

Desenvolvimento de painéis *sandwich* estruturais constituídos por camadas nervuradas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço e conectores de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro

Rodrigo
Lameiras¹

Tiago
Santos²

Joaquim
Barros³

Miguel
Azenha⁴

Isabel
Valente⁵

RESUMO

No presente trabalho propõe-se uma nova solução estrutural de painéis *sandwich* termicamente eficientes para uma casa modular pré-fabricada. Os painéis *sandwich* tradicionais são geralmente constituídos por duas camadas externas de betão separadas por um núcleo de material isolante, e unidas através de conectores metálicos. No entanto, estes conectores causam pontes térmicas, uma vez que atravessam a camada de isolamento e são constituídos por materiais com elevada condutibilidade térmica. Em painéis que compõem a envolvente das edificações tais pontes térmicas podem levar a um maior consumo energético da edificação e problemas relacionados com a humidade e consequente condensação. Na tentativa de evitar estes problemas é proposto um método construtivo inovador através do uso de conectores compósitos com fibra de vidro (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP) e de camadas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). Com o objetivo de reduzir os custos com materiais, propõe-se o uso de camadas de pequena espessura de BACRFA com nervuras nas proximidades dos conectores, facilitando a materialização das conexões embebidas e evitando concentrações de tensões nestas regiões. Neste trabalho apresentam-se diferentes soluções de conectores de GFRP para ligar os panos de BACRFA dos painéis *sandwich* nervurados e avaliam-se os respectivos comportamentos mecânicos mediante a realização de ensaios de arranque (*pull-out*). Também é realizado um estudo numérico preliminar para avaliar o impacto, do ponto de vista térmico, do emprego de camadas nervuradas e do uso do GFRP em substituição do aço para materializar as conexões entre as camadas de betão.

Palavras-chave: Painel *sandwich*, BACRFA, GFRP, análise térmica, ensaios de arranque (*pull-out*)

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a tendência de elevação dos custos da energia, têm conduzido as regulamentações técnicas a tornarem-se cada vez mais exigentes do ponto de vista do desempenho energético das edificações [1, 2]. Estas exigências somam-se a uma maior consciencialização do consumidor relativamente aos fatores que têm impulsionado uma busca crescente por tecnologias que conduzam a uma maior eficiência energética das habitações. Sabendo que uma parcela significativa do consumo energético dos edifícios está relacionada com os aparelhos utilizados para aquecimento ou arrefecimento, uma das formas de garantia de redução dos gastos de

¹ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Eng., Dep. de Eng. Civil, Guimarães, Portugal. rmlameiras@civil.uminho.pt

² ISISE, Univ. do Minho, Escola de Eng., Dep. de Eng. Civil, Guimarães, Portugal. b5812@civil.uminho.pt

³ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Eng., Dep. de Eng. Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

⁴ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Eng., Dep. de Eng. Civil, Guimarães, Portugal. miguel.azinha@civil.uminho.pt

⁵ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Eng., Dep. de Eng. Civil, Guimarães, Portugal. isabelv@civil.uminho.pt

energia preconizada nas regulamentações relativas ao conforto térmico de edifícios é o estabelecimento de valores limite para a transmissibilidade térmica (U) para as paredes que compõem a envolvente do edifício [1]. Esta limitação é essencialmente definida com base nas características meteorológicas da região em análise. Para se atender a estes requisitos, que estão a tornar-se cada dia mais exigentes, ou atrair os clientes mais conscientes através de certificações energéticas, é necessário introduzir inovações no mercado ao nível da capacidade de isolamento das soluções de fachada.

É este cenário que conduz a um crescente interesse pelo sistema de paredes aligeiradas e isoladas de betão do tipo *sandwich*. Esta tecnologia é especialmente atrativa por empregar materiais comumente utilizados na construção civil, e pelo facto do isolamento térmico se encontrar protegido entre duas camadas de betão. Além disto, devido a sua inércia térmica, a camada de betão voltada para o interior da edificação contribui para uma regularização eficaz das temperaturas da habitação. Tradicionalmente, estes painéis são constituídos por camadas de betão armado com armaduras convencionais e conectores metálicos que unem as duas camadas de betão [3], contribuindo para o devido funcionamento do painel durante as operações de transporte, içamento, e sob as condições de uso ao longo da sua vida útil. No entanto, devido à sua elevada condutibilidade térmica e ao facto de atravessarem a camada de isolamento, os conectores metálicos geralmente causam regiões com elevada transmissibilidade térmica, também denominadas por pontes térmicas [4, 5]. Estas regiões geralmente levam a um aumento do valor U da parede como um todo e contribuem para o aumento da probabilidade de ocorrerem problemas de condensação nas superfícies internas da edificação.

De forma a evitar as limitações do sistema tradicional que acabam de ser mencionadas, neste artigo introduz-se um novo conceito para painel estrutural pré-fabricado, constituído por panos externos em betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) de reduzida espessura, ligados por conectores contínuos de material compósito polimérico reforçado com fibras de vidro (GFRP). O núcleo do painel proposto é composto por um isolante térmico (*p.ex.*: poliestireno expandido, poliestireno extrudido, espuma de poliuretano, lã de rocha, etc). A opção por GFRP para os conectores deve-se à sua baixa condutibilidade térmica, de forma a serem evitadas as pontes térmicas. Além disto, pretende-se tirar proveito do facto do GFRP ser imune à corrosão eletroquímica, à qual estão sujeitos os aços convencionais. Devido a esta sua propriedade, o GFRP não requer recobrimentos mínimos, tais como os especificados pelos regulamentos de betão armado [6], possibilitando a redução do volume de betão a ser utilizado. Por outro lado, a escolha do BACRFA está relacionada com as vantagens inerentes de se utilizar este material em oposição ao betão armado convencional. A opção por BACRFA permite reduzir a espessura das camadas de betão, uma vez que não requer um recobrimento mínimo de armaduras. Outra vantagem está no facto de dispensar atividades de dobragem e colocação de armaduras, bem como a vibração e nivelamento do betão.

Apesar das suas vantagens, este sistema apresenta desafios importantes, nomeadamente no que diz respeito à garantia de ligação adequada entre os conectores de GFRP e as camadas de pequena espessura de BACRFA. Estes conectores devem resistir a forças de afastamento entre os painéis externos de BACRFA, além de permitir a transferência de forças de corte entre elas. No presente trabalho são propostas e estudadas duas formas de realizar esta conexão, quer através de embebedimento, quer através de colagem - ver Fig.1.

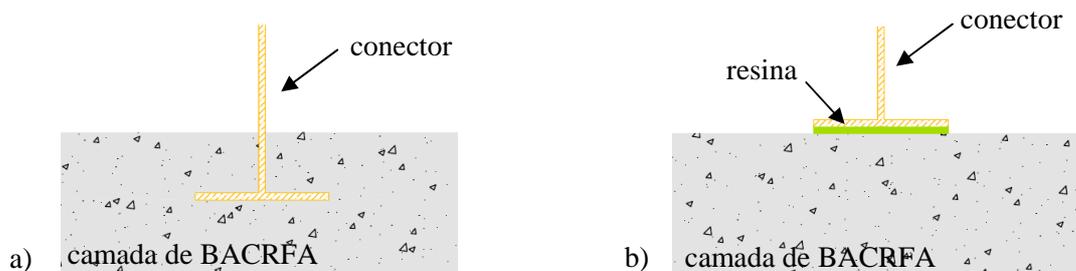


Figura 1. Formas de conexão entre os conectores de GFRP e as camadas de betão: a) conexão embebida; b) conexão colada.

Através de análises mecânicas preliminares das paredes submetidas a níveis de carregamento de serviço [7], os autores verificaram que seria possível empregar camadas de BACRFA com espessuras limitadas a 40mm. No entanto, o emprego de camadas com esta espessura introduz dificuldades construtivas para materializar o embebedimento dos conectores. De forma a ser possível tirar proveito da economia no consumo de betão proporcionada pelo uso de camadas de reduzida espessura e, ao mesmo tempo, viabilizar o emprego de conectores embebidos, neste artigo propõe-se o emprego de painéis onde as camadas de betão possuem nervuras nas proximidades dos conectores, conforme esquematizado na Fig.2.

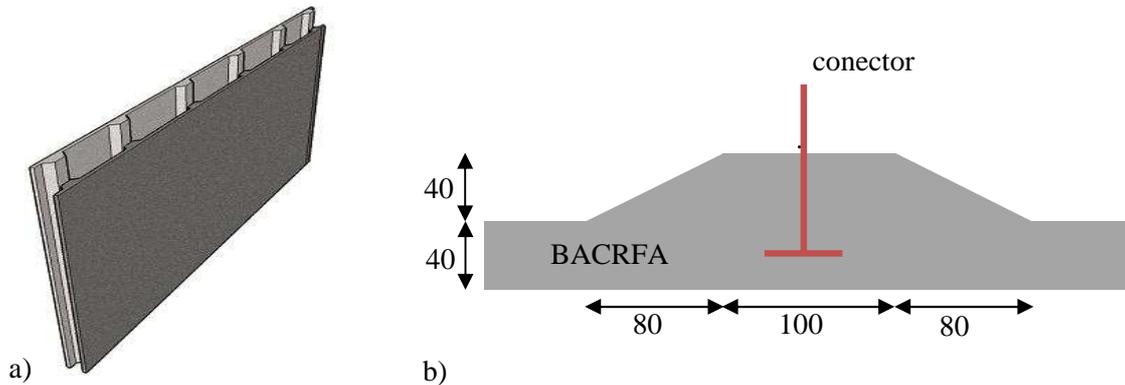


Figura 2. Conceito de painéis *sandwich* nervurados, a) perspectiva de um painel e b) dimensões das nervuras (medidas em mm).

Este trabalho apresenta os resultados correspondentes a um estudo preliminar realizado para avaliar o desempenho de algumas soluções propostas para as conexões entre GFRP e as camadas de BACRFA. Neste estudo, foram concebidos provetes com geometria representativa de quatro soluções possíveis para a conexão dos painéis, que foram por sua vez sujeitos a ações de arranque, avaliando-se as correspondentes cargas e mecanismos de rotura. São também apresentados estudos numéricos realizados para avaliar o desempenho térmico da solução proposta em termos do valor U e da evolução das temperaturas num ambiente interno da edificação.

2. ENSAIOS DE *PULL-OUT*: PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Tipos de conectores

Dois tipos principais de conectores são propostos: embebido e colado. O conector embebido atravessa a camada de isolamento e imerge nas duas camadas de betão do painel. Para que o mesmo fique disposto no local e à profundidade projetada, ele é posicionado previamente à betonagem das camadas a uma distância de 20mm da superfície inferior do bloco de BACRFA. São propostos e estudados três tipos de conectores embebidos de GFRP: um perfil em forma de “T” (tipo T – Fig. 3a), um perfil em forma de “Y” (tipo Y – Fig. 3b) e uma placa plana com orifícios uniformemente espaçados (tipo L – Fig. 3c). Nos conectores em forma de perfil, a ancoragem dos conectores é garantida por aderência e embricamento mecânico dos mesmos nas camadas de betão. No caso dos conectores planos (L), a ligação ao betão é maioritariamente materializada pelo BACRFA que atravessa as aberturas circulares do conector. Apesar da ancoragem dos conectores T e Y ser garantida por aderência e embricamento mecânico, estes conectores, também possuem aberturas na zona da conexão com o betão, permitindo deste modo que o BACRFA flua entre as componentes do conector e garanta um suplemento de resistência ao corte materializado pelos pinos internos em BACRFA. Por sua vez, o conector colado (tipo C – Fig. 3d) é constituído por um perfil com geometria idêntica a do conector tipo T que, no entanto, é colado às superfícies das camadas de BACRFA depois deste ter sido curado, fazendo uso de adesivo estrutural. Uma vantagem associada aos conectores embebidos está na redução do número de fases no fabrico dos painéis, evitando assim a incorporação de materiais adicionais ou outro processo construtivo na execução da ligação entre as duas camadas de BACRFA. A opção da avaliação desta

solução no contexto deste estudo deve-se principalmente a dois fatores: (i) é uma solução relativamente fácil de executar; (ii) não requer espessamento das camadas BACRFA na vizinhança das zonas de conexão, podendo assim resultar numa simplificação do correspondente molde de fabrico. As formas e dimensões dos conectores utilizados nos ensaios de *pull-out* estão detalhadas na Fig.3.

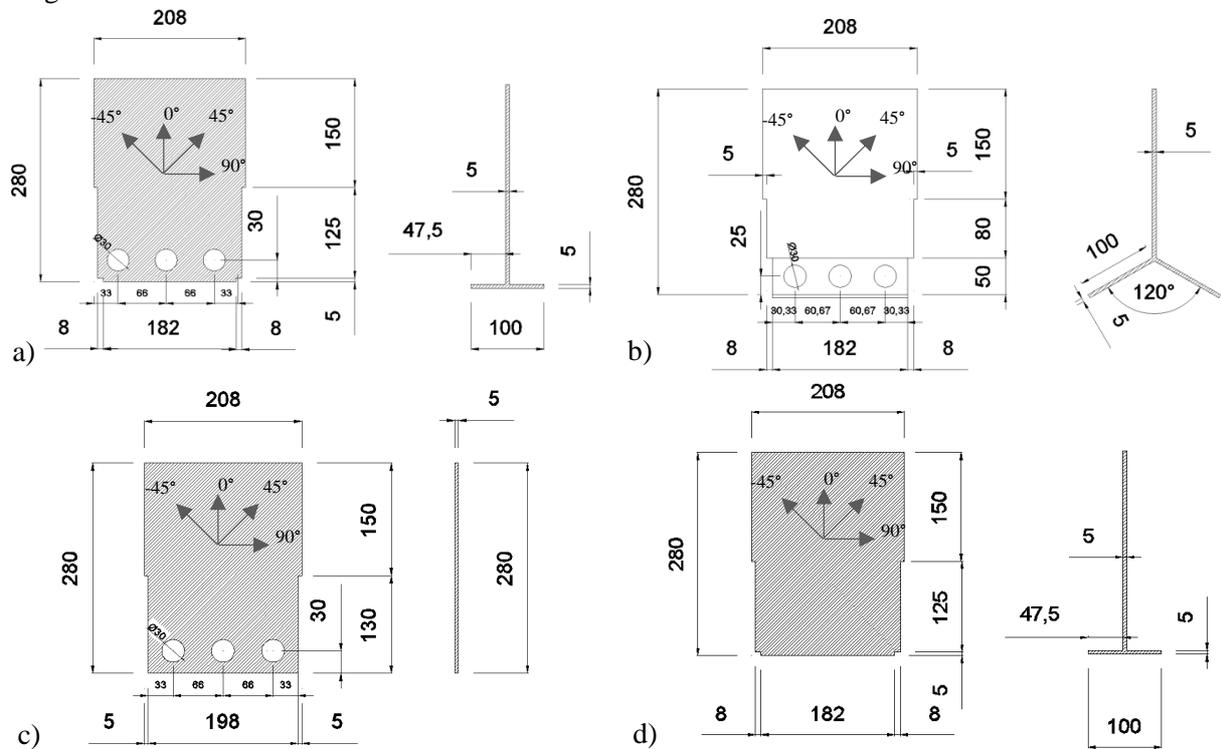


Figura 3. Geometria dos conectores: a) embecido do tipo T; b) embecido do tipo Y; c) embecido do tipo L; d) colado (unidades: mm).

2.2 Materiais

2.2.1 GFRP

Todos os provetes de GFRP utilizados nesta pesquisa foram produzidos pelo Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP) nas suas instalações através do processo de moldagem por transferência de resina por vácuo (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – VARTM*). O GFRP adotado é constituído por 6 camadas de uma manta de fibra de vidro do tipo E e uma resina polimérica do tipo poliéster, 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 segundo quatro eixos: 0°: 283g/m², +45°: 302g/m², -45°: 302g/m² e 90°: 300g/m². Para a caracterização mecânica do GFRP, foram extraídos provetes a partir de conectores fornecidos pelo PIEP. Foram realizados ensaios com provetes extraídos nas direções 0° e 90° (provetes com 280 e 208mm, respectivamente). O ensaio de tração direta foi realizado numa prensa com célula de carga de 200 kN, em controlo de deslocamento com velocidade de 2 mm/min, de acordo com os procedimentos recomendados pela norma [8]. As extensões nos FRPs foram determinadas através do uso de um clip gauge posicionado na parte central dos provetes com comprimento de referência de 50 mm. O valor médio da resistência à tração, da extensão última e do módulo elástico foram, respectivamente, 350.11MPa, 25912µε e 13.52GPa na direção 0° e 363.41MPa, 26185µε e 14.30GPa na direção 90°.

2.2.2 BACRFA

Foi utilizado betão da classe C50/60 de acordo com a EN1992-1 [6], com a seguinte composição expressa em kg por m³ de betão: CEM I 42.5R – 380.54kg; filer calcário – 326.17kg; água – 126.83kg; superplastificante – 6.09 kg; areia fina – 362.59kg; ½ areia – 574.58kg; brita 5/12 – 510.06kg; fibras de aço – 45kg. A fibra utilizada é de aço trefilado com tensão de cedência de

1345MPa, com extremidades dobradas, 35 mm de comprimento e 0.55mm de diâmetro, o que corresponde a um fator de forma de aproximadamente 65. Foi utilizado um aditivo superplastificante Viscocrete 3002HE da Sika para alcançar as características de auto-compactabilidade desejadas. O valor médio obtido para a resistência à compressão foi de 60.68MPa e para o módulo de elasticidade obteve-se um valor de 33GPa. Esta composição foi concebida pela empresa CiviTest, e o BACRFA for produzido nas suas instalações.

2.3 Preparação dos provetes

Como a distribuição e direção das fibras do BACRFA são influenciadas pelos fluxos de betonagem, todos os provetes foram betonados na posição horizontal de forma a reproduzir a metodologia que se prevê adotar na realização dos painéis em estaleiro de pré-fabricação. No caso dos conectores embebidos, o BACRFA é vertido no molde, embebendo o perfil FRP posicionado previamente. 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 GFRP são colados aos provetes de betão através do uso de resina epóxi.

3. CONFIGURAÇÃO E PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS DE *PULL-OUT*

O ensaio de *pull-out*, cuja configuração de ensaio está representada na Fig. 4a, baseia-se na aplicação de tração direta ao perfil de GFRP. Para a realização do ensaio utiliza-se uma amarra de chapas dentadas fixa no GFRP 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. Todos os ensaios são realizados com controlo de deslocamento a uma velocidade no êmbolo de 10 μ m/s. A força de tração aplicada pelo atuador é determinada com a utilização de uma célula de carga. Na Fig.4b representa-se o posicionamento dos 8 transdutores de deslocamento (LVDT) colocados no provete: quatro deles com comprimento de leitura de +/- 2mm (LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5, e LVDT 6); um com +/- 4mm (LVDT 8); e três com +/- 12,5mm (LVDT 1, LVDT 2 e LVDT 7). Os transdutores de deslocamento com maior comprimento de leitura registram o deslocamento do GFRP com relação ao BACRFA (LVDT 2 e LVDT 7) e o deslocamento do provete de BACRFA (LVDT 1 e LVDT 8) devido à sua deformação por flexão. Os LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5 e LVDT 6 são utilizados para medir a extensão nas secções livres do GFRP.

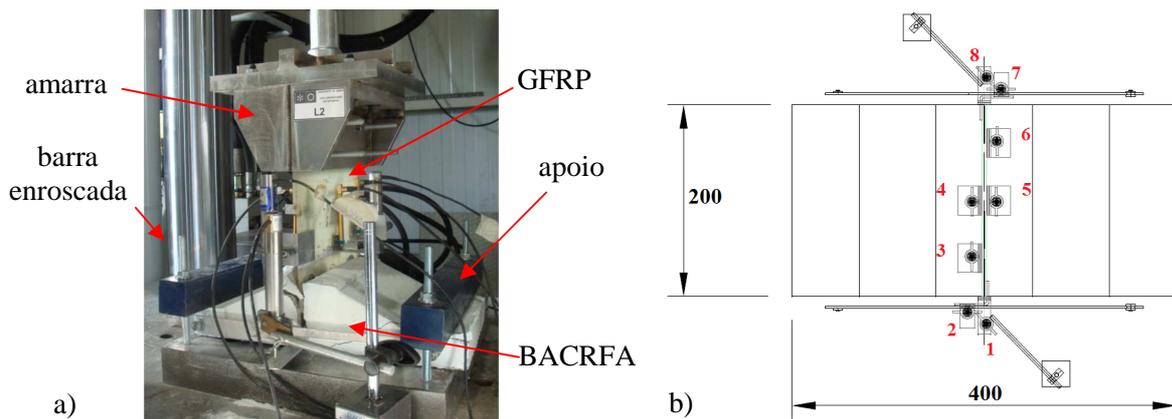


Figura 4. a) Configuração dos ensaios de arranque; b) planta da instrumentação adotada (medidas em mm).

As leituras dos deslocamentos do GFRP com relação ao BACRFA, LVDTs 2 e 7, são realizadas com o auxílio a um batente fixo a uma barra de alumínio. Esta barra é apoiada em parafusos fixos ao provete de BACRFA em pontos alinhados aos apoios. Os deslocamentos no provete de BACRFA são determinados através de medições no ponto de deslocamento máximo do provete (parte central). Notar que a leitura feita pelos LVDTs 2 e 7 mede, além do deslocamento relativo entre o GFRP e o

BACRFA, a flexão que ocorre na parte central do provete. Por isso, para se obter o escorregamento relativo entre o GFRP e o BACRFA é feita a subtração do deslocamento por flexão do provete de BACRFA ao deslocamento do GFRP com relação ao BACRFA (LVDT 2 – LVDT 1 e LVDT 7 – LVDT8).

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *PULL-OUT*

4.1 Modos de rotura

Nos conectores tipo T o modo de rotura dá-se de forma muito dúctil. As linhas de rotura do BACRFA desenvolvem-se por baixo do banzo do conector e evoluem a $\sim 45^\circ$ ao longo da nervura (ver Fig.5a). Esta rotura dá-se por progressiva abertura da fenda que define a linha de rotura, seguida de destacamento do BACRFA localizado acima dessa linha. Ao final dos ensaios os conectores aparentavam não terem sofrido danos (observação a olho nu). No caso dos provetes constituídos por conectores tipo Y, o modo de rotura dá-se de forma semelhante ao que foi verificado nos provetes com conectores tipo T. No entanto, constata-se que a superfície de rotura destes provetes é maior do que as observadas para os restantes conectores testados e que, durante a realização dos ensaios se observa o surgimento de fendilhação múltipla no provete, mesmo para cargas inferiores ao valor de pico. Ao contrário do que ocorreu com o conector tipo T, os conectores Y sofreram delaminação. Por sua vez, a rotura dos provetes com conectores tipo L acontece com o a abertura de uma fenda vertical no BACRFA. Neste conector o GFRP é completamente arrancado do betão. Após a realização dos ensaios, os perfis de GFRP não demonstram sinais de dano significativos, a não ser os ocasionados pelo escorregamento entre o perfil de GFRP e o BACRFA. Em particular, observa-se que os orifícios não apresentam quaisquer sinais de rasgos ou esmagamentos nos provetes ensaiados. Já a rotura dos conectores colados se dá pelo descolamento na interface GFRP-adesivo. É de salientar a perda abrupta de capacidade de carga logo após ser atingida a carga de pico no caso do perfil colado, pelo que a rotura é eminentemente frágil. Neste tipo de ligação os provetes de BACRFA encontram-se praticamente intactos, sem o surgimento de fendas visíveis.

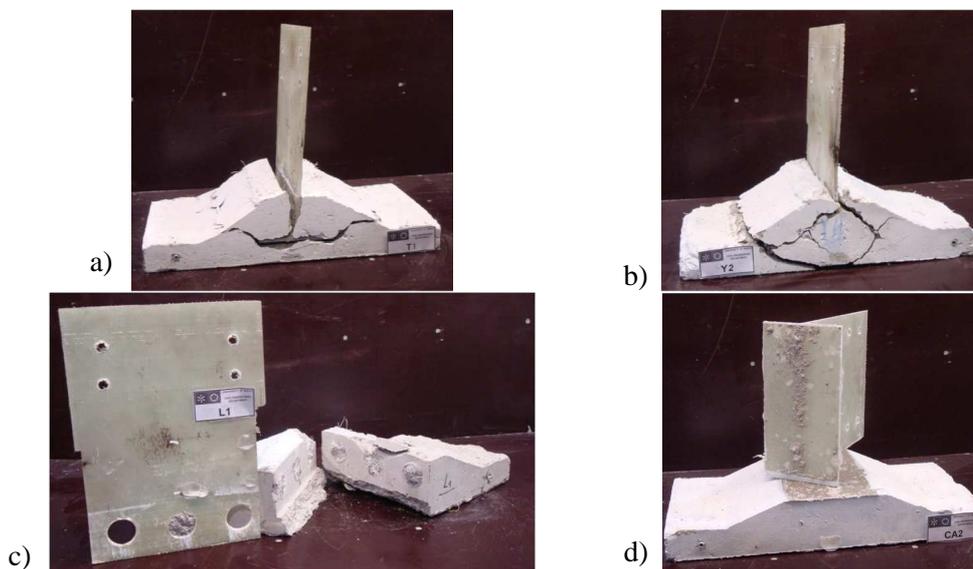


Figura 5. Modos de rotura típicos nos conectores tipo: a) T; b) Y; c) L; d) C.

4.2 Capacidades de carga, extensões no GFRP e comportamento carga vs. escorregamento

No Quadro 1 apresentam-se as cargas máximas e as extensões máximas nas secções livres do GFRP obtidas para cada um dos provetes ensaiados.

Quadro 1. Capacidade de carga e extensão máxima no GFRP nos provetes ensaiados.

Descrição	Provete	Carga máxima (kN)	Extensão máxima no GFRP ($\mu\epsilon$)
Tipo T	T1	12.57	1042.17
	T2	12.81	757.88
Tipo Y	Y1	16.63	893.05
	Y2	21.63	1209.24
Tipo L	L1	11.17	454.80
	L2	8.30	434.27
Tipo C	C1	11.06	268.70
	C2	8.08	*

*- provete sem leitura das extensões no GFRP.

Na Fig 6a apresentam-se as curvas que relacionam carga e escorregamento para os provetes testados, enquanto na Fig. 6b apresenta-se a evolução das extensões nas secções livres do GFRP para o provete em que estas extensões foram máximas.

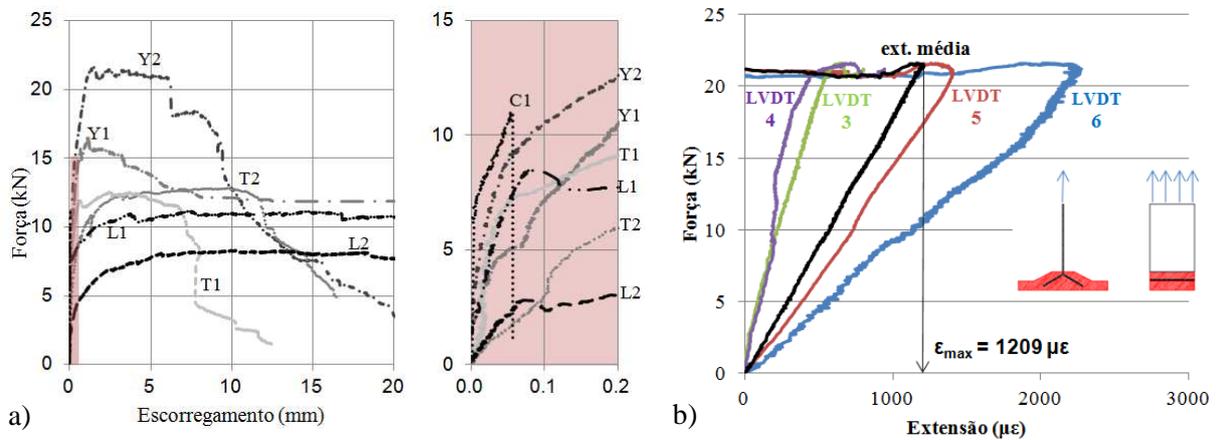


Figura 6. Resultados dos ensaios de *pull-out*: a) diagrama força-escorregamento; b) evolução das extensões nas secções livres do GFRP do provete Y2.

Nos provetes constituídos por conectores do tipo T a rotura dá-se de forma dúctil para ambos, sendo mantida a carga ao nível da carga máxima até um escorregamento na ordem dos 8mm para o provete T1 e de 11mm para o provete T2. No caso dos conectores tipo L embebidos os provetes também apresentam uma rotura dúctil, chegando a atingir escorregamentos superiores a 20mm ao nível da carga máxima. Estes valores indicam um comportamento muito satisfatório do conector, apresentando elevada capacidade de absorção de energia de deformação sem haver perda da capacidade de carga. 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 Y1 de 16.63 kN e para o Y2 de 21.63 kN. Outro ponto favorável é a entrada da carga em queda muito lenta após o pico (rotura dúctil). Salienta-se que no trecho inicial, os conectores tipo Y apresentam rigidez mais elevada do que as verificadas nos outros tipos de ligação estudados. No caso dos conectores colados(C), os resultados obtidos indicam que, apesar de apresentarem capacidades de carga similares às obtidas pelos conectores tipo L, os escorregamentos verificados são muito baixos, tipicamente abaixo de 0,1mm até o completo destacamento do perfil de GFRP do bloco de BACRFA.

Com relação à deformação máxima nas secções livres dos conectores, verifica-se que os valores máximos alcançados são, em geral, muito baixos. O valor máximo da extensão foi de 1209 $\mu\epsilon$ para o provete Y2. Este valor corresponde a somente 4.7% da extensão última do GFRP na direção 0°, o que indica o quanto os GFRPs estavam distantes de atingirem a rotura nestas secções.

5. ANÁLISES TÉRMICAS

As análises térmicas foram realizadas através do uso de ferramentas numéricas baseadas no método dos elementos finitos (MEF) [9] com o objetivo de avaliar o desempenho térmico dos painéis. Visouse a quantificação do impacto do recurso a nervuras e conectores de diferentes materiais neste desempenho. Os parâmetros de controlo deste estudo foram o valor U do painel e a evolução das temperaturas no interior de um ambiente de uma edificação constituída por painéis *sandwich* (com características baseadas nas descritas nos capítulos anteriores). Para este estudo os modelos de análise consideram apenas um plano de transferência de calor (estudo 2D), sendo todos os materiais simulados por elementos finitos bidimensionais quadriláteros de 4 nós, enquanto as fronteiras térmicas foram simuladas por elementos lineares de 2 nós. Todos os modelos foram construídos de forma a representarem um segmento do painel e o ambiente interno de uma habitação, com 3.0m de distância entre as paredes externas. De forma a simplificar o modelo, foram consideradas as simetrias do problema, simulando-se somente metade do ambiente interno e considerando-se uma distância entre conectores de 1.0m. Inerentemente à simulação 2D, o modelo proposto também despreza as trocas de calor pelo teto e piso da edificação, assim como qualquer troca de calor que haja na direção vertical e em juntas entre painéis. Foram construídos quatro modelos: a) painel sem nervura e sem conectores (SN-SC); b) painel com nervura e sem conectores (CN-SC); c) painel com nervura e com conectores tipo L de aço (CN-LA) e d) painel com nervura e com conectores tipo L em GFRP (CN-LG). Considerou-se que a geometria dos modelos CN-LA e CN-LG são iguais, diferindo somente no material empregue no conector, ambos com 5mm de espessura (ver Fig.8). Considerou-se que todo o sistema tinha uma temperatura inicial de 20°C e que estava sujeito a uma temperatura externa constante e igual a 0°C. Na superfície externa do painel, considerou-se uma fronteira térmica com coeficiente de convecção igual ao indicado pelo RCCTE [1]: 25 W/m²K. As propriedades dos materiais adotadas são as listadas no Quadro 2. As simulações transientes foram realizadas por um período total de 96h, com passos de análise de 1h.

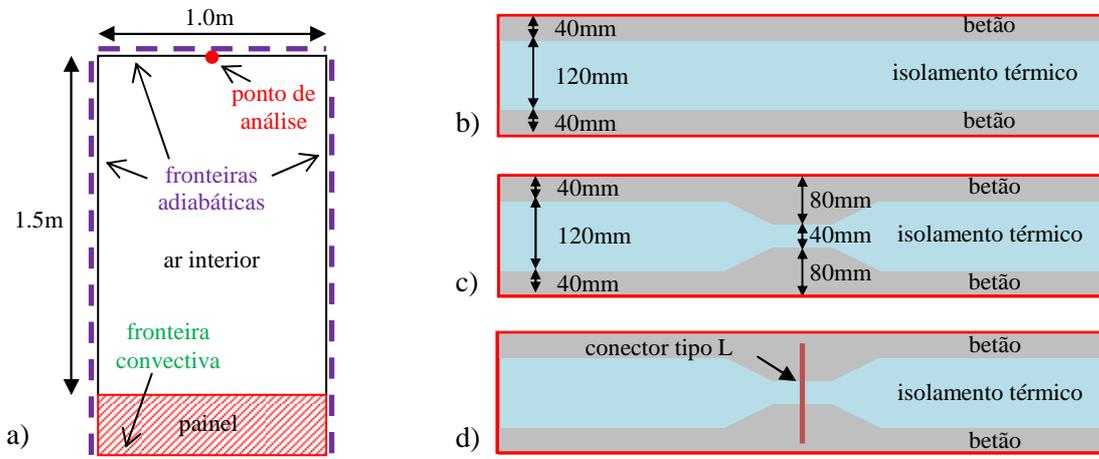


Figura 7. a) Geometria dos modelos numéricos; b) painel SN-SC; c) painel CN-SC; d) painéis CN-LA e CN-LG.

Quadro 2. Propriedades térmicas dos materiais consideradas nas simulações numéricas [10-12].

Material	Calor específico (J/m ³ K)	Condutibilidade Térmica (W/mK)
Ar interno*	1.208E+03	1.354
BACRFA	2.112E+06	2.000
Espuma de Poliuretano	6.191E+04	0.037
Aço	3.479E+06	50.000
GFRP	2.720E+06	0.220

*- adota-se uma condutibilidade térmica efetiva de forma a serem consideradas as trocas convectivas de calor dentro do ambiente interno (mais detalhes em [12]).

O valor U foi calculado a partir das temperaturas nas superfícies externas e internas do painel e do fluxo de calor que atravessa o mesmo. As temperaturas foram determinadas em 100 pontos igualmente espaçados ao longo da largura do painel e o fluxo perpendicular às superfícies do painel calculado

com base na média dos fluxos em 5 superfícies igualmente espaçadas ao longo da sua espessura. A média dos fluxos em cada uma destas superfícies também foi determinada em 100 pontos distintos ao longo da largura do painel. O método utilizado para cálculo do valor U com base nesta informação é o método do somatório, descrito em detalhe na ASTM C-1155 [13], utilizando-se um intervalo de 6h entre duas determinações consecutivas das temperaturas e fluxos. Os valores de U determinados foram de: $0.285\text{W/m}^2\text{K}$ para o painel de referência SN-SC, $0.386\text{W/m}^2\text{K}$ para o painel de referência CN-SC, $1.574\text{W/m}^2\text{K}$ para o painel CN-LA e $0.403\text{W/m}^2\text{K}$ para o painel CN-LG. Estes resultados indicam que, para os materiais e geometrias considerados, a transmissibilidade térmica do painel sofre um acréscimo significativo quando se passa de uma solução sem nervura para a solução com nervura (35%). Isto indica que, ao utilizar esta solução para as camadas de betão, é necessário aumentar a espessura do isolamento (ou utilizar um material com menor condutibilidade térmica) de forma a compensar os incrementos da transmissão de calor. Quando comparada as soluções com conectores com a solução CN-SC, nota-se que os acréscimos na transmissibilidade térmica devido ao conector de aço e GFRP foram de, respectivamente, 307.7% e 4.4%. Este resultado comprova a importância de se empregar um material de baixa condutibilidade térmica mesmo num conector com seção tão reduzida quanto o do conector tipo L. Apesar do conector de GFRP possuir a mesma geometria e também atravessar a camada de isolamento, provocando uma descontinuidade do mesmo, o facto dele possuir uma condutibilidade térmica 227 vezes inferior ao do aço conduziu a uma transmissibilidade térmica do painel 4.35 vezes inferior. As evoluções das temperaturas no ponto central do ambiente da habitação (ponto de análise apontado na Fig.7) são mostradas na Fig. 8a para todos os painéis. Os resultados indicam que o arrefecimento do ambiente ocorre de forma muito mais rápida quando os painéis dispõem de conector tipo L em aço. Este resultado já era expectável uma vez que os painéis CN-LA são os que apresentam maior valor U . Na Fig. 8b são apresentadas seções transversais destes painéis para o instante 12h, com representação das iso-linhas de distribuição de temperatura. Nestas imagens podem ser visualizadas as pontes térmicas no painel do tipo CN-LA, o que não aparece no caso do painel CN-LG.

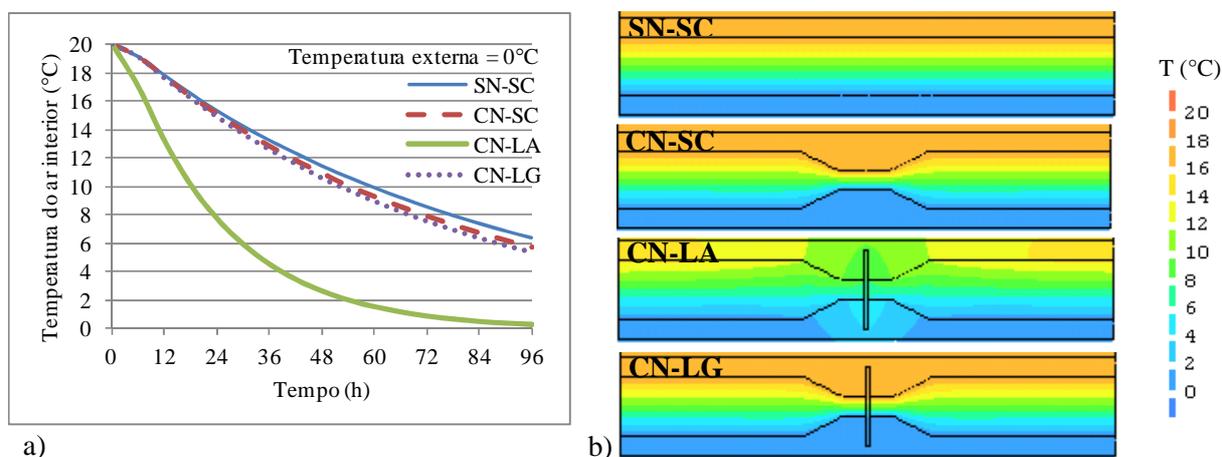


Figura 8. a) Evolução das temperaturas no ar interior; b) mapas de temperatura para o instante 12h.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um novo painel estrutural *sandwich* pré-fabricado constituído por camadas externas de pequena espessura em betão auto-compactável reforçado com fibras (BACRFA), apresentando nervuras nas zonas de conexão. Foram propostas 4 soluções de conectores de GFRP para materializar a conexão entre as camadas de BACRFA. Estas soluções foram estudadas através de um estudo preliminar no qual os conectores estavam sujeitos a forças de arranque. Tendo em conta os resultados apresentados é possível chegar as seguintes conclusões: 1) Os conectores colados e os tipo L embebidos apresentam o mesmo nível de capacidade de carga (9,60kN). O conector tipo T embebido apresenta um nível intermédio de capacidade de carga (12,70kN), e o conector tipo Y embebido é a tipologia com maior capacidade de carga (19,00kN); 2) De uma forma geral, os conectores colados com adesivo apresentam rotura muito frágil, enquanto os conectores embebidos apresentam roturas

dúcteis; 3) Os conetores tipo L embebidos, constituídos por placas de GFRP simplesmente furadas, apesar de apresentarem a mesma capacidade de carga dos conetores colados, apresentaram rotura muito mais dúctil, chegando a atingir deslizamentos superiores a 20mm, mantendo o nível da carga máximo alcançado pelo provete; 4) Em nenhum caso as extensões nas secções livres dos GFRPs se aproximaram das extensões últimas dos laminados, atingindo no máximo valores correspondentes a 4.7% da extensão última.

Foram realizadas análises térmicas com ferramenta baseada MEF com o intuito de avaliar o desempenho térmico dos painéis e quantificar o impacto neste desempenho do uso da configuração com nervuras, e de conetores de diferentes materiais. Os resultados deste estudo indicam que a transmissibilidade térmica do painel sofre um acréscimo significativo quando se passa de uma solução sem nervuras para a solução com nervuras (35%). Adicionalmente observou-se que na solução com nervura, a transmissibilidade térmica do painel aumentou com a aplicação dos conetores. No entanto, o incremento da transmissibilidade térmica é muito baixo quando o conector é realizado em GFRP (4.4%), o que não acontece quando se utiliza conector em aço (307.7%).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa QREN número 5387, LEGOUSE. Agradece-se também o contributo e apoio fornecido pelas empresas parceiras: Mota Engil, Civitest e PIEP. O suporte financeiro da FCT também é reconhecido pela bolsa individual de doutoramento concedida ao primeiro autor SFRH/BD/64415/2009 e pelo suporte financeiro à unidade de investigação ISISE.

REFERÊNCIAS

- [1] Decreto-Lei 80/2006 (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE), in: Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril, Portugal.
- [2] HM Government (2010). The Building Regulations 2000: conservation of fuel and power. Coming into effect 1 October 2010., in, London.
- [3] T.D. Bush, G.L. Stine (1994). Flexural Behaviour of Composite Precast Concrete Sandwich Panels With Continuous Truss Connectors, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, 39, 112-121.
- [4] B.-J. Lee, S. Pessiki (2006). Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels, *Energy and Buildings*, 38, 1006-1014.
- [5] J. Keenahan [et al.] (2012). Numerical assessment of the thermal performance of structural precast panels, in: *Numerical modeling strategies for sustainable concrete structures - SSCS*, Aix-en-Provence, pp. 10.
- [6] CEN (2004). Eurocode 2: design of concrete structures – part I: general rules and rules for buildings, in, Brussels.
- [7] R.M. Lameiras [et al.] (2012). Sandwich structural panels comprising thin-walled Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC) and Fibre Reinforced Polymer (FRP) connectors, in: *8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (BEFIB 2012)*, Guimarães.
- [8] ASTM Standard D 3039/D 3039M (2008). Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, in, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [9] TNO-DIANA-BV (2007). Diana User's Manual - Release 9.2, in, Delft, The Netherlands.
- [10] W.D. Callister Jr. (2007). *Materials science and engineering : an introduction*, 7th ed.
- [11] F.P. Incropera [et al.] (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley.
- [12] Y.A. Çengel, A.J. Ghajar (2010). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, McGraw-Hill.
- [13] ASTM Standard C 1155 (2007). Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data - ASTM C1155.