.
Após 24 hs.: 0,23 m.(11:00hs) 12.01.99

Método de Perfuração | Posição do Revestimento | Nº. de Golpes/ 15 cm. de Penetração 1ª. 2ª. 3ª. | Peso = 65kgf Altura de Queda = 75cm; Revestimento Φe = 2½"; Amostrador Φe = 50,8mm Φi = 34,9mm; GRÁFICO: Nº. de Golpes x Penetração x Profundidade | Posição do NA | S P T - T kgf x m | S P T | Amostras e Convenções | Classificação do Material Amostrado

Ensaio por Lavagem (cm)/10min

5 10 15 20 25 30 35 40 45

COTA: -2,15m (RN_1)

TC		2/27	1/7	1/11			2/18	(1)	0,97 Pavimentação em Asfalto. Macadame Hidraulico. Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a22mm), c/mto pco. resto de tijolo, cinza-escuro, fofa.
		2/20	3/16	2/9			5/25	(2)	1,23 Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a22mm), c/mto pco. resto de tijolo, cinza-escuro, fofa.
		2	4/17	5/13			9	(3)	Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a22mm), c/mto pco. resto de tijolo, marrom-claro, pouco compacto.
		2	3	5			8	(4)	2,34 Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a22mm), c/mto pco. resto de tijolo, marrom-claro, pouco compacto.
		1	2/17	2/19			4/36	(5)	Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a9mm), de cor variada predominancia cinza-escuro, pco. avermelhado, fofa, medianamente compacto a compacto.
		1	2	3			5	(6)	4,25 Aterro de areia fina c/areia grossa e pco. siltoso, c/pco. pedregulho (3a28mm), c/mto pco. resto de tijolo, de cor variada predominancia cinza-escuro, pco. avermelhado, de fofo a pouco compacto.
CA		P/70	-	-			-	(7)	Aterro de areia fina c/areia media e pco. pedregulho.
		P/42	1/39	-			1/39	(8)	
		P/33	1/37	-			1/37	(9)	
		1/82	-	-			-	(10)	Turfa c/mto.pca.argila organica e mto.pca. areias fina e media escura, fofa. com mto. pco. silte. hm=401%
		P/100	-	-			-	(11)	
		P/115	-	-			-	(12)	10,60 Argila organica, pco. turfosa, pca. areia fina, pca. areia media, mto. pco. silte, cinza-escuro, mole. h=125,90%
		P/87	-	-			-	(13)	11,74 Argila organica turfosa, pco. areia fina e mto. pca. areia media, escura, muito mole, com pca. areia media. hm=99,20%
		P/100	-	-			-	(14)	13,37
		P/18	1/14	2/20			3/34	(15)	Areia fina c/ areia media e pedregulho fino, c/mto. pca. argila e pco. pedregulho (3a9mm), mto. pco. siltosa, cinza-escura, fofa.
CL		1	1/36	-			1/36	(16)	14,69 Areia fina c/areia media e grossa, areia grossa e pedregulho (3a9mm), mto. pca. argila e pco. pedregulho de diabasio, pco. siltosa, cinza-escura, fofa.
		4/17	4	5/13			9/28	(17)	15,14 Areia fina c/areia media e grossa, areia grossa e pedregulho (3a9mm), mto. pca. argila e pco. pedregulho de diabasio, pco. siltosa, cinza-escura, fofa.
								(18)	Areia fina c/areia media e grossa, areia grossa e pedregulho (3a9mm), mto. pca. argila e pco. pedregulho de diabasio, pco. siltosa, cinza-escura, fofa.

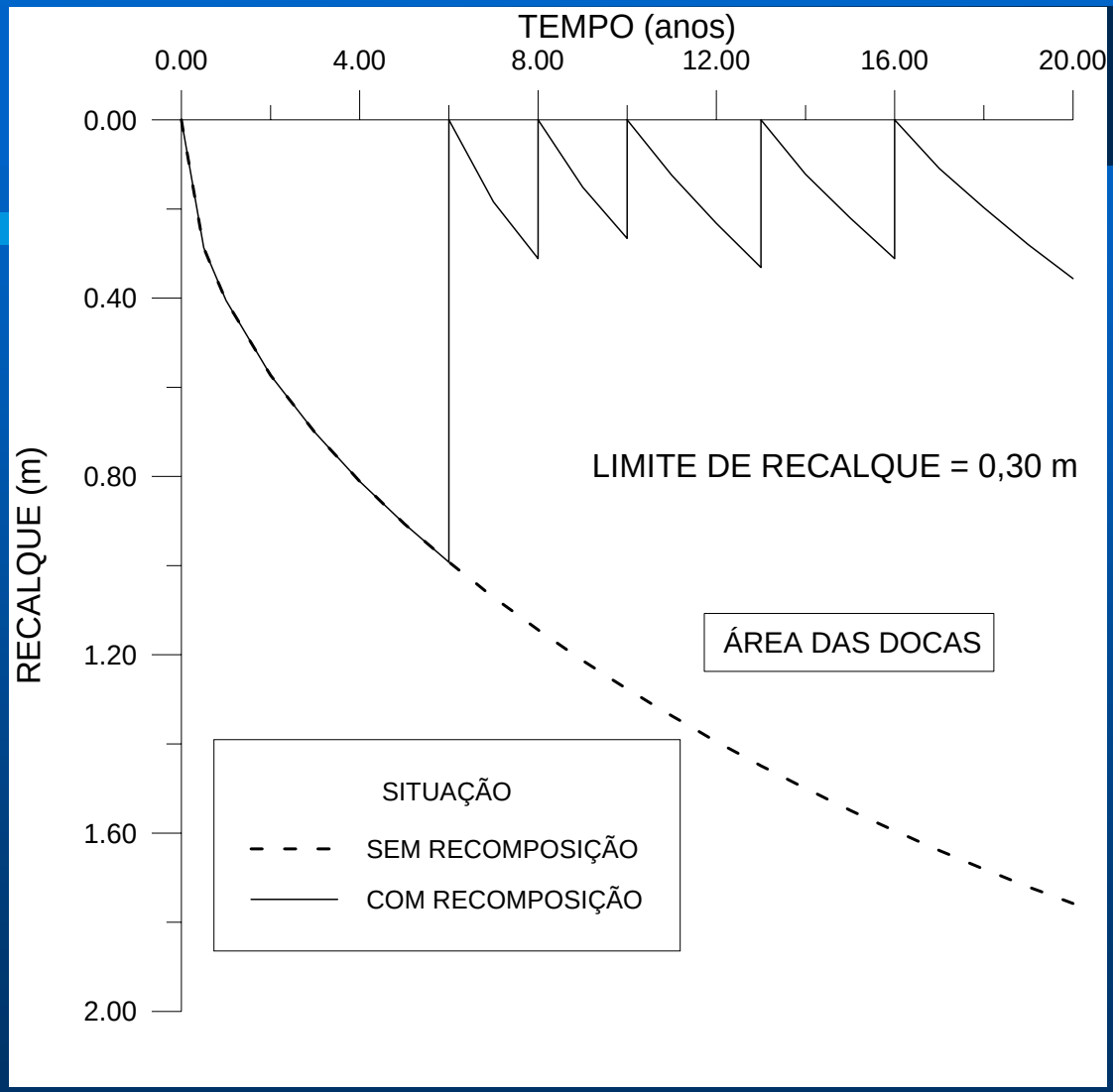
SHOPPING GUARARAPES



SHOPPING GUARARAPES



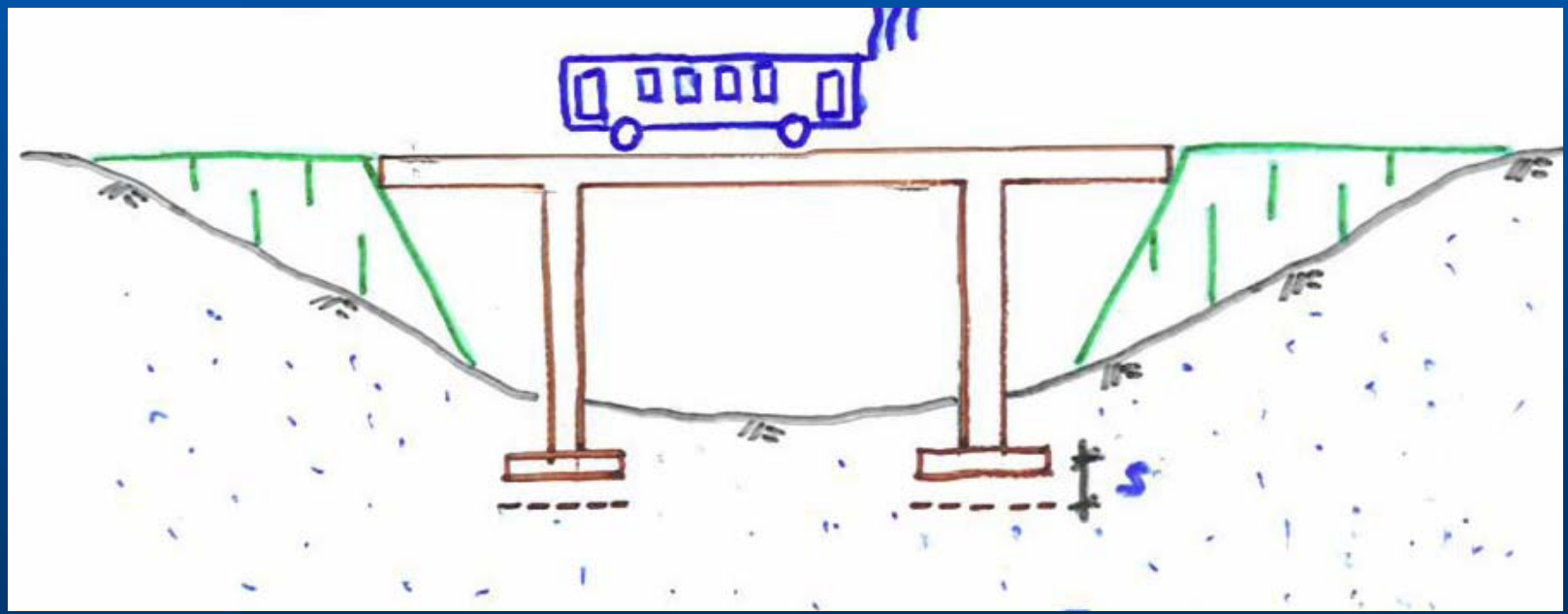
SHOPPING GUARARAPES



SHOPPING GUARARAPES

Carga Dinâmica

- **Tráfego:** **pontes e viadutos**

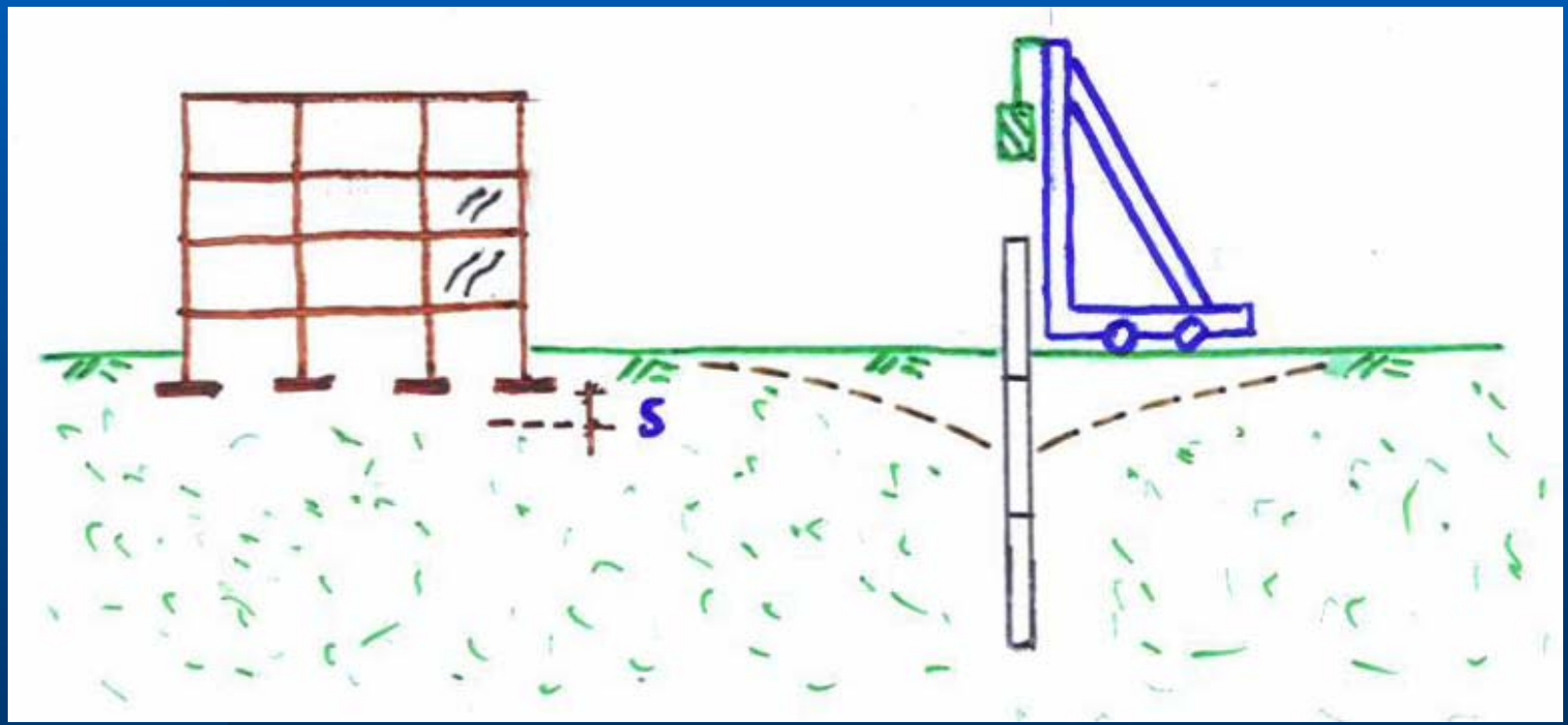




PONTE SOBRE O RIO JITITUBA / AL

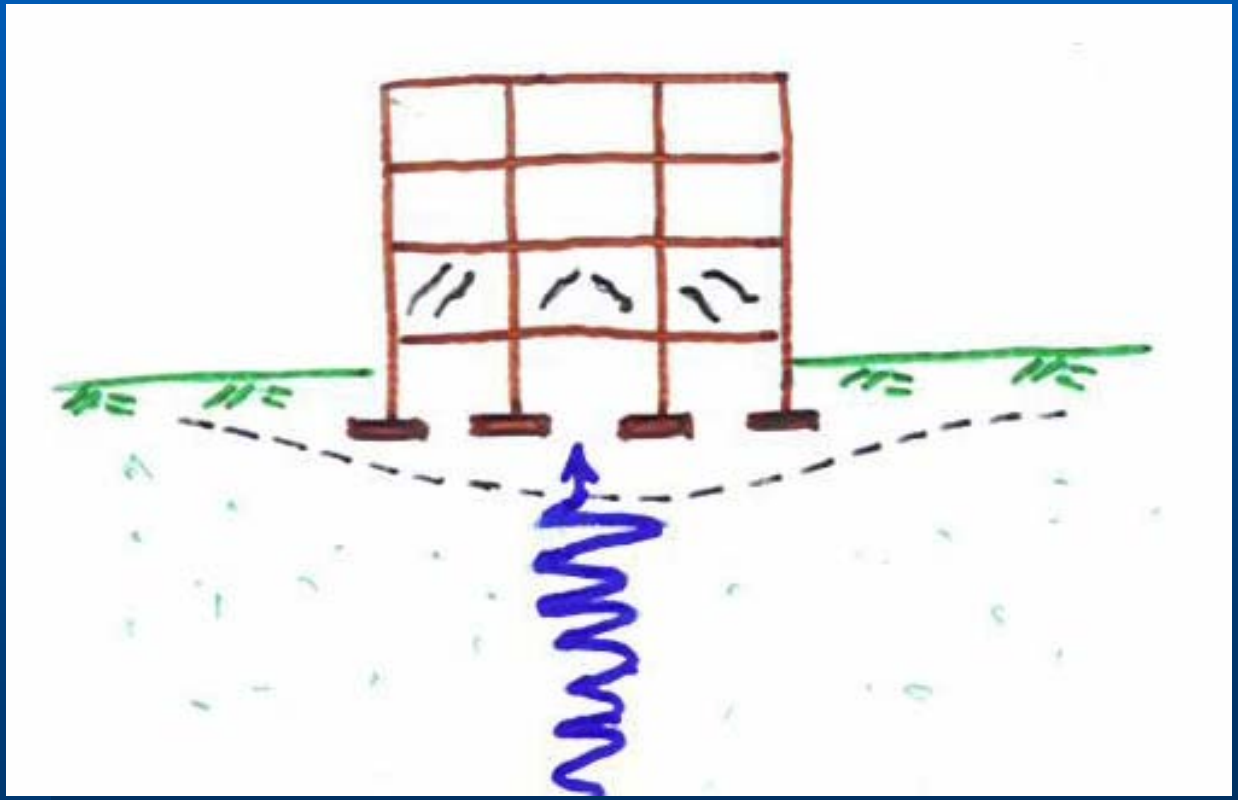
Carga Dinâmica

- **Cravação de estacas: vibrações**



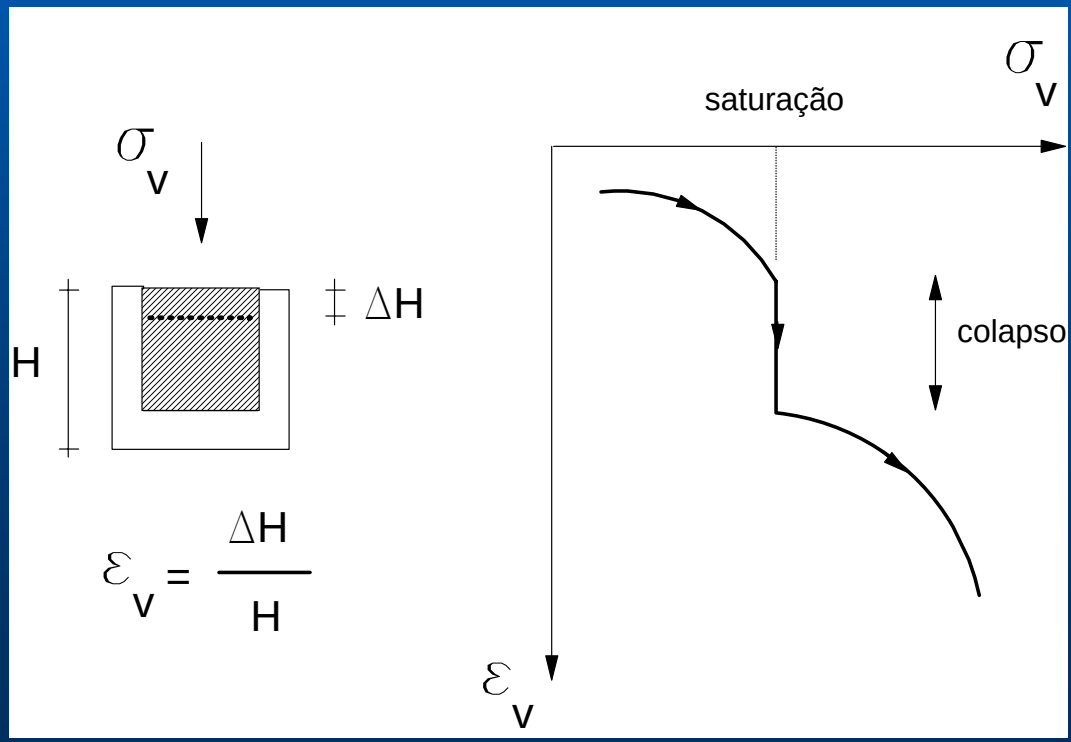
Carga Dinâmica

- **Sismos:** **Caruaru**



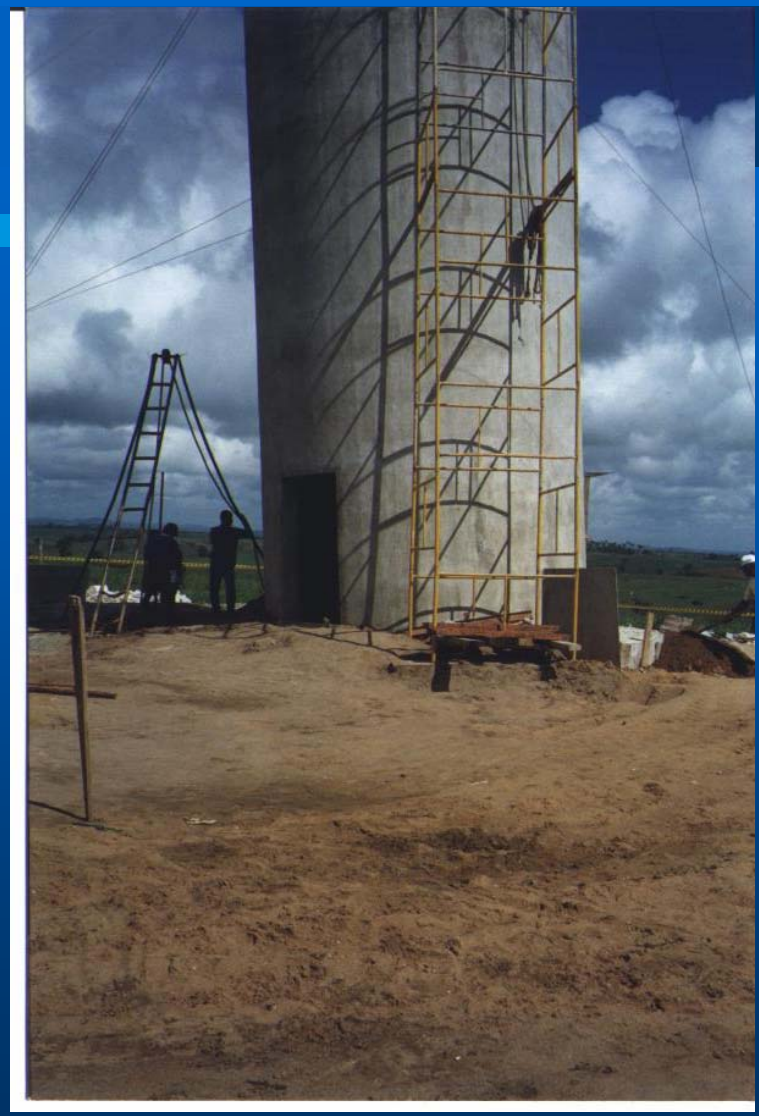
Variação de Umidade

- **Solo colapsível:** **região do semi-árido (areias médias e finas)**

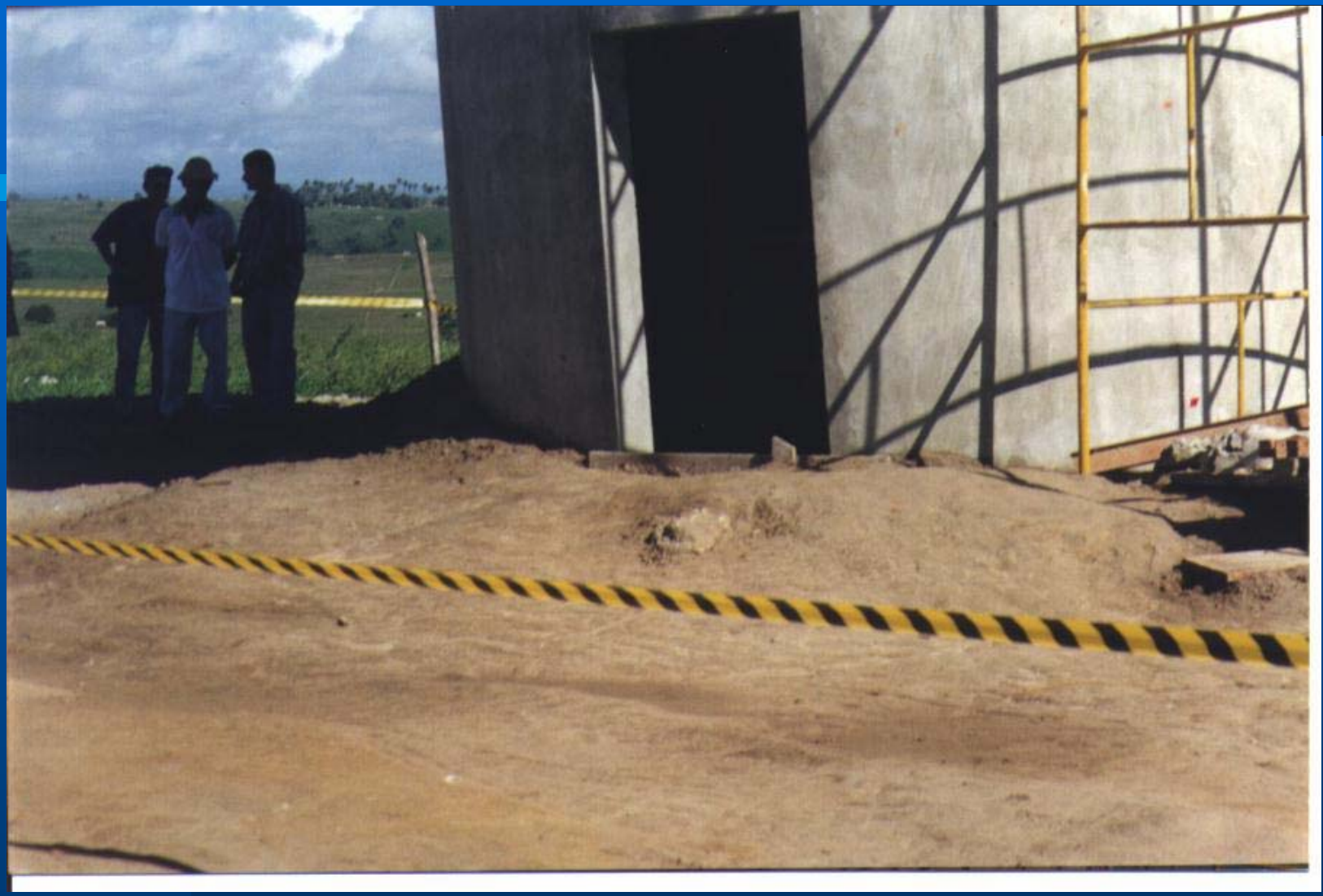




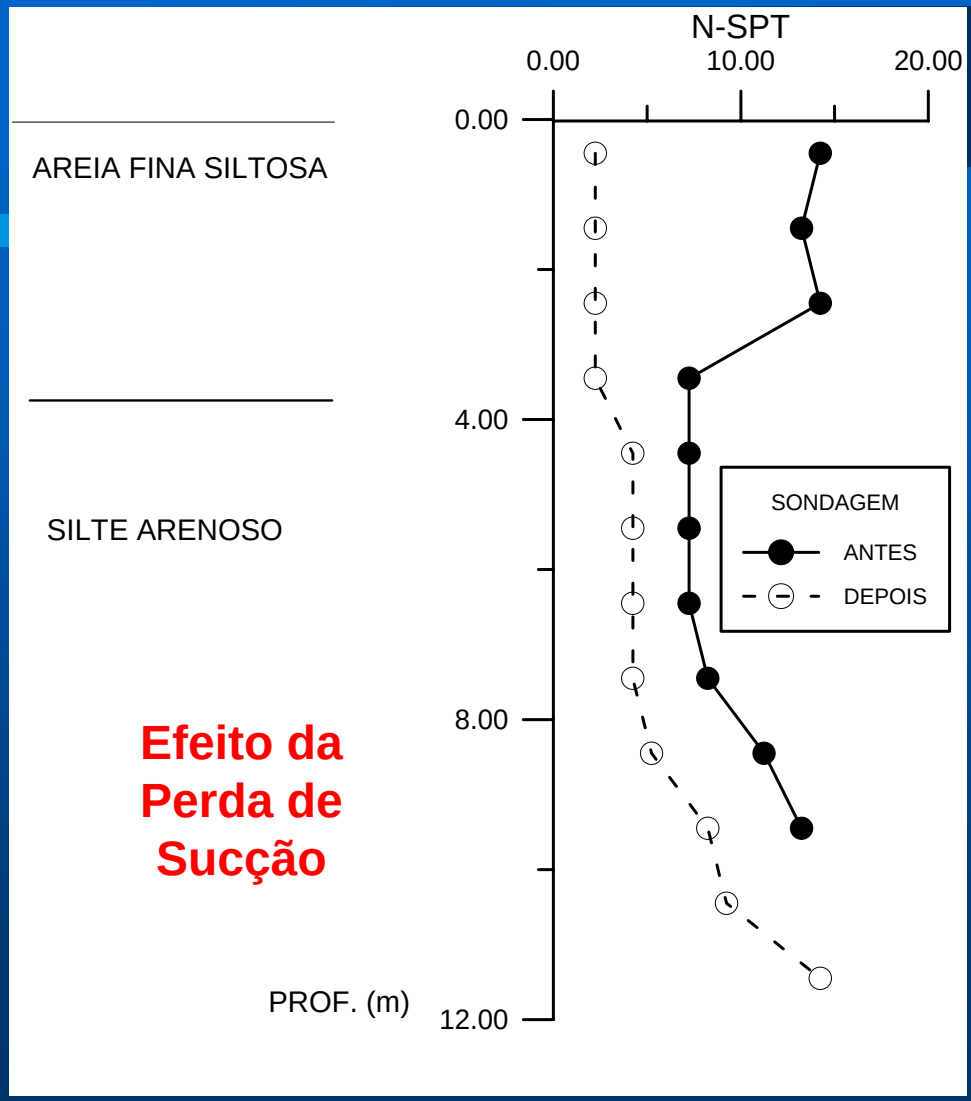
RESERVATÓRIO EM BOQUIM / SE



RESERVATÓRIO EM BOQUIM / SE



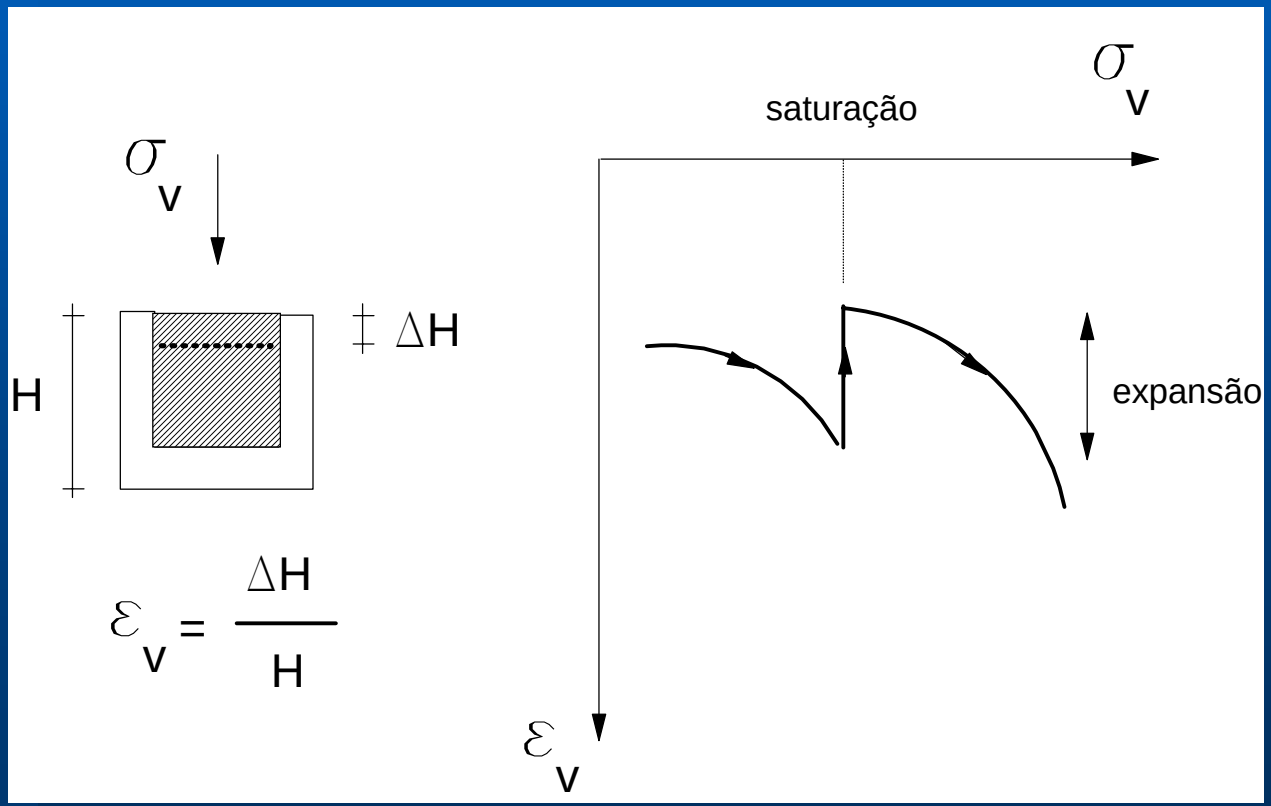
RESERVATÓRIO EM BOQUIM / SE



RESERVATÓRIO EM BOQUIM / SE

Variação de Umidade

- **Solo expansivo: argilas plásticas**



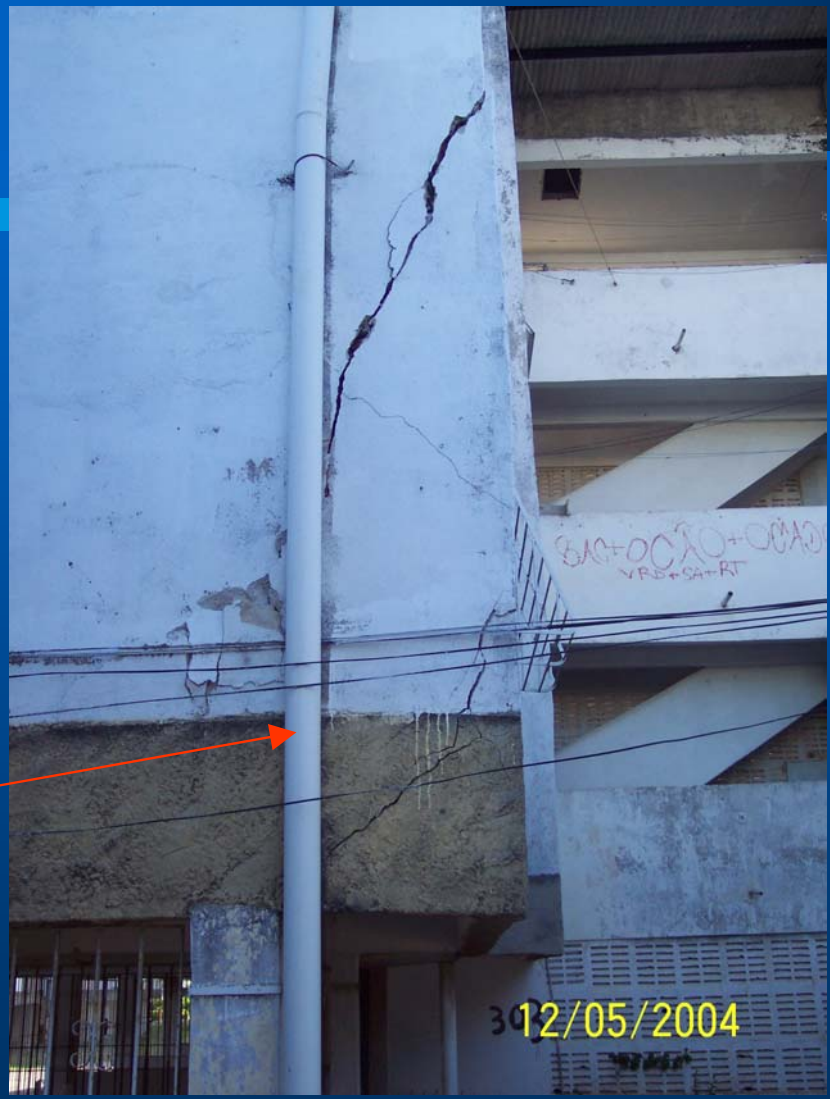


PRÉDIO EM OLINDA / PE



PRÉDIO EM OLINDA / PE

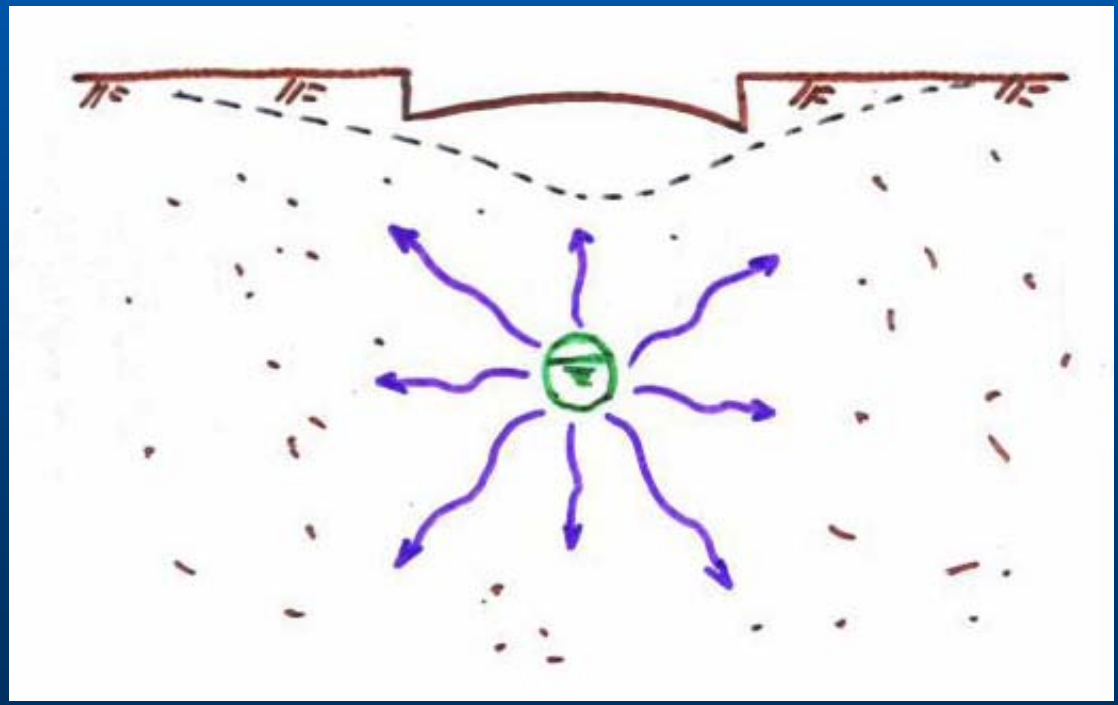
VAZAMENTO



PRÉDIO EM OLINDA / PE

Variação de Umidade

- **Ruptura de tubulação:** umedecimento do solo e carreamento de material





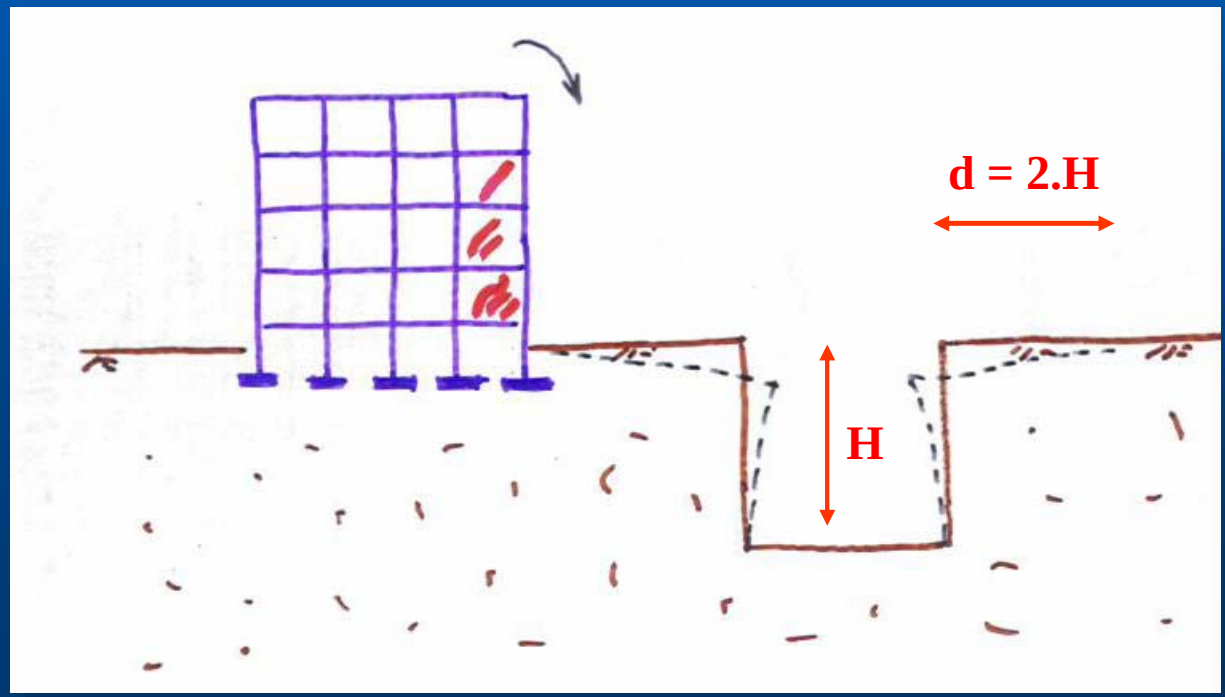
PRÉDIO EM RECIFE / PE



PRÉDIO EM RECIFE / PE

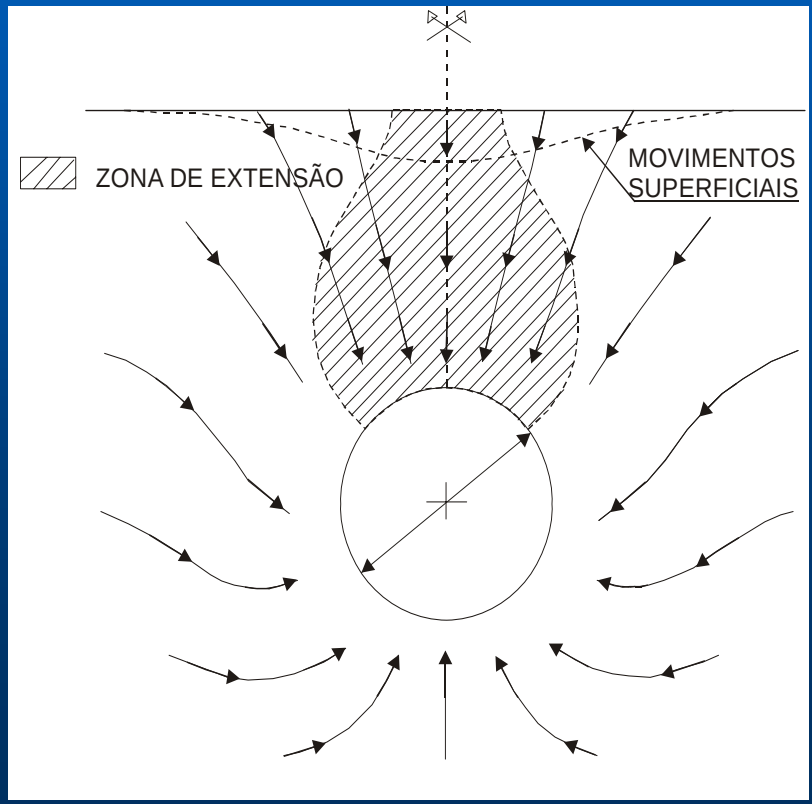
Métodos de Construção

- **Escavação a céu aberto:**
  deslocamento lateral e vertical



Métodos de Construção

- **Escavação subterrânea: metrôs**

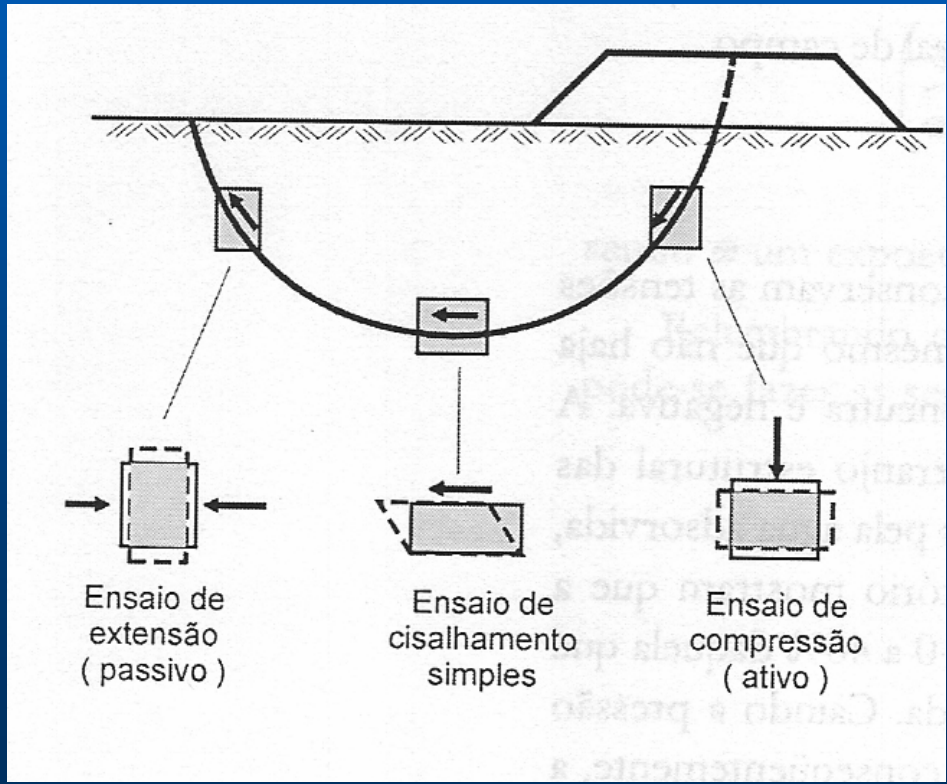


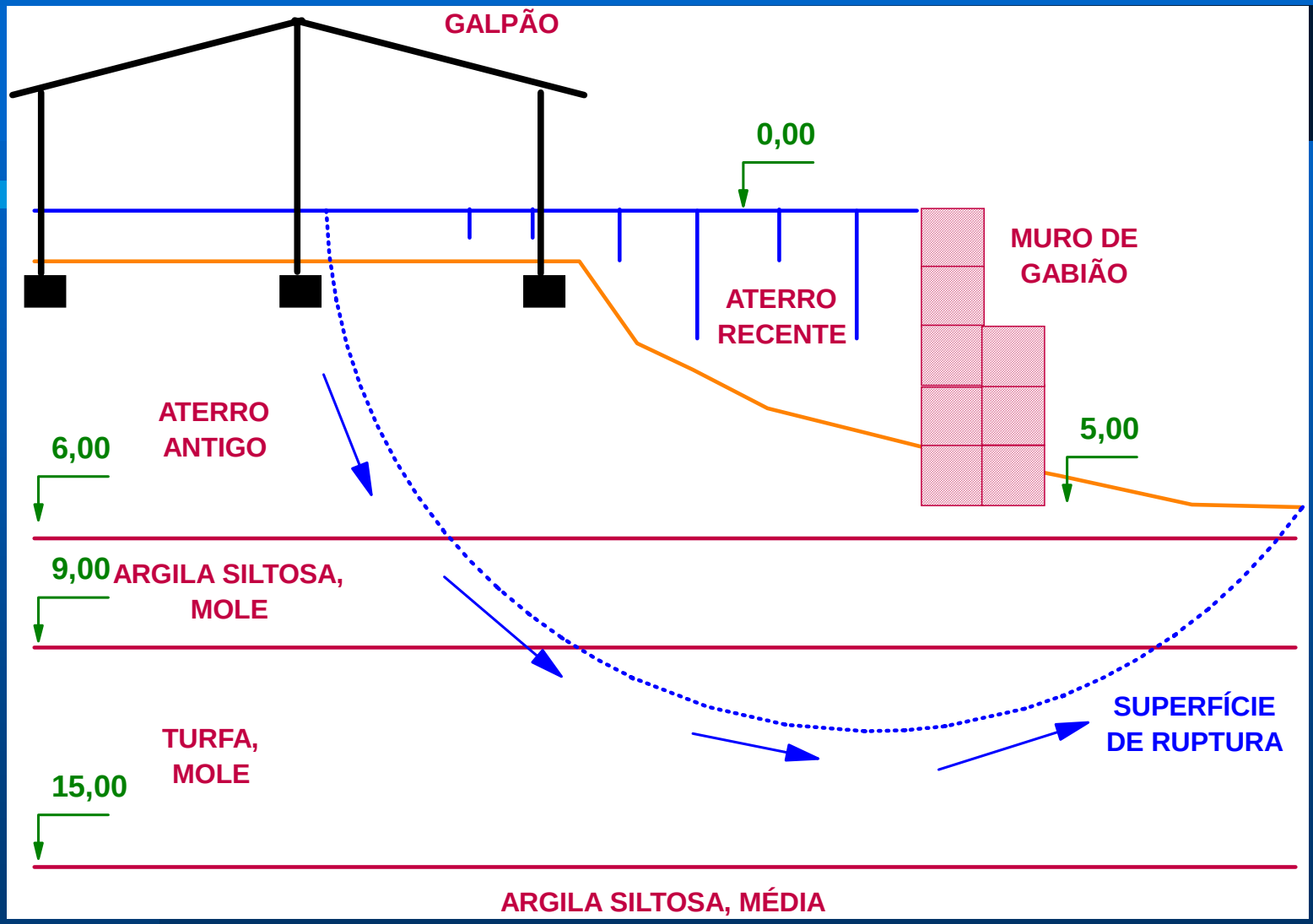


TÚNEL EM SHANGAI

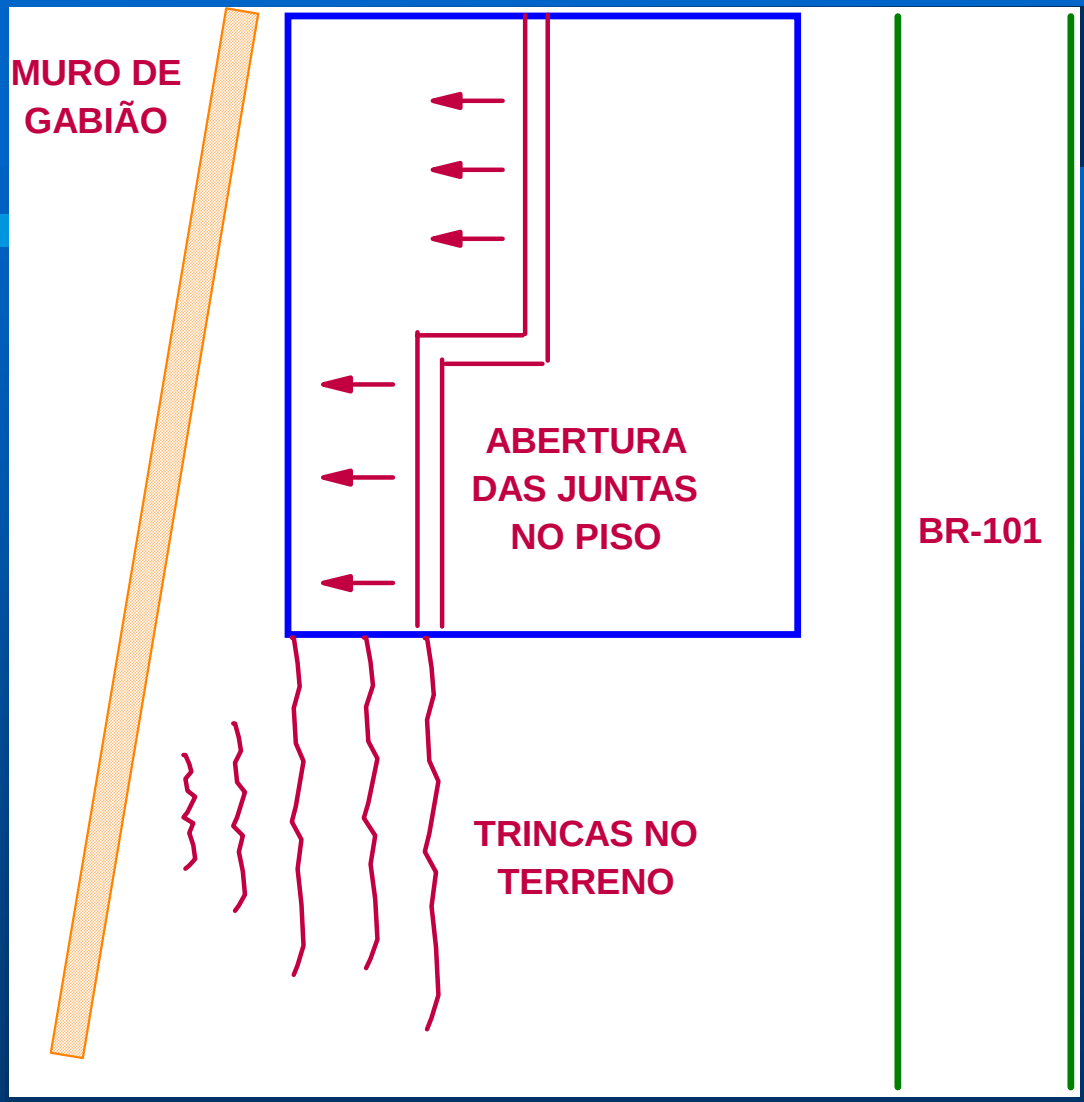
Métodos de Construção

- **Execução de aterros:** **ruptura de solos moles**

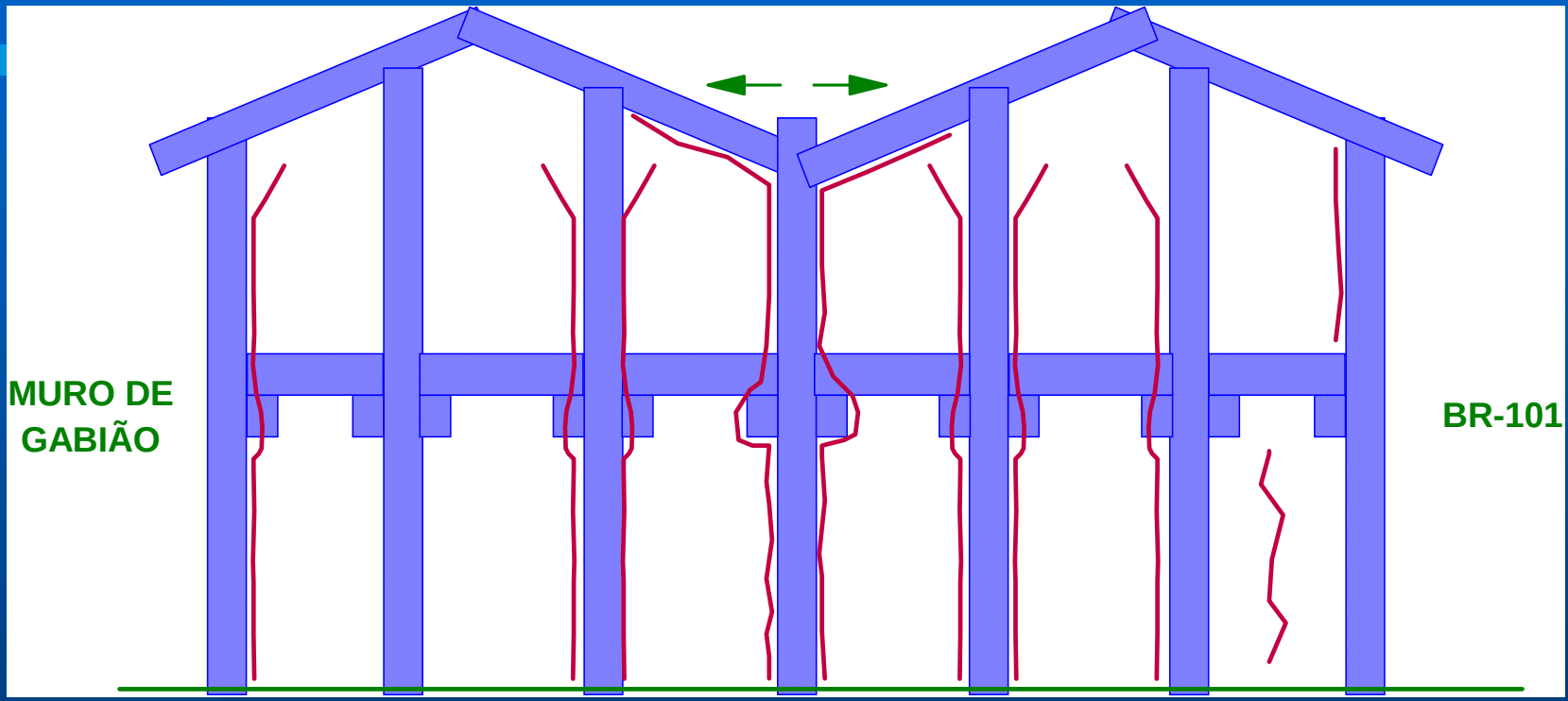




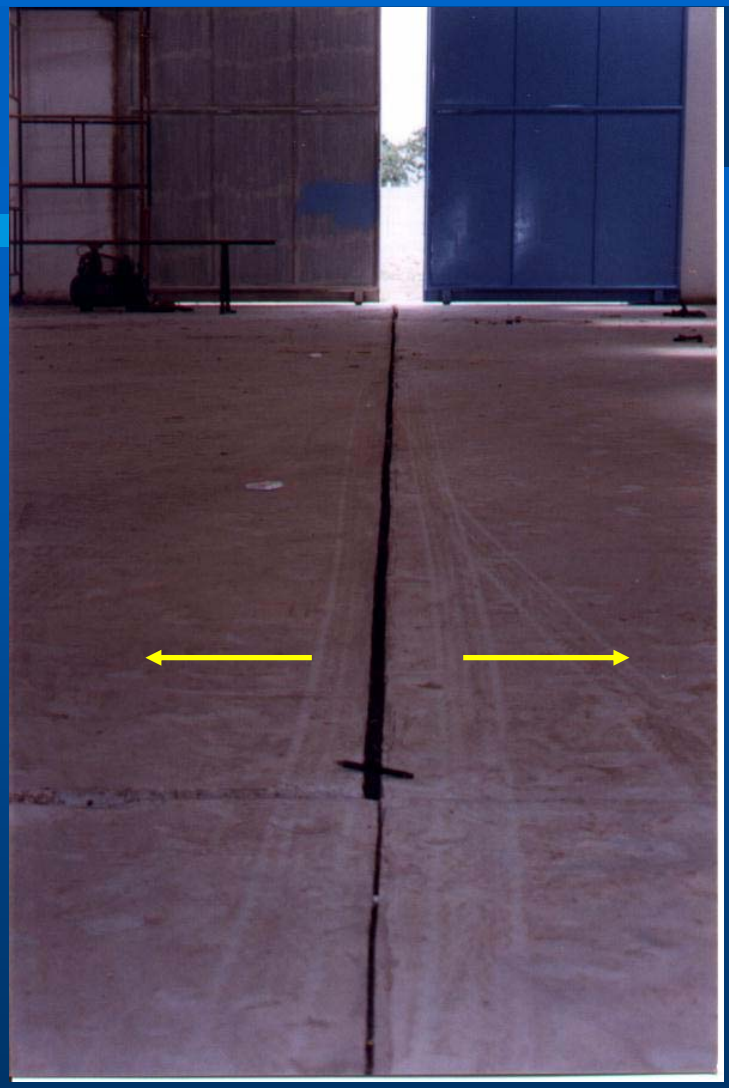
GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



GALPÃO EM RECIFE / PE



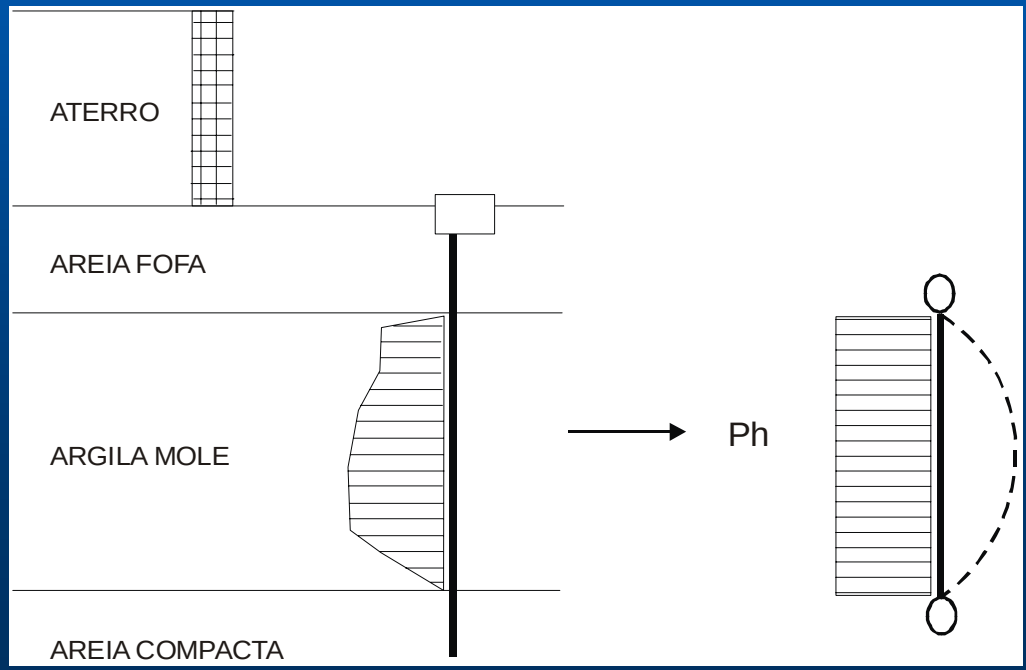
GALPÃO EM RECIFE / PE

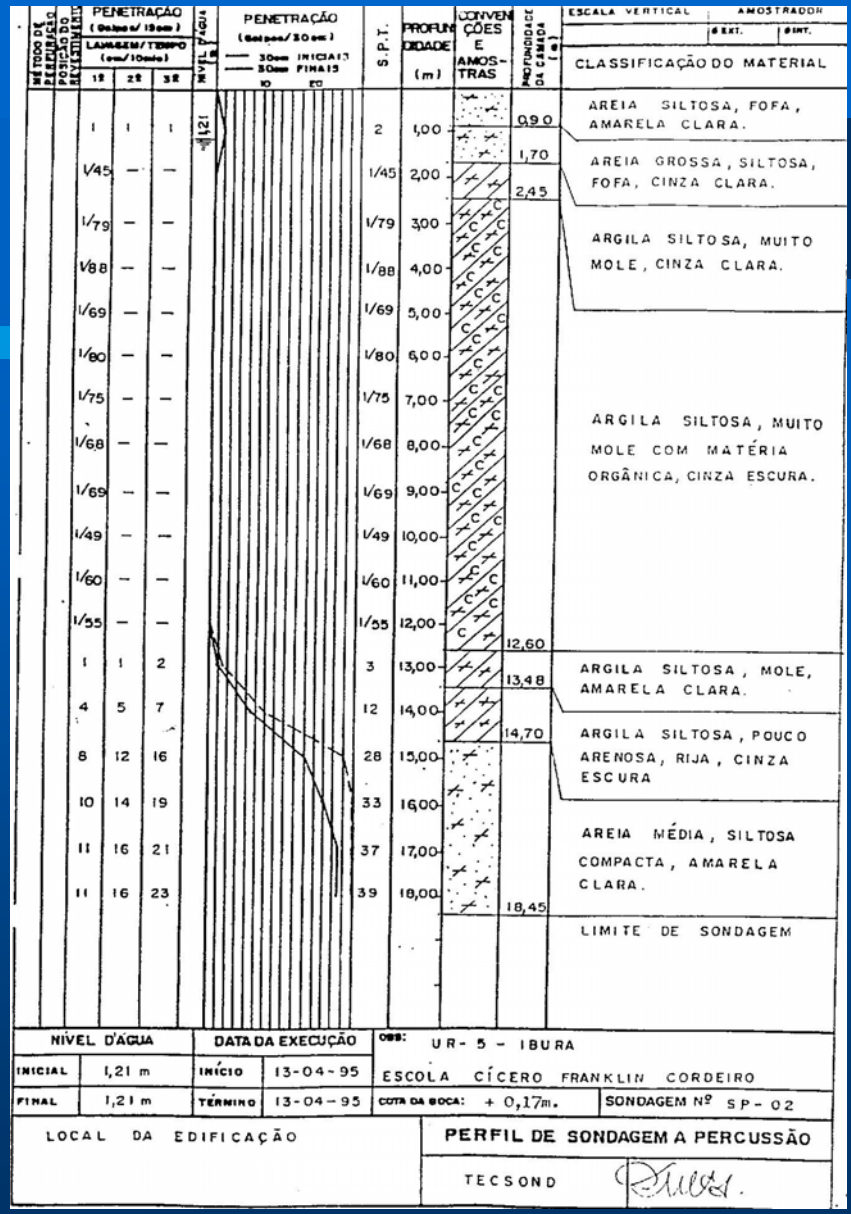


GALPÃO EM RECIFE / PE

Métodos de Construção

- **Execução de aterros:** deslocamento lateral de solos (Efeito Tschebotarioff)





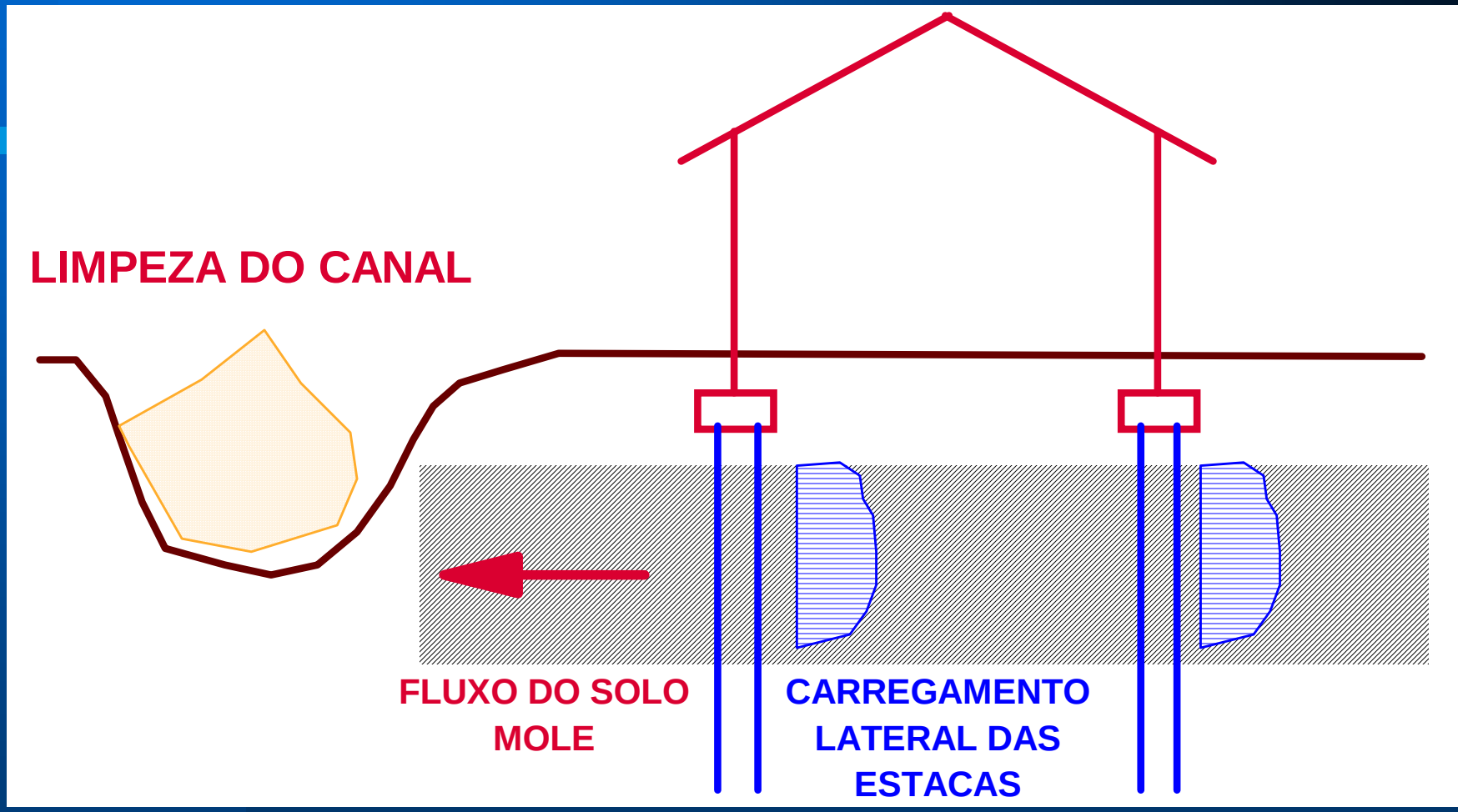
ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE



ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE



ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE



ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE



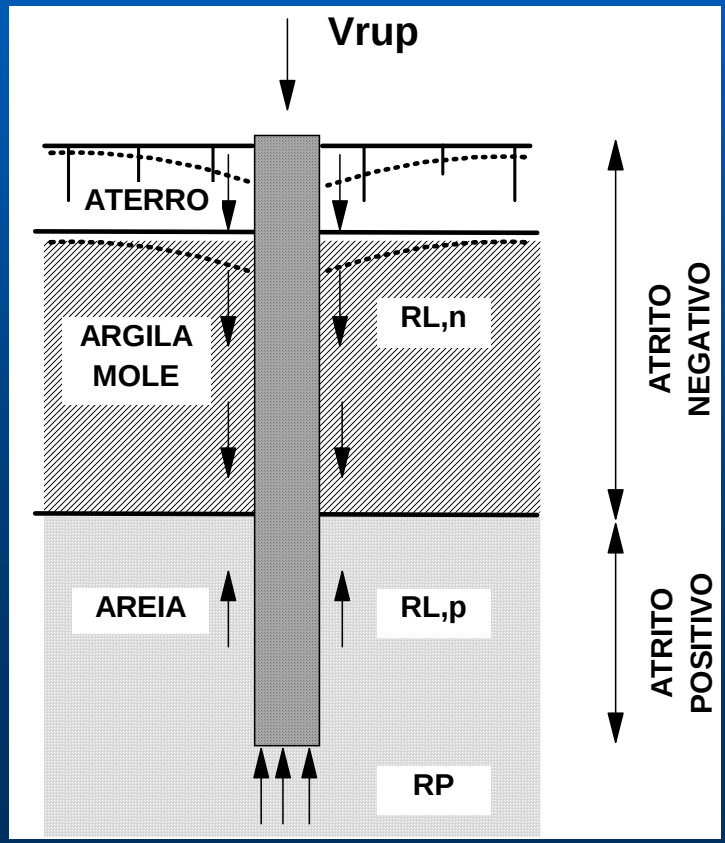
ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE



ESCOLA NO IBURA – RECIFE / PE

Métodos de Construção

- **Execução de aterros:** atrito negativo em estacas





SEDE DA CHESF – RECIFE / PE



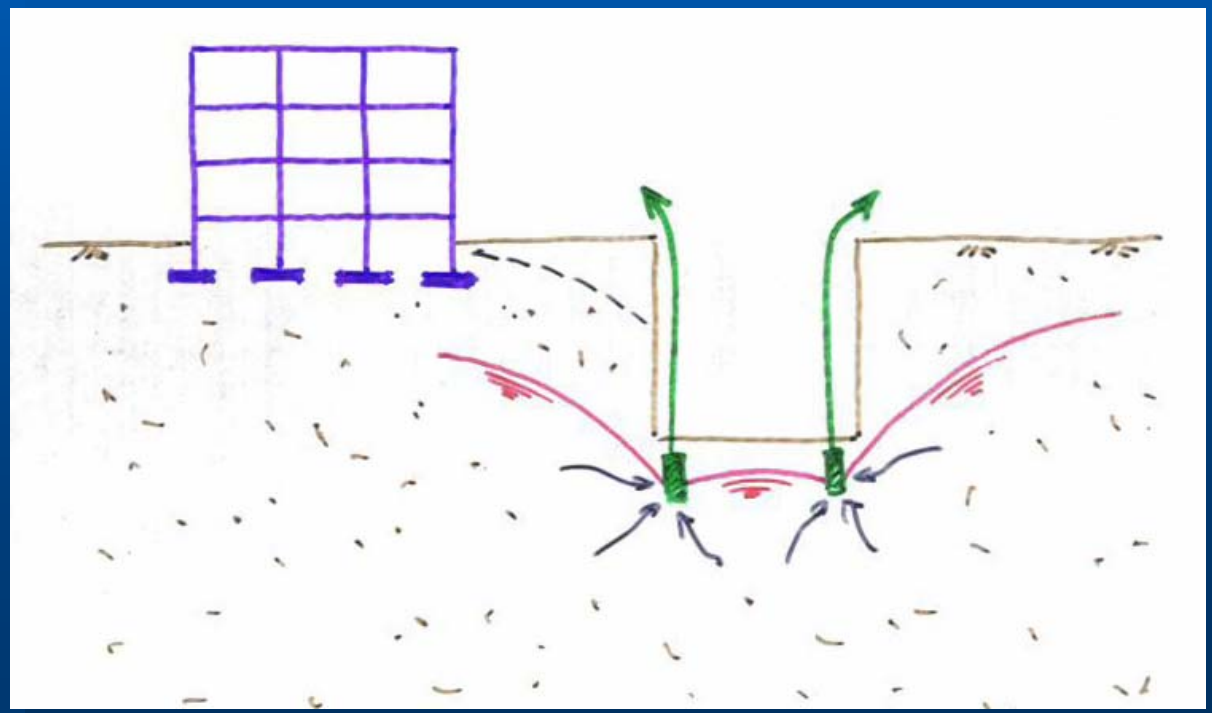
SEDE DA CHESF – RECIFE / PE



SEDE DA CHESF – RECIFE / PE

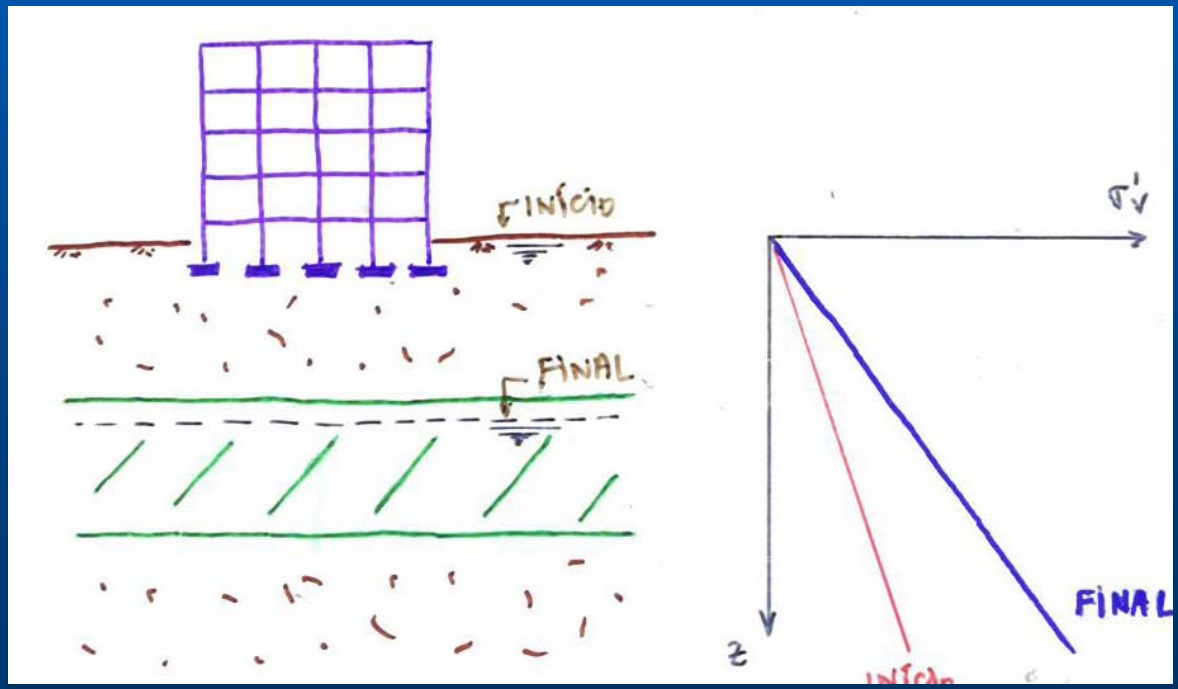
Métodos de Construção

- **Rebaixamento do freático:** carrea-mento de solo fino



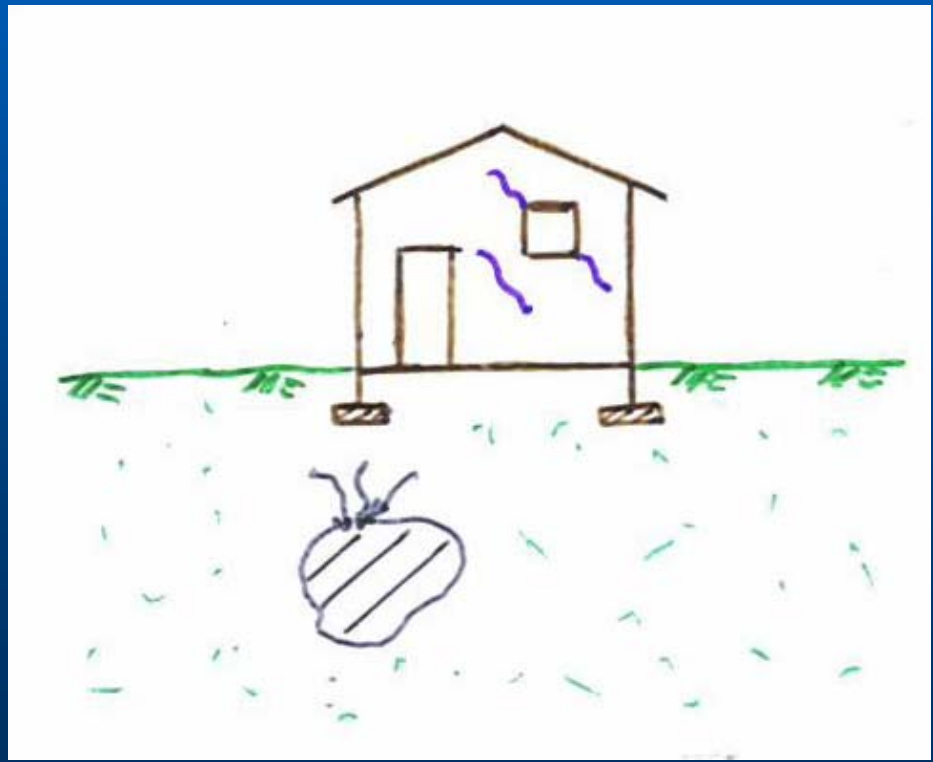
Métodos de Construção

- **Rebaixamento do freático:** **aumento do peso aparente do solo**



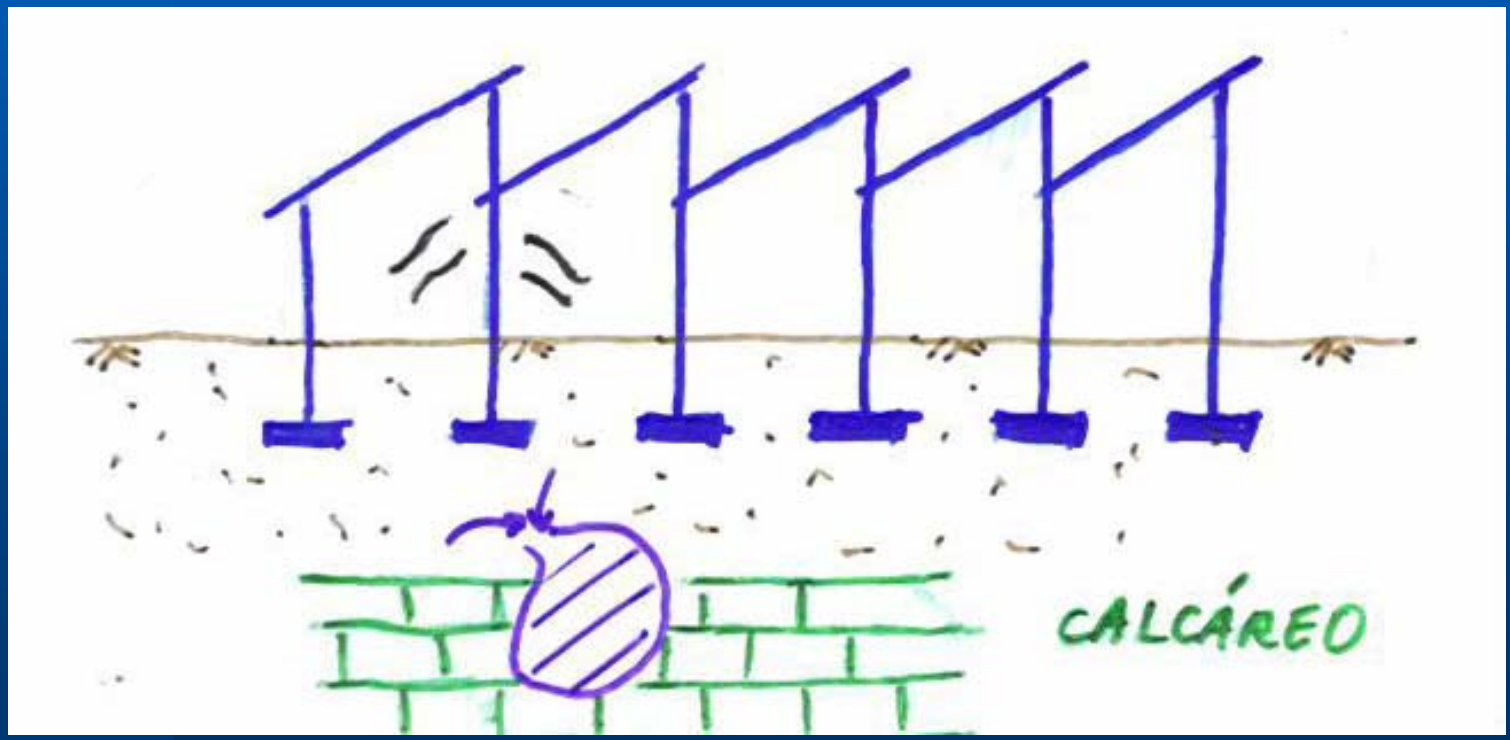
Condições Ambientais

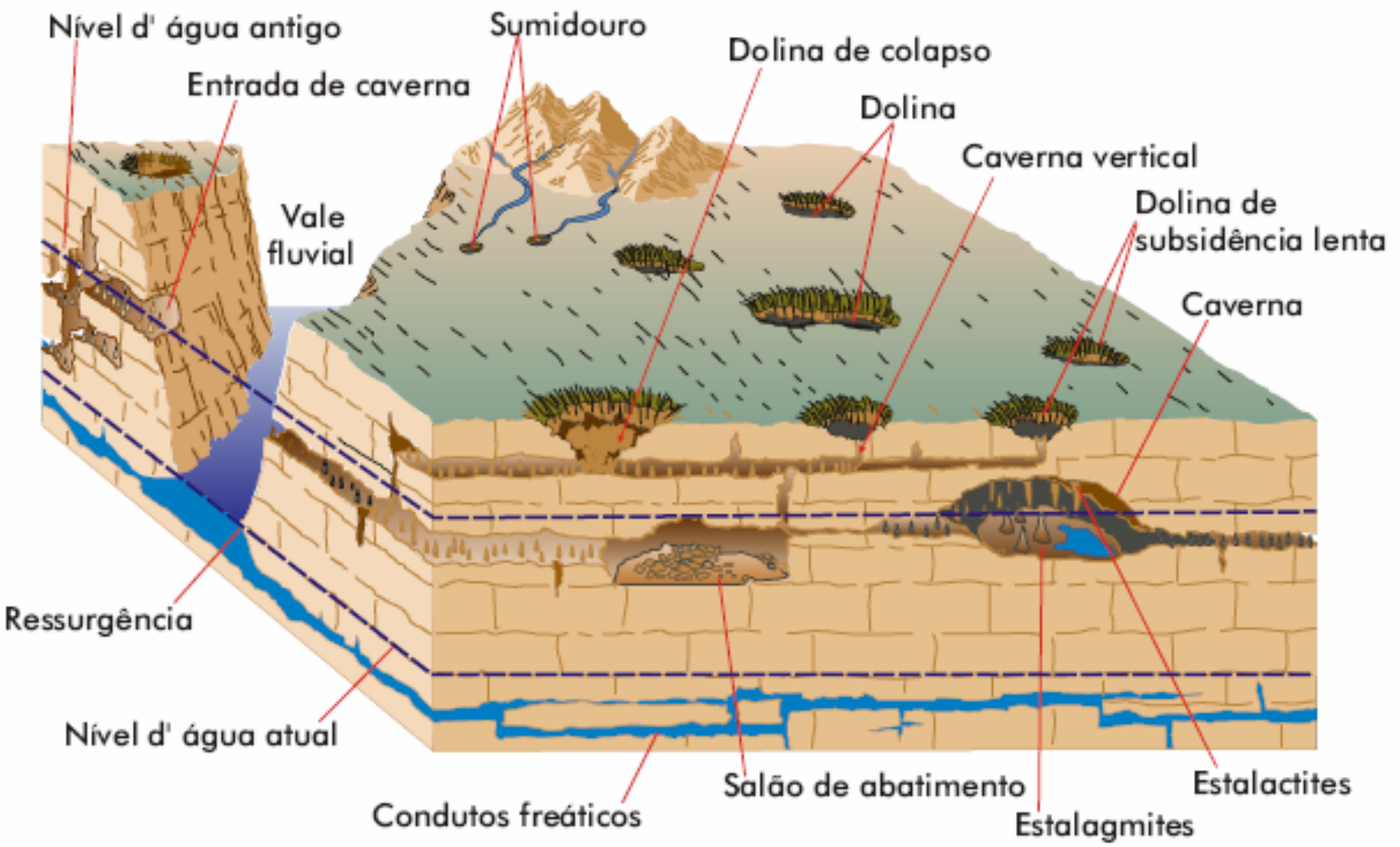
- **Formação de cavernas por animais: formigueiros**



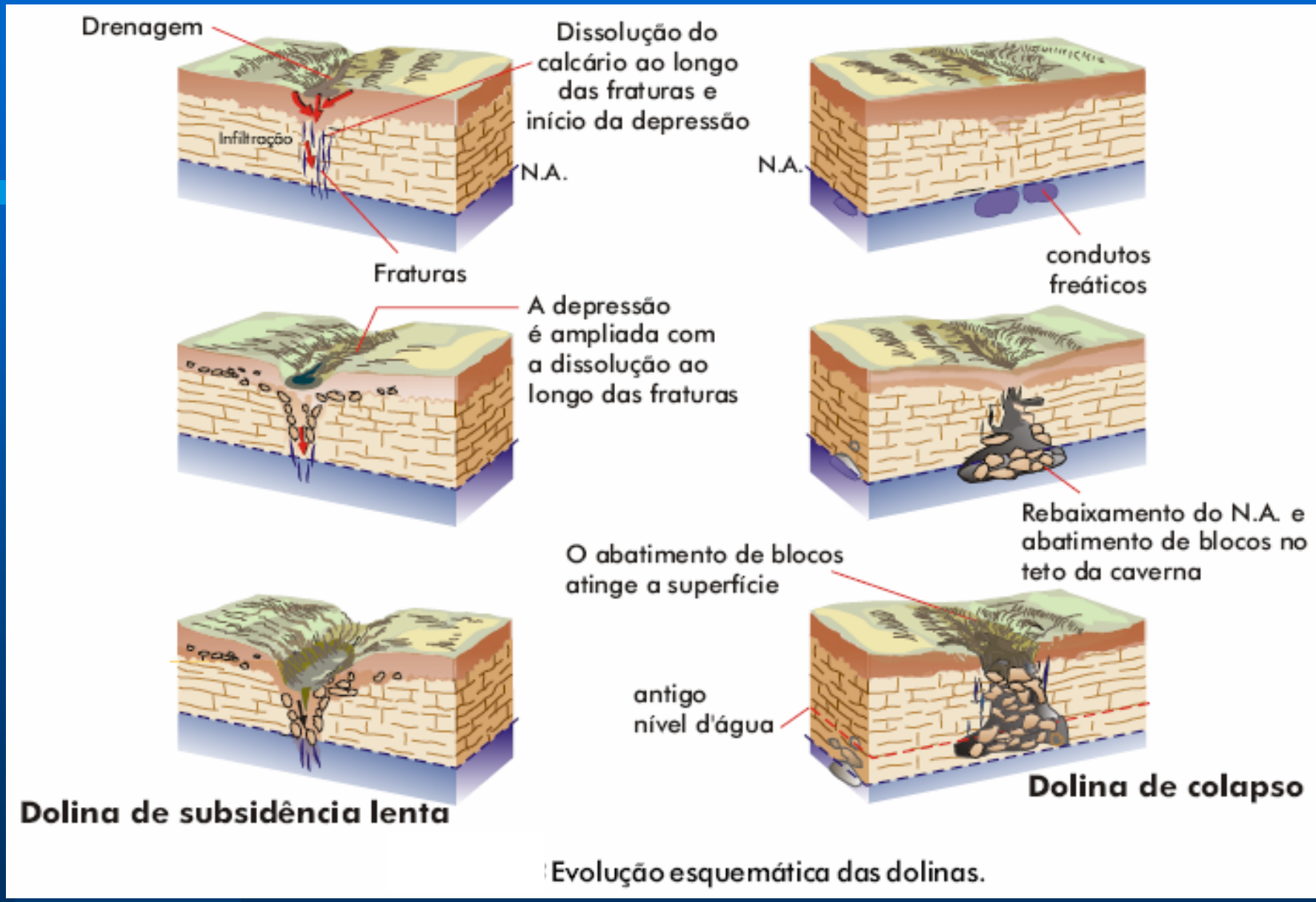
Condições Ambientais

- **Erosão química: cavernas em calcáreo**





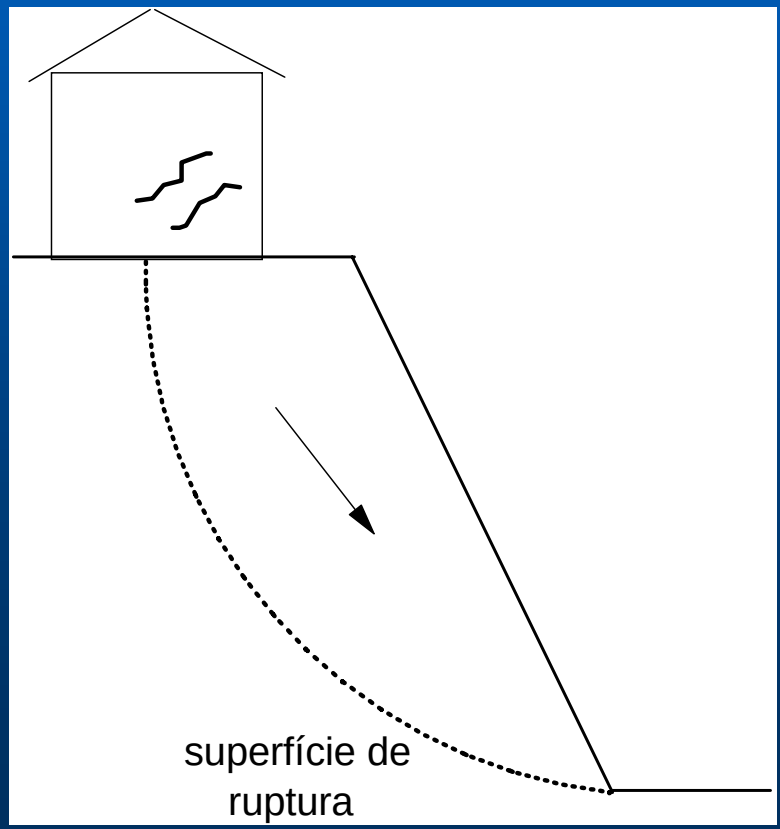
Componentes principais do sistema cárstico.



Evolução esquemática das dolinas.

Condições Ambientais

- **Movimentação de taludes:** **áreas urbanas**





RESIDÊNCIA EM ALDEIA / PE



RESIDÊNCIA EM ALDEIA / PE



RESIDÊNCIA EM ALDEIA / PE

Condições Ambientais

- **Deterioração dos materiais: RAA**



EDIFÍCIO EM BOA VIAGEM – RECIFE / PE



EDIFÍCIO EM BOA VIAGEM – RECIFE / PE



EDIFÍCIO EM BOA VIAGEM – RECIFE / PE

Tipos de Danos

Conceitos

- **Patologia:** estudo das doenças e suas consequências no corpo humano.
- **Patologia das Fundações:** estudo dos danos provocados pelos movimentos da fundação.



TODA FUNDAÇÃO APRESENTA MOVIMENTOS

Analogia

Etapa	Medicina	Fundações
Anamnese	- Idade, sexo, etc - Alergias - Histórico de doenças - Remédios, vacinas	- Tipo de estrutura e fundação - Materiais usados e sua vida útil - Carregamento - Tempo de construção
Diagnóstico	- Sintomas fisiológicos e psíquicos - Ocorrência - Definição das causas	- Levantamento de danos e sua tipologia - Ocorrência / histórico - Causas dos danos
Tratamento	- Nenhum (defesa natural) - Tópico (remédios, tratamentos, etc) - Generalizado (operação, transplante, etc)	- Convivência com os danos (estabilização natural) - Reforço localizado - Reforço generalizado

Tipos de Danos

Danos	Características	Inconvenientes
Estéticos	- São subjetivos e de efeito psicológico	- Do simples mau estar ao alarme com pânico
Funcionais	- Comprometem o uso e destinação da obra	- Mau funcionamento de equipamentos
Estruturais	- Afetam os elementos estruturais	- Podem comprometer a estabilidade da obra - Podem exigir reforços

Danos Estéticos

- **Fissuras em painéis de alvenaria de estruturas aporticadas.**
- **Desaprumos não acentuados.**

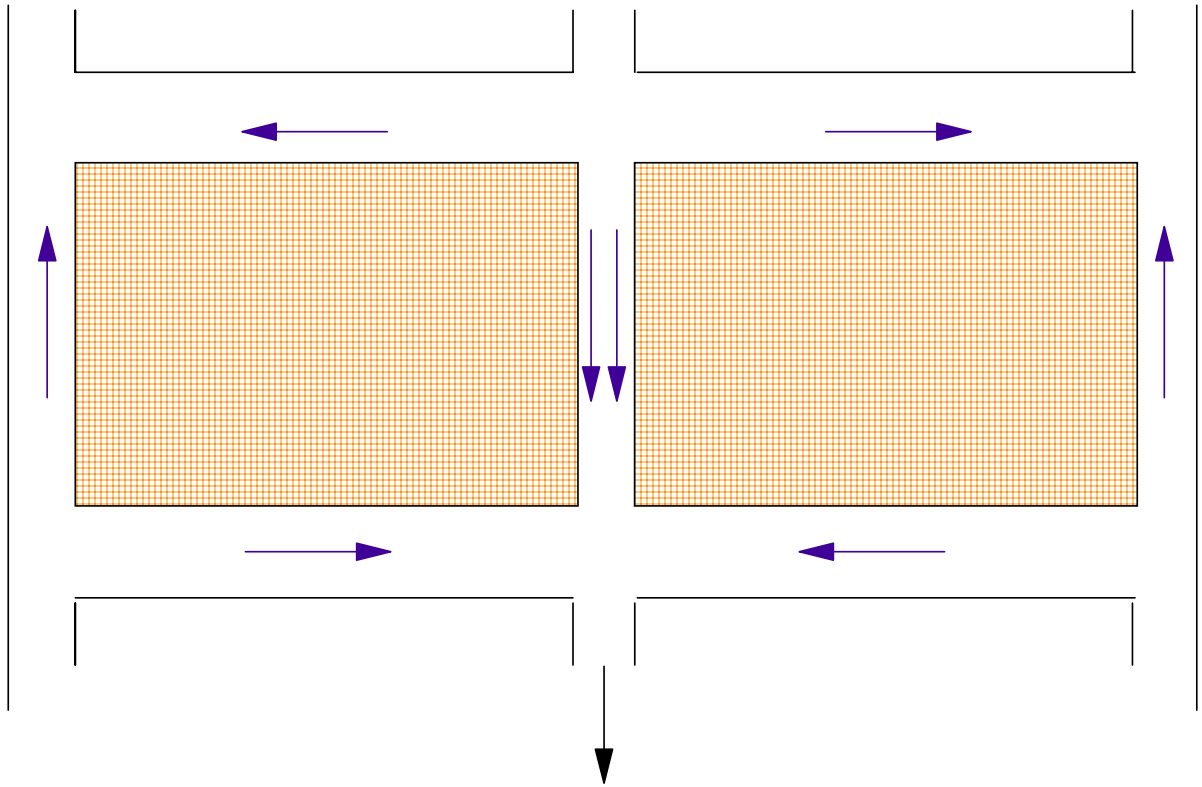
Danos Funcionais

- Janelas emperradas
- Inversão de drenagem
- Problemas com elevadores

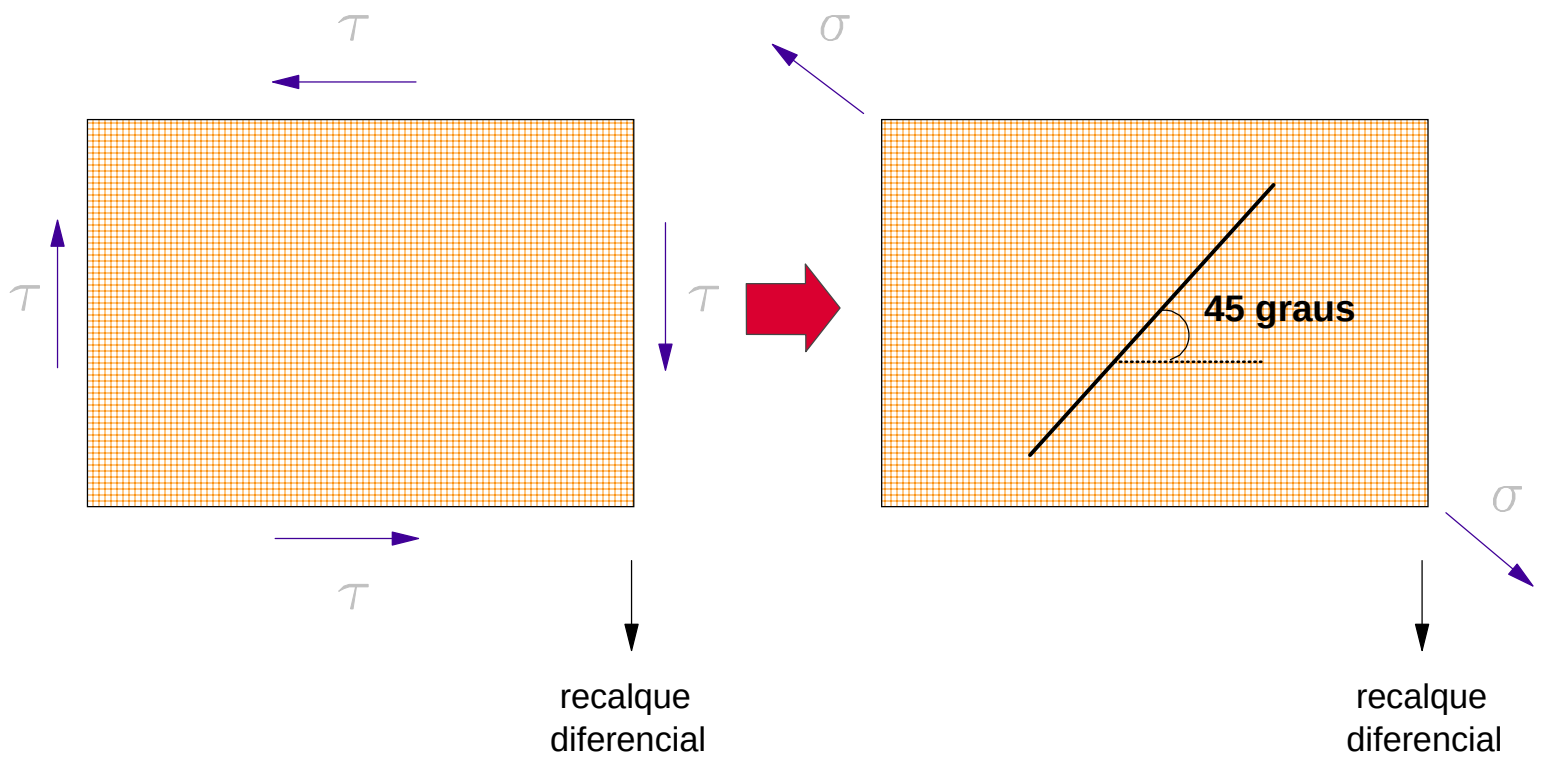
Danos Estruturais

- **Fissuras em painéis de alvenaria autoportante (estrutural).**
- **Fissuras em lajes, vigas e pilares.**

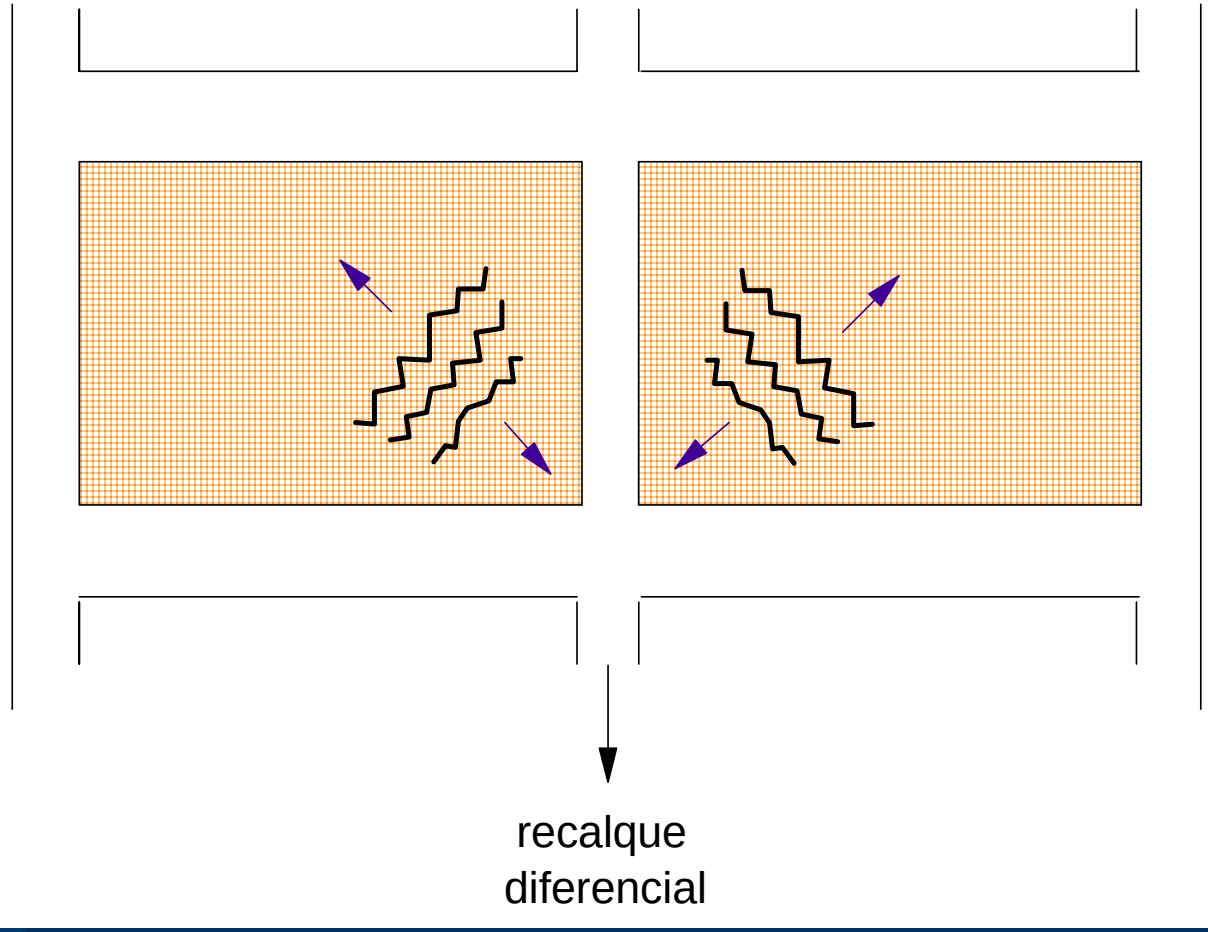
Sintomas Típicos - Alvenaria



Sintomas Típicos - Alvenaria



Sintomas Típicos - Alvenaria





CASA EM CAMARAGIBE / PE



PRÉDIO EM JABOATÃO / PE

Sintomas Típicos - Aberturas

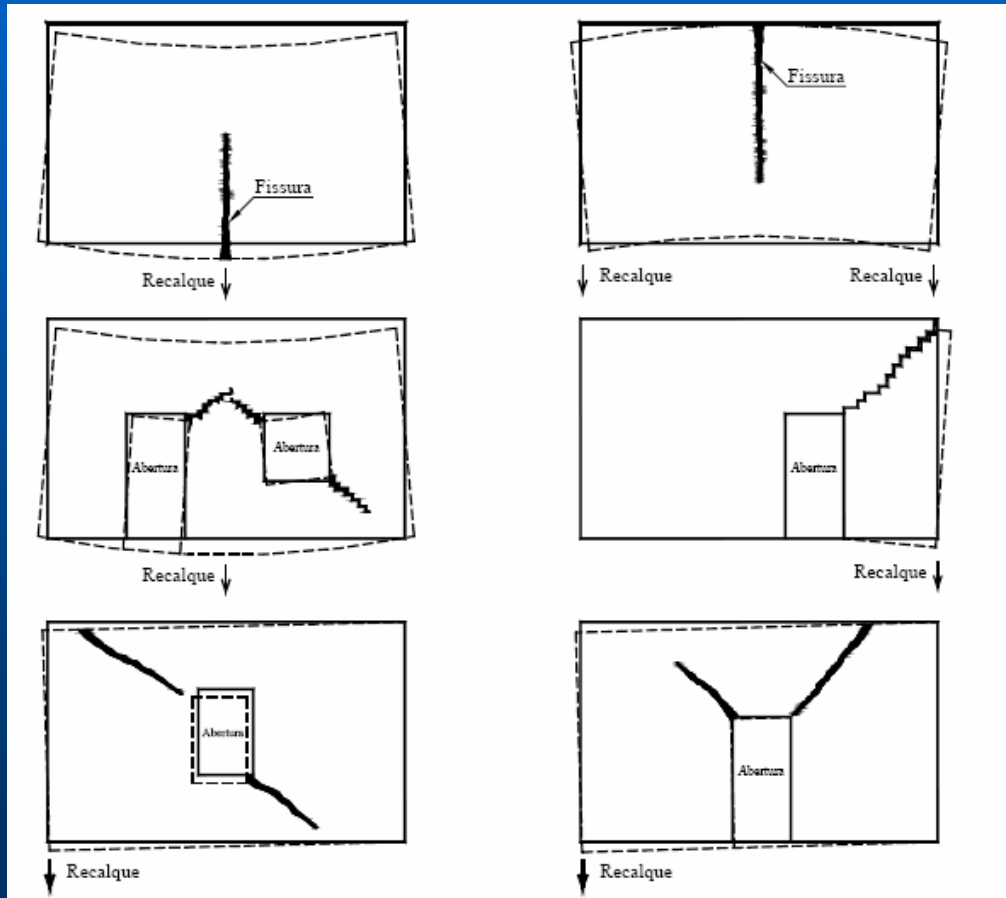
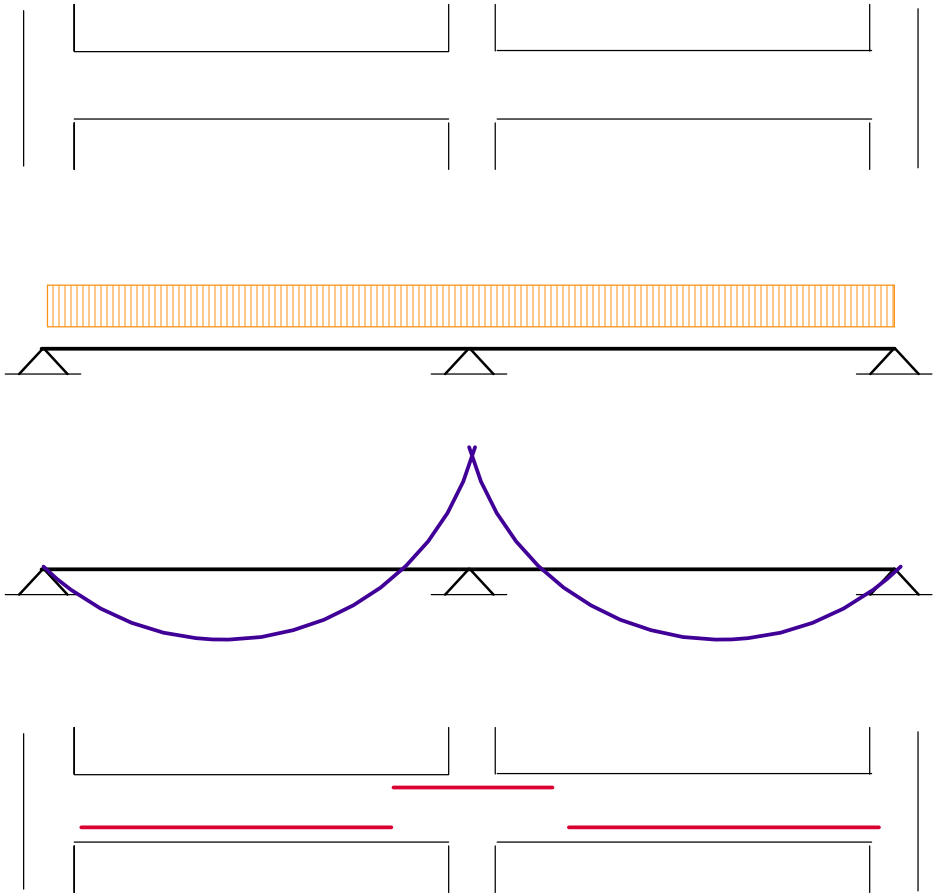


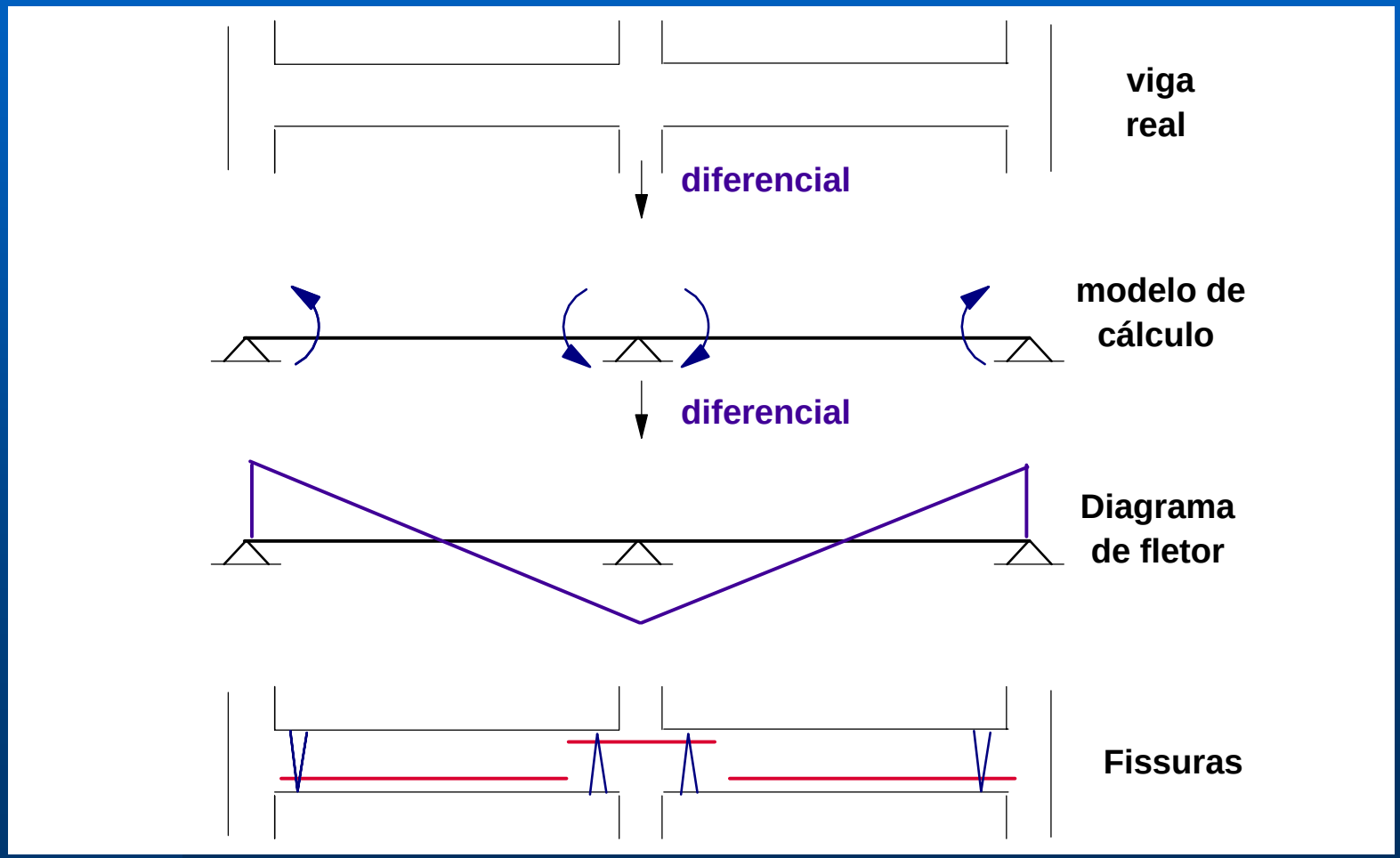
Figura 2.2 Exemplos de fissuras causadas por recalques (GRIMM, 1988).

HOLANDA Jr. (2002)

Sintomas Típicos - Vigas



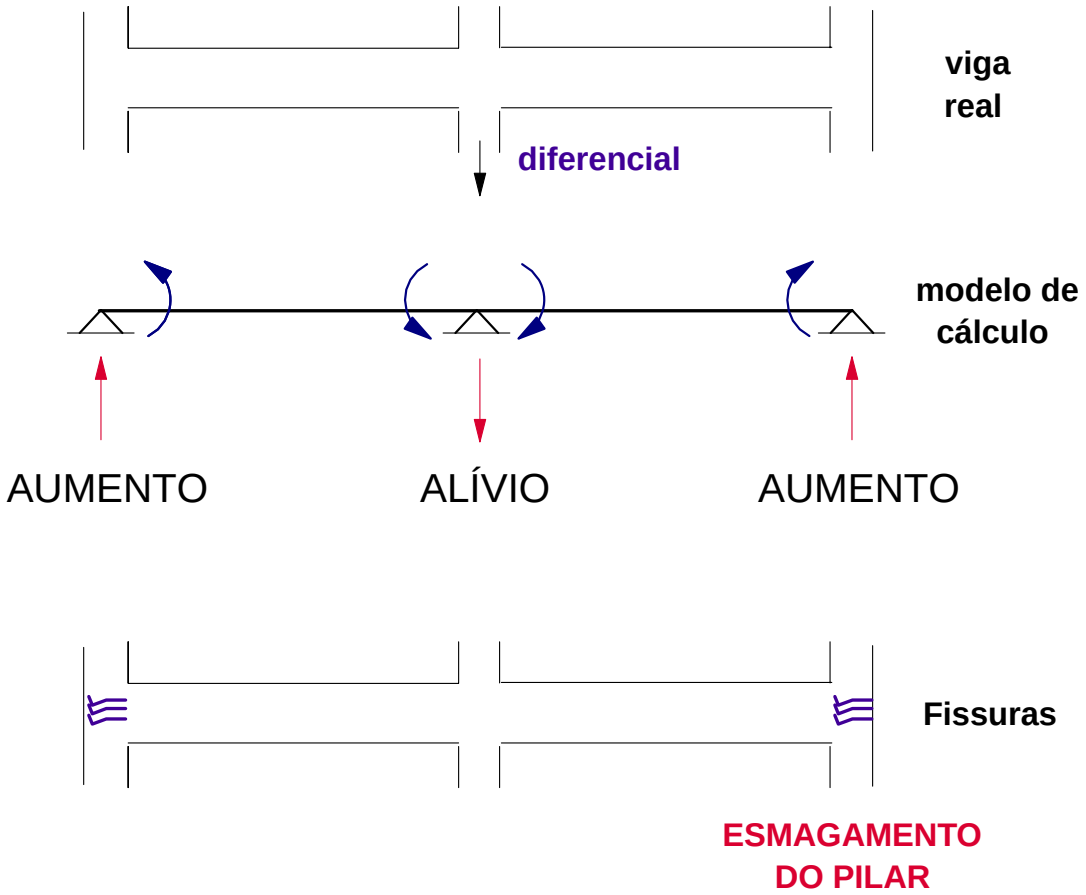
Sintomas Típicos - Vigas

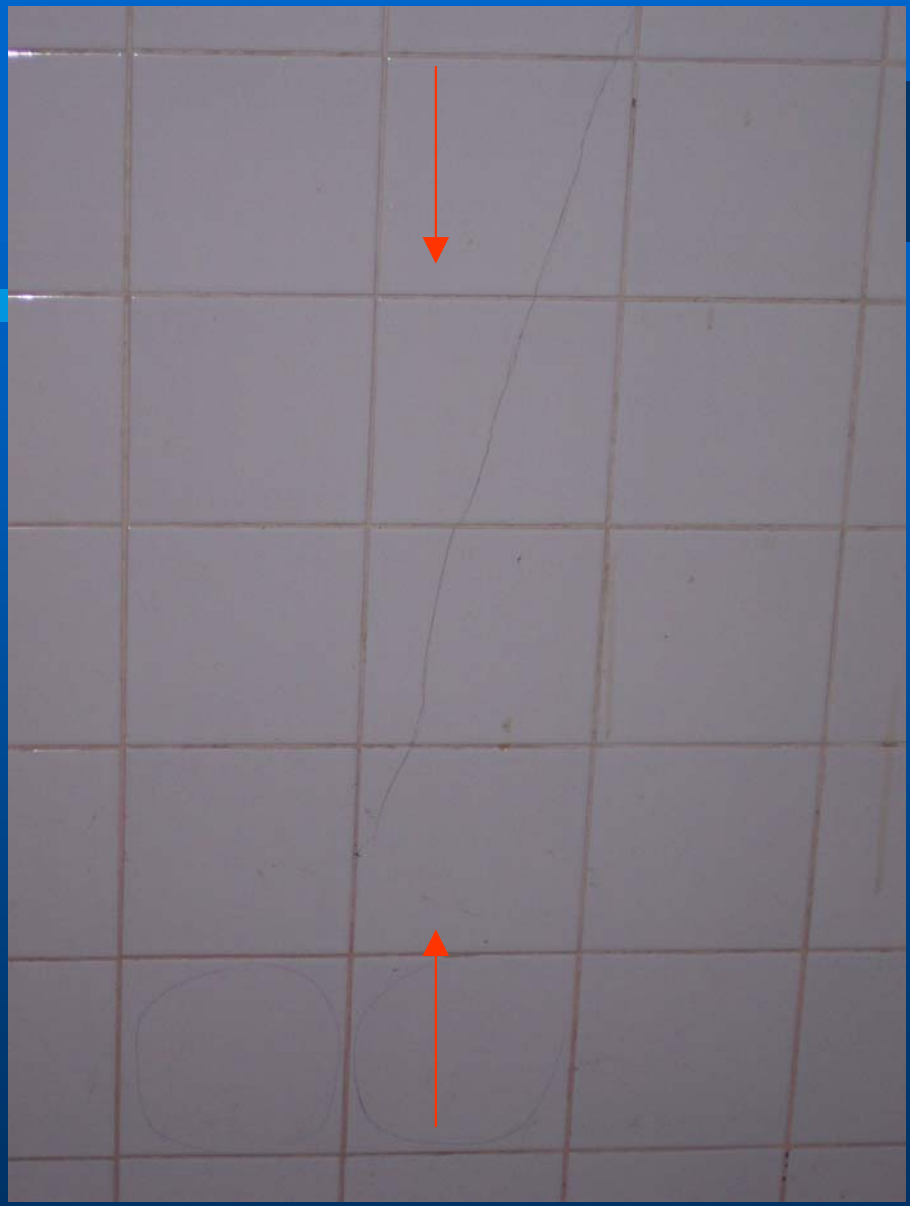




PRÉDIO EM JABOATÃO / PE

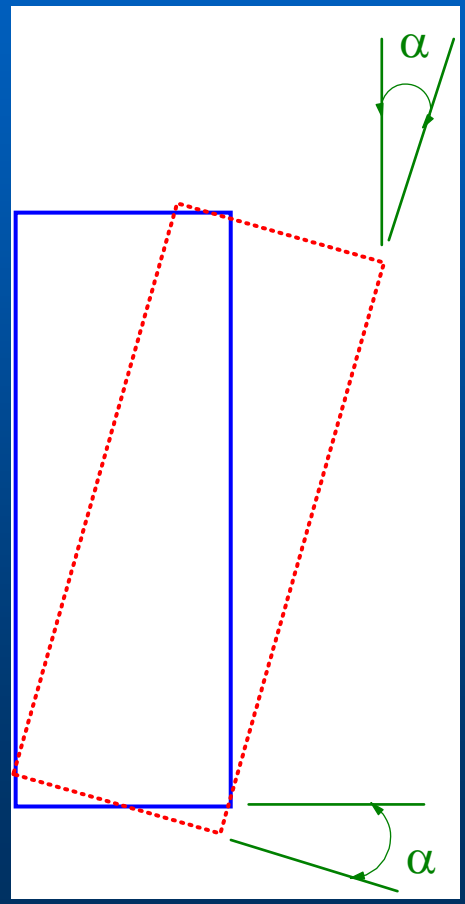
Sintomas Típicos – Pilares



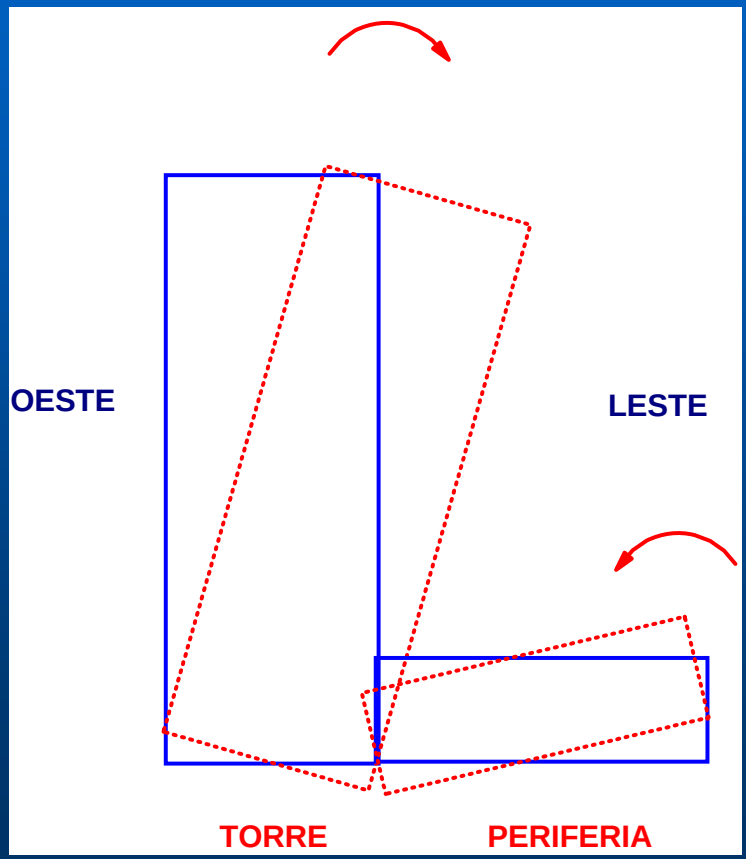


PRÉDIO EM JABOATÃO / PE

Sintomas Típicos – Desaprumo



Sintomas Típicos – Desaprumo



PRÉDIO EM JABOATÃO / PE

Sintomas Típicos – Desaprumo



$$w = \frac{\Delta s}{L} = \frac{23-12}{580} = 1/53$$

PRÉDIO EM JABOATÃO / PE

Sintomas Típicos – Piso



SUPERMERCADO EM RECIFE / PE

Sintomas Típicos – Piso



SUPERMERCADO EM RECIFE / PE

Sintomas Típicos – Piso



SUPERMERCADO EM RECIFE / PE

Sintomas Típicos – Piso



GALPÃO EM RECIFE / PE

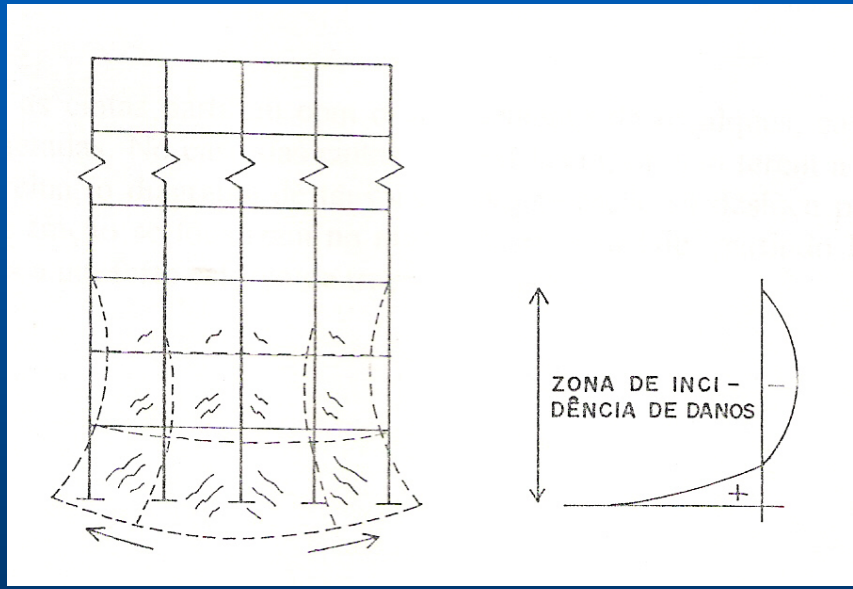
Sintomas Típicos – Piso



GALPÃO EM RECIFE / PE

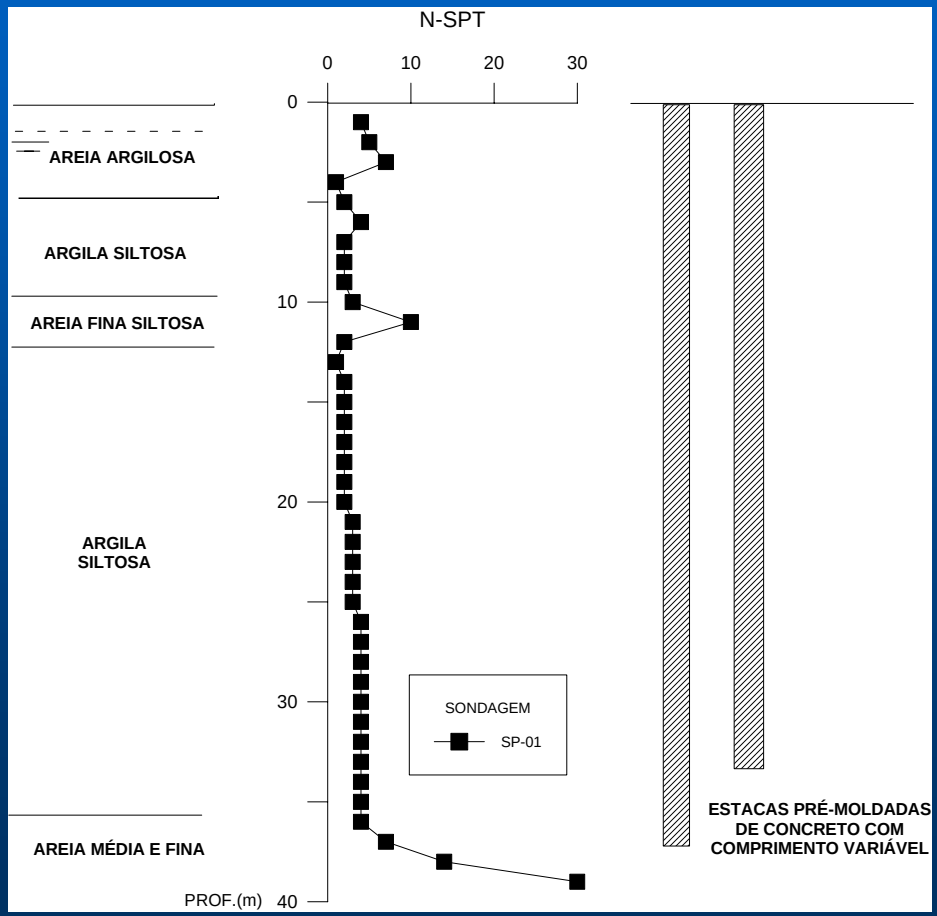
Zona de Ocorrência de Danos

- **Os danos são mais intensos nos pavimentos inferiores.**
- **Normalmente não atingem mais que 5 pavimentos.**



GUSMÃO E GUSMÃO FILHO (1997)

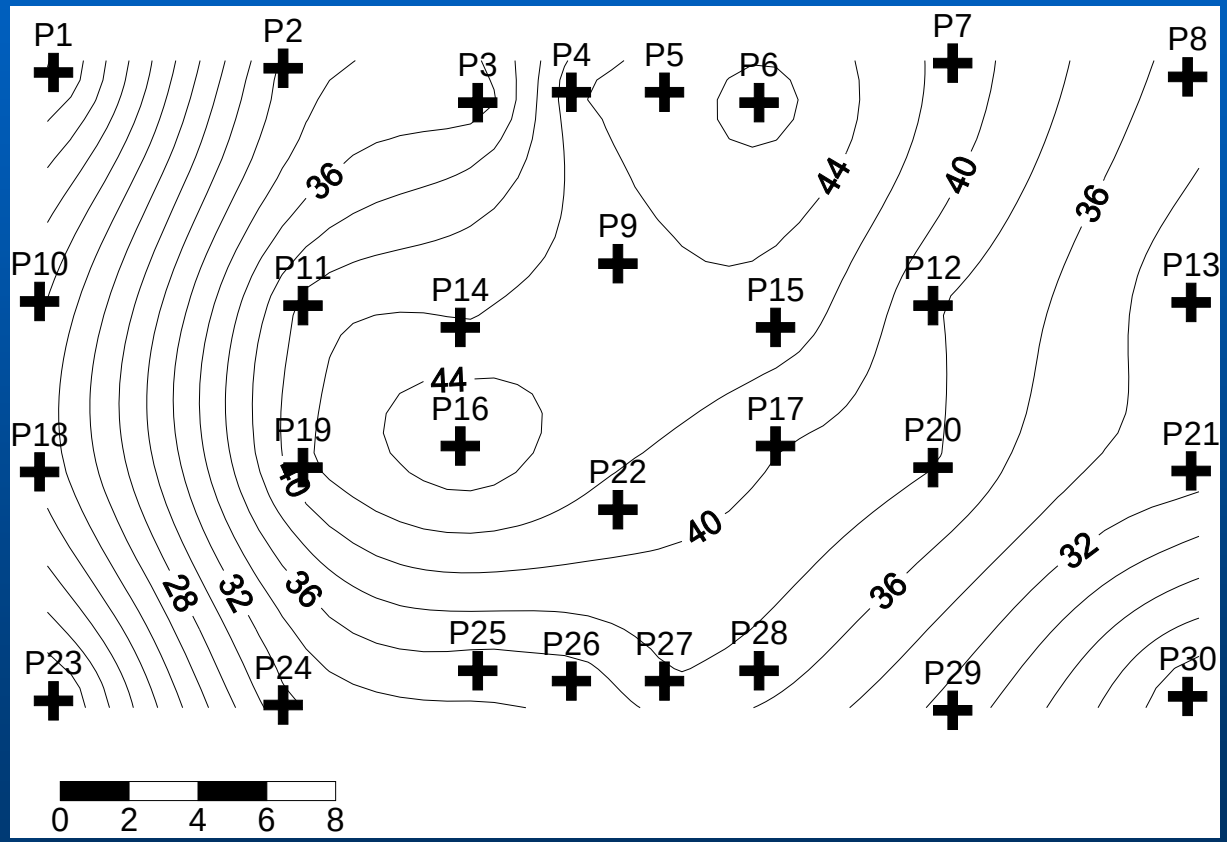
Exemplo



17 PAVTOS

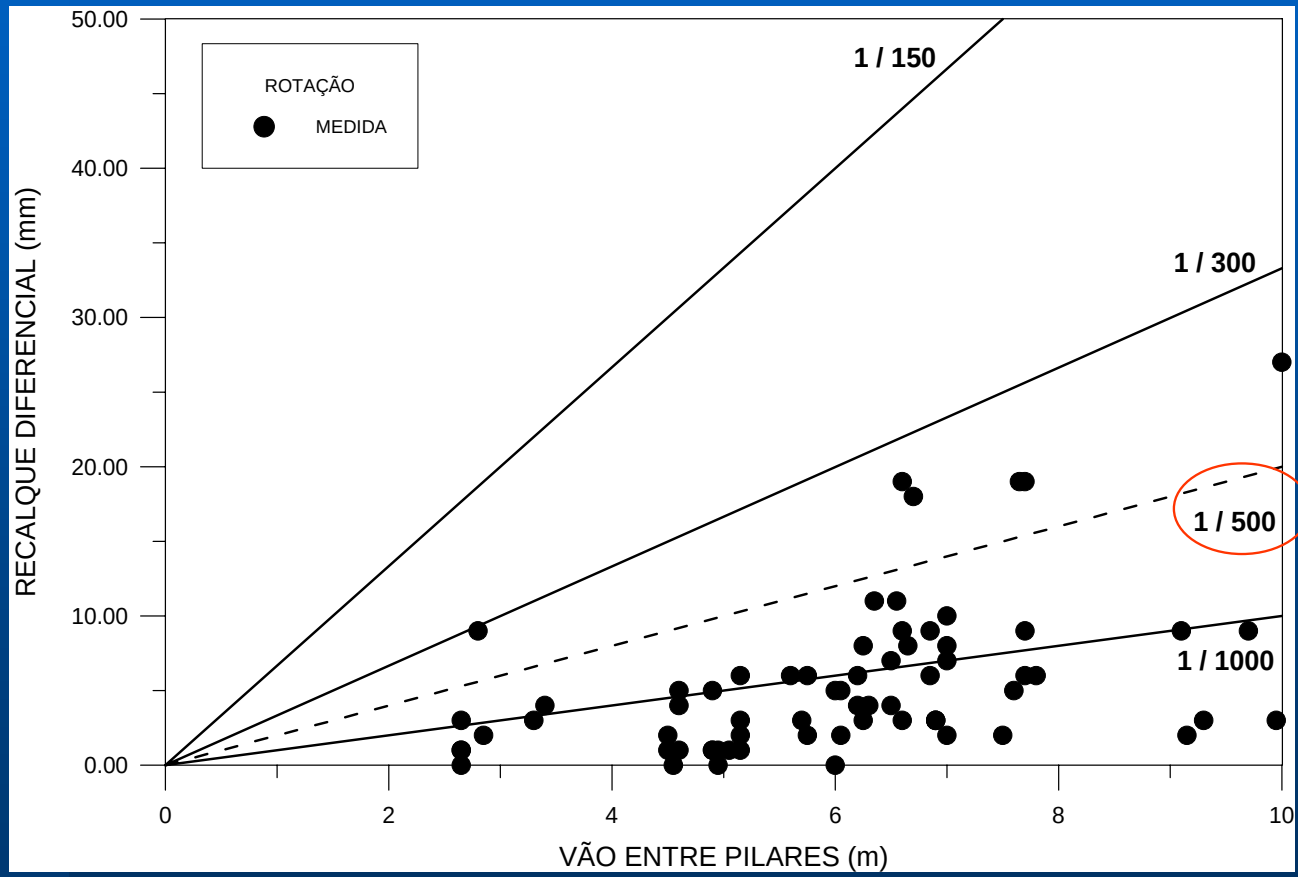
PRÉDIO EM RECIFE / PE

Exemplo

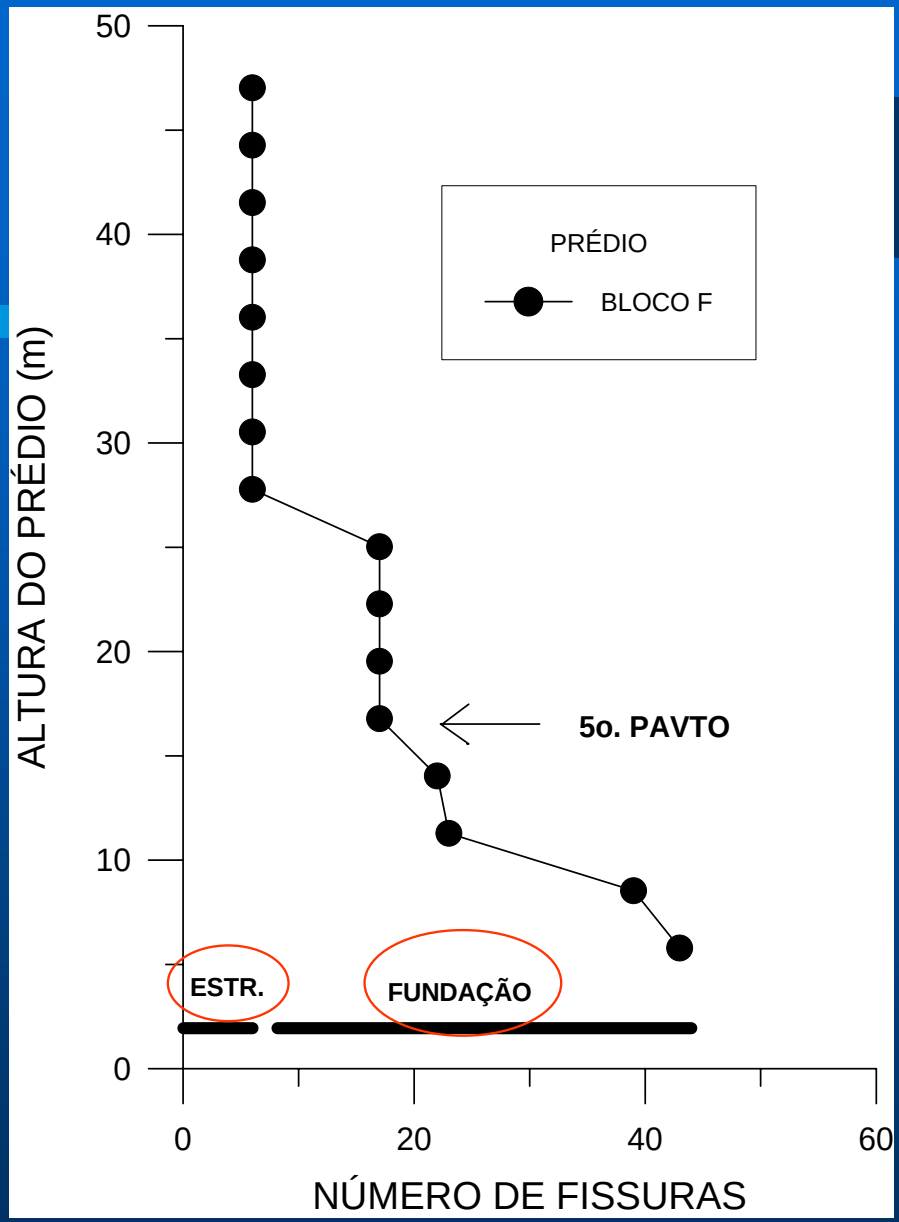


PRÉDIO EM RECIFE / PE

Exemplo



PRÉDIO EM RECIFE / PE



PRÉDIO EM RECIFE / PE

GUSMÃO (2006)

Levantamento de Danos

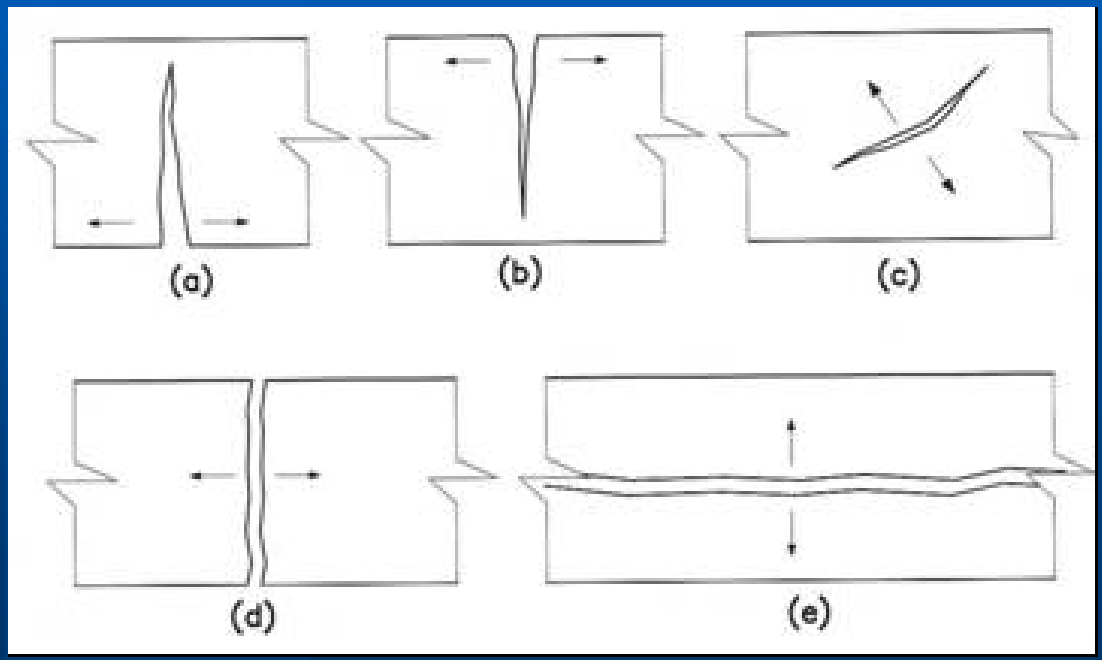
Levantamento de Danos

- As deformações e os movimentos da fundação provocam os danos.
- Os danos se manifestam de várias maneiras:
  - Materiais
  - Peças isoladas
  - Conjunto da obra

Classificação das Fraturas

Intensidade do Dano	Abertura da Fratura (mm)
Muito leve	1
Leve	5
Moderado	5 a 15
Severo	15 a 25
Muito severo	> 25

Fratura x Tipo de Esforço



(a) Flexão – deformada côncava

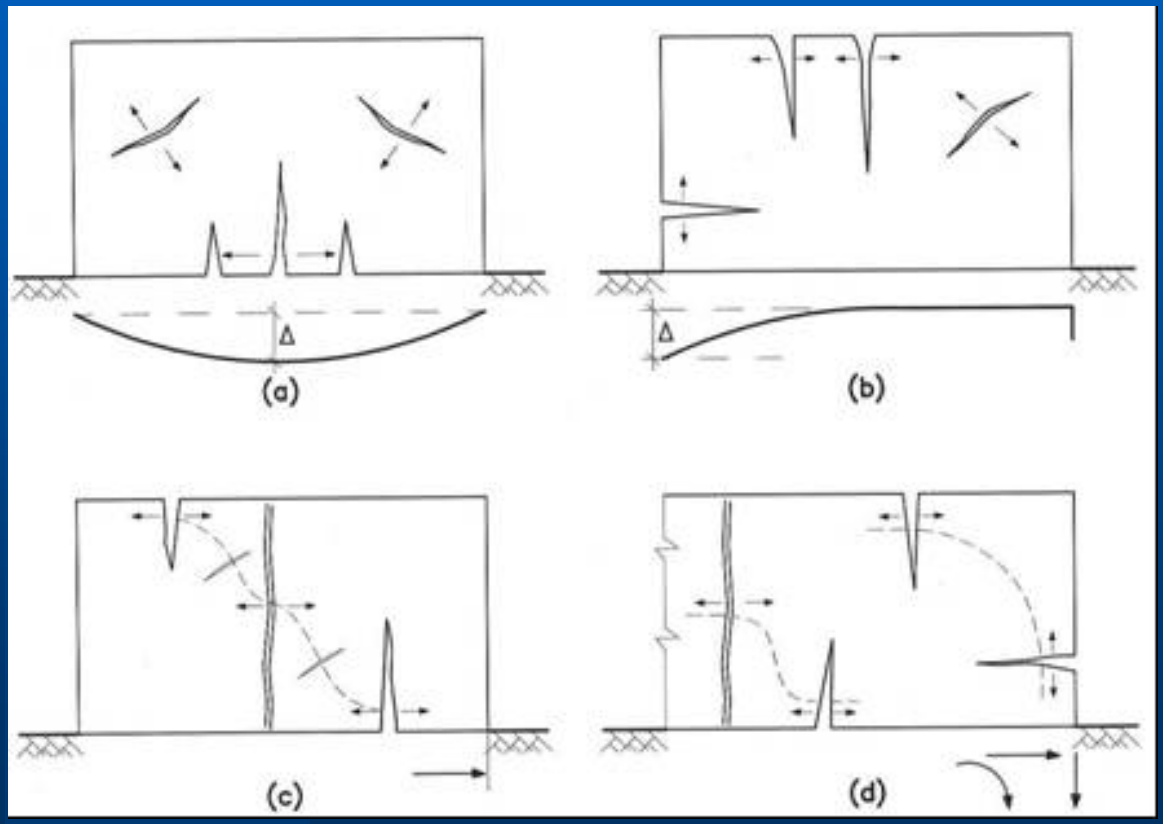
(b) Flexão – deformada convexa

(c) Cisalhamento – recalque LD

(d) Tração horizontal

(e) Tração vertical

Fratura x Tipo de Esforço



(a) Recalque no centro

(b) Recalque no bordo LE

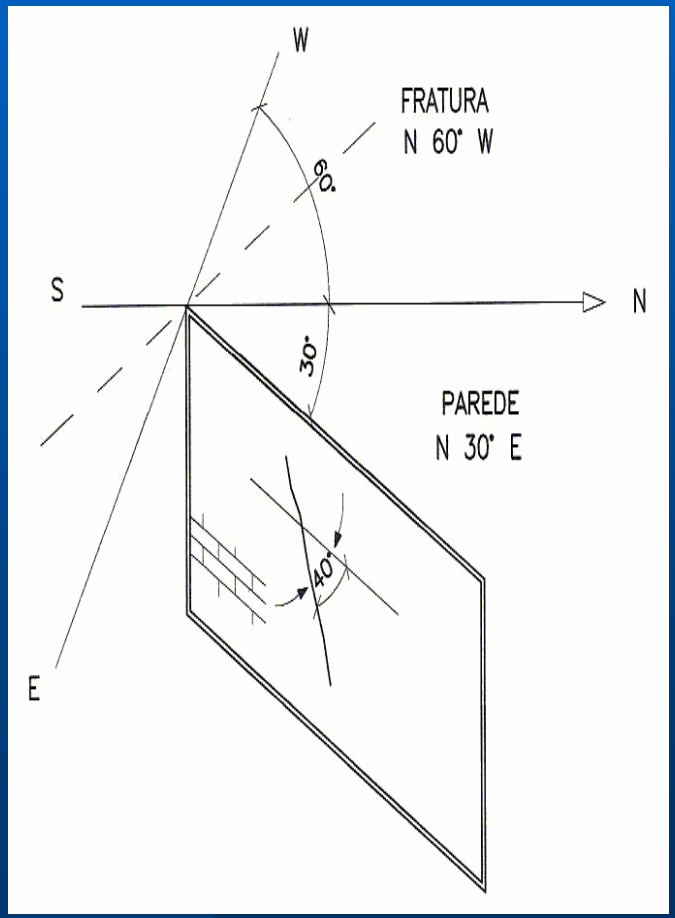
(c) Tração no terreno LD

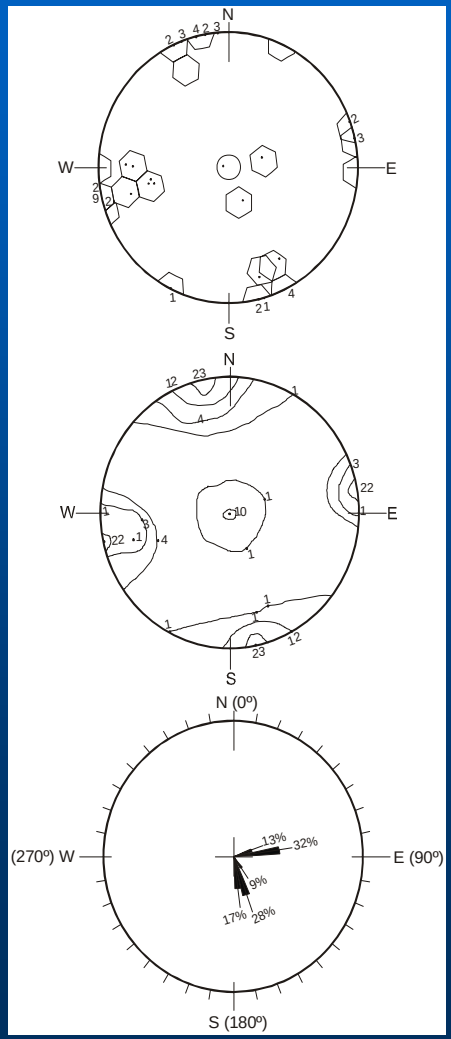
(d) Tração no terreno LD e recalque no bordo LD

Mapeamento de Danos

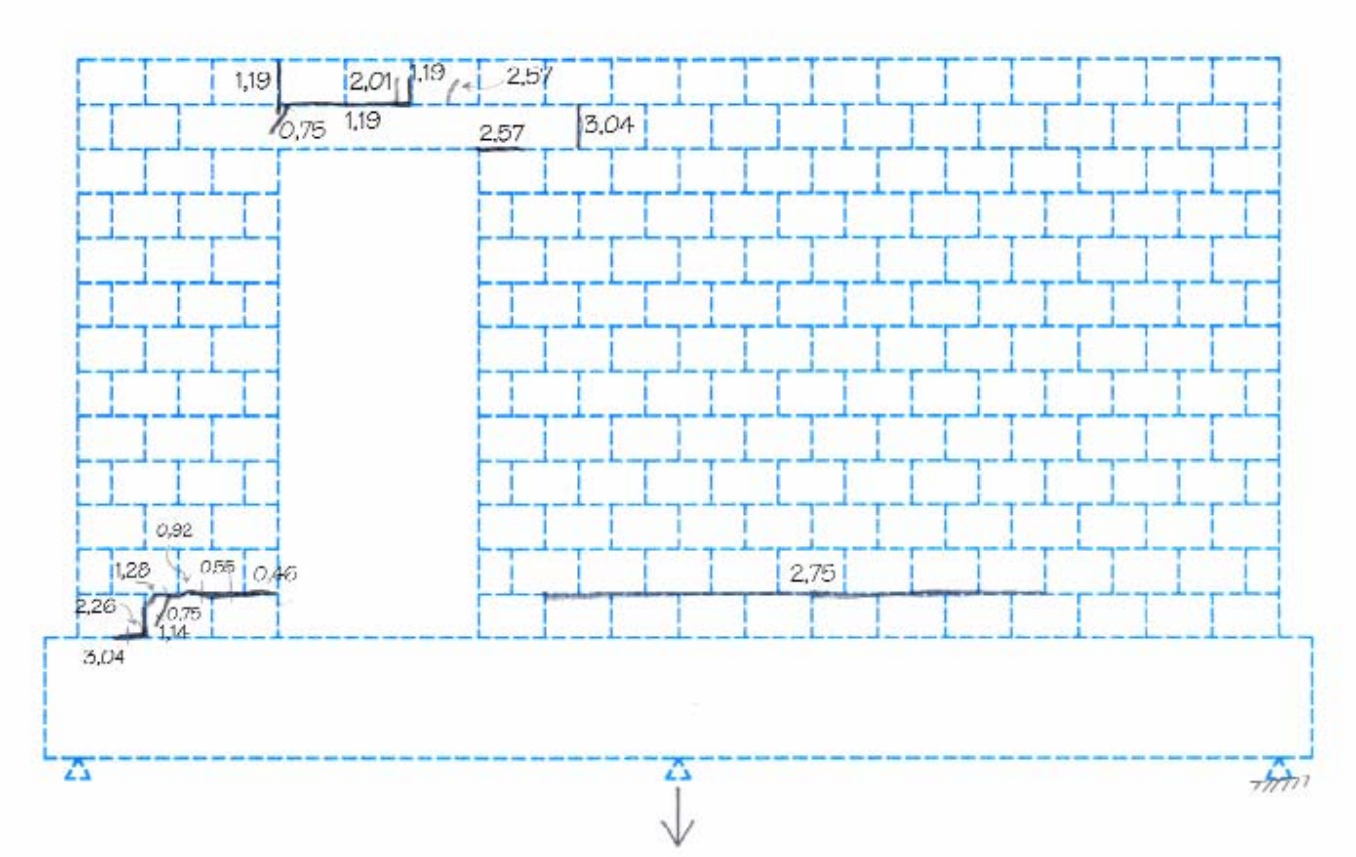
- **Tipo de representação:**
  - **Estereográfica (geologia estrutural)**
  - **Cartesiana (coquis, desenhos em escala, etc)**

Representação Esterográfica





Representação Cartesiana



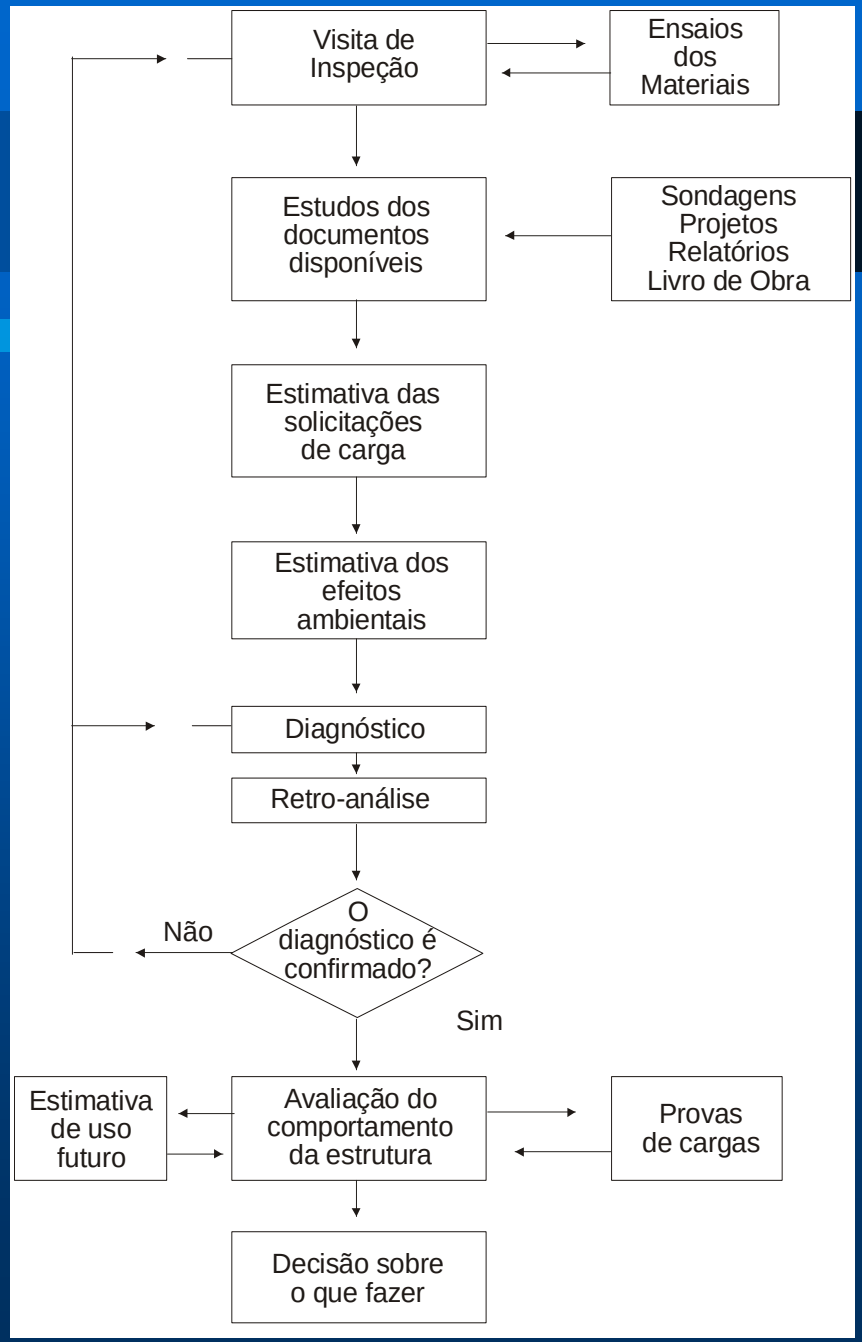
HOLANDA Jr. (2002)

Diagnóstico

Características

- **Método basicamente indutivo: causas x efeitos**
- **Deve ser baseado nos dados reais, e não nos indicados no projeto**
- **Podem ser necessários dados adicionais: sondagens, ensaios, provas de carga, etc**

Fluxograma



GUSMÃO FILHO (2006)

Carta de Diagnóstico

Causa do Dano	Detalhe
Problemas de escorregamento	- Recalque - Inclinação - Movimento lateral do solo - Movimento vertical do solo - Tirante incapaz de resistir
Problemas de variação de umidade	- Chuva ou seca prolongada, com solo expansivo ou colapsível - Árvores junto da construção - Subsidência geral, quando há rios e canais por perto - Rebaixamento do NA - Corte em talude de fundação - Subida do NA devido ao dreno ou barragem perto

Carta de Diagnóstico

Causa do Dano	Detalhe
Problemas de construção	- Recalque - Escavação do solo, em cavas superficiais ou galerias subterrâneas - Recalque em camada mole por rebaixamento do NA - Forma, concretagem e cura inadequada do concreto - Erro de bitola, posição e quantidade de ferro - Sobrecarga durante a construção - Excesso de compactação - Material pouco compactado - Aterro de solo expansivo - Execução de estacas e aterro em terreno fofo ou mole

Carta de Diagnóstico

Causa do Dano	Detalhe
Efeitos ambientais	**- Recalque** **-Erosão geral ou local de pilares de pontes** **- Erosão interna (“piping”)** **- Percolação** **- Mudanças de temperatura** **- Ataque de ácidos** **- Fatores geológicos, como cavernas, movimentos de massa, etc** **- Elementos biológicos, como formigas, cupins, ataque de microorganismos Corrosão**

Carta de Diagnóstico

Causa do Dano	Detalhe
Erros de projeto	- Recalque - Carga subestimada - Resistência superestimada - Ficha enterrada subdimensionada - Omissão de juntas - Cálculo errado
Tecnologias de obras	- Deficiência na drenagem - Material estranho no concreto (sal,etc). - Agregados expansivos e RAA - Concreto permeável - Dosagem inadequada do concreto - Blocos de pedra mal rejuntados - Revestimentos inadequados - Vazamentos

Carta de Diagnóstico

Causa do Dano	Detalhe
Cargas Inesperadas	- Recalque - Explosão de gás, bombas, etc. - Colisão - Colapso de edifício adjacente - Abalo sísmico

GUSMÃO FILHO (2006)

Movimentos Admissíveis

Critérios

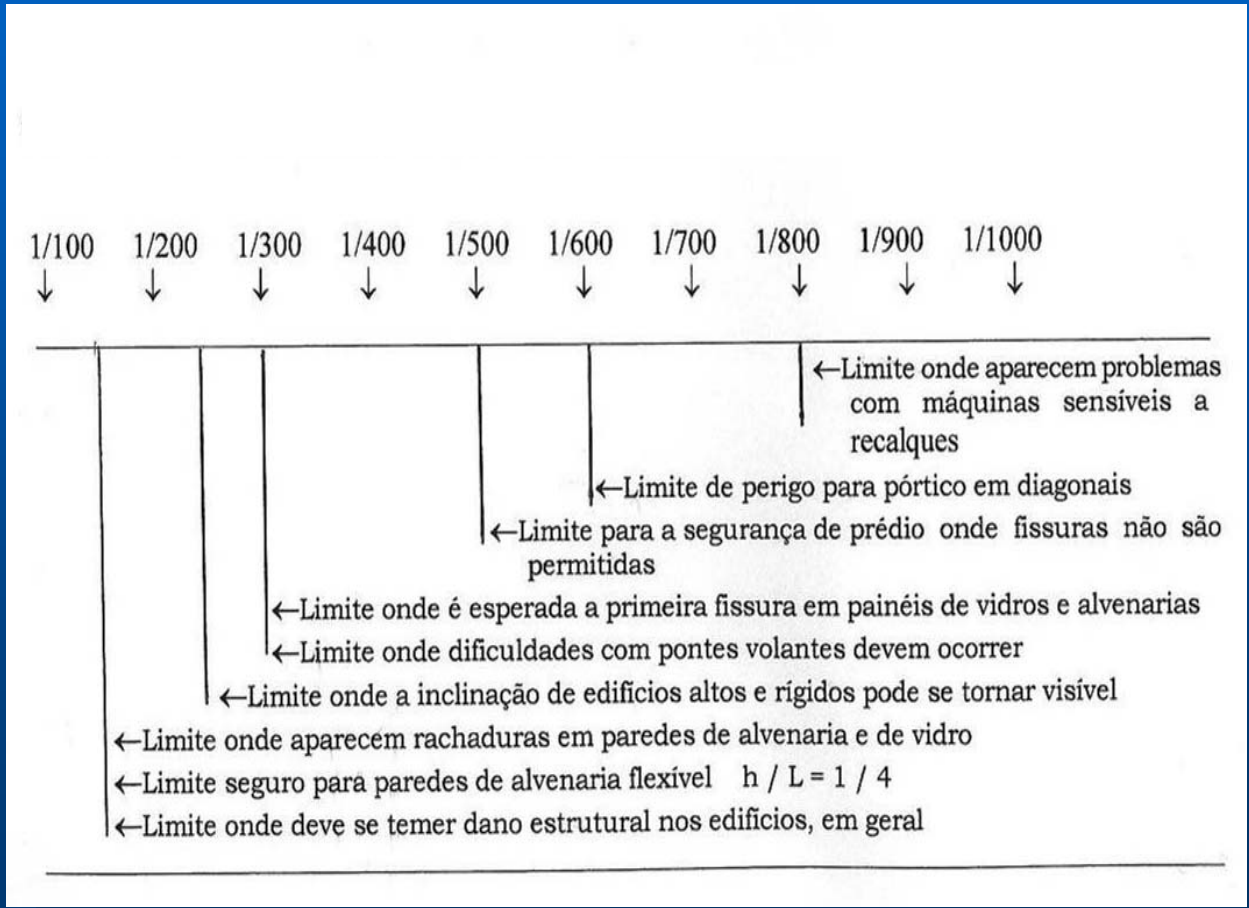
Parâmetro	Dano Associado	Referências
Recalque Absoluto Máximo	- Estético - Funcional	- Terzaghi e Peck (1987) - Polshin e Tokar (1957) - Sowers (1962)
Distorção Angular Máxima	- Estético - Funcional - Estrutural	- Skempton e MacDonald (1956) - Bjerrum (1963)
Tensão Máxima de Tração	- Estético - Estrutural	- Burland e Wroth (1974)

Recalque Absoluto Máximo

Tipo de Fundação	Recalque Máximo (mm)	
	Terreno Arenoso	Terreno Argiloso
Sapatas	25 a 40	65
Radier	40 a 65	65 a 100

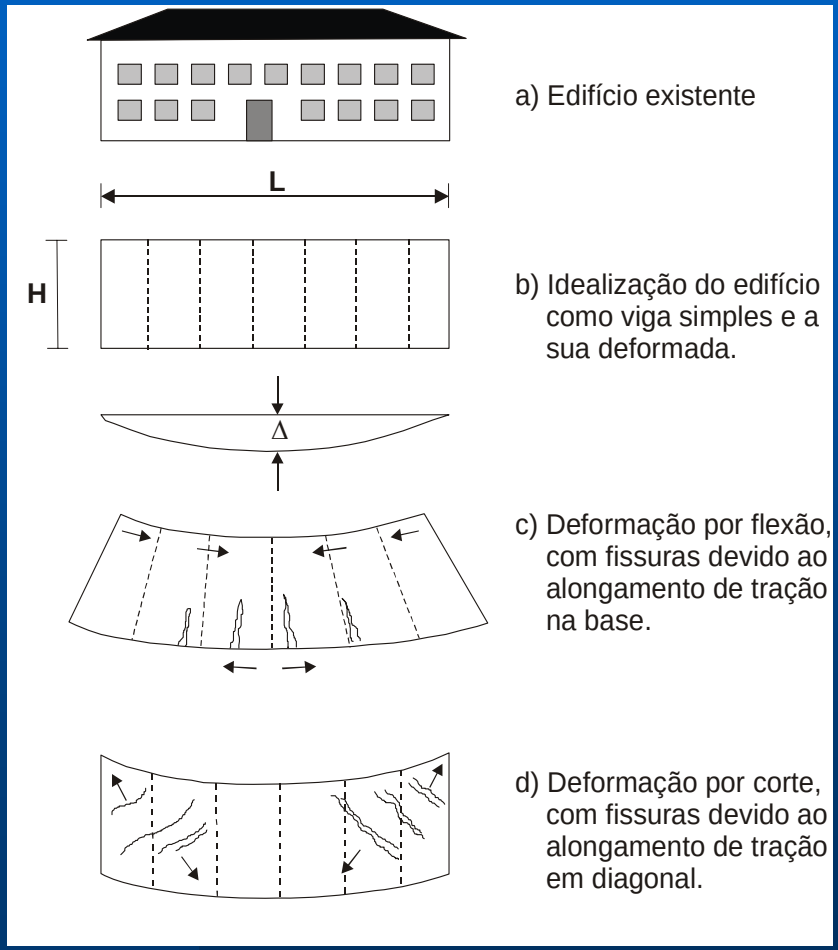
Polshin & Tokar (1957)

Distorção Angular Máxima



Bjerrum (1963)

Alongamento Máximo de Tração



a) Edifício existente

b) Idealização do edifício como viga simples e a sua deformada.

c) Deformação por flexão, com fissuras devido ao alongamento de tração na base.

d) Deformação por corte, com fissuras devido ao alongamento de tração em diagonal.

Material	ε crit [%]
Material de tijolo e de pedra, com argamassa de cimento	0,05 a 0,10
Concreto armado	0.03 a 0,05

Burland & Wroth (1974)

Monitoramento das Obras

Instrumentação

- **Calibração dos modelos de cálculo:** previsto x medido
- **Otimização de projetos:** método observacional
- **Identificação de** situações de risco: **velocidade de recalques**

Experiência do Recife

- **Sensibilização do setor a partir da década de 90.**
- **Monitoramento: mais um controle tecnológico da obra.**
- **Retroanálise de parâmetros dos solos: otimização dos projetos.**
- **Identificação das causas de eventuais patologias.**

Custos do Monitoramento

Serviço	Custo (R$)
-Prova de carga estática em estaca (carga de ensaio de 3 MN)	12.000,00 a 15.000,00
-Prova de carga dinâmica (05 ensaios + 02 análises capwap)	5.000,00 a 8.000,00
-Medição de recalques (nivelamento + 06 leituras)	4.000,00*



* custo diluído ao longo do tempo de construção

Medição de Recalques

- **Pinos: aço inoxidável e base esférica.**



Recife – UPE



Rio de Janeiro - COPPE

Medição de Recalques

- **Referêncial de nível: ideal é aquele que se apresenta como indeslocável.**
  - ✓ **Profunda**
  - ✓ **Superficial**



RN PROFUNDO

Medição de recalques

- **Nível: ótico e dotado de placa plano paralela.**



Medição de Recalques

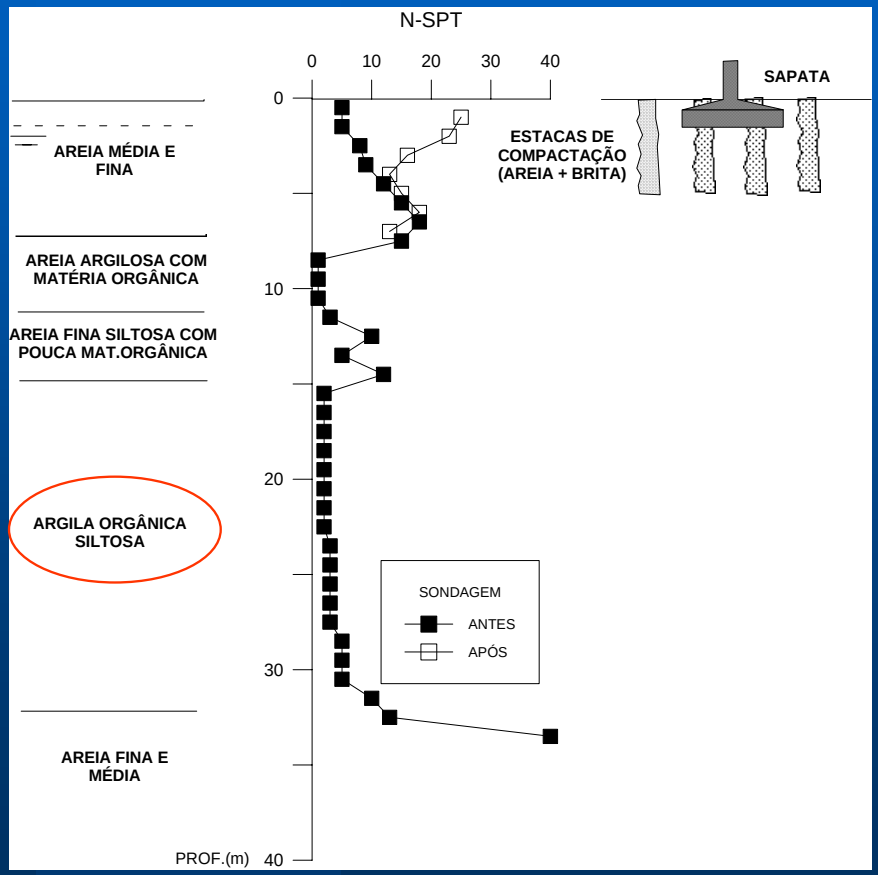
- **Mira: chapa de invar.**

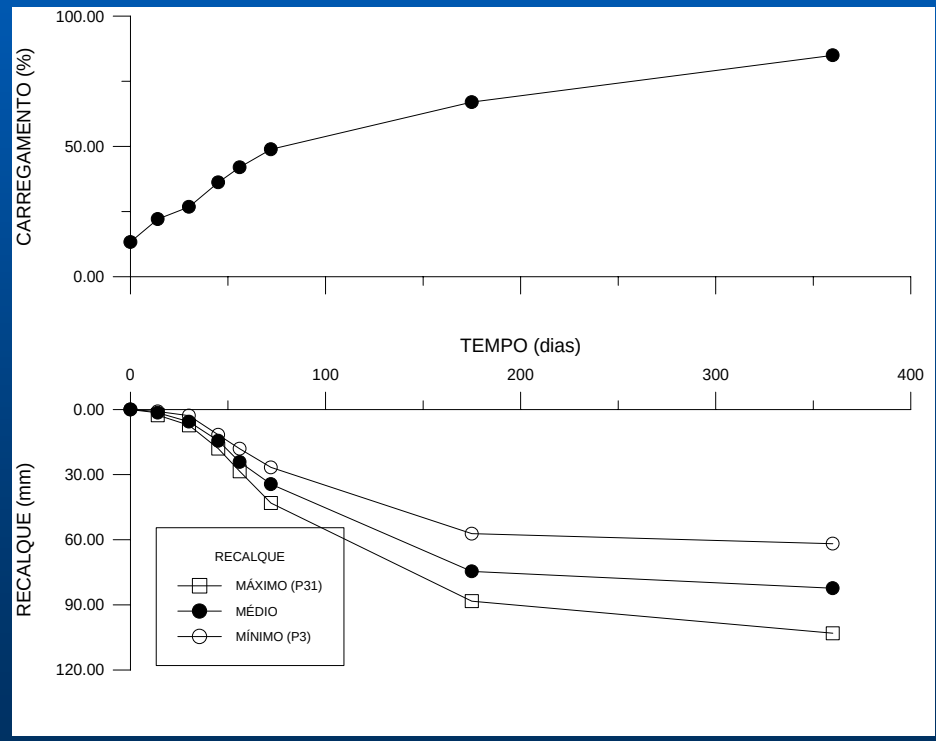


Freqüência das Medições

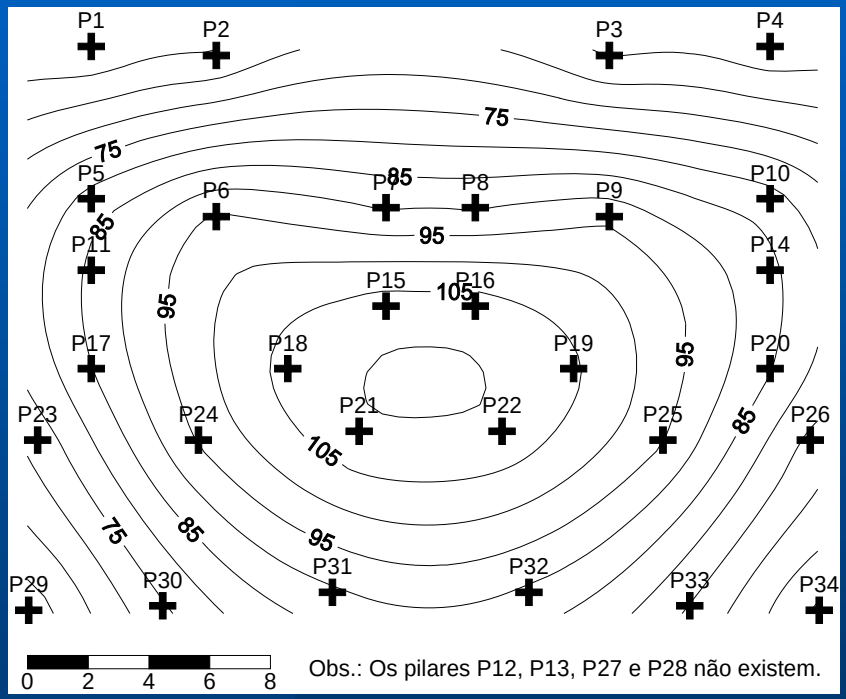
Etapa	No. de Medições
-Até a concretagem da 1ª laje	Instalação dos pinos + Nivelamento
-Até a concretagem da coberta	+02
-Até o final do assentamento da alvenaria	+01
-Até o final do revestimento interno e externo:	+01
-Até o final do assentamento de piso	+01
-Antes da entrega do prédio	+01
Total	07

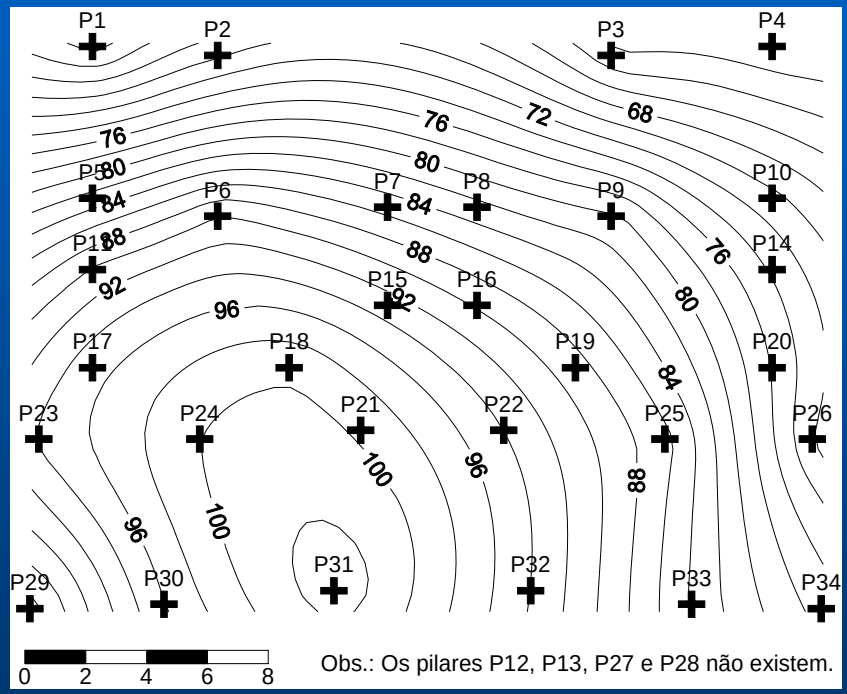
Exemplo


N-SPT
0
10
20
30
40
SAPATA
ESTACAS DE COMPACTAÇÃO (AREIA + BRITA)
AREIA MÉDIA E FINA
AREIA ARGILOSA COM MATÉRIA ORGÂNICA
AREIA FINA SILTOSA COM POUCA MAT.ORGÂNICA
ARGILA ORGÂNICA SILTOSA
AREIA FINA E MÉDIA
SONDAGEM
ANTES
APÓS
PROF.(m)


CARREGAMENTO (%)
100.00
50.00
0.00
TEMPO (dias)
0
100
200
300
400
RECALQUE (mm)
0.00
30.00
60.00
90.00
120.00
RECALQUE
MÁXIMO (P31)
MÉDIO
MÍNIMO (P3)

Exemplo





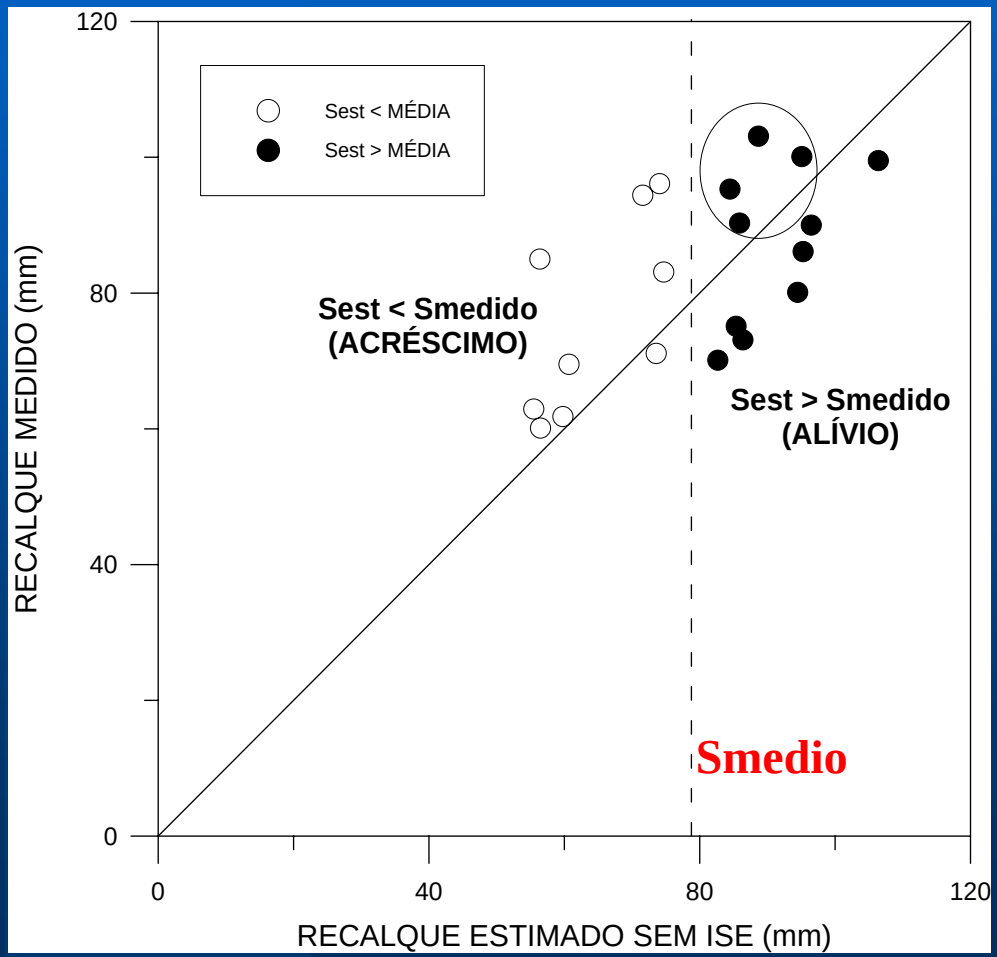
ESTIMADO SEM ISE

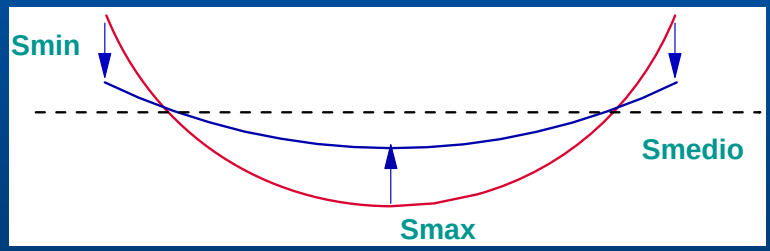
$\overline{S}$ = 79,2 mm CV = 0,189

MEDIDO

$\overline{S}$ = 82,3 mm CV = 0,162

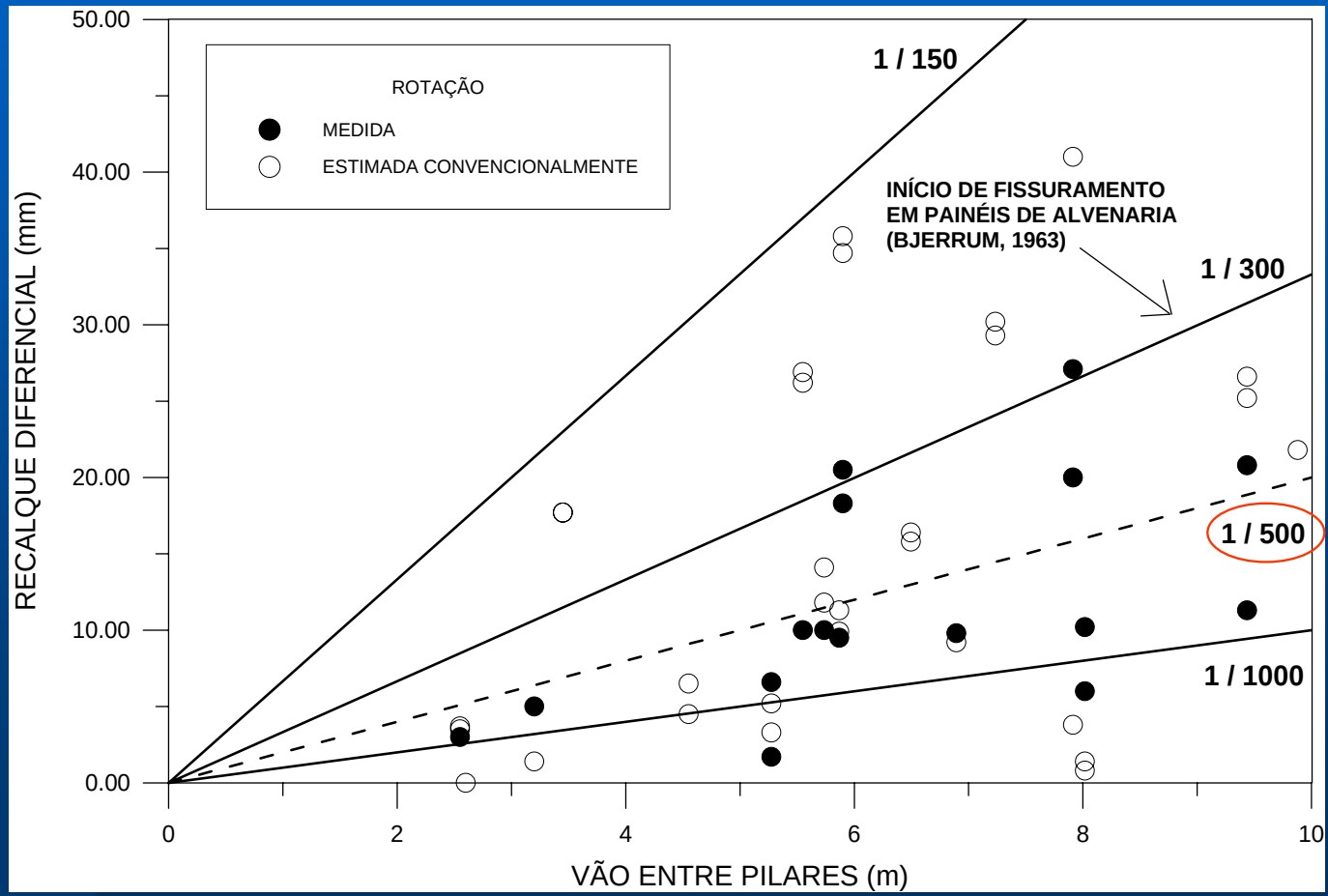
Exemplo





DEFORMADA DE RECALQUES

Exemplo


ROTAÇÃO
MEDIDA
ESTIMADA CONVENCIONALMENTE
1 / 150
INÍCIO DE FISSURAMENTO
EM PAINÉIS DE ALVENARIA
(BJERRUM, 1963)
1 / 300
1 / 500
1 / 1000
RECALQUE DIFERENCIAL (mm)
VÃO ENTRE PILARES (m)
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
0
2
4
6
8
10

Medição de Carga nos Pilares

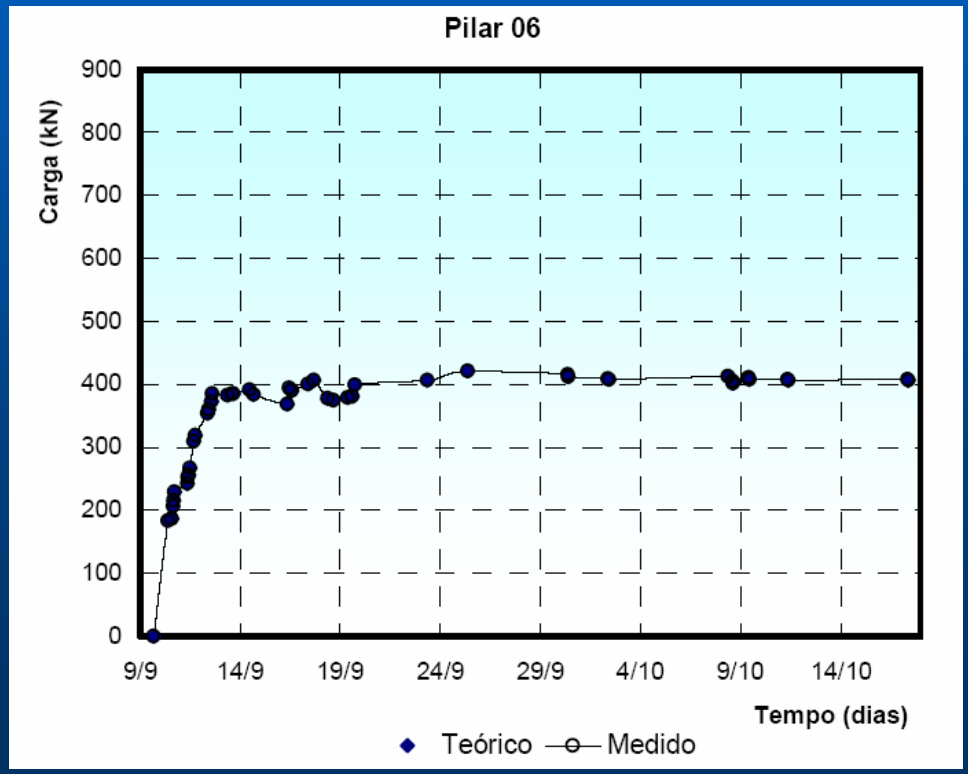
- **É feita de maneira indireta: (deformação do pilar → modelo tensão-deformação → carga).**
- **Dificuldade de interpretação: fluência + retração do concreto + efeitos térmicos.**

Medição de Carga nos Pilares

- **Russo Neto (2005): ótimos resultados.**



EXTENSÔMETRO MECÂNICO



EVOLUÇÃO DA CARGA NA CONSTRUÇÃO

Muito obrigado pela atenção ...

gusmao.alex@ig.com.br