

Comportamento à tracção uniaxial aos 28 dias de argamassa reforçada com fibras de vidro

Joaquim A. O. Barros¹

Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO

No presente trabalho o comportamento à tracção de argamassa reforçada com fibras de vidro é caracterizado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial sob controlo de deslocamentos. As propriedades avaliadas foram determinadas em provetes com 28 dias. Foram efectuados ensaios com provetes fabricados segundo a técnica convencional de amassadura e segundo a técnica do betão projectado. Utilizou-se fibras de alta resistência aos meios alcalinos e alguns provetes incluíam um polímero que aumenta a durabilidade das propriedades deste compósito. É proposto um modelo simplificado para simular o comportamento à tracção uniaxial deste compósito.

1 - INTRODUÇÃO

O reforço de produtos plásticos foi, muito provavelmente, a primeira área de aplicação de fibras de vidro. A melhoria de algumas propriedades físicas e mecânicas, conseguida por intermédio do reforço com fibras de vidro tipo *E* (Biryukovich 1965), estimulou a investigação no domínio do comportamento de materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras de vidro (*BRFV*). Contudo, cedo se verificou que a fibra de vidro tipo *E* era pouco resistente aos meios alcalinos, característicos das composições à base de Cimento Portland Ordinário (*CPO*). Durante as décadas de 70 e 80 vários trabalhos (Stucke 1976, Majumdar 1980, Proctor 1982) revelaram que as propriedades do compósito beneficiadas pelo reforço das fibras degradavam-se acentuadamente durante a vida deste compósito. A deterioração das propriedades das fibras de vidro em meios alcalinos foi encarada como sendo a causa principal do envelhecimento acelerado deste material.

Na tentativa de resolver esta deficiência, a companhia inglesa *Pilkington Brothers, Ltd* desenvolveu e introduziu no mercado, em 1971, uma fibra de vidro de alta resistência aos meios alcalinos, comercializada segundo a designação de *Cem-FIL 1*. Nos anos que se seguiram firmas japonesas e americanas introduziram no mercado fibras de vidro com atributos semelhantes.

Apesar da maior resistência destas fibras aos meios alcalinos, a durabilidade dos *BRFV* não aumentou significativamente. A degradação das propriedades deste compósito ao longo da sua vida foi principalmente atribuída à reacção química entre os produtos da hidratação do *CPO* e os componentes da fibra de vidro. A utilização simultânea de cimentos de baixo teor alcalino e fibras de vidro de alta resistência aos meios alcalinos permitiu obter compósitos mais duráveis, mas o problema da degradação das propriedades destes compósitos não foi

plenamente solucionado, principalmente quando os compósitos são submetidos a ambientes húmidos.

Diversos materiais inorgânicos tais como pozolanas, cinzas volantes e escórias de altos fornos foram também utilizados na tentativa de aumentar a durabilidade dos *BRFV*, dado que estes materiais, quando adicionados ao cimento, reagem com os produtos hidratados do cimento reduzindo a percentagem de hidróxidos de cálcio, principal produto responsável pela progressiva fragilização dos *BRFV*. Um aumento considerável da durabilidade dos *BRFV* foi registado quando se substituiu 35% do peso de cimento por cinzas volantes finas (Leonard 1984, Bentur 1986). Como razão principal para este comportamento foi apontada a diminuição de produtos hidratados em torno dos filamentos que constituem a fibra de vidro, devido ao facto destes espaços terem sido ocupados pelas partículas finas das cinzas volantes.

Em 1979 uma segunda geração de fibras de alta resistência foram lançadas no mercado pela Pilkington Brothers Ltd com a designação comercial de *Cem-FIL 2*. Esta fibra tem na sua composição química um produto que inibe a acumulação de compostos calcários na sua superfície.

Na mesma época a companhia holandesa Forton BV desenvolveu um compósito designado comercialmente por Forton-*PGFRC* (*Polymer modified Glass Fiber Reinforced Cement*) que era constituído por uma argamassa reforçada com fibras de vidro e incluindo um polímero. Os primeiros produtos de *PGFRC* continham fibras de vidro tipo *E* e um polímero acrílico. As partículas finas do polímero envolvem as fibras protegendo-as tanto da agressividade química do meio ambiente como do seu envolvimento pelos produtos hidratados do cimento. Bijen (Bijen 1983) registou um aumento significativo na durabilidade das propriedades dos compósitos de fibras de vidro expostos a condições naturais quando estes compósitos incluíam o referido polímero. Todavia, em ambientes húmidos, principalmente em produtos imersos em água, o efeito do polímero na durabilidade das propriedades do compósito de matriz cimentícia é bastante menos pronunciado (Bijen 1983, Bijen 1990).

Nos últimos anos tem-se assistido a uma melhoria das propriedades das fibras no que respeita à sua resistência aos meios alcalinos, tanto por intermédio de tratamentos da superfície da fibra como da sua própria constituição química, pelo que maiores durabilidades são apontadas (Fyles 1986) aos compósitos reforçados com este tipo de fibras.

Cimentos especialmente vocacionados para os *BRFV* começaram a ser desenvolvidos na década de 80, principalmente no Japão e China. Atribuiu-se como razões principais para o aumento da durabilidade dos *BRFV* realizados com estes cimentos a sua baixa alcalinidade e a inexistência de hidróxidos de cálcio nos espaços entre os filamentos da fibra de vidro (Akihama 1987, Takada 1987).

O *BRFV* produzido por intermédio da técnica convencional de amassadura ou por meio da técnica do betão projectado tem-se revelado um material promissor para diversas aplicações da indústria da construção civil (Majumdar 1991, Laffarga 1996, Comino 1996). Para tal contribuem os seguintes principais factores: relativa facilidade de realizar peças com geometria complexa, com secções delgadas e com diferentes acabamentos; boas propriedades físicas e melhores propriedades mecânicas que os correspondentes materiais não reforçados com fibras.

Neste trabalho apresenta-se os principais resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial efectuados com argamassas reforçadas com fibras de vidro (*ARFV*) produzidas pela Companhia Forton BV e com *ARFV* produzidas no Stevin Laboratory (laboratório da Universidade de Delft, Holanda). Os resultados obtidos referem-se aos 28 dias de idade dos provetes.

2 - ENSAIOS DE TRACÇÃO UNIAXIAL SOB CONTROLO DE DESLOCAMENTOS

2.1 - Principais características das composições de *ARFV* fabricadas no Stevin Laboratory

Alguns dos provetes ensaiados foram fabricados no *Stevin Laboratory (SL)* segundo a técnica convencional de amassadura (*TCA*), tendo-se utilizado o equipamento e procedimentos usualmente aplicados na realização de materiais convencionais de matriz cimentícia. Todavia, algumas alterações foram introduzidas por forma a ser garantida a necessária trabalhabilidade da mistura e a ser obtida uma composição que permita evidenciar o reforço proporcionado pela participação das fibras (Barros 1992). Os parâmetros estudados para este fim foram, fundamentalmente, a relação areia/cimento (*i/c*), a relação água/cimento (*a/c*), tipo e quantidade de aditivo, percentagem de fibras, técnica de amassadura e processo de introduzir as fibras na mistura.

Do trabalho relativo à composição de *ARFV*, de avaliação da trabalhabilidade das correspondentes misturas e da quantificação das suas propriedades mecânicas pode-se apontar as seguintes principais conclusões:

- a introdução de fibras de vidro na composição de argamassas melhora as propriedades mecânicas do material se a composição for adequada para activar os mecanismos de reforço das fibras, tais como a aderência e a resistência ao arranque das fibras relativamente à matriz envolvente. Uma composição adequada para misturas a serem amassadas segundo a técnica convencional deve ser caracterizada pelos seguintes principais requisitos: inertes/cimento (*i/c*) entre 1.0 e 1.33; água/cimento (*a/c*) entre 0.3 a 0.4; 2% a 3% em peso de fibras; utilizar um adequado aditivo que garanta a necessária trabalhabilidade sem aumentar a percentagem de água (o ensaio de abaixamento do cone de Abrams não é adequado para aferir a trabalhabilidade das misturas fibrosas); as fibras devem ser introduzidas lentamente na mistura por forma a evitar a sua aglomeração;

- a resistência à flexão e tracção aumentam com a percentagem de fibras desde que estas sejam adequadamente introduzidas nas composições. A resistência à compressão é principalmente regida pelas propriedades da matriz (factores *a/c* e *i/c*). O reforço de 2.4% em peso de fibras permitiu, aos 28 dias, duplicar a resistência à flexão de provetes de 160×40×40 mm³ ensaiados sob três pontos de carga.

2.2 - Considerações gerais relativas a ensaios de tracção uniaxial

A investigação desenvolvida nos últimos anos tem evidenciado que para percentagens de fibras utilizadas nas aplicações de uso corrente, o comportamento pós fendilhação é o mais favorecido pelo reforço das fibras. Este benefício pode ser avaliado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial sob controlo de deslocamentos. A investigação realizada no domínio do comportamento à tracção de materiais frágeis é, contudo, limitada devido às dificuldades inerentes a estes ensaios. Para se realizar ensaios estáveis de tracção uniaxial sob controlo de deslocamentos é necessário recorrer a equipamentos bastante rígidos, e os transdutores que controlam o ensaio devem registar, tanto quanto possível, somente o estado de deformação que se desenvolve na zona de fractura, por forma a diminuir a probabilidade de ocorrência de descargas instáveis após o pico de carga (Hordijk 1991). Deve-se ainda evitar o desalinhamento do provete relativamente à direcção de actuação da carga, para não introduzir estados iniciais de tensão desconhecidos. As estruturas que garantem a fixação do provete ao equipamento devem possuir rigidez rotacional suficiente que impeça o desenvolvimento de extensões por flexão do provete, assegurando, assim, um estado de deformação o mais uniforme possível na secção do provete (Wang 1990).

2.3 - Preparação dos provetes

No Quadro 1 apresenta-se as principais características das composições relativas aos provetes manufacturados no *SL*. Estes provetes foram obtidos a partir do corte de cubos de 150 mm de lado. Os cubos ficavam cobertos com uma folha de polietileno até ganharem rigidez suficiente para serem desmoldados. Após desmoldados os provetes permaneciam dentro de água. Aos 22 dias de cura os cubos foram retirados do tanque de água, tendo sido cortados na direcção ortogonal à direcção de betonagem, dando origem aos provetes de tracção com 150×60×50 mm³, que permaneceram no ambiente natural do laboratório até serem ensaiados.

Quadro 1 - Principais características das composições dos provetes manufacturados no *Stevin Laboratory*.

Parâmetros	Composição	
	<i>AS</i> ⁽¹⁾	<i>ARFV</i>
<i>i/c</i> ⁽²⁾	1	1.33
<i>a/c</i> ⁽²⁾	0.35	0.4
Fibras ⁽³⁾	2.4	-
Plastificante	2.6 ⁽⁴⁾	3.0 ⁽⁴⁾

- (1) - Argamassa simples
 (2) - Em peso. Os inertes eram constituídos por areias com 1 mm de dimensão máxima.
 (3) - Percentagem em volume da composição total.
 (4) - Plastificante *Melment L10* em percentagem do peso do cimento.

A companhia *Forton BV* disponibilizou quatro painéis de 755×605×50 mm³ de argamassa reforçada com fibras de vidro e incluindo um polímero (*PGFRC*), dois obtidos por intermédio da técnica convencional de amassadura (*TCA*) e os outros dois segundo a técnica do betão projectado (*TBP*). No Quadro 2 apresenta-se as correspondentes composições.

Quadro 2 - Composições dos provetes de *PGFRC*.

Constituinte (Kg)	Mistura projectada 5/5 ⁽¹⁾	Mistura amassada 3/7 ⁽²⁾
Cimento <i>PcB</i> ⁽³⁾	50	50
Areia LG 56 ⁽⁴⁾	50	50
Componente <i>VF 774</i> da <i>Forton</i> ⁽⁵⁾	7	10
Água	13	12
Fibras de vidro <i>AR</i>	6.3	3.75
Características		
Água/cimento (em peso)	1.0	1.0
areia/cimento (em peso)	3	2.9
Fibras de vidro <i>AR</i> (% em peso)	5	3
Polímero (% vol. da mistura)	5	7.2
Tipo de fibras de vidro <i>AR</i>	<i>Cem-FIL 250/5B</i> de 31 mm	<i>Cem-FIL 60/2</i> de 12 mm

- (1) - Significa 5% em peso de fibras e 5% em volume de partículas sólidas do polímero (composição típica dos produtos manufacturados segundo a técnica da mistura projectada).
 (2) - Significa 3% em peso de fibras e 7% em volume de partículas sólidas do polímero (composição típica dos produtos manufacturados segundo a técnica convencional de amassadura).
 (3) - Cimento Portland, classe B segundo a norma *NEN 3550*.
 (4) - Areia siliciosa de 0.1-0.6 mm.
 (5) - Polímero acrílico disperso em água e contendo 51 % m/m de partículas sólidas.

Os painéis permaneceram cobertos com uma folha de polietileno até ao seu desmolde. Após o desmolde, os painéis ficaram em estufa à temperatura de 20^o C e 65 % de humidade relativa, sendo transferidos aos sete dias para o *SL* onde permaneceram no ambiente natural do laboratório.

Na Figura 1 representa-se o plano de corte dos provetes *PGFRC*. Para se analisar a influência da direcção de corte dos provetes no comportamento destes em tracção, alguns provetes foram cortados na direcção ortogonal aos restantes.

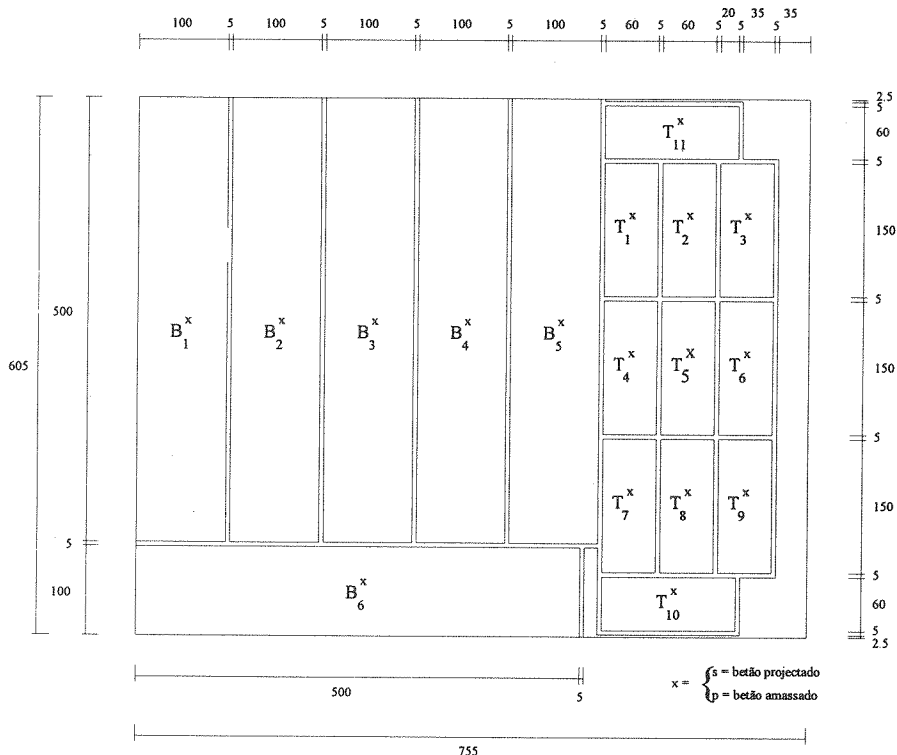


Figura 1 - Plano de corte dos provetes *PGFRC*: T- provetes de tracção; B - provetes de flexão.

2.4 - Equipamento e procedimentos de ensaio

Na Figura 2 inclui-se uma fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de tracção, tendo a sua descrição sido efectuada por Hordijk (Hordijk 1991). Exceptuando a velocidade de deformação, todos os provetes foram ensaiados sob as mesmas condições, por forma a comparar-se o desempenho das diferentes composições e processos de fabrico utilizados na manufacturação dos provetes. Na Figura 3 representa-se esquematicamente a disposição das quatro células de carga de 50 kN utilizadas. Os deslocamentos foram lidos por intermédio de oito transdutores, quatro de 35 mm de campo de medida dispostos nas arestas do provete e albergando a zona de fractura, e os outros quatro de 110 mm de campo de medida aplicados no centro de cada uma das quatro faces do provete, tal como está representado na Figura 4. A fixação dos transdutores ao provete era realizada no dia anterior ao ensaio e era efectuada por meio da colagem dos respectivos suportes em aço, cujas distâncias entre si definiam o campo de medida do respectivo transdutor. O processo de fixação dos transdutores ao provete e deste aos pratos do equipamento é descrito em (Barros 1992). Os sinais dos transdutores eram ampliados, enviados para um computador, convertidos em valores digitais e armazenados em disquete. O controlo do ensaio era efectuada por intermédio da média dos sinais emitidos pelos quatro transdutores de 35 mm de campo de medida. A deformação da zona de fractura era caracterizada por intermédio da média dos deslocamentos lidos nestes transdutores. Os deslocamentos lidos nos transdutores de 110 mm de campo de medida foram utilizados,

fundamentalmente, para quantificar o módulo de elasticidade do material. Os provetes de argamassa simples (*AS*) e os provetes de *ARFV* foram ensaiados com uma velocidade de deformação de $0.08 \mu\text{m/s}$ e $0.16 \mu\text{m/s}$, respectivamente. Em todos os provetes, a secção a meia altura foi reduzida para $30 \times 50 \text{ mm}^2$ por intermédio da aplicação de entalhes.

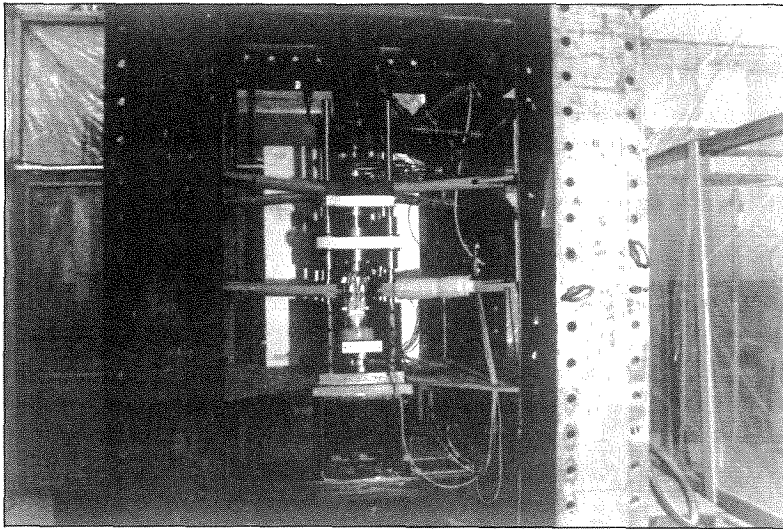


Figura 2 - Foto do equipamento utilizado nos ensaios de tracção uniaxial sob controlo de deslocamentos.

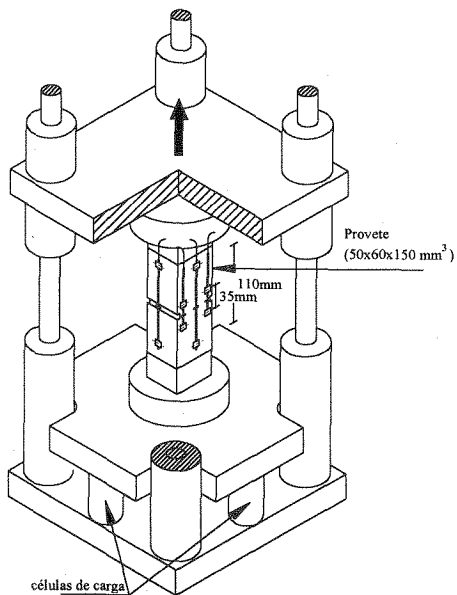
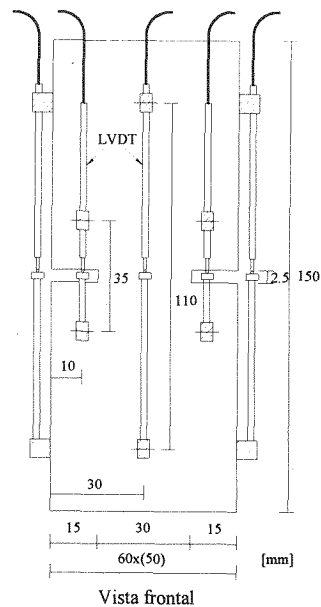


Figura 3 - Disposição das células de carga e dos transdutores de deslocamento.



Vista frontal
Figura 4 - Esquema dos transdutores montados num provete.

2.5 - Resposta dos provetes

2.5.1 - Provetes da Forton produzidos segundo a técnica do betão projectado

Na Figura 5 apresenta-se, para os provetes T_4^s , T_5^s e T_6^s (ver Figura 1), as respostas tensão-deslocamento médio ($\sigma-\delta_m$) nos transdutores correspondentes aos dois tipos de arranjos (35 e 110 mm de campo de medida). O índice s na designação do provete significa que se trata de provete realizado segundo a *TBP*. A tensão é o cociente entre a média das forças lidas nas quatro células de carga e a área da secção entalhada ($30 \times 50 \text{ mm}^2$). A resposta destes provetes entre o início da fendilhação e a máxima carga caracteriza-se por um ramo não linear com desenvolvimento significativo. A resistência de aderência e atrito das fibras à matriz envolvente permitiram que a carga de rotura do compósito tivesse sido significativamente superior à carga de fendilhação da matriz. A extensão deste ramo deverá depender da percentagem e esbelteza (razão comprimento diâmetro da fibra) das fibras utilizadas, devendo ser tanto maior quanto mais elevados forem os valores destas variáveis. Os pequenos ciclos de carga-descarga ocorridos nesta fase devem ser consequência do processo de transferência de carga entre a matriz e as fibras. Da análise da Figura 5 constata-se que as respostas $\sigma-\delta_m$ nos dois arranjos de transdutores são praticamente iguais, o que evidencia que a deformação total é basicamente a desenvolvida na zona de fractura. A profundidade significativa dos entalhes contribuiu para tal facto. Como a deformação é praticamente igual nos dois arranjos de transdutores conclui-se que a relação tensão-extensão, $\sigma-\varepsilon$, correspondente a cada um dos arranjos, é bastante diferente, dado o diferente campo de medida destes aparelhos (35 e 110 mm). Assim, se a extensão for obtida com base no campo de medida do transdutor, a relação $\sigma-\varepsilon$ estará dependente desse campo

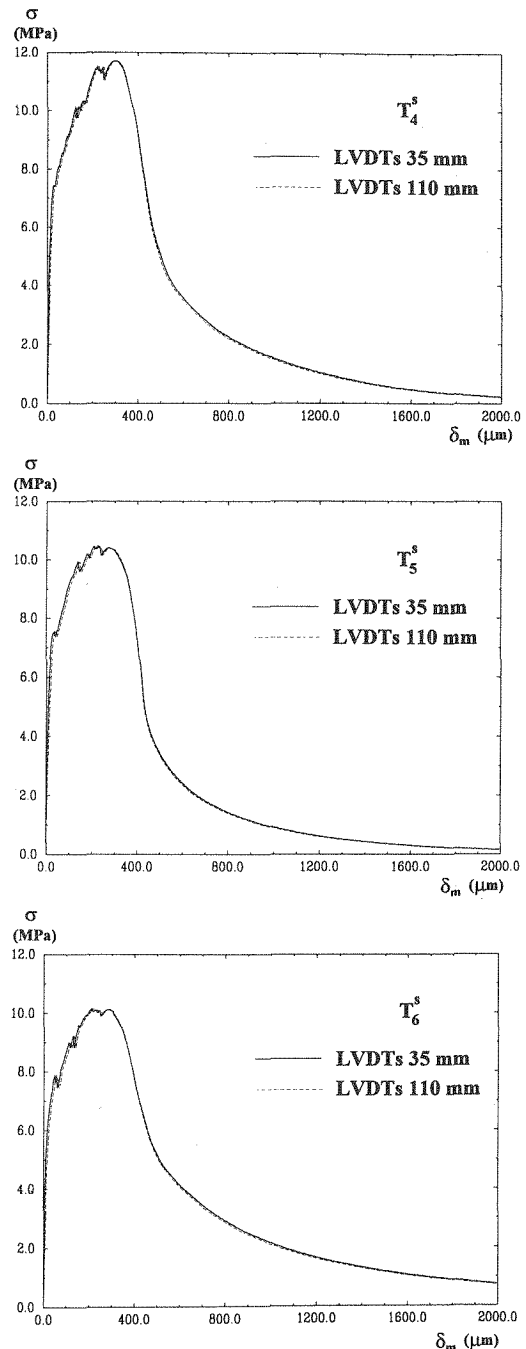


Figura 5 - Resposta tensão-deslocamento médio nos dois arranjos de transdutores dos provetes da Forton T_4^s , T_5^s e T_6^s produzidos segundo a técnica do betão projectado.

de medida, pelo que não é a relação mais apropriada para simular o comportamento do material, principalmente em fase de amolecimento. Nesta fase, a relação tensão-abertura de fenda ($\sigma-w$) é mais adequada, dado que w é a soma da abertura das fendas que se distribuem na zona de fractura, cujo valor é independente da dimensão do campo de medida do transdutor. As relações $\sigma-w$ e $\sigma/f_{ct}-w$ correspondentes aos provetes em análise estão representadas na Figura 6 (f_{ct} é a resistência à tracção do material). Na Figura 6b inclui-se, ainda, a seguinte relação:

$$\frac{\sigma}{f_{ct}} = \left\{ 1 + \left(C_1 \frac{w}{w_u} \right)^3 \right\} \exp \left(-C_2 \frac{w}{w_u} \right) - \frac{w}{w_u} (1 + C_1^3) \exp(-C_2) \quad , \quad (1)$$

proposta por Cornelissen *et al.* (Cornelissen 1986) para os betões simples, em que $C_1=3.0$ e $C_2=6.93$. Para os presentes provetes fibrosos adoptou-se para máxima abertura de fenda, w_u , o valor de $2000 \mu\text{m}$. Da análise da Figura 6b conclui-se que a anterior relação simula com rigor suficiente o comportamento destes provetes em fase de amolecimento.

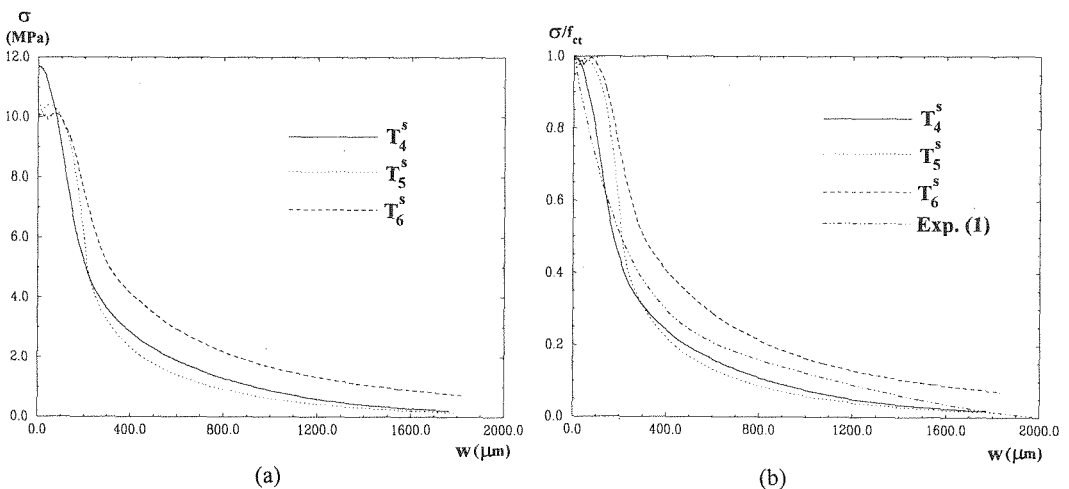


Figura 6 - Resposta tensão-abertura de fenda, $\sigma-w$, (a) e tensão normalizada-abertura de fenda, $\sigma/f_{ct}-w$, (b) dos provetes da Forton T_4^s , T_5^s e T_6^s produzidos segundo a técnica do betão projectado.

O Quadro 3 inclui os principais resultados obtidos nestes provetes.

2.5.2 - Provetes da Forton produzidos segundo a técnica convencional de amassadura

Na Figura 7 apresenta-se as relações tensão-deslocamento médio nos dois arranjos de transdutores, obtidas nos ensaios dos provetes T_5^p , T_6^p e T_{11}^p . O índice p na designação do provete significa que se trata de provete realizado segundo a TCA. Tal como nos provetes manufacturados segundo a TBP, verifica-se que os deslocamentos registados nos dois arranjos de transdutores são idênticos, pelo que as relações $\sigma-\varepsilon$ são dependentes do campo de medida do respectivo transdutor.

Contudo, nos provetes produzidos segundo a *TCA*, o ramo não linear, prévio à carga de rotura, apresenta menor desenvolvimento que o ocorrido nos provetes realizados segundo a *TBP*. A carga de rotura e a capacidade de absorção de energia são também consideravelmente inferiores.

Da análise da Figura 7 verifica-se que a resistência e a capacidade de absorção de energia do provete T_{11}^P é significativamente inferior à dos restantes provetes. Tal comportamento deve estar relacionado com a diferente orientação de corte do provete T_{11}^P relativamente à dos outros dois provetes (ver Figura 1). Após a análise das superfícies de fractura dos provetes verificou-se que o provete T_{11}^P apresentava menor percentagem de fibras oferecendo reforço efectivo que no caso dos outros dois provetes.

Conforme se pode concluir da Figura 8b, a expressão (1) revela-se também adequada para simular o comportamento em amolecimento dos provetes da *Forton* manufacturados segundo a *TCA*, desde que se atribua para máxima abertura de fenda a registada nos ensaios (aproximadamente 2500 μm).

Os valores mais representativos das propriedades avaliadas nos ensaios efectuados nos provetes a que a presente secção diz respeito estão incluídos no Quadro 4.

Confrontando os resultados dos Quadros 3 e 4 conclui-se que os provetes produzidos segundo a *TCA* apresentam menor capacidade de absorção de energia, menor resistência, menor deformabilidade sob a carga de rotura e menor rigidez que os provetes manufacturados segundo a *TBP*. Isto deve-se fundamentalmente ao facto de, nestes últimos, ter sido utilizado maior percentagem de fibras de maior comprimento que se distribuem em camadas paralelas à direcção de actuação da carga.

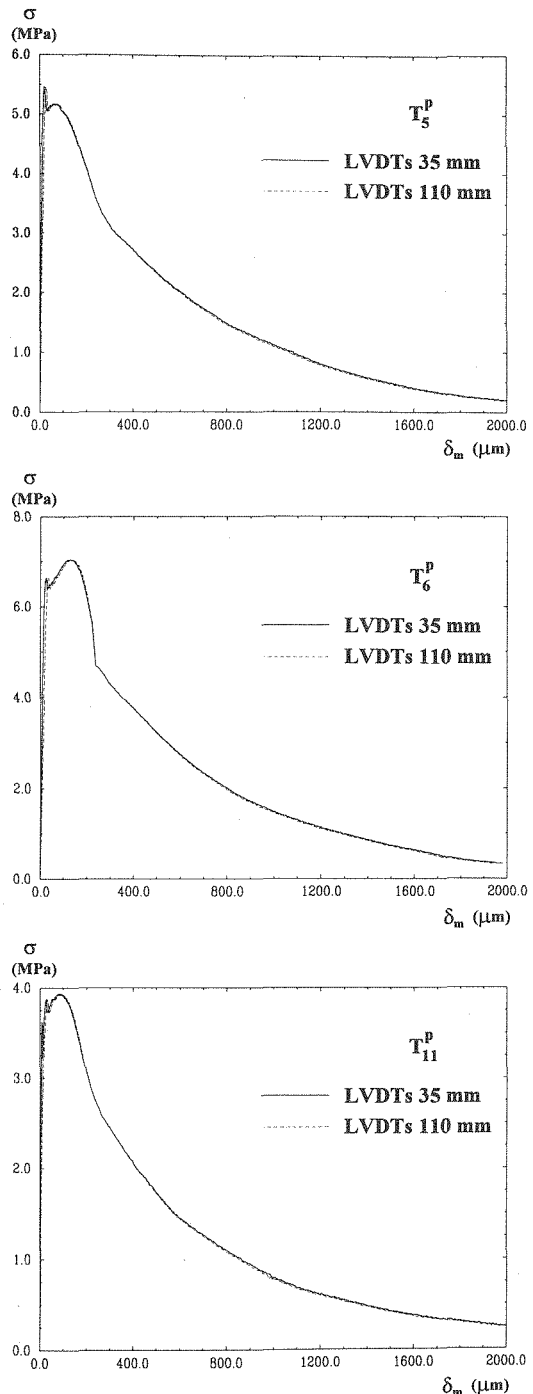


Figura 7 - Resposta tensão-deslocamento médio nos dois arranjos de transdutores dos provetes da *Forton* T_5^P , T_6^P e T_{11}^P produzidos segundo a técnica convencional de amassadura.

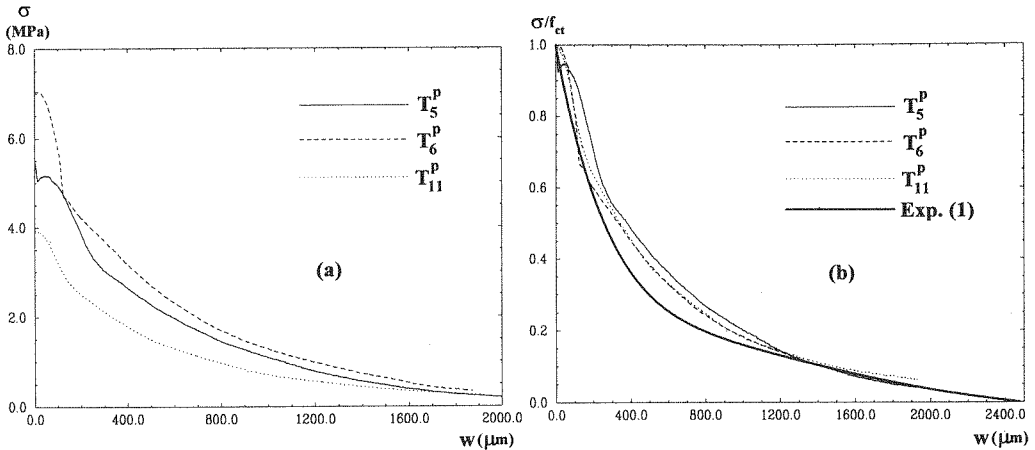


Figura 8 - Resposta tensão-abertura de fenda, $\sigma-w$, (a) e tensão normalizada-abertura de fenda, $\sigma/f_{ct}-w$, (b) nos provetes da Forton T_5^P , T_6^P e T_{11}^P produzidos segundo a técnica convencional de amassadura.

Quadro 3 - Resultados mais significativos obtidos nos ensaios dos provetes da Forton manufacturados segundo a técnica do betão projectado.

	Provete		
	T_4^S	T_5^S	T_6^S
(1) f_{ct} (N/mm ²)	11.7	10.5	10.2
(2) δ_p (l=35 mm) (μ m)	303	227	212
(3) δ_p (l=110 mm) (μ m)	307	233	219
(4) δ_u (l=35 mm) (μ m)	2053	2022	2028
(5) δ_u (l=110 mm) (μ m)	2017	1989	1992
(6) σ_u (N/mm ²)	0.21	0.15	0.71
(7) E_c (N/mm ²)	38544	44088	38832
(8) G_a (N/mm)	6.719	5.482	7.168
(9) G_f (N/mm)	3.842	3.546	5.469

(1) -Máxima tensão. (2) -Média dos deslocamentos lidos nos transdutores de 35 mm de campo de medida no momento correspondente à máxima carga. (3) -Média dos deslocamentos lidos nos transdutores de 110 mm de campo de medida no momento correspondente à máxima carga. (4) -Média dos deslocamentos últimos lidos nos transdutores de 35 mm de campo de medida. (5) -Média dos deslocamentos últimos lidos nos transdutores de 110 mm de campo de medida. (6) -Tensão última. (7) - Valor médio do módulo de elasticidade obtido a partir da relação $\sigma-\varepsilon$ até à leitura correspondente ao limite de proporcionalidade ($E_c = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta\sigma_i / \Delta\varepsilon_i) / (n-1)$ em que n é o número de leituras até ao limite de proporcionalidade). (8) -Energia total dissipada no ensaio. Área sob a curva $\sigma-\delta$. (9) -Energia de fractura (área sob a curva $\sigma-w$).

Quadro 4 - Resultados mais significativos obtidos nos ensaios dos provetes da Forton manufacturados segundo a técnica convencional de amassadura.

	Provete		
	T_5^P	T_6^P	T_{11}^P
(1) f_{ct} (N/mm ²)	5.5	7.0	3.9
(2) δ_p (l=35 mm) (μ m)	20	119	86
(3) δ_p (l=110 mm) (μ m)	27	125	91
(4) δ_u (l=35 mm) (μ m)	2012	1978	2010
(5) δ_u (l=110 mm) (μ m)	1982	1945	1978
(6) σ_u (N/mm ²)	0.19	0.33	0.25
(7) E_c (N/mm ²)	31806	24069	29898
(8) G_a (N/mm)	3.207	4.436	2.475
(9) G_f (N/mm)	3.157	3.738	2.166

Ver notas do Quadro 3.

2.5.3 - Provetes produzidos no Stevin Laboratory

Na Figura 9 inclui-se as relações tensão-deslocamento médio nos dois arranjos de transdutores, obtidas nos provetes de argamassa simples T_{u1}^{SL} e T_{u2}^{SL} e de argamassa reforçada com fibras T_{r1}^{SL} e T_{r2}^{SL} . Verifica-se que estas relações são mais próximas nos provetes fibrosos que nos provetes de argamassa simples.

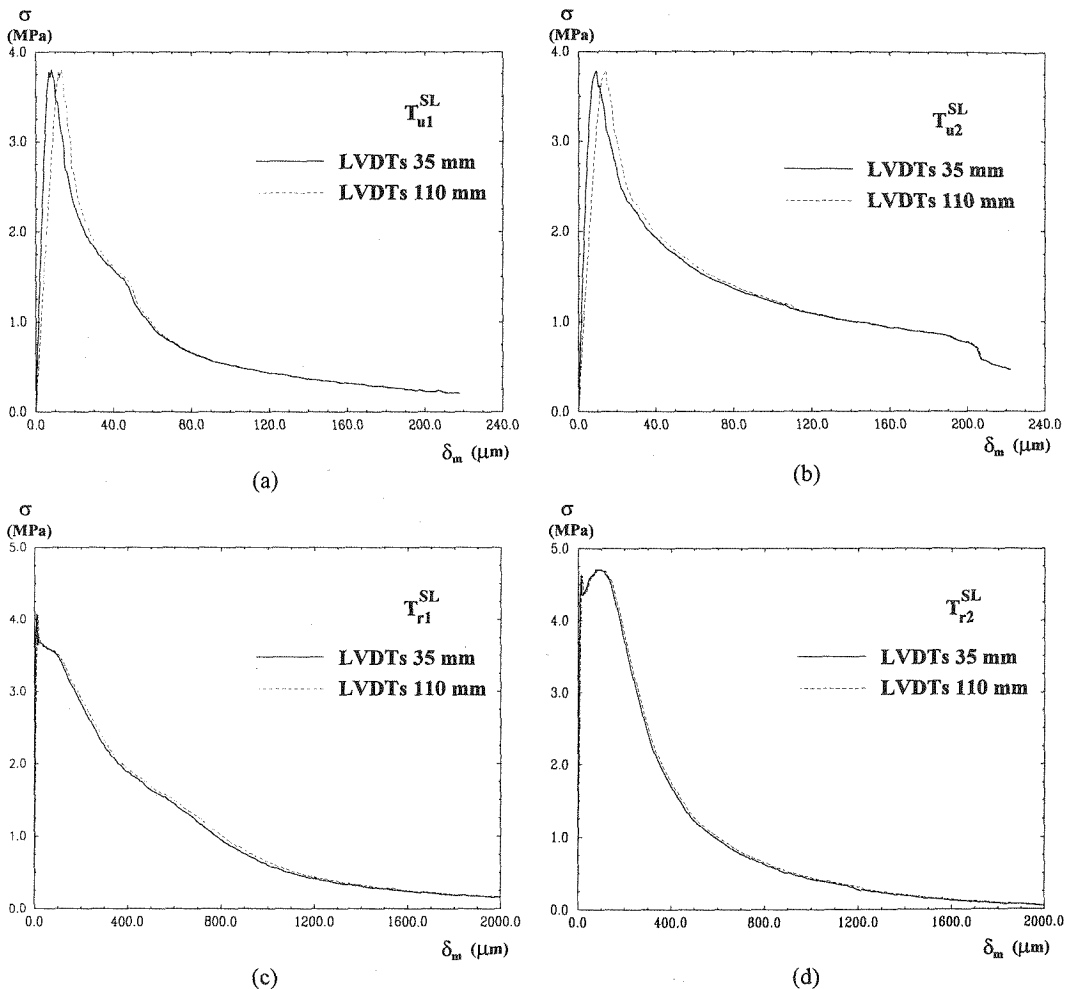


Figura 9 - Resposta tensão-deslocamento médio nos dois arranjos de transdutores dos provetes não reforçados com fibras T_{u1}^{SL} (a) e T_{u2}^{SL} (b) e reforçados com fibras T_{r1}^{SL} (c) e T_{r2}^{SL} (d) produzidos no SL.

Incluindo-se numa mesma figura (Figura 10) as respostas obtidas nos provetes fibrosos e não fibrosos manufacturados no SL conclui-se que a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras é a capacidade de absorção de energia (ver também resultados apresentados no Quadro 5). Até à deformação última dos provetes de argamassa simples, os provetes reforçados com fibras retêm parte substancial da capacidade de carga que possuem no início do amolecimento, pelo que este compósito apresenta um comportamento muito mais dúctil. Da Figura 11 conclui-se que a expressão (1) permite simular com rigor suficiente o comportamento tanto dos provetes de argamassa simples como dos de argamassa reforçada

com fibras de vidro, bastando para tal atribuir à máxima abertura de fenda (w_u) o valor que se extrapola do comportamento experimental destes provetes.

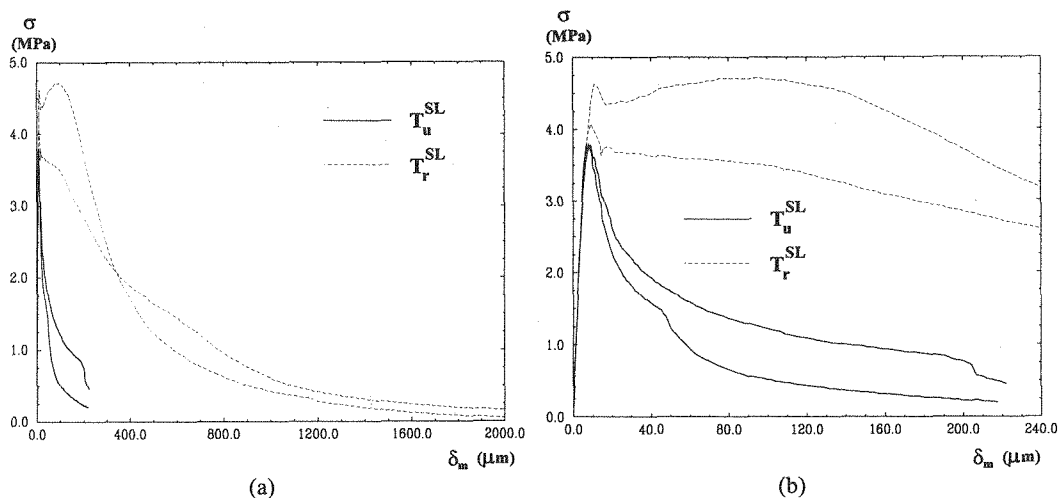


Figura 10 - Resposta total (a) e parcial (b) tensão-deslocamento nos provetes de argamassa simples T_{u1}^{SL} e T_{u2}^{SL} e de argamassa reforçada com fibras de vidro T_{r1}^{SL} e T_{r2}^{SL} .

Quadro 5 - Resultados mais significativos obtidos nos ensaios dos provetes manufacturados no SL segundo a técnica convencional de amassadura.

	Provete (*)			
	T_{u1}^{SL}	T_{u2}^{SL}	T_{r1}^{SL}	T_{r2}^{SL}
(1) f_{ct} (N/mm ²)	3.8	3.8	4.1	4.7
(2) δ_p (l=35 mm) (μm)	8	9	9	95
(3) δ_p (l=110 mm) (μm)	13	14	14	101
(4) δ_u (l=35 mm) (μm)	218	222	2324	2012
(5) δ_u (l=110 mm) (μm)	219	224	2319	2063
(6) σ_u (N/mm ²)	0.2	0.46	0.01	0.05
(7) E_c (N/mm ²)	35657	35837	37929	45209
(8) G_a (N/mm)	0.184	0.303	2.190	2.080
(9) G_f (N/mm)	0.173	0.287	2.156	1.668

Ver notas do Quadro 3

(*) - Significado dos símbolos: SL - Provete realizado no *Stevin Laboratory*; u - Provete não reforçado com fibras; r - Provete reforçado com fibras.

3 - CONCLUSÕES

Tendo em conta o comportamento apresentado pelos provetes ensaiados no presente trabalho, recomenda-se para lei constitutiva em tração a representada esquematicamente na Figura 12.

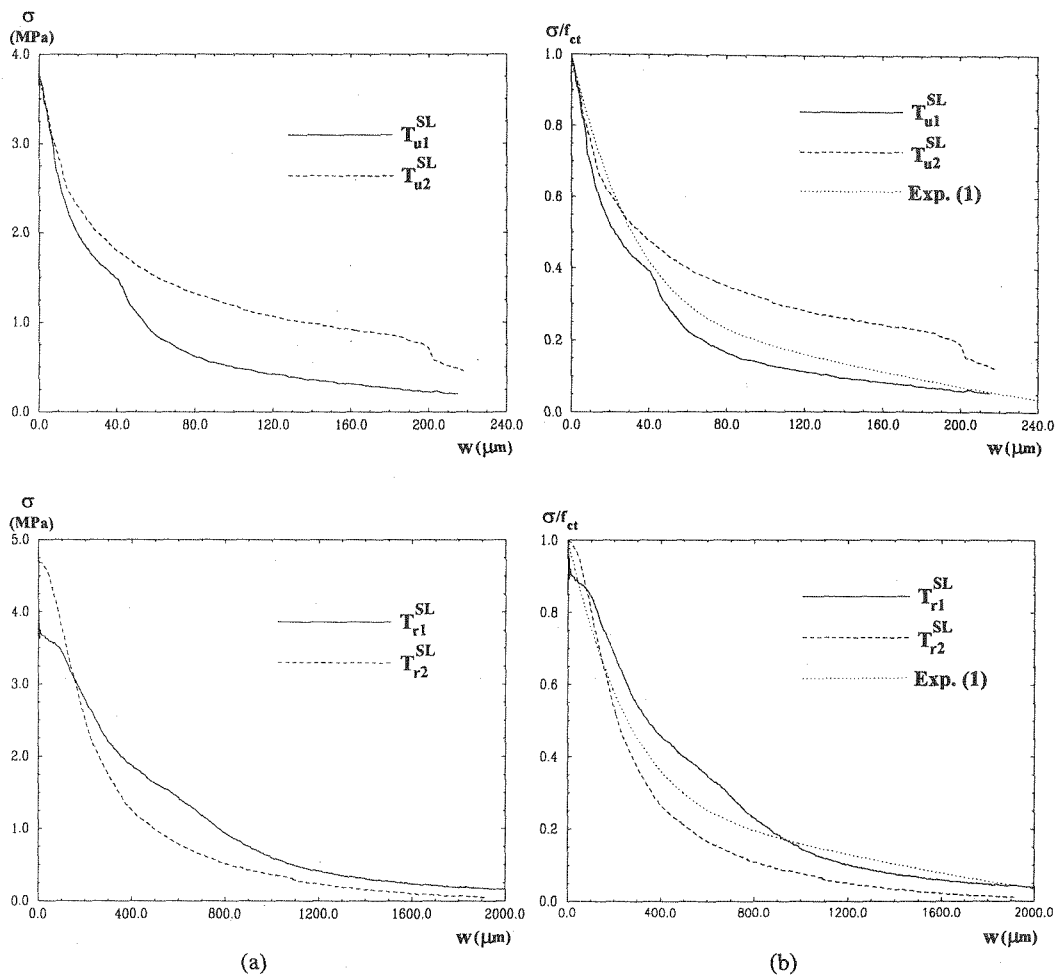


Figura 11 - Resposta tensão-abertura de fenda, $\sigma-w$, (a) e tensão normalizada-abertura de fenda, $\sigma/f_{ct}-w$, (b) nos provetes de argamassa simples T_{u1}^{SL} , T_{u2}^{SL} e de argamassa reforçada com fibras T_{r1}^{SL} , T_{r2}^{SL} manufacturados no SL.

De acordo com esta figura, a deformação do betão fendilhado (Figura 12a) pode ser encarada como a soma da deformação do betão entre fendas (Figura 12b) com a deformação nas fendas (Figura 12c). Até à máxima carga o comportamento à tracção do BRFV pode ser simulado por dois ramos. Um ramo linear até ao início da fendilhação, caracterizado pelo módulo de elasticidade do compósito. Entre o início da fendilhação e a máxima tensão desenvolve-se um ramo não linear cuja extensão depende fundamentalmente das características de reforço do compósito. O parâmetro α define a amplitude deste ramo. Dos resultados obtidos experimentalmente conclui-se que o valor do parâmetro α diminui com o aumento da percentagem e esbelteza das fibras, o que significa que aumenta a extensão do referido ramo não linear. Nos provetes reforçados com 5% em peso de fibras e manufacturados segundo a técnica do betão projectado, o valor de α variou de 0.5 a 0.7. Nos restantes provetes α aproximou-se da unidade, o que significa que, nestes casos, o desenvolvimento do ramo não linear é desprezável.

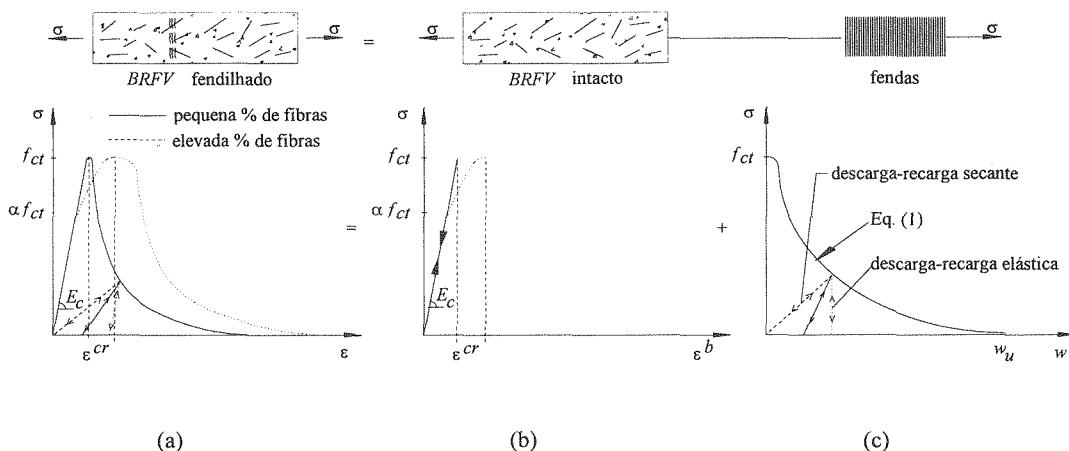


Figura 12 - Lei constitutiva para os compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de vidro.

Da análise do comportamento dos provetes ensaiados conclui-se que o comportamento dos provetes em fase de amolecimento deve ser caracterizado por uma relação tensão-abertura de fenda ($\sigma-w$), dado que nesta fase a relação tensão-extensão ($\sigma-\epsilon$) depende do campo de medida do transdutor. Da comparação entre as respostas experimentais e a prevista pela equação (1) conclui-se que esta expressão é adequada para simular o comportamento em amolecimento dos BRFV. O bom desempenho desta expressão foi confirmado por intermédio da simulação numérica dos ensaios realizados no presente trabalho (Barros 1994).

O comportamento em descarga-recarga na fase de amolecimento dos materiais de matriz cimentícia é usualmente modelado por intermédio de funções secante ou elástica representadas na Figura 12c (Rots 1988). Estas funções são, contudo, limites de comportamento teórico dado que se por um lado a resposta secante não é a mais apropriada, pois o material apresenta sempre alguma deformação residual, por outro lado, o desenvolvimento de fendilhação degrada a rigidez do material sendo por isso inadequada a função de descarga elástica que prevê a mobilização da rigidez intacta do material, como se este estivesse não fendilhado. Nos compósitos fibrosos, as fibras que atravessam as fendas oferecem resistência suplementar ao fecho e reabertura destas, pelo que os compósitos fibrosos apresentam maiores deformações residuais e maior rigidez em descarga-recarga que os correspondentes materiais não reforçados com fibras. Assim, e comparativamente com estes últimos materiais, a lei de descarga-recarga dos BRFV deve-se aproximar mais da resposta elástica. A equação desta lei deve ser função das propriedades da matriz, das propriedades das fibras, nomeadamente da percentagem, esbelteza, rigidez e características geométricas e de superfície, e ainda das propriedades da microestrutura da interface fibra-matriz. A própria deformação instalada no material deve contribuir para a definição desta lei, dado que quanto maior for a deformabilidade alcançada menor será a rigidez da resposta em descarga-recarga e maiores serão as deformações residuais. Essa expressão deve ser conceptualmente semelhante à proposta por Barros para os betões reforçados com fibras de aço (Barros 1995).

No Quadro 6 inclui-se os resultados (valores médios) mais significativos obtidos nos ensaios realizados. Dado o pequeno número de provetes ensaiados, os resultados apresentados do Quadro 6 devem ser encarados a título qualitativo. Dos resultados obtidos verificou-se ainda que:

- o aumento da resistência à tracção só é significativo quando se utiliza percentagens de fibras acima dos 3% em peso, sendo este aumento tanto maior quanto maior for a esbelteza da fibra;

- as propriedades do compósito também dependem do seu processo de fabrico. Aquele que permita a utilização de elevada percentagem de fibras de elevada esbelteza e dispostas nos planos de desenvolvimento das tensões de tracção será o que proporciona maior grau de desempenho mecânico ao compósito;

- o sentido adoptado para corte do provete parece também influenciar as propriedades do compósito, o que revela um sentido preferencial de orientação das fibras que está dependente do processo de fabrico. Este assunto merece uma investigação mais aprofundada.

Quadro 6 - Valores médios dos resultados mais significativos obtidos nos ensaios de tracção uniaxial sob controlo de deformações.

	Provetes de composições realizadas no SL		Provetes de composições da Forton (PGFRC)	
	AS ⁽¹⁾	ARFV ⁽²⁾ ($V_f = 2.4\%$)	MCA ⁽³⁾ ($V_f = 2.6\%$)	MBP ⁽⁴⁾ ($V_f = 4.2\%$)
G_f (J/m ²)	230	1912	3017	4286
f_{ct} (MPa)	3.8	4.4	5.5	10.8
δ_p (μm)	11	55	78	250
δ_u (μm)	300	2350	2550	2200
w_u (μm) ⁽⁵⁾	300	2300	2500	2000
w_c (μm) ⁽⁶⁾	311	2234	2820	2040

(1) - AS = Argamassa simples.

(2) - ARFV = Argamassa reforçada com fibras de vidro.

(3) - TCA = Técnica convencional de amassadura.

(4) - TBP = Técnica do betão projectado.

(5) - valor estimado para abertura máxima de fenda.

(6) - máxima abertura de fenda obtida segundo a expressão $w_c = 5.14G_f / f_{ct}$ (Hordijk 1991).

4 - REFERÊNCIAS

- Akihama, S.; Suenga, T.; Tanaka, M.; Hayashi, M. (1987), "Properties of GFRC with low alkaline cement", Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, ACI, pp. 189-210.
- Bentur, A. (1986), "Aging process of glass fibre reinforced cements with different cementitious matrices", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, vol. 2, paper 7.3.
- Barros, J.A.O. (1992), "Behaviour of glass fibre reinforced concrete systems", Technical Report, Civil Eng. Departement, Faculty of Eng., University of Porto.
- Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A.; Veen, C.V.D. (1994), "Tensile behaviour of glass fibre reinforced concrete", Recent Advances in Experimental Mechanics, eds. J.F. Silva Gomes et al., vol. 2, pp. 1073-1080.
- Barros, J.A.O. (1995), "Comportamento do betão reforçado com fibras. Análise experimental e simulação numérica", Tese de Doutoramento, Faculdade de Eng^a da Universidade do Porto.
- Bijen, J. (1983), "Durability of some glass fiber reinforced cement composites", ACI Journal, pp. 305-311, July-August.
- Bijen, J. (1990), "Improved mechanical properties of glass fibre reinforced cement by polymer modification", Cement & Concrete Composites, vol. 12, pp. 95-101.
- Biryukovich, K.L.; Biryukovich Y.L.; Biryukovich D.L. (1965), "Glass Fibre Reinforced Cement", Budivelinik, Kiev, 1964, Translation n^o 12, Civil Engineering Research Association, London.
- Comino Almenara P.I. (1996), "Realizaciones en GRC en la construcción", I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción, pp. 419-426.

- Cornelissen, H.A.W. ; Hordijk, D.A. ; Reinhardt, H.W. (1986)*, "Experimental determination of crack softening characteristics of normal weight and lightweight concrete", *Heron, Fracture Mechanics and Structural Aspects of Concrete*, vol. 31, Nº 2, pp. 45-56.
- Fyles, K.; Litherland, K.L.; Proctor, B.A. (1986)*, "The effect of glass fibre compositions on the strength retention of GFC", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, volume 2, paper 7.5.
- Hordijk, D.A. (1991)*, "Local approach to fatigue of concrete", *Dissertation, Delft University of Technology*.
- Laffarga Osteret J.; Olivares Santiago M. (1996)*, "Tipos de acabados en el GRC", *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción*, pp. 163-168.
- Leonard, S.; Bentur, A. (1984)*, "Improvement of the durability of glass fiber reinforced cement using blended cement matrix", *Cement and Concrete Research*, vol. 14, pp. 717-728.
- Majumdar, A.J. (1980)*, "Some aspects of glass fibre reinforced cement research", *Advances in Cement-Matrix Composites*, Editors: D.M. Roy, A.J. Majumdar, S.P. Shah and J.A. Manson, *Materials Research Society, Boston*, pp. 37-60.
- Majumdar, A.J.; Laws, V. (1991)*, "Glass reinforced cement", *BSP professional books*, 197 pages.
- Proctor, B.A., Oakley, D.R.; Litherland, K.L. (1982)*, "Developments in the assessment and performance of GRC over 10 years", *Composites*, vol. 13, nº 2, pp. 173-9.
- Rots, J.G. (1988)*, "Computational modeling of concrete fracture", *Dissertation, Delft University of Technology*.
- Stucke, M.J.; Majumdar, A.J. (1976)*, "Microstructure of glass fibre reinforced cement composites", *Journal of Materials Science*, vol. 11, nº 6, pp. 1019-30
- Takada, H.; Uchida, I.; Sakurada, T. (1987)*, "Development of lightweight durable fiberglass-reinforced concrete (FRC)", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, ACI*, pp. 179-188.
- Wang, Y. ; Li, V.C. ; Backer, S. (1990)*, "Experimental determination of tensile behaviour of fibre reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 87, nº 5, pp. 461-468, September-October.