

SISTEMAS ESPECIAIS para REFORÇO de ESTRUTURAS de BETÃO

Thomaz Ripper
– 2005 –



1. QUESTÃO de PRINCÍPIOS

É dever da ENGENHARIA DESPERTAR a
atenção da SOCIEDADE CIVIL para a
necessidade cívica de PLANEAR a
MANUTENÇÃO e a REABILITAÇÃO de
todo o PATRIMÓNIO EDIFICADO,
individual e colectivamente.



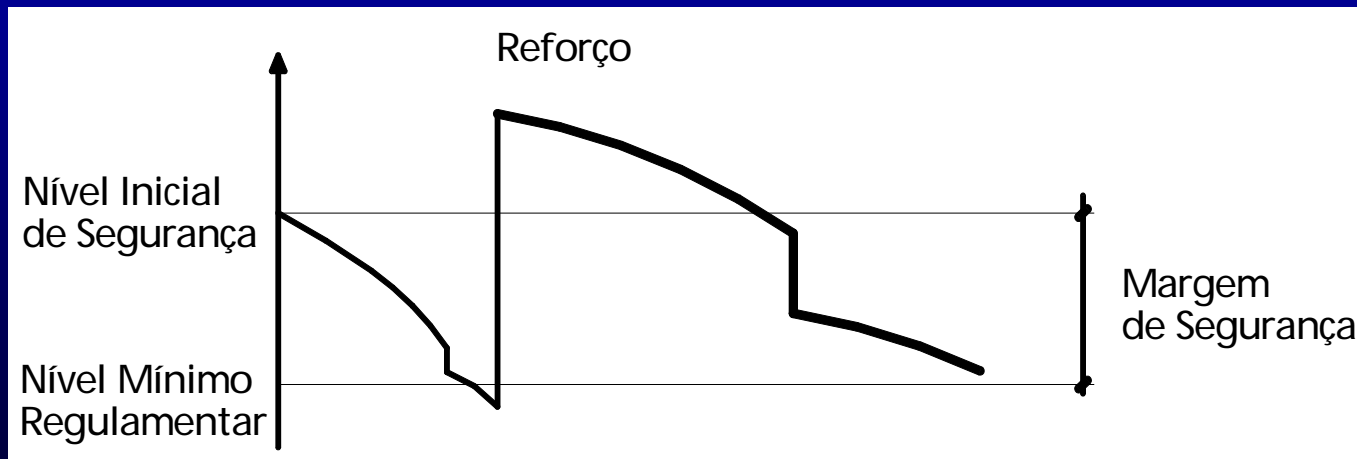
2. PORQUÊ REABILITAR e REFORÇAR?

- rotina eficaz de manutenção e preservação do património;
- correcção de defeitos originais de projecto, de construção e/ou planeamento de utilização;
- aumento da sobrecarga de utilização;
- modificação da geometria ou da concepção estrutural;
- adequação às novas imposições regulamentares (aumento da confiabilidade / segurança);
- melhoria dos níveis de segurança e/ou ductilidade (desempenho, na generalidade);
- prolongamento da vida útil;
- protecção adequada (segurança) contra acções extraordinárias (sismos, ventos, marés elevadas, variações de temperatura, grandes impactos mecânicos, explosões, etc.).



3. QUANDO INTERVIR?

- decisão de Proprietário, Utente e Técnico;
- perdas contínuas (trechos curvos) representam a degradação natural das propriedades dos materiais;
- perdas localizadas (descontinuidades) representam o aumentar das exigências em termos das combinações de acções a considerar (ou mesmo já a ocorrerem), quer por via regulamentar (fogo, sismo, sobrecargas de utilização), quer por adulteração da utilização.



4. COMO INTERVIR?

- é fundamental o trabalho de investigação dos danos, de conhecimento dos materiais existentes e do processo de construção;
- as intervenções deixam uma marca do tempo em que foram efectuadas, pelo que deverá implicar acções altamente especializadas, de modo a recuperar e manter a imagem, a concepção original ou o momento áureo na história da construção;
- os materiais devem ser escolhidos em função da sua durabilidade e compatibilidade com os existentes;
- a metodologia de reabilitação deverá permitir, na generalidade dos casos, o acesso a todas as evidências históricas da construção, sendo pautada pela mínima intrusão e pela garantia da máxima reversibilidade;
- uma construção histórica tem uma vida muito longa e a sua conservação normalmente é efectuada por várias gerações.



5. REGULAMENTOS DISPONÍVEIS

- Boletim CEB n.º 162 (1983);
- South African Roads Board: Recommendations for the Design of Epoxy Bonded External Steel Plate Reinforcement (1993);
- BRI (Building Research Institute, Japanese Ministry of Construction): Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures (1993);
- Regulamento Sueco 47.33 (1995);
- Beton Kalender (extracto das normas DIN), a partir de 1996;
- CSA (Canadian Standards Association): S806-97 - Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Plastics (Draft 2) (1997);
- ACI Committee 440F: FRP Reinforcement for Concrete Structures (1997 – 2002);
- Eurocódigo 8 - parte 1-4: Reforço e Recuperação de Edifícios;
- FIB Technical Report Bulletin n.º 14: Externally Bonded FRP Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (2001);
- Concrete Society Technical Report n.º 55: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials (2001);
- FIB Technical Report Bulletin n.º 18: Management, Maintenance and Strengthening of Concrete Structures (2002).



6. NÍVEIS CONFORTÁVEIS de SEGURANÇA

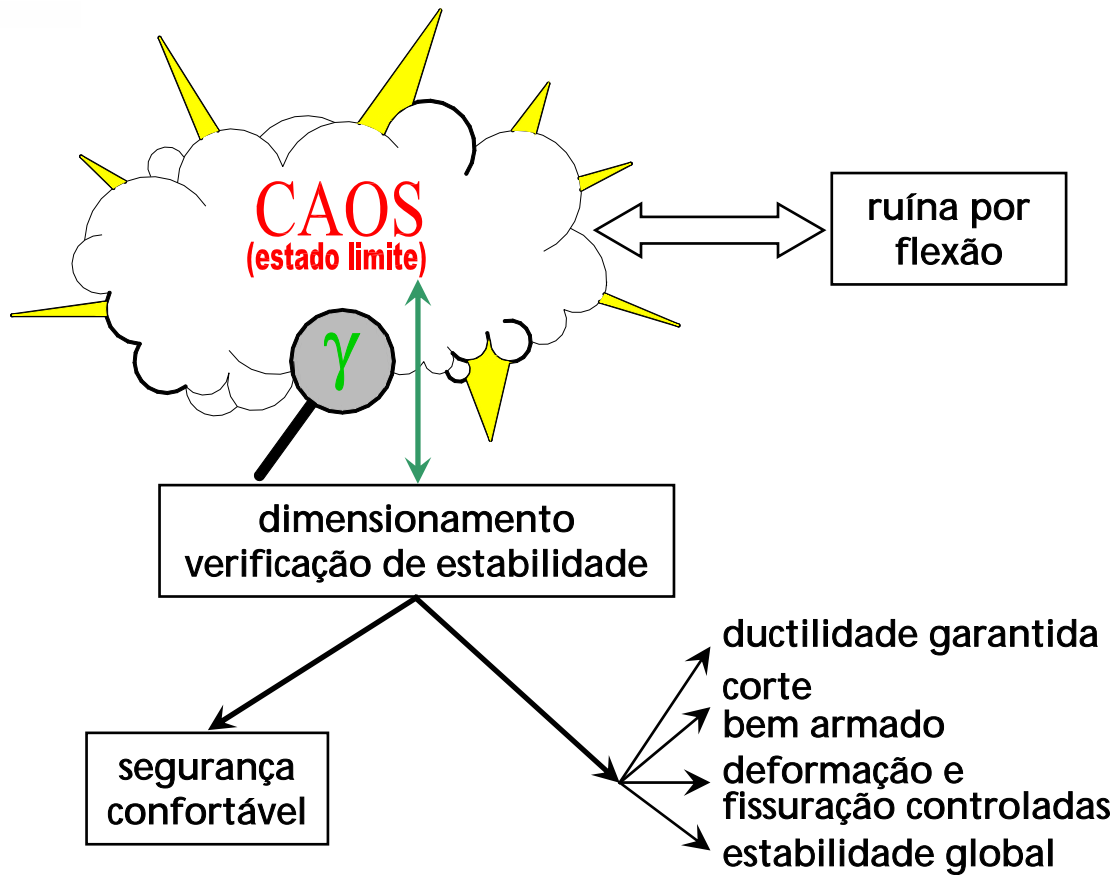
Uma estrutura recém executada, em uso permanente ou recém-reabilitada, deve transmitir aos seus utentes (e responsáveis) uma confortável sensação de segurança.

Em linguagem de Engenharia, este conforto deverá ser garantido, caso a caso, por um razoável afastamento da situação de CAOS, que na maioria dos regulamentos é caracterizada pela ruína por flexão.

O conceito de segurança adoptado pelos Códigos mais modernos baseia-se no “Método dos Coeficientes de Segurança Parcelares”, que consiste na aplicação de coeficientes de majoração para as acções e de minoração para as resistências, para que seja possível considerar as incertezas próprias a cada um dos parâmetros.

Estes coeficientes são calibrados por forma a que, na generalidade, seja atingido um nível de segurança confortável, entendendo-se como tal aquele que atenda a uma probabilidade de ruína inferior aos limites aceites pela Sociedade Civil.





7. 1ª ETAPA: PESQUISA, INFORMAÇÃO

Qualquer avaliação de uma dada estrutura existente é um caso isolado, com um modelo próprio, independente, único. Assim, quanto mais informação houver sobre a estrutura, melhor se compreenderá a sua patologia, melhor se modelará o seu comportamento e, conseqüentemente, mais adequado será o projecto de recuperação / reforço e mais eficaz a estratégia de intervenção.

O Boletim n.º 162 do CEB-FIP (1983), sugere, na verificação de estruturas existentes, a introdução de coeficientes de minoração

γ_R , para a resistência inicial da estrutura, e γ_K , para a rigidez inicial da estrutura, a definir em função do idade da estrutura, do tipo e intensidade da degradação já instalada e da qualidade da inspecção realizada.



8. CRITÉRIOS para REFORÇAR

$$\Phi_R = \frac{R_d}{F_d}$$

índice de resistência residual.

$$\Phi_R \geq 1$$

→ se a obra estiver em boas condições não há que reforçar.

$$0,67 \leq \Phi_R \leq 1$$

→ recuperar e, eventualmente, reforçar, dependendo do caso.

$$0,5 < \Phi_R < \frac{2}{3}$$

→ escorar de emergência e reforçar.

$$\Phi_R \leq 0,5$$

→ escorar de emergência e demolir.

9. LIMITES para os REFORÇOS

- caso o reforço introduzido deixe de ser eficaz, como resultado de acções tais como fogo, vandalismo ou explosão, por exemplo, o elemento estrutural deverá ser capaz de suportar a combinação de acções estabelecida nesta situação, ou seja, as acções permanentes e a uma percentagem ψ das acções eventuais:

$$R_{orig} \geq F_g + \psi F_q$$

- o reforço máximo absoluto é o que duplica a capacidade resistente do elemento estrutural:

$$R_{ref} \leq 2 \times R_{orig}$$



10. CRITÉRIOS BÁSICOS para o DIMENSIONAMENTO de REFORÇOS

- não utilizar, salvo em casos muito específicos, uma análise elástica linear. Na generalidade, se poderá proceder a uma análise da estrutura segundo um modelo elástico, mas contando com a redistribuição de esforços. Os resultados assim obtidos em muito se aproximarão dos de uma análise plástica, mais sofisticada;
- níveis confortáveis de segurança e de ductilidade;
- teoria dos estados limites;
- E. L. Utilização: fendilhação, deformação, vibração;
- E. L. Ruína: resistência, equilíbrio, fadiga, bambeamento, curvatura, aderência, ancoragem;
- prevenir as ruínas prematuras (destacamento precoce do reforço em relação ao suporte em betão, por exemplo);
- prevenir as ruínas frágeis, como as resultantes de excesso de compressão no betão, esforço transversal, tracção transversal e torção;



11. EQUAÇÃO de DIMENSIONAMENTO

Cada Regulamento tem procedimentos próprios para a definição dos valores característicos das acções e resistências, assim como para os correspondentes coeficientes parciais de segurança.

Estes procedimentos levam em consideração características e tradições metodológicas próprias de cada país ou região, que poderão, em cada caso, ser mais penalizantes ou suaves relativamente a valores definidos em documentos como o FIB, os Eurocódigos ou a ACI, por exemplo.

O conceito de segurança deverá considerar, sempre:

- tolerâncias relativas à geometria dos elementos e do conjunto e à posição das varões de aço no meio da massa de betão;
- incertezas relativas ao modelo estrutural adoptado, ao método de cálculo, ao modo de ruína e ao nível de gravidade das consequências de uma ruína;
- nos casos de recuperação e reforço, deverá considerar também as incertezas quanto a uma maior repercussão do nível de esforços a actuarem numa estrutura fissurada e eventualmente danificada e ainda quanto a interacção estrutura antiga – elementos de reforço (comportamento monolítico futuro).

$$F_{d} = (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$



F_k – é o valor característico das acções, definido em função da variabilidade das intensidades destas, devendo ser considerado, quer para o dimensionamento de reforços, quer para a verificação de estabilidade, de acordo com o estabelecido nos regulamentos vigentes. Poderão existir, para uma dada acção, valores característicos superiores e inferiores sensivelmente diferentes, em função da maior ou menor variabilidade da intensidade da acção. F_k é função de:

- período de vida útil (T) previsto para a construção (em geral 50 anos, dependendo da importância social da construção e dos parâmetros de mercado);
- nível de risco associado, que é traduzido pela probabilidade pretendida ($PROB_F$), em geral assumida como igual a 95%, de que durante a vida útil os valores estabelecidos para as acções não sejam ultrapassados.

Associado a estes parâmetros surge naturalmente um outro, o período de retorno (ΔT), que é o tempo no qual estas condições (acções) limites, teriam a probabilidade definida de ocorrência:

$$F_{d'} = (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$



Assim, como exemplos:

Para $T = 100$ anos e $PROB_F = 95\%$, $\Delta T = 1950$ anos;

Para $T = 50$ anos e $PROB_F = 95\%$, $\Delta T = 975$ anos;

Para $T = 25$ anos e $PROB_F = 95\%$, $\Delta T = 238$ anos;

Para $T = 50$ anos e $PROB_F = 90\%$, $\Delta T = 475$ anos;

Para $T = 50$ anos e $PROB_F = 70\%$, $\Delta T = 140$ anos (NB);

Para $T = 50$ anos e $PROB_F = 50\%$, $\Delta T = 37$ anos.

$$\Delta T = \frac{1}{1 - PROB_F^{1/T}}$$

No caso de estruturas existentes, F_k poderá ser ou não reduzido, tendo-se em conta, por um lado, o horizonte de vida útil que se adopte a partir da intervenção de reforço / reabilitação (que normalmente é inferior ao de uma estrutura nova) e, por outro, o nível de risco, que será naturalmente maior, dado que se está a intervir numa construção já com historial de deformações (e de fissuração).

Para uma mesma estrutura, F_k poderá portanto ser diferente, caso se esteja a fazer uma verificação de estabilidade ou caso se trate de dimensionar reforços.



$$F_d = (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$

$\gamma_F \geq 1$ é o coeficiente de majoração das acções, ou esforços, já que estes daquela decorrem, em função de um modelo de análise (de cálculo) adequadamente definido.

Este coeficiente considera as incertezas existentes quanto aos valores assumidos para as acções, a sua variabilidade e a da simultaneidade de ocorrência, e ainda a própria coerência do nível de majoração definido para cada acção.

No caso de estruturas existentes (γ'_F), se por um lado se poderá ter maior certeza quanto ao valor das acções, por outro se terá maior incerteza quanto à importância de uma dada acção (esforço) na resposta de uma estrutura já danificada (fissurada, deformada). Assim, segundo o CEB 162:

$\gamma'_g = \begin{cases} 1,1(\gamma_g - 0,1) \Rightarrow \\ 1,0(\gamma_g - 0,1) \Rightarrow \end{cases}$	estruturas danificadas
	estruturas sãs
$\gamma'_q = \begin{cases} 1,1\gamma_q \Rightarrow \\ 1,0\gamma_q \Rightarrow \end{cases}$	estruturas danificadas
	estruturas sãs

Para ventos, sismos e outras acções mais importantes, deverá ser efectuado um estudo mais rigoroso (pura probabilidade de ruína) para a determinação dos valores característicos.



$$F_{d=} (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$

R_k – é o valor característico da resistência dos materiais, tomado como aquele para o qual se garanta uma probabilidade de 95 % de que não lhe venham a ocorrer valores inferiores e que, no caso dos materiais já existentes, deverá ser avaliado por ensaios directos, ou seja, por extracção de corpos de prova.

Para o aço a situação é simples, devendo-se, para além de realizar ensaios de tracção, proceder-se a observação da conformação superficial do varão.

Para o betão, haverá que definir elementos ou áreas de inspecção e caracterizar várias resistências representativas destes universos (lajes, vigas, pilares, andares, região de betão melhor, região de betão pior, etc.). Os resultados deverão ser interpretados à luz de cada regulamento.

No entanto, para os materiais de reforço os valores serão mais reduzidos, dado que não se conseguirá, via de regra, mobilizar a totalidade da capacidade do material, posto que o reforço estará a trabalhar apenas para uma parcela das acções. Esta consideração

é feita, por facilidade de tratamento, através de γ_m e γ_n .



$$F_{d=} (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$

$\gamma_m \geq 1$ é o coeficiente de minoração da resistência dos materiais, função da variabilidade da resistência de cada material, da diferença entre a resistência real e a que se avalia pelos ensaios de caracterização e das incertezas existentes quanto ao processo de fabricação e o controlo de qualidade dos materiais de reforço.

Tratando-se de estruturas existentes, considera-se que tenha sido obtida informação rigorosa sobre as propriedades dos materiais realmente utilizados na estrutura.

Assim, os coeficientes γ'_m a adoptar para os materiais existentes poderão ser mais discretos que os tomados em estruturas a construir.

No entanto, para os materiais de reforço os valores serão mais elevados (ver tabela), forçando a que estes materiais trabalhem a tensões mais baixas, compatíveis com a transmissão de esforços a ser feita, por suspensão e corte, através de um betão fraco (o de recobrimento das armaduras).

Assim:

$$\gamma'_m = \gamma_m / 1,10, \text{ limitando-se:}$$

$$\gamma'_c \geq 1,20$$

$$\gamma'_s \geq 1,05.$$



$\gamma_R < 1$ é o coeficiente que considera o tipo e o nível de degradação da estrutura, como por exemplo:

CORROSÃO	COEFICIENTE γ_R			
IDADE DA ESTRUTURA	NÍVEL DE DANOS			
	A	B	C	D
Antiga	0,85	0,70	0,50	0,25
Recente	0,95	0,80	0,60	0,35

Dano A – manchas de ferrugem, alguma fendilhação longitudinal, sem delaminação do betão e mínima perda de secção das armaduras (< 5%);

Dano B – manchas de ferrugem, alguma fendilhação longitudinal e transversal (estribos), alguma delaminação do betão e perda de secção das armaduras < 10%;

Dano C – manchas de ferrugem, fendilhação extensa, muita delaminação do betão e perda significativa de secção das armaduras (< 15%);

Dano D – perda localizada da aderência entre a armadura e o betão e elevada perda de secção das armaduras < 25%.



$$F_{d'} = (\gamma_F) \times F_k \leq R_d = (\gamma_n \times \gamma_R) \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$

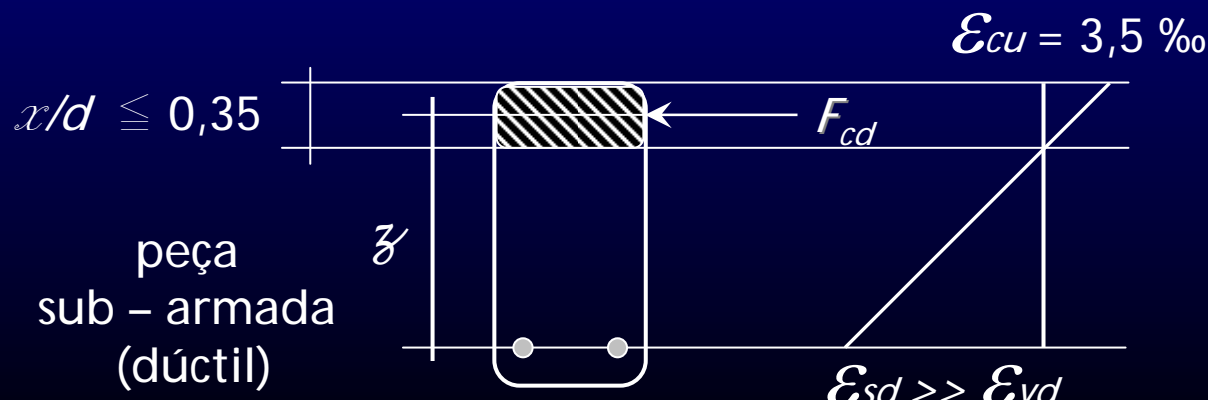
$\gamma_n \leq 1$ é o coeficiente de comportamento, ou de monolitismo, a afectar a parcela resistente, por forma a considerar as dificuldades executivas próprias do sistema de reforço (em especial as referentes à sua forma de aplicação e à capacidade aderente do suporte em betão), a experiência de quem executa e ainda as incertezas quanto à correcta reprodução das hipóteses de Projecto.

Assim, um reforço a executar numa viga a meio do vão, "overhead", deverá ter um coeficiente de comportamento mais gravoso do que o da mesma viga junto ao apoio, pela face superior, executado com maior conforto e, portanto, com maior probabilidade de atingir melhor desempenho.



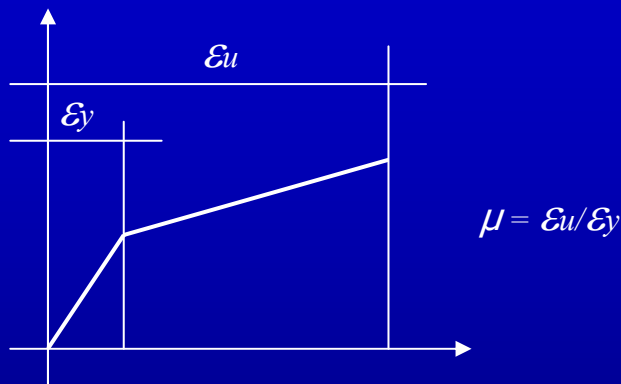
12. A DUCTILIDADE APLICADA ao REFORÇO

- a capacidade de uma estrutura (ou de um elemento estrutural, ou dos materiais que os compõem) em oferecer resistência mesmo sob domínio não elástico é definida, na generalidade, como ductilidade.
- o oposto de comportamento dúctil é comportamento frágil, em que a rotura é brutal, ocorrendo sem qualquer aviso prévio.
- uma estrutura dúctil trabalha com um significativo aumento das deformações inelásticas, sem que isto implique grande perda de rigidez ou grande acréscimo de tensão nos materiais resistentes.
- a flexão simples é o melhor exemplo. Nas peças ditas sub-armadas, a rotura é regida pelo aço, pelo que há que percorrer toda a deformação correspondente ao patamar de cedência, com o conseqüente aviso traduzido em fissuras e grandes flechas, antes de atingir a ruína.
- ao controlar a posição da linha neutra está-se a tentar trabalhar com o máximo acumular de energia (trabalho) e com o menor nível de esforço (pouca área comprimida e grande braço de alavanca), para que, quando vier um maior esforço, ainda existam muitos pares de $(F_{cd} \times z)$ que garantam adequadamente o equilíbrio da secção.



- na generalidade, a medida da ductilidade (μ) é feita pela deformabilidade da peça num dado instante comparada com a deformabilidade medida no início da situação de escoamento (comportamento plástico), ou seja:

$$\mu = \frac{\Delta}{\Delta_y} > 1,0$$



- garantir que uma estrutura assuma um comportamento dúctil implica, sempre, que ela seja adequadamente pormenorizada, o que inclui:
 - ✓ um sistema estrutural que permita redistribuição de esforços;
 - ✓ armaduras dispostas de tal forma que sejam evitadas ruínas prematuras (corte, aderência, ancoragem, destacamento do reforço), obedecendo, assim, a modelos clássicos de trabalho, como o da treliça de Morsch, e garantindo-se ruína por flexão, com grandes deformações;
 - ✓ estribos não muito espaçados entre si e bem amarrados, para introduzir compressão transversal sobre a secção de betão e também sobre o tirante traccionado.

13. MATERIAIS

- ☑ materiais que responderão pelo aumento de resistência:
 - ⇒ betão;
 - ⇒ aço;
 - ⇒ FRPs (plásticos armados com fibras).

- ☑ materiais que serão responsáveis pela aderência entre os materiais de reforço e a estrutura existente:
 - ⇒ betão;
 - ⇒ resinas;
 - ⇒ chumbadouros.



13.1. betão

☑ características genéricas:

- ⇒ compacto;
- ⇒ rico em cimento;
- ⇒ baixo factor A/C ($< 0,40$);
- ⇒ garantia de minimização dos efeitos da retracção diferida em relação ao betão existente;
- ⇒ controlo da máxima dimensão dos inertes;
- ⇒ melhoria das características mecânicas e da homogeneidade pela adição dosada de fibras de polipropileno ou mesmo de fibras metálicas;
- ⇒ redução da porosidade pela adição de sílica activa;
- ⇒ garantia de sistema de cura apropriado.



☑ formas de aplicação:

- ⇒ dependerá do tipo de reforço a ser executado, das dificuldades de acesso e das extensões envolvidas;
- ⇒ nos casos de intervenção em grandes áreas, aplicação por projecção, em geral por via seca;
- ⇒ em reforços localizados, betão confinado por formas, com garantia de vibração adequada;
- ⇒ como alternativa ao betão, nos casos em que as áreas de intervenção sejam discretas, utilizar argamassas poliméricas, de base cimentosa, modificadas com adição de polímeros em pó e outras adições. Devem ser tixotrópicas, isentas de retracção, prontas para aplicar, às quais deverá ser adicionada apenas água, na quantidade estritamente necessária à hidratação e justo no momento de sua aplicação, a ser feita à espátula e aperto final à mão.



13.2. resinas

- ☑ colas, aplicadas manualmente (tixotrópicas, com consistência de massa) ou por injeção (líquidas);
- ☑ em geral em dois componentes – a resina pura e o endurecedor – misturados somente na hora da aplicação, na proporção a definir pelo Fabricante.
- ☑ características genéricas:
 - ⇒ normalmente de base epóxida (modificada, para substratos húmidos) ou em poliuretano, para permitir a “respiração” de substratos minerais;
 - ⇒ espessura muito bem controlada;
 - ⇒ elevada resistência ao corte (20 MPa) e à tracção (50 MPa) e baixo módulo de elasticidade (2 a 8 GPa), para garantir transferência de carga sem escorregamentos;
 - ⇒ viscosidade adequada, em especial para os casos de aplicação por injeção.



☑ características especiais: (a especificar pelo Projectista)

- ⇒ “pot-life”, intervalo de tempo durante o qual o material líquido é facilmente utilizável. Situa-se, normalmente, entre 30 e 60 minutos, devendo ser escolhido em função do tipo de trabalho a realizar e da temperatura ambiente. O “pot-life” diminui com o aumento da temperatura e com a quantidade de material a preparar, pois quanto maior for o volume a polimerizar, maior a libertação de calor durante a cura da resina;
- ⇒ temperatura de transição ao estado vítreo, que caracteriza o ponto a partir do qual a resina deixa de estar endurecida, comportando-se como cola, e passa a estar pastosa, deixando de ser capaz de transferir esforços entre os materiais de reforço e a base. As resinas epóxicas assumem este comportamento sob temperaturas $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.



13.3. aço

- ☑ varões de aço A 235, A 400 ou A 500, na dependência do tipo do aço da armadura existente. Eventualmente o aço de reforço precisará ter características especiais de soldabilidade;
- ☑ de pré-esforço, em fios e cordões para aplicação exterior;
- ☑ em chapas e perfis metálicos, do tipo S 235 ($f_y = 235$ MPa), S 275 ($f_y = 275$ MPa) ou S 355 ($f_y = 355$ MPa), sendo a utilização deste último mais vantajosa quando a estrutura existente tiver varões de aço do tipo A 400.



13.4. chumbadouros

- ☑ a serem fixados mecânica e/ou quimicamente ao suporte de betão, exigindo, sempre, furação prévia. Em geral trabalham a tracção (como ancoragem) e ao corte (como pinos). Existe uma grande variedade de produtos destes no mercado, com diferentes diâmetros e comprimentos;
- ☑ uma variante é a utilização de varões de aço passantes, com as extremidades em rosca;
- ☑ outra variante consiste na utilização de varões de aço com a cabeça em gancho.



13.5. plásticos armados com fibras

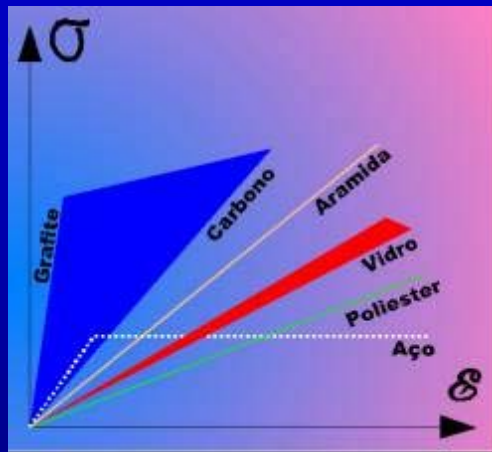
☑ generalidades:

- ⇒ elementos compósitos: matriz resinosa + armadura fibrosa;
- ⇒ plásticos epóxidos armados com fibras de carbono (grafite), vidro ou aramida;
- ⇒ impregnados “in situ”, com menor concentração de fibras, ou seja, com menor capacidade resistente, mas com a propriedade de poder acompanhar a geometria do substrato, pelo que são usados para o cintamento de pilares e como estribos, em vigas ;
- ⇒ pré-fabricados, sob a forma de lâminas ou varões, apropriados para os reforços à flexão, pois têm capacidade de fazer frente a esforços de maior grandeza;
- ⇒ pré-esforçados.



☑ armaduras:

(a especificar pelo Projectista, em função do módulo de elasticidade e da deformação de rotura)



- ✓ fibras de carbono ou grafite;
- ✓ fibras de vidro;
- ✓ fibras de aramida;
- ✓ fibras sintéticas (poliéster, nylon).

- ⇒ as armaduras são as responsáveis pela resistência mecânica e pela rigidez;
- ⇒ para aumento da capacidade resistente, fibras com módulo de elasticidade específico elevado;
- ⇒ para a obtenção de um comportamento dúctil, melhor será recorrer à fibras com maior extensão de rotura;
- ⇒ a concentração máxima de fibras (força a resistir) dependerá do processo de fabricação: 35% para o manual e 70% para o pré-fabricado.

☑ fibras de vidro:

- ✓ são as fibras mais utilizadas, dado o conhecimento que já se tem sobre o seu comportamento;
- ✓ elaboradas a partir da química do vidro;
- ✓ estupenda razão qualidade / preço;
- ✓ excelentes características de isolamento;
- ✓ peso específico elevado;
- ✓ baixo módulo de elasticidade;
- ✓ baixa resistência face à cargas permanentes e à cíclicas;
- ✓ maior sensibilidade à humidade, aos álcalis e à abrasão.

⇒ E-Glass: é o tipo mais utilizado, à base do vidro mais comum. Boas propriedades eléctricas, baixa capacidade de absorção de humidade, durável e de baixo custo;

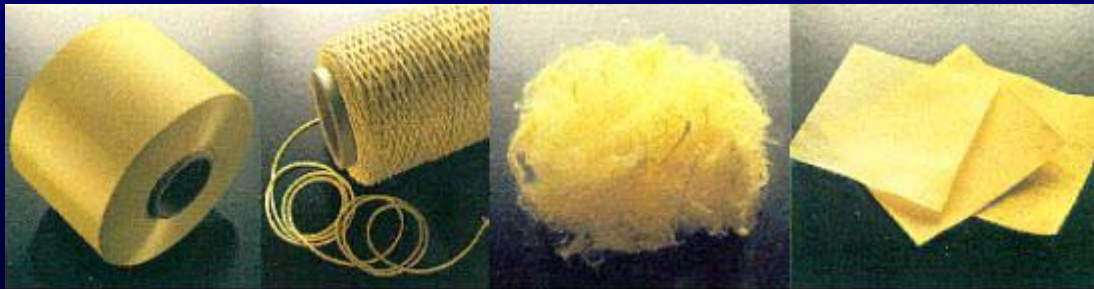
⇒ AR-Glass: alta percentagem de silício, é resistente aos álcalis (indicada para revestir materiais cimentosos). As propriedades mecânicas são inferiores às das fibras E;

⇒ R-Glass: é recente, à base de aluminato de cálcio; é um produto topo de gama, cujo módulo de elasticidade chega a 180 GPa. Possui custo mais elevado e é muito resistente a fadiga, ao calor e à humidade.



☑ fibras de aramida:

- ⇒ aramida é a designação genérica das fibras orgânicas de poliamida aromática;
- ⇒ foram introduzidas comercialmente pela DuPont, no ano de 1965, como KEVLAR[®];
- ⇒ muito baixo peso específico;
- ⇒ excepcional tenacidade (resistência ao impacto) e de difícil moldagem;
- ⇒ excelente resistência à abrasão;
- ⇒ produto razoavelmente caro;
- ⇒ pouco resistentes à compressão;
- ⇒ sensíveis à fluência e aos raios ultravioleta.



☑ fibras de carbono ou grafite:

- ⇒ a partir da pirólise de fibras base, que não se volatilizam ou derretem mesmo quando submetidas a altas temperaturas;
- ⇒ são de base acrílica (poliacrilonitril – PAN), que são mais caras e admitem maiores deformações, ou derivadas do petróleo destilado (PITCH), que são cerca de 33 % mais baratas, mas que só admitem alongamentos até 12 ‰ ;
- ⇒ a obtenção das fibras de carbono principia pelo aquecimento das fibras base ao ar, até 300 °C, por forma a estabilizá-las – já que serão as responsáveis pelo processo de fusão – e impedir que se contraíam sob temperaturas ainda “baixas”;
- ⇒ depois dá-se a carbonização das fibras, sob temperaturas de até 2000 °C, numa atmosfera inerte, para eliminar todos os elementos que não sejam carbono. Consegue-se, assim, carbonos de alta resistência ($E = 150$ a 300 GPa);
- ⇒ para grafites ($E = 700$ a 800 GPa, mas com tensões de rotura mais baixas que o carbono), há que elevar a temperatura até 3000 °C – grafitização das fibras – estágio em que se forma a estrutura cristalizada própria do grafite, muito rígida e resistente.



☑ fibras sintéticas:

- ⇒ são fabricadas a partir de polímeros termoplásticos, sendo, em geral, produtos estáveis e duradouros;
- ⇒ fibras de polipropileno (homopolímero de polipropileno 10% fibrilado e imprimado) são inertes e compatíveis com todo o tipo de cimento e aditivos, pelo que são muito utilizadas em produtos cimentosos e em geotêxteis. Têm muito boas propriedades mecânicas;
- ⇒ fibras de polietileno, também derivam de poliolefinas e são muito utilizadas como armaduras em matrizes cimentosas e em materiais geotêxteis;
- ⇒ fibras de nylon derivam da poliamida, têm boa resistência à tracção e são muito empregues em materiais geossintéticos;
- ⇒ fibras de poliéster têm emprego no campo dos geotêxteis e têxteis em geral, combinadas, via de regra, com lã de vidro e imersas numa matriz termoplástica.



Características de algumas fibras em cordão

principais características	tipo de resinas				
	grafite	carbono E médio	carbono E baixo	aramida KEVLAR® 49	e-glass
resistência à tração (GPa)	2,4	2,9	5,7	2,7	1,9
módulo de elasticidade (GPa)	830	390	290	125	72
deformação na rotura (‰)	3	7	18	19	48
peso específico (kN/m ³)	21,6	17,6	17,6	14,5	25,5
coef dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	-1,45	-1,13	-0,75	-2,0	5
Resistividade (μΩ-m)	2,2	9,5	15		402 × 10 ¹⁸
preço (USD/kg)	140	35	18	33	2

☑ matrizes:

(a especificar pelo Projectista, em função do componente de base, com a definição do módulo de elasticidade, da deformação de rotura, da viscosidade e do ponto de transição vítrea)

✓ a matriz dos materiais plásticos envolve, protege e suporta as armaduras, por forma a:

- ⇒ manter as fibras juntas, alinhadas numa direcção previamente definida;
- ⇒ transferir as tensões entre as diferentes armaduras, impedindo o bambeamento destas;
- ⇒ proteger as armaduras das agressões ambientais e contra o desgaste;
- ⇒ conferir, em alguns casos, a necessária ductilidade ao plástico, para que este se acomode face a fissuras que ocorram como resultado de fracturas nas fibras.



- ✓ as resinas de epóxico caracterizam-se por:
 - ⇒ extraordinária capacidade de aderência;
 - ⇒ grande capacidade resistente às acções mecânicas e às agressões químicas
 - ⇒ baixa retracção durante a cura;
 - ⇒ são sensíveis à humidade;
 - ⇒ exigem dosagem cuidada da quantidade de catalisador;
 - ⇒ serem 3 vezes mais caras que as de viniléster e 4 vezes mais que as de poliéster.
- ✓ os maiores problemas das matrizes poliméricas são a degradação sob a acção do calor, da humidade e dos ataques químicos;
- ✓ as características da matriz influem nas características do produto final:
 - ⇒ muito nas condições de fabricação (viscosidade, ponto de fusão, temperatura de transição vítrea, cura);
 - ⇒ pouco nas propriedades mecânicas.

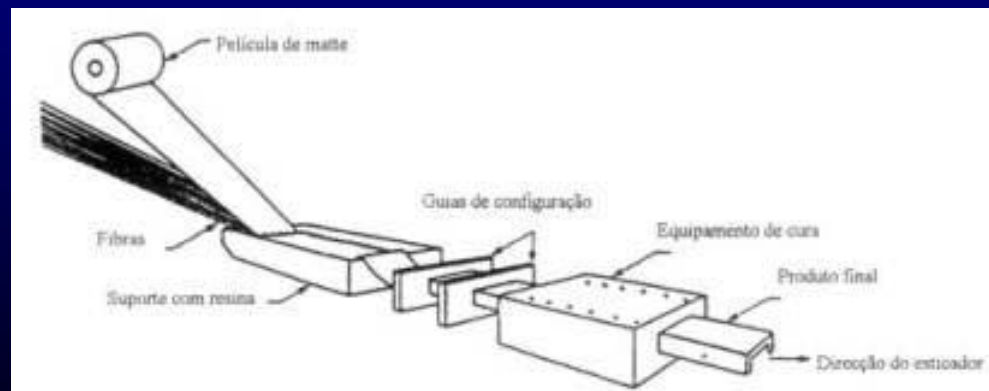
Características de algumas resinas

principais características	tipos de resina			
	epóxico	viniléster	fenólica	poliimida
resistência à tração (MPa)	55 – 130	79 – 90		40 – 190
módulo de elasticidade (GPa)	2,5 – 4,1	3 – 3,3		3 – 5
deformação na rotura (%)	1 – 9	3,9 – 5,2	3	1 – 60
peso específico (kN/m ³)	10,8 – 12,7	10,9 – 12,9	12,5 – 13,1	12,7 – 13,7
retração volumétrica na cura (%)	1 – 3	0,1 – 1	0,5 – 1,5	0,5 – 0,7
temperatura transição vítrea (°C)	50 – 260	119 – 280	130 – 180	210 – 340
coef. dilatação térmica (µm/m/°C)	45 – 90			14 – 50



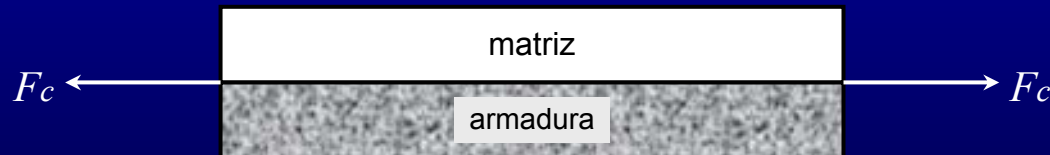
☑ processos de fabricação:

- ✓ **impregnação manual**: embebimento das armaduras em resina no estado líquido. Este processo possibilita a adaptação do material às superfícies, é rápido, pode ser executado à temperatura ambiente, mas poderá resultar em produtos de qualidade questionável:
 - ❖ pela pouca capacidade de impregnação (o que implica a utilização de quantidades reduzidas de armadura);
 - ❖ pela grande possibilidade de desalinhamento das armaduras durante o processo de impregnação, o que reduz a capacidade resistente na direcção principal, assim como o módulo de elasticidade do produto;
 - ❖ pela dificuldade em garantir o pleno envolvimento das armaduras, ou seja, que a impregnação esteja garantida, na totalidade.
- ✓ **pultrusão**, que consiste no estiramento das fibras, já impregnadas de resina, através de um molde, onde se produz a polimerização da resina, dando lugar à produção de perfis com a mesma forma da cavidade do molde.



☑ propriedades elásticas dos plásticos fibrados:

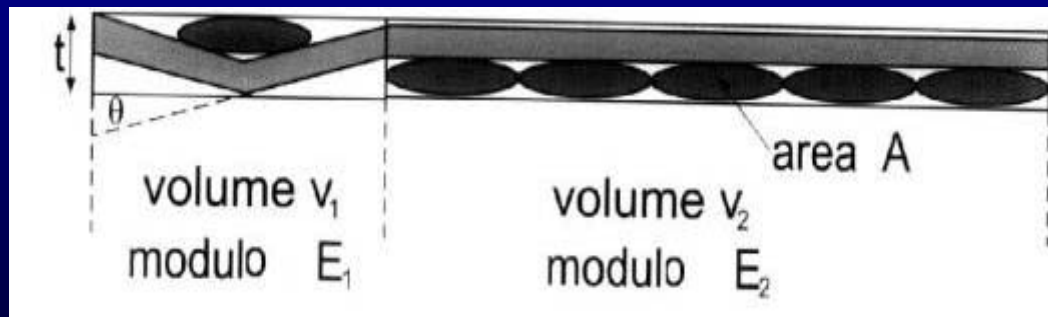
- ⇒ FRPs são assumidos como materiais anisotrópicos (propriedades mecânicas diferentes para diferentes direcções no plano) e delgados (elementos laminares, de espessura desprezível);
- ⇒ o método mais simples para se estimar o módulo de elasticidade de um plástico unidireccional é assumir o modelo em paralelo, no qual os dois componentes estão perfeitamente associados, deformando-se em conjunto, ou seja, a deformação do plástico é igual à das armaduras e à da matriz. Assim, sendo v a concentração volumétrica de cada componente:



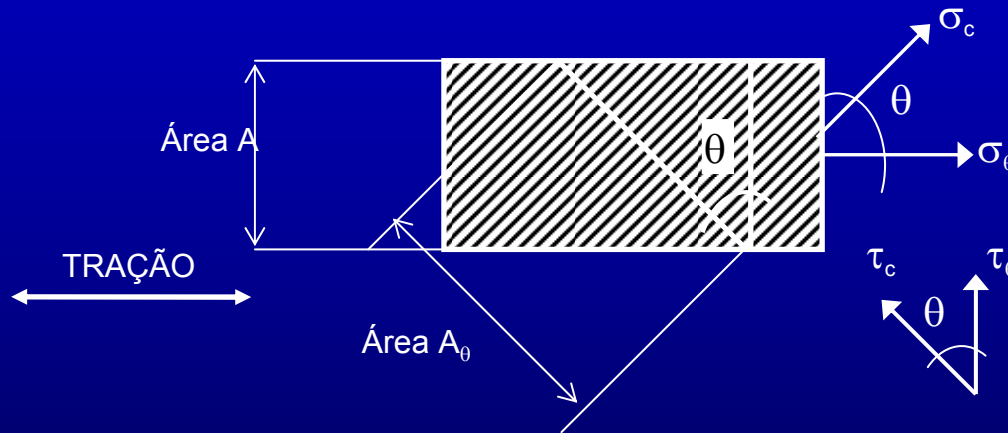
Lei de Voigt ou regra das misturas:

$$E_c = E_f \times v_f + E_m \times (1 - v_f)$$

- ⇒ a rigidez na direcção da armadura é função de E das fibras, enquanto a rigidez transversal é regida pelo E da matriz;
- ⇒ os tecidos entrelaçados possuem características de concentração volumétrica de fibras e de módulo de elasticidade muito distintas. Nunca será demais lembrar que o valor de E reduz-se com o aumento de θ .



⇒ se as fibras estão orientadas segundo um ângulo $\neq 0^\circ$ a resistência efectiva é menor, porque às tensões axiais somar-se-ão as resultantes das tensões tangenciais:

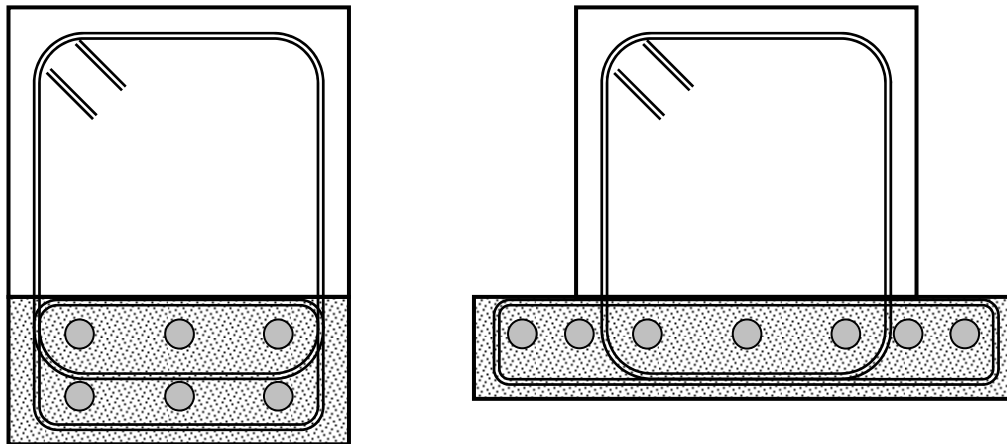


$$\sigma_c = \frac{F \cos \theta}{A_\theta} = \frac{F \cos \theta}{\frac{A}{\cos \theta}} = \frac{F}{A} \cos^2 \theta = \sigma_\theta \cos^2 \theta$$

14. REFORÇOS à FLEXÃO: TÉCNICAS DISPONÍVEIS

14.1. adição de varões de aço

- é uma metodologia adequada quando:
 - houver deficiência resistente nas armaduras existentes;
 - não houver problema em aumentar as dimensões geométricas;
 - a qualidade do betão existente for compatível com o novo campo de tensões a ser implantado.



Vantagens e desvantagens:

- recurso a materiais correntes na Construção Civil (o que pode ser um perigo, por estimular os não especialistas);
- implica a remoção da camada de recobrimento das armaduras, cuja má qualidade (é betão sujeito à tracção) é responsável pelo mau desempenho dos reforços à base de colagens;
- protege de forma eficaz as armaduras contra a acção do fogo;
- se o betão de recobrimento for bem aplicado e adequadamente protegido, constitui-se numa barreira eficaz à penetração dos agentes agressores causadores da corrosão das armaduras.
- exige, normalmente, intervenções profundas - e custosas - na estrutura remanescente (furação para amarração dos novos varões);
- em geral, introduz grandes acréscimos na geometria das peças;
- é altamente poluente (poeira e ruído);
- exige tempo para que o betão endureça e a estrutura possa entrar em carga;
- exige cuidado especial para a interface betão novo - betão velho, tanto em termos de execução (retracção diferenciada), como de cálculo (limitação da tensão de corte).



Metodologia de execução:

- avaliação da necessidade de se escorar e/ou macaquear (apoios provisórios?) a peça antes da execução dos trabalhos;
- remoção da camada de recobrimento, até a exposição do semi-perímetro das varões, com recurso a martelos pneumáticos leves (± 5 kgf), devendo-se tomar medidas para o controlo da microfissuração das superfícies. A superfície deverá ficar razoavelmente rugosa, dado que a aderência se dará também por atrito;
- limpeza das superfícies expostas, pela aplicação sucessiva de jactos de areia húmida, água e ar sob pressão controlada, por forma a remover toda a sujeira que a operação precedente tenha deixado, assim como eventuais carepas de corrosão;
- posicionamento dos novos varões, bem atados aos existentes e espaçados de tal forma a permitir cómoda betonagem, respeitando dobragem sob ângulos adequados e evitando ganchos;
- saturação, com água, da superfície de betão. A água é a melhor ponte de aderência entre materiais cimentosos;
- aplicação do novo betão, respeitando as mais adequadas condições de aplicação, lançamento e cura.



14.2. aumento da secção de betão

- aumento da capacidade resistente das peças (lajes, em especial) ao se aumentar a contribuição da parcela do betão (área comprimida):
 - picagem da superfície (controlo da rugosidade);
 - limpeza;
 - saturação da superfície;
 - betão fluido, razão $A/C < 0,35$, eventualmente com fibras;
 - chumbadouros metálicos, em quinquôncio, distribuídos ao longo da superfície a ligar;
 - espessura de betão ≥ 30 mm, para fazer algum peso e, conseqüentemente, uma pressão mobilizadora de um nível de aderência mais elevado.



4.3. colagem de chapas metálicas

- é uma metodologia adequada quando:
 - houver deficiência resistente nas armaduras existentes;
 - houver problema em modificar a geometria;
 - for possível controlar a conformidade dos materiais a empregar e das intervenções a realizar;
 - as acções cíclicas não forem muito importantes;
 - a qualidade do betão existente for compatível com o novo campo de tensões a ser implantado.
- implica:
 - ◆ em pequenas superfícies, apenas a aplicação prévia da resina sobre as duas interfaces a serem coladas;
 - ◆ na generalidade, injeção e selagem da periferia do contacto entre a chapa e o substrato.
- na grande maioria dos casos, as chapas devem ter espessura máxima de 5 a 6 mm. Mais do que isso acarretaria uma exagerada concentração de esforços e a perda do comportamento dúctil da secção. O Boletim 162 do CEB estabelece como 10 mm o limite máximo para a espessura destas chapas.



Vantagens e desvantagens:

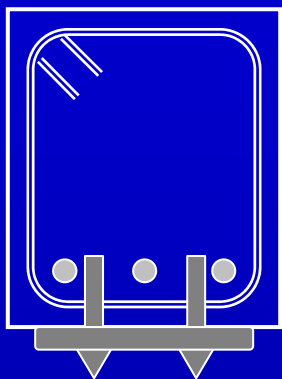
- não altera muito a geometria das peças;
- é pouco poluente;
- propicia uma razoável rapidez de execução, interferindo muito pouco com a normal utilização da estrutura ;
- dá-se um natural controlo da fissuração do betão existente, como resultado do próprio processo de injeção.
- exige, para garantia de bom desempenho, injeção do adesivo e colocação de chumbadores;
- exige excepcional preparação tanto da superfície em betão quanto da chapa metálica;
- solicita a camada de betão entre a armadura existente e o reforço a mobilizar elevadas tensões de corte;
- as peças metálicas são pesadas e não têm flexibilidade para se adaptar à geometria da peça de betão;
- é sensível à acção de altas temperaturas e de raios UV, dada a importância do papel do adesivo;
- apresenta problemas de fluência sob a acção de cargas permanentes;
- grande variação no desempenho do sistema mesmo face a pequenas deficiências de pormenor.



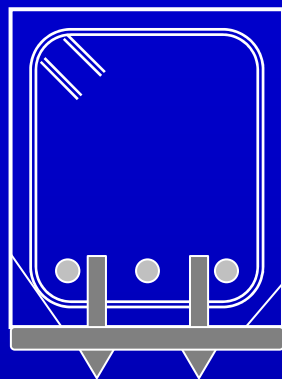
Metodologia de execução:

- avaliação da necessidade de se escorar e/ou macaquear (apoios provisórios?) a peça antes da execução dos trabalhos;
- picagem ligeiro da superfície, para remover a camada mais externa do betão, a jactos de areia ou a martelo de agulhas. A rugosidade a obter é bem mais suave que para as situações de reforços por adição de betão, por tratar-se de uma colagem pura e simples. A espessura da cola não deverá ultrapassar os 3 mm;
- furação prévia do substrato em betão, marcando os pontos para a posterior fixação dos chumbadouros;
- regularização da superfície pela aplicação manual de uma argamassa fina, não retráctil, pouco espessa e muito resistente;
- as chapas deverão ser metalizadas, galvanizadas ou pintadas para protecção contra a corrosão;
- decapagem abrasiva da face das chapas que irá ficar em contacto com a cola, a ser protegida por uma película adesiva, que só deverá ser removida no momento da aplicação;
- injeção com resina de viscosidade e "pot-life" controlados;
- o aperto dos chumbadores deverá ser dado antes e confirmado depois da injeção da resina;
- garantir protecção contra o fogo, por pintura ou pela aplicação de um revestimento em argamassa compacta.



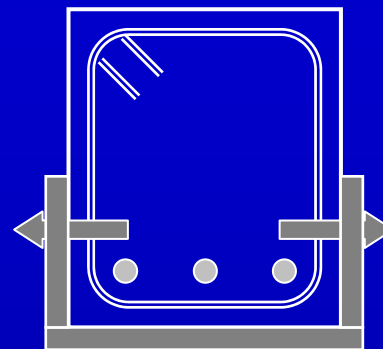


Ok!



fissuras nas arestas!

Não!



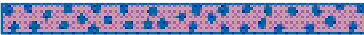
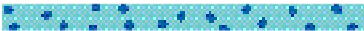




Ok!



4.4. colagem de FRPs

- é uma metodologia adequada quando:
 - houver deficiência resistente;
 - o aspecto estético for fundamental;
 - for possível controlar a conformidade dos materiais a empregar e das intervenções a realizar;
 - os prazos de execução forem curtos;
 - a questão de não haver poluição for fundamental;
 - a qualidade do betão existente for compatível com o novo campo de tensões a ser implantado.
- é uma técnica exclusiva para concretizar o aumento da taxa de armadura, implicando :
 - ◆ para reforços de vigas, quando o esforço adicional a introduzir é significativo, pela colagem de lâminas epóxicas de fibras de carbono pré-fabricadas, com módulo de elasticidade muito próximo ao do aço de construção;
 - ◆ para reforço em lajes, onde a força a resistir não será muito elevada, utilizar tecidos unidireccionais de fibras de carbono, a serem impregnados, no local, com resina epóxida. A utilização de mais do que três camadas superpostas não conduz a bons resultados.



CFRP	tecidos unidirecionais	tecidos bidirecionais	laminas
peso de fibras (g)	200 a 400	300 a 500	200 a 400
espessura de cálculo (mm)	0,11 a 0,23	0,27 a 0,45	1 a 1,4
espessura do plástico (mm)	0,35 a 0,65	0,90 a 1,60	1 a 1,4
proporção de fibras no plástico	25 a 40 % 	20 a 35 % 	60 a 70 % 
alinhamento das fibras			

Vantagens e desvantagens:

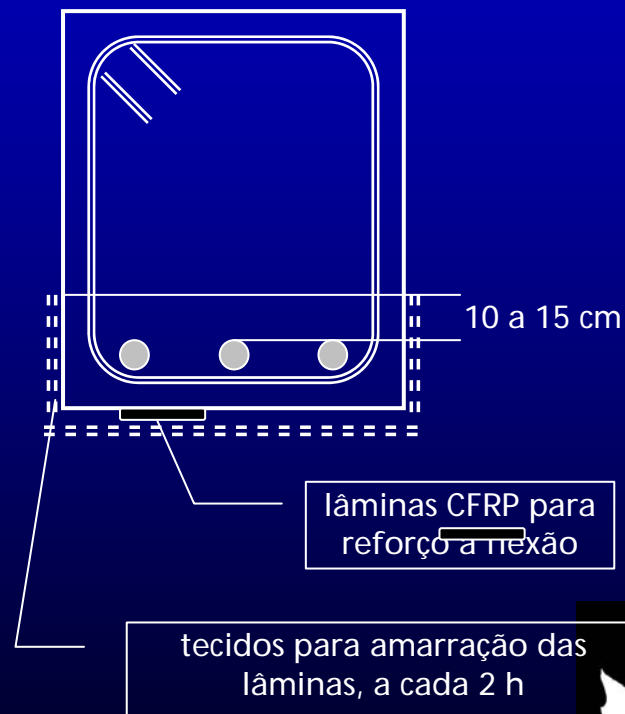
- não altera muito a geometria das peças;
- é pouco poluente;
- é de muito rápida execução, caso o suporte não seja muito irregular.
- são materiais ainda muito caros;
- exige excepcional preparação do substrato;
- solicita a camada de betão entre a armadura existente e o reforço com elevadas tensões de corte;
- os problemas sob a acção de altas temperaturas e de raios UV, pela importância do papel das resinas;
- grande variação no desempenho do sistema mesmo face a pequenas deficiências de pormenor.



Metodologia de execução para as lâminas:

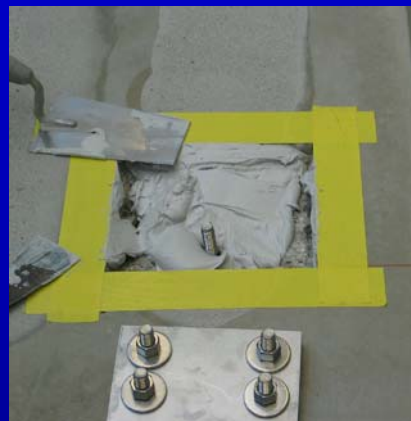
- avaliação da necessidade de se escorar e/ou macaquear (apoios provisórios?) a peça antes da execução dos trabalhos;
- conveniente preparação do substrato, que deverá estar são, sem fissuras nem delaminações, nivelado e regularizado;
- depois de removida a camada de betão não aderente, aplicar uma fina camada de regularização, à base de argamassa epóxida ("putty"), acabada à espátula;
- o controlo da regularidade da superfície deve ser feito através de uma régua com 2 m de comprimento, não se admitindo, em cada medição, desníveis superiores a 5 mm;
- humidade do substrato, na aplicação da lâmina, inferior a 4 %;
- lâminas limpas com solvente apropriado;
- limitar a espessura de adesivo a 2 mm;
- preparada e limpa a superfície, aplicar o primário epóxido (em uma demão, sem qualquer diluição) cuja função será não só a de melhorar, através da impregnação, as características do betão da superfície, mas também a de garantir a plena adesão da lâmina, devendo o betão garantir adequada resposta a uma tensão mínima de arrancamento ("pull - off") de 1,5 MPa;
- aplicação manual das lâminas, com uma leve pressão a rolo macio, para expulsar o adesivo em excesso.





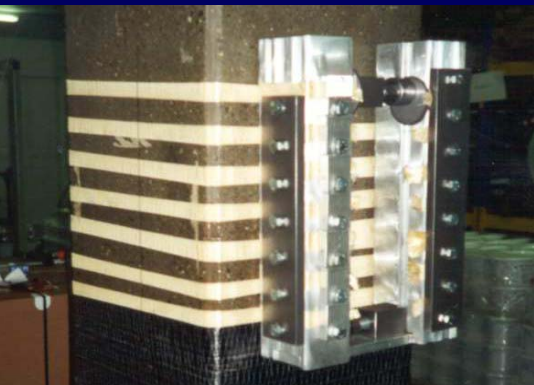
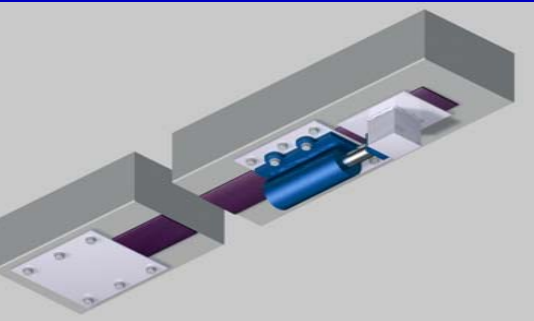
Novos sistemas de aplicação de lâminas:

- amarração exterior, em cunhas de alumínio, para que o material plástico possa trabalhar sob maiores deformações, sendo mais dúctil.



Novos sistemas de aplicação de lâminas:

- Pré-esforço exterior, com sistemas de amarração especiais, também para que o material plástico possa trabalhar sob maiores deformações e, ao introduzir compressões, ser ainda mais dúctil.



Metodologia de execução para os tecidos:

- preparação do substrato, com a remoção da leitada superficial do betão, com uma esmeriladora;
- arredondamento das arestas das vigas, raio mínimo de 15 mm;
- limpeza da superfície a jactos de água e ar;
- impregnação com primário epóxico que resista a uma tensão pull-off mínima de 1 MPa;
- reparação dos defeitos geométricos ou de execução da superfície a ser revestida (cuja irregularidade não deve superar a 2mm/1m), a ser executada pela aplicação de uma fina camada de regularização, à base de argamassa epóxida ("putty"), acabada à espátula;
- até um máximo de 24 h após o primário, aplicar a resina de colagem, à pincel;
- os tecidos são então desenrolados e cortados, com uma vulgar tesoura, à rigorosa medida do reforço a ser executado;
- aplicação manual, retirando-se, depois do correcto posicionamento, o plástico protector;
- aplicação da resina de impregnação;
- acabamento final com revestimentos de alto desempenho que, em simultâneo, confirmam ao sistema um melhor comportamento na resistência a acção do fogo e aos raios UV.

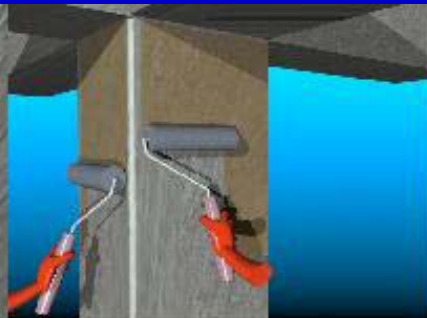




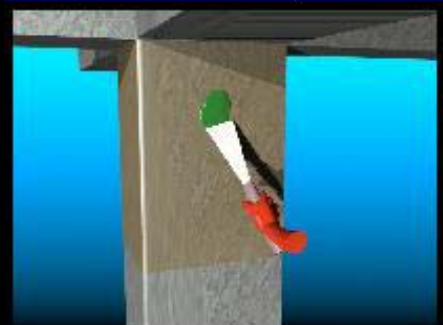
Esmerilagem da superfície



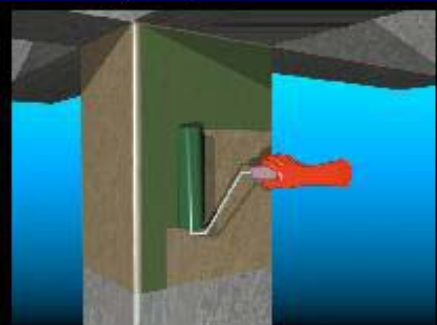
Preparação das arestas



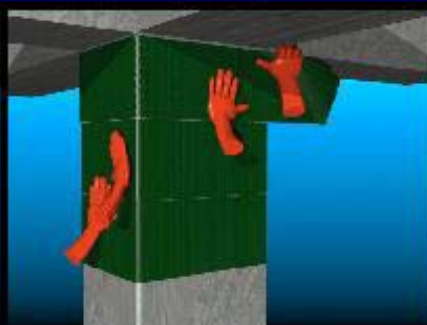
Aplicação do primer



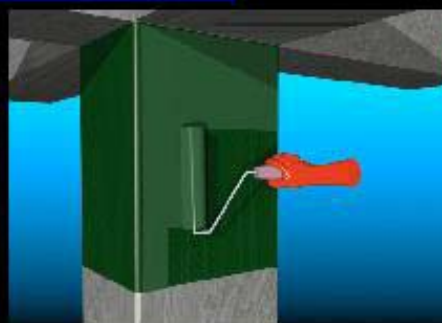
Regularização da superfície com argamassa



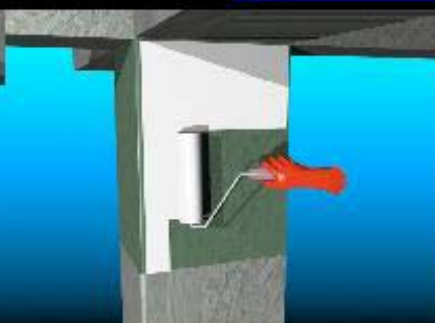
Resina de colagem (undercoating)



Aplicação das folhas de fibras de carbono



Resina de impregnação (overcoating)



Aplicação de revestimento de alto desempenho



14.5. pré-esforço exterior

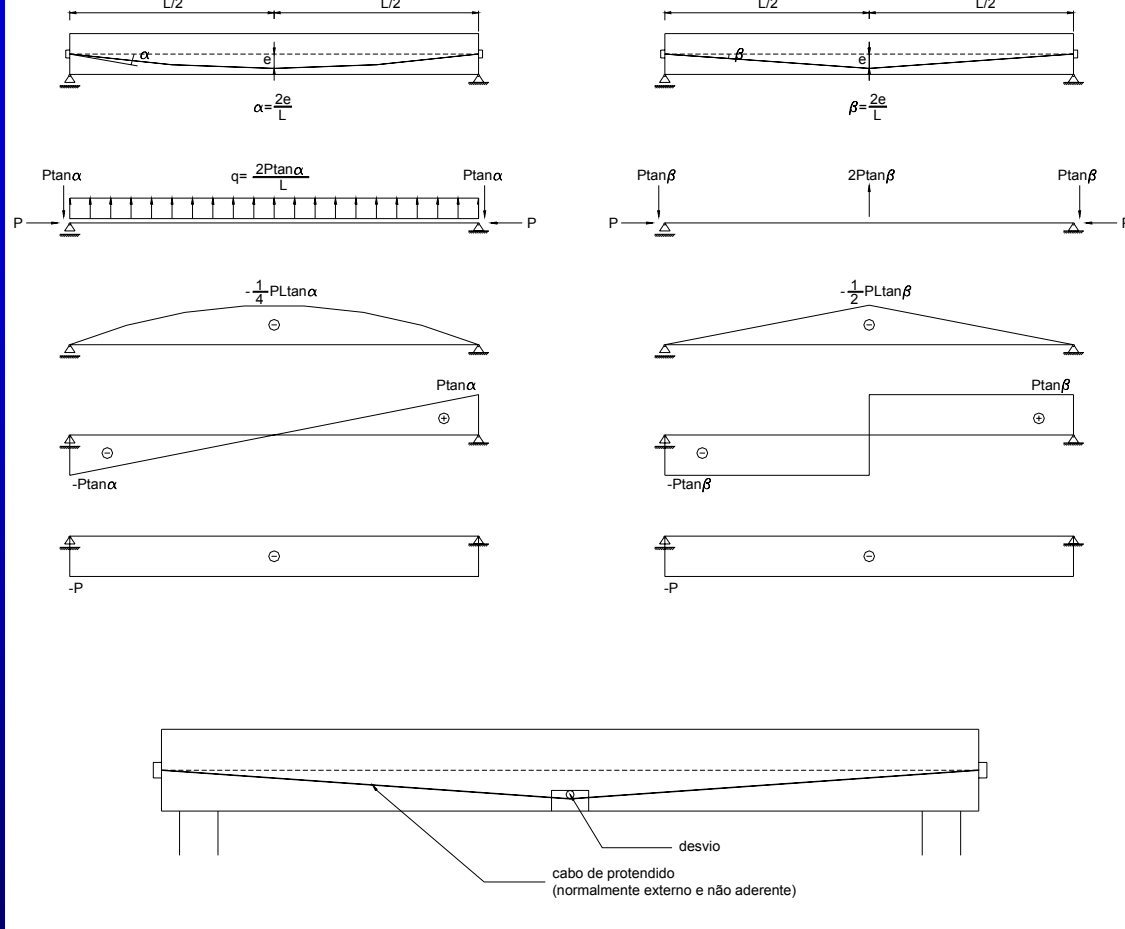
Esta é a técnica que, por excelência, caracteriza a situação de reforço activo, pelo que, via de regra, conduz aos melhores resultados, por alterar o campo de tensões instalado no betão, ao introduzir pressões de compressão, sendo capaz de controlar, em simultâneo, resistência, deformação e fissuração.

No entanto, muitas vezes existem limitações físicas à introdução desta técnica, em especial em trabalhos a realizar no interior de edifícios. É também uma metodologia que pode implicar custos elevados.

A introdução de pré-esforço como elemento de reforço (pós-tensão) pretenderá, em geral, contrariar uma carga actuante (cargas permanentes ou novas sobrecargas), ou uma deformação, ou reduzir níveis de tensão nas armaduras (para controlar a fissuração, por exemplo) ou ainda implantar um novo estado de tensões, pela adição de um campo de compressão constante. Assim sendo, será sempre interessante, para efeito de se tirar o máximo partido do reforço, considerar, tanto para a verificação de tensões como para o dimensionamento à rotura, a pós-tensão como uma acção sobre a secção de betão armado existente.

Para a concretização destes objectivos são normalmente utilizados cabos exteriores à estrutura, não aderentes, sendo a força equivalente introduzida através de uma peça acessória, de desvio, especialmente concebida para o efeito. Em alguns casos, haverá que cuidar das questões relacionadas com o bambeamento dos cabos, o que pode ser conseguido pela introdução de múltiplos desviadores.

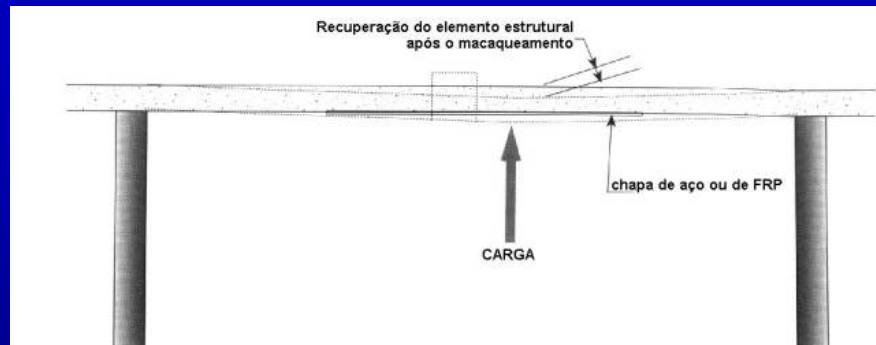




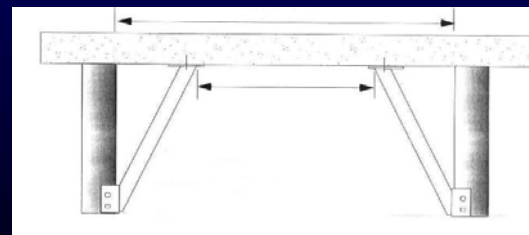
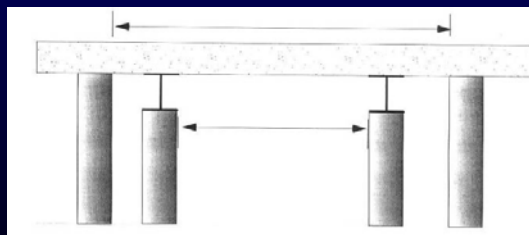
Em termos de dimensionamento, haverá que controlar os níveis de compressão que passarão a estar instalados no betão, com a introdução da pré-esforço, do comportamento da secção à rotura, das tensões nas regiões de amarração e do aparecimento de esforços adicionais se os elementos a reforçar (ou os adjacentes a estes) forem hiperstáticos.

14.6. outras situações

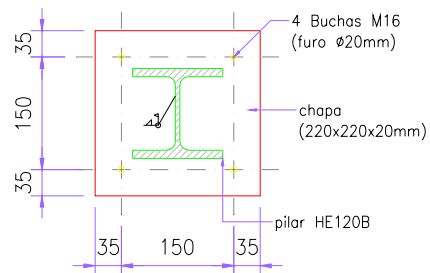
São situações em que o reforço poderá ser executado pela introdução de novos elementos, que assumam a nova carga a ser instalada na estrutura ou uma parcela da carga existente, casos em que, necessariamente, precisariam ser activados por macaqueamento.



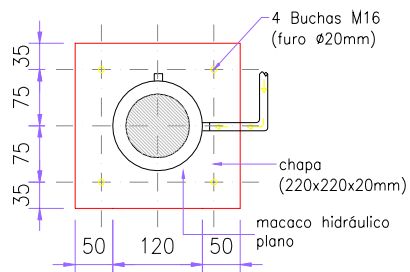
Incluem-se, neste caso, a adição de perfis metálicos ou de novas vigas de betão armado, pré-fabricadas ou moldadas "in situ", e ainda a redução de vãos, pela introdução de pilares (escoras permanentes) intermédias. É importante atentar para o fato de que se estará a alterar todo o sistema estrutural existente, o que implica re-calcular, criteriosamente, a estrutura.



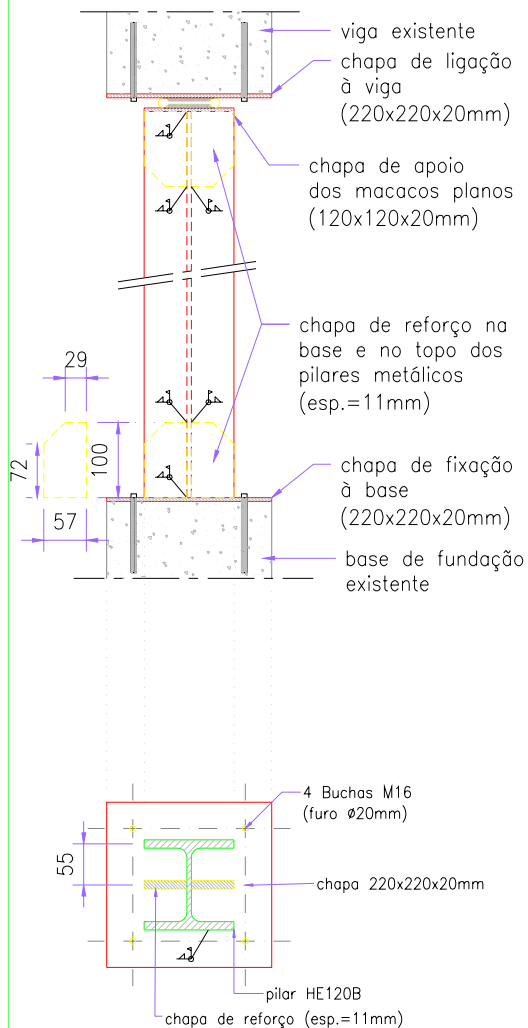
Fixação do Perfil CHAPA na BASE



Fixação do Perfil

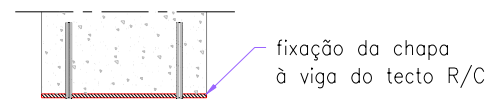


Fixação do Perfil ELEVAÇÃO TIPO

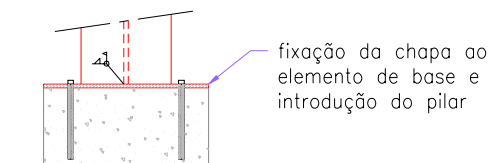


Processo Execução

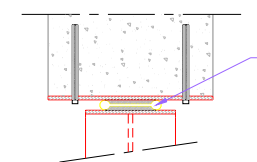
1)



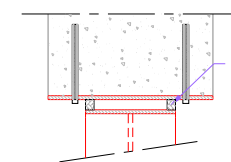
2)



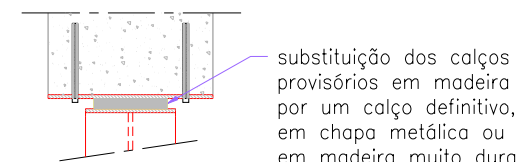
3)

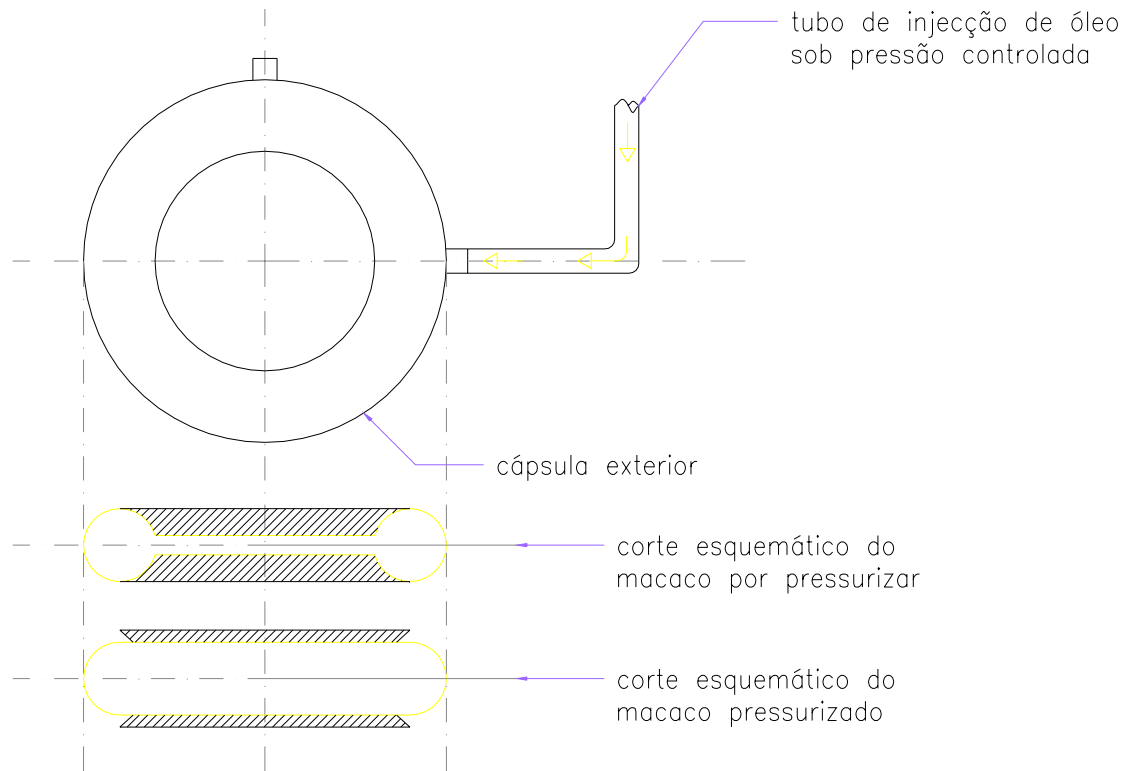


4)

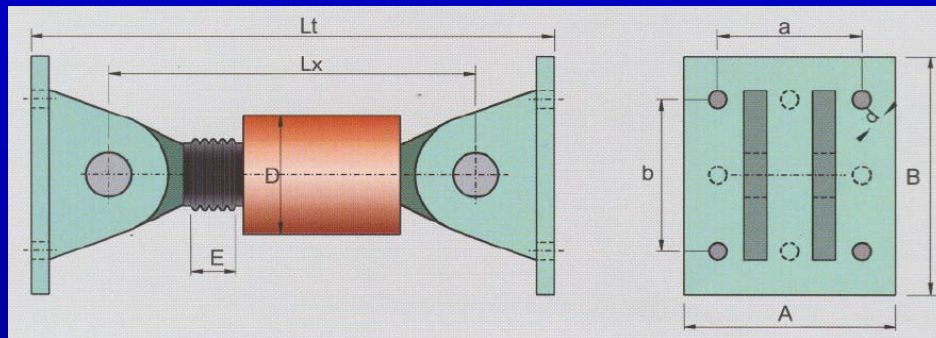
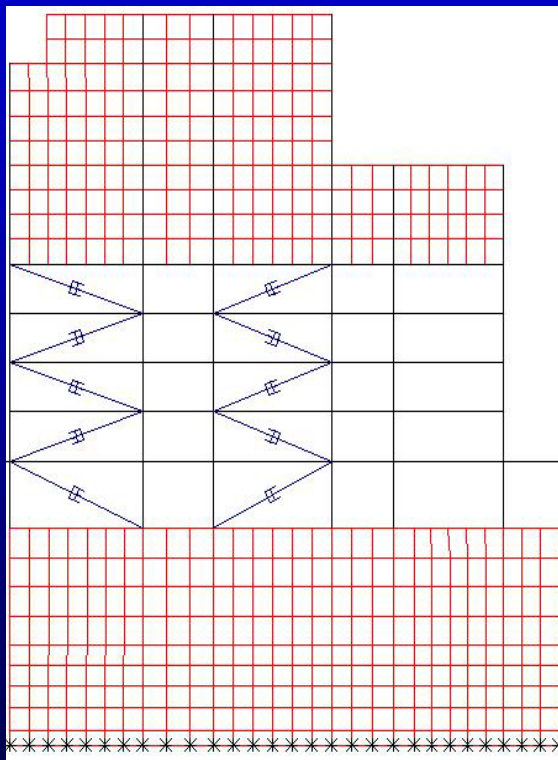


5)





Outra situação específica de reforço é a que se destina a melhoria da resposta sísmica, pela introdução de dissipadores de energia ou de novos elementos de betão.



15. REFORÇOS à FLEXÃO: DIMENSIONAMENTO

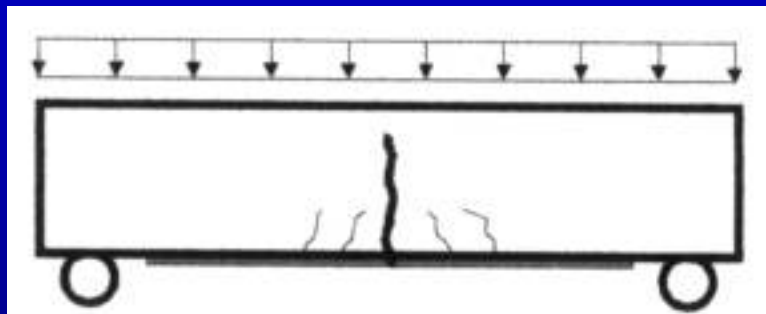
15.1. conceitos básicos

- ter presente a parcela das acções pela qual se irá responsabilizar o elemento de reforço;
- verificação do comportamento ao esforço transversal, para garantir a hipótese de rotura à flexão;
- dimensionamento à rotura, com verificação do comportamento em serviço:
 - eixo neutro que garanta comportamento dúctil ($\leq 35\%$);
 - selecção do modo de rotura pretendido, sendo mais adequado prevenir ruínas prematuras, o que requer a adopção de modelos clássicos de dimensionamento para o betão armado (treliça de Morsch, em especial) e exige a introdução de sistemas mecânicos que garantam amarração efectiva e suspensão dos reforços;
 - limitação das extensões de rotura para o reforço, em função das características próprias de cada material;
 - controlo das extensões da armadura original, em especial quando se está a reforçar com FRPs. Neste caso, como a inércia do elemento de reforço é pequena, as armaduras existentes passam a ser muito mais solicitadas.

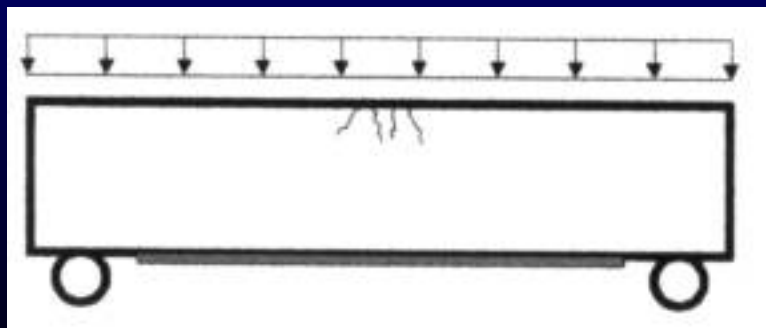


15.2. modos de rotura

- alongamento da armadura
 - peça a trabalhar como sub - armada, comportamento dúctil, maior capacidade para redistribuição de esforços.

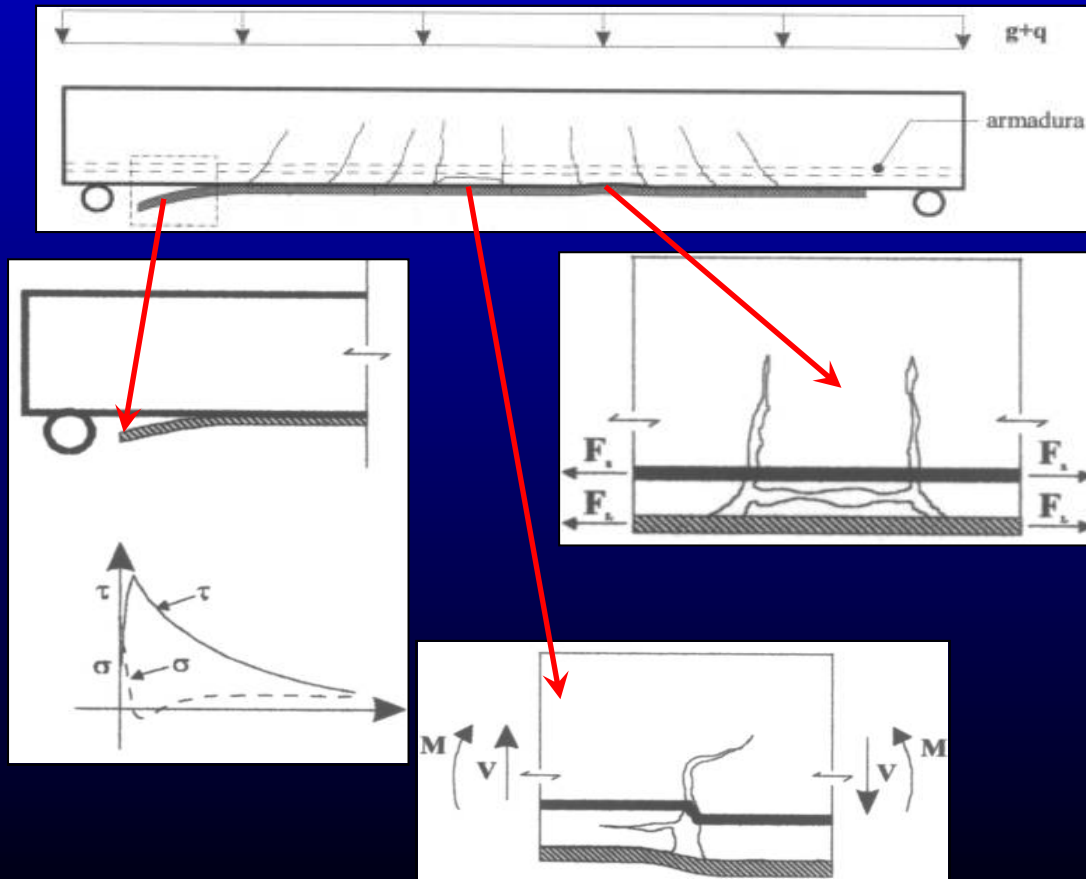


- esmagamento do betão
 - comportamento mais frágil, porque o esgotamento do betão não dá chance a se tirar partido da capacidade de deformação plástica (aço) ou elástica (FRPs).

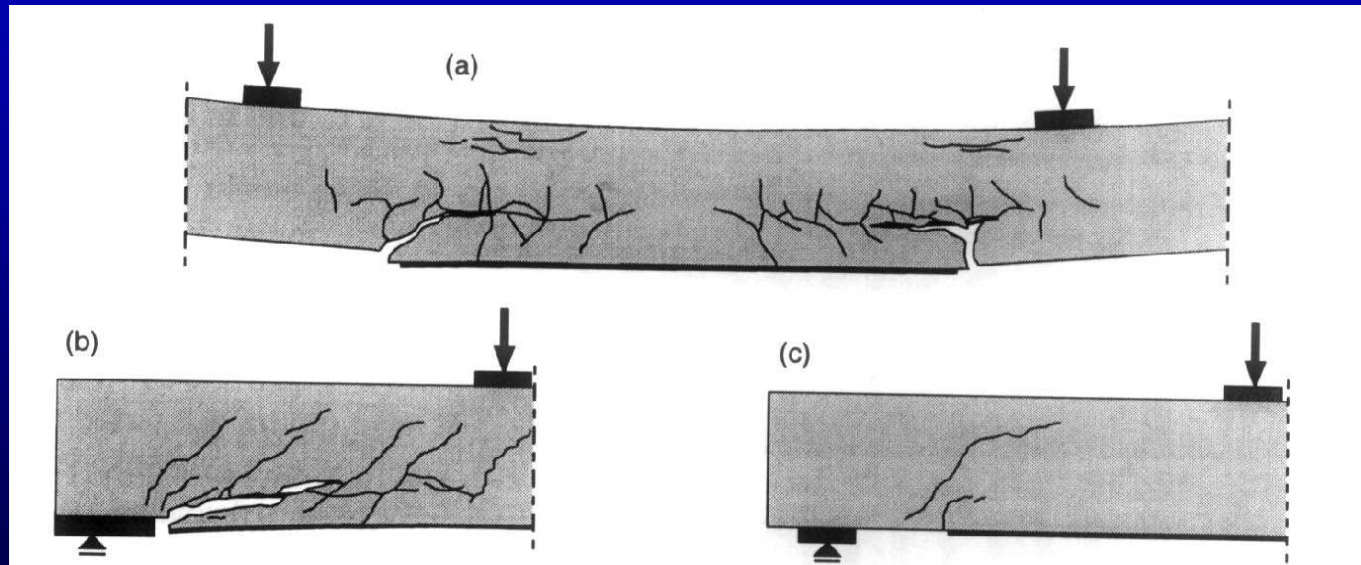


• ruínas prematuras

- o destacamento do elemento de reforço por tracção / esforço transversal no betão da interface ou no adesivo dá-se principalmente em consequência da incapacidade do sistema (betão + adesivo) em transmitir os esforços entre a armadura existente e o elemento de reforço).

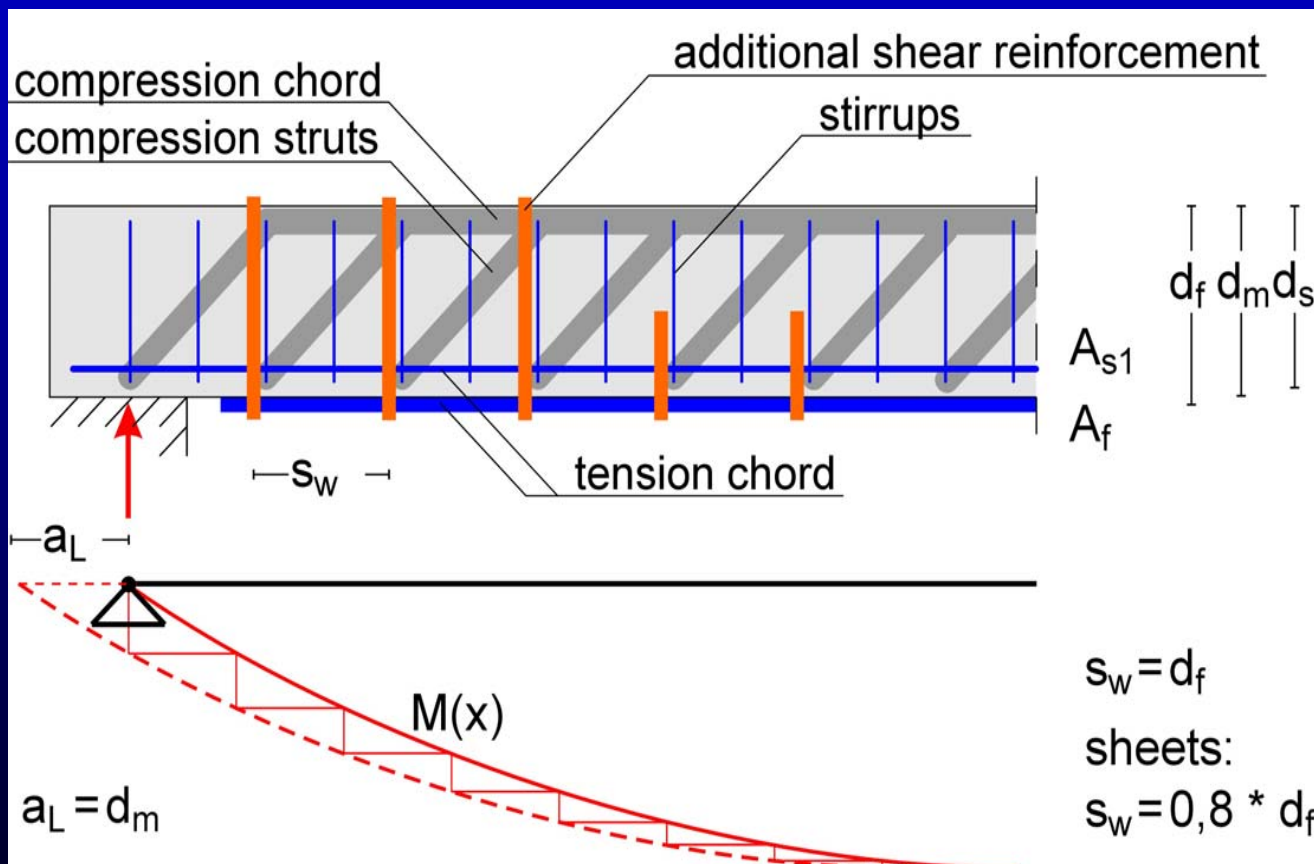


- é muito importante que a extensão (comprimento) do reforço seja tal que se garanta a amarração em zona comprimida

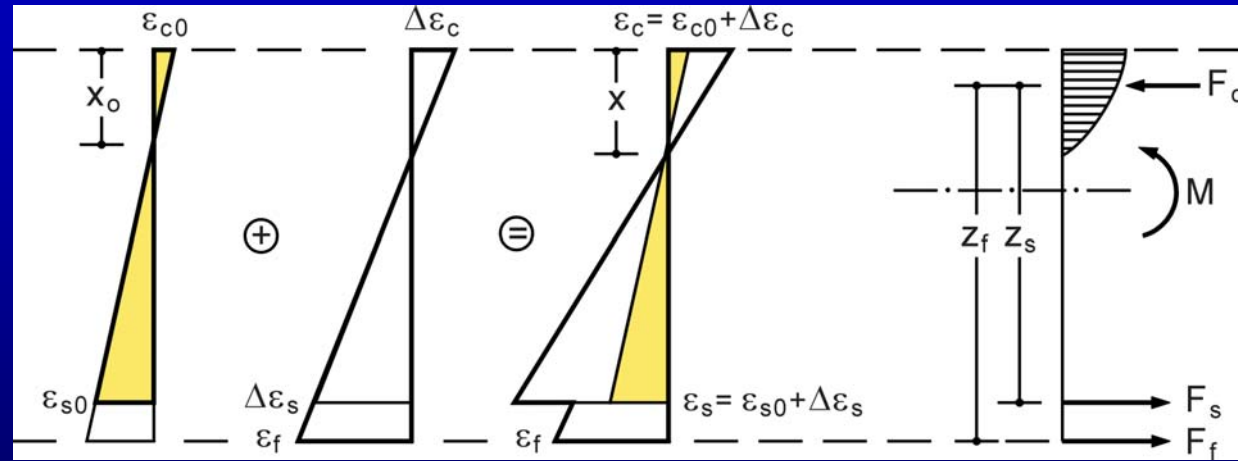
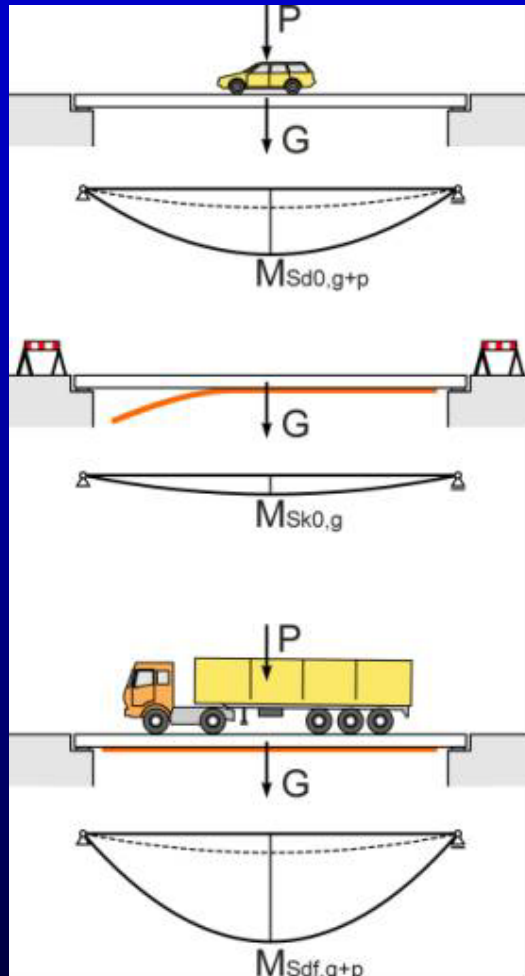


15.3. selecção do modelo para dimensionamento

- a treliça de Morsch modificada é um modelo clássico e, portanto, confortável e seguro. O sua utilização exige a introdução de sistemas mecânicos que garantam amarração efectiva e suspensão dos reforços.



15.4. Sistemas de Equilíbrio



15.5. Recomendações

- utilizar, principalmente nos casos de eixos neutros muito altos, em que o encurtamento do betão for inferior a 2‰, o diagrama parábola - rectângulo para o betão;
- controlar as tensões de corte na interface entre os materiais, limitando-as, em qualquer caso, a :

$$\tau_{sd} = \frac{1}{\gamma_c} \times \frac{2}{3} f_{ctm} \leq 2 \text{MPa}$$

- adoptar, como tensão de cálculo dos FRPs:

$$\sigma_{ref,u} = \epsilon_{ref,u} \times \frac{E_{ref}}{\gamma_{ref}}$$

- limitar, para plásticos armados com fibras de carbono, o alongamento na rotura a:

- ◆ $\epsilon_{ref,u} = 6,5 \text{‰}$ (lâminas com $G = 200 \text{ GPa}$);
- ◆ $\epsilon_{ref,u} = 8,0 \text{‰}$ (lâminas com $G = 150 \text{ GPa}$);
- ◆ $\epsilon_{ref,u} = 6,0 \text{‰}$ (para os tecidos unidireccionais).



16. REFORÇOS ao CORTE: DIMENSIONAMENTO

16.1. conceitos básicos

- o reforço ao corte deverá sempre ser executado através da disposição de tecidos unidireccionais na direcção transversal, admitindo-se, desde que seja conveniente, inclinar as tiras em relação à horizontal;
- a deformação última dos plásticos estará limitada pela consideração da deformação limite dos estribos existentes ($\varepsilon = 2$ a 3 ‰), condicionada pela do betão, por forma a poder-se desenvolver o cálculo segundo o modelo de treliça modificado;
- o cálculo deverá ser feito, à semelhança do que acontece para os reforços por adição de chapas metálicas, pela consideração da contribuição resistente das parcelas do betão, dos estribos e do reforço :

$$V_{sd} = V_{cd} + V_{wd} + \gamma_m V_{fd}$$

- é fundamental garantir a adequada amarração das tiras de tecido na região de compressão da secção. Quando esta estiver na laje, haverá que recorrer a peças metálicas complementares ou ao embebimento das extremidades dos tecidos em meio epóxico.



16.2. recomendações

$$V_{rd2} \begin{cases} 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \cdot b_w \cdot d & \left(\begin{array}{l} \theta = 45^\circ \\ \alpha = 90^\circ \end{array} \right) \\ 0,54 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2 \theta (\text{cotg} \alpha + \text{cotg} \theta) \end{cases}$$

$$V_{cd} = 0,6 f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk \text{ inf}}}{\gamma_c} = 0,21 \frac{f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c}$$

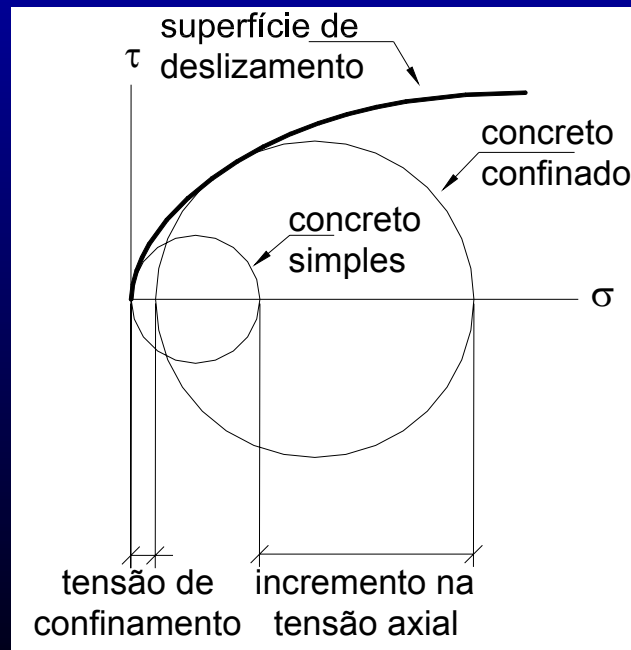
$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$$

$$V_{fd} = 2 \cdot \frac{A_{sf}}{s_f} \cdot E_{fd} \cdot \mathcal{E}_f$$

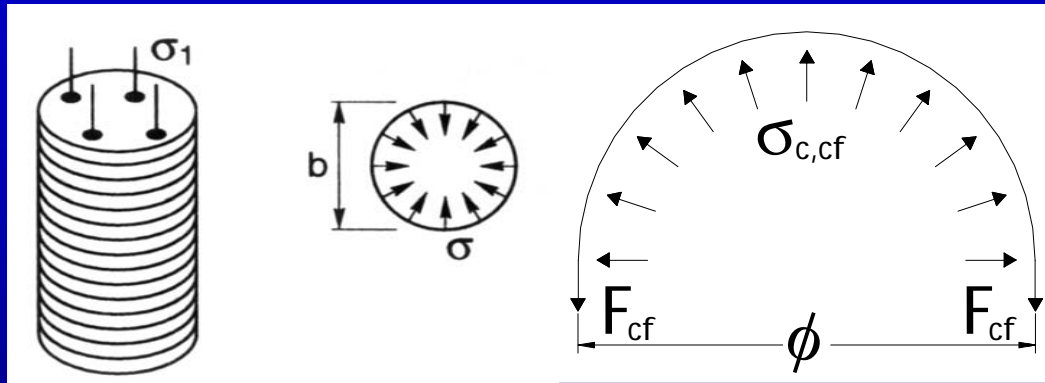
17. REFORÇOS de PILARES: CINTAMENTO

17.1. conceitos básicos

- com o cintamento pretende-se aumentar a capacidade de carga de um pilar através do incremento da resposta parcelar conferida pelo betão, quando confinado, ou melhorar o seu coeficiente de ductilidade, quanto aos deslocamentos horizontais;
- observe-se o círculo de Mohr para as situações de betão simples e confinado e constate-se como mesmo uma pequena tensão de confinamento resulta num acentuado acréscimo de tensão axial:



17.2. pormenores



$$\sigma_{c,cf} = f_{ck} + \Delta\sigma_c$$

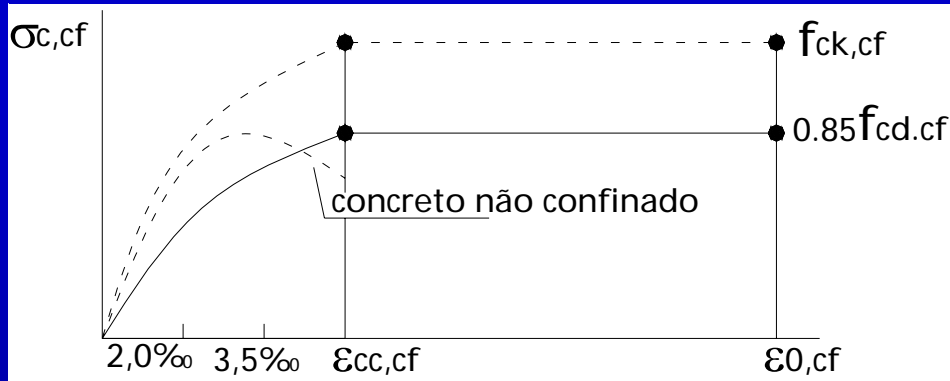
$$F_{cf} = \sigma_{c,cf} \times \frac{\phi}{2}$$

Para $\gamma = 0,25$, por equilíbrio:

$$\mu\Delta\sigma_c = \sigma_s$$

$$\Delta\sigma_c = 4 \times \sigma_s$$

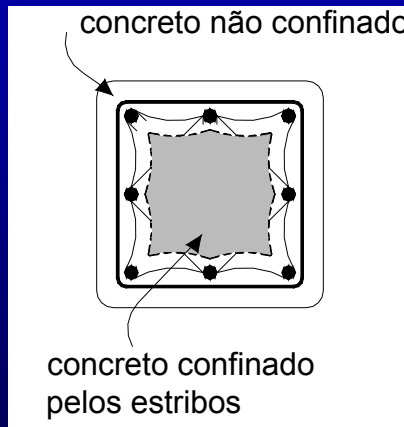
betão modificado pela acção do confinamento (MC-90):



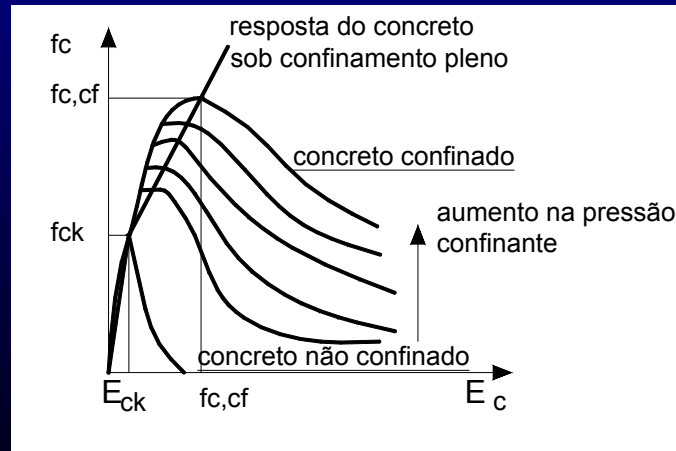
Equação geral:

$$f_{c,cf} = f_{ck} + k\sigma_{s,cf}$$

k depende do nível de confinamento.



Quanto mais intenso –
contínuo, pleno – for o
confinamento, melhor a
resposta do betão.



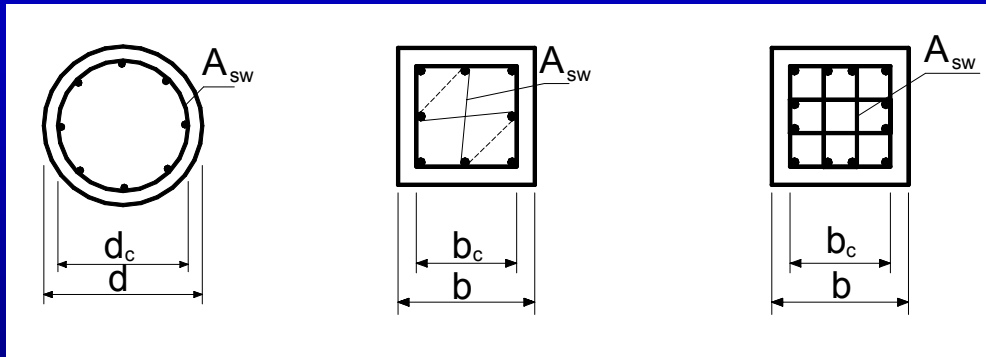
O código Modelo 90 das seguintes expressões:

$$\frac{f_{c,cf}}{f_{ck}} = 1 + 5 \frac{\sigma_{s,cf}}{f_{ck}} \quad \text{se} \quad \sigma_{s,cf} < \frac{f_{ck}}{20} \quad ; \quad \frac{f_{c,cf}}{f_{ck}} = 1,125 + 2,5 \frac{\sigma_{s,cf}}{f_{ck}} \quad \text{se} \quad \sigma_{s,cf} > \frac{f_{ck}}{20}$$

$$\frac{\sigma_{s,cf}}{f_{cf}} = 0,5 \alpha \omega_{\omega}$$

$$\alpha = \left(1 - \frac{nb_1^2}{6b_0^2} \right) \left(1 - \frac{s}{2b_0} \right)^2$$

$$\omega_{\omega} = \frac{W_{cf}}{W_{c,cf}} \times \frac{f_{cf,d}}{f_{cd}}$$



$$\omega_{\omega} = \frac{4A_{sw}}{d_c s} \times \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$\omega_{\omega} = \frac{4 \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} A_{sw} \right)}{b_c s} \times \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

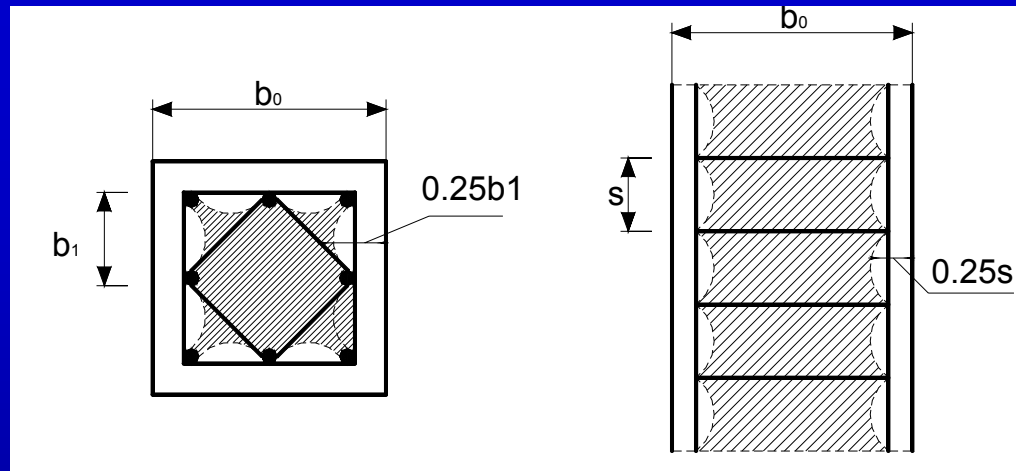
$$\omega_{\omega} = \frac{9A_{sw}}{d_c s} \times \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$W_{c,cf}$ é o volume de betão confinado, por metro;

n é o número de varões longitudinais do pilar que efectivamente ajudam no confinamento;

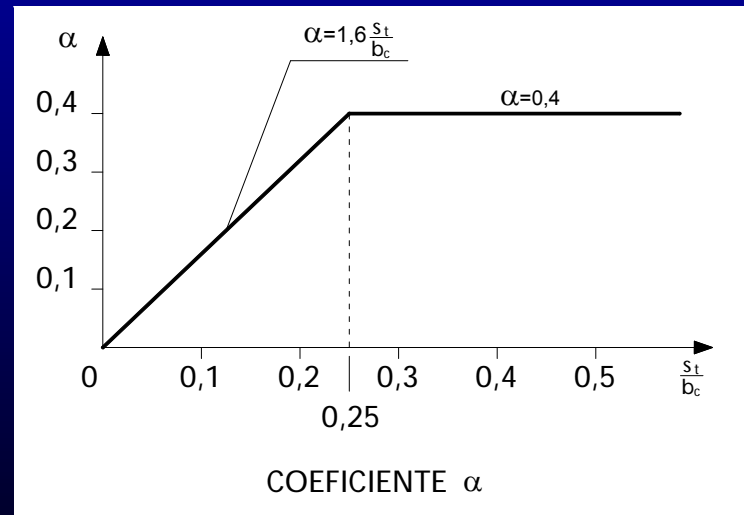
d_c e/ou b_c definem a dimensão do núcleo, a partir do perímetro da secção medido pelo eixo dos estribos;

s é o espaçamento entre estribos, assumido como $\leq 0,5, b_0$ ou 20 cm.



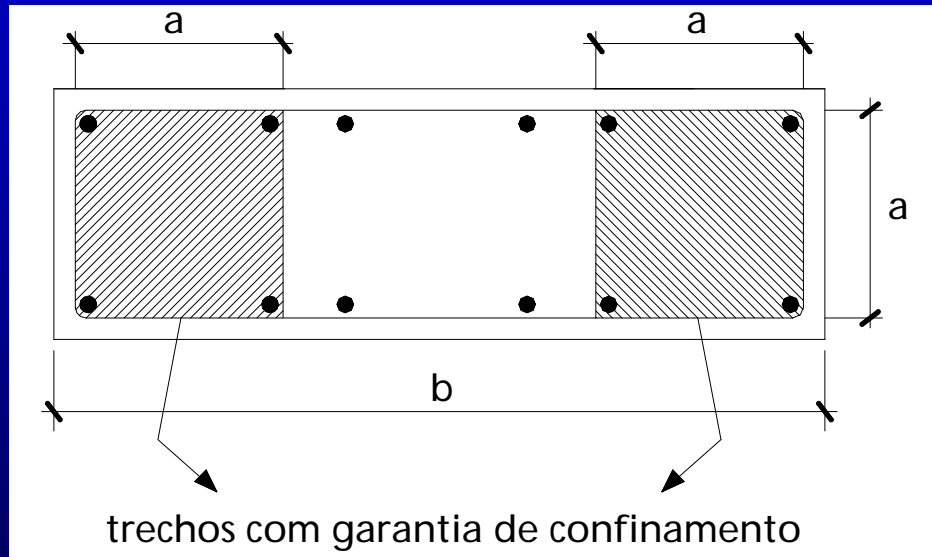
Relação entre as tensões de betão confinado e livre, segundo o regulamento espanhol EHE – 98.

$$\frac{f_{c,cf}}{f_{ck}} = 1 + 1,6\alpha, \quad \omega$$



equação de dimensionamento à compressão simples:

$$\gamma_F \times N = \gamma_n \times \gamma_R \left(\frac{0,85 A'_c f_{c,cf}}{\gamma'_c} + A'_s \frac{f_{yk}}{\gamma'_s} \right)$$



18. CRITÉRIOS para a APRESENTAÇÃO dos PROJECTOS

Informação

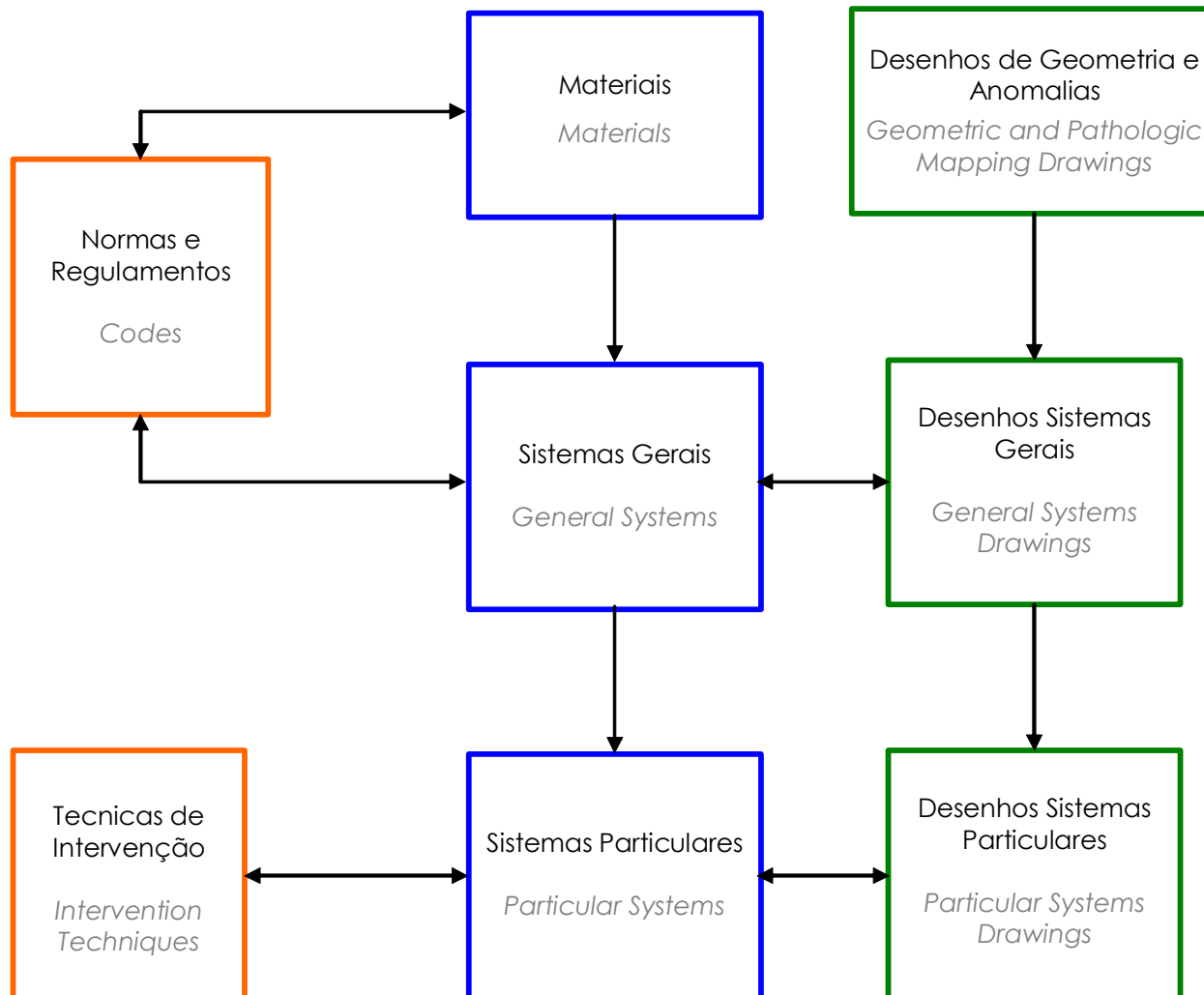
Information

Peças Escritas
Caderno de Encargos

*Texts and
Specifications*

Peças Desenhadas

Drawings

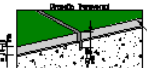


Seqüência de Aplicação

1) Preparação da Superfície Receptora

1.1) Corte da Superfície

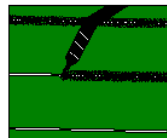
Remoção do reboco, de 3 mm de espessura, com lâmina de corte especial.
Remoção posterior das fibras de corte com lâmina de corte no ângulo.



3mm de reboco

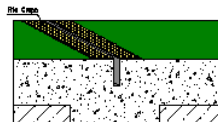
1.2) Limpeza da Superfície

Limpeza com pára e aspirador de pó para remoção de pó.



1.3) Aplicação da Fita Crua como Elemento Galvanizador

Colagem da fita nos lados do reboco.



2) Aplicação dos Laminados

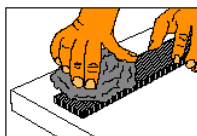
2.1) Corte da Laminado

Estabelecimento da largura para as direções definidas no Projeto, através da medição da esp. com o "baldão" de apoio para as bordas.



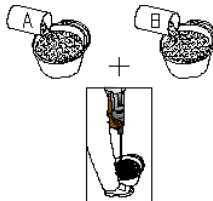
2.2) Limpeza do Laminado

Limpeza com pano úmido impregnado com resina epoxídica.



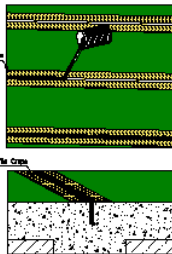
2.3) Preparação do Adesivo

Mistura das duas resinas, em proporção previamente definida.



2.4) Aplicação do Adesivo na Superfície

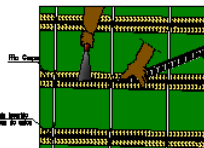
Preenchimento da faixa de aderência por pontos.



1-DIREÇÃO TRANSVERSAL

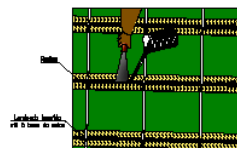
2.5) Aplicação do Laminado na Direção Transversal

Laminado aplicado manualmente, pressionando-se contra a superfície com o rolo e com uma espátula para ajustar o laminado e alisar o fundo do reboco.



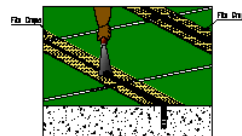
2.6) Galvanismo do Substrato à Superfície

Preenchimento do reboco até à superfície com uma massa feita do mesmo tipo que a massa para o reboco e impregnada das fibras, distribuída de uma espátula.
Deixar curar de acordo com o tempo (de 1 hora a 1 hora 30).

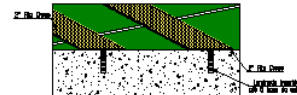


2.7) Limpeza Final da Superfície

Remoção do excesso com espátula e limpeza com água e limão.



Aplicação da fita seca para obter a superfície do laminado.



2-DIREÇÃO LONGITUDINAL

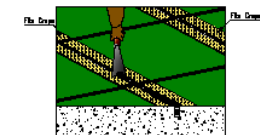
2.8) Aplicação do Laminado na Direção Longitudinal

Laminado aplicado manualmente, pressionando-se contra a superfície com o rolo e com uma massa de base quente (de acordo com o fabricante), até atingir o fundo do reboco.

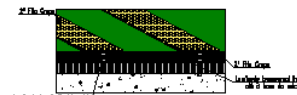


2.9) Limpeza Final da Superfície

Remoção do excesso com espátula e limpeza com água e limão.



Aplicação da fita seca para obter a superfície do laminado.



3) Cruzamento dos Laminados

Trabalho em ângulo longitudinal



RESINA (EPOXI)

- Adesão ao concreto > 2,5 MPa
- Resistência à tração < 0,1%
- Resistência à compressão, < 40 MPa
- Resistência ao corte, < 2 a 3 MPa
- Módulo de Elasticidade (Modulo) > 2 GPa

LAMINADO (CFRP)

- Resistência à tração > 2,5 MPa
- Alongamento à ruptura > 1,5%
- Módulo de Elasticidade (Modulo) > 130 GPa

<p>Projeto: []</p> <p>Execução: []</p> <p>Revisão: []</p> <p>Assinatura: []</p> <p>Data: []</p>		<p>08</p> <p>Projeto: []</p> <p>Execução: []</p> <p>Revisão: []</p> <p>Assinatura: []</p> <p>Data: []</p>
<p>Projeto: []</p> <p>Execução: []</p> <p>Revisão: []</p> <p>Assinatura: []</p> <p>Data: []</p>		<p>Projeto: []</p> <p>Execução: []</p> <p>Revisão: []</p> <p>Assinatura: []</p> <p>Data: []</p>