

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO REFORÇADO COM FIBRAS SOB ACÇÕES CICLÍCAS**

**JOAQUIM BARROS**

Professor Auxiliar  
UMinho  
Guimarães

**JOSÉ SENA CRUZ**

Assistente  
UMinho  
Guimarães

**RAIMUNDO DELGADO**

Professor Associado  
FEUP  
Porto

**ANÍBAL COSTA**

Professor Auxiliar  
FEUP  
Porto

## **SUMÁRIO**

No presente trabalho são expostos os resultados de um programa experimental em provetes cilíndricos de betão armado reforçado com fibras de aço. Os provetes cilíndricos armados com diferente percentagem de fibras e de cintas foram sujeitos a acções cíclicas de compressão uniaxial. Os principais benefícios proporcionados pelo reforço das fibras e do grau de confinamento introduzido pelas cintas são referidos.

## **1. INTRODUÇÃO**

Para a generalidade das estruturas e, em particular, para as estruturas de betão armado, a actual regulamentação prevê critérios que têm por objectivo garantir um comportamento satisfatório face ao tipo de sismo que actua sobre essas estruturas. Assim, é necessário que a estrutura esteja preparada para suportar cargas cíclicas quando o comportamento da estrutura é iminentemente não linear. Muitas vezes, este requisito estrutural é avaliado pela ductilidade da estrutura, isto é, pela sua capacidade em dissipar energia sem perda de resistência. As zonas da estrutura com maior ductilidade são os principais focos de dissipação de energia [1]. Estas zonas localizam-se, geralmente, nos nós de ligação viga/pilar. Correntemente, a ductilidade pretendida é conseguida por intermédio de elevada quantidade de armadura transversal, podendo introduzir dificuldades na betonagem. Com a utilização de fibras de aço, a quantidade de armadura transversal poderá ser significativamente reduzida sem diminuição do grau de ductilidade desejado.

Nas últimas décadas, a utilização de fibras de aço no reforço de elementos de betão armado tem aumentado significativamente. Contudo, o conhecimento do comportamento deste compósito sob acções cíclicas é ainda reduzido. Com este trabalho pretende-se contribuir para um melhor conhecimento do comportamento do betão reforçado com fibras de aço sob acções alternadas de compressão uniaxial.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais utilizados

#### 2.1.1 Armadura

Para a construção dos provetes cilíndricos utilizaram-se varões de aço de 6 milímetros de diâmetro. Com vista à caracterização da armadura efectuaram-se ensaios de tracção uniaxial, apresentando-se no Quadro 1 as principais características mecânicas.

Quadro 1 - Principais características mecânicas dos varões ensaiados.

Varão	Ext. no Início da Cedência (%)	Ext. no Início do Endurecimento (%)	Ext. na Rotura Máxima (%)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
φ6	0.200	-	12	690	740

#### 2.1.2 Fibras

Nos betões reforçados com fibras utilizaram-se fibras de aço inox designadas comercialmente por *Dramix ZP30/.50* [2].

#### 2.1.3 Betões

As composições dos betões estão incluídas no Quadro 2. O cimento utilizado, fornecido pela SECIL, foi o Portland classe B.

Todas as composições foram amassadas numa betoneira de eixo vertical, segundo os procedimentos usuais utilizados na fabricação dos betões convencionais, sendo as fibras o último material a ser adicionado.

Com o intuito de avaliar a trabalhabilidade dos betões, efectuaram-se ensaios convencionais: o cone de Abrams (designado também por “*Slump Test*”) e o “*VB Test*”. Foi possível verificar um decréscimo do “*Slump Test*” com o aumento da quantidade de fibras. No que se refere ao “*VB Test*” constatou-se um aumento do tempo de leitura com o crescimento da quantidade de fibras, embora este aumento seja menos pronunciado que o registado no “*Slump Test*”, o que revela que, sob vibração, o betão reforçado com fibras de aço, *BRFA*, desenvolve boa trabalhabilidade [3].

Quadro 2 - Composição dos betões.

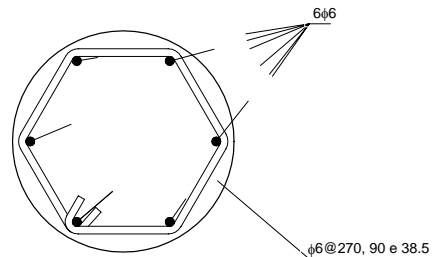
Elemento	Composição (kg/m <sup>3</sup> de betão)
Cimento	450
Areia (0-3 mm)	729
Brita (0-15 mm)	1000
Água	202.5
Fibras	0, 30, 60, 90

## 2.2 Características dos modelos ensaiados

Os provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, foram reforçados com uma armadura longitudinal constante (6 varões), e com quatro níveis distintos de armadura transversal de forma a variar o grau de confinamento promovido pelas cintas. No Quadro 3 apresenta-se o afastamento entre cintas utilizado nas diferentes séries. Inclui-se ainda a correspondente percentagem de armadura transversal,  $\rho_w$ , definida pela razão entre o volume de cintas e o volume de betão, por unidade de comprimento do provete.

Quadro 3 - Armadura transversal utilizada.

Espaçamento entre cintas (mm)	$\rho_w$ (%)
sem cintas	0.00
270	0.38
90	1.13
38.5	2.65



Na Figura 1 ilustra-se a nomenclatura adoptada para designar cada série. Entende-se por série o conjunto de provetes cilíndricos com a mesma quantidade de armadura transversal e de fibras.

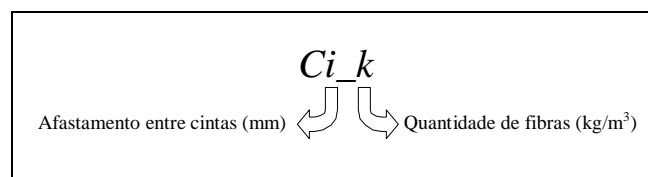


Figura 1 - Nomenclatura utilizada para a designação das séries.

Foram fabricados cinco provetes cilíndricos para cada série totalizando oitenta unidades. No Quadro 4 sintetiza-se todas as séries ensaiadas neste trabalho. As variáveis  $W_f$  e  $V_f$  representam a percentagem de fibras em peso e volume da mistura, respectivamente [3].

Quadro 4 - Séries de provetes cilíndricos ensaiadas.

Série	Afastamento entre cintas (mm)	$\rho_w$ (%)	Quantidade de fibras (kg/m <sup>3</sup> )	$W_f$ (%)	$V_f$ (%)
C00_00	-	0.00	0	0.00	0.00
C00_30	-	0.00	30	1.25	0.38
C00_60	-	0.00	60	2.50	0.76
C00_90	-	0.00	90	3.75	1.15
C270_00	270.0	0.38	0	0.00	0.00
C270_30	270.0	0.38	30	1.25	0.38
C270_60	270.0	0.38	60	2.50	0.76
C270_90	270.0	0.38	90	3.75	1.15
C90_00	90.0	1.13	0	0.00	0.00
C90_30	90.0	1.13	30	1.25	0.38
C90_60	90.0	1.13	60	2.50	0.76
C90_90	90.0	1.13	90	3.75	1.15
C38_00	38.5	2.65	0	0.00	0.00
C38_30	38.5	2.65	30	1.25	0.38
C38_60	38.5	2.65	60	2.50	0.76
C38_90	38.5	2.65	90	3.75	1.15

### 2.3 Sistema de ensaio

Para a realização dos ensaios recorreu-se a uma prensa da série 315 da *MTS*. Esta prensa permite realizar ensaios de compressão/tracção podendo-se aplicar cargas até um limite máximo de 2700 kN. A prensa está munida de um transdutor de deslocamentos que pode registar deformabilidades até 200 mm [3, 4].

Com os procedimentos adoptados para o historial de deslocamentos impostos procurou-se avaliar: o andamento global da curva tensão-extensão, a capacidade de absorção de energia e a degradação de rigidez da resposta descarga/recarga até ao esgotamento da capacidade de carga [3].

Para cada série ensaiou-se quatro provetes segundo o historial de deslocamentos que incluía descargas/recargas. O quinto provete (da mesma série) foi ensaiado sem se efectuar qualquer descarga (carregamento monotónico). Os ensaios foram realizados com velocidade de deformação de 20  $\mu\text{m/s}$ .

### 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Observações durante e após o ensaio

Durante os ensaios procurou observar-se as alterações externas ocorridas nos provetes. Após a conclusão dos ensaios de cada série, cada provete foi inspeccionado no intuito de retirar mais elementos sobre o seu estado final, sendo os aspectos mais significativos anotados.

Em qualquer ensaio verificou-se sempre o aparecimento de fendilhação vertical, em geral, associada à aproximação da capacidade de carga máxima do provete. Esta fase era acompanhada pelo esgotamento da resistência do betão de recobrimento, bastante notório, principalmente, nos provetes fortemente cintados, em que estes pareciam ter sido “descascados”.

A rotura do betão de recobrimento (fenómeno que na literatura da especialidade é designado por descasque) facilitou a ocorrência da encurvadura dos varões longitudinais. Em geral, o comprimento de encurvadura correspondeu à distância entre cintas. Contudo, não foi possível observar a partir de que estado de deformação a encurvadura ocorria. Os varões encurvados localizavam-se numa zona afastada das extremidades do provete devido, essencialmente, ao efeito de cintagem imposto pelos pratos da prensa.

A encurvadura dos varões longitudinais, a pressão exercida pelo betão cintado e o descasque foram os aspectos fundamentais que contribuíram para a rotura das cintas. Esta aconteceu, de um modo geral, para valores elevados de deformação, ocorrendo, sempre, no ponto de “fecho” da cinta.

De um modo geral, os principais fenómenos ocorridos nos provetes (encurvadura, descasque e rotura das cintas) localizaram-se, predominantemente, no terço superior do provete. Este fenómeno deve-se ao processo de fabrico e de ensaio dos provetes dado que a zona mais compactada (junto à face inferior) era colocada sobre o prato inferior da prensa.

Nas Figuras 2 a 5 apresentam-se as configurações de rotura obtidas para os provetes com  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras. Alguns dos aspectos anteriormente referidos poderão aí ser observados.



Figura 2 - Configuração de rotura dos provetes da série C00\_30.



Figura 3 - Configuração de rotura dos provetes da série C270\_30.



Figura 4 - Configuração de rotura dos provetes da série C90\_30.



Figura 5 - Configuração de rotura dos provetes da série C38\_30.

### 3.2 Resultados numéricos

Após a realização dos ensaios procedeu-se à análise e tratamento dos resultados obtidos experimentalmente. Neste trabalho, para as diferentes análises realizadas, desprezaram-se as alterações de comportamento motivadas pelo comportamento não linear material e geométrico dos varões longitudinais. Refira-se, ainda, que a relação entre a força máxima dos  $6\phi 6$  (armadura longitudinal) e a carga máxima dos provetes variou entre 10 % e 20 %.

#### 3.2.1 Diagramas tensão *versus* extensão

Da análise dos diagramas tensão-extensão ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de todos os provetes ensaiados concluiu-se [3] que os primeiros quatro provetes de cada série (ensaiados com historial de deformação cíclico), tiveram um andamento semelhante ao quinto, da mesma série (ensaio monotónico). Em geral, as respostas da mesma série, incluindo os ramos de descarga/recarga, apresentaram um andamento muito próximo. Na Figura 6 apresenta-se os diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes com cintas afastadas de 38.5 mm e com  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras.

No sentido de comparar as diferentes séries, tornou-se necessário determinar o comportamento representativo de cada série. Este foi definido com base na determinação da curva média  $\sigma$ - $\epsilon$  referente aos provetes com historial de deformação cíclico em compressão. A título ilustrativo, na Figura 7 apresenta-se o diagrama de tensão *versus* extensão para níveis crescentes de quantidade de fibras e  $\rho_w = 2.65 \%$ .

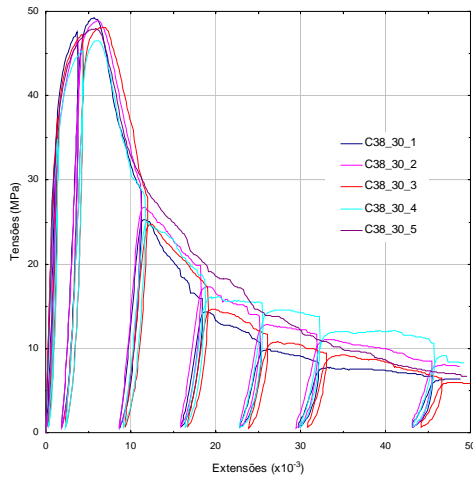


Figura 6 - Diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  da série C38\_30.

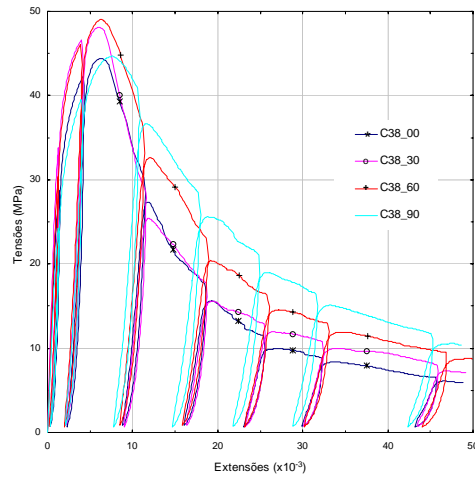


Figura 7 - Diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  para  $\rho_w = 2.65\%$ .

Da observação dos diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  das diferentes séries é possível concluir que [3]:

- a tensão e a extensão de pico aumentam com o crescimento da percentagem da armadura transversal;
- ao aumento da quantidade de fibras não corresponde um aumento significativo da tensão e correspondente extensão de pico;
- o declive do ramo de amolecimento é tanto mais suave quanto maior for a percentagem de cintas e de fibras, pelo que o comportamento do provete é mais dúctil na fase de amolecimento;
- há um aumento da capacidade de absorção de energia com o aumento da quantidade de cintas e de fibras;
- a forma do ramo de amolecimento é idêntica em qualquer das séries, sofrendo apenas uma translação com a variação da percentagem de armadura transversal e quantidade de fibras.

### 3.2.2 Tensão e extensão de pico e módulo de elasticidade inicial

A partir dos diagramas tensão-extensão das diferentes séries foi possível extrair alguns pontos e grandezas notáveis, tais como: a tensão e correspondente extensão de pico, assim como, o módulo de elasticidade inicial.

Da análise dos resultados obtidos, verificou-se que a extensão de pico sofre um ligeiro aumento com a quantidade de fibras. Verifica-se que a percentagem de armadura transversal é mais significativa que a quantidade de fibras para o aumento da extensão de pico. É de referir

que a lei de evolução da extensão parece ser diferente quando existe ou não armadura transversal [3].

Mantendo-se constante  $\rho_w$ , a tensão máxima não sofre alterações significativas com o aumento da quantidade de fibras, enquanto que com o aumento da percentagem de armadura transversal, a tensão máxima aumenta significativamente.

Da análise dos resultados relativos ao módulo de elasticidade inicial,  $E_{ci}$ , verifica-se que a sua evolução não varia significativamente, quer com a quantidade de fibras, quer com a quantidade de cintas.

### 3.2.3 Energia em compressão

A propriedade do material mais beneficiada pelo reforço das fibras é a capacidade de absorção de energia registada após o pico de carga. Esta energia aumenta com a quantidade de fibras [5]. Neste trabalho definiu-se energia em compressão,  $G_c$ , como sendo a área do diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondente à envolvente monotónica. Nas Figuras 8 e 9 apresentam-se diagramas de energia em compressão, para quantidade de fibras e de armadura transversal constante, respectivamente.

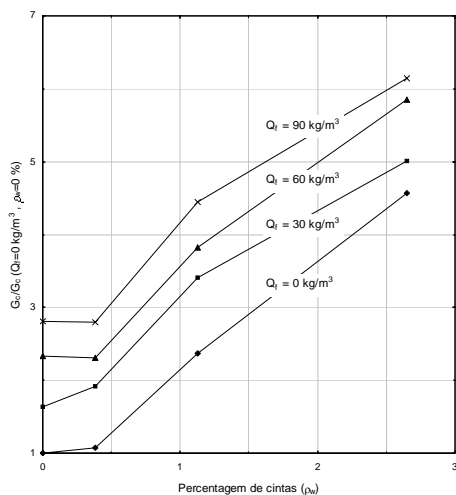


Figura 8 - Energia em compressão para  $Q_f$  constante.

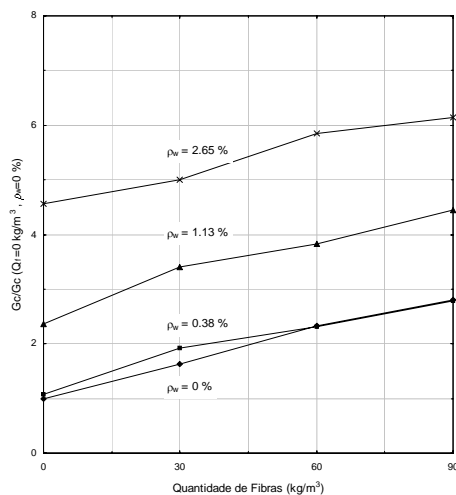


Figura 9 - Energia em compressão para  $\rho_w$  constante.

A partir destes diagramas é possível concluir que, em geral, ocorre aumento da energia em compressão com o aumento quer da quantidade de fibras, quer da percentagem de armadura transversal. Contudo, este aumento é mais significativo com a existência da armadura transversal.



Verifica-se que a lei de evolução da energia em compressão (para valores crescentes da quantidade de fibras) não sofre variação significativa quando se consideram valores crescentes de  $\rho_w$ . Situação idêntica é verificada para o caso da evolução da energia em compressão para valores crescentes da percentagem de armadura transversal.

### 3.2.4 Evolução da degradação de rigidez na descarga/recarga

Quando se efectua uma descarga, esta apresenta um comportamento essencialmente não linear. Não obstante, a recarga manifesta um comportamento muito próximo do linear. Em geral, na bibliografia da especialidade os ramos de descarga/recarga das leis constitutivas do betão são simulados por segmentos rectos. No presente trabalho, a evolução dos ramos de descarga/recarga foi também determinada admitindo-os como sendo rectos. No cálculo do módulo de elasticidade correspondente a um ramo genérico de descarga e de recarga recorreu-se ao procedimento ilustrado na Figura 10.

Com o módulo de elasticidade representativo dos ramos de descarga e recarga,  $E_{c0}$ , traçaram-se diagramas da sua evolução para diferentes níveis de deformação. Os módulos de elasticidade foram avaliados nos pontos PTM (ver Figura 10), aos quais estão associadas as extensões,  $\varepsilon_{PTM}$ . Os valores  $E_{c0}$  e os correspondentes  $\varepsilon_{PTM}$  constituem o conjunto de pontos que definem curvas designadas por diagramas de degradação de rigidez de  $E_{c0}$ . Na Figura 11 representam-se os diagramas de degradação de rigidez de  $E_{c0}$  correspondentes às séries com  $\rho_w = 2.65\%$ . Estas curvas foram determinadas a partir das curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  representativas de cada série.

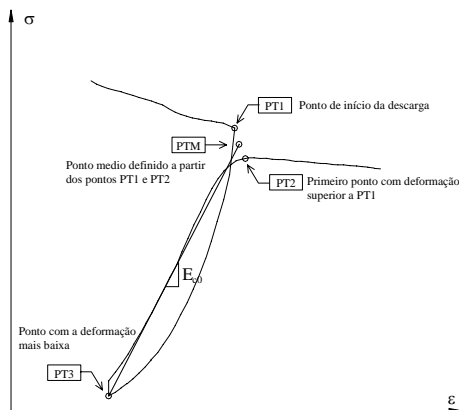


Figura 10 - Procedimento adoptado para a determinação do módulo de elasticidade de  $E_{c0}$ .

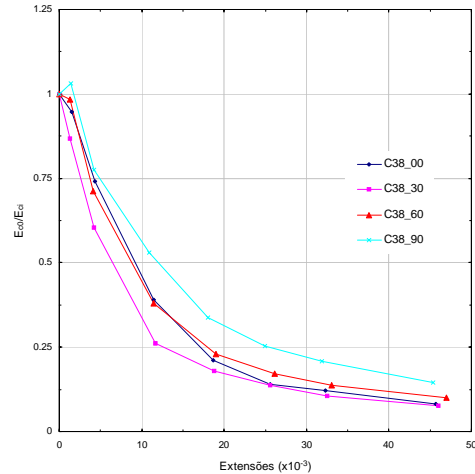


Figura 11 - Diagramas de degradação de rigidez de  $E_{c0}$  para as séries com  $\rho_w = 2.65\%$ .

É possível verificar uma evolução semelhante de todos os diagramas. Estes apresentam uma forma de evolução que se aproxima de uma lei exponencial. Existe uma diminuição da

degradação de rigidez com o aumento da percentagem de fibras. O aumento de  $\rho_w$  conduz a uma variação notória do diagrama, podendo afirmar-se que, para efeitos de diminuição da degradação de rigidez, as cintas são mais eficientes que as fibras.

Todavia, pode também verificar-se que, por exemplo, o comportamento dos provetes reforçados com  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibras e com  $\rho_w = 1.13\%$  - C90\_60 - é semelhante ao desenvolvido pelos provetes de betão simples com  $\rho_w = 2.65\%$  - C38\_00. Isto significa que, no caso de ser necessário aplicar percentagem elevada de cintas, o que pode prejudicar o processo de betonagem, estas podem ser parcialmente substituídas por fibras, sem prejuízo da capacidade de retenção de rigidez do material.

#### 4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nos ensaios cíclicos de compressão uniaxial, efectuados com provetes cilíndricos de betão armado com fibras de aço, verificou-se que a capacidade de absorção de energia foi a propriedade mais beneficiada com a adição de fibras ao betão. É então possível concluir que a adição de fibras aumenta a ductilidade. O aumento de ductilidade, propriedade de elevada importância do ponto de vista das acções sísmicas, é traduzida num ramo de amolecimento de menor declive e, no aumento da extensão de pico.

Com o aumento da quantidade de fibras, verificou-se um ganho de rigidez dos ramos de descarga/recarga, enquanto que a tensão de pico e o módulo de elasticidade inicial não sofreram alterações significativas.

As curvas tensão-deformação registadas nos ensaios monotónicos com provetes de betão reforçado com fibras correspondem às envolventes das curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios cíclicos de compressão uniaxial.

A introdução de armadura transversal (cintas) conduz a um aumento da tensão e extensão de pico, da energia em compressão e da rigidez dos ramos de descarga/recarga. Verificou-se, ainda, que o módulo de elasticidade inicial não varia significativamente com o grau de confinamento dado pela armadura transversal.

Para finalizar, refere-se que é possível substituir, parcialmente, cintas por fibras, sem prejuízo da capacidade de retenção de energia e de rigidez do material.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho manifestam o agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização dos ensaios experimentais, entre as quais se destacaram:

- o Engenheiro Fernando Miguel pela colaboração prestada no fabrico dos protótipos;
- o Engenheiro Erik Ulrix, representante da Bekaert que forneceu as fibras de aço;
- o Engenheiro Paulo Choupina e a Engenheira Raquel Figueira, pelo fornecimento do cimento Secil;

- o Engenheiro Fernandes, representante da Pedreira da Madalena, que permitiu o fornecimento da brita.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Gomes, A.M., “*Comportamento e reforço de elementos de betão armado sujeitos a acções cíclicas*”, dissertação submetida para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, 1992.
- [2] Bekaert N.V., “*Dramix fibres hors fils d’acier pour reinforcement de betón et mortier*”, Specification, Bekaert N.V., 6 pages, October, 1991.
- [3] Cruz, J.M.S., “*Comportamento Cíclico de Estruturas Porticadas de Betão Armado Reforçado com Fibras de Aço. Simulação Numérica e Análise Experimental*”, dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 1998.
- [4] MTS, Manuais do equipamento MTS, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993.
- [5] Barros, J.A.O., “*Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.