



**COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES ENTRE CONECTORES DE  
COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO E  
BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO  
(BACRFA) – ENSAIOS DE ARRANQUE (PULL-OUT TESTS)**

**Relatório 10-DEC/E-26**

**Rodrigo Lameiras, Tiago Santos, Isabel Valente, Joaquim Barros e Miguel Azenha**

**Dezembro de 2010**

**PROJECTO LEGOUSE**

– Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados –

Projecto em Co-Promoção n°2009/005387





## 1. INTRODUÇÃO

Os painéis tipo sanduíche são elementos constituídos por duas camadas externas de betão separadas por uma camada de material isolante e ligadas através de conectores. Estes painéis geralmente incorporam o sistema de vedação e o sistema estrutural da edificação, permitindo uma maior agilidade da construção. A eficiência térmica e estrutural alcançada com a disposição em sanduíche torna essa tecnologia competitiva.

Os conectores comumente empregues para fazer a ligação entre as faces de betão são conectores metálicos. Devido à elevada condutibilidade térmica desses conectores que penetram na camada de isolamento, são ocasionadas pontes térmicas nas regiões das ligações (Rizkalla and Dawood, 2009). Uma vez que os painéis sanduíche geralmente constituem a envolvente das edificações, essas pontes térmicas ocasionam perda de eficiência energética significativa (Lee and Pessiki, 2006).

Assim, o objetivo principal do estudo apresentado no presente relatório é comparar o desempenho mecânico de conectores constituídos por materiais com menor condutibilidade térmica do que os conectores metálicos para serem utilizados como elementos de ligação entre as faces de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) que constituem os painéis sanduíche.

Opta-se então por estudar somente conectores de FRP (*Fibre Reinforced Polymer*), material que apresenta baixa condutibilidade térmica, não ocasionando perdas significativas de desempenho térmico dos painéis.

No presente relatório é apresentado o resultado de um estudo preliminar, onde diferentes soluções para conexão dos painéis de betão são comparadas mediante a realização de ensaios de arranque (de tipo *pull-out*). Serão avaliados os comportamentos de diferentes soluções embebidas e de uma solução colada.

Apesar do ensaio de *pull-out* não traduzir o tipo de esforços expectáveis nos elementos estruturais, este é um ensaio simples que compara os desempenhos relativos de diferentes soluções para conexões das faces de betão.

Em função dos resultados apresentados neste estudo preliminar serão escolhidos os tipos de conectores que deverão ser estudados através de ensaios de corte, ensaio com um arranjo experimental mais complexo, porém que traduz o tipo de esforços esperados de fato nos painéis sanduíche (esforço rasante gerado pela flexão do painel).



## 2. PAINEIS TIPO SANDUÍCHE – CONCEITO LEGOUSE

O presente trabalho parte do pressuposto que os painéis sanduíche serão constituídos por duas camadas externas de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) de 40 mm de espessura cada e na zona dos conectores estas possuirão uma maior espessura de forma que facilitem a execução das conexões embebidas (ver Figura 1).

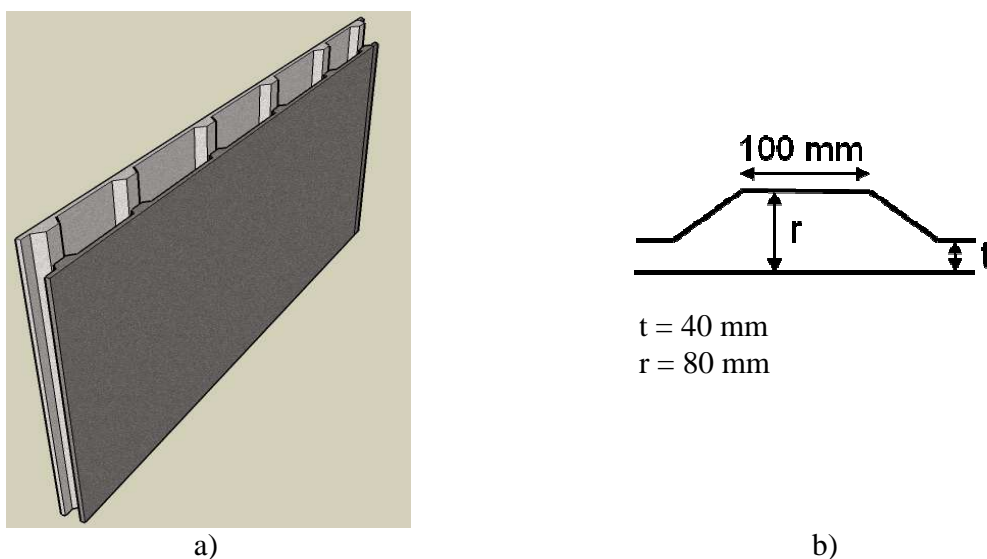


Figura 1 – Conceito de painéis sanduíche nervurados. a) Vista dos painéis; b) dimensões das nervuras dos painéis de BACRFA.

## 3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta secção apresenta-se um resumo das características dos materiais utilizados nos ensaios de arranque.

### 3.1. FRP

Todos os provetes de FRP utilizados nesta pesquisa foram produzidos pelo PIEP através do processo de infusão da resina à vácuo.

O FRP adotado é constituído por 6 camadas de uma manta de fibra de vidro e uma resina polimérica, totalizando aproximadamente 5 mm de espessura.

A manta de fibra de vidro utilizada é do tipo multiaxial do fabricante SELCOM (referência EQX 1200), com fibras dispostas quadriaxialmente ao longo das direções  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  e  $90^\circ$  conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Características do tecido de fibra de vidro utilizado.

| Referência | Tipo de Fibra | Gramagem               |                          |                          |                         | Total |
|------------|---------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|
|            |               | 0°<br>g/m <sup>2</sup> | +45°<br>g/m <sup>2</sup> | -45°<br>g/m <sup>2</sup> | 90°<br>g/m <sup>2</sup> |       |
| EQX 1200   | Vidro E       | 283                    | 302                      | 302                      | 300                     | 1187  |

A resina utilizada é do tipo poliéster. Esta resina caracteriza-se por ser um plástico termofixo quando endurecido, ou seja, não amolecem quando submetidos à temperaturas elevadas. As suas principais propriedades mecânicas estão reunidas no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades da resina de poliéster à temperatura ambiente (Callister Jr., 2007).

| Massa específica | Módulo de Elasticidade à tração (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Tensão de escoamento (MPa) | Alongamento de rotura (%) |
|------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1,29 – 1,40      | 2,8 – 4,1                             | 48,3 – 72,4                | 59,3                       | 30 – 300                  |

Para a caracterização mecânica do FRP, foram extraídos provetes a partir de conectores fornecidos pelo PIEP. Os provetes extraídos seguem a lógica da Figura 2, sendo de assinalar que foram obtidos nas direções 0° e 90°.

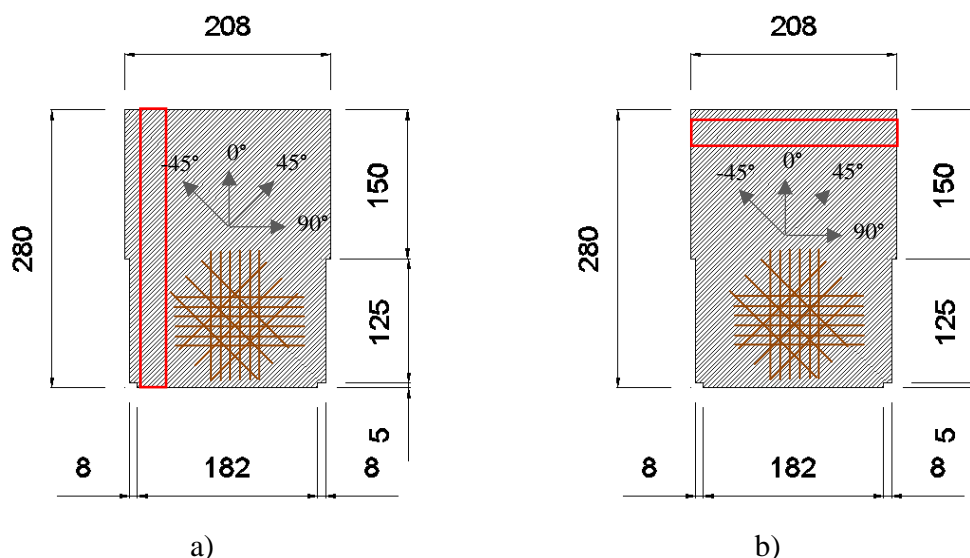


Figura 2 – Obtenção dos provetes e disposição das fibras nos compostos caracterizados. a) provete a 0° e b) provete a 90°.

Para evitar rotura precoce dos provetes por danos provocados pela concentração de tensões junto às amarras, foram utilizados “*tabs*” constituídos por chapas de alumínio de 5 cm de comprimento coladas nos dois lados das duas extremidades (ver Figura 3).

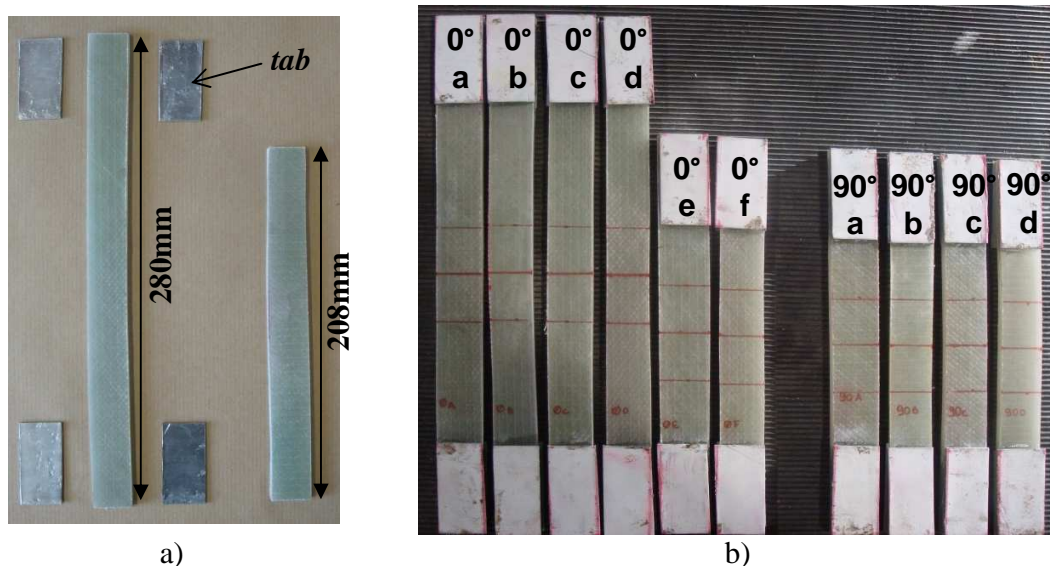


Figura 3 – Provetes antes dos ensaios.

O ensaio de tração direta foi realizado numa prensa com célula de carga com capacidade para 200 kN e velocidade de 2 mm/min, de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas (ASTM Standard D 6856, 2003) e (ASTM Standard D 3039/D 3039M, 2008). As deformações nos FRPs foram determinadas através do uso de um “*clip gauge*” posicionado na parte central dos provetes com comprimento de referência de 50 mm (ver Figura 4).

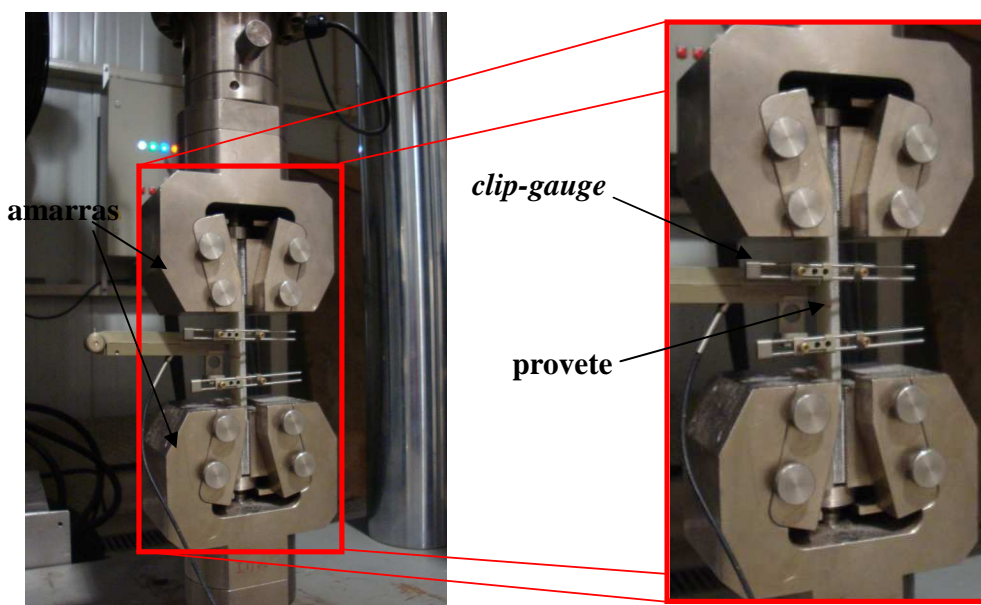


Figura 4 – Configuração do ensaio de tração direta.

Os resultados dos ensaios estão reunidos na Tabela 1 e na Figura 5 e os modos de rotura podem ser visualizados na Figura 6.

Os resultados indicam que as propriedades mecânicas do FRP nas direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$  são muito semelhantes. Este comportamento era esperado uma vez que a manta de fibra de vidro utilizada contém quantidades de fibras semelhantes nas duas direções.

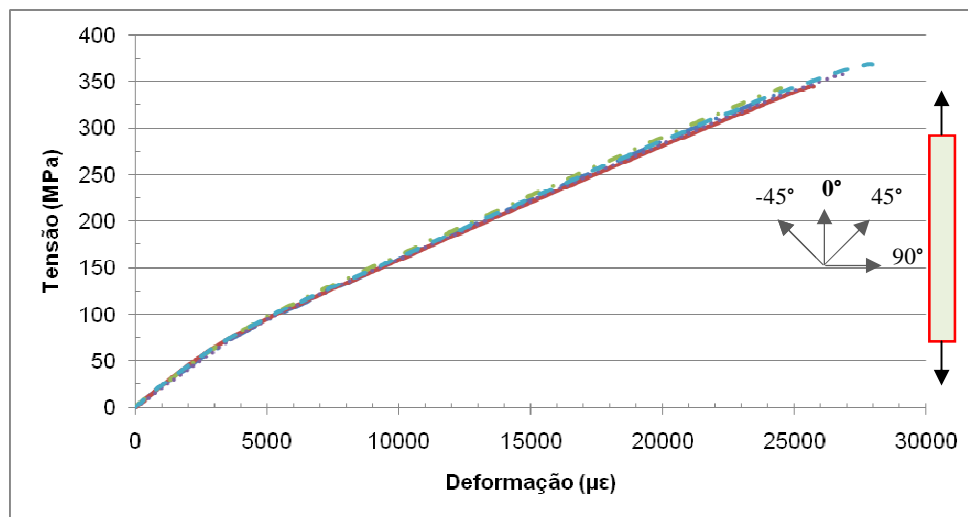
A rotura dos provetes se deu sempre no próprio FRP e de forma semelhante para as duas direções. Aparentemente não houve problemas com concentração de tensões nas regiões das amarras.

Os resultados dos provetes 90<sup>c</sup> e 90<sup>d</sup> não foram apresentados por ter havido problemas com a aquisição dos dados. Já os resultados dos provetes 0<sup>e</sup> e 90<sup>b</sup> foram desconsiderados por terem apresentado desvios relativos da tensão máxima de tração superiores a 15% dos valores médios.

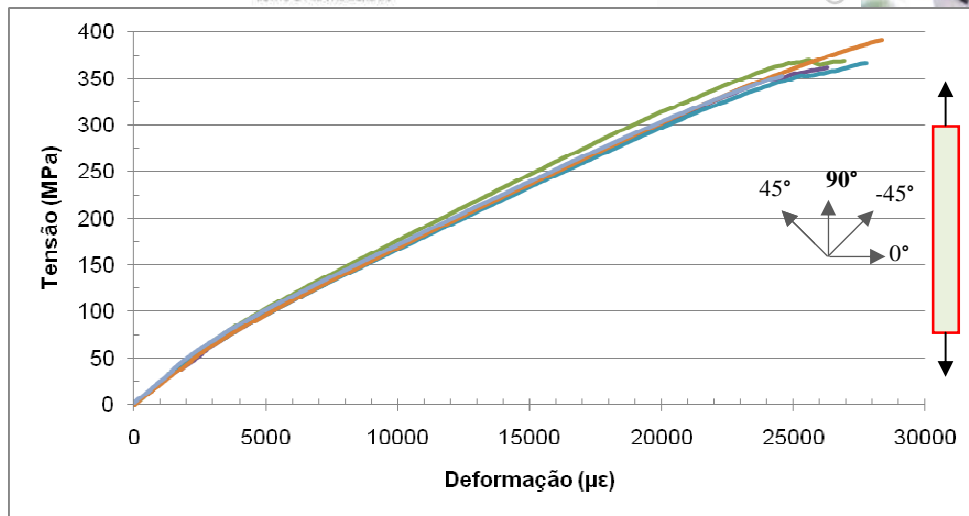
Tabela 1 – Propriedades mecânicas do FRP – Tração direta.

| Direção das Fibras | Provete | Tensão Última (MPa) |        |       | Deformação Última ( $\mu\epsilon$ ) |       |      | Módulo de Elasticidade (GPa) |       |      |
|--------------------|---------|---------------------|--------|-------|-------------------------------------|-------|------|------------------------------|-------|------|
|                    |         | Valor               | Média  | DP    | Valor                               | Média | DP   | Valor                        | Média | DP   |
| 0°*                | a       | 337,04              | 350,11 | 12,82 | 24541                               | 25912 | 1501 | 13,74                        | 13,52 | 0,27 |
| 0°*                | b       | 344,70              |        |       | 25713                               |       |      | 13,22                        |       |      |
| 0°*                | c       | 342,68              |        |       | 24494                               |       |      | 13,86                        |       |      |
| 0°*                | d       | 357,26              |        |       | 26853                               |       |      | 13,45                        |       |      |
| 0°**               | f       | 368,85              |        |       | 27961                               |       |      | 13,33                        |       |      |
| 90°**              | a       | 340,20              | 363,41 | 17,20 | 23156                               | 26185 | 1982 | 14,58                        | 14,30 | 0,32 |
| 90°**              | e       | 369,20              |        |       | 26916                               |       |      | 14,79                        |       |      |
| 90°**              | f       | 361,03              |        |       | 26314                               |       |      | 14,12                        |       |      |
| 90°**              | g       | 366,45              |        |       | 27787                               |       |      | 13,95                        |       |      |
| 90°**              | h       | 391,18              |        |       | 28365                               |       |      | 14,18                        |       |      |
| 90°**              | i       | 352,40              |        |       | 24573                               |       |      | 14,20                        |       |      |

\*- provetes com L = 280 mm, \*\*- provetes com L = 208 mm.

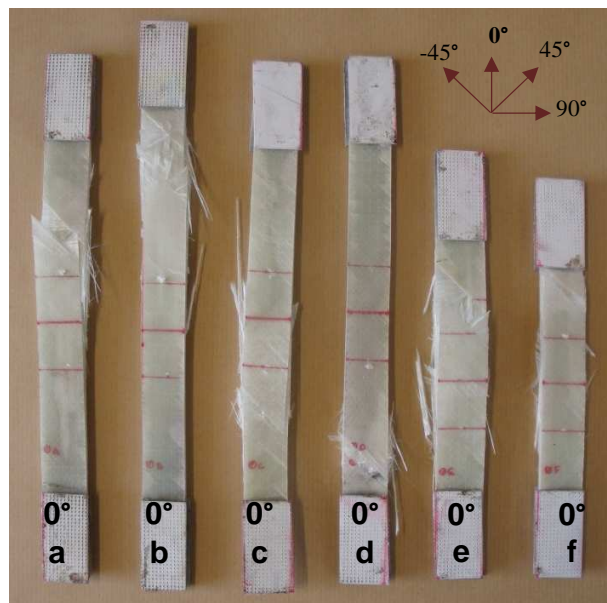


(a)



(b)

Figura 5 – Curvas tensão x deformação para os FRPs. a) Direção 0°; b) direção 90°.



a)



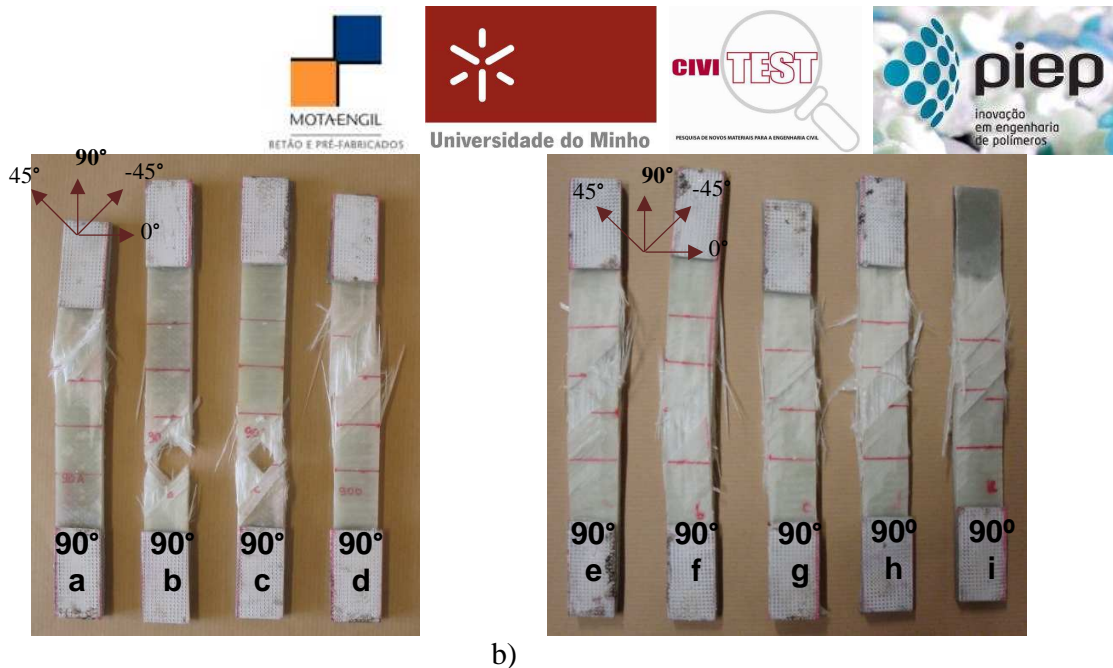


Figura 6 – Modo de rotura dos provetes. a) Direção 0°; b) direção 90°.

### 3.2. BACRFA

Os materiais que constituem o BACRFA são: cimento Portland CEM I 42,5 R, filer calcário, brita 2 (5-12mm), ½ areia, areia fina, superplastificante viscocrete 3002HE e fibras de aço Dramix 65/35 BN. A composição do BACRFA é definida no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição de BACRFA por m<sup>3</sup>.

| Cimento | Filer Calcário | Água Total | Superplastificante | Areia Fina | ½ Areia | Brita [5-12] | Fibras |
|---------|----------------|------------|--------------------|------------|---------|--------------|--------|
| [kg]    | [kg]           | [kg]       | [kg]               | [kg]       | [kg]    | [kg]         | [kg]   |
| 380,54  | 326,17         | 126,83     | 6,09               | 362,59     | 574,58  | 510,06       | 45,00  |

Os ensaios de caracterização mecânica do BACRFA foram realizados pela CIVITEST. O módulo de elasticidade do material em causa é de 33 GPa com o coeficiente de variação de 1,3%.

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão do BACRFA utilizado foram efetuados sob controlo de deslocamento. Para tal utilizou-se uma prensa servo-controlada, constituída por um grupo hidráulico, um servo-actuador de 3000 kN de capacidade máxima de carga, dispondo de transdutor interno de posição de 200 mm de curso, e software para controlo do ensaio. As forças foram medidas por intermédio de uma célula de carga de 3000 kN de capacidade máxima. A velocidade de deformação imposta no decorrer do ensaio foi de 0,005 mm/s. As envolventes dos resultados obtidos são apresentadas pela Figura 7.

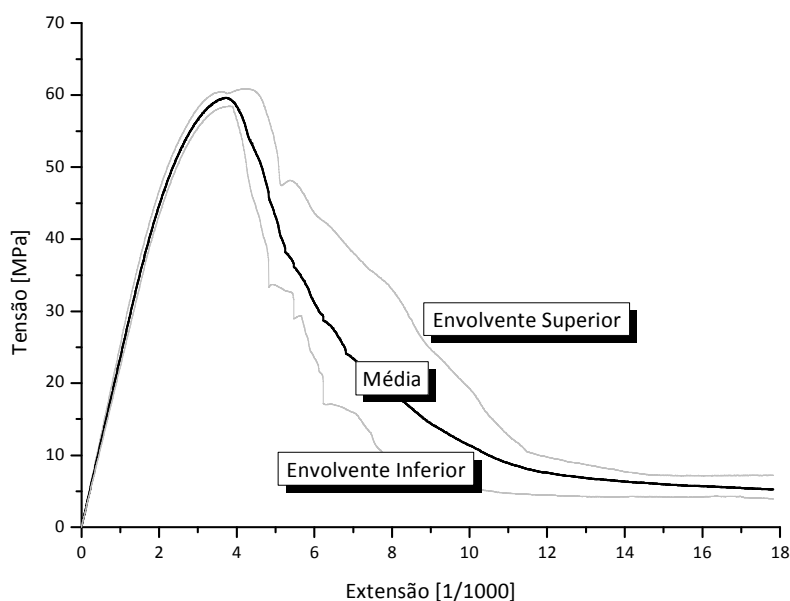


Figura 7 – Envoltório superior, inferior e média dos ensaios de compressão do BACRFA aos 28 dias.

#### 4. TIPO DE CONECTORES E DESCRIÇÃO DOS PROVETES

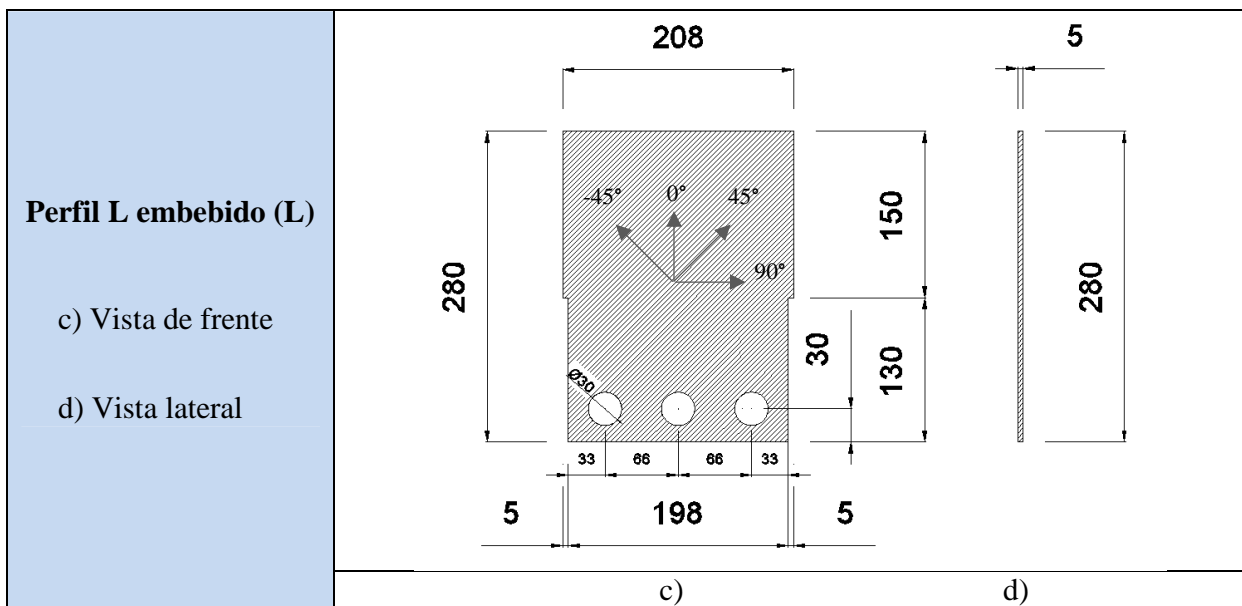
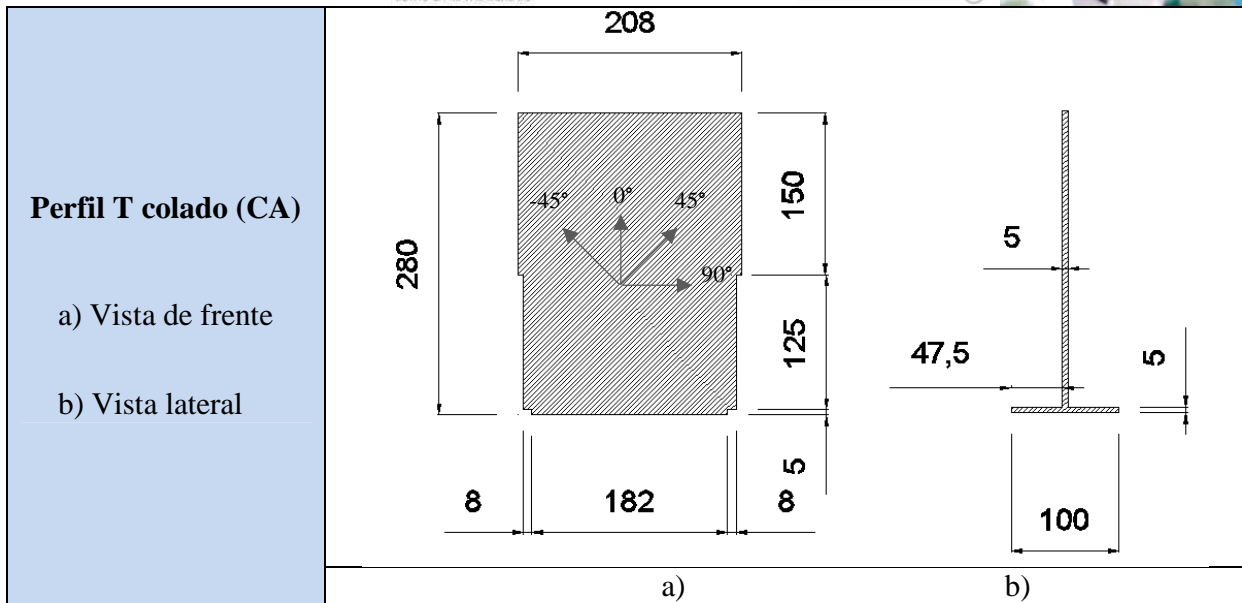
No total são ensaiados quatro tipos de conectores, sendo três tipos embebidos com diferentes geometrias e um tipo colado na superfície do provete de BACRFA. A Figura 8 apresenta a geometria dos perfis de FRP estudados no presente trabalho. Na figura estão marcados os ângulos correspondentes à orientação das fibras do FRP que constitui o perfil.

As geometrias de todos os conectores estudados estão limitadas pela pequena espessura do painel de BACRFA.

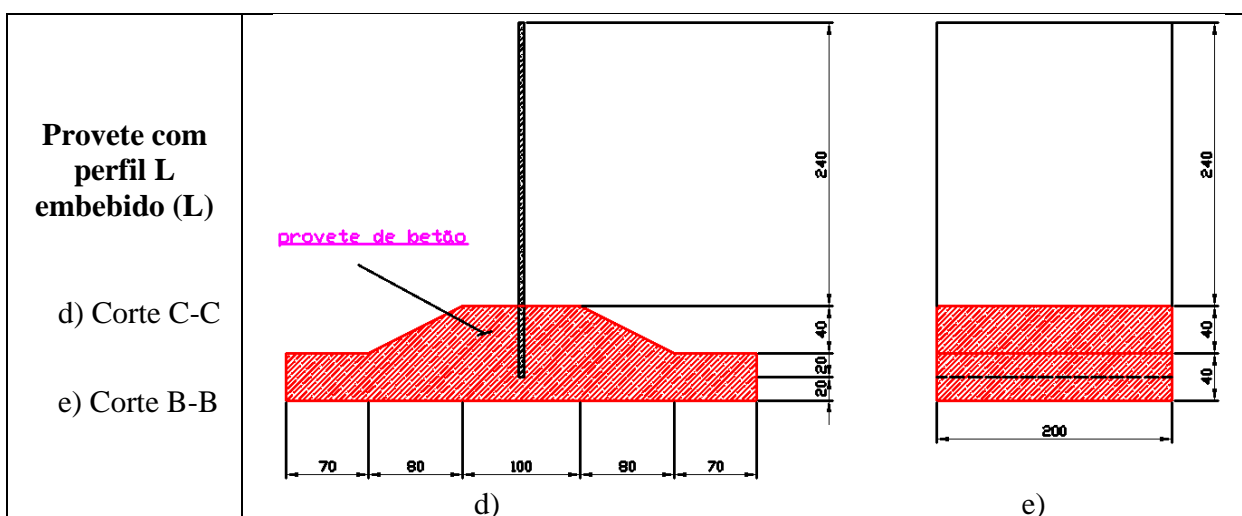
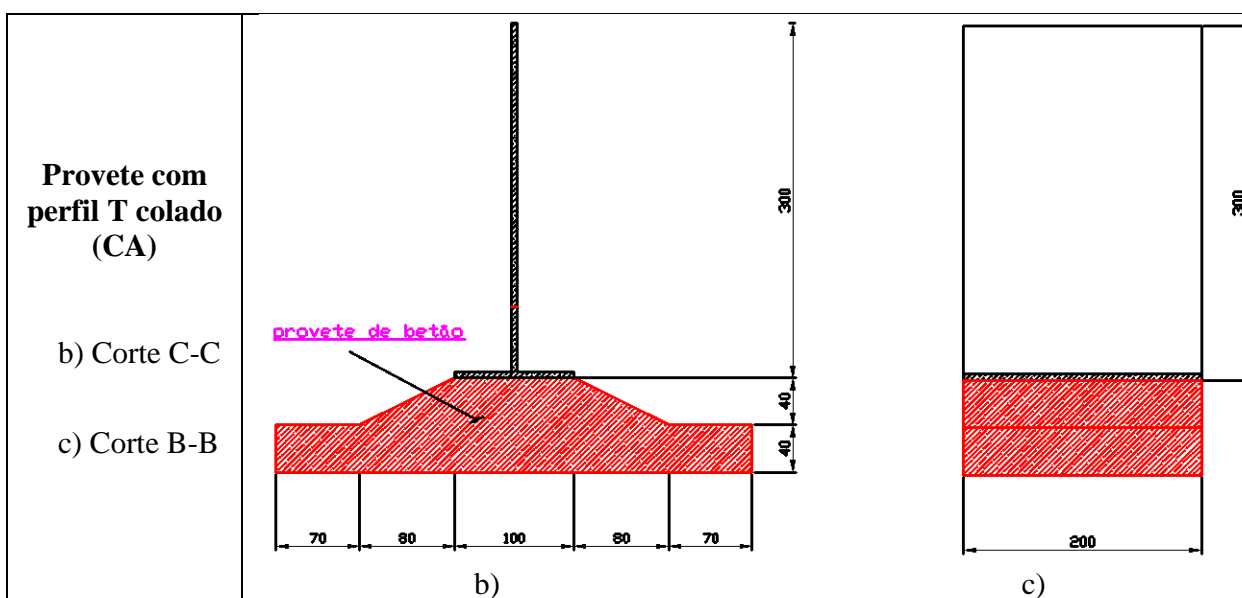
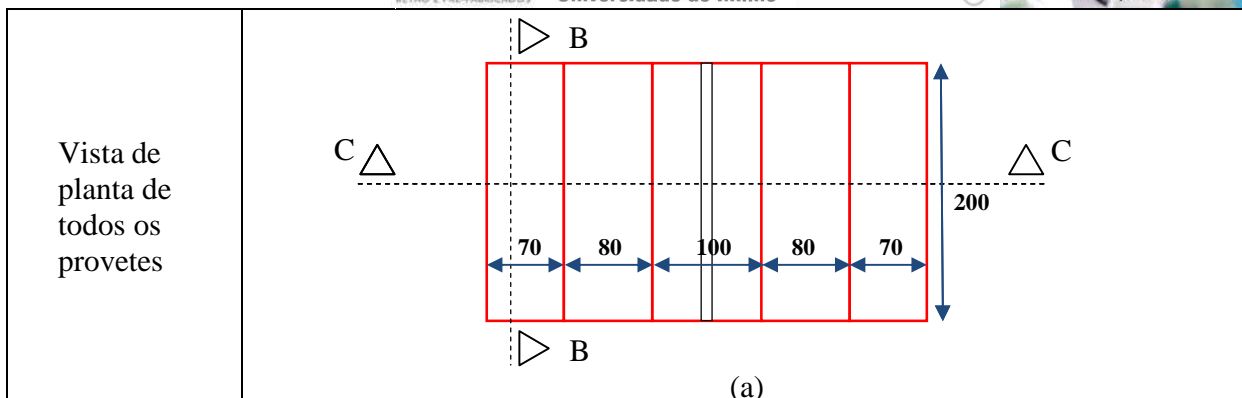
O conector do tipo L embebido, constituído por uma placa simplesmente furada é baseado nos conectores de aço já existentes para estruturas mistas betão-aço (Valente and Cruz, 2004; Jeong, Kim et al., 2009).

A vantagem associada aos conectores embebidos está no fato deste tipo permitir a redução do número de etapas para confecção dos painéis e não requisitar materiais adicionais para a execução da ligação. Neste tipo as conexões entre as faces de betão são materializadas com o posicionamento dos conectores e injeção do betão.

A opção por estudar as conexões coladas se deu por este tipo de ligação ser relativamente simples de ser executado e não requisitar uma maior espessura dos painéis na zona das conexões.







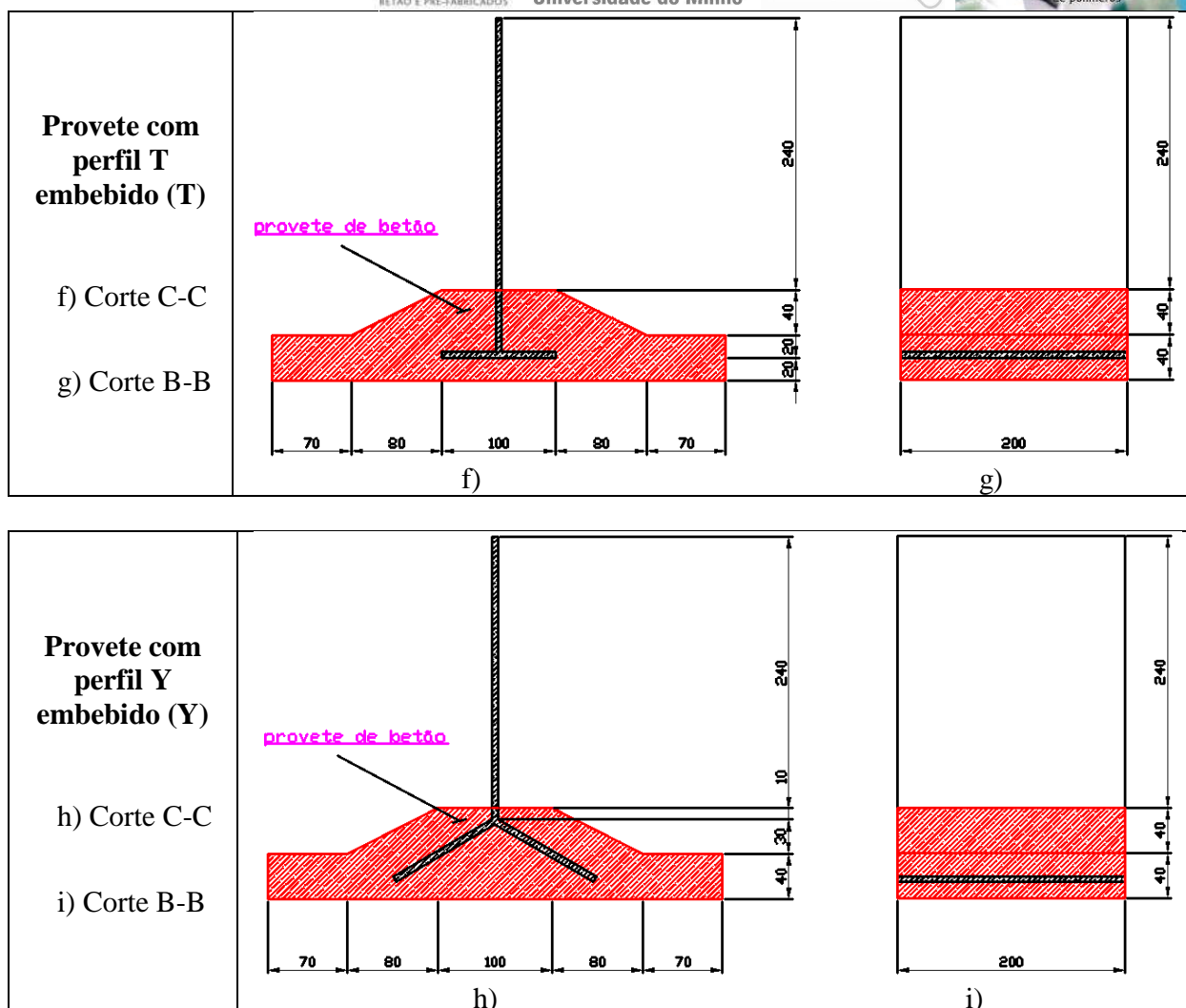


Figura 9 – Dimensões dos provetes de BACRFA (unidades em milímetros).

## 5. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Os provetes de BACRFA são moldados pela Civitest, parceira do projeto LEGOUSE. No caso dos conectores embebidos, o BACRFA é injetado no molde, embebendo o perfil FRP. A Figura 10 ilustra o posicionamento dos perfis e a mesa de molde antes de se injetar o BACRFA.

Para os perfis colados com adesivo, utilizam-se provetes de betão fabricados em simultâneo com os restantes provetes embebidos. Após os 28 dias da moldagem, os perfis de FRP são colados aos provetes de betão através do uso de resina epóxi.



Figura 10 – Moldagem dos provetes.

## 6. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

A técnica de arranque (*Pull-out*) baseia-se na aplicação de tração direta ao perfil de FRP. Para a realização do ensaio utiliza-se uma amarra de chapas dentadas fixa no FRP e o provete de BACRFA é fixo à base da prensa através de duas barras de aço de seção quadrada com 40 mm de aresta. Estas barras de aço são presas a uma base fixa por barras roscadas (Figura 11).

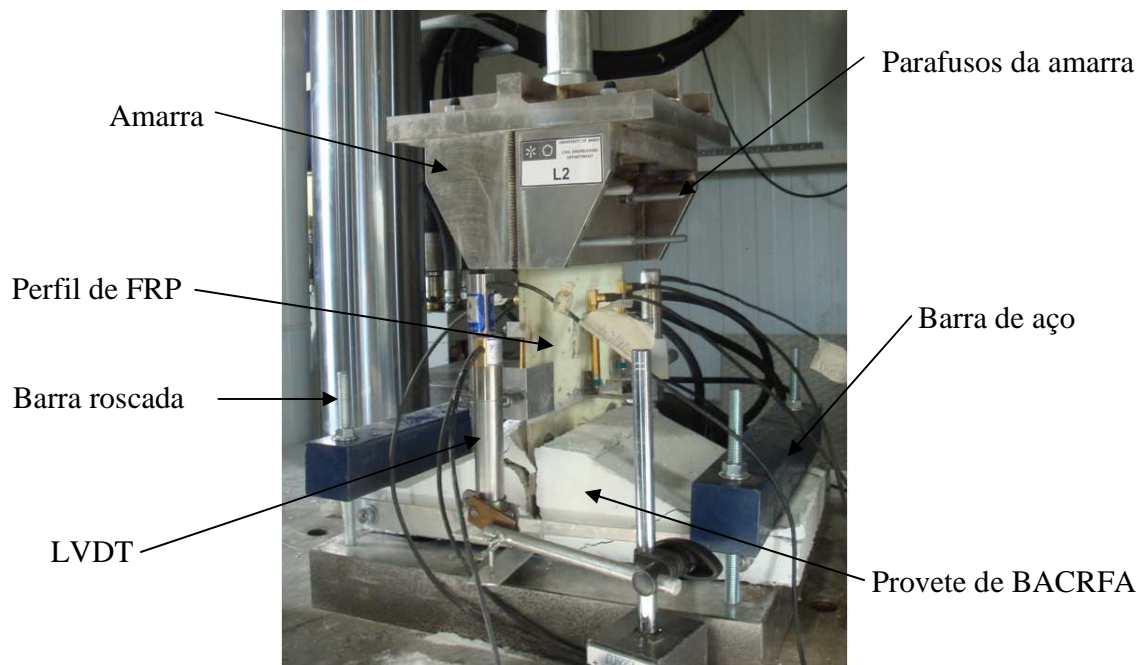
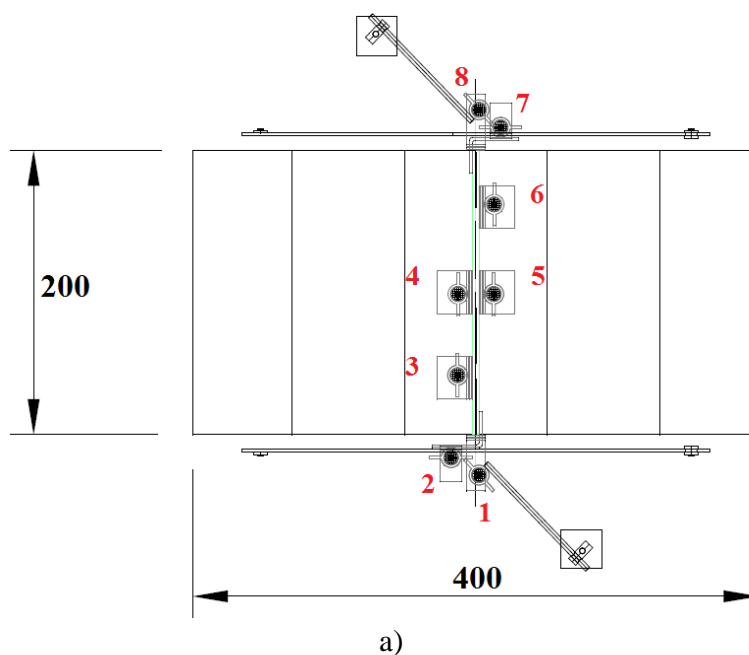


Figura 11 – Configuração de ensaio de arranque adoptada.

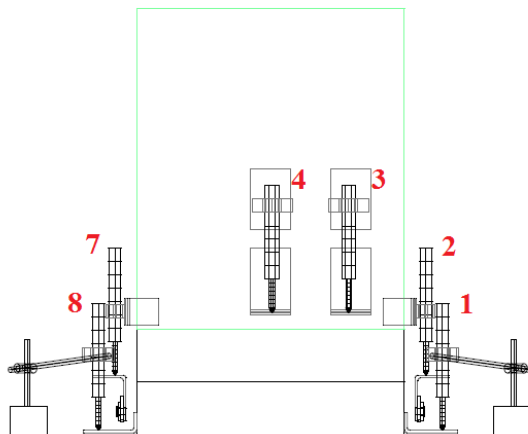
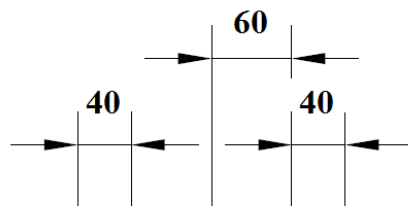
Na Figura 12 representa-se a configuração do ensaio de arranque e o posicionamento dos LVDT's (*Linear Variation Displacement Transducers*) no provete, sendo visível também o posicionamento do perfil FRP e a nervura do provete.

Para efetuar a medição dos deslocamentos utilizam-se 8 transdutores de deslocamento, quatro deles com comprimento de leitura de  $\pm 2$  mm (LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5, e LVDT 6), um com  $\pm 4$  mm (LVDT 8) e três com  $\pm 12,5$  mm (LVDT 1, LVDT 2 e LVDT 7). Os transdutores de deslocamento com maior comprimento de leitura registam o deslizamento relativo entre o FRP e o betão (LVDT 2 e LVDT 7) e o deslocamento do provete de BACRFA (LVDT 1 e LVDT 8) devido à flexão. Os LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5 e LVDT 6 são utilizados para medir a extensão do FRP.

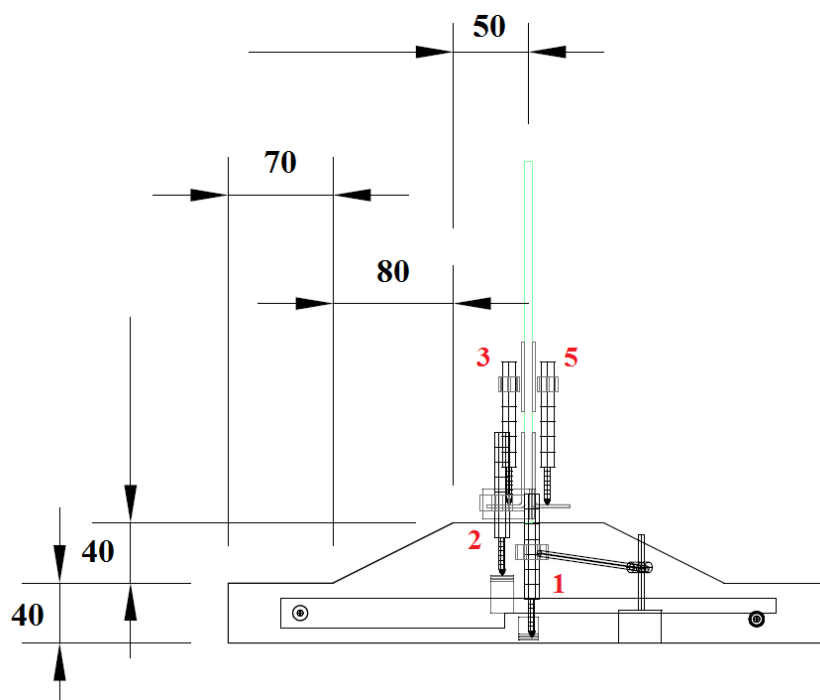
Todos os ensaios são realizados na máquina MICROTTEST (SCM4000), com controlo de deformação. O transdutor interno da máquina serve de controlo ao ensaio, impondo uma velocidade no êmbolo de  $10 \mu\text{m/s}$ . A força de tracção aplicada pelo actuador é determinada com a utilização de uma célula de carga.



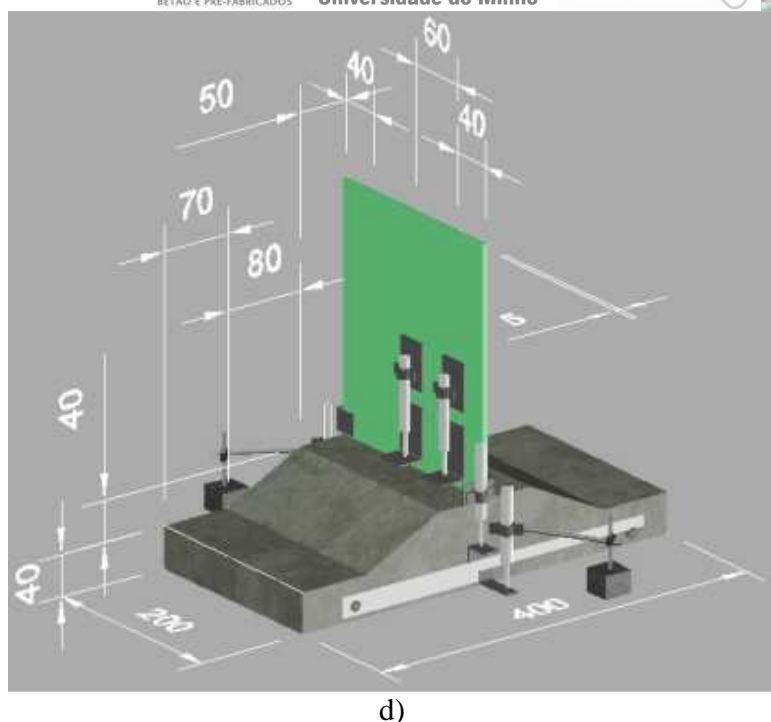




b)



c)



d)

Figura 12 – Instrumentação adotada no ensaio de arranque. a) vista em planta; b) vista lateral; c) vista frontal e d) esquema 3D (medidas em milímetros).

A determinação do deslizamento relativo do FRP-betão (*Slip*) é feita pela subtração do deslocamento do BACRFA ao deslocamento do FRP. Como forma de minimizar a parcela correspondente à deformação do próprio FRP nas medições do deslizamento, os LVDTs fixados no FRP são posicionados o mais próximo possível do provete de betão. Os deslocamentos no provete de BACRFA são determinados através de medições no ponto de deslocamento máximo do provete (parte central). Para minimizar os erros nas leituras, os batentes de leitura dos LVDTs 1 e 8 são fixados na parte inferior do provete, conforme é mostrado na Figura 13a.

As leituras dos deslocamentos relativos do FRP, LVDTs 2 e 7, são realizadas com o auxílio a um batente fixo a uma barra de alumínio. A barra é aparafusada ao provete de BACRFA nos pontos próximos à fixação do provete à base da máquina (Figura 13b). Assim, a determinação do deslizamento é possível pela subtração das leituras efetuadas pelos LVDTs 1 e 8, respectivamente, às leituras efetuadas pelos LVDTs 2 e 7.

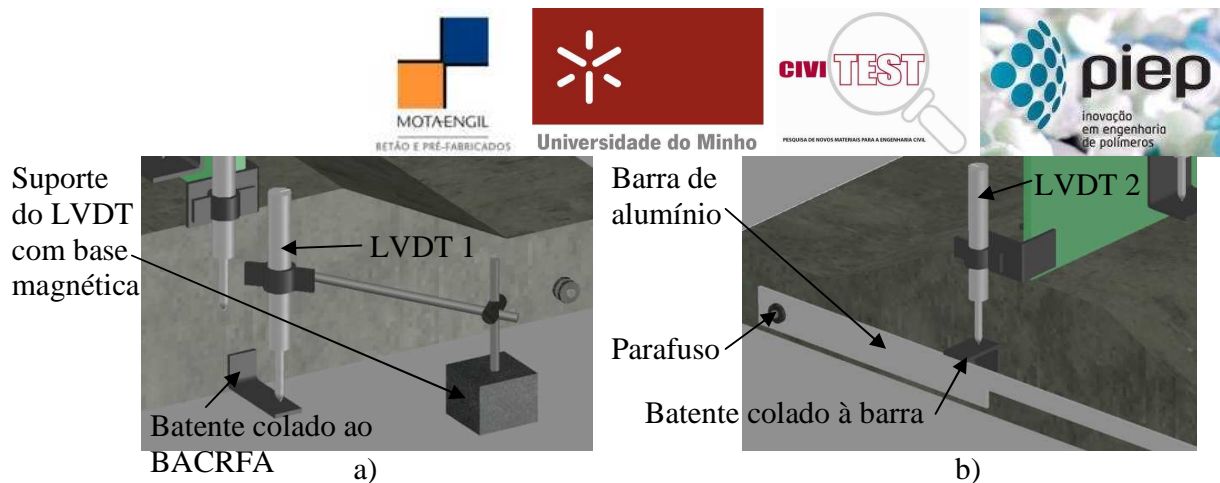


Figura 13 – Posicionamento do a) LVDT 1 e b) LVDT 2 de modo a obter-se o deslizamento do FRP.

## 7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram ensaiados dois provetes correspondentes a cada tipo de conexão estudado, sendo eles:

- Com perfis em T colados (CA2 e CA3);
- Com perfis em L embebidos (L1 e L2);
- Com perfis em T embebidos (T3 e T4) e
- Com perfis em Y embebidos (Y3 e Y4).

Apresentam-se resultados dos principais parâmetros caracterizadores do comportamento das ligações estudadas, sendo estes: a carga última, o deslizamento relativo entre FRP e BACRFA e a evolução das extensões nos perfis de FRP.

### 7.1. Perfil T colado (CA)

As Figuras Figura 14 e Figura 15 apresentam a relação entre a carga e o deslizamento entre o FRP e o BACRFA dos provetes CA2 e CA3, respectivamente.

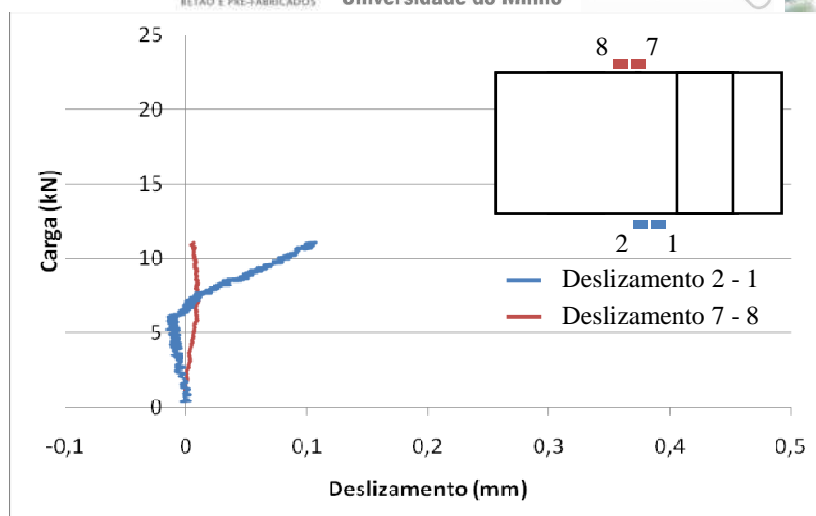


Figura 14 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete CA2.

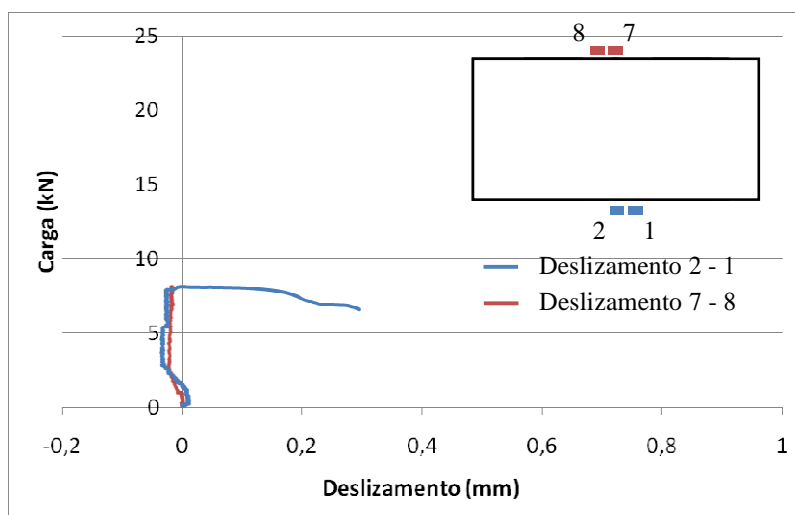


Figura 15 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete CA3.

Os resultados obtidos indicam que o nível de deslizamento verificado nos provetes colados é muito baixo, tipicamente abaixo de 0,1mm até o completo arrancamento do perfil de FRP do betão. Esse comportamento não é desejável para os conectores dos painéis sanduíche uma vez que uma rotura frágil da ligação oferece menos segurança aos utilizadores da edificação.

A evolução das extensões nos perfis de FRP dos provetes CA2 e CA3 é ilustrada nas Figuras Figura 16 e Figura 17.

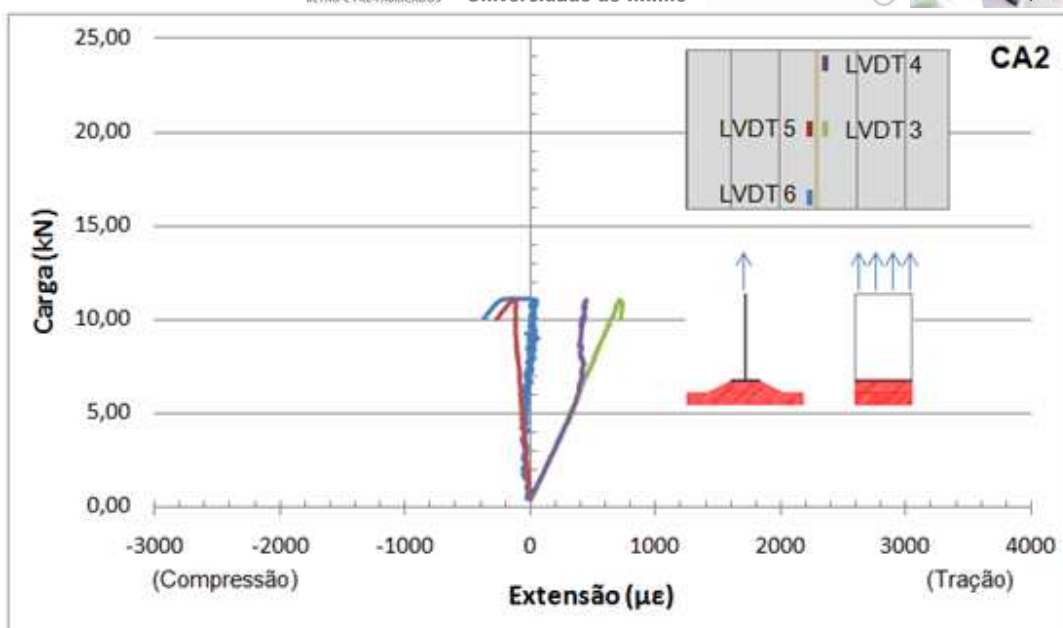


Figura 16 – Evolução da extensão do FRP versus a carga aplicada no provete CA2.

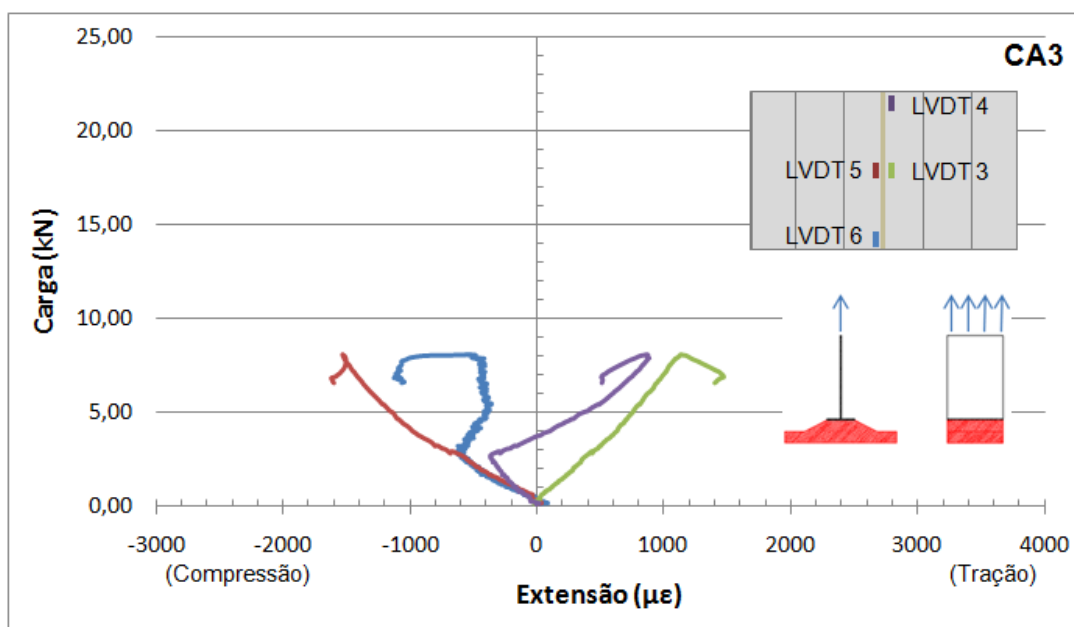


Figura 17 – Evolução da extensão do FRP versus a carga aplicada no provete CA3.

Através da análise dos valores individuais obtidos para os diferentes LVDTs é possível compreender como se deu o ensaio e avaliar o procedimento experimental adotado. As Figuras Figura 16 e Figura 17 indicam que houve flexão do perfil de FRP durante a realização dos

ensaios, uma vez que em ambos os casos, o lado dos LVDTs 3 e 4 se apresenta-se tracionado e o lado dos LVDTs 5 e 6 encontra-se comprimido.

Os valores médios das extensões nos provetes CA2 e CA3 (média das extensões para os quatro LVDTs) estão respectivamente apresentados nas Figuras Figura 18 e Figura 19.

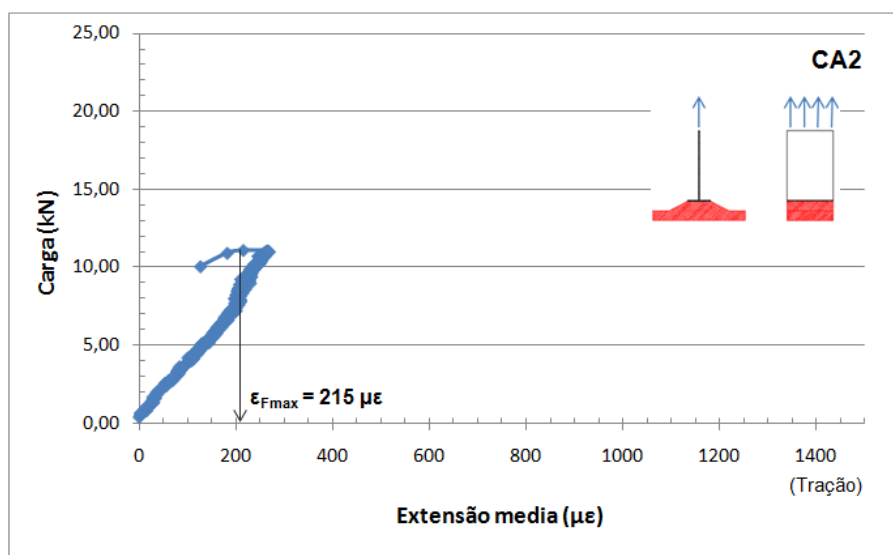


Figura 18 – Evolução da extensão média do FRP no provete CA2.

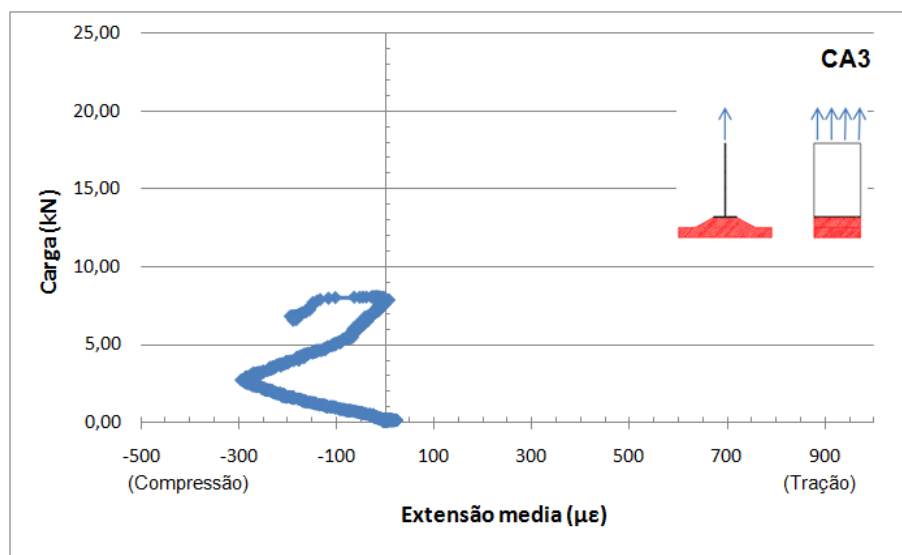


Figura 19 – Evolução da extensão média do FRP no provete CA3.



Quando a análise é realizada em termos de extensões médias, os valores são muito baixos em ambos os provetes. Enquanto no provete CA2 as extensões indicam coerentemente extensões de tração, no provete CA3, estranhamente, a média dos valores indicam compressão no perfil de FRP.

Os valores das extensões individuais para cada um dos LVDTs e os valores médios estão reunidos na Tabela 2.

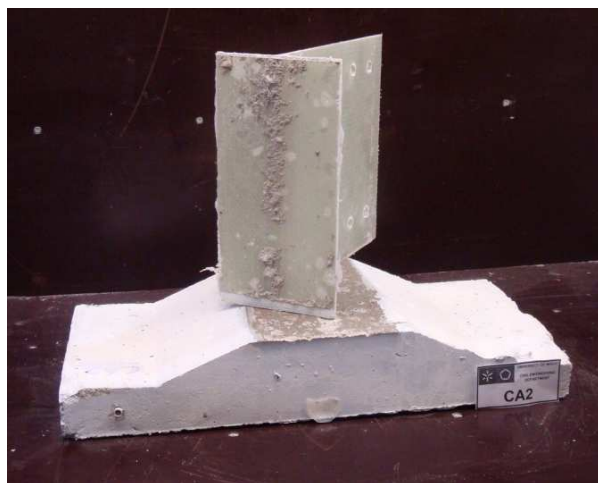
Tabela 2 – Extensões nos provetes CA2 e CA3 (sinal negativo corresponde a encurtamento).

| Provete | LVDT | Carga Última (kN) | Extensão correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão máxima de tração – $\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média máxima de tração – $\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ ) |
|---------|------|-------------------|--|--|--|--|
| CA2     | 3    | 11,06             | 711,70   | 733,87   | 215,11   | 268,70   |
|         | 4    |                   | 446,23   | 448,34   |  |  |
|         | 5    |                   | -116,98  | 2,11   |  |  |
|         | 6    |                   | -180,49  | 59,06  |  |  |
| CA3     | 3    | 8,08              | 1139,37  | 1473,30  | -17,74   | 24,25  |
|         | 4    |                   | 861,87   | 880,85   |  |  |
|         | 5    |                   | -1527,11   | 35,83  |  |  |
|         | 6    |                   | -545,08  | 82,90  |  |  |

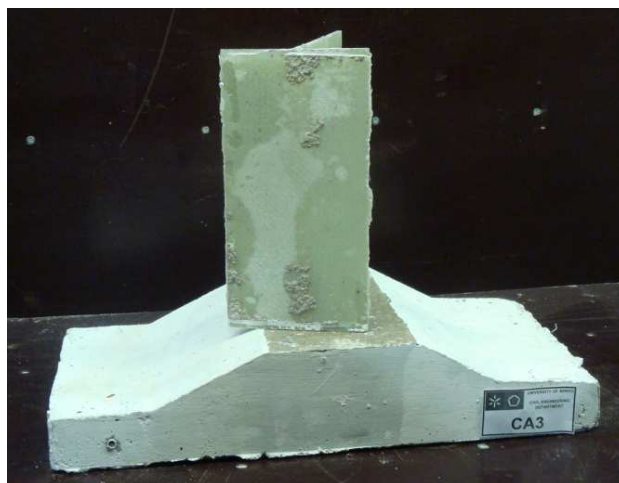
A rotura dos proteves com o perfil FRP em T colado dá-se por descolagem entre o adesivo de colagem e a superfície do banzo do FRP (Figura 20).

É de salientar a perda abrupta de capacidade de carga logo após ser atingida a carga de pico, pelo que a rotura é eminentemente frágil.

Após a aplicação de carga os provetes de betão encontram-se praticamente intactos, sem o surgimento de fendas visíveis. A carga máxima para os provetes CA2 e CA3 é de 11,06 kN e 8,08 kN, respectivamente.



a) CA2

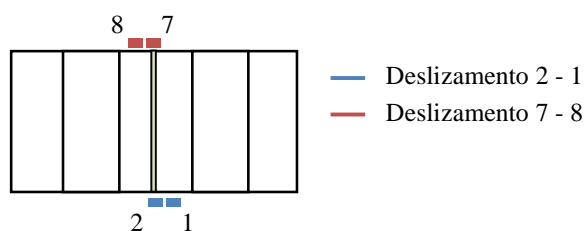


b) CA3

Figura 20 – Modo de rotura dos provetes colados (CA).

## 7.2. Perfil L embebido (L)

As Figuras Figura 21 **Error! Reference source not found.** e Figura 22 apresentam os deslizamentos entre o FRP e o BACRFA dos provetes L1 e L2. Em ambos os casos, os deslizamentos são muito superiores aos provetes com perfil em T colados, chegando a níveis de deslizamento superiores a 20 mm, sem haver perda de carga. Esses valores indicam um comportamento muito satisfatório do conector, apresentando elevada capacidade de absorção de energia de deformação sem haver perda da capacidade de carga.





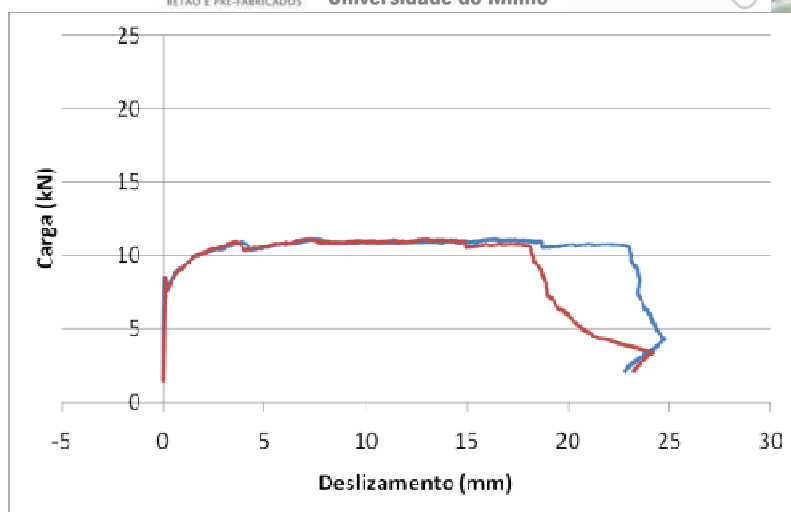


Figura 21 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete L1.

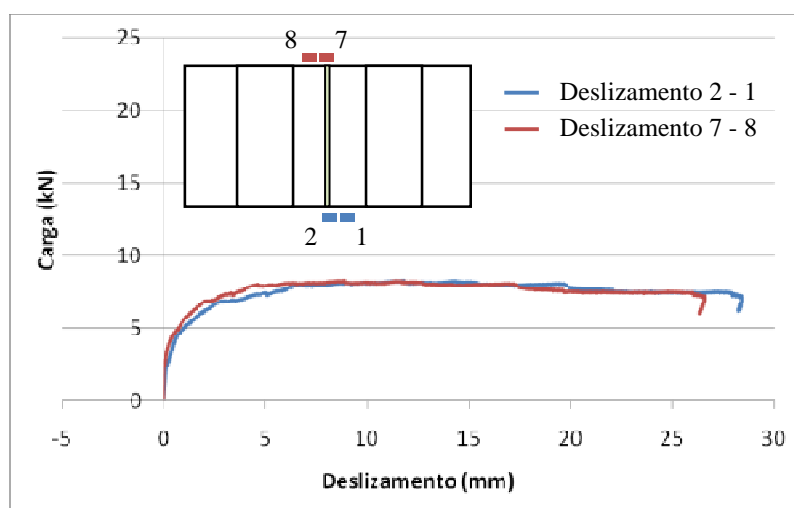


Figura 22 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete L2.

A carga máxima obtida no provete L1 foi de 11,17 kN e no provete L2 de 8,30 kN. Destaca-se a entrada da carga em patamar logo depois de atingido o valor de pico, dando origem a uma rotura dúctil.

As extensões do FRP dos provetes L1 e L2 são representadas pelas Figuras Figura 23 e Figura 24, respectivamente.

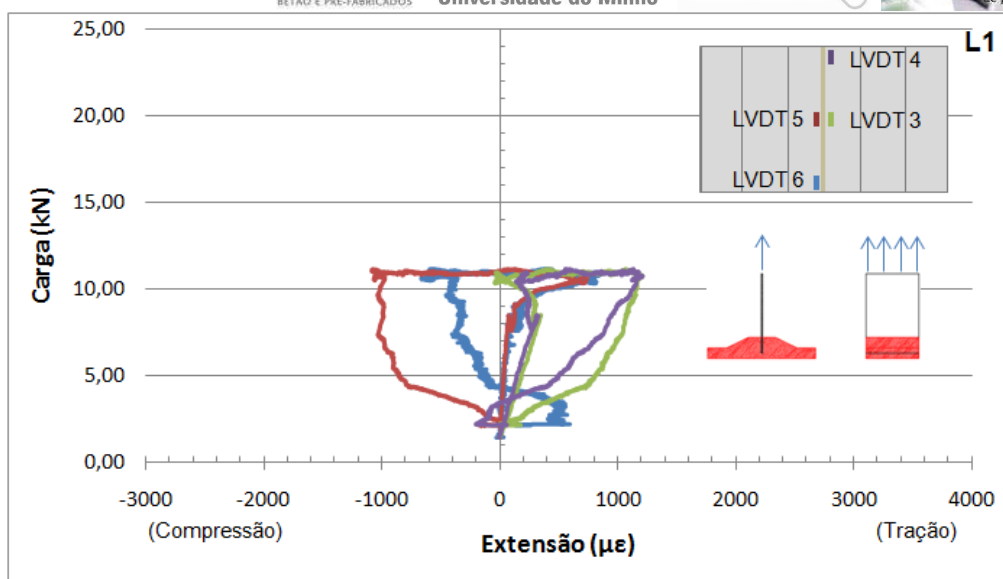


Figura 23 – Evolução das extensões do FRP no provete L1.

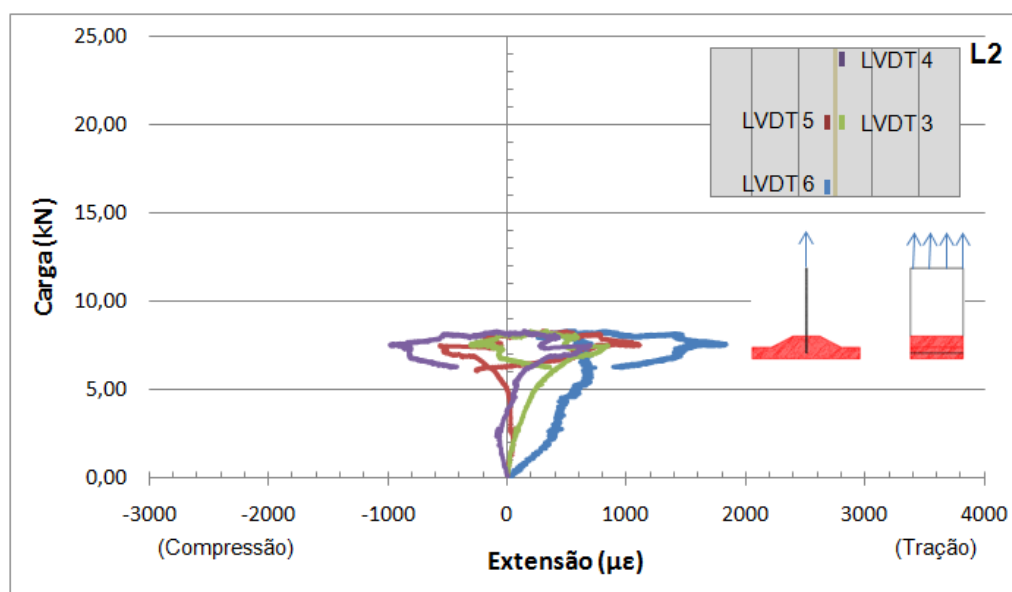


Figura 24 – Evolução das extensões do FRP no provete L2.

Através da análise das Figuras Figura 23 e Figura 24 é possível concluir que, mais uma vez, houve flexão nos perfis de FRP durante a realização dos ensaios.

Os valores médios das extensões para os provetes L1 e L2 (média das extensões para os quatro LVDTs) estão respectivamente apresentados nas Figuras Figura 25 e Figura 26.

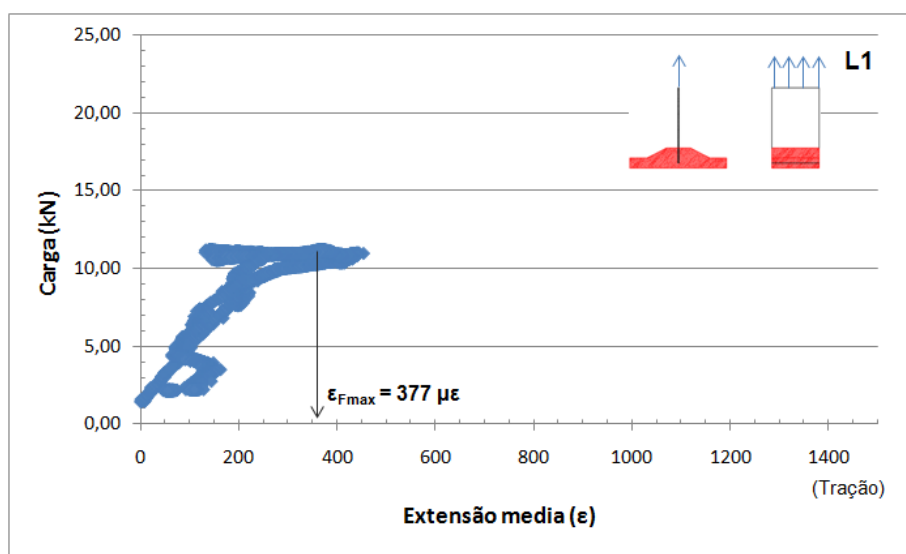


Figura 25 – Evolução da extensão média do FRP no provete L1.

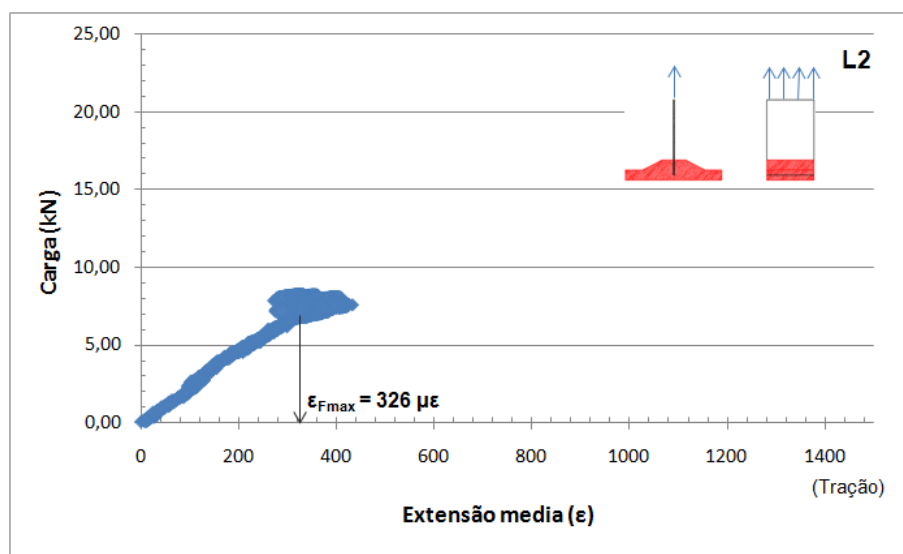


Figura 26 – Evolução da extensão média do FRP no provete L2.

Como pode ser observado nas Figuras Figura 25 e Figura 26 as extensões médias em ambos os provetes são muito baixas, não atingindo os 400  $\mu\epsilon$ .

Os valores das extensões individuais para cada um dos LVDTs e os valores médios estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Extensões nos provetes L1e L2 (sinal negativo corresponde a encurtamento).

| Provete | LVDT | Carga Última (kN) | Extensão correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão máxima de tração – $\epsilon_{maxt}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média máxima de tração – $\epsilon_{m,max}$ ( $\mu\epsilon$ ) |
|---------|------|-------------------|--|---|--|--|
| L1      | 3    | 11,17             | 400,20   | 1208,00   | 376,58   | 454,80   |
|         | 4    |                   | 563,33   | 1203,67   |  |  |
|         | 5    |                   | 123,32   | 750,38  |  |  |
|         | 6    |                   | 419,49   | 864,48  |  |  |
| L2      | 3    | 8,30              | 326,30   | 844,76  | 326,28   | 434,27   |
|         | 4    |                   | 141,37   | 695,20  |  |  |
|         | 5    |                   | 299,31   | 1100,28   |  |  |
|         | 6    |                   | 538,15   | 1834,32   |  |  |

Para esse tipo de conector a fenda principal surge ao longo do conector e os mesmos são completamente arrancados do provete de betão (ver Figura 27). Após a realização dos ensaios os perfis de FRP não demonstram sinais de dano significativos, a não ser os ocasionados pelo escorregamento entre o perfil de FRP e o betão. Em particular, observa-se que os orifícios não apresentam quaisquer sinais de rasgos ou esmagamentos em ambos os provetes.



a)



b)

Figura 27 – Modo de rotura dos provetes com conectores tipo “L”. a) L1 e b) L2.

### 7.3. Perfil T embebido (T)

As Figuras Figura 28 e Figura 29 apresentam a relação entre a carga e o deslizamento medido entre o FRP e o BACRFA dos provetes T3 e T4, respectivamente.

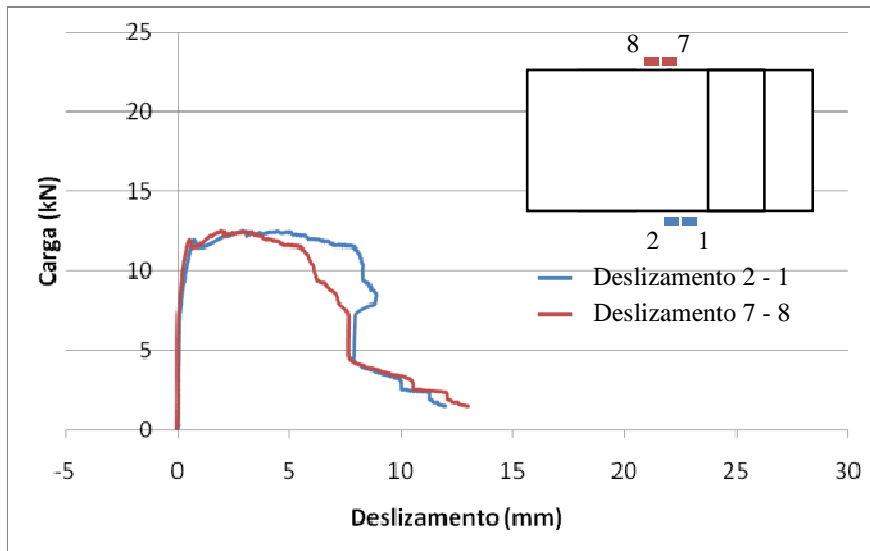


Figura 28 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete T3.

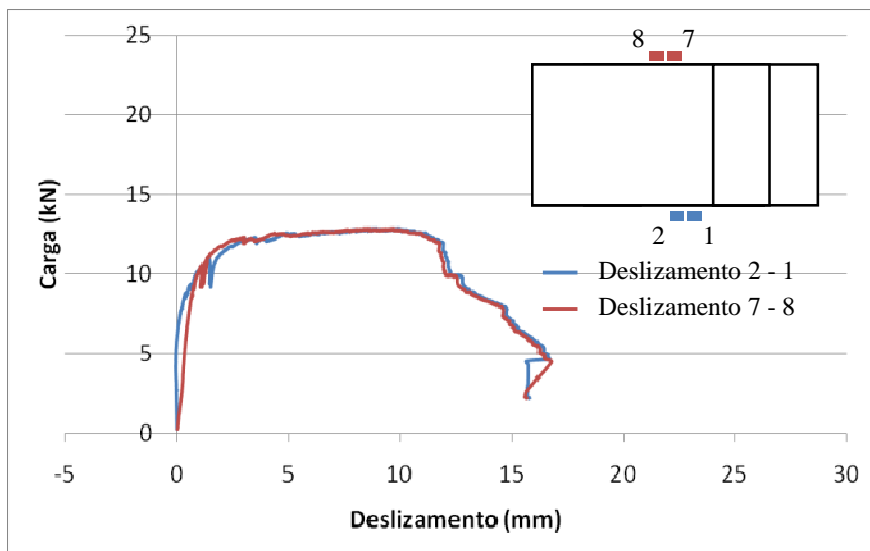


Figura 29 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete T4.

Nas Figuras Figura 28 e Figura 29 é possível visualizar valores de deslizamento muito semelhantes em ambos os lados dos provetes. A rotura dá-se de forma dúctil para ambos os

provetes, sendo mantida a carga ao nível da carga máxima até um deslizamento na ordem dos 8mm para o provete T3 e de 11mm para o provete T4.

A carga última obtida no ensaio com o provete T3 foi de 12,57 kN e para T4 de 12,81 kN. Salienta-se que a carga entra em patamar progressivamente originando uma rotura muito dúctil.

As extensões do FRP dos provetes T3 e T4 são representadas pelas Figuras Figura 30 e Figura 31, respectivamente.

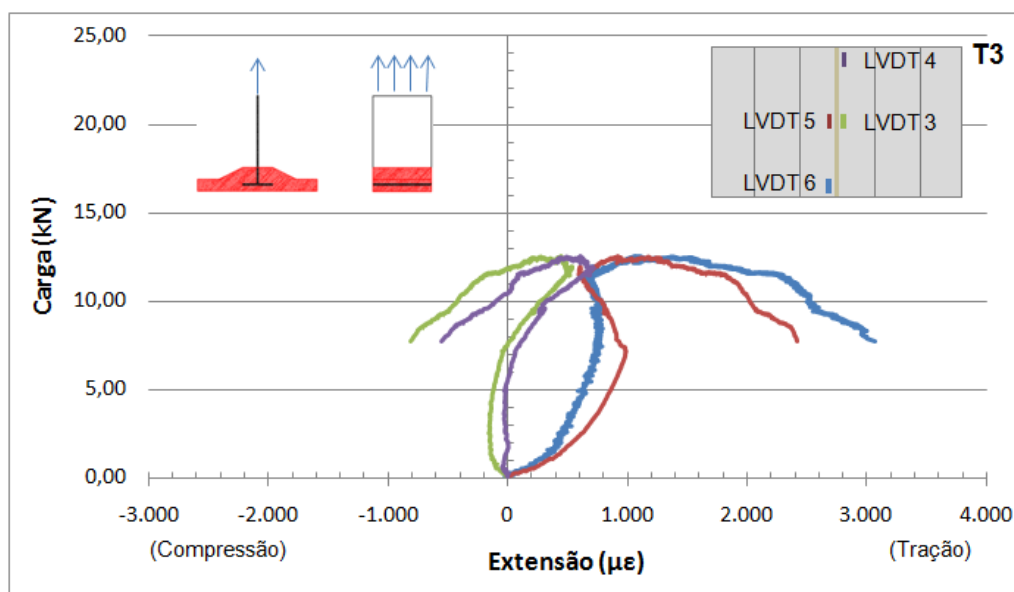


Figura 30 – Evolução das extensões do FRP no provete T3.

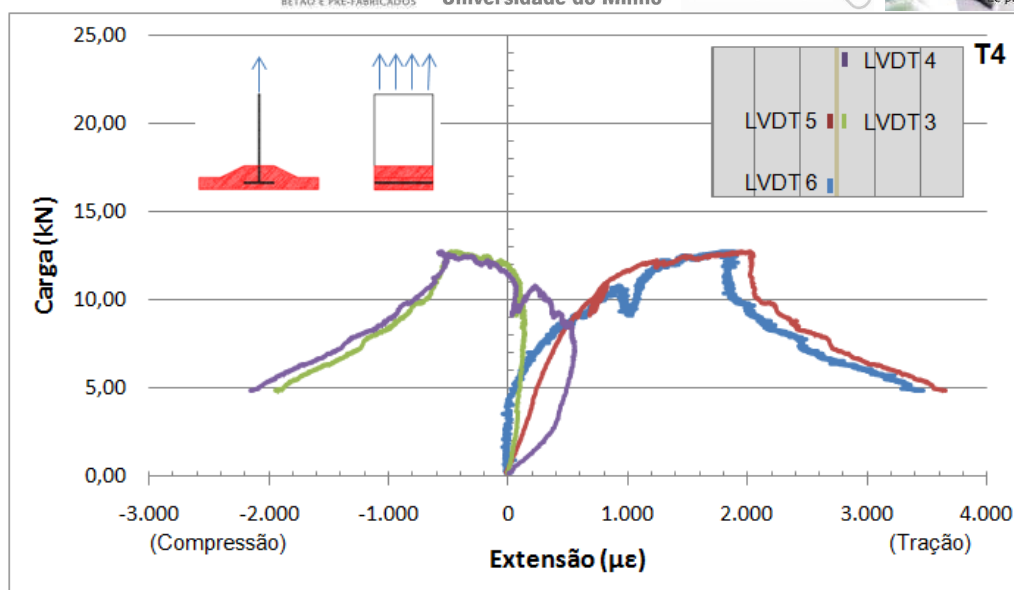


Figura 31 – Evolução das extensões do FRP no provete T4.

Através da análise das Figuras Figura 30 e Figura 31 é possível concluir que mais uma vez houve flexão nos perfis de FRP durante a realização dos ensaios. As extensões máximas foram superiores a 3000  $\mu\epsilon$  em ambos os casos. Nos dois ensaios, o lado dos LVDTs 5 e 6 manteve-se mais tracionado do que o lado dos LVDTs 3 e 4.

Os valores médios das extensões para os provetes T3 e T4 (média das extensões para os quatro LVDTs) estão respectivamente apresentados nas Figuras Figura 32 e Figura 33.

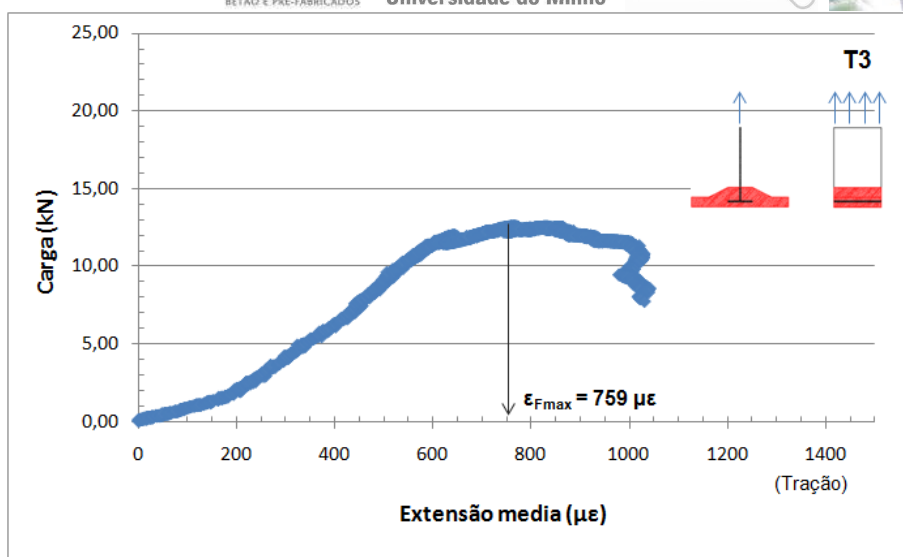


Figura 32 – Gráfico da evolução da extensão média do FRP no provete T3.

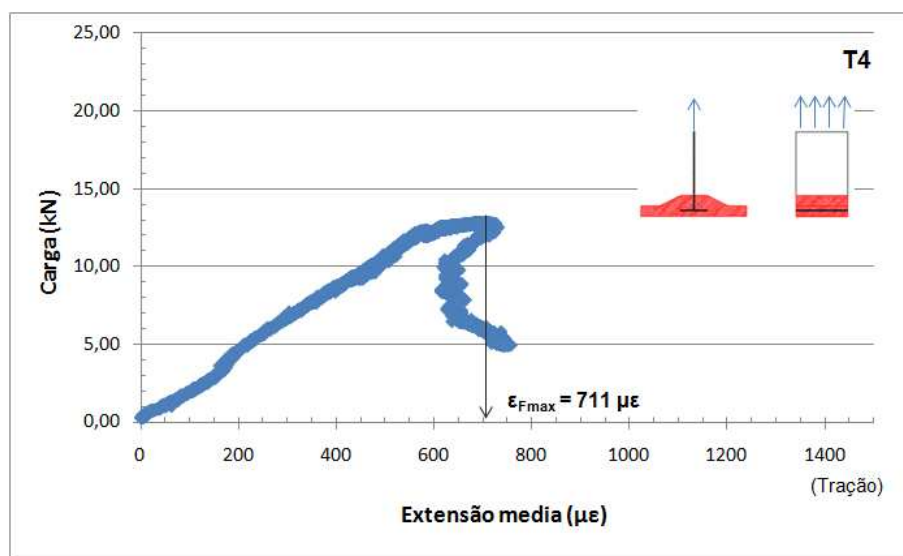


Figura 33 – Gráfico da evolução da extensão média do FRP no provete T4.

Como pode ser observado nas Figuras Figura 32 e Figura 33 as extensões médias correspondentes às cargas máximas são 759 e 711  $\mu\epsilon$  respectivamente para os provetes T3 e T4.

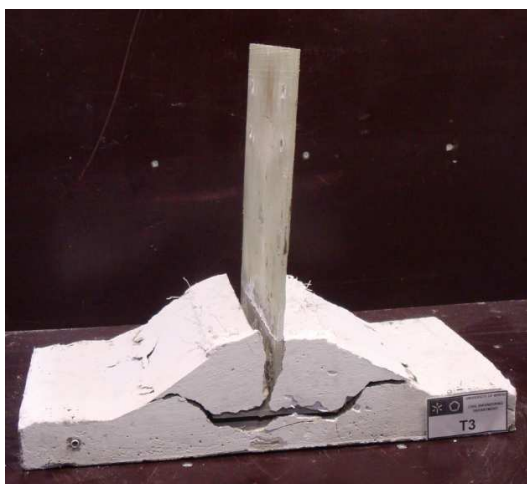
Os valores das extensões individuais para cada um dos LVDTs e os valores médios estão reunidos na Tabela 4.



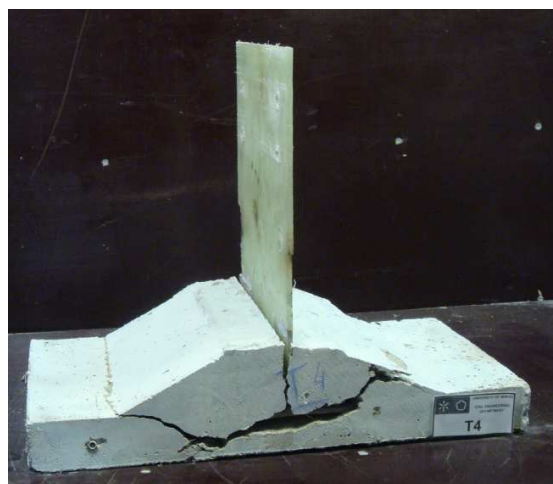
Tabela 4 – Extensões nos provetes T3 e T4 (sinal negativo corresponde a encurtamento).

| Provete | LVDT | Carga Última (kN) | Extensão correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão máxima de tração – $\epsilon_{maxt}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média máxima de tração – $\epsilon_{mmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) |
|---------|------|-------------------|--|---|--|---|
| T3      | 3    | 12,57             | 448,77   | 542,75  | 759,34   | 1042,17   |
|         | 4    |                   | 610,80   | 713,13  |  |   |
|         | 5    |                   | 920,07   | 2417,67   |  |   |
|         | 6    |                   | 1057,73  | 2069,2  |  |   |
| T4      | 3    | 12,81             | -440,32  | 145,72  | 711,03   | 757,88  |
|         | 4    |                   | -569,67  | 557,00  |  |   |
|         | 5    |                   | 1953,93  | 3657,00   |  |   |
|         | 6    |                   | 1813,25  | 3472,61   |  |   |

O modo de rotura nos ensaios com este tipo de conector dá-se de forma muito dúctil, como pode ser verificado nas Figuras Figura 28 e Figura 29. É possível identificar na Figura 34 que para o conector tipo T embebido as linhas de rotura do BACRFA se desenvolvem por baixo do banzo do conector e evolui a 45° ao longo da nervura. A rotura dos provetes com o perfil FRP em T embebido dá-se por progressiva abertura da fenda que define a linha de rotura, seguida de destacamento do BACRFA localizado acima dessa linha.



a)



b)

Figura 34 – Modo de rotura dos provetes tipo “T”. a) T3 e b) T4.

#### 7.4. Perfil Y embebido (Y)

As Figuras Figura 35 e Figura 36 apresentam o deslizamento relativo entre o conector de FRP e o BACRFA.

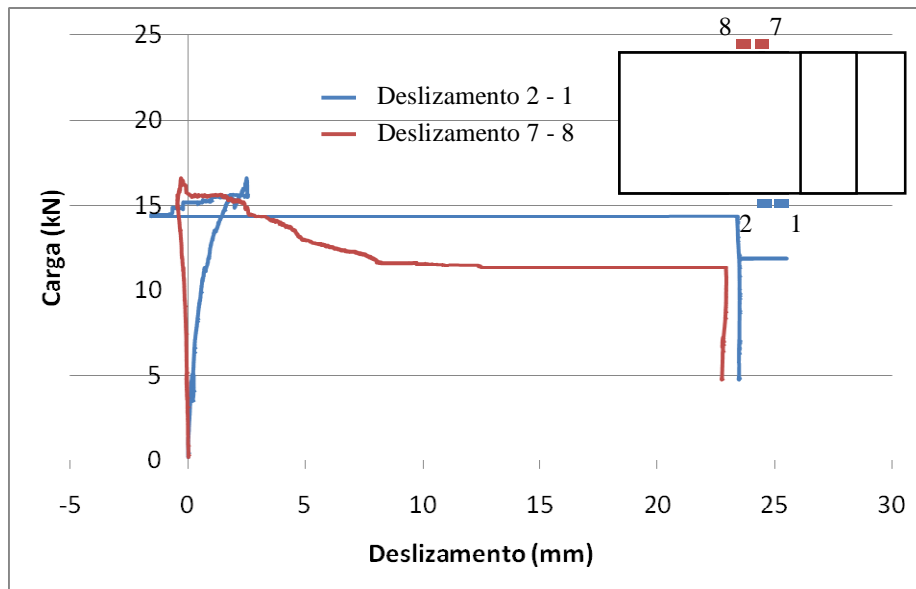


Figura 35 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete.

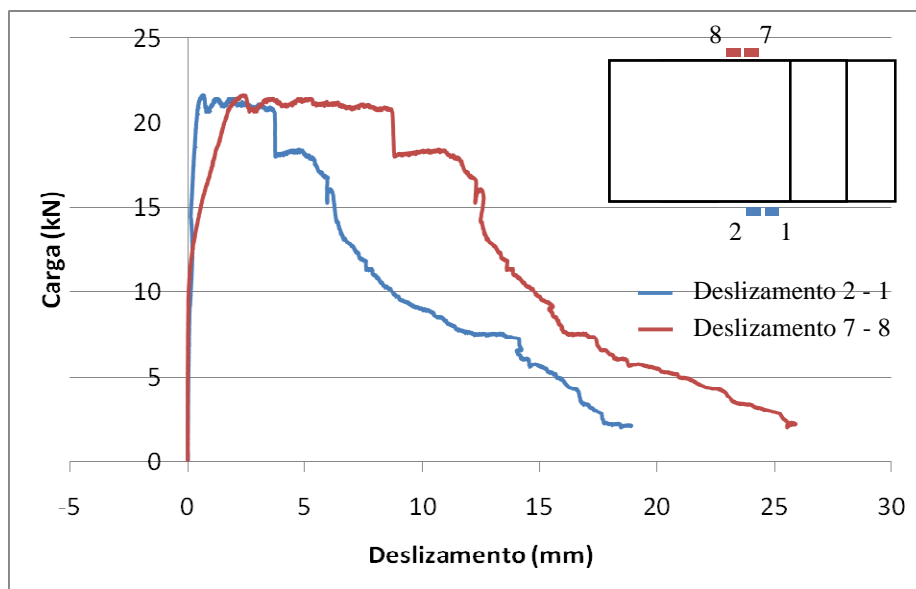


Figura 36 – Relação entre a carga e o deslizamento FRP/BACRFA do provete Y4.

Nos ensaios com os conectores tipo Y destaca-se positivamente o elevado valor da carga correspondente ao pico, quando comparado com as outras tipologias, sendo para o Y3 de 16,63 kN e para o Y4 de 21,63 kN. Outro ponto favorável é a entrada da carga em queda muito lenta após o pico (rotura dúctil).

Verifica-se nas Figuras Figura 35 e Figura 36 que, no trecho inicial, os conectores tipo Y apresentam rigidezes mais elevadas do que as verificadas nos outros tipos de ligação estudados.

As extensões do FRP dos provetes Y3 e Y4 são representadas pelas Figuras Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

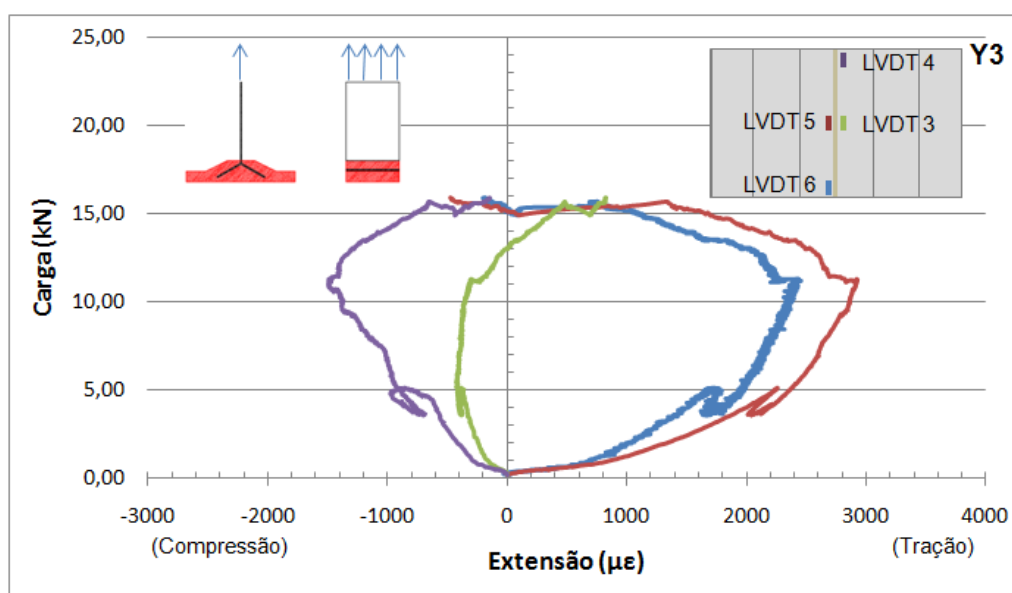


Figura 37 – Gráfico da evolução das extensões do FRP no provete Y3.

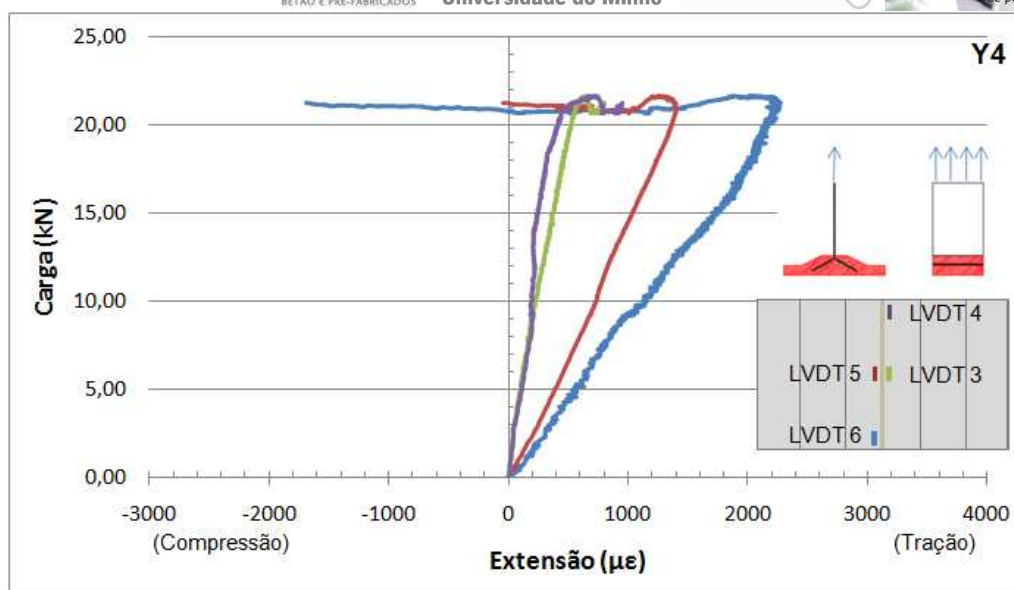


Figura 38 – Gráfico da evolução das extensões do FRP no provete Y4.

Através da análise das Figuras Figura 37 e Figura 38 é possível concluir que mais uma vez há flexão nos perfis de FRP durante a realização dos ensaios. As extensões máximas atingem valores próximos dos 3000  $\mu\epsilon$ . Assim como nos ensaios com os conectores tipo T embebido, o lado dos LVDTs 5 e 6 mantém-se mais tracionado do que o lado dos LVDTs 3 e 4.

Os valores médios das extensões para os provetes Y3 e Y4 (média das extensões para os quatro LVDTs) estão respectivamente apresentados nas Figuras Figura 39 e Figura 40.

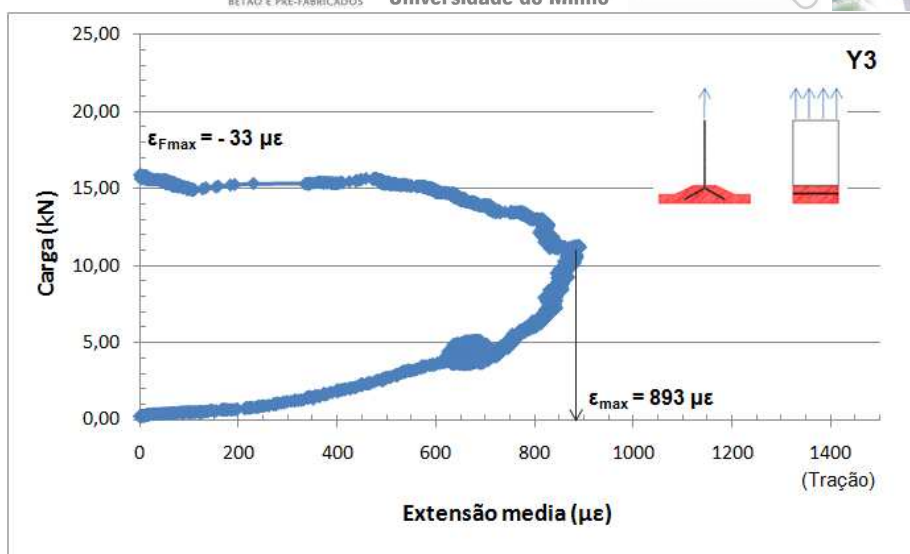


Figura 39 – Gráfico da evolução da extensão média do FRP no provete Y3.

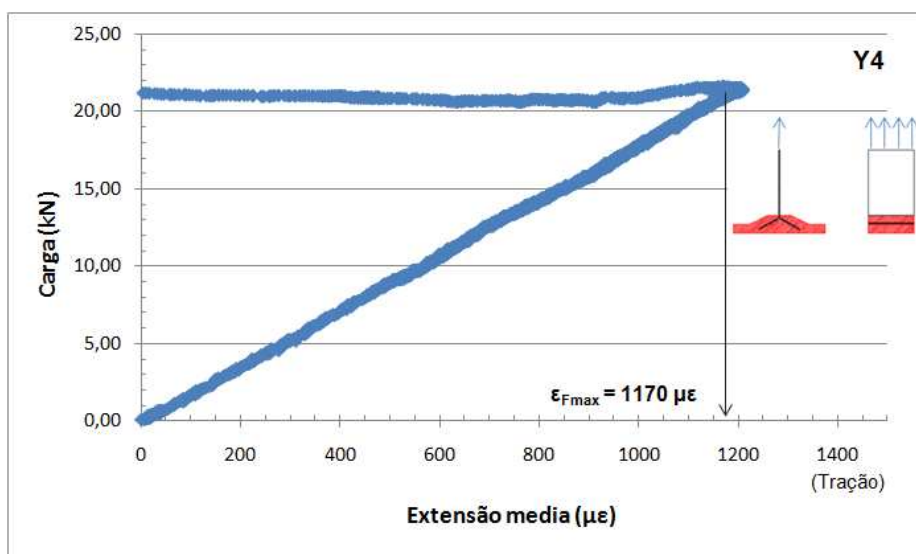


Figura 40 – Gráfico da evolução da extensão média do FRP no provete Y4.

Como pode ser observado nas Figuras Figura 39 e Figura 40 as extensões médias correspondentes às cargas máximas são de 893 e 1170  $\mu\epsilon$  respectivamente para os provetes Y3 e Y4.

Os valores das extensões individuais para cada um dos LVDTs e os valores médios estão reunidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Extensões nos provetes Y3 e Y4 (sinal negativo corresponde a encurtamento).

| Provete | LVDT | Carga Última (kN) | Extensão correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão máxima de tração – $\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média correspondente à carga máxima – $\epsilon_{Fmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) | Extensão média máxima de tração – $\epsilon_{mmax}$ ( $\mu\epsilon$ ) |
|---------|------|-------------------|--|--|--|---|
| Y3      | 3    | 16,63             | 933,45   | 933,45   | -33,00   | 893,05  |
|         | 4    |                   | 421,97   | 421,97   |  |   |
|         | 5    |                   | -1070,77   | 2926,70  |  |   |
|         | 6    |                   | -418,65  | 2458,15  |  |   |
| Y4      | 3    | 21,63             | 646,25   | 801,47   | 1170,17  | 1209,24   |
|         | 4    |                   | 714,18   | 946,27   |  |   |
|         | 5    |                   | 1259,4   | 140,91   |  |   |
|         | 6    |                   | 2060,83  | 2276,25  |  |   |

Destaca-se que a superfície de rotura de ambos os provetes é maior do que as observadas para os demais conectores testados e que, durante a realização dos ensaios se observa o surgimento de fendilhamento múltiplo no provete mesmo quando este mantém uma elevada capacidade de carga. Provavelmente, essa forma de rotura ocorre devido ao efeito benéfico das fibras de aço do betão (Figura 41).



Figura 41 – Fendilhamento múltiplo verificado nos provetes constituídos por conectores tipo Y embecidos.

Outro aspecto relevante é que as linhas de rotura mobilizadas nos provetes Y3 e Y4 não são idênticas, o que tem depois reflexo na carga máxima atingida por cada um dos provetes. Possivelmente, o posicionamento do conector no provete de betão não ficou igual nos dois provetes, levando a que se mobilizassem diferentes modos de rotura. Deste modo, fica claro que as dimensões da zona de BACRFA que envolve o conector condicionam significativamente o seu comportamento e o modo como se desenvolve a rotura desta ligação. Este aspecto é significativo se se considerar a possibilidade de alterar a configuração dos provetes.

Ambos os provetes já rompidos podem ser vistos na Figura 42.



a)



b)

Figura 42 – Modo de rotura dos provetes com conectores tipo “Y”. a) Y3 e b) Y4.

Durante a realização dos ensaios verificou-se que os perfis de FRP começaram a sofrer delaminação como a que se apresenta na Figura 43.



Figura 43 – Delaminação verificada no perfil de FRP durante os ensaios com as conexões tipo Y.

## 8. CONCLUSÕES

Tendo em conta os resultados apresentados anteriormente é possível chegar às seguintes conclusões:

- **Com relação ao procedimento experimental adotado:**
  - Em todos os ensaios verifica-se que o perfil de FRP se apresenta sob flexão durante a realização dos ensaios. Isso indica que é necessário adaptar o setup utilizado de forma a que se consiga centrar melhor o provete em relação ao equipamento de aplicação de carga e efetuar a aplicação da carga garantindo a sua distribuição uniforme ao longo do desenvolvimento do FRP.
- **Com relação à capacidade de carga dos conectores estudados:**
  - Os conectores colados e os tipo L embebidos apresentam o mesmo nível de capacidade de carga (valor médio cerca de 9,60kN). O conector tipo T embebido apresenta um nível intermédio (média de 12,70kN) e o conector tipo Y embebido é a tipologia com maior capacidade de carga (média de 19,00kN);





- Estudos paramétricos dos painéis sanduíche apresentados em relatórios anteriores indicam que, para a situação em uso (considerando cargas do vento e cargas axiais das lajes apoiadas nos painéis), as tensões máximas de tração nos perfis de FRP são sempre inferiores a 8MPa. Considerando uma distribuição de tensões uniforme nos conectores de FRP, essas tensões correspondem a uma carga na ordem de 4kN nos provetes ensaiados nos ensaios de arranque. Sendo assim, todos os tipos de conectores estudados no presente estudo satisfariam essa capacidade de carga necessária, apesar das diferentes capacidades de carga apresentadas.
- **Com relação às formas de rotura verificadas para os diferentes tipos de conectores estudados:**
  - De uma forma geral, os conectores colados com adesivo apresentam uma rotura muito frágil enquanto os conectores embebidos apresentam roturas dúcteis. Os conectores tipo L embebidos, constituídos por placas de FRP simplesmente furadas, apesar de apresentarem a mesma capacidade de carga dos conectores colados, mostram uma forma de rotura muito mais dúctil, chegando a atingir deslizamentos superiores a 20mm ao nível da carga máxima.
  - Em nenhum caso as extensões nos FRPs se aproximaram das extensões últimas dos perfis. Enquanto os ensaios de caracterização mostram que os perfis possuem extensão última em cerca de 26000 $\mu\epsilon$ , o valor máximo verificado nos ensaios de arranque foi de 3657 $\mu\epsilon$  no ensaio da conexão do tipo T.
- **Com relação à necessidade de realização de trabalhos futuros:**
  - O presente estudo limitou-se a estudar o desempenho mecânico das conexões através dos ensaios de arranque. No entanto, quando aplicados nos painéis sanduíche, as conexões estarão sujeitas a esforços de corte. Sendo assim, também é importante que sejam realizados estudos com ensaios de tipo *push-out*;
  - No presente estudo são analisados os comportamentos dos diferentes tipos de conectores em provetes de BACRFA nervurados. No entanto, a materialização das nervuras implica dificuldades construtivas que tornam os sistemas de conexão embebidos menos atrativos quando comparados com o sistema colado. Sendo assim, devem ser realizados novos estudos em elementos de BACRFA de pequena espessura e conectores embebidos, adaptando a geometria dos conectores aqui estudados.
  - Foi verificado que no caso das conexões tipo L os conectores aparentemente estão sobredimensionados uma vez que não foi verificado qualquer tipo de dano. Sendo assim são necessários mais estudos de forma a que o compósito possa ser otimizado.

Por último é feito um resumo dos resultados obtidos nesse estudo preliminar. Na Figura 44 estão reunidas as cargas máximas e a forma de rotura (na forma de curvas carga x deslizamento) para os diferentes provetes ensaiados.






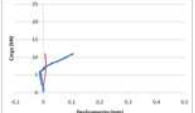

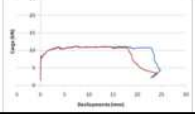
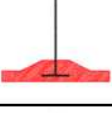
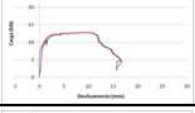
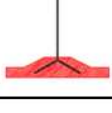
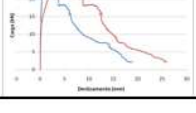
| Provete   |              |     | Carga máxima (kN) | Tipo de rotura  |
|---|--------------|-----|-------------------|---|
| Tipo  | Referência   |     |                   |   |
|  | "T" colado   | CA2 | 11,06             |  |
|   | "T" colado   | CA3 | 8,08              |   |
|  | "L" embebido | L1  | 11,17             |  |
|   | "L" embebido | L2  | 8,30              |   |
|  | "T" embebido | T3  | 12,57             |  |
|   | "T" embebido | T4  | 12,81             |   |
|  | "Y" embebido | Y3  | 16,63             |  |
|   | "Y" embebido | Y4  | 21,63             |   |

Figura 44 – Resumo dos resultados para os diferentes tipos de conectores.

## REFERÊNCIAS

ASTM Standard D 3039/D 3039M (2008). Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA, ASTM International.

ASTM Standard D 6856 (2003). Testing Fabric-Reinforced "Textile" Composite Materials. West Conshohocken, PA, ASTM International.

Callister Jr., W. D. (2007). Materials science and engineering : an introduction.

Jeong, Y.-J., H.-Y. Kim, et al. (2009). "Longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs with perfobond shear connectors." Journal of Constructional Steel Research **65**(1): 81-88.

Lee, B.-J. and S. Pessiki (2006). "Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels." Energy and Buildings **38**(8): 1006-1014.

Rizkalla, S. H. and M. Dawood (2009). Advances on the Use of FRP for the Precast Concrete Industry. FRPRCS-9. Sydney, Australia.

Valente, I. and P. J. S. Cruz (2004). "Experimental analysis of Perfobond shear connection between steel and lightweight concrete." Journal of Constructional Steel Research **60**(3-5): 465-479.

