

# Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração

## Capítulo 32

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho. UFRGS  
Paulo Helene. PhD Engenharia

•1

### 32.1 Introdução e Importância do Tema

Discutir a questão da avaliação de estruturas de concreto com problemas de resistência e perda de integridade por fissuração.

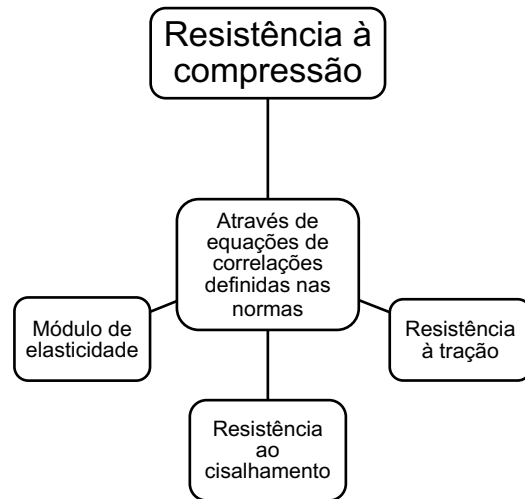


São processos patológicos importantes que necessitam ser adequadamente diagnosticados e tratados, pois podem afetar negativamente a segurança, durabilidade, funcionalidade e desempenho das estruturas de concreto.

•2

### 32.2 Conceitos Básicos Sobre a Resistência à Compressão do Concreto

Projeto típico de uma estrutura civil



•3

A resistência do concreto vai variar ao longo de uma estrutura de grandes dimensões, construída durante um período de tempo de vários meses, utilizando diferentes betonadas ou caminhões de concreto, que ficam sujeitas a condições ambientais e carregamentos distintos.

### Burj Khalifa, Dubai

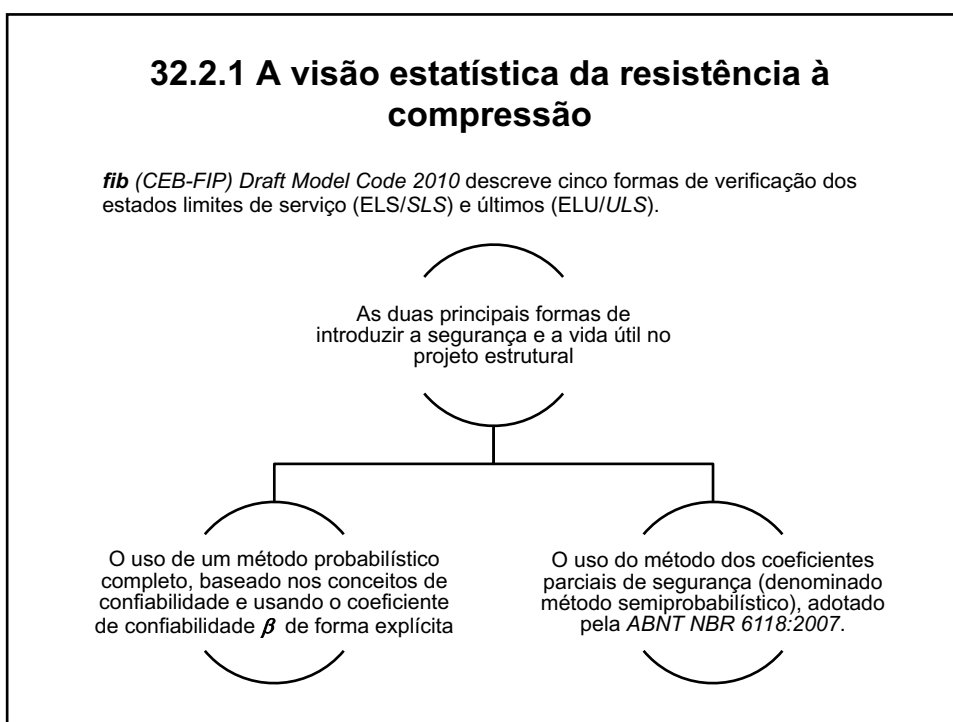


**828 metros de altura**  
**A faixa de temperatura ao longo do ano (10-50°C)**  
**Resistência do concreto superior aos 80 Mpa**  
**(Fonte: Produtos BASF)**

•4

<p>O boletim 214R-02 do ACI aponta uma série de fatores que podem causar variações na resistência do concreto</p>	Variações na relação água/materiais cimentícios.
	Variações na demanda de água.
	Variações nas características e proporções dos materiais constituintes.
	Variações nas condições de mistura, transporte, lançamento e adensamento.
	Variações nas condições ambientais durante o processo de cura.

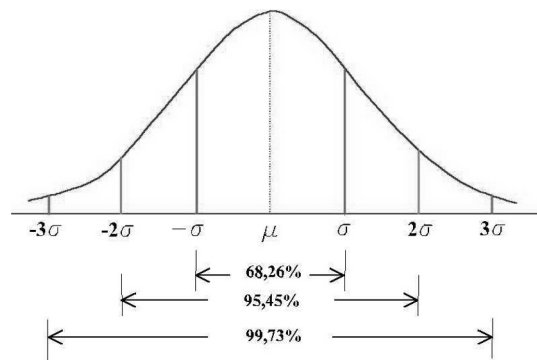
•5



•6

### 32.2.1 A visão estatística da resistência à compressão

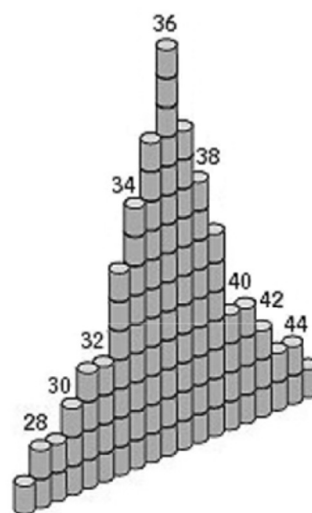
Na prática, somente as resistências dos materiais são usadas como variáveis aleatórias a serem medidas e quantificadas durante o processo de execução e uso da estrutura, pois as cargas estão pré-fixadas em tabelas de cargas médias e textos normativos.



•7

### 32.2.1 A visão estatística da resistência à compressão

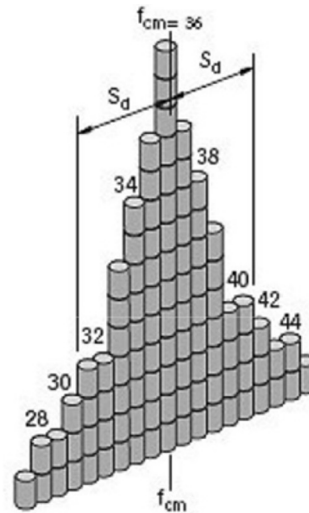
Se todos os corpos de prova fossem empilhados lado a lado de acordo com as resistências obtidas nos ensaios, formariam uma imagem que pode ser comparada com uma distribuição Normal de Probabilidade, semelhante à distribuição de Gauss.



•8

### 32.2.1 A visão estatística da resistência à compressão

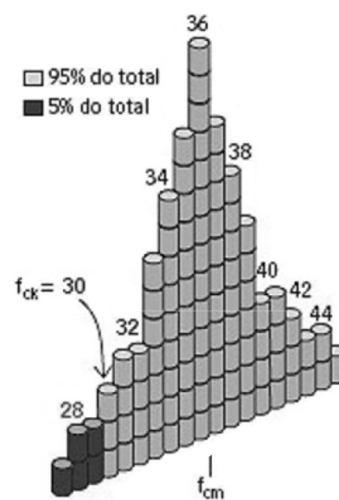
A média das resistências dos corpos de prova é indicada por  $f_{cm}$ . O desvio-padrão ( $S_d$ ) é a unidade básica da variação dos resultados em torno dessa média. Quanto menor o valor de  $S_d$ , mais efetivo o controle que a central dosadora de concreto tem sobre a qualidade do material que fornece.



•9

### 32.2.1 A visão estatística da resistência à compressão

$f_{ck}$  → resistência característica do concreto à compressão. Valor de referência para projeto e produção. Somente 5% do volume do concreto na estrutura pode estar abaixo desse valor referido a condições padrões e ideais de adensamento, cura, capeamento, ensaio. No Brasil refere-se à resistência medida num cilindro padrão com  $h/d = 2$ .



•10

### 32.2.1 A visão estatística da resistência à compressão

Valor	Definição
$f_{cd}$	Resistência de projeto do concreto à compressão (equivalente à $f_{ck,ef}$ , desde que a qualidade da execução esteja dentro das tolerâncias. $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$
$f_{ck,ef}$	Resistência característica efetiva (real) do concreto na estrutura. Impossível de ser conhecida.
$f_{ck,est}$	Resistência característica estimada do concreto à compressão. Valor obtido a partir de conceitos estatísticos referido ao quantil de 5% inferior de uma distribuição normal (Gauss).
$f_{c,ext,j}$	Resistência à compressão do concreto obtida de testemunho extraído da estrutura a j dias de idade.
$f_c$	Resistência do concreto à compressão. Obtida a partir de amostragem e ensaio padrão, sob condições ideais. Representa a menor unidade de produto de uma produção de concreto, ou seja, todo o concreto de uma única amassada.

•11

### 32.2.2 Correções na resistência devido aos efeitos de longa duração

- ✓ Entende-se por longa duração qualquer carregamento que atue por um período superior a 15 minutos. Nessas condições todos os materiais e também o concreto apresenta uma resistência inferior àquela medida num ensaio "instantâneo", monotônico, estático e único.
- ✓ A tensão à compressão de cálculo do concreto,  $\sigma_{cd}$ , aos 50 anos de idade, a ser utilizada pelo projetista estrutural, seria:

$$\sigma_{cd} = f_{cd} * \beta = (f_{ck} / \gamma_c) * \beta$$

- ✓ Essa seria a tensão admitida como disponível no elemento estrutural, para fins de introdução da segurança no projeto, nas condições dos estados limites últimos ELU, seria aplicado aos 28 dias de idade e mantido até 50 anos de idade.

•12

### 32.2.2 Correções na resistência devido aos efeitos de longa duração

O coeficiente  $\beta$  de Rüsçh:

$$\beta = \beta_1 \times \beta_2$$

- ✓  $\beta_1$  que depende da taxa de crescimento da resistência à compressão do concreto a partir da data de aplicação da carga.
- ✓  $\beta_2$  que depende da taxa de “perda de capacidade resistente por efeito da carga de longa duração” do material (concreto, aço, madeira) também chamado no Brasil de efeito Rüsçh.

No caso da *ABNT NBR 6118:2007*, a partir de 28 dias até 50 anos:

- ✓  $\beta_1 = 1.16$
- ✓  $\beta_2 = 0.73$
- ✓  $\beta = 0.85$

•13

### 32.2.2 Correções na resistência devido aos efeitos de longa duração

No caso de não se dispor de resultados reais de crescimento da resistência do concreto da estrutura em análise, pode-se adotar o modelo matemático:

$$\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}} = e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{j}}\right)}$$

- ✓ j: idade do concreto em dias;
- ✓  $f_{c,j}$ : resistência à compressão média do concreto na idade j dias;
- ✓  $f_{c,28}$ : resistência à compressão média a 28 dias;
- ✓ s: coeficiente que depende do tipo de cimento

O texto da *ABNT NBR 6118:2007*, item 12.3.3, adota a mesma formulação, porém restringe seu uso apenas a idades inferiores a 28 dias.

•14

### 32.2.2 Correções na resistência devido aos efeitos de longa duração

*fib* (CEB-FIP) Model Code 2010, o modelo matemático que melhor representa o efeito deletério da ação das cargas de longa duração é:

$$\frac{f_{c,j}}{f_{c,t_0}} = 0,96 - 0,12 * \sqrt[4]{\ln\{72 * (j - t_0)\}}$$

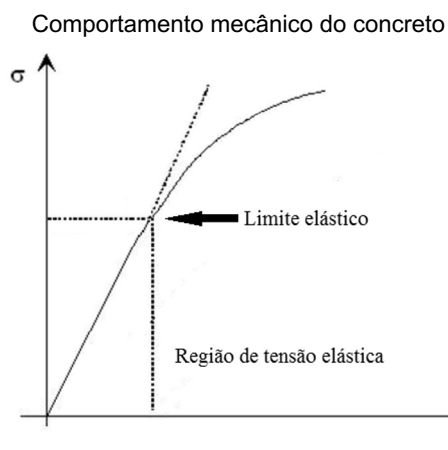
- ✓  $f_{c,sus,j}$  = resistência à compressão do concreto sob carga mantida, na idade  $j$  dias, em MPa;
- ✓  $f_{c,t_0}$  = resistência potencial à compressão do concreto na data (idade)  $t_0$  instantes antes de aplicação da carga de longa duração, em MPa;
- ✓  $t_0$  = idade de aplicação da carga, em dias, considerada significativa;
- ✓  $j$  = qualquer idade do concreto *a posteriori* de  $t_0$ , expressa em dias ou fração de dias.

•15

### 32.3 Princípios de Controle da Resistência do Concreto em Estruturas

A adoção de um determinado valor de referência para a resistência à compressão durante o processo de projeto estrutural tem repercussões vitais na:

- ✓ Segurança e durabilidade das estruturas de concreto resultantes.
- ✓ Propriedades importantes estão diretamente ou indiretamente associados à resistência à compressão do concreto, principal parâmetro de controle de estruturas de concreto simples e armado.



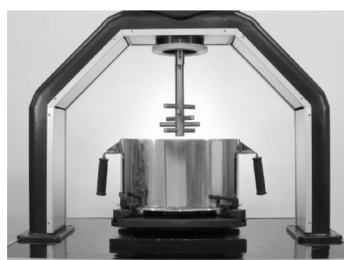
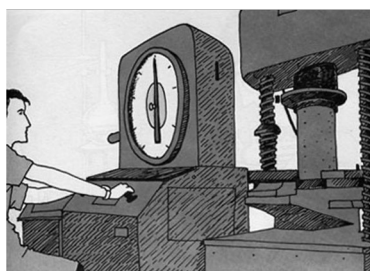
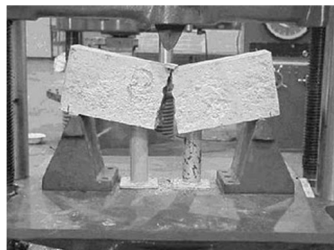
•16



### 32.3 Princípios de Controle da Resistência do Concreto em Estruturas

Pode ser complexa:

Pois envolve cuidados para uma adequada coleta de amostras e realização de ensaios de laboratório representativos.



•17

### 32.3 Princípios de Controle da Resistência do Concreto em Estruturas



Também, sua análise demanda a participação de diferentes profissionais, tanto ligados à tecnologia do concreto quanto ao cálculo estrutural, além de envolver considerações estatísticas.

•18

### 32.3.1 Especificações normativas sobre controle da resistência

NORMA	ANO	TÍTULO	OBSERVAÇÕES
ABNT NBR 6118	2007	Projeto de estruturas de concreto - Procedimento	Documento técnico principal no Brasil.
ABNT NBR 14931	2004	Execução de estruturas de concreto - Procedimento	Documento complementar mais importante para as questões relativas à resistência mecânica.
ABNT NBR 12655	2006	Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento	Requisitos da qualidade do concreto
ABNT NBR 7212	1984	Execução de concreto dosado em central	Requisitos adicionais para a norma ABNT NBR 12655
ABNT NBR 12654	2000	Controle tecnológico de materiais componentes do concreto - Procedimento	Para o controle da qualidade dos materiais componentes do concreto

•19

### 32.3.1 Especificações normativas sobre controle da resistência

O controle da resistência do concreto pode ser feito:

Controle total	Controle parcial
O concreto de cada betonada é controlado individualmente (100%), sendo realizado mapeamento dos locais de lançamento na estrutura.	O controle é feito sem que seja realizado o mapeamento dos locais de lançamento do concreto na estrutura, independentemente se a amostragem é total ou parcial.
<p><b>Observação:</b> Embora não seja um requisito de norma, os autores deste capítulo recomendam que, de preferência, proceda-se ao controle total (100%) do concreto, com mapeamento detalhado dos locais ou elementos que receberam o volume de concreto de um determinado caminhão betoneira.</p>	

•20

### 32.3.2 Cuidados necessários na coleta de amostras

Um dos cuidados necessários para garantir que os corpos-de-prova moldados representem a resistência do concreto diz respeito aos procedimentos de coleta das amostras. A norma ABNT NBR 12655:2006 estabelece todos os procedimentos para retirada e acondicionamento de amostras.

Em os casos triviais o autor recomenda
<ul style="list-style-type: none"> <li>Retirar os corpos-de-prova do último terço do caminhão.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Evite lançar água em excesso no balão, para não correr risco de distorcer significativa o traço e a qualidade do concreto.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>As normas solicitam que seja retirada somente uma amostra por caminhão.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ponto de vista da tecnologia do concreto é razoável considerar que todo o concreto de um balão de um único caminhão betoneira é homogêneo e tem uma resistência similar e única.</li> </ul>

•21

### 32.3.2 Cuidados necessários na coleta de amostras

Essa consideração subsidia a noção de “exemplar”, adotada na *ABNT NBR 12655:2006* e que coincide com a visão da maioria das normas estrangeiras e também da Norma Internacional ISO 22965:2007.

Segundo as normas	Autor
<p>Não é razoável imaginar que resultados de corpos-de-prova retirados de um volume restrito de concreto, provenientes da mesma amassada, confeccionada com os mesmos materiais, misturados juntos e transportados dentro de um único caminhão betoneira, tenham resistências mecânicas diferentes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Um volume único de concreto, misturado numa betoneira ou no balão do caminhão-betoneira, terá uma resistência homogênea.</li> <li>Essa é sua resistência potencial na boca da betoneira.</li> <li>Qualquer variabilidade ocasionalmente agregada durante o processo de concretagem seria decorrente de causas como: tempo de mistura errado, a manutenção deficiente, mau funcionamento do balão do caminhão-betoneira ou devido ao lançamento indevido de água extra.</li> </ul>
<p>Observações do autor: A variabilidade nunca é devida às características intrínsecas do concreto definido por um traço em peso e misturado num equipamento adequado e bem mantido.</p>	

•22

### 32.3.3 Cuidados necessários nos ensaios de resistência mecânica

A partir de ensaios de corpos-de-prova sob compressão axial, obtém-se  $f_{ck,est}$ . Esse valor é comparado ao valor da  $f_{ck}$ .

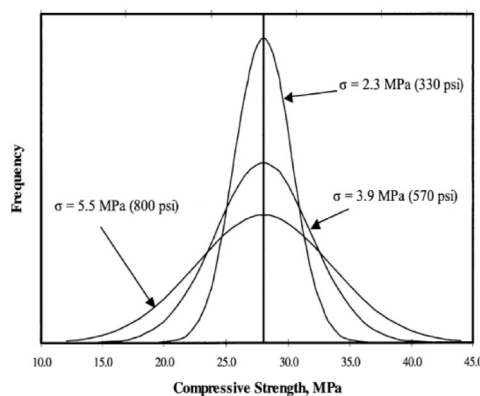
Norma	Título	Objetivo	Observações
ABNT NBR 5738:2008	Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.	Prescreve o procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto.	É fundamental adotar cuidados nos procedimentos de ensaio por que podem ocasionar reduções na resistência de um corpo-de-prova.
ABNT NBR 5739:2007	Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.	Prescreve um método de ensaio pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos-de-prova cilíndricos de concreto.	Verifica se o laboratório está obtendo resultados compatíveis.
ACI 214R-02	Avaliação dos Resultados do ensaio da Resistência do Concreto.	Discute as variações que ocorrem na resistência do concreto e apresenta procedimentos estatísticos que são úteis na interpretação destas variações no que diz respeito a ensaios específicos e critérios.	Qualquer desvio dos procedimentos de ensaio normalizados tenderá a alterar os resultados, afetando a estimativa de resistência.
ASTM C31	Prática padrão para fazer e cura amostras de ensaio de concreto no campo.	Fornecer requerimentos padronizados para fazer, cura, proteção e transporte de corpos de prova de concreto em condições de campo.	Recomenda que a preparação de corpos-de-prova de concretos de endurecimento lento não deve ser iniciada muito cedo.

•23

### 32.3.3 Cuidados necessários nos ensaios de resistência mecânica

Observações:

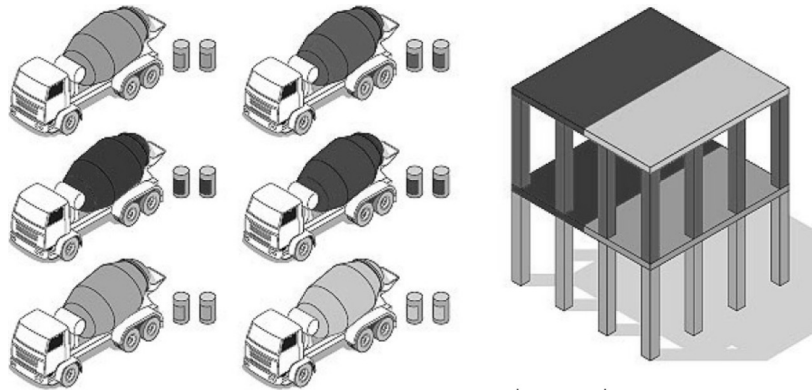
- ✓ Tome-se como valor característico o maior dos dois valores de corpos-de-prova irmãos.
- ✓ Para reduzir as interferências e favorecer a comparabilidade e a reprodutibilidade, conduzir os ensaios exatamente como preconizado nas normas.
- ✓ Um projeto pode ser penalizado quando a variabilidade é elevada. Também podem haver fontes de erro sistemático, que provocam perturbações tendenciosas mas uniformes nos resultados.
- ✓ As amostras com resistências médias similares podem resultar em estimativas de resistência características muito diferentes, se os coeficientes de variação entre os ensaios forem diferentes.



Curvas de distribuição normal com mesmo valor médio e desvios-padrão distintos.

•24

### 32.3.4 Rastreabilidade



Para permitir que se possa avaliar o impacto da presença e determinar a localização de alguma amostra de concreto que apresente problemas de resistência, é fundamental ter um processo de controle de qualidade adequado, que permita rastrear onde cada caminhão ou betonada de concreto foi utilizada (ABNT NBR 12655:2006).

•25

### 32.4 Trabalhando com Estruturas com Problemas de Resistência

O processo de controle da resistência tem a função de averiguar se a resistência do concreto usado nas peças estruturais é superior à especificada em projeto ou, no limite extremo, suficiente para assegurar um adequado comportamento estrutural, com um nível aceitável de segurança, sob o ponto de vista estatístico.



•26

Razões	Escopo	Ações
$f_{ck,est} < f_{ck}$	Qual o novo $f_{ck}$ para verificação da segurança estrutural	Trata-se de transformar o resultado de $f_{c,ext,j}$ num $f_{ck}$ equivalente
Concreto não conforme com o especificado	Analisar o concreto para comparar com o especificado / pedido	Trata-se de pesquisar se a composição, traço, resistência e outras características e propriedades do concreto entregue
Concreto exposto a meio agressivo	Analisar características e propriedades do concreto determinantes da vida útil	Trata-se de uma análise complexa de ciclo de vida do concreto naquele meio
Qualidade da execução da estrutura	Analisar homogeneidade do concreto, geometria, tolerâncias	Trata-se de uma aferição da qualidade das concretagens e precisão da execução frente às tolerâncias de norma
Perícia	Inspeção e diagnóstico para esclarecer um problema patológico	Trata-se de esclarecer um colapso parcial ou total, um problema patológico grave, uma flecha exagerada, etc.
Mudança de uso, retrofit	Avaliar o estado atual da estrutura	Trata-se de uma análise tipo "as built" da estrutura.

•27

Estratégias	Recomendações
Revisar os procedimentos de coleta, condicionamento e ensaio das amostras.	Averiguando se foram tomadas todas as precauções e cuidados para que a estimativa de resistência à compressão seja efetuada de forma correta e precisa.
Efetuar investigações/prospecções na estrutura real, através do uso de ensaios destrutivos ou semidestrutivos.	Para averiguar qual o valor de resistência do concreto efetiva na obra obtendo-se um novo $f_{c,est}$ denominado "equivalente" a uma resistência como se fosse medida através do procedimento convencional de moldagem e ruptura.
Se a resistência efetiva está abaixo da esperada, efetuar uma revisão de projeto considerando um novo valor de $f_{ck}$ obtido através dessas inspeções, extrações na estrutura e novos ensaios, ao invés do valor do $f_{ck}$ .	Inicialmente adotado naquele projeto, avaliando quais as repercussões disso sob o ponto de vista da segurança estrutural.
Intervir, por processo de reforço, demolição, mudança ou alteração de uso.	Para corrigir o problema, compatibilizando as resistências efetivas dos elementos estruturais com as solicitações existentes, respeitado adequado nível de segurança.

•28

A ABNT NBR  
6118:2007.  
5% do total de  
volume de concreto  
pode apresentar  
resistência inferior  
ao  $f_{ck}$ .



Um conjunto de resultados individuais provavelmente terá, alguns valores individuais mais baixos. Por isso, admitir um quantil de valores de até 5% abaixo do especificado como característico é uma definição universalmente aceita e que consta tanto de Boletins como o CEB 191 *General Principles on Reliability for Structures* (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1988) quanto da ABNT NBR 6118:2007

•29

### **32.5 Impacto dos Problemas com a Resistência do Concreto na Análise da Segurança de Estruturas Acabadas**

A análise da segurança em estruturas acabadas difere de forma fundamental da verificação de segurança efetuada quando se está projetando uma estrutura nova.

•30



Fatores que são considerados numa estrutura acabada:

- ✓ As seções e resistências das peças.
- ✓ A presença de defeitos.
- ✓ O carregamento estão definidos.

•31



Durante o projeto de uma obra:

- ✓ Os coeficientes de minoração da resistência do concreto são utilizados com o intuito de deixar uma reserva de resistência que possa absorver incrementos nas solicitações decorrentes de erros ou imprecisões do processo construtivo.

•32



Considerações importantes:

- ✓ Até 5% do volume total de concreto pode apresentar resistência inferior ao  $f_{ck}$  especificado no projeto estrutural.
- ✓ Sabendo onde está esse concreto conforme, porém com  $f_{ck,est}$  abaixo do  $f_{ck}$ , é possível analisar para ver se existem ou não repercussões importantes sob o ponto de vista da capacidade resistente da estrutura (verificação da segurança).
- ✓ Deve-se analisar cada situação considerando aspectos como a responsabilidade estrutural do elemento e o microclima ao qual o concreto estará exposto.
- ✓ Caso a quantidade de concreto com resistência abaixo do  $f_{ck}$  de projeto, superar 5%, então fica identificado que há um problema de produção desse concreto.
- ✓ No caso de produção conforme, se por acaso, aqueles 5% de concreto abaixo de  $f_{ck}$  foram destinados justamente à concretagem de peças importantes e sem folga de capacidade resistente, não há dúvida que deve haver reforço, porém há dúvida de quem será o responsável pelas despesas decorrentes, pois 5% de “defeituosos” está dentro das “regras do jogo”.

•33

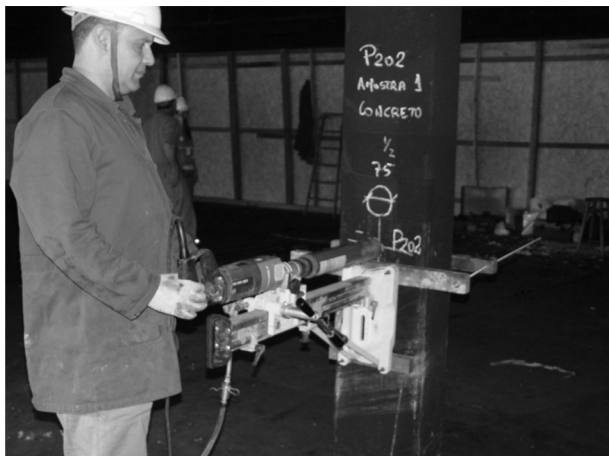
### 32.6.1 Anamnese

É o processo pelo qual se coleta e se revê criticamente todos os dados relativos à estrutura, ao traço, à preparação do concreto e aos ensaios de resistência realizados, averiguando se foram cumpridas as especificações de obra e se não houve erros de execução ou de transmissão de informações.

•34

### 32.6.2 Extração de Testemunhos

Processo de extração de testemunhos (Arquivo LEME/UFRGS).



•35

### 32.6.2 Extração de Testemunhos

Aspecto de testemunho com bases irregulares, que devem ser regularizadas (Arquivo LEME/UFRGS).



•36

### 32.6.2 Extração de Testemunhos

Corte para regularização do testemunho ou retirada da porção contendo armaduras (Arquivo LEME/UFRGS).



•37

### 32.6.2 Extração de Testemunhos

Aspecto de testemunho extraído (Arquivo LEME/UFRGS).



•38

Norma	Características	Observações
ABNT NBR 7680:2007	Estabelece-se os requisitos exigíveis para extração, preparo e ensaio de testemunhos cilíndricos e prismáticos de concreto simples, armado e protendido.	Recomenda-se que se extraia o menor número possível de testemunhos e que estes sejam de pequena dimensão e nunca cortem armaduras. No caso de pilares, cada elemento deve ser representado por apenas um testemunho íntegro.
ABNT NBR 7584:1995	Prescreve-se o método para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso do esclerômetro de reflexão.	Deve-se reconstituir a seção, com auxílio de um procedimento tipo "dry-pack", formulada para apresentar boa aderência e retração nula. Isso é fundamental para que não surja uma descontinuidade no entorno na área de extração, que pode permitir o ingresso de agentes agressivos e vir a comprometer a durabilidade da estrutura.
BS 1881 204:1988 ou do American Concrete Institute ACI 228.2R-21 Part 2 (2004)	É uma metodologia utilizada para medir a espessura da camada de concreto em estruturas de concreto armado para verificar a localização e o tamanho de reforçar superfície do aço.	Os ensaios de pacometria de acordo com os métodos internacionais da British Standards Institute, poderiam evitar extrair ou cortar barras da armadura.

Observações do autor: As normas citadas são unânimes em recomendar que se efetue a amostragem de testemunhos extraídos de concreto somente de regiões sãs e íntegras, sempre e quando o objetivo é avaliar a resistência à compressão do concreto.

Nota: Jamais poderiam ser ensaiados e utilizados testemunhos extraídos provenientes de pilares que sofreram prévio esmagamento, onde o concreto já estará rompido e não apresenta mais sua resistência original, de regiões com nítidos ninhos de concretagem, de regiões de juntas de concretagem, ou próximo de arestas.

•39

### 32.6.3 Uso de ensaios não destrutivos ou semidestrutivos

Dentre a grande gama de ensaios não destrutivos e semidestrutivos existentes, pode-se considerar que, atualmente, os mais simples e úteis, sob o ponto de vista do interesse de avaliação da resistência de estruturas acabadas, são:

- ✓ Avaliação da dureza superficial por esclerometria
- ✓ Determinação da velocidade de pulso ultrassônico
- ✓ Ensaios de arrancamento.
- ✓ Outros ensaios.

•40

### 32.6.3.1 Avaliação da Dureza Superficial por Esclerometria

Norma	Características	Observações
<b>ABNT NBR 7584:1995</b>	É um método baseado na avaliação da dureza superficial do material por meio da reflexão de um peso lançado sobre a superfície de ensaios.	Em materiais com alta resistência superficial, obtém-se grandes valores de recuo, enquanto, em materiais de baixa resistência, verificam-se baixos valores de reflexão do martelo.



Esclerômetro utilizado para medir a dureza superficial do concreto.

•41

### 32.6.3.2 Determinação da Velocidade de Pulso Ultrassônico

Norma	Características	Observações
<b>ABNT NBR 8802:1985.</b>	É um método não destrutivo que mede a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica no interior de um corpo. Esse dado pode então ser usado para estimar a compacidade e homogeneidade do mesmo.	Este tipo de ensaio ganhou difusão graças ao desenvolvimento de aparelhos portáteis de medição, tais como o PUNDIT, da CNS.



Aspecto do aparelho portátil de ensaio VPU (Arquivo LEME/UFRGS).

•42

### 32.6.3.3 Ensaios de arrancamento

Norma	Características	Observações
ASTM C-900 - 1987	Arrancar-se um elemento fixado ao concreto, pode-se estimar a resistência à tração ou ao cisalhamento, fatores limitantes da ruptura, os quais estão correlacionados com a resistência à compressão do material.	O princípio de ensaio consiste na medição da resistência à fratura de uma superfície de concreto mobilizada pela aplicação de um esforço de arrancamento num pino ou elemento metálico fixado ao pino.

Nota: Durante o ensaio, o concreto fica submetido à tração e ao cisalhamento. Esses dados são posteriormente utilizados para fazer uma correlação com a resistência à compressão. A resistência ao arrancamento pode ser entendida como o quociente entre a força de arrancamento e a área teórica lateral do tronco de cone de concreto arrancado.

•43

Existem várias técnicas de ensaio de arrancamento, que diferem no formato ou forma de aplicação da força de arrancamento.

- ✓ Na primeira modalidade, os pinos são fixados nas fôrmas, tendo o cuidado de deixar uma extremidade rosqueada livre para fixar o aparelho de arrancamento. Nessa categoria se encaixa, por exemplo, o sistema LOK-TEST.
- ✓ Na segunda, os pinos metálicos são fixados após o endurecimento do concreto, logo antes do ensaio. Utiliza-se um equipamento de corte dotado de coroa cilíndrica. Um furo perpendicular à superfície é efetuado e um alargamento produzido à uma profundidade determinada.



Figura 9 – Procedimento de ensaio de arrancamento ESCOT com uso de luva expansora (CAMPAGNOLO & SILVA FILHO, 2005).

•44

### 32.6.3.4 Outros ensaios

Outros ensaios não destrutivos podem ser interessantes para analisar a condição de conservação do concreto, tais como o georadar.

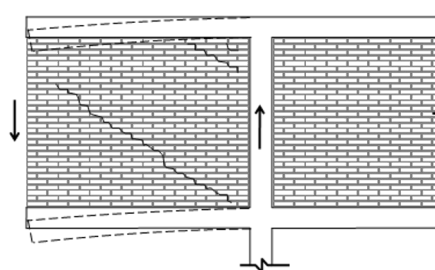
Observam-se que todos esses métodos são úteis, mas a estimativa de resistência a partir desses métodos embute incertezas. Por isso recomenda-se que, sempre que possível, seja feita uma combinação de ensaios para melhorar o diagnóstico

•45

### 32.6.4 Controle das deformações e deslocamentos

Essa análise se baseia no princípio de que, se a resistência do concreto for menor que a esperada, seu módulo também tende a ser menor.

A lei de Hooke indica como, as deformações específicas tendem a se incrementarem, o que conseqüentemente aumenta os deslocamentos e rotações.



Exemplo de formação de fissuras devido à deformação de vigas em balanço

•46

### 32.6.4 Controle das deformações e deslocamentos

Questões importantes:

- ✓ O controle de deformações específicas e/ou de deslocamentos é, portanto, um importante indicativo do desempenho estrutural e pode, de forma indireta, ser usado para checar se a resistência do concreto é adequada.
- ✓ O controle das deformações em estruturas acabadas e o controle dos deslocamentos são efetuados com auxílio de instrumentos que permitem monitorar a variação de posição em uma direção principal.

•47

### 32.6.4 Controle das deformações e deslocamentos

*Prova de carga*

Norma	Características	Observações
<b>ABNTNBR 9607:1986</b>	É um ensaio efetuado com o intuito de testar a capacidade e avaliar o comportamento de deformações e capacidade de carga de uma estrutura existente.	Estabelece os procedimentos para realização de provas de carga no Brasil, essas provas de carga englobam o conjunto de operações destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura por meio da medição e do controle dos efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas.

•48



## 32.7 Avaliação da Segurança Estrutura

No caso de existência de resultados de resistência aquém do especificado, devem ser adotadas as seguintes ações corretivas, conforme ABNT NBR 6118, item 25.3.1:

- a) Revisão do projeto considerando o novo resultado de resistência característica do concreto à compressão obtido do controle de recebimento realizado através de corpos de prova moldados.
- b) Permanecendo a insegurança estrutural, extrair testemunhos de acordo com a ABNT NBR 7680, estimar o novo  $f_{ck}$  de acordo com a ABNT NBR 12655 e utilizar na nova verificação estrutural o novo  $\gamma_c$  disposto no item 12.4.1 da ABNT NBR 6118:2003 ( $\gamma_c = 1,27$ ).
- c) Permanecendo a não-conformidade, deve ser atendido o item 25.3.3 da ABNT NBR 6118, que orienta escolher entre as seguintes alternativas:
  - ✓ Determinar as restrições de uso da estrutura.
  - ✓ Providenciar o projeto de reforço.
  - ✓ Decidir pela demolição parcial ou total.

•49

### 32.7.1 Proposta de Metodologia de Verificação da Segurança

O autor sistematiza e propõe a seguinte metodologia:

## ***Primeiro Passo***

•50

### 32.7.1.1 Proposta de Metodologia de Verificação da Segurança

Deve-se comparar a resistência à compressão equivalente obtida das extrações, por meio do emprego de coeficientes corretivos, considerando-se, no mínimo:

1. Corrigir  $f_{c,ext,j}$  devido à relação h/d conforme ABNT NBR 7680:2007.
2. Corrigir  $f_{c,ext,j}$  devido ao efeito deletério de broqueamento conforme recomendado pelo ACI 214.4R:2010, usando o coeficiente 1,06.
3. Passar  $f_{c,ext,j}$  a  $f_{c,28d}$  empregando os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  de crescimento ou de decréscimo da resistência, de acordo com a teoria de Rusch (vide secção 35.2 deste capítulo).

Obtido o  $f_c$  equivalente a 28 dias, deve-se comparar esse valor com  $f_{ck}$  de projeto. Se o valor for superior ao especificado, a análise pode ser encerrada.

•51

### 32.7.1.2 Proposta de Metodologia de Verificação da Segurança

## ***Segundo Passo***

•52

Norma	Característica	Formula	Observaciones
ABNT NBR 6118:2007	com base na teoria da segurança	$f_{c,j} = 1.1 \cdot f_{c,ext,j}$	Aceitando uma redução de $\gamma_c$ em nome da maior representatividade de $f_{c,ext}$ em relação a $f_{ck,ef}$ .
ABNT NBR 6118:1978 (válida até março de 2004).	permitia considerar	$f_{c,j} = 1.15 \cdot f_{c,ext,j}$	Um valor aparentemente mais coerente e mais justo devido ao grande número de variáveis no sentido negativo, de redução da resistência do testemunho.
ACI 437:2003	recomenda	$f_{c,j} = 1.18 \cdot f_{c,ext,j}$	
ACI 318:2008	recomenda	$f_{c,j} = 1.21$ a $1.25 \cdot f_{c,ext,j}$ .	
fib (CEB-FIP) 1999		$f_{c,j} = 1.11$ a $1.20 \cdot f_{c,ext,j}$	
O Eurocode 2. EN 1992:2004 Annex A item A.2.3 referência a EN 13791:2007	Recomenda para revisão da segurança: estrutura bem executada → revisar a segurança adotando: $\gamma_s = 1.05$ (ao invés de 1.15); $\gamma_c = 1.35$ (ao invés de 1.50) → $\gamma_c = 1.26$ (equivalente no Brasil)	$f_{c,j} = 1.18 \cdot f_{c,ext,j}$	Deve-se majorar em apenas 10%. Para ser pragmático e coerente com as demais normas nacionais e internacionais, poder-se-ia majorar de 11% a 25% a critério do consultor e sempre com "bom senso". Observe-se que 1,24 foi o valor obtido na tese de Cremonini .

•53

### 32.7.1.2 Proposta de Metodologia de Verificação da Segurança

Atualmente no Brasil, recomenda-se que se adote o valor sugerido pela ABNT NBR 6118:2007 e, somente em casos especiais, outro valor maior (por exemplo, 1,15, como sugerido pela antiga ABNT NBR 6118:1978) poderia ser adotado, desde que bem justificado.

Conversão de "moldado equivalente,  $f_{c,28}$ " a " $f_{ck,est}$ ", segundo diferentes normas.

Local pilar viga	$f_{c,28}$ MPa	NBR 6118:2007	NBR 6118:1978	ACI 437 & Eurocode 2	fib Model Code 90	ACI 318:2005	$f_{ck,est}$ adotado MPa
		1,1	1,15	1,18	1,20	1,25	

Nota: De qualquer forma, mesmo adotando o valor de 1,10, ainda se estaria declaradamente a favor da segurança, penalizando a verdadeira resistência do concreto.

•54

### 32.7.1.3 Proposta de Metodologia de Verificação da Segurança

## Terceiro Passo

•55

Conclusões	Do ponto de vista da engenharia de concreto	Observações	Formula
O resultado obtido, simplesmente aplicando os coeficientes do Quadro 3, pode não ser o mais adequado para realizar a verificação da segurança da estrutura, pois são valores decimais resultantes de uma análise matemática expressada por coeficientes de "ajuste".	As classes de concreto estão numa escala de 5 MPa, ou seja C20, C25, C30, e assim por diante, até C50, conforme a ABNT NBR 8953:2009 não tendo sentido físico considerar precisões de decimal ou valores intermediários entre as classes já consagradas e normalizadas.	Dessa forma recomenda-se que os cálculos estruturais sejam revisados adotando-se valores de $f_{ck}$ compatíveis com os patamares de resistência de concreto admitidos na norma, com arredondamento para a classe de resistência mais próxima existente na norma.	$\sigma_{ed} = \frac{f_{ck} * 0,85}{\gamma_c} = \frac{0,85}{1,4} * f_{ck}$

•56

### 32.8 Alternativas de Intervenção em Estruturas com Resistência Inadequada

O item 25.3.3 da ABNT NBR 6118:2007 orienta que, caso após uma investigação, a resistência seja considerada inadequada, deve-se escolher entre as seguintes alternativas:

- ✓ Estabelecer restrições ao uso da estrutura, que limitem o carregamento atuante, fazendo com que esse carregamento seja compatível com a resistência efetiva da estrutura.
- ✓ Providenciar um projeto de reforço, que permite incrementar a capacidade de carga da estrutura original.
- ✓ Demolir parcial ou totalmente a estrutura, reconstruindo as partes necessárias com a resistência adequada.

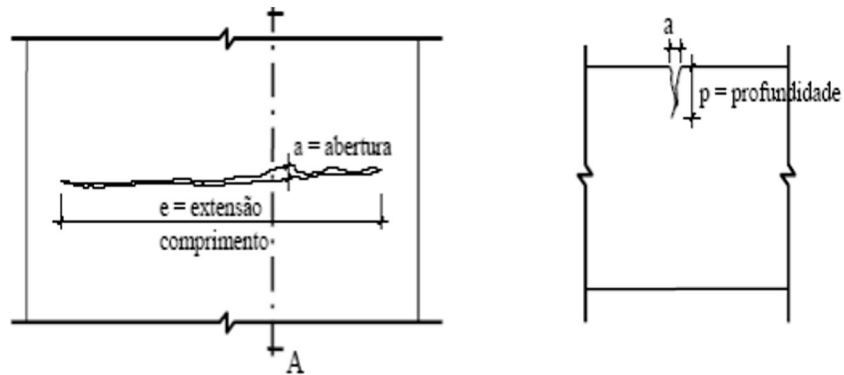
•57

### 32.9 Controle da Fissuração

Norma	Características	Observações
ACI 214.4R-10	O controle estatístico do concreto sempre pressupõe uma incerteza na avaliação.	É fundamental atentar para todos os sinais de que a estrutura possa estar se comportando de forma inadequada. Um dos sintomas mais comuns e visíveis consiste na ocorrência de perda de integridade pela fissuração. Nesses casos é fundamental mapear o quadro fissuratório e monitorar a evolução das fissuras para que se possam avaliar quais as causas e os efeitos da perda de integridade.

•58

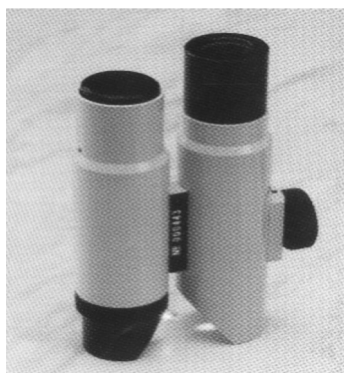
### 32.9 Controle da Fissuração



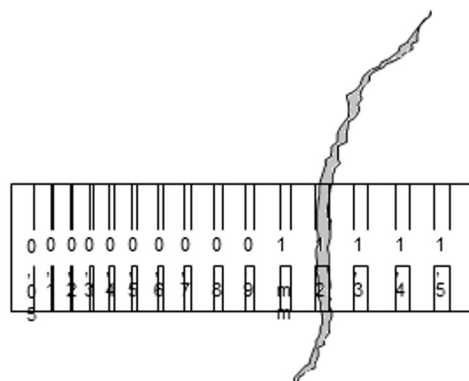
Parâmetros geométricos usados para caracterizar uma fissura.

•59

### 32.9 Controle da Fissuração



Aspecto de um fissurômetro ótico tipo lupa com iluminação  
(Arquivo LEME/UFRGS).



Aspecto do fissurômetro tipo régua de comparação  
(KLEIN & SILVA FILHO, 2010).

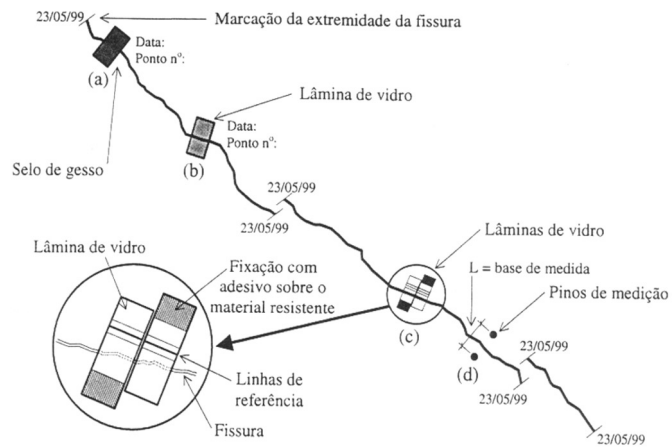
•60

### 32.9 Controle da Fissuração

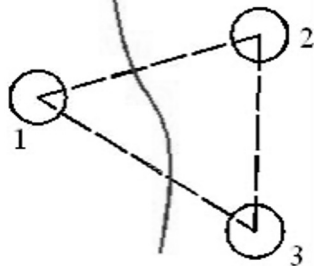
Formas de instrumentação para controle da abertura de fissuras.

Para o controle das fissuras pode ser usado:

- ✓ Selo de Gesso
  - Simples
  - Duplas
- ✓ Lâminas de vidro
  - Duplos
  - Terna



•61



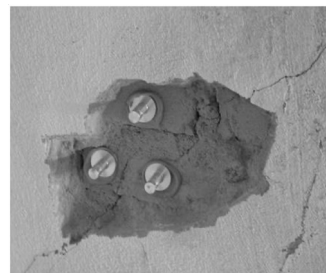
Croquis da disposição dos três pinos.



Detalhe da medição da distância entre pinos com auxílio de paquímetro digital.



Vista da instrumentação instalada.



Detalhe do sistema de instrumentação com pinos.

•62

### 32.9 Controle da Fissuração

Além do indicativo de problemas de resistência, o monitoramento do quadro fissuratório pode ser importante para detectar problemas de durabilidade.

Quando a abertura da fissura é elevada, essa fissura pode tornar-se um caminho preferencial para ingresso de agentes agressivos, reduzindo o cobrimento efetivo. A ABNT NBR 6118:2007 adota diferentes limites para a abertura máxima características de fissura ( $w_k$ ).

•63

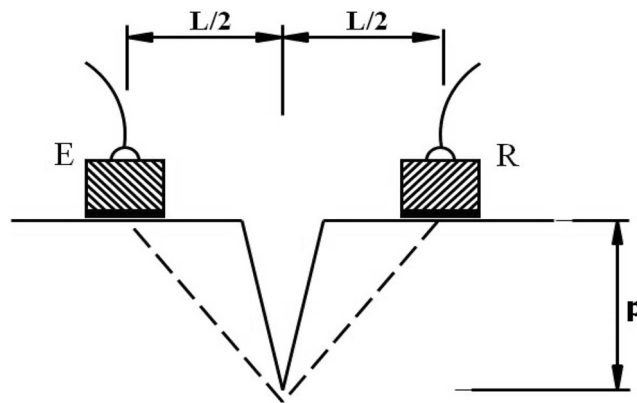
### 32.9 Controle da Fissuração

	CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL			
	I	II	III	IV
<b>Concreto Simples</b>	Sem restrições à abertura de fissuras			
<b>Concreto Armado</b>	$w_k \leq 0,4$ mm	$w_k \leq 0,3$ mm		$w_k \leq 0,2$ mm
<b>Concreto Protensão Parcial (Nível 1)</b>	$w_k \leq 0,2$ mm	$w_k \leq 0,2$ mm com pós-tração	Não admite fissuração. Devem ser adotadas medidas de proteção especial na região das ancoragens.	
<b>Concreto sob Protensão Limitada (Nível 2)</b>	Não admite fissuração. Deve-se verificar o estado limite de fissuração (ELS-F) e de descompressão (ELS-D). Para classes de agressividade III e IV devem ser adotadas medidas de proteção especial na região das ancoragens.			
<b>Concreto sob Protensão Total (Nível 3)</b>				

•64



Outra técnica que pode ser utilizada para obter estimativas da profundidade de fissuras é o ensaio de VPU. Essa possibilidade tem sido estudada pelo grupo de pesquisa em Ensaios Não Destrutivos da UFSC (MEDEIROS *et al.*, 2008), que demonstrou que o princípio é válido, mas que a precisão das estimativas ainda não é muito elevada.

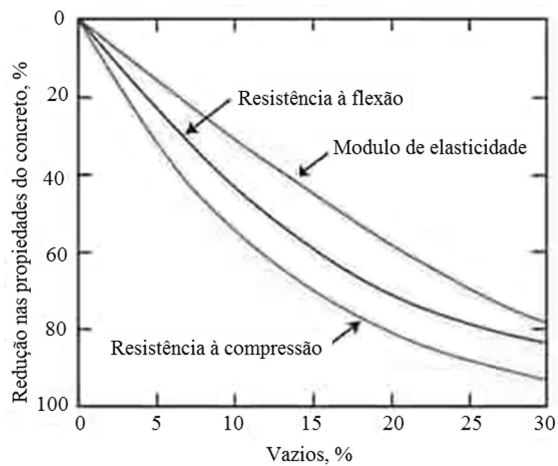


Geometria de ensaio para determinação da profundidade de uma fissura com uso de ensaios de pulso ultrassônico.

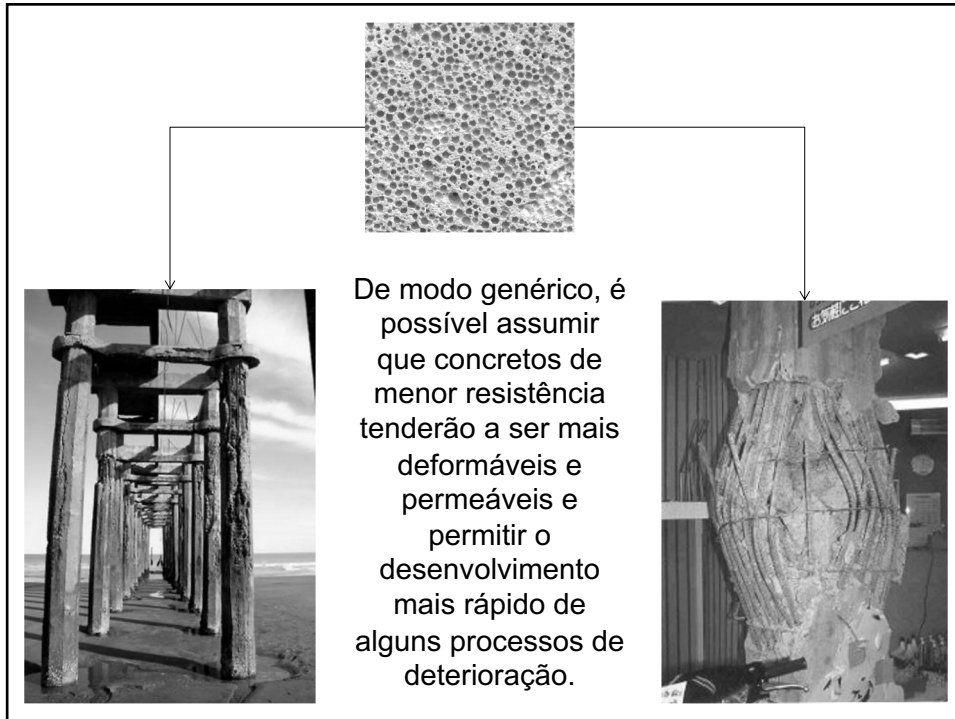
•65

### 32.10 Considerações sobre a Avaliação de Impactos de Problemas de Resistência e Fissuração na Vida Útil

Em geral, pode-se assumir que a redução da resistência está associada a:



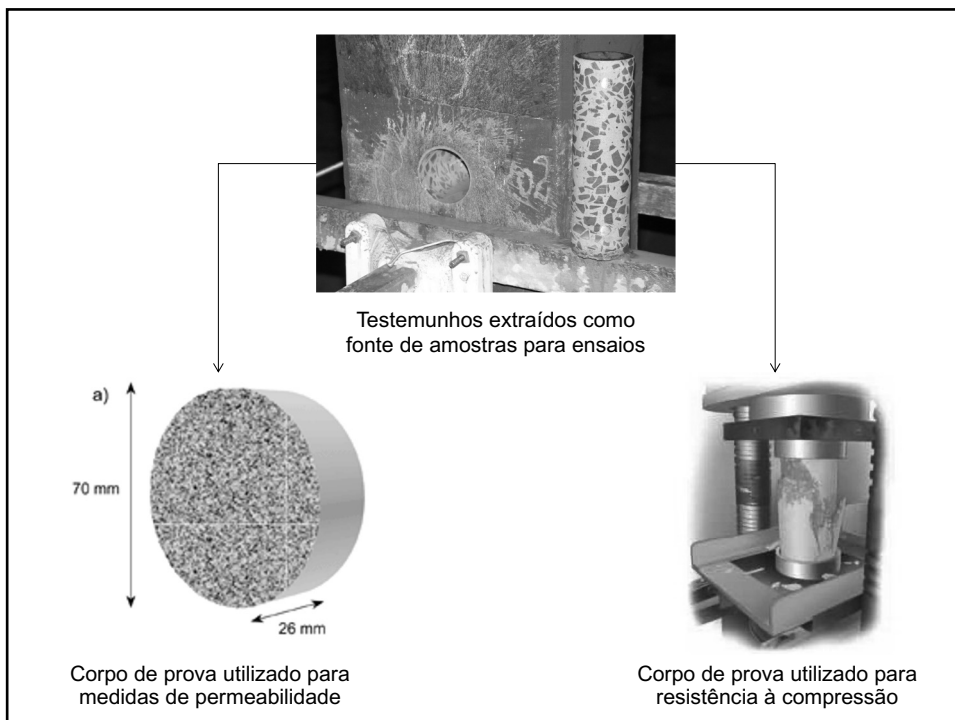
•66



De modo genérico, é possível assumir que concretos de menor resistência tenderão a ser mais deformáveis e permeáveis e permitir o desenvolvimento mais rápido de alguns processos de deterioração.

The diagram illustrates the relationship between concrete microstructure and its durability. At the top center is a square image showing a porous concrete microstructure with many small, irregular voids. Two arrows point downwards from this image. The left arrow points to a black and white photograph of a long, narrow pier structure made of concrete columns, showing signs of weathering and deterioration. The right arrow points to a black and white photograph of a concrete specimen being tested in a laboratory, showing significant cracking and deformation under load.

•67



Testemunhos extraídos como fonte de amostras para ensaios

a) 70 mm 26 mm

Corpo de prova utilizado para medidas de permeabilidade

Corpo de prova utilizado para resistência à compressão

The diagram shows the process of extracting test specimens from a concrete source. At the top center is a black and white photograph of a concrete wall with a circular opening and a cylindrical concrete specimen being extracted. Two arrows point downwards from this image. The left arrow points to a circular concrete specimen labeled 'a)' with dimensions of 70 mm in height and 26 mm in diameter. Below it is the text 'Corpo de prova utilizado para medidas de permeabilidade'. The right arrow points to a cylindrical concrete specimen being tested in a compression machine. Below it is the text 'Corpo de prova utilizado para resistência à compressão'.

•68

**OBRIGADO**