

Influência da Temperatura no Comportamento de Elementos de Betão Armado Reforçados à Flexão com Laminados de CFRP

Nelson L. F. Vaz^{1,†}, José L. B. Aguiar², Aires Camões³
*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

A necessidade de reabilitação estrutural de elementos de betão armado tem-se revelado cada vez mais frequente. O reforço por adição de armaduras exteriores através da aplicação de compósitos de fibra de carbono é, actualmente, a técnica de utilização mais generalizada e com maior potencial. Em muitos casos, a aplicação de compósitos pode significar um meio de aumentar a vida útil de uma estrutura que possivelmente não poderia ser reforçada utilizando materiais convencionais. A possibilidade de se proceder à operação de reforço em períodos de tempo muito curtos, sem que seja necessário interromper, completamente, a utilização da estrutura, apresenta-se como uma das maiores vantagens associadas ao reforço de elementos de betão armado com materiais compósitos. A união entre o reforço e o suporte, geralmente, é realizada com colas de base epoxídica. Contudo, é nesta parte do sistema que a integridade do reforço pode ser afectada. Entre vários factores, destaca-se a exposição a temperaturas elevadas que pode influenciar a eficácia da colagem. Nesta comunicação, apresenta-se um estudo experimental, cujos resultados evidenciam que a resistência térmica deste tipo de sistema de reforço não é muito elevada.

1. INTRODUÇÃO

Durante o período de vida útil para que as estruturas de betão armado são dimensionadas, devem apresentar níveis adequados de segurança, de funcionalidade e de durabilidade. No entanto, inúmeras situações não previstas inicialmente, ao nível do projecto, da construção ou da utilização, podem comprometer o cumprimento de algumas dessas exigências.

O envelhecimento e a degradação das estruturas de betão podem ser considerados como um processo natural e inevitável. No decurso da sua vida útil, os materiais empregues na construção interagem com o meio ambiente, constituído, entre outros, por agentes agressivos que apresentam variados níveis de agressividade. A temperatura pode ser considerada como uma das acções agressivas associadas ao meio ambiente.

Assim, é de particular relevância avaliar qual o efeito da temperatura nos sistemas de reforço estrutural de elementos de betão armado com laminados de CFRP, nomeadamente na cola epoxídica que tem que garantir a eficácia do funcionamento deste tipo de armadura

¹ Eng.º Civil, Aluno de Mestrado.

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (Nelson_vaz@civil.uminho.pt)

² Professor Associado, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães.

³ Professor Auxiliar, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães.

exterior, através da transferência de tensões entre o suporte e o material de reforço, que é fundamental para o bom funcionamento do sistema.

Neste contexto, com o objectivo de avaliar a influência da temperatura no comportamento de reforços externos de elementos de betão armado, estabeleceu-se um programa de ensaios laboratoriais, cujos resultados permitiram uma avaliação comparativa. Foram ensaiados à flexão provetes de betão armado reforçado com CFRP após terem sido submetidos a quatro diferentes ciclos de exposição térmica (temperatura máxima de 20°C, 40°C, 60°C e 80°C). Os resultados são apresentados e analisados.

2. ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

No decorrer do século XX, o betão tornou-se num dos materiais mais utilizados pelo Homem, apenas suplantado pela água. As potencialidades deste material evidenciaram-se com maior ênfase após a 2ª Guerra Mundial, generalizando-se a sua utilização e permitindo a construção de estruturas arrojadas e bastante esbeltas. Para este facto, contribuíram diversos factores como: resistência à compressão suficiente, facilidade de aplicação, possibilidade de se moldar e o baixo custo. A sua aplicação encontra-se generalizada um pouco por toda a parte, na construção de edifícios, pontes, viadutos, barragens, pavimentos de estradas, túneis ou canais.

Em tempos pensou-se que o betão era eterno e que as armaduras se encontravam devidamente protegidas pela camada de betão de recobrimento. Contudo, a experiência veio demonstrar o contrário, evidenciando que as estruturas de betão armado se degradam.

Inicialmente, os aspectos relacionados com a durabilidade das construções não eram devidamente considerados. Como resultado, as construções em betão encontram-se, muitas delas, degradadas, carecendo de trabalhos de reparação. Mesmo algumas mais recentes, justificam, também, intervenções nesse sentido.

Podem ser apontadas várias razões para que uma estrutura de betão armado necessite de ser reabilitada ou reforçada:

- Deterioração dos materiais, associada à idade avançada da construção;
- Corrosão das armaduras, resultado da penetração de iões cloreto;
- Ataque do betão por carbonatação ou sulfatos;
- Exposição a acções acidentais, podendo-se destacar sismos, incêndios, explosões, vandalismo ou cheias;
- Equívocos no planeamento, no projecto ou na execução;
- Utilização de materiais de qualidade deficiente;
- Agravamentos no valor da carga actuante por modificação da utilização da construção ou dos regulamentos.

3. REABILITAÇÃO E REFORÇO

As estruturas de betão armado são projectadas para um determinado período de vida útil, durante o qual devem apresentar níveis de segurança, funcionalidade e durabilidade adequados. Porém, mais vezes do que o desejado, tal não se verifica. O aumento do estado de deterioração das estruturas é, na maior parte das vezes, resultado da perda de capacidade de resposta às acções para que foram dimensionadas. Por conseguinte, de alguns anos a esta parte e em todo o mundo, a posição de um engenheiro civil relativamente às estruturas foi renovada.

À medida que certos tipos de avarias se tornaram mais frequentes, mais propostas de soluções foram despontando, fazendo-se acompanhar de um crescimento gradual da actividade de reparação das construções.

Os trabalhos de reparação requerem, antes que se projecte ou execute, uma observação e análise cuidada das causas das anomalias e do grau de afectação na construção. Essa tarefa, hoje em dia, está mais facilitada. Os recursos aumentaram e existe a possibilidade de se realizar ensaios *in situ* e em laboratório com mais fiabilidade e rapidez, a oportunidade de se observar locais que sem o auxílio de instrumentos há uns anos seria impossível e registar, em suporte digital, as observações.

As estruturas de betão armado, perante uma manutenção adequada e regular, assim como reabilitações ocasionais mais profundas, contribuem decisivamente para a poupança de recursos naturais e de energia e para a preservação do ambiente. Quando tal não é consumado, o período de vida útil da estrutura é mais limitado e, em geral, uma nova construção, ambientalmente mais “dispendiosa”, deverá surgir no seu lugar.

4. INTERVENÇÕES EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

A intervenção nas estruturas de betão armado pode classificar-se de duas formas distintas: uma reparação global; ou uma reparação parcial, quando se intervém apenas em alguns elementos. Numa intervenção de reparação, realizada com o intuito de repor ou aumentar a capacidade resistente da estrutura, pode-se actuar ao nível das cargas ou então na capacidade resistente dos elementos, como se pode verificar por observação da Tabela 1.

Tabela 1 – Intervenções em estruturas.

Intervenção	Actividades
Redução do efeito das cargas	Mudar o tipo de utilização.
	Alterar o esquema estrutural – encurtar vãos.
Acréscimo da capacidade resistente dos elementos estruturais	Aumento das secções transversais – encamisamento.
	Aumento da quantidade de armadura – encamisamento.
	Colagem de armaduras pelo exterior.

A escolha do sistema de reforço, pode ser justificada por várias razões, destacando-se: o aspecto económico; a possibilidade de aplicação de uma solução simples e rápida; a diminuição do impacto arquitectónico; o peso próprio dos materiais de reforço; as características mecânicas; e a durabilidade dos materiais de reforço.

4.1. Reforço com armaduras exteriores

Para o reforço de estruturas de betão armado, existem inúmeras soluções. Contudo o encamisamento, o pré-esforço exterior e a colagem de armaduras externas são as técnicas mais aplicadas.

O reforço e reabilitação de estruturas recorrendo a chapas coladas, assume-se como uma técnica adequada quando as estruturas apresentam deficiência nas armaduras ou quando se pretende aumentar a capacidade de carga das mesmas. Além das vantagens já mencionadas, o uso destes sistemas de reforço caracteriza-se pela ausência de materiais que exigem longos períodos de cura.

Os elementos utilizados como reforço podem, basicamente, ser de duas origens: os de natureza metálica e os não metálicos. Os de natureza não metálica são correntemente designados como “Polímeros Reforçados com Fibras” (*Fibre Reinforced Polymers – FRP*). As primeiras utilizações, bem sucedidas, de materiais compósitos de FRP ocorreram na indústria naval, aeroespacial, automobilística e desportiva. A sua aplicação na construção civil é relativamente recente devido ao custo elevado e ao défice de conhecimento técnico, que atrasou o aparecimento de normalização aplicável.

Os desenvolvimentos recentes nos materiais, nos métodos e nas técnicas de reforço estrutural foram apreciáveis. A aplicação de materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras na construção tornou-se uma certeza e é vista como os “novos” e altamente promissores materiais para a indústria (FIB, 2001). De seguida, serão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho acerca da durabilidade de reforços de betão armado com laminados CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*) colados pelo exterior. Os capítulos seguintes introduzem alguns conceitos relacionados com o trabalho efectuado.

5. DURABILIDADE

A durabilidade de um material ou componente pode ser encarada como a capacidade em resistir a mudanças nas suas propriedades, quando submetido a determinadas condições de exposição.

O comportamento de um sistema de reforço de CFRP colado pelo exterior de uma estrutura de betão armado depende muito das condições de exposição na envolvente ambiental onde está inserido. Neste contexto, destacam-se os efeitos da temperatura e da humidade, bem como os efeitos associados à radiação solar, a agressões químicas ou provocados pela erosão (RILEM, 2000).

Neste tipo de sistema de reforço, estão presentes duas fracções poliméricas: a do CFRP e a do adesivo. A temperatura que transforma o material polimérico numa massa macia designa-se por temperatura de transição vítrea (T_g) (Hutchinson, 2000). Após esta temperatura ser ultrapassada, as propriedades mecânicas do material polimérico, tal como a resistência, o módulo de elasticidade e, conseqüentemente, a rigidez, diminuem bruscamente. A adicionar a este facto, saliente-se que esta temperatura (T_g) pode depender das condições de exposição ambiental, nomeadamente quando o polímero absorve humidade. Esta interacção com a humidade envolvente pode resultar na diminuição da T_g . Este efeito associa-se à redução das outras propriedades mecânicas devido à presença da humidade.

Nestas circunstâncias, é recomendável limitar a aplicação de materiais poliméricos na construção a situações onde a diferença entre a respectiva T_g e a amplitude térmica esperada não ultrapasse valores compreendidos entre 10°C e 20°C (ACI, 1996).

6. ADERÊNCIA

As resinas sintéticas, nomeadamente as resinas epoxídicas, são os materiais de colagem de utilização mais frequente. O sistema mais comum é o bicomposto, constituído por uma base e um endurecedor, que devem ser misturados no momento da aplicação. Cada vez mais, as resinas epoxídicas disponíveis no mercado não se apresentam no seu estado puro, mas sim associadas a outros produtos para facilitar a sua aplicação ou ajustar as suas propriedades. Estes aditivos podem ser plastificantes, solventes, aceleradores ou cargas minerais. Estes últimos originam argamassas epoxídicas que reduzem o custo do produto e contribuem com relevâncias técnicas sendo de destacar: a diminuição da retracção e do coeficiente de dilatação térmico linear, o aumento da viscosidade, da duração da aplicação, das resistências mecânicas (excepto ao choque), da aderência aos suportes húmidos e da resistência ao calor.

Os materiais adesivos assumem um papel importante no bom desempenho do reforço exterior (Araújo, 2002). Com a multiplicidade de materiais disponíveis, resultado de várias origens e composições, é permitida a oportunidade de adequar o melhor possível um tipo de adesivo a uma situação concreta.

7. TRATAMENTO DAS SUPERFÍCIES

A eficaz transferência de tensões entre o suporte e o material de reforço é fundamental para o bom funcionamento do sistema de reforço (ACI, 1993), pelo que se deve conceder especial atenção às superfícies que vão ser unidas.

O grau de aderência depende muito das propriedades do betão solicitado. Quanto menor for a resistência do betão, mais fraca será a sua aderência ao material de reforço. Por esta razão, quando a camada solicitada for incapaz de suportar as acções transmitidas, é conveniente removê-la e refazer a superfície com uma argamassa hidráulica ou com um produto de origem sintética. É favorável conferir alguma rugosidade quando ela não existe e efectuar uma limpeza profunda.

Os laminados de CFRP, após o seu armazenamento, contêm camadas indesejáveis de poeiras e gorduras que devem ser removidas. Se a superfície for protegida com um filme plástico é apenas necessário removê-lo, caso contrário será aconselhável usar um produto de limpeza, que normalmente é recomendado pelo fornecedor do sistema. Antes da aplicação do reforço deve-se proceder a uma última inspecção, controlando a temperatura e a humidade.

8. ENSAIOS LABORATORIAIS

Com o objectivo de avaliar a influência da temperatura no comportamento de reforços externos de elementos de betão armado, estabeleceu-se um programa de ensaios laboratoriais, cujos resultados permitissem uma avaliação comparativa.

8.1. Degradações

Numa primeira fase, após se decidir os materiais a aplicar, elaborou-se um programa de degradações a submeter em várias vigas de betão armado.

Como a T_g da cola é de aproximadamente 63°C, uma das temperaturas de exposição teria que ser próxima dessa. Igualmente importante seria ultrapassar significativamente a referida temperatura e estudar o comportamento no ambiente do laboratório de trabalho, em

que a temperatura normalmente ronda os 20°C. A selecção das exposições térmicas foi baseada em trabalhos anteriores e numa norma europeia (CEN, 2002) e conduziu às exposições indicadas na Tabela 2. Cada subgrupo (dois betões distintos, cada qual com vigas reforçadas, Ref, e sem reforço, SR) de uma série de ensaios é composto por três provetes.

Tabela 2 – Exposições térmicas.

Exposição (°C)		Degradação	Tempo do ciclo (horas)	Número de Ciclos
Mínima	Máxima			
20	20	T20	6+6	50
20	40	T40	6+6	50
20	60	T60	6+6	50
20	80	T80	6+6	50

8.2. Provetes de betão armado

Com o objectivo de avaliar o efeito associado ao tipo de betão, utilizaram-se dois betões distintos para a produção dos provetes: um designado por corrente (Corr) e outro de elevado desempenho (BED). Por imposição da geometria da câmara de degradação, os provetes foram produzidos com as dimensões de 65x15x10 cm³.

Os provetes foram fabricados com uma armadura longitudinal inferior constituída por três varões de aço A400NR com 6 mm de diâmetro e a armadura superior com dois varões do mesmo tipo. Foi, também, colocada uma armadura de esforço transverso, constituída por varões lisos de aço A500 com 3 mm de diâmetro, afastados de cerca de 5 cm.

Após a realização das amassaduras, os provetes foram conservados nas condições de exposição laboratorial. Um dia após a betonagem, procedeu-se à desmoldagem dos provetes e sua imersão em água a 20°C, onde permaneceram durante 20 dias. De seguida, secaram à temperatura ambiente para, posteriormente, se proceder à sua preparação para efectuar a colagem do reforço, aos 28 dias de idade.

A resistência à compressão dos betões produzidos foi determinada aos 28 dias de idade em provetes cúbicos com 15 cm de aresta. O betão convencional apresentou uma resistência média de 30,0 MPa e o BED de 90,0 MPa.

8.3. Aplicação do sistema de reforço

Aos 28 dias de idade, os provetes de betão armado foram devidamente preparados de modo a proceder-se ao seu reforço, através da colagem de laminados de CFRP.

8.3.1. Preparação da superfície

Para preparar a superfície das vigas de betão armado a reforçar, estas foram sujeitas à acção de um disco de diamante, de um abrasivo, de um jacto de ar e de uma escova macia. Com este procedimento, a leitada de cimento, o material descofrante e as poeiras foram retiradas, ao mesmo tempo que aumentou a rugosidade da superfície (anteriormente lisa) das vigas.

A face do laminado CFRP destinada a receber a cola, foi limpa imediatamente antes de esta ser aplicada, com o soluto de limpeza indicado pelo fabricante.

8.3.2. Colagem do sistema de reforço

A localização do reforço das vigas está indicada na Figura 1. O produto de colagem seleccionado foi uma argamassa epoxídica, que deve ser misturada na altura da aplicação na razão 3:1 (peso ou volume de base e endurecedor, respectivamente). Este adesivo tem como carga mineral um filer calcário.

A aplicação envolveu o espalhamento de cola nas duas superfícies, com especial cuidado no suporte, tentando preencher todos os poros. Durante a colagem, o posicionamento e a compressão uniforme do laminado na viga não devem permitir a formação de vazios e devem permitir a formação de uma espessura da lâmina de cola de aproximadamente 1 mm. A secagem decorreu num ambiente com a temperatura de 20°C durante 7 dias, após os quais se deu início à degradação dos provetes.

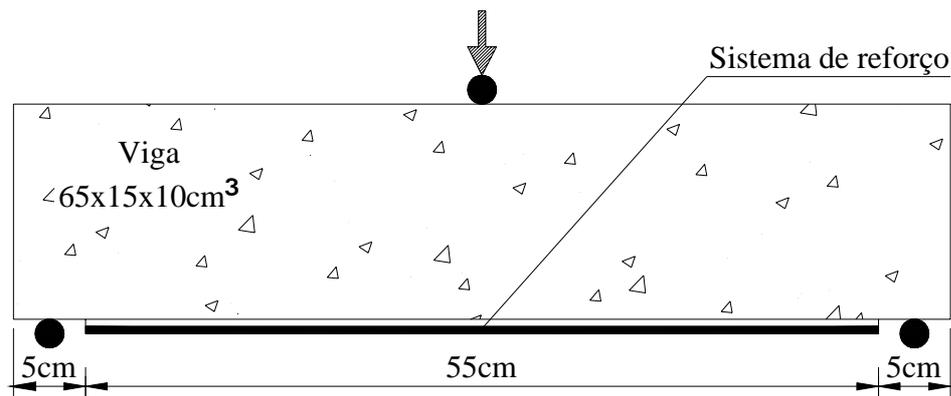


Figura 1 – Localização do reforço na viga.

8.4. Ensaios realizados

Decorridos os 50 ciclos (CEN, 2002) de exposição térmica, as vigas foram ensaiadas à flexão, sob a acção de três pontos de carga.

O ensaio efectuou-se com um sistema servo-controlado garantindo uma velocidade de deslocamento a meio vão de 10 $\mu\text{m/s}$ e decorreu à temperatura de exposição máxima, sendo para isso assegurado que após retirar as vigas da câmara de degradação, o arrefecimento até ao final do ensaio não fosse significativo ($<5^\circ\text{C}$).

9. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figuras 2 a 5 apresentam-se as curvas de comportamento médias, representativas da variação do momento flector actuante na secção a meio vão e da respectiva deformação vertical, verificadas no decurso dos ensaios de flexão realizados, abrangendo as várias exposições térmicas a que os provetes foram sujeitos. Na Figura 6, apresenta-se a evolução dos momentos flectores resistentes máximos para as diferentes degradações.

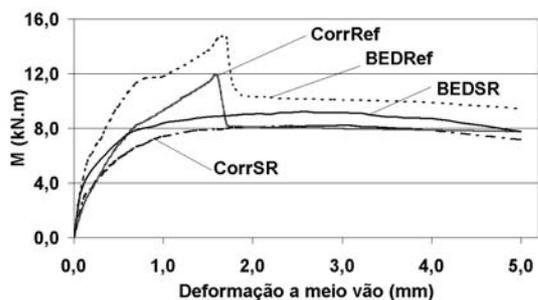


Figura 2 – Curvas momento-deformação, T20.

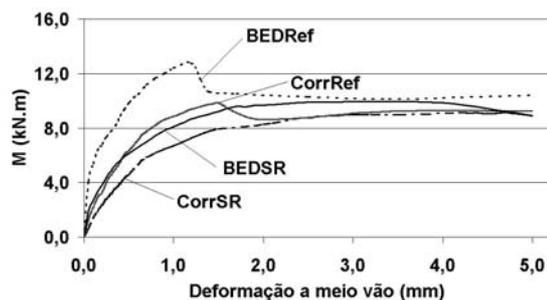


Figura 3 – Curvas momento-deformação, T40.

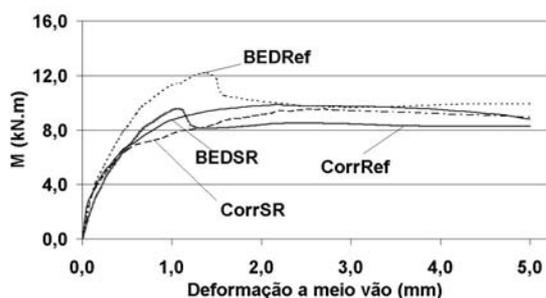


Figura 4 – Curvas momento-deformação, T60.

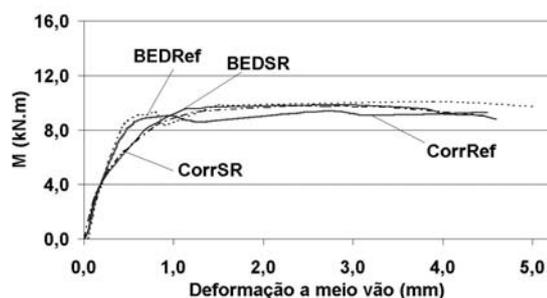


Figura 5 – Curvas momento-deformação, T80.

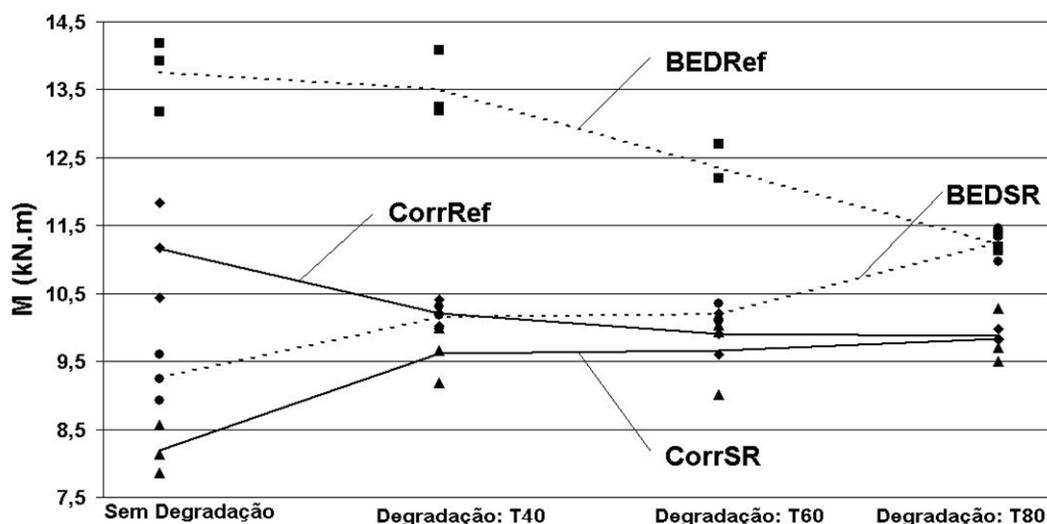


Figura 6 – Evolução dos momentos máximos com o aumento da severidade da exposição térmica.

Conforme seria de esperar, o aumento da agressividade térmica provocou uma diminuição da eficiência do reforço. Quando se aproximou e ultrapassou a temperatura de transição vítrea da cola, isto é, com as exposições T60 e T80, começaram a verificar-se descolagens do reforço.

Por observação das curvas momento-deformação verifica-se que, com o aumento da temperatura envolvente, o comportamento das vigas reforçadas tende a aproximar-se das de controlo, sem inclusão de reforço.

Na série de ensaios sem degradação e com a exposição T40, as roturas nas vigas sem reforço ocorreram por flexão (Figura 7) e nas vigas com reforço aconteceram devido à delaminação causada pela rotura do betão de recobrimento (Figura 8). Quando a agressividade da exposição foi próxima da T_g do adesivo, verificaram-se algumas descolagens nas extremidades do reforço. Nestas situações, a descolagem aconteceu na interface betão-adesivo.



Figura 7 – Configuração de rotura por flexão.

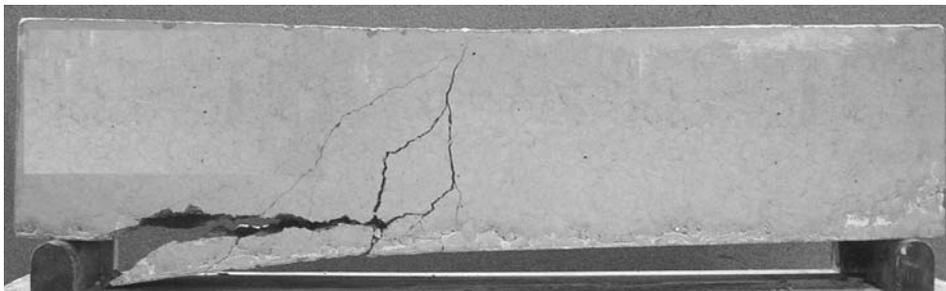


Figura 8 – Configuração de rotura por delaminação.

Com a condição de exposição mais rigorosa (T80), observaram-se descolagens coesivas completas do reforço dos provetes de BED (Figura 9). No betão corrente os resultados visuais não foram tão perceptíveis.

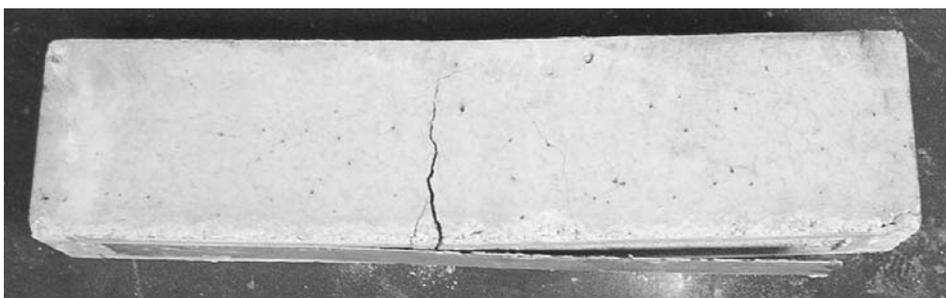


Figura 9 – Configuração de rotura com descolagem coesiva do reforço.

10. CONCLUSÕES

O tipo de reforço estudado, sem dúvida alguma que apresenta inúmeras vantagens. Contudo, quando aplicado num ambiente quente, carece de cuidados especiais. Mesmo quando sujeitos a uma simples exposição solar, é possível registarem-se temperaturas bastante elevadas, capazes de afectar a eficácia do sistema de reforço.

Os ensaios realizados incidiram apenas perante a acção conjunta de temperatura e de carga, mas, normalmente, estas acções não actuam sozinhas. Pode, também, existir, em simultâneo, humidade ou o meio ser quimicamente agressivo. Por esta razão, é aconselhável que o adesivo utilizado possua uma temperatura de transição vítrea 10°C a 20°C superior à temperatura máxima prevista no local, que se prevejam sistemas de protecção do reforço por intermédio da colocação de sistemas isolantes térmicos e que durante os trabalhos de reforço exista supervisão adequada. Este acompanhamento deve incidir especialmente na avaliação das condições de exposição ambiental, na mistura da cola, na preparação das superfícies, nas operações de aplicação do reforço e nas condições de secagem.

Apesar das vigas de betão de elevado desempenho manifestarem sempre melhores resultados que as restantes, a colagem de reforços neste género de betão, menos poroso, carece de mais cuidados.

11. REFERÊNCIAS

ACI 440, *Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2000.

ACI 440R-96, *State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, ACI Committee 440, 1996.

ACI 50R-93, *Use of epoxy compounds with concrete*, American Concrete Institute, ACI Committee 503. 1993.

Anne Beeldens, Van Gemert D.; Aguiar B., *Aging factors affecting Adhesion*; RILEM TC 151, *Adhesion Technology: Physical and Chemical Aspects*, Chapter 6, 2000.

Araújo, C. M., *Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono*, Dissertação de Doutoramento, Universidade federal do Rio de Janeiro, 2002.

CEN, European Committee for Standardisation – *EN 13733, Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test Methods – Determination of the durability of structural bonding agents*, Brussels, Belgium, 2002.

FIB Bulletin, *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, International Federation for Structural Concrete (FIB), FIB, 2001.

Hutchinson A. R.; Quinn J., *Strengthening of Reinforced Concrete Structures, using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*, Cambridge, 2000.