

The background of the slide features a pattern of green leaves and stems, rendered in a stylized, low-poly aesthetic. The leaves are various shades of green, from light to dark, and are scattered across the frame. The stems are thin and dark green, connecting the leaves. The overall effect is a natural, organic texture.

# **Reforço de Estruturas com Fibras de Carbono**

# Histórico

- As primeiras pesquisas relativas aos compósitos de fibra de carbono foram desenvolvidas no Japão há aproximadamente 25 anos, devido aos problemas que o país tem enfrentado com abalos sísmicos.
- Os japoneses costumam reforçar as cabeças dos pilares com a fibra de carbono para enrijecer os nós das estruturas, evitando assim a liquefação, que é o efeito causado pelo abalo sísmico.
- Atualmente, o reforço é colocado em estruturas novas para evitar que estas venham a ruir em virtude de abalos.
- Os EUA começaram a usar esse tipo de reforço em projetos aeroespaciais da NASA e, posteriormente, sua utilização estendeu-se à indústria automobilística, como revestimento dos carros de Fórmula 1, para a proteção contra esmagamento das pernas dos pilotos em caso de batidas.

# Procedimentos preliminares à execução de recuperação e reforço das estruturas

- Deve ser feita uma avaliação da estrutura envolvida, de forma a estabelecer, da maneira mais exata possível e com margem de segurança confiável, a sua capacidade resistente naquele instante, identificando quaisquer deficiências ou anomalias que existam e que possam influenciar na segurança da estrutura, determinando as suas origens e pesquisando a integridade do substrato de concreto.

# Procedimentos preliminares à execução de recuperação e reforço das estruturas

- diagnóstico do problema e tomada das medidas emergenciais;
- análise da viabilidade do projeto;
- investigação do estado da estrutura com o auxílio de ensaios não destrutivos, considerando-se sua rigidez e redistribuição de cargas;
- seleção do material e da melhor técnica a ser utilizada;
- elaboração do projeto detalhado;
- execução do projeto com rigoroso controle de qualidade

# Materiais compósitos

- Os materiais compósitos são definidos como uma combinação macroscópica de dois elementos principais, distintos entre si: uma matriz e um material de reforço, que usualmente é constituído por fibras.
- Cabe às fibras suportarem o máximo possível do esforço aplicado, por apresentarem maior resistência e rigidez, enquanto a função principal da matriz é ligar as fibras e transmitir as cargas externas para as mesmas através das tensões tangenciais na interface fibra/matriz.

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de algumas fibras KENDALL (1999).

Propriedade	Vidro-E	Aramida (A) Kevlar 49™	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento)
					550 (ruptura)
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação Específica na ruptura (%)	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento)
					6 (ruptura)
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	25,6	14,4	18	19	78,5
Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5,0	-2 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	12 (longitudinal)
		+59 (transversal)	+17 (transversal)		
Custo da fibra (US\$/kg)	2	22	15 - 22	90	1

# Reforço dos polímeros

- A razão principal para reforçar polímeros é aumentar a sua rigidez e, conseqüentemente, devido às propriedades das fibras, aumentar a resistência à tração, à compressão em estruturas confinadas e ao impacto, além de melhorar a resistência à fadiga.
- Com isso, selecionando-se dentre as diversas fibras, geometrias e polímeros disponíveis, as propriedades mecânicas e de durabilidade de um material podem se adequar a uma aplicação específica.
- Os desempenhos estruturais dos materiais compósitos dependem principalmente do tipo e da quantidade de fibras utilizadas numa dada direção.

# Função do adesivo

- Garantir a aderência do reforço com o concreto, transferindo as tensões tangenciais do reforço para o substrato do concreto, estabelecendo assim a integridade do conjunto reforço-epóxi-concreto.
- Desta forma, nota-se que a escolha do adesivo a ser utilizado é importantíssima, pois uma grande parte do comportamento mecânico do reforço depende dele.

# Resinas Epoxídicas

- As resinas epoxídicas são formadas por monômeros que, ao reagirem com catalisadores, formam polímeros de cadeias de grande extensão. As características desses polímeros variam de acordo com o monômero, com o catalisador utilizado e com as proporções destes para a formação dos polímeros.
- As resinas epoxídicas são derivadas do petróleo, resultante da combinação da epícloridina e do bisfenol.
- Essa resina epóxi por si só, entretanto, não apresenta aplicação prática. Daí, se utilizar catalisadores que contêm hidrogênio ativo em suas moléculas para reagir com essa resina gerando uma “formulação epóxi”.
- A camada de epóxi não deve exceder a 3 mm de espessura para que o endurecimento do epóxi no interior da pasta não seja reduzido, prejudicando assim o reforço realizado. Na prática a sua espessura final fica em torno de 1,5 mm

# Propriedades físicas e químicas

## CEB-FIP 2001

- Resistência à tração variando de 30 MPa a 90 MPa, e à compressão, de 120 MPa a 210 MPa;
- Excelente adesão ao concreto entre 30 MPa e 50 MPa, rompendo-se geralmente por tração fora da área colada;
- Intervalo de tempo variando de 30 minutos a 10 horas para se adquirir resistência, sendo que a resistência máxima é obtida aos sete dias;
- Retração inferior à do concreto.

# Sistemas de reforço de FC

- Chapas ou Fitas: são chapas de CFC de alta resistência, impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos dos mais diversos e complexos formatos, colados sobre a superfície do concreto
- Mantas e tecidos pré-impregnados (“prepreg”): possuem espessura similar a do papel de parede, colados sobre a superfície do concreto com resina epóxi, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em “cantos vivos”
- Barras: As fibras de carbono, que as compõem, são envolvidas em matriz epóxica, havendo 65 % de fibra. A superfície externa das barras é revestida por uma camada adicional de epóxi e grãos de areia selecionados de modo a dar-lhes condição ativa de aderência

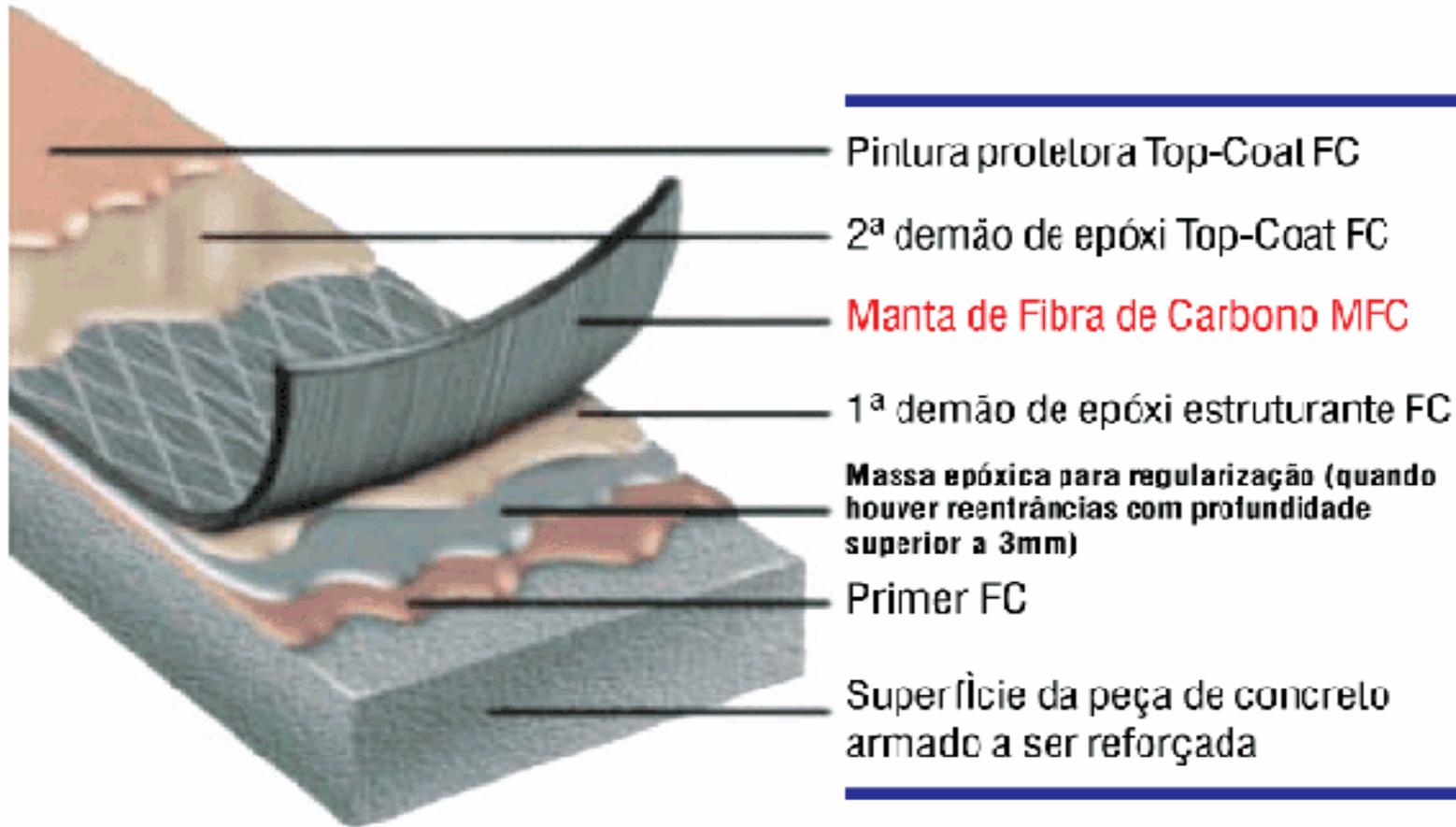
# Outros componentes

- Preparador de superfície
  - Massa reparadora
  - Epóxi saturante
- Este sistema só pode ser usado p/ reforço, não se dispensando o tratamento adequado na área, no caso de trincas, corrosão de armaduras e similares, para depois entrar com o reforço da fibra. A recuperação estrutural convencional é indispensável.

# Vantagens

- Leveza
- Alto módulo de elasticidade
- Alta resistência à tração com aumento ou restituição da capacidade portante de quaisquer elementos estruturais
- Baixa fluência (creep) e pouquíssima perda de relaxação
- Insensibilidade à corrosão e recobrimento sem exigências
- Insensibilidade ao ataque químico, por ácidos, álcalis e aos íons cloretos
- Neutralidade eletromagnética e sem condutividade térmica
- Facilidade de transporte, manuseio e aplicação com redução no tempo gasto
- Manutenção das dimensões originais do elemento estrutural, de sua integridade e rigidez

# Aplicação da manta de FC



**SISTEMA MFC**

## METODOLOGIA



### Preparação das superfícies

- Recuperação estrutural convencional.
- Aplicação de primer FC.
- Correção de desníveis com massa epóxica FC.



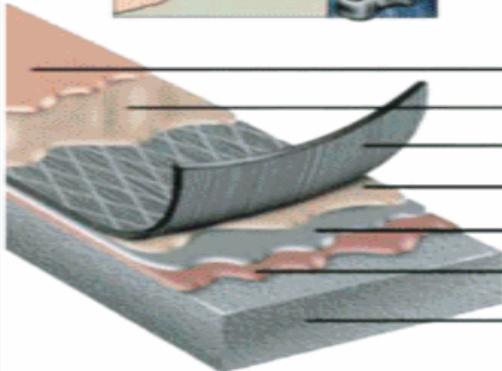
### Primeira demão de epóxi estruturante FC.



### Manta de fibra de carbono MFC e segunda demão de epóxi estruturante FC



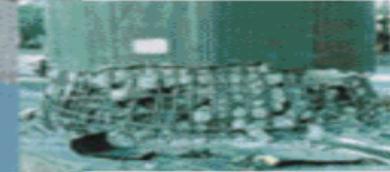
### Pintura de proteção com Top-Coat FC.



- Pintura protetora Top-Coat FC
- 2ª demão de epóxi Top-Coat FC
- **Manta de Fibra de Carbono MFC**
- 1ª demão de epóxi estruturante FC
- Massa epóxica para regularização (quando houver reentrâncias com profundidade superior a 3mm)
- Primer FC
- Superfície da peça de concreto armado a ser reforçada

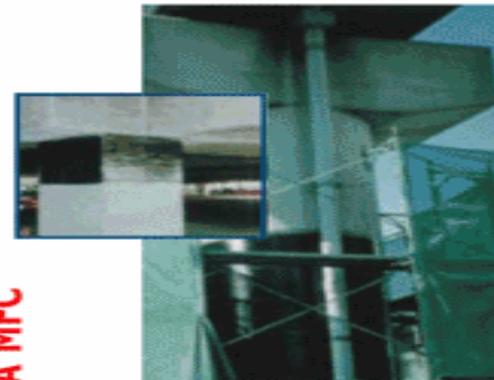
**SISTEMA MFC**

## PILARES



Situações como esta podem ser evitadas.

O sistema MFC é o único reforço estrutural de aplicação e resposta rápida.



Pilares com qualquer dimensão...



...são facilmente reforçados com o sistema MFC.

# Aplicação da fita FC

O uso de fita FC objetiva, além do reforço puro e simples, a diminuição da aplicação de camadas da manta de fibra de carbono, viabilizando ainda mais o uso deste tipo de reforço estrutural. As regras básicas de utilização são as seguintes:

- 1 – Corte, com utilização de uma serra circular, abrindo-se um sulco de 4mm de largura por 17mm de profundidade. A largura de 4mm é obtida usando-se disco de corte especial. O sulco deverá ser bem limpo utilizando-se um pequeno pincel e aspirador de ar com bico fino de sucção.
- 2 – Aplica-se fita crepe nas laterais do sulco, de modo a evitar o excesso de adesivo na superfície do concreto.
- 3 – Aplicação, com preenchimento do sulco, de epóxi estruturante tixotrópico. A aplicação deverá ser feita encostando-se o bico do mixer do cartucho no fundo do sulco, de modo a evitar a formação de bolhas de ar no adesivo epóxico.
- 4 – Aplicação de epóxi estruturante nas laterais da fita, com a inserção da fita de fibra de carbono no sulco.
- 5 – Com uma espátula, retirar todo excesso e limpar a superfície com estopa e álcool, aplicação de fita crepe cobrindo o local e 24 horas após, retirar a fita crepe, podendo-se usar uma pequena lixadeira.

O consumo do epóxi estruturante FC para aplicação da fita é de 200gr/m.

# Aplicação da vara de FC



Figura 1 e 2 - A fita de fibra de carbono sendo inserida no sulco previamente preenchido com epóxi. A aplicação do epóxi estruturante em ambos os lados da fita antes de sua inserção no sulco.

14/6/2006

Reforço de Estruturas com Fibras de  
Carbono

17

# Aplicação da vara de FC



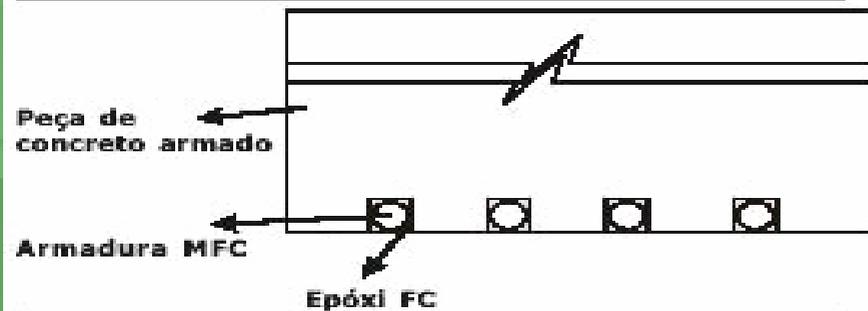
Figura 7 - A aplicação complementar de epóxi estruturante, com espátula, para nivelamento do sulco já com a fita de reforço.

Figura 8 - O reforço feito em uma laje.

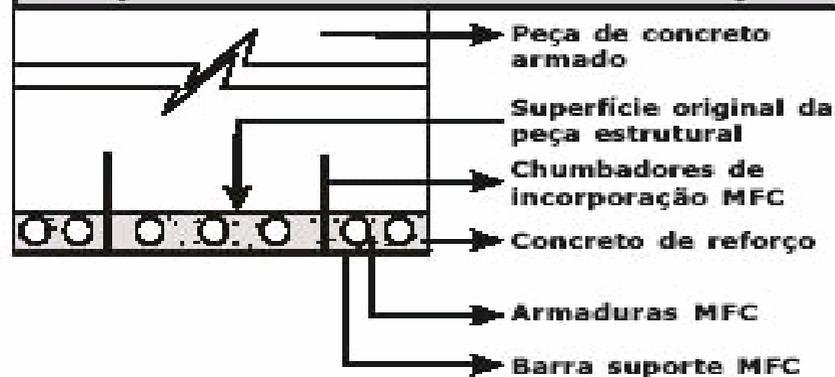


# Aplicação de barras de FC

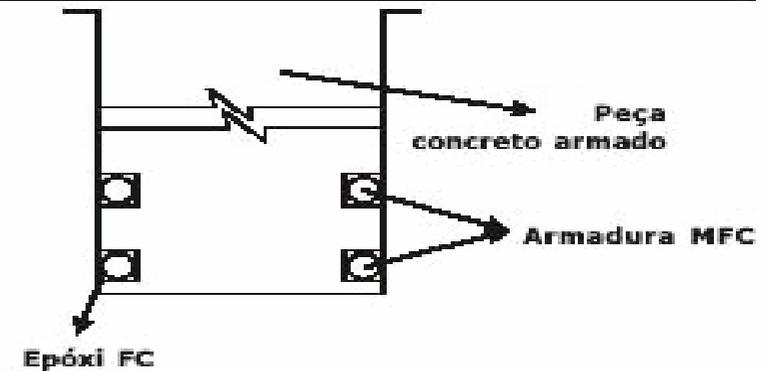
## Método de fundo (Quando houver espessura de recobrimento adequada)



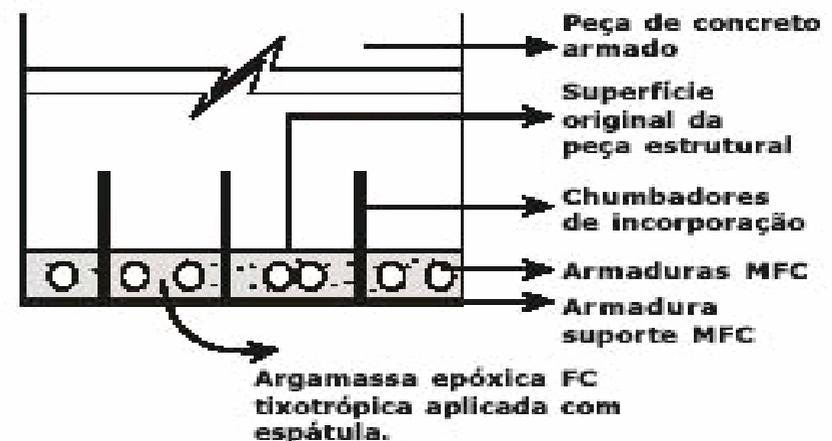
## Método de fundo com concreto (Quando não houver espessura de recobrimento ou grande quantidade de armaduras)



## Método lateral.



## Método de fundo (com argamassa espóxica)



# Fabricação

- O processo de carbonização de polímeros orgânicos (poliacrilonitrila, entre outros) resulta nas fibras de carbono ou de grafite, formadas de dezena de milhares de filamentos com espessura próxima de um quinto da de um fio de cabelo ( $5\ \mu\text{m}$  a  $18\ \mu\text{m}$ ), e possuidoras de características mecânicas excepcionais, fruto do seu arranjo microestrutural.
- Após serem expostas ao ar, as fibras são submetidas a elevadas temperaturas, que atingem cerca de  $1300\ ^\circ\text{C}$ , para as de carbono, e excedem de  $1900\ ^\circ\text{C}$  até cerca de  $3000\ ^\circ\text{C}$ , para as de grafite. Além disto, as fibras de carbono possuem uma percentagem de teor de carbono variando entre 93% e 95%, enquanto que as de grafite têm um teor maior que 99%, o que leva estas últimas a serem em torno de 20 vezes mais caras e terem módulo de elasticidade de até cerca de 3 vezes maior que as de carbono.

# Processamento

- Geralmente, *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e *pitch* são as três principais matérias-primas usadas na fabricação das fibras de carbono ou de grafite, sendo a poliacrilonitrila a mais comum. O processo de pirólise e oxidação de fibras sintéticas resulta na poliacrilonitrila, enquanto que o de petróleo destilado ou piche convertido em cristal líquido gera o *pitch*.
- Resumidamente, as fibras de carbono são processadas da seguinte maneira: após a poliacrilonitrila ser trefilada em cerca de 5 a 10 vezes o seu tamanho com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, a mesma é submetida a três processos de aquecimento, que são a estabilização, a carbonização e a grafitização.

# Estabilização

- Inicialmente, no processo da estabilização, a poliácrlonitrila é aquecida num forno com temperatura variando entre 200 °C e 300 °C a fim de tornar estáveis suas dimensões.
- Aumentando-se a temperatura na faixa de 1000 °C a 1500 °C, dá-se o processo de carbonização, ou seja, a poliácrlonitrila sofre pirólise numa atmosfera inerte de nitrogênio e argônio.
- No último processo de grafitização, atinge-se temperatura acima de 2500 °C, o que conduz a uma microestrutura da poliácrlonitrila com carbono em rede hexagonal compacta.
- Por fim, as fibras resultantes sofrem um processo de tratamento superficial para aumentar sua resistência e aderência e, então, coletadas numa bobina.

# Modos de ruptura à flexão

Alongamento da armadura interna com deformação específica elástica do CFC seguido de sua ruptura, caracterizando uma ruptura dúctil com maior capacidade para redistribuição de esforços internos;



Figura 3.1– Ruptura por alongamento da armadura; adaptada de LOPES (2002).

# Modos de ruptura à flexão

Esmagamento do concreto na zona de compressão, caracterizando uma ruptura frágil, com esgotamento da capacidade do concreto, sem redistribuição dos esforços internos.

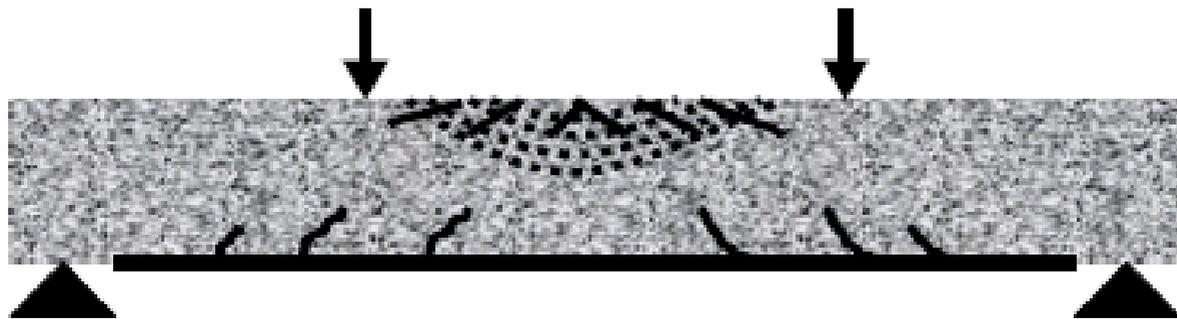
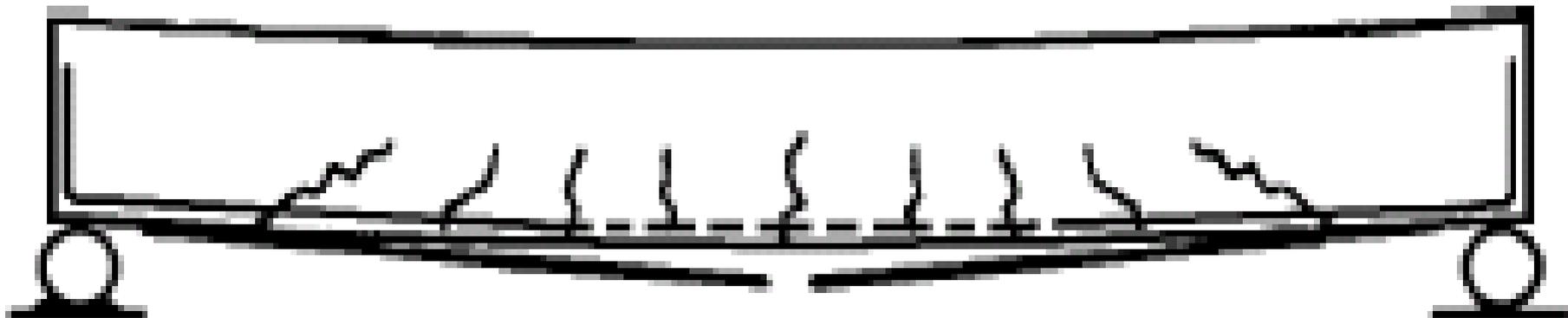


Figura 3.2– Ruptura por esmagamento do concreto; adaptada de LOPES (2002).

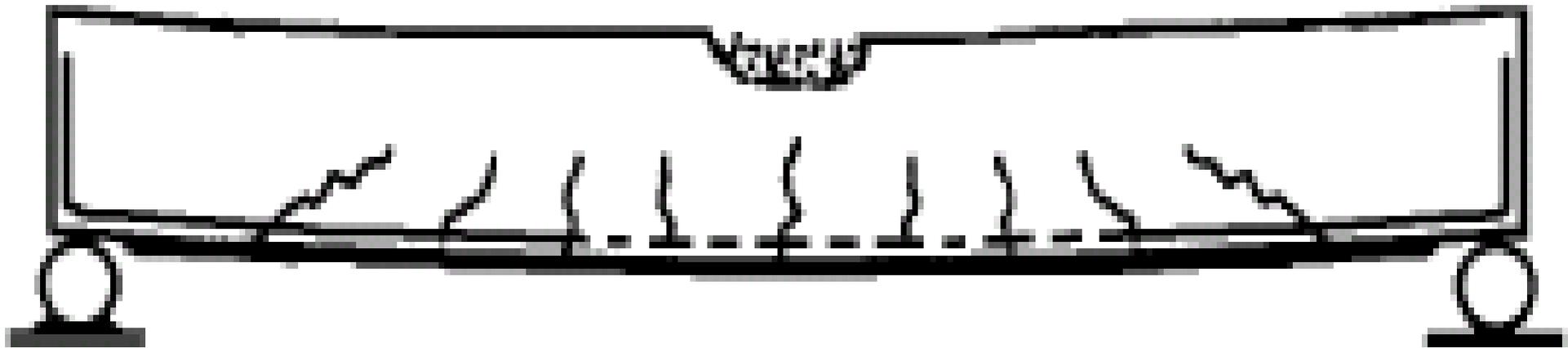
# Ruptura 1



(a)

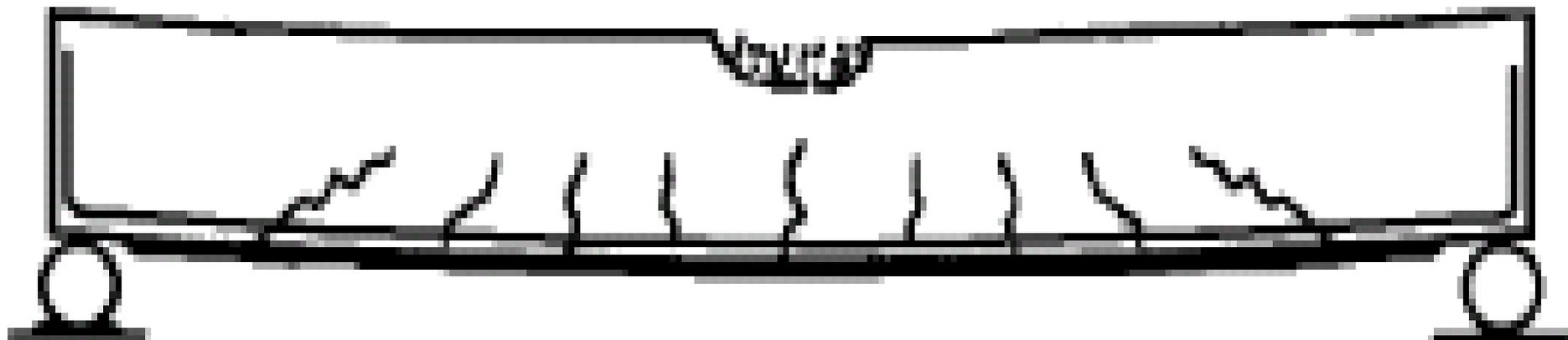
escoamento da armadura longitudinal interna seguido  
pela ruptura do reforço

# Ruptura 2



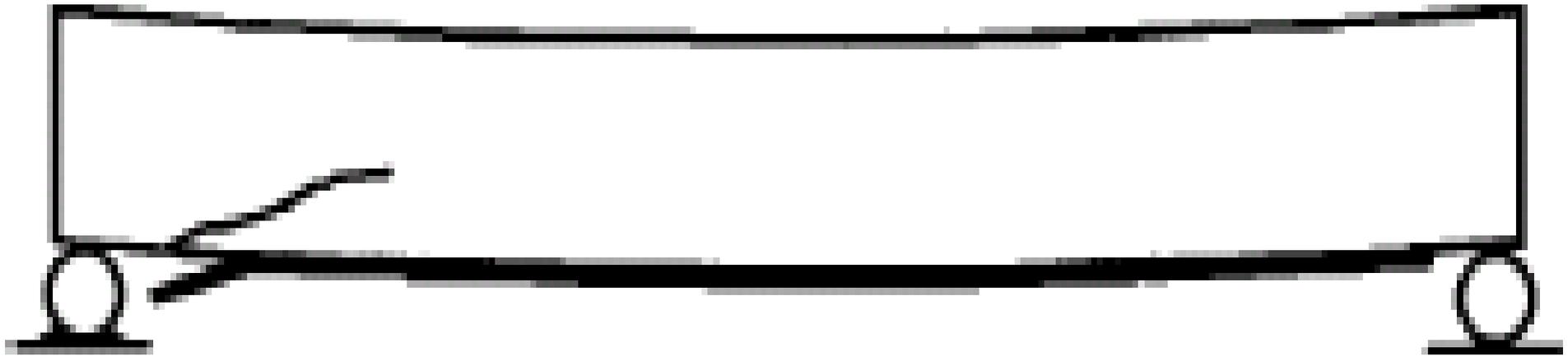
escoamento da armadura longitudinal interna seguido pelo esmagamento do concreto

# Ruptura 3



esmagamento do concreto

# Ruptura 4



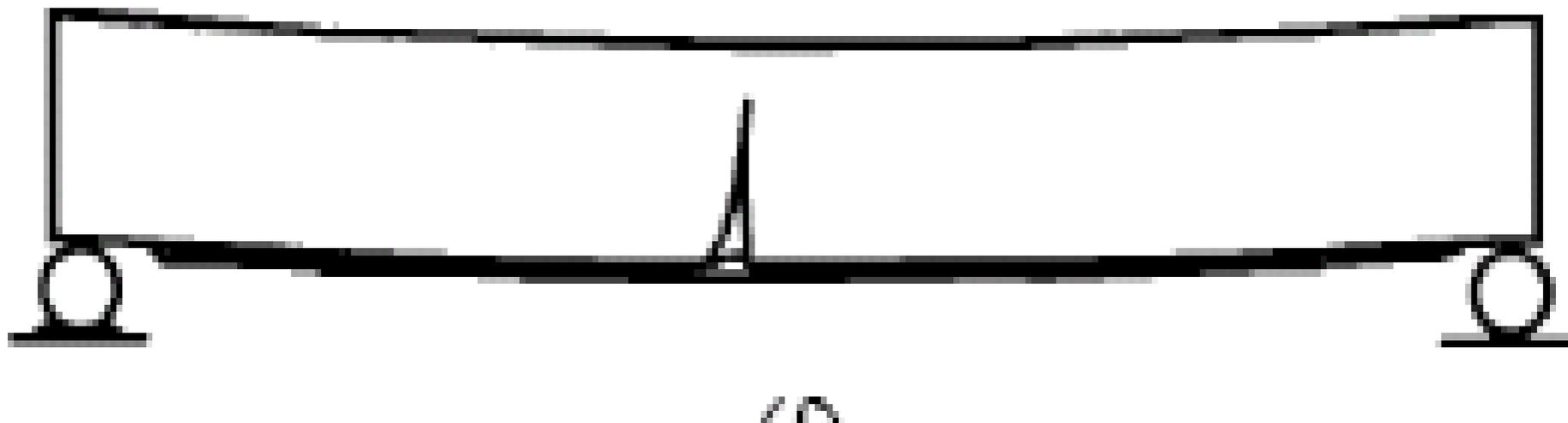
destacamento do reforço nas suas extremidades  
causado por fissuras de cisalhamento

# Ruptura 5



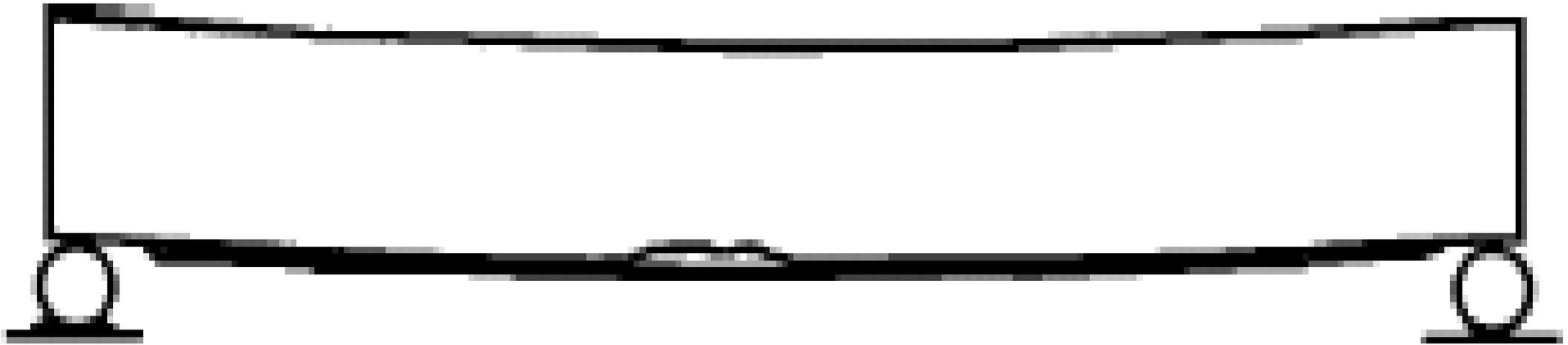
destacamento do reforço em fissuras inclinadas devido às suas aberturas horizontal e vertical

# Ruptura 6



descolamento do reforço causado por fissuras de flexão

# Ruptura 7



descolamento do reforço causado por irregularidades na superfície do concreto ou pela deficiência da ligação

# Dimensionamento - ELU

Os estados limites últimos são aqueles que correspondem ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura, em parte ou no todo, podendo originar-se de uma das causas seguintes:

- perda da estabilidade da estrutura assimilada a um corpo rígido, isto é, incapacidade de absorver reações de apoio ou forças de ligação em vínculos internos;
- ruptura de seções críticas da estrutura, isto é, a incapacidade de absorver solicitações atuantes nestas seções;
- transformação da estrutura em mecanismo, onde a ruptura ocorre após a plastificação;
- instabilidade elástica (flambagem);
- deterioração por fadiga.

# Deformação última do FC

$\varepsilon_{fud} \leq 6,0 \text{ ‰}$  , para reforço in situ (compósitos de resina e folhas ou tecidos de fibras);

# Ligação substrato-compósito

- A qualidade da ligação das interfaces concreto – cola – material de reforço afeta o desempenho de vigas reforçadas. Nas interfaces ocorre a transferência de tensões que pode garantir a compatibilidade de deformações entre os materiais, necessária para que se tenha eficiência do reforço.
- Para evitar-se dano local do material de reforço, cantos angulosos devem ser arredondados. O manual do CEB (2001) propõe o valor de 30 mm para o raio de arredondamento de cantos angulosos na superfície do concreto, contra o valor de 13 mm sugerido pelo ACI 440.2R (2002).
- Segundo o ACI 440.2R (2002), a resistência do substrato de concreto à tração direta mínima deve ser de 1,4 MPa. Para esta última, os manuais da SIKA (2000) e do CEB (2001) sugerem o valor de 1,0 MPa. Além disso, devem ser seguidas instruções do fabricante do material de reforço para sua aplicação quanto ao preparo, limpeza, condição de umidade e nivelamento da superfície do concreto.

# Adesão de um sistema fibra/epóxi a superfície de uma peça de CA

Para a superfície do concreto: resistência da superfície à tração, seu perfil, porosidade, pH e tensão superficial

Para o revestimento ou propriamente a matriz aglomerante: viscosidade, tensão superficial, cura, retração e a capacidade de aderir e curar num ambiente alcalino, aerado e úmido como a superfície do concreto novo

Qualquer contaminação na superfície afetará estes fatores e, conseqüentemente, a adesão do reforço do aglomerante epóxico com a superfície do concreto,

O modo de adesão é predominantemente mecânico, o qual exige penetração e absorção da matriz líquida para dentro dos poros da superfície e para o interior das cavidades do substrato do concreto por sua ação capilar.

Desta forma, para assegurar a adesão mecânica da matriz epóxica, torna-se importante checar a existência e a remoção de contaminantes expondo a verdadeira superfície.

# Preparação da superfície

- Superfície limpa, isenta de contaminação ou sujeiras
- Remoção da película friável caracterizada pela nata de cimento existente na superfície do concreto de, aproximadamente, 3 mm e que prejudica a adesão entre concreto antigo e o compósito
- Trincas e fissuras deverão ser monolitizadas com injeção, usando-se epóxi de baixa viscosidade, de preferência com menos de 100cps ou resinas de baixíssima viscosidade, como o metacrilato (20cps), vertendo-se dentro o produto.

# A uniformidade da superfície

- Há uma tolerância para o grau e tamanho dos defeitos superficiais encontrados na superfície da peça estrutural, considerando-se a aplicação do reforço estrutural composto pelo sistema polimérico fibra/matriz epóxica.
- Protuberâncias e saliências maiores do que 3mm devem ser corrigidas com a utilização de meios mecânicos.
- Pequenos e grandes buracos deverão ser corrigidos com primer e massa epóxica.

# Quantidade de Camadas

- O CEB (2001) limita o número de camadas de reforço em 3, para o caso de reforço pré – fabricado em lâminas e em 5, para reforços curados *in situ*.
- Já o ACI 440.2R (2002) não faz referência ao número limite de camadas de reforço, mas destaca que a ligação concreto – material de reforço deva ser feita de forma que se garanta a transferência de tensões entre os materiais.

# Fluência (Creep) e Relaxação

- As armaduras e cabos de protensão em fibra de carbono apresentam baixa fluência, quando comparada ao aço.
- A relaxação ou perda de tensão que ocorre em materiais submetidos a deformação constante, relacionada também a perda da tensão de protensão, das armaduras e cabos de protensão em fibra de carbono situa-se entre 2 e 3 %.

# Bibliografia

- ARAÚJO, C.M. Reforço à flexão e ao cisalhamento em vigas de concreto. Dissertação de Mestrado – Depto. de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, RJ, 2002a.
- BEBER, A.J. Estudo teórico-experimental de vigas de concreto reforçadas com FC. IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, SP, 2000
- BEBER, A . J. Comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com compósito de FC. Tese de Doutorado – Depto. de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- CEB-FIP. Technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, 2001
- CERQUEIRA, E.C. Reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado com FC. Dissertação de Mestrado - Depto. de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, RJ, 2000
- PEREIRA, B. Estude de reforço externo em vigas de CA utilizando compósitos de FC. Dissertação de Mestrado – Programa de PG em Eng<sup>a</sup> Civil PUC - Rio, 2005
- JUVANDES, L. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP. Tese de D.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999.
- MACHADO, A.P. Reforço de estruturas de CA com FC, SP, PINI, 2002.
- ACI 440.2R-02. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures
- ACI 440.1R-03. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars
- CARNEIRO, L.A.V. Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras. COPPE/UFRJ, Tese de Doutorado - Depto. Engenharia Civil, 2004

**Sessão encerrada**  
**Obrigado a todos**

Eng<sup>o</sup> Marcelo Iliescu  
[iliescu@iliescu.com.br](mailto:iliescu@iliescu.com.br)  
[www.iliescu.com.br](http://www.iliescu.com.br)