

# Aderência dos Epóxidos ao Betão Hidráulico

J. L. Barroso de Aguiar <sup>1</sup>

*Universidade do Minho, Guimarães*

## RESUMO

As reparações e as colagens de estruturas de betão são trabalhos cada vez mais necessários. A necessidade de reparar estas estruturas provém da sua antiguidade ou de defeitos durante a construção. Os polímeros são materiais que se comportam bem em trabalhos de reparação e de colagem devido à sua elevada aderência o que torna possível a ligação betão endurecido-betão endurecido, betão endurecido-betão fresco e betão endurecido-materiais metálicos por colagem. Apresentamos dois ensaios, um de tracção directa e outro baseado nos princípios da mecânica da fractura. Este último permitiu-nos a avaliação da aderência de forma mais rigorosa que o ensaio de tracção directa. Determinámos a resistência à tracção e as taxas de libertação de energia de deformação para a aderência entre betão endurecido e epóxido.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas técnicas de reparação, os polímeros utilizam-se puros ou com cargas constituídas por fillers diversos. Habitualmente injecta-se uma resina pura em fissuras finas e procede-se à colagem estrutural betão endurecido-betão endurecido utilizando uma resina com cargas minerais.

Com os ensaios de tracção, estudámos, por um lado, a influência de uma dada carga sobre a aderência do sistema betão endurecido-polímero-betão endurecido, e, por outro lado, a aderência em função das características e da dosagem de carga.

Utilizámos um ensaio baseado nos princípios da mecânica da fractura porque os ensaios de tracção directa não permitem caracterizar a aderência de forma válida. Em primeiro lugar, quando a rotura é do tipo I (rotura no betão), sabemos que a colagem resiste mais que o betão, mas não sabemos qual é a sua resistência. Em segundo lugar, a dimensão dos provetes tem influência nos resultados que se obtêm com este tipo de ensaios.

---

1 - Professor Auxiliar

A mecânica da fractura permite-nos, a partir de uma análise mecânica, determinar os parâmetros da fissura, cujos valores críticos são característicos dos materiais. Esta determinação permitirá caracterizar de forma mais correcta a aderência entre epóxidos e betão. A mecânica da fractura permite-nos, também, conhecer a influência dos defeitos sempre presentes numa colagem.

## 2. ENSAIOS DE TRACÇÃO DIRECTA

### 2.1 Descrição

Todos os ensaios de tracção directa efectuaram-se de acordo com a norma francesa NFP 18-871, relativa a produtos para a colagem estrutural entre dois elementos de betão com superfície de aplicação horizontal. Para a colagem estrutural utilizámos um betão com 90 dias cuja resistência à compressão aos 28 dias em cilindros 16 cm x 32 cm era da ordem dos 48 MPa.

Com vista a minimizar, ou anular, o efeito de uma heterogeneidade pontual na camada de polímero colocada no provete para efectuar a colagem, trabalhamos com meios-prismas de 14 cm x 9 cm x 30 cm (Fig.1). A aplicação dos polímeros efectuou-se sobre superfícies de 420 cm<sup>2</sup> escovadas e húmidas. Obtiveram-se prismas de 14 cm x 18 cm x 30 cm por colagem do outro meio-prisma de betão endurecido correspondente.

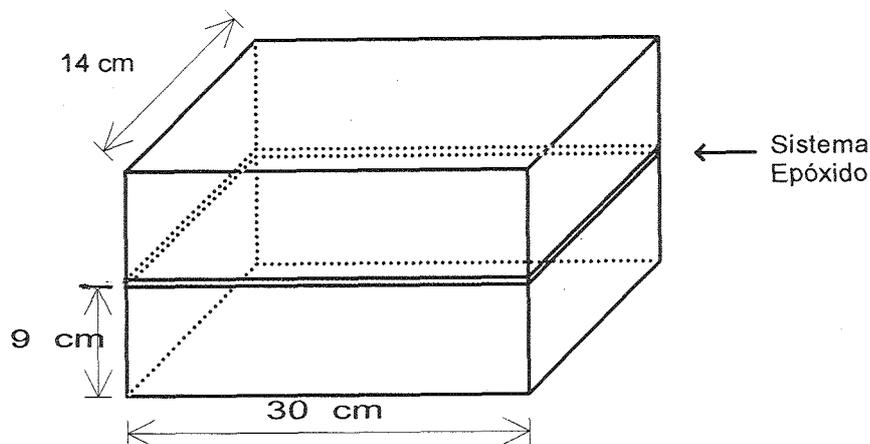


Fig. 1 - Provete prismático reconstituído por colagem

Tendo em atenção as conclusões de trabalhos anteriores (Lamouri, 1984, Paillère, 1986 e Troncy, 1985), não nos interessámos pelo estado de superfície do suporte seco, porque, neste caso, a rotura ocorre sempre no betão.

Os provetes destinados à determinação da aderência obtiveram-se 28 dias após a colagem, por carotagem de cilindros de 8 cm de diâmetro da base e 18 cm de altura (Fig. 2), obtidos do prisma reconstituído.

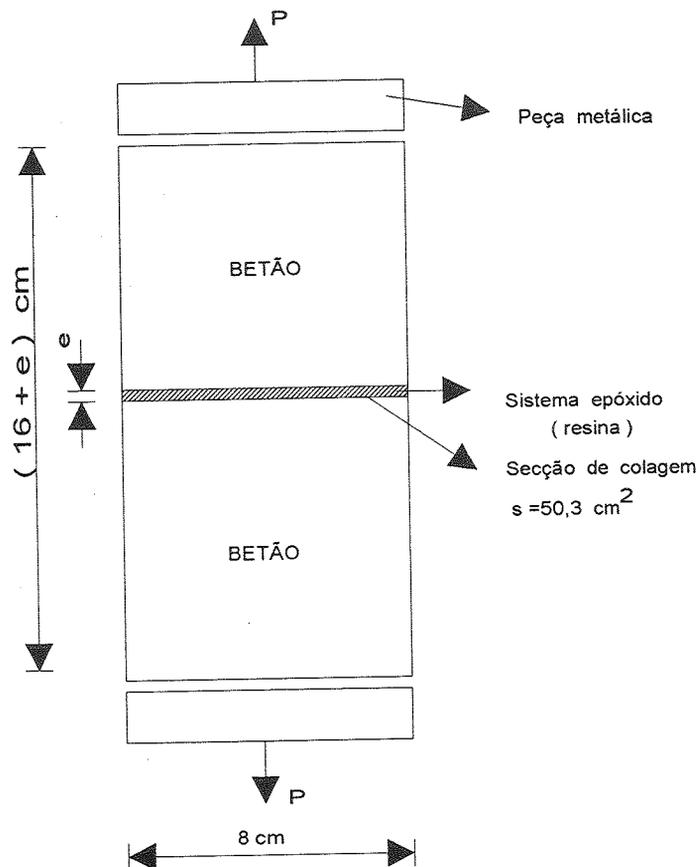


Fig. 2 - Provete cilíndrico betão-resina-betão

Utilizámos dois sistemas epóxicos, sistema A (resina de epóxido A + endurecedor A<sub>1</sub> à base de poliamina alifática) e sistema X (resina de epóxido X + endurecedor Y à base de uma mistura de aminas cíclicas e de álcool benzílico).

Os modos de rotura dos provetes reconstituídos classificaram-se em quatro tipos (Fig. 3). No tipo I (Fig. 3a), o cilindro reconstituído não se separa pelo plano de colagem horizontal. O betão rompe sob o efeito de tensões de tracção exercidas sobre o provete. No caso da colagem de betão fresco/betão endurecido, a rotura pode dar-se do lado do betão endurecido que serve de suporte ou do lado do betão fresco. No tipo II (Fig. 3b), a rotura abrange o betão e o plano de colagem. No tipo III (Fig. 3c), o produto fica aderente sobre cada meio-provete de betão e a rotura dá-se na espessura do produto de colagem segundo um plano paralelo ao plano de colagem. No tipo IV (Fig. 3d), a rotura dá-se numa das interfaces produto de colagem-betão devido à falta de aderência do produto submetido aos ensaios.

Estudámos a aderência em função da natureza mineralógica do filler, da sua granulometria e da percentagem presente no sistema epóxico. Experimentámos os dois sistemas epóxicos A e X definidos anteriormente, três fracções granulométricas diferentes de uma carga calcária e de uma carga 100 % siliciosa (Quadro 1).

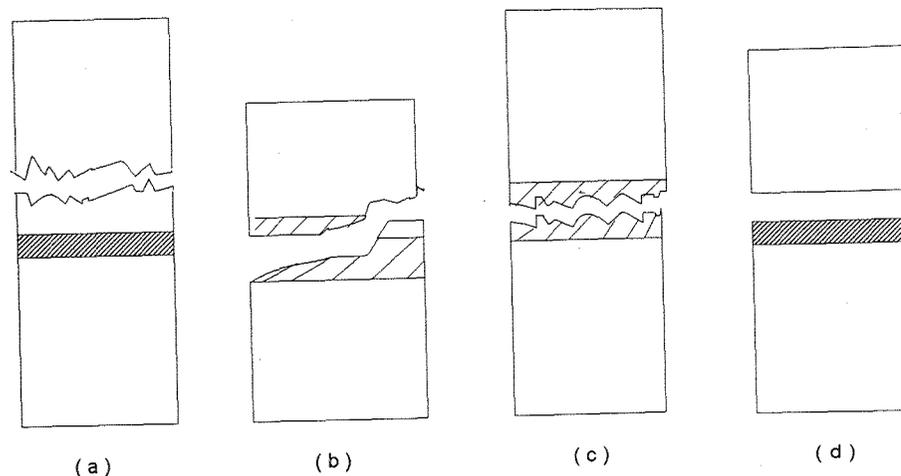


Fig. 3 - Diferentes tipos de rotura. (a) Tipo I: rotura no betão,  
 (b) tipo II: rotura mista betão-plano de colagem,  
 (c) tipo III: rotura coesiva,  
 (d) tipo IV: rotura adesiva (descolagem)

Quadro 1 - Fracções granulométricas

Natureza da carga	Filler ultrafino	Filler fino	Filler médio
Calcário	80% < 4 $\mu\text{m}$	68% < 4 $\mu\text{m}$	35% < 4 $\mu\text{m}$
	92% < 20 $\mu\text{m}$	85% < 20 $\mu\text{m}$	75% < 30 $\mu\text{m}$
Sílica	72% < 4 $\mu\text{m}$	61% < 4 $\mu\text{m}$	39% < 4 $\mu\text{m}$
	95% < 20 $\mu\text{m}$	95% < 20 $\mu\text{m}$	100% < 30 $\mu\text{m}$

## 2.2 Determinação da quantidade de carga incorporável nos polímeros

Como se pode ver na Fig. 4, a quantidade de filler que é possível juntar aos sistemas epóxicos A e X decresce com a finura do filler. Esta quantidade é menor no caso do filler silicioso. Assim, para os fillers médios ( $SS < 20000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), atinge-se 80 % para o sistema X e 70 % para o A com o filler calcário e cerca de 70 % no máximo para o filler silicioso qualquer que seja o epóxido utilizado. Para esta última carga, constata-se que a partir de uma superfície específica de  $38000 \text{ cm}^2/\text{g}$  o teor máximo de carga é sempre da ordem de 52 % para o polímero X. No caso do polímero A, o patamar situa-se por volta dos 42 % para fillers com  $SS > 60000 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

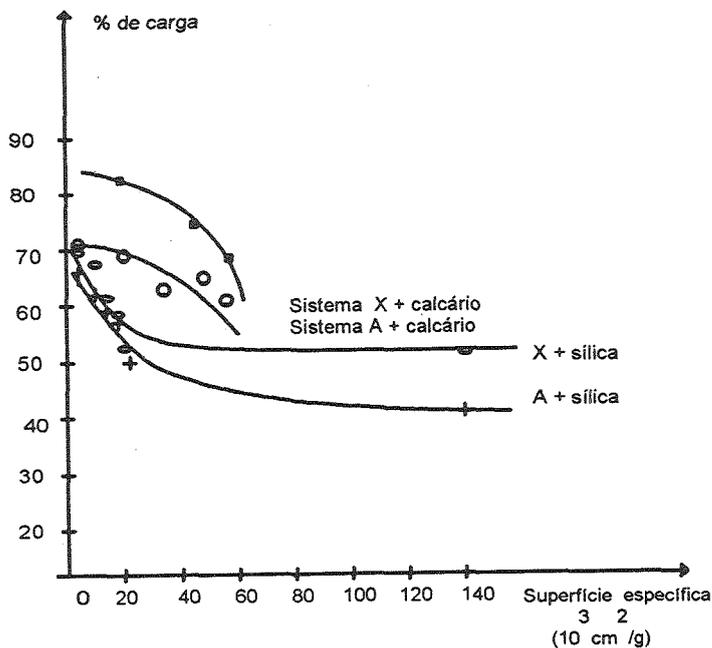


Fig. 4 - Quantidade máxima de filler incorporável nos dois tipos de resinas de epóxico em função da superfície específica do filler

### 2.3 Influência da percentagem, da natureza e da granulometria da carga sobre a aderência do polímero

Verificámos (Figs. 5 e 6) que existe uma dosagem óptima de filler que conduz a um máximo de resistência e de aderência. Este óptimo varia segundo a natureza do filler, a sua granulometria e o sistema epóxico experimentalado.

Para a resina A obtêm-se os melhores resultados (rotura no betão) com o filler calcário fino e ultrafino e para dosagens compreendidas entre 5 e 16 %. Os fillers calcário e silicioso parecem conferir o mesmo comportamento ao sistema X qualquer que seja a sua granulometria, mas as percentagens óptimas, do ponto de vista da aderência, estão compreendidas entre 12 e 18 % para o filler calcário e entre 20 e 30 % para o filler silicioso.

Estes resultados são apresentados em conjunto na Fig. 7 onde se pode ver que as tensões máximas que conduzem a uma rotura no betão, registadas com o sistema X têm lugar indiferentemente com os fillers calcários ou siliciosos, com uma tendência para melhores desempenhos no caso dos elementos médios da sílica e ultrafinos de calcário. Com o sistema epóxico A os desempenhos decrescem à medida que a dimensão dos fillers calcários aumenta. Os fillers siliciosos conduzem, qualquer que seja a sua granulometria, a roturas mistas, com resistências da ordem de 2,5 MPa.

Estes resultados confirmam a existência de um par óptimo polímero-carga. A aderência de um sistema epóxico a um betão húmido parece ser, entre outras, função da natureza e da granulometria da carga utilizada.

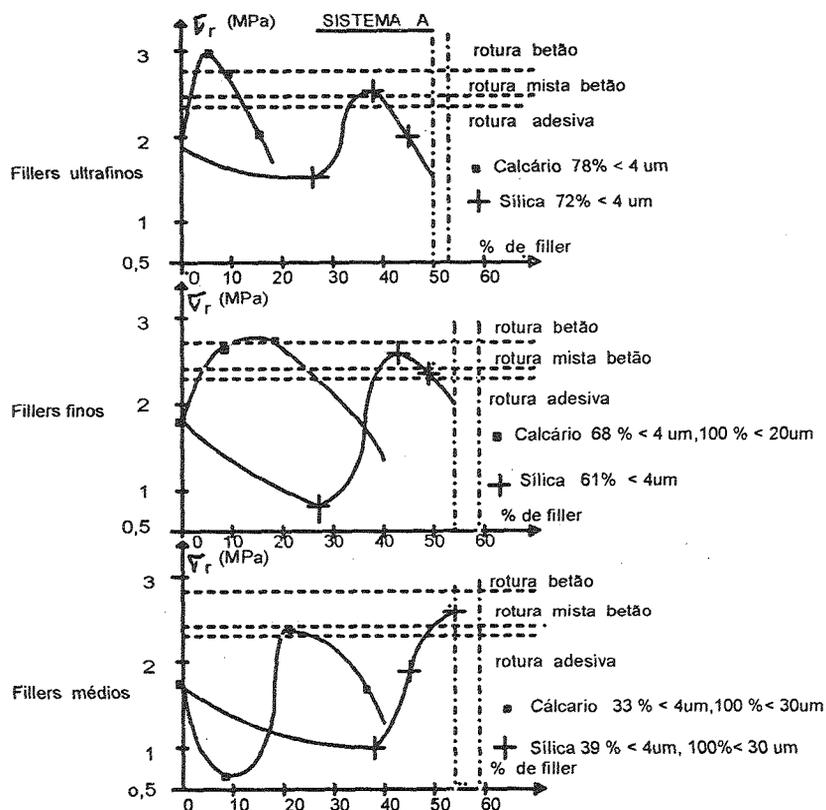


Fig. 5 - Aderência em função da dosagem de filler (superfície húmida - espessura  $\approx 0,6$  mm)

### 3. APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA FRACTURA

#### 3.1 Escolha do ensaio

Escolhemos o ensaio tipo DCB (double cantilever beam) porque é o que nos permite seguir melhor a propagação da fissura. Neste ensaio, a propagação efectua-se num comprimento maior que nos outros ensaios baseados nos princípios da mecânica da fractura (flexão três ou quatro pontos por exemplo). Os provetes utilizados na flexão possibilitam comprimentos de propagação da ordem dos 10 cm, o que é muito pouco, sobretudo quando comparado com o comprimento da zona microfissurada do betão (6-8 cm).

Utilizámos uma argamassa normal de acordo com a norma francesa NFP15-403 de Julho de 1963. O cimento utilizado foi um cimento CPA-HTS. O epóxido foi escolhido em função dos resultados do estudo anterior. Utilizámos o sistema A (resina de epóxido A + endurecedor  $A_1$  à base de poliamina alifática) com uma carga calcária (20%).

Os provetes são do tipo DCB (Fig. 8). O estado de superfície é argamassa serrada. Obtêm-se as superfícies serradas aos 28 dias. No momento da colagem, as superfícies estavam secas. Com vista a obter uma boa repetição do estado de superfície, os provetes são retirados

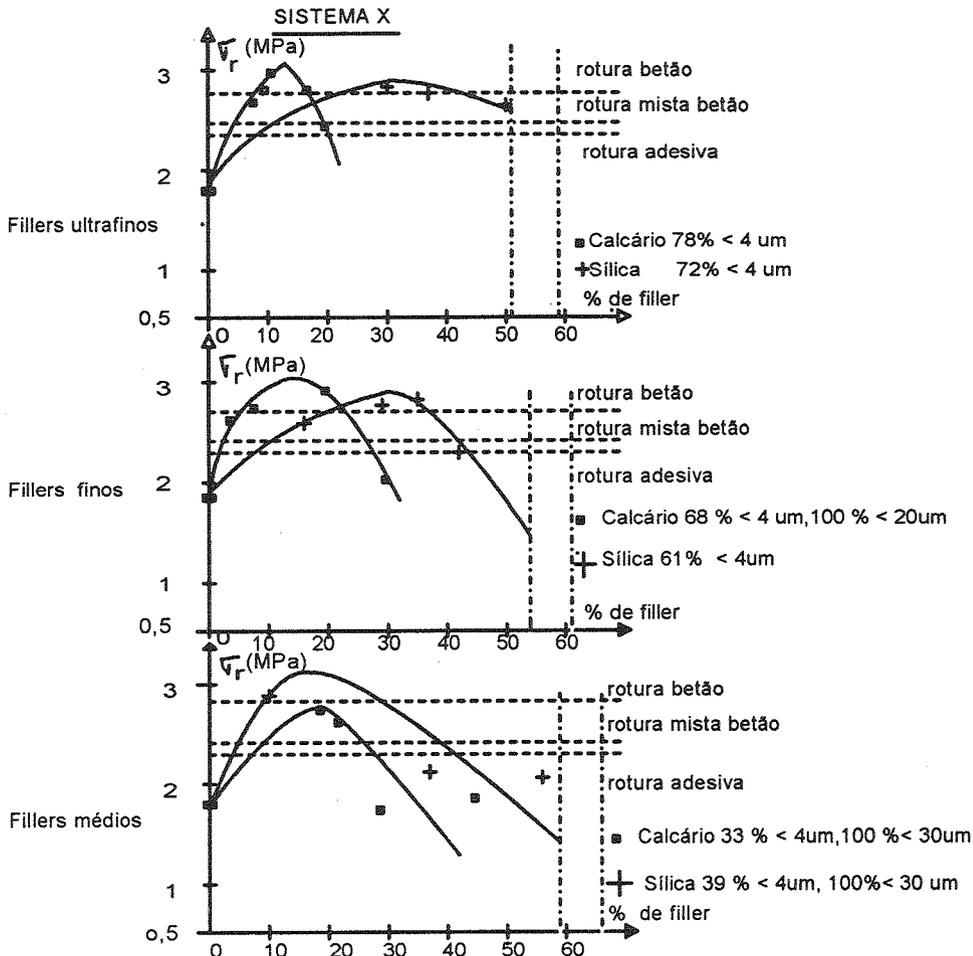


Fig. 6 - Aderência em função da dosagem de filler (superfície húmida - espessura  $\approx 0,6$  mm)

da água 7 dias antes da sua colagem. As superfícies foram escovadas com lixa e submetidas a um jacto de ar para eliminar todas as partículas friáveis ou soltas.

### 3.2 Preparação do ensaio

As superfícies serradas de cada meio-provete foram cuidadosamente cobertas de uma camada de ligante de epóxido, com a ajuda de uma espátula. Decorrido o espaço de tempo requerido (dependente da cinética de polimerização do ligante de epóxido), procedemos à união dos dois meios-provetes. Placas com 1 mm de espessura permitiram a obtenção de uma junta com esta espessura (Fig. 9). As colagens foram conservadas num local plano e mantidas na sua posição com o auxílio de um serra-juntas durante 24 horas, para uma melhor molhagem do suporte argamassa. Os provetes reconstituídos, ficaram em seguida em cura a  $20 \pm 2$  °C durante 72 h, depois foram conservados dentro de água a  $20 \pm 1$  °C.

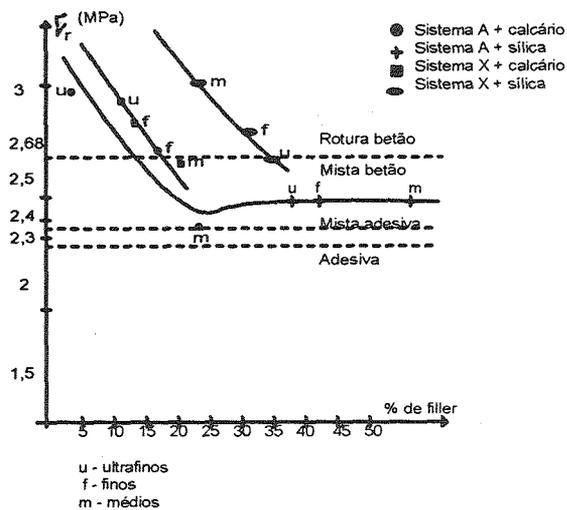


Fig. 7 - Tensões máximas de rotura em função da dosagem de filler

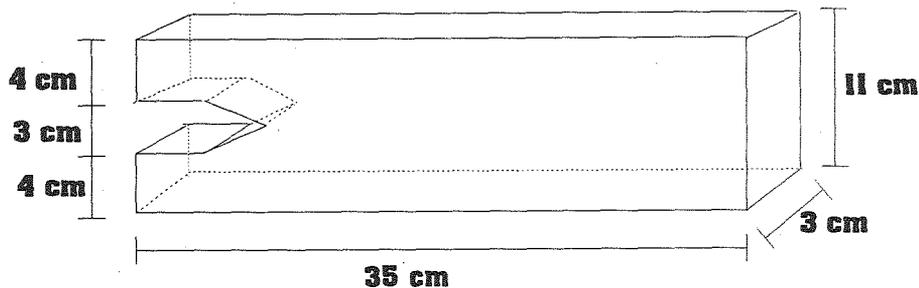


Fig. 8 - Dimensões do provete tipo DCB

Sete dias após a colagem, procedemos a uma redução da secção por serragem (Fig. 10). O caminho de fissura obtido foi de 7,5 mm X 3 mm de cada lado do provete.

Depois de termos criado um caminho de fissura, procedemos ao reforço dos provetes com quatro placas de aço de 3 mm de espessura (Figs 10 e 11) com vista a obrigar a fissura a seguir todo o comprimento do provete. Em seguida, duas peças metálicas coladas sobre os provetes asseguraram a ligação à máquina de tracção.

### 3.3 O ensaio

Em primeiro lugar efectuámos ciclos de fadiga para ter uma frente de fissura bem marcada e eliminar todos os problemas de jogo da montagem, que podem tornar a curva carga-deslocamento não linear. Efectuámos 10 ciclos de 20 daN (carga máxima) com uma velocidade de 240  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Em seguida começámos o ensaio propriamente dito com uma velocidade de 10  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

Quando se observou que a carga diminuía, parámos a máquina de tracção e deixámos a fissura propagar-se a deslocamento constante durante 15 min. Em seguida descarregámos e carregámos imediatamente até uma nova descida da carga; parámos 15 min como anteriormente. Efectuámos três ciclos de carga-descarga.

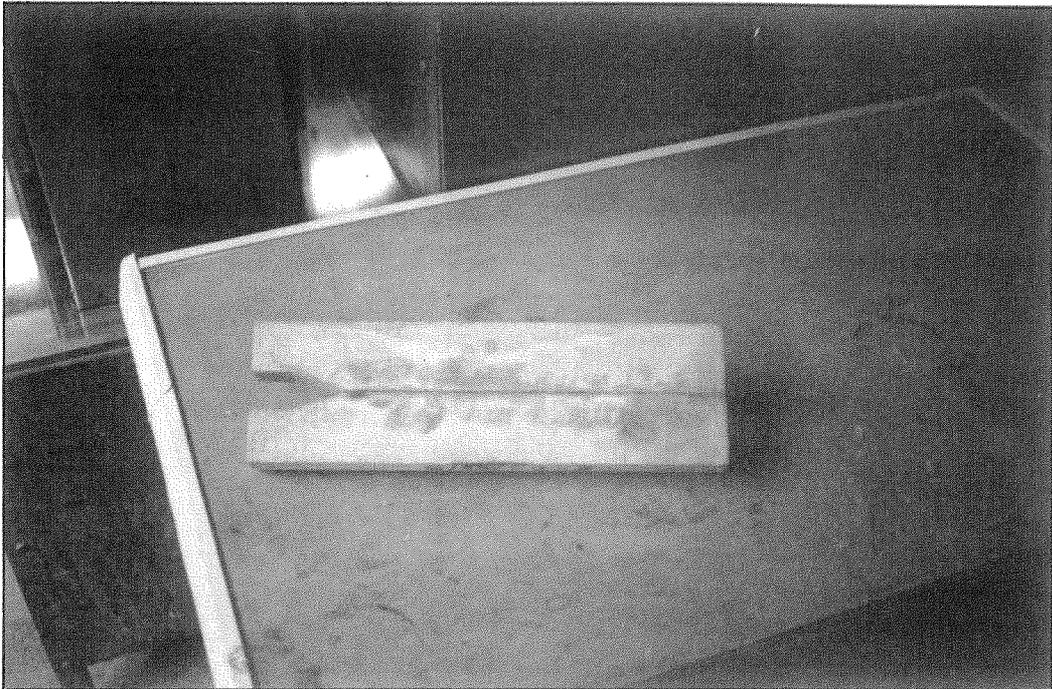


Fig. 9 - Provette depois de colado

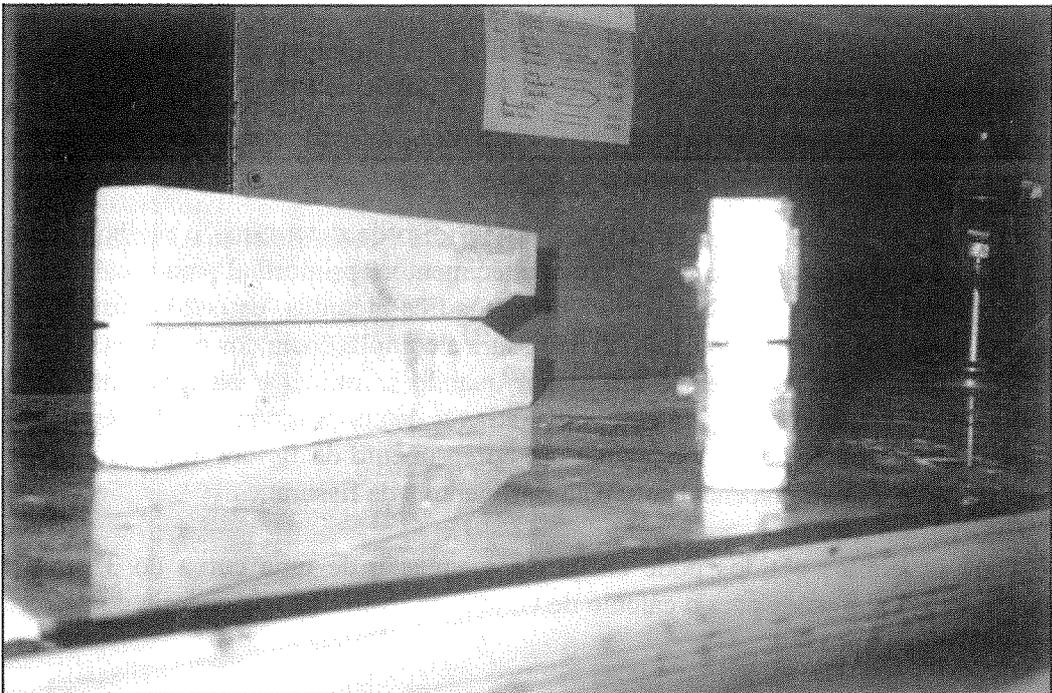


Fig. 10 - Caminho de fissura e reforço dos provetes

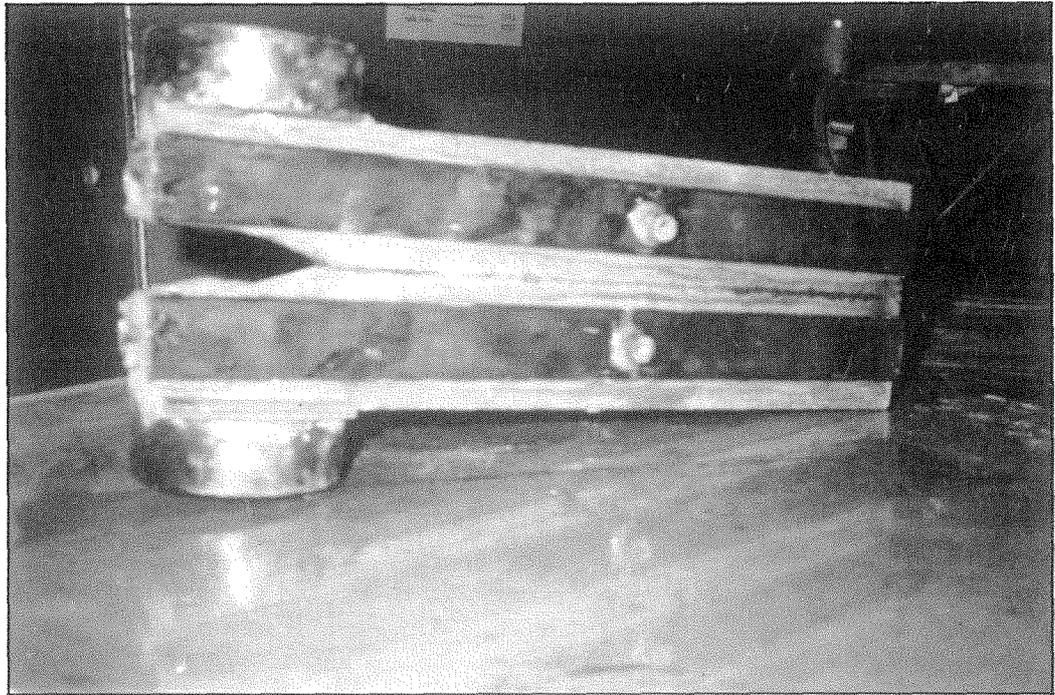


Fig. 11 - Provete de argamassa + cola reforçado

Depois do último ciclo, efectuámos um novo carregamento, mas quando chegámos a cerca de 50 % da carga máxima do ciclo anterior, aumentámos a velocidade do ensaio para um valor entre 10 e 30 mm/min. Retirámos em seguida o deflectómetro e continuámos o ensaio até à rotura total do provete. Registámos a carga correspondente a essa rotura.

#### 3.4 Medição do comprimento da fissura

O objectivo principal dos primeiros ensaios foi o de determinar o melhor método de medição do comprimento da fissura. O seu conhecimento é primordial para o cálculo do teor de restituição de energia de deformação. Utilizámos três métodos: emissão acústica (Aguilar, 1987), deflectómetro no meio do caminho de fissura e complacência dos provetes.

Verificámos que a dispersão era menor quando se utiliza o comprimento da fissura obtido pelo método que consiste em determinar através de um programa de elementos finitos a complacência do provete correspondente a um comprimento da fissura imposto. A figura 12 mostra a variação da complacência com o comprimento  $a$  da fissura.

Com os pontos obtidos pode chegar-se à equação de uma curva do 3º grau em  $a$ . Sabemos que as expressões para o cálculo de  $G$ , teor de restituição de energia de deformação, podem ser de dois tipos:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

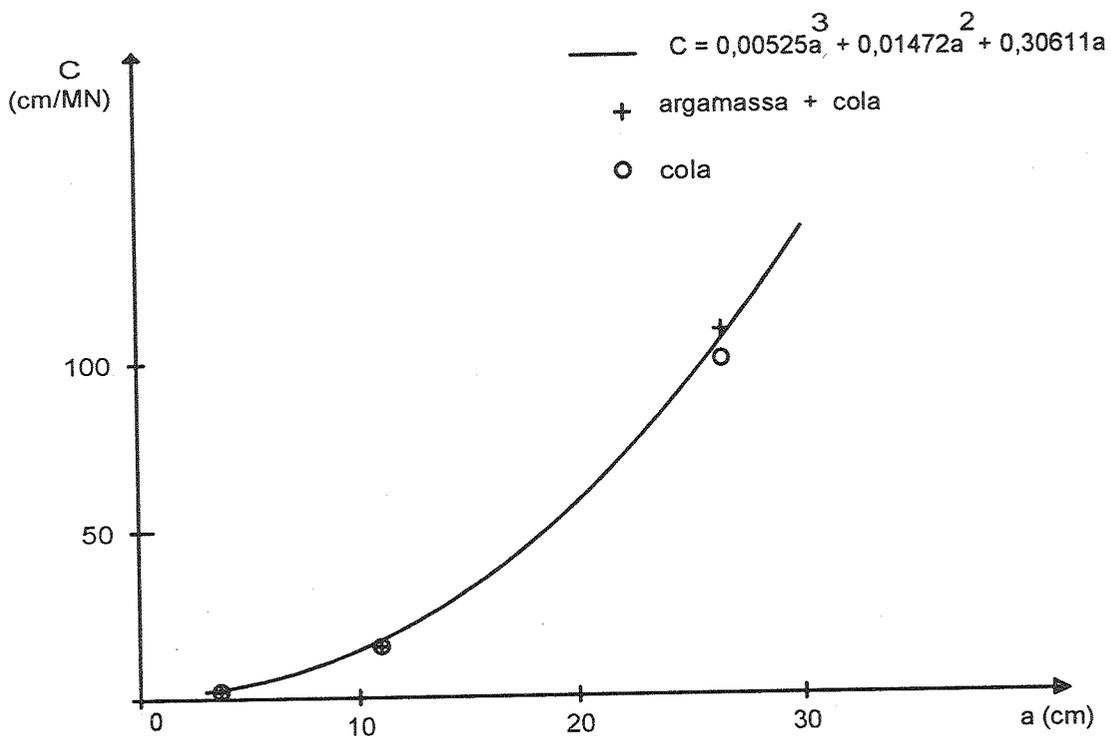


Fig. 12 - Variação da complacência dos provetes com o comprimento da fissura

É a fórmula do método da complacência. Temos uma outra expressão apresentada por Srawley, 1967:

$$G = \frac{12P^2}{B^2h^3E}(a^2 + 1,32ha + 0,532h^2) \quad (2)$$

Se igualarmos as expressões 1 e 2, temos:

$$\frac{dC}{da} = \frac{24}{Bh^2E}(a^2 + 1,32ha + 0,532h^2) \quad (3)$$

Como B, h e E são constantes, temos:

$$\frac{dC}{da} = f(a^2) \quad (4)$$

e portanto

$$C = f(a^3) \quad (5)$$

Como para  $a = 0$ ,  $C = 0$ , a expressão 5 é da seguinte forma:

$$C = \alpha_1 a^3 + \alpha_2 a^2 + \alpha_3 a \quad (6)$$

Se se faz passar esta curva pelos três pontos obtidos nos cálculos pelo método dos elementos finitos (Fig. 12), temos:

$$C = 0,00525a^3 + 0,01472a^2 + 0,30611a \quad (7)$$

com C em cm/MN e a em cm. Se se derivar a expressão 7 segundo a, obtemos:

$$\frac{dC}{da} = 0,01575a^2 + 0,02944a + 0,30611 \quad (8)$$

Substituindo a expressão 8 em 1, vem:

$$G = \frac{P^2}{2B} (0,001575a^2 + 0,02944a + 0,30611) \quad (9)$$

com G em MN/cm, P em MN, a e B em cm.

### 3.5 Resultados

Na primeira série de ensaios obtivemos teores de restituição de energia de deformação a uma velocidade de propagação nula de 61,93 N/m para roturas argamassa, e 48,76 N/m para roturas mistas.

Na segunda série determinámos o teor de restituição de energia de deformação a velocidade de propagação nula,  $G_0$  e o teor crítico de restituição de energia de deformação,  $G_c$ . Os valores encontrados foram  $G_0 = 77,75$  N/m para roturas argamassa e  $G_0 = 36,85$  N/m para roturas mistas. Estes valores estão próximos dos encontrados na série nº 1.

Para  $G_c$ , os valores apresentam-se na Fig. 13. Verifica-se uma tendência para estabilização para velocidades entre 20 e 30 mm/min. Propomos que a determinação de  $G_c$  se faça a uma velocidade de 30 mm/min. Os valores estimados para  $G_c$  são 179,00 N/m para as roturas argamassa e 158,00 N/m para as roturas mistas.

## 4. CONCLUSÕES

Dos ensaios de tracção directa podem retirar-se as conclusões seguintes:

- (i) a quantidade de filler que é possível juntar aos sistemas epóxido decresce com a finura do filler;
- (ii) existe uma dosagem óptima de filler conduzindo a um máximo de resistência e aderência;
- (iii) a carga introduzida num polímero desempenha um papel importante na sua aderência ao betão húmido.

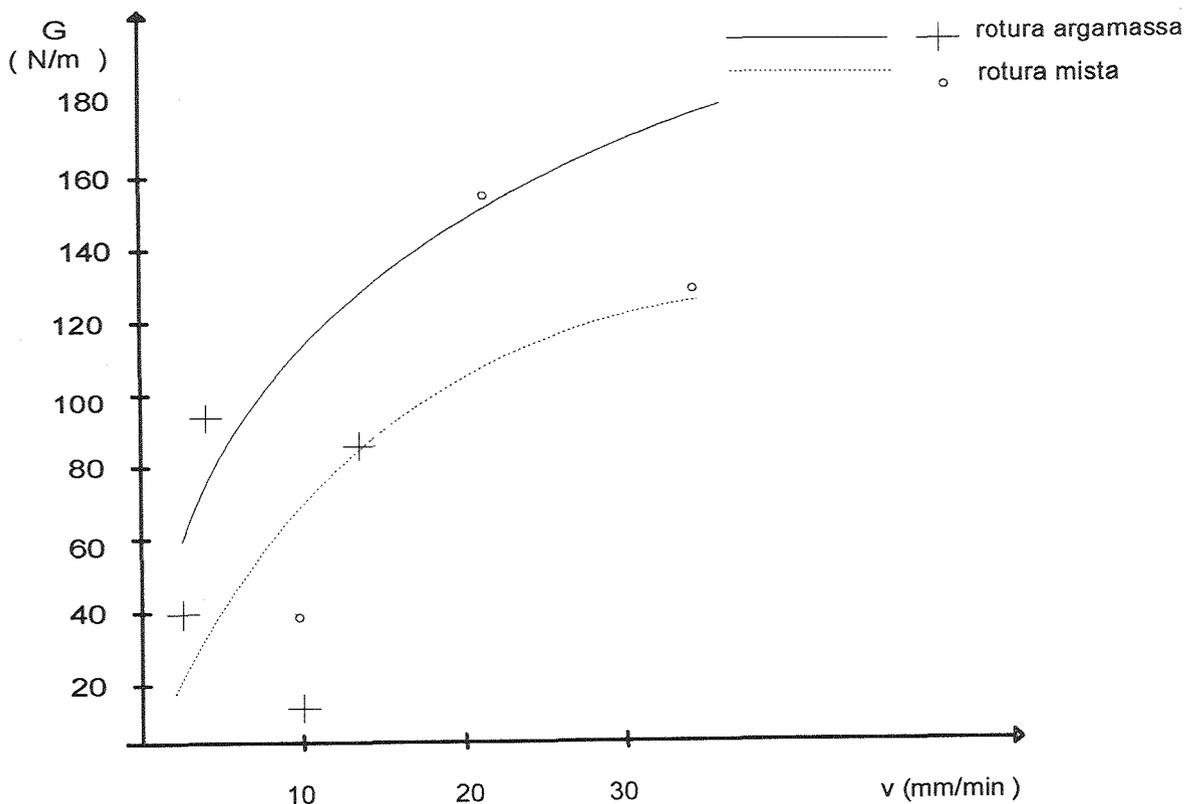


Fig. 13 - Variação do teor de restituição de energia de deformação com a velocidade do ensaio.

A determinação da resistência das ligações betão-epóxico com ensaios de mecânica da fractura permitiu concluir o seguinte:

(i) É possível aplicar a mecânica da fractura ao estudo das ligações betão-epóxico. Para isto devem utilizar-se provetes do tipo DCB porque têm um comprimento maior para a propagação da fissura. Dos três métodos utilizados para determinar o comprimento das fissuras, o método da complacência foi o que deu melhores resultados;

(ii) Para os casos estudados, foi possível determinar o teor de restituição de energia de deformação a velocidade de propagação nula,  $G_0$ , e o teor crítico de restituição de energia de deformação,  $G_c$ . Os valores médios de  $G_0$  são 69,84 N/m para as roturas argamassa e 42,81 N/m para as roturas mistas. Os de  $G_c$  elevam-se a 179,00 N/m para as roturas argamassa e 158,00 N/m para as roturas mistas;

(iii) Enquanto com os ensaios de tracção directa, o epóxico utilizado tinha conduzido a roturas no betão, com a aplicação da mecânica da fractura obtivemos algumas roturas mistas mesmo com as superfícies de colagem do betão secas.

## REFERÊNCIAS

Aguiar, J. L. e al, "Mechanical behaviour of adhesive joints such as a concrete epoxy" in Proceedings of Conference on Mechanical Behaviour of Adhesive Joints, Saint-Etienne, France, 1987.

Lamouri, R., "Analyse de la liaison adhésive entre un liant époxydique et le béton hydraulique". Thèse présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1984.

Paillère, A. M. e al, "Influence de la nature et de la granularité de la charge sur l'adhérence des résines époxydes au béton durci sec et humide", in Proceedings of Conference on Adhesion between Polymers and Concrete, Aix-en-Provence, France, 1986.

Srawley, J. E. e Gross, B., "Stress intensity factors for crackline-loaded edge-crack specimens", Mater. Res. Stds 7(4), 1967, 155-162.

Troncy, M., "Etude de la liaison adhésive, entre un liant époxydique et le béton", Mémoire présenté à l'Université de Clermont II, Aubière, France, 1985.