

# DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE RESINAS EPOXÍDICAS E ARGAMASSAS HIDRÁULICAS

José Barroso de Aguiar\*

Correio electrónico: [aguiar@civil.uminho.pt](mailto:aguiar@civil.uminho.pt)

## Resumo

A determinação da aderência entre polímeros e argamassas coloca alguns problemas. A utilização de ensaios tradicionais como tracção directa, flexão ou corte, normalmente não permite a determinação do valor numérico da aderência. Quando o ligante é bom e a colagem é bem executada, a rotura ocorre na argamassa. Este tipo de roturas permite concluir que a aderência é superior ao valor da tensão de rotura obtida, não sendo possível dizer qual o valor numérico da aderência. Utilizando um ensaio baseado na mecânica da fractura é mais fácil a determinação da aderência. Os provetes com entalhe permitem a concentração de tensões na junta polímero/argamassa. Assim, as roturas adesivas são mais frequentes, permitindo a determinação do valor numérico da aderência. O provete escolhido para este estudo foi o DCB (“double cantilever beam”). Os materiais utilizados foram uma resina epoxídica e uma argamassa normal. Os ensaios de tracção directa das colagens entre estes dois materiais conduziram a roturas na argamassa. No entanto, nos ensaios com provetes DCB obtiveram-se sempre roturas mistas.

Para a determinação da energia de fractura ( $G_f$ ) é necessário conhecer o comprimento da fissura. Este parâmetro altera-se durante o ensaio, não sendo fácil a sua determinação em cada instante. Para esta determinação, utilizaram-se três métodos: emissão acústica, colocação de um deflectómetro no meio do caminho de fissura e complacência. O método da complacência revelou-se mais adequado. Outro problema é o desvio das fissuras para fora do seu caminho esperado. Para evitar estes desvios, reforçaram-se os provetes exteriormente, colando placas de aço. Assim, conseguiu-se que as roturas seguissem o caminho de propagação esperado. Por último, para evitar o reforço exterior, utilizaram-se provetes DCB com secção variável. Estes provetes comportaram-se bem durante os ensaios.

*Palavras-chave:* Resinas epoxídicas, Aderência, Energia de fractura.

---

\* Prof. Associado da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Grupo de Materiais de Construção.

## 1 Introdução

A aderência encontra-se entre as propriedades mais importantes dos produtos e sistemas de reparação de estruturas de betão. Normalmente a aderência determina-se através de ensaios de tracção, corte ou flexão [1, 2]. Os ensaios tradicionais não são totalmente correctos para determinação da aderência. Quando ocorrem roturas na argamassa ficamos sem saber o valor numérico da aderência.

Nesta comunicação apresentaremos dois ensaios baseados na mecânica da fractura. A utilização de provetes entalhados permite concentrar as tensões [3] na junta polímero/argamassa e as roturas adesivas são mais frequentes. Este tipo de roturas permite a determinação do valor numérico da aderência.

O provete escolhido foi o DCB “double cantilever beam” [4], porque possui um comprimento maior para a propagação da fissura. Os provetes para flexão três ou quatro pontos, têm apenas cerca de 10 cm de comprimento para propagação da fissura. Os provetes DCB têm cerca de 25 cm de comprimento para propagação da fissura.

## 2 Preparação dos Ensaios

Utilizou-se argamassa normal [5], confeccionada com cimento portland de elevada resistência. Com vista a determinar a influência da humidade da argamassa, utilizaram-se alguns provetes secos e outros húmidos no momento da colagem. A resina epoxídica utilizada tem um endurecedor à base de poliamina alifática. Para obter boa aderência com superfícies húmidas, adicionou-se à resina epoxídica uma carga calcária (20%) [6].

As dimensões dos provetes DCB foram as indicadas nas figuras 1 e 2. Utilizaram-se dois tipos de provetes, DCB com altura constante e DCB com altura variável. Este último tipo de provete foi utilizado com vista a facilitar a preparação dos ensaios, dispensando o reforço exterior que se revelou necessário para os provetes DCB com altura constante (Figs. 3 e 4).

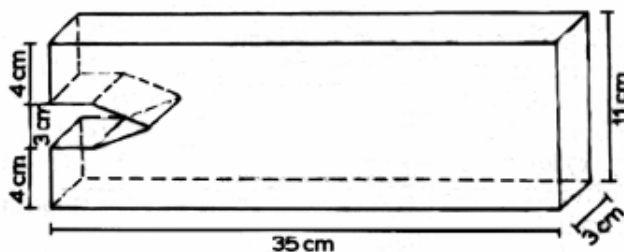


Figura 1: Dimensões do provete DCB com altura constante.

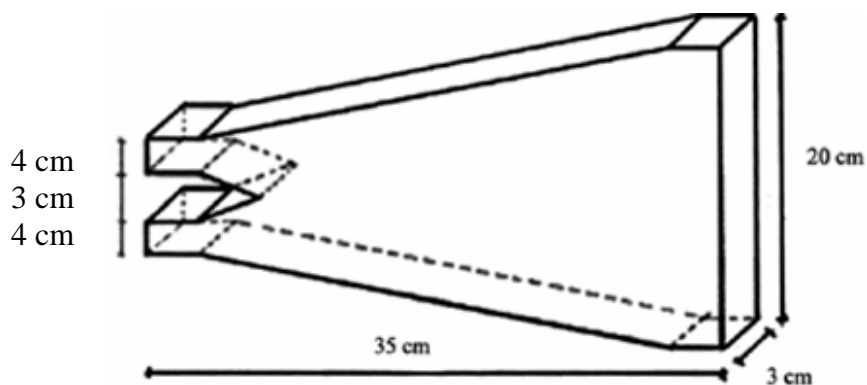


Figura 2: Dimensões do provete DCB com altura variável.



Figura 3: Caminho de fissura e reforço exterior dos provetes.

Depois da argamassa endurecer 28 dias, serraram-se os provetes em duas metades. Estas foram colocadas dentro de água, logo após a serragem. Para as colagens com superfície seca, retiraram-se os meios provetes de dentro de água 7 dias antes. Para colar com superfície húmida, retiraram-se os meios provetes de argamassa de dentro de água no momento da colagem. A superfície de argamassa resultante da serragem foi escovada com uma escova de aço, por forma a retirar todas as partículas friáveis e não aderentes. Os meios provetes com superfície seca foram limpos com um jacto de ar comprimido.



Figura 4: Provete argamassa/resina epoxídica com reforço exterior.

O sistema epoxídico foi cuidadosamente espalhado com uma espátula, sobre as superfícies de cada meio provete resultantes da serragem. Depois do tempo de espera exigido que depende da cinética de polimerização da resina epoxídica, colaram-se as duas metades do provete. Utilizaram-se pequenas placas com 1 mm de espessura, por forma a obter sempre uma junta de colagem com esta espessura que um estudo anterior [6], mostrou ser a mais conveniente. Depois da colagem, mantiveram-se os provetes numa superfície plana durante 72 horas à temperatura de  $20\pm 2$  °C. De seguida colocaram-se dentro de água à temperatura de  $20\pm 1$  °C.

Sete dias após a colagem, criaram-se por serragem, caminhos de fissura (Fig. 3), de cada lado dos provetes. Estas cavidades tinham 7,5 mm de largura e 3 mm de profundidade. Para assegurar que a fissura se propagará até à outra extremidade do provete, colaram-se quatro placas de aço com 3 mm de espessura (Figs. 3 e 4). Este reforço efectuou-se apenas nos provetes DCB com altura constante. Os provetes DCB com altura variável dispensam este reforço. Para possibilitar a ligação à máquina de tracção colaram-se duas peças metálicas de cada lado dos provetes.

### 3 Ensaios

Em primeiro lugar efectuámos alguns ciclos de carga-desgarga para criar uma frente de fissura bem marcada e para eliminar todos os problemas relacionados com o sistema de ensaio que podem originar falta de linearidade na curva carga-deslocamento. Efectuaram-se dez ciclos com uma carga máxima de 0,20 kN e com uma velocidade de 240  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Terminado o

décimo ciclo iniciámos o verdadeiro ensaio. A velocidade foi alterada para 10  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

Quando observámos uma ligeira descida da carga, parámos a máquina e deixámos a fissura propagar-se durante 15 minutos com um deslocamento imposto. A carga aplicada descia ao longo desse tempo. Depois voltámos a ligar a máquina e a carga subia até uma nova descida e conseqüente paragem da máquina durante 15 minutos. Seguindo este procedimento efectuaram-se três ciclos de carga-descarga (Fig. 5).

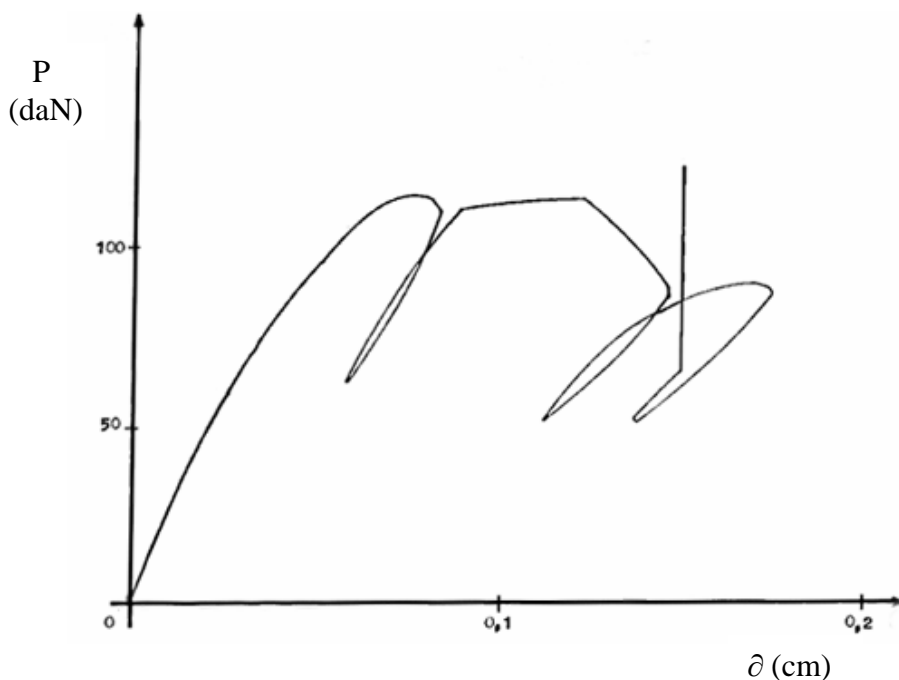


Figura 5: Variação da carga com o deslocamento.

O principal objectivo da primeira série de ensaios foi a comparação de diferentes métodos de determinação do comprimento da fissura ao longo do ensaio. Três métodos foram escolhidos: emissão acústica, deflectómetro no meio do caminho de fissura e complacência. Para o método designado por emissão acústica, colocaram-se quatro receptores nos provetes, um em cada canto (Fig. 6). Quando a fissura está em propagação, o processo de rotura origina ruídos que são detectados pelos receptores de emissões acústicas. A localização do ponto de origem desse ruído efectua-se analisando os tempos de chegada a três dos receptores e relacionando-os com o tempo de chegada ao quarto [7].

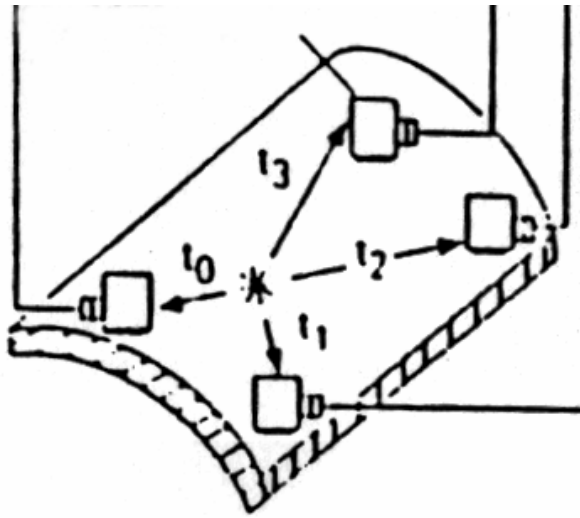


Figura 6: Posicionamento dos receptores de emissões acústicas.

O deflectómetro no meio do caminho de fissura possibilita a determinação do instante em que a frente de fissura está situada nessa posição. Podemos dizer que nesse instante o seu comprimento é cerca de metade do valor máximo possível. Este método não pode ser utilizado isoladamente. Há necessidade de utilizar outro método para esclarecer como varia o comprimento da fissura antes e depois do ponto onde o deflectómetro foi colocado.

O método da complacência consiste na determinação, utilizando o método dos elementos finitos, da complacência do provete que corresponde a um dado comprimento da fissura. Com esta informação é possível estimar o comprimento da fissura, durante os ensaios, conhecendo a complacência que corresponde a cada ciclo.

A energia de fractura é uma característica do material. Assim, os valores determinados por diversos métodos deveriam ser iguais. Durante os ensaios encontramos alguma variação. A dispersão foi menor no método da complacência. Este método apresenta ainda algumas vantagens experimentais, porque não é necessário colar peças extra para determinar os comprimentos da fissura. Assim, na última série de ensaios apenas utilizámos o método da complacência.

Na figura 7 podemos observar a variação da complacência com o comprimento da fissura, no caso dos provetes DCB com altura constante. Tendo em conta as expressões geralmente utilizadas para determinação da energia de fractura,  $G$ , podemos dizer que a curva da figura 7 é do 3º grau.

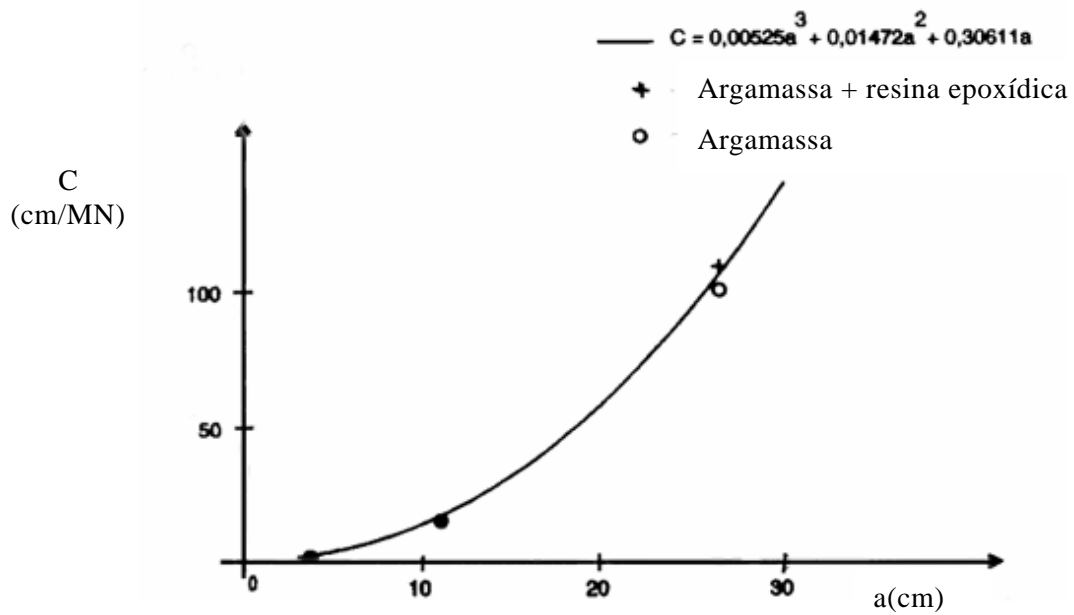


Figura 7: Variação da complacência dos provetes com o comprimento da fissura.

A energia da fractura pode ser calculada utilizando a fórmula seguinte:

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

em que:

- $P$  – carga aplicada;
- $B$  – espessura do provete;
- $C$  – complacência;
- $a$  – comprimento da fissura.

A fórmula de *Srawley* [8], é a seguinte:

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

em que:

- $h$  – altura do provete;
- $E$  – módulo de elasticidade.

Igualando as fórmulas (1) e (2):

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

Como  $B$ ,  $h$  e  $E$  são constantes:

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

e

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

Como para  $a=0$ ,  $C=0$ , a equação (5) é da forma seguinte:

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

Para que a curva passe pelos três pontos determinados com os cálculos baseados no método dos elementos finitos (Fig. 7):

$$C = 0,00525a^3 + 0,01472a^2 + 0,3061a \quad (7)$$

válida com:

$C$  em  $\text{cm.MN}^{-1}$

$a$  em  $\text{cm}$ .

Derivando a equação (7) em ordem a  $a$ :

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

Substituindo a equação (8) em (1):

$$G = \frac{P^2}{2B} (0,01575a^2 + 0,02944a + 0,30611) \quad (9)$$

válida com:

$G$  em  $\text{MN.cm}^{-1}$ ;

$P$  em  $\text{MN}$ ;

$a$  e  $B$  em  $\text{cm}$ .

Para os provetes DCB com altura variável seguindo o mesmo raciocínio, obtivemos:

$$G = \frac{P^2}{2B} (0,007271a^2 + 0,04240a + 0,39667) \quad (10)$$

válida com:

$G$  em  $\text{MN.cm}^{-1}$ ;

$P$  em  $\text{MN}$ ;

$a$  e  $B$  em  $\text{cm}$ .



## 4 Resultados

Efectuaram-se também alguns ensaios com provetes padrão (apenas de argamassa). Estes provetes não foram serrados. A utilização destes provetes permitiu determinar a energia de fractura da argamassa. Ensaíram-se três provetes sendo a média dos resultados de 61,26 N/m. Os valores médios dos resultados obtidos com os provetes argamassa/resina epoxídica apresentam-se na tabela 1. Cada valor apresentado corresponde à media de três resultados.

**Tabela 1: Energia de fractura das colagens argamassa/resina epoxídica.**

Tipo de provete	Estado de superfície	G (N/m)	Tipo de rotura
Altura constante	Seco	42,61	45% argamassa
Altura constante	Húmido	22,65	0% argamassa
Altura variável	Seco	23,68	40% argamassa
Altura variável	Húmido	8,34	0% argamassa

Com os provetes DCB não se obtiveram roturas 100% argamassa. Num estudo anterior com ensaios de tracção directa [6], para o mesmo tipo de colagens obtiveram-se sempre roturas na argamassa. Assim, a determinação da aderência com provetes DCB é mais fácil. Com roturas na argamassa não é possível concluir sobre o valor numérico da aderência.

Tal como se esperava, quando a superfície da argamassa está húmida a aderência diminui significativamente. A redução é de cerca de 47 % para os provetes com altura constante e de cerca de 65 % para os provetes com altura variável. Os provetes com altura variável dispensam o reforço exterior, mas a energia de fractura diminui significativamente. A redução situa-se entre 44 e 63%.

## 5 Conclusões

A utilização de um ensaio baseado na mecânica da fractura para determinar a aderência entre argamassas hidráulicas e resinas epoxídicas revelou-se mais adequada que a utilização de outros ensaios como tracção, flexão ou corte. A concentração de tensões na junta origina mais roturas adesivas, tornando possível a quantificação da aderência.

Os provetes DCB com altura constante necessitam de um reforço exterior com placas de aço para evitar o desvio da fissura. Sem o reforço a fissura não segue o caminho desejado até à outra extremidade do provete. Os provetes DCB com altura variável dispensam o reforço exterior. No entanto, os valores da aderência diminuíram, sendo necessário efectuar mais ensaios para clarificar esta situação. Quando as colagens se efectuam com a superfície da

argamassa húmida verifica-se uma redução da aderência relativamente à das colagens com superfície seca.

## 6 Bibliografia

- [1] *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity - Part 9: General Principles for the Use of Products and Systems*, ENV 1504-9. Bruxelas: CEN, Comité Europeu de Normalização, 1997.
- [2] Sasse, H. R. & Stenner, R. *Adhesion and the new series of european standards on protection and repair of concrete structures*. 2nd International Symposium Adhesion between Polymers and Concrete, Dresden, Setembro 1999, pp. 485-494.
- [3] Inglis, C. E. *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*. Transactions of Institute of Architecture, Vol. 55, 1913.
- [4] *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints, ASTM D3433-93*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06, 1997.
- [5] *Sable Normal et Mortier Normal, NF P 15-403*. Paris: Associação Francesa de Normalização, 1963.
- [6] Aguiar, J. B. *Evaluation method for adhesion test results of bonded wet concrete to epoxies*. 2nd International Symposium Adhesion between Polymers and Concrete, Dresden, Setembro 1999, pp. 247-256.
- [7] Aguiar, J. B. *et al. Mechanical behaviour of adhesive joints such as a concrete epoxy*, European Mechanics Colloquium 227, Mechanical Behaviour of Adhesive Joints, Saint-Etienne, Agosto 1987, pp. 249-256.
- [8] Srawley, J. E. & Gross, B. *Stress intensity factors for crackline-loaded edge-crack specimens*, Materials, Research and Standards, Vol. 7, 4, 1967, pp. 155-162.