

Durabilidade de Estruturas Mistas em Aço-Betão Coladas

Durability of Composite Concrete Steel Bonded Structures

A. Rocha^{a†}, J.B. Aguiar^a, I.B. Valente^a

^a *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: alexandrerochasalles@gmail.com*

RESUMO

A utilização mista de materiais baseia-se no aproveitamento do comportamento mecânico específico de cada material. A utilização de estruturas mistas em aço e betão tem vindo a crescer e mostra-se eficiente tanto na construção de novas edificações quanto na reabilitação. A procura pelo desenvolvimento sustentável na construção civil está diretamente relacionada com a racionalização da utilização de recursos minerais em conjunto com a redução do desperdício e o aproveitamento otimizado das estruturas. Com este intuito, procura-se desenvolver soluções construtivas que facilitem a reabilitação de construções existentes e sistemas construtivos com alto desempenho em termos de vida útil. Este estudo está voltado para o tema da sustentabilidade na medida em que se pretende uma melhor compreensão dos fenómenos associados à durabilidade dos materiais e componentes do sistema construtivo misto em aço e betão e se procura por soluções mais duradouras e otimizadas. Neste trabalho, pretende-se aprofundar o conhecimento de sistemas mistos de aço e betão, onde são utilizados perfis metálicos enformados a frio e galvanizados, em combinação com diferentes composições de betão, utilizando adesivos estruturais na ligação entre estes componentes. Neste contexto, pretende-se realçar os processos de degradação e a sua influência no comportamento global dos elementos mistos analisados. Foram realizados ensaios em elementos estruturais em aço enformado a frio colados a elementos em betão, com a finalidade de avaliar a durabilidade dessas estruturas quando expostas a condições ambientais desfavoráveis. Os resultados obtidos mostram que, embora em alguns casos a degradação afete parcialmente a capacidade resistente dos elementos, em outros casos, este tipo de sistema construtivo pode ser utilizado mantendo a capacidade resistente esperada dos elementos constituintes.

ABSTRACT

The use of composite materials is based on taking advantage of the specific mechanical behaviour of each material. The use of steel and concrete composite structures is constantly growing and is proving to be efficient both in the construction of new buildings and in rehabilitation. The pursuit for sustainable development in construction is directly related to a reduction in the use of natural resources, together with a reduction of waste and an optimized use of the structural solutions. For this purpose, this work aims to develop construction solutions that facilitate the rehabilitation of existing constructions and construction systems with high performance in terms of life cycle. This study focuses on sustainability as a possible result of a better understanding of the phenomena associated with the durability of materials and components of the composite steel and concrete construction system and the search for more durable and optimized solutions. In this work, it is intended to extend the knowledge on steel and concrete composite systems that combine galvanized cold-formed steel profiles with concrete, using structural adhesives as the connection between these components. In this context,

Palavras-chave:

Estruturas mistas em aço e betão; Durabilidade; Aderência; Adesivos estruturais; aço enformado a frio.

Keywords:

Composite steel and concrete structures; Durability; Adhesion; Structural Adhesives; Cold Formed Steel.

it is intended to highlight the degradation processes and their influence on the global behaviour of the analysed composite solution. Tests were carried out on structural elements in cold-formed galvanized steel glued to concrete elements, with the aim of evaluating the durability of these structures when exposed to unfavourable environmental conditions. The obtained results show that, although in some cases the degradation partially affects the resistance capacity of the elements, in other cases, this type of constructive system can be used maintaining the expected load capacity.

1. Introdução

A associação estrutural de diferentes materiais é cada vez mais frequente. Nos sistemas mistos em aço-betão retiram-se benefícios do contributo funcional de cada material. Uma maior durabilidade desses materiais e dos elementos construtivos possibilita a ampliação da sua vida útil, resultando numa diminuição do consumo de matérias-primas e numa menor quantidade de resíduos de construção e demolição.

A utilização de adesivos na ligação aço-betão tem potencial em novas construções e em reforço estrutural. Considerando as vantagens associadas à utilização de perfis de aço enformados a frio na construção, julga-se que o conhecimento limitado sobre aderência entre chapa lisa galvanizada e camada de betão, por meio de adesivos estruturais, e sobre a durabilidade desta ligação em situação de exposição a condições ambientais e de carregamento desfavoráveis condiciona a sua utilização. Este trabalho propõe-se estudar o comportamento e a durabilidade deste sistema de ligação e propor novas soluções mais eficientes.

Utilizar soluções construtivas mais sustentáveis, seja pelo elevado desempenho, poupança na utilização de materiais, maior durabilidade, ou ainda reaproveitamento de materiais e estruturas pré-existentes, é um desígnio para a sociedade e indústria atuais [1], [2]. A combinação de diferentes materiais que acontece nas estruturas mistas aço-betão apresenta vantagens: maior resistência vs. peso, redução da altura total do edifício, elementos estruturais mais esbeltos, maior resistência à flexão, maior rigidez, maior resistência ao fogo, construção mais rápida e flexível, maior durabilidade, etc. [3].

As estruturas mistas em aço-betão analisadas associam uma secção de betão armado a um perfil metálico enformado a frio, podendo ser utilizadas em construções novas ou em situações de reforço estrutural. Os conectores correntemente utilizados são os *stud bolts*, mas vários autores salientam o potencial dos adesivos estruturais como elemento de ligação. No entanto, o desempenho a longo prazo, a incerteza em relação aos impactos no meio ambiente e a durabilidade representam uma barreira crítica para a ampla aplicação deste tipo de ligação [4], [5].

O uso de adesivos estruturais tem vindo a crescer em várias indústrias pois são mais sustentáveis do que as ligações convencionais, permitem uma redução no peso e nos custos de produção, e possibilitam flexibilidade no dimensionamento, maior resistência à fadiga e comportamento melhorado sob efeito de vibração e corrosão. Tem também crescido a aplicação da colagem na reparação de estruturas, evitando a reconstrução [5]–[11].

As ligações por colagem estão geralmente sujeitas a quatro tipos de esforços: flexão, tração, corte e torção [6]. Os modos de rotura podem distinguir-se entre rotura coesiva, rotura do adesivo, rotura da colagem (interface entre elemento e adesivo) e rotura combinada. Rotura coesiva ou rotura do adesivo são preferíveis, porque a ligação pode mobilizar a sua máxima capacidade de carga.

O processo de colagem influencia a qualidade da ligação e a força transferida na ligação depende das propriedades dos elementos e adesivos. Características como área de colagem, espessura do adesivo, rugosidade e tratamento superficial dos elementos, propriedades químicas do elemento e adesivo, tempo de cura e condições ambientais são as mais influentes na eficiência da ligação [5], [6], [12]–[14]. Neste grupo, apenas as condições ambiente vão variar durante a vida útil da estrutura [13].

A utilização de perfis enformados a frio nas edificações de baixo e médio porte tende a tornar o elemento estrutural mais leve [15], [16]. São geralmente produzidos a partir de chapas de

aço galvanizadas com 1,5 mm a 5 mm de espessura e podem assumir várias formas. São geralmente fabricados com um mínimo de 25% de aço reciclado, o que é considerado altamente sustentável [15]–[21].

2. Materiais e métodos

2.1. Estruturas Mistas de Aço-Betão Coladas

A conexão entre aço e betão é geralmente assegurada por conectores de corte, no entanto, esse tipo de conexão tem desvantagens, pois a transmissão de esforços não é uniforme ou contínuas.

Em estruturas mistas, o uso de adesivos estruturais como elemento de ligação entre os componentes de aço e de betão tem sido discutido por vários autores. Uma das vantagens deste método é que o adesivo possibilita a transferência contínua do esforço entre o aço e o betão.

Convencionalmente utilizados, os conectores mecânicos causam concentração de tensões e têm pouca resistência à fadiga [3]. Outra desvantagem dessas conexões é a incapacidade de assegurar um elevado grau de interação. Além disso, a maior densidade de conectores mecânicos pode prejudicar o processo de betonagem. A **Figura 1** compara a representação esquemática de um conector mecânico num elemento misto de aço-betão com um elemento misto de aço-betão colado.

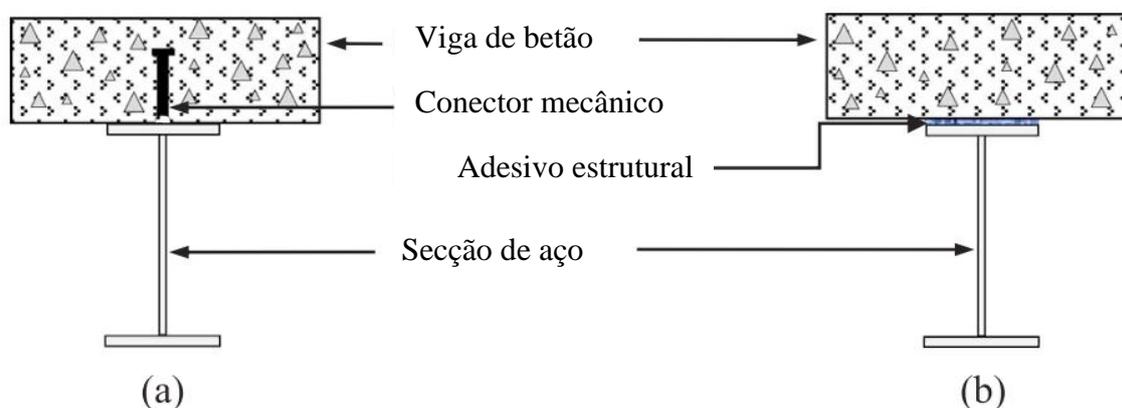


Figura 1 – Elemento composto, mecanicamente conectado (a), colado (b) [3].

Vários aprimoramentos nos adesivos estruturais existentes, em conjunto com o desenvolvimento de novos adesivos aumentaram sua aplicabilidade em várias áreas, como o reforço de estruturas existentes e as ligações estruturais. Em comparação com os conectores mecânicos convencionais, os adesivos estruturais oferecem maior homogeneidade na distribuição de tensões, juntamente com uma cofragem reduzida, velocidade de construção acelerada, maior qualidade e melhoria do comportamento à fadiga dos membros. Os adesivos estruturais também podem ser usados para unir membros com elementos transversais finos. Eles atuam como elementos de ligação e fornecem melhor resistência à corrosão e à percolação de água. Devido a estas vantagens, os adesivos são usados para a ligação de partes similares e dissimilares no setor aeroespacial, automotivo, marítimo e da construção civil [3].

De acordo com Berthet *et al.* [22], investigações para encontrar outros métodos para unir aço e betão foram realizadas por vários laboratórios desde 1962 e, para avaliar o comportamento de estruturas mistas de aço-betão coladas, três tipos de sistemas compostos de aço-betão foram analisados. No primeiro sistema, a laje de betão foi moldada sobre a superfície da viga de aço, onde previamente foram colados agregados com resina epoxídica. O segundo sistema consiste em juntar uma laje de betão pré-fabricada com uma viga de aço, utilizando resina fresca. No terceiro sistema, o betão foi colocado diretamente sobre a resina fresca, que cobria a superfície de aço. Os resultados mostraram que o primeiro sistema exibe uma elevada deformação, quando comparado aos restantes, o segundo sistema é o que apresenta menor capacidade de carga e o terceiro sistema é o mais resistente, evidenciando porém um comportamento mais frágil [22].

De acordo com Barnes *et al.* [8], após estudo sobre a transferência de esforço através da colagem num elemento misto de aço-betão, pode-se concluir que:

- A tensão de corte numa junta adesiva de aço-betão apresenta uma distribuição exponencial, com valor máximo junto da extremidade carregada do elemento;
- O aumento na espessura da cola ou adesivo leva a uma redução geral nos níveis de pico de tensão e um aumento na capacidade resistente global.

Barnes *et al.* [8] realizaram ainda uma análise não linear com elementos finitos bidimensionais de provetes de aço-betão colados. Os resultados obtidos dizem respeito a níveis de tensão e a espessura de colagem mostram que na simulação por elementos finitos de um adesivo com espessura de 1 mm, a distribuição de tensão de corte assemelhava-se mais aos resultados experimentais do que uma análise teórica baseada no método de Volkersen [23]. No entanto, com camadas adesivas mais grossas, de 3 e 5 mm, tanto o método de Volkersen como a análise com elementos finitos forneceram distribuições de tensão de corte semelhantes. Ambos os métodos de análise são apenas aplicáveis a níveis de carga mais baixos, em que a fendilhação do betão ainda não ocorreu [8].

Para as estruturas mistas de aço-betão coladas, a capacidade resistente da estrutura depende principalmente da aderência. É nítido que um desempenho adesivo mínimo da interface aço-betão é necessário para assegurar o comportamento misto da estrutura [22].

Para entender a ligação física de interfaces compostas e a viabilidade de ligação realizada com adesivo, vários autores têm realizado investigações experimentais relacionando a resistência ao corte com a mudança na espessura da camada de ligação, tal como se apresenta no gráfico da Figura 2 [3], [24].

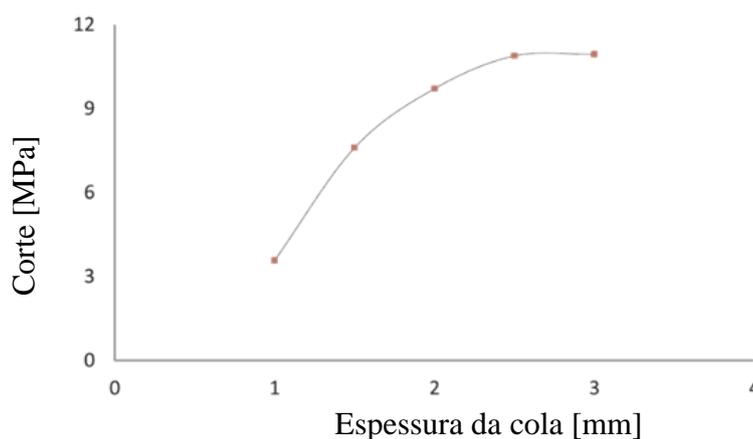


Figura 2 – Variação da resistência ao corte em função da espessura de colagem [3].

2.2. Programa Experimental

Neste trabalho, optou-se pela realização de ensaios de flexão de elementos mistos em aço-betão para avaliar o comportamento mecânico de um elemento misto de aço-betão com colagem.

Com a intenção de obter resultados que permitissem avaliar a durabilidade de elementos mistos de aço-betão colados, foi elaborado um plano experimental. Os provetes fabricados foram submetidos a ataques que simularam ambientes agressivos. Posteriormente, estes provetes foram submetidos a ensaios de flexão, permitindo avaliar o seu desempenho e compará-lo com o de outros provetes similares que não foram submetidos a nenhum tipo de ambiente agressivo.

No ensaio de flexão, optou-se pela utilização de provetes de pequenas dimensões, com o objetivo de garantir uma maior amostragem. Optou-se por produzir pequenas vigas de betão com dimensão de $215 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, que seriam posteriormente coladas a elementos metálicos, formando elementos mistos de aço-betão.

2.3. Composição do Betão

A dosagem do betão (**Tabela 1**) foi estudada considerando o Método de Faury, onde se procurou encontrar um valor otimizado para a composição ideal, respeitando os procedimentos e valores indicados pela NP EN 206-1 de 2007 [5], sobretudo no que diz respeito aos valores máximos de razão A/C, valores mínimos de resistência e dosagem de cimento, em função da classe de exposição.

Conforme dito anteriormente, dada a classe de exposição do betão a ser elaborado, optou-se pela utilização de um adjuvante superplastificante, com a finalidade de permitir a produção de um betão com elevada classe de trabalhabilidade, de baixíssima relação A/C, e fluido, durante o tempo necessário para a colocação em moldes, além de apresentar outras vantagens tais como melhoria no acabamento superficial (fator importante quando se trata de uma estrutura que será posteriormente colada) e atingimento de maiores resistências mecânicas às primeiras idades.

Foi utilizada uma quantidade de 1,5% do adjuvante superplastificante MasterGlenium SKY 617, à base de éter policarboxílico, que apresenta elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade.

Tabela 1 – Dosagem do betão.

Material	Dosagens por m ³ de Betão
Cimento	360,00 kg
Brita 4 - 8	682,72 kg
Areia 0 - 4	1238,02 kg
MasterGlenium SKY 617	30,00 kg
Água (w)	113,56 litros

2.4. Perfil Metálico

Após comparação entre vários perfis disponibilizados no mercado, e considerando as disposições da NP EN 1994-1 de 2011 [25] no que diz respeito ao dimensionamento de elementos estruturais mistos, optou-se pela utilização de um perfil do tipo ômega em aço galvanizado ($\Omega 90^\circ \text{AR} \times 50 \times 2,5$), com as propriedades geométricas enunciadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Geometria e secção bruta do perfil.

Perfil	b_a [mm]	h_a [mm]	A_a [mm ²]	Z_g [mm]	I_a [mm ⁴]
$\Omega 90^\circ \text{AR} \times 50 \times 2,5$	50,0	50,0	526,2	21,2	188177,9

Após os cálculos realizados com base na NP EN 1994-1 de 2011 [25], os valores da capacidade resistente à flexão da secção adotada e da correspondente máxima carga aplicável durante o ensaio são apresentados pela Tabela 3.

2.5. Adesivo Estrutural

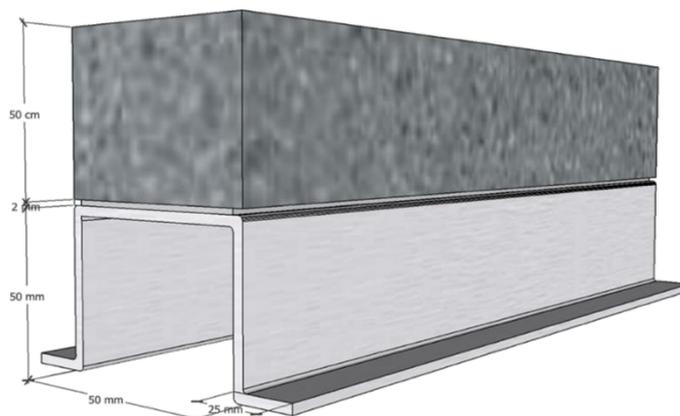
A decisão de utilizar uma resina epoxídica como elemento de ligação é resultado do reconhecido desempenho deste tipo de cola nas ligações entre os mais diversos tipos de materiais, inclusive na união entre elementos de materiais distintos.

Para esta campanha experimental, considerando de trabalhos anteriormente realizados, optou-se pela utilização do produto Sikadur 31 EF, uma cola estrutural e argamassa de reparação em dois componentes, à base de resinas epóxi, isento de solventes, tixotrópico que pode ser aplicado em superfícies com alguma humidade [26].

O provete final obtido, considerando espessura mínima de colagem de 2 mm, é representado na Figura 3.

Tabela 3 – Valores de momento fletor resistente para a secção transversal adotada.

<i>ANÁLISE PLÁSTICA</i>						
A_a [mm ²]	I_a [mm ²]	f_y [kN]	Z (mm)	M_{Rd} [kNm]	P_{rd} [kN]	$t_{max,pl}$ [MPa]
526,2	188178	136,8	58,63	6,5	163,0	28,9
<i>ANÁLISE ELÁSTICA</i>						
A_a [mm ²]	I_a [mm ²]	f_y [kN]	Z (mm)	M_{Rd} [kNm]	P_{rd} [kN]	$t_{max,el}$ [MPa]
526,2	188178	136,8	45,0	5,8	110,1	14,7

**Figura 3** – Desenho esquemático do provete.

2.6. Ambientes Agressivos

Foram realizados ataques químicos em duas soluções aquosas, sendo uma com alta concentração (105 g/L) de Cloreto de Sódio - NaCl, e outra uma solução saturada (350g/L) de Sulfato de Magnésio - MgSO₄ [27]. Para acelerar a degradação por exposição aos ambientes foi desenvolvido um sistema para realização de ciclos de 12h, pré-programados e com acionamentos automatizados, de submersão em solução saturada das substâncias, seguido de período de secagem em ambiente controlado, durante 60 dias.

Foram submetidos um total de doze provetes (Figura 4), seis em cada uma das soluções aquosas criadas com a finalidade de que três provetes fossem retirados após 30 dias de ataque em cada uma das duas soluções, e outros três provetes ficassem expostos ao ciclo de ataque por mais 30 dias, totalizando 60 dias de exposição em cada um dos dois ambientes.

2.7. Ensaios

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos (Figura 5.a), num total de quinze provetes, sendo doze deles submetidos aos ambientes agressivos já descritos, e três que permaneceram em condições ambientais normais, tratados como referenciais. Foi utilizado um equipamento com atuador servo-controlado, acoplado a uma célula de carga de 200 kN e transdutor interno acoplado. O ensaio foi definido em controlo de deslocamento, utilizando a velocidade de 0,01mm/s. Foram utilizados Transformadores Diferenciais Variáveis Lineares (LVDT's, acrónimo do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) conforme apresentado pela Figura 5.b para medir a deformação vertical sofrida pelos provetes e também o escorregamento entre as componentes de aço e betão.

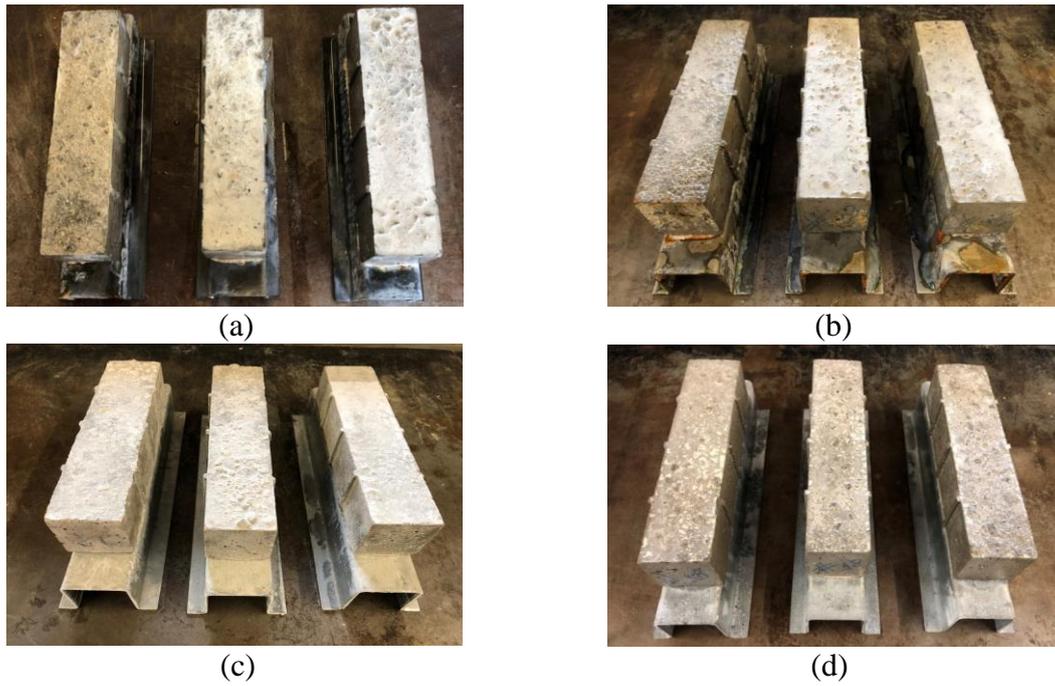


Figura 4 – Provetes após exposição de 30 (a) e 60 (b) dias a solução concentrada de NaCl e após exposição de 30 (c) e 60 (d) dias a solução concentrada de MgSO₄.

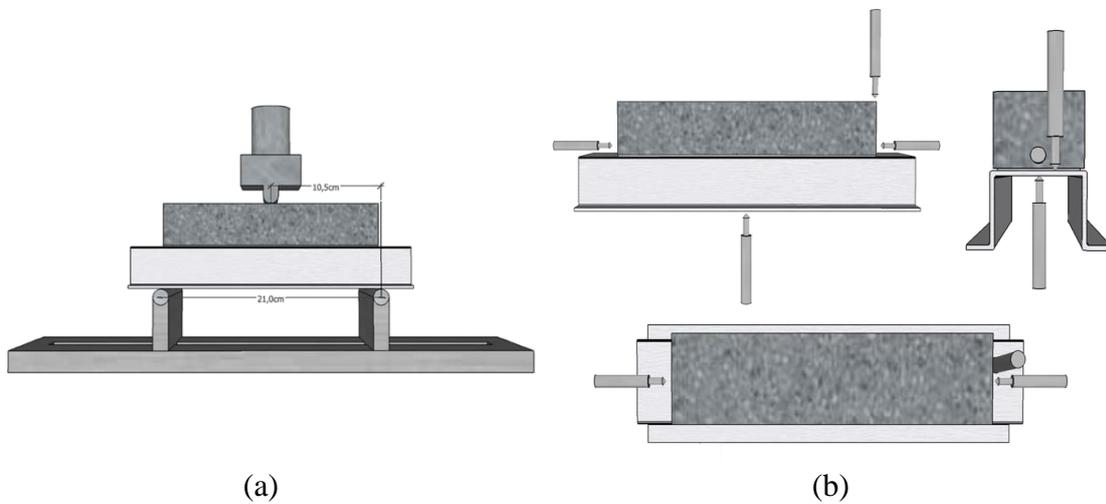


Figura 5 – (a) Desenho esquemático do posicionamento dos apoios e aplicação de carga e (b) disposição dos LVDT's.

3. Resultados

Os resultados obtidos mostram diferenças entre os vários grupos de provetes. A Figura 6 mostra imagens dos vários provetes após rotura decorrente da realização dos ensaios.

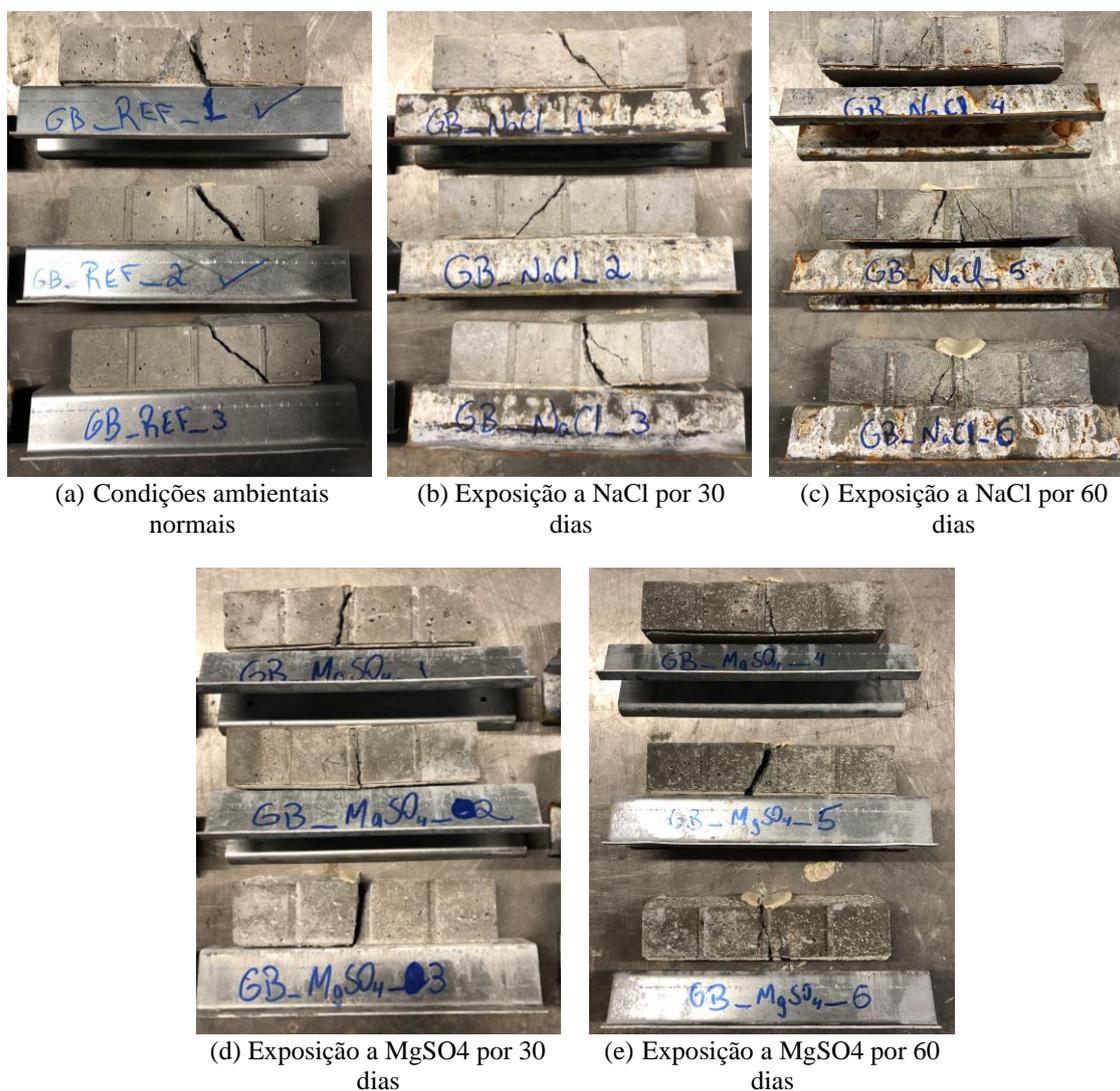


Figura 6 – Provetes após ensaios de flexão em 3 pontos.

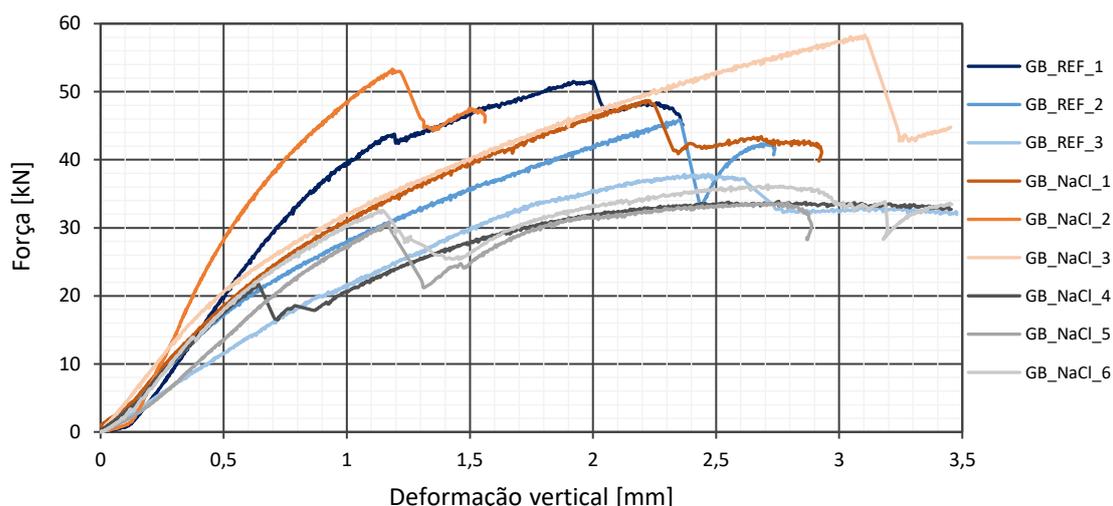
A Tabela 4 resume os resultados referentes à carga máxima atingida e à forma de rotura de cada um dos quinze provetes ensaiados. Os resultados são subdivididos considerando os cinco grupos definidos com três provetes cada, que estiveram sob as mesmas condições e, portanto, pertencem à mesma família.

4. Discussão

Para facilitar a análise, apresentam-se separadamente os resultados relativos aos provetes expostos à solução de cloreto e expostos à solução de sulfatos. A Figura 7 apresenta a relação entre carga aplicada e correspondente deformação medida a meio vão para os provetes expostos à solução de Cloreto de Sódio (30 e 60 dias) e para os provetes de referência (não expostos a ambientes agressivos).

Tabela 4 – Resultados obtidos nos provetes testados.

Provete	Tempo de exposição [dias]	Força máxima - F_{max} [kN]	Valor médio de F_{max} [kN]	Varição de F_{max} [%]	Rotura observada
GB_REF_1	0	51,51			Corte
GB_REF_2	0	45,82	45,08	-	Corte
GB_REF_3	0	37,91			Corte
GB_NaCl_1	30	48,70			Corte
GB_NaCl_2	30	53,31	53,45	+18,59	Corte
GB_NaCl_3	30	58,33			Corte
GB_NaCl_4	60	33,89			Corte / Flexão
GB_NaCl_5	60	33,68	34,63	-23,18	Corte / Flexão
GB_NaCl_6	60	36,31			Corte / Flexão
GB_MgSO ₄ _1	30	31,49			Flexão
GB_MgSO ₄ _2	30	30,50	30,51	-32,32	Flexão
GB_MgSO ₄ _3	30	29,54			Flexão
GB_MgSO ₄ _4	60	34,30			Flexão
GB_MgSO ₄ _5	60	46,89	37,55	-16,70	Corte / Flexão
GB_MgSO ₄ _6	60	31,55			Flexão

**Figura 7** – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de NaCl)

A partir da análise da relação entre força aplicada e a deformação sofrida a meio vão para os três provetes de cada tipo, pode-se verificar, de acordo com o gráfico apresentado a partir da Figura 7, que nos primeiros 30 dias de exposição em solução de NaCl não houve degradação dos elementos devido ao ataque, ocorrendo inclusive um incremento de capacidade de carga de aproximadamente 18,5%. Este aumento de capacidade de carga pode ser explicado pelo fato de ter havido maior teor de humidade durante o tempo de cura do betão e da cola, já que ambos foram inseridos numa solução aquosa.

Já para os provetes que ficaram submetidos a um total de 60 dias de exposição em solução de NaCl, a força máxima atingida apresentou um decréscimo de aproximadamente 23,2%, devido à influência da corrosão do aço sobre a colagem, fazendo com que o adesivo estrutural perdesse sua capacidade de ligação entre os elementos de aço e de betão. Em consequência disso, deu-se uma rotura por flexão do betão, após a ser aplicada uma carga de cerca de 30 kN.

Aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não evidenciou grandes alterações. Destaca-se que a fissuração do betão nos elementos onde a efetividade da cola foi

perdida teve início para valores de deformação menores, onde se nota uma perda de carga rápida e localizada nas curvas GB_NaCl_4, GB_NaCl_5, e GB_NaCl_6. Após a perda de carga identificada em todos os provetes deste grupo, é possível observar que a curva volta a ter um comportamento ascendente, permitindo ao provete recuperar alguma ou mesmo toda a capacidade de carga perdida.

O comportamento dos provetes expostos a Sulfato de Magnésio (a 30 e a 60 dias) é comparado com os provetes de referência (não expostos a ambientes agressivos) na Figura 8.

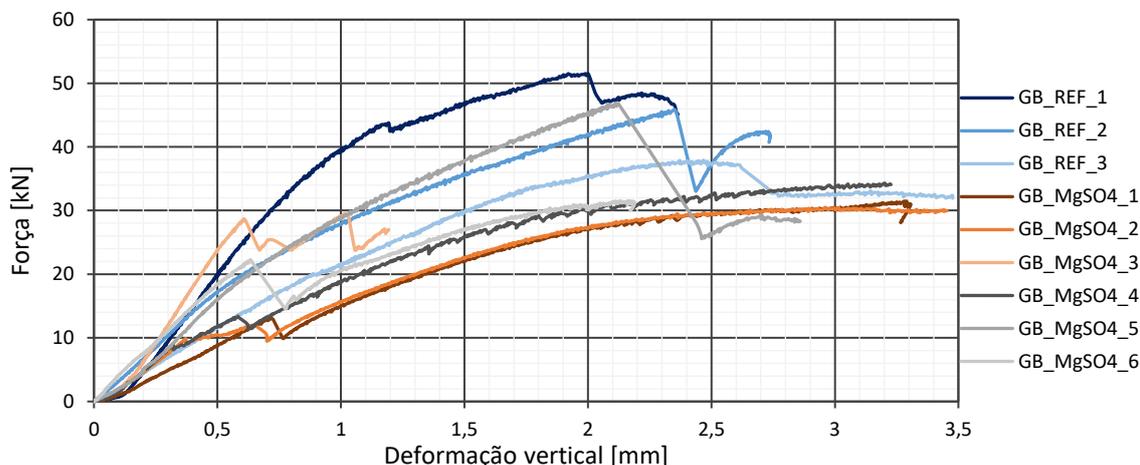


Figura 8 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$)

Para os provetes expostos à solução de $MgSO_4$, durante 30 dias, verificou-se que a carga máxima atingida apresentou um decréscimo de aproximadamente 32,3% em relação aos provetes de referência. Esse decréscimo deve-se à degradação do betão junto à interface cola/betão, que afeta o desempenho do adesivo estrutural, resultando numa rotura por flexão do betão, após se atingir uma força aplicada da ordem de 30 kN. Para a exposição de 60 dias não foi observada uma evolução da degradação anteriormente referida. No grupo de provetes expostos à solução de $MgSO_4$ durante 60 dias, os valores de carga máxima medidos foram próximos dos anteriormente obtidos à idade de 30 dias, com exceção de um dos provetes testados (GB_MgSO₄_5) que apresentou uma carga máxima muito próxima das que foram medidas nos provetes de referência. Estes resultados indicam que os provetes expostos durante 60 dias apresentaram perda de capacidade resistente em relação aos provetes de referência, mas não sofreram perda de capacidade de carga entre os 30 e os 60 dias de exposição. Novamente aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não apresentou grandes alterações.

5. Conclusões

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permitiu identificar que, em alguns casos, a capacidade de carga dos elementos estruturais mistos colados foi afetada pelos ambientes agressivos a que foram expostos e que o tempo de exposição aos agentes agressivos é um parâmetro relevante na evolução da capacidade resistente. Embora os elementos tenham mantido uma capacidade resistente considerável depois da exposição, há que explorar mais as alterações de comportamento provocadas pelos ambientes agressivos, principalmente a exposição ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$), ambiente que provocou uma mudança que ficou patente na curva força vs deformação, apontando para uma perda de efetividade da cola ao atingir forças da ordem de 30 kN, além de um padrão de fendilhação que difere daquele que foi observado nos provetes de referência (sem exposição).

Os provetes que sofreram exposição à concentração de cloreto de sódio (NaCl) apresentaram um modo de rotura semelhante ao que foi observado nos provetes de referência, mas após 60 dias de exposição também evidenciaram alguma perda de capacidade de carga, podendo-se observar a abertura de fendas para valores de carga mais baixos.

O adesivo estrutural utilizado na colagem entre os elementos de aço e betão teve um comportamento bastante rígido. O comportamento rígido do adesivo combinado com o vão pequeno foram fatores preponderantes para que alguns dos provetes tenham apresentado modo de rotura que se caracteriza pela formação de uma fenda transversal com orientação de 45° em relação ao eixo longitudinal do provete. Essa fenda parte da zona superior do elemento de betão e é característica de rotura por corte. O modo de rotura descrito aconteceu nos provetes que atingiram valores de carga mais altos e apresentaram maior eficiência da cola.

Ao analisar os provetes que estiveram expostos ao ambiente que se mostrou ser mais nocivo (MgSO_4), nota-se que a perda da efetividade da cola como elemento de ligação ocorreu para valores de carga mais baixos, e os provetes tornaram-se menos rígidos, permitindo uma rotura do betão com orientação de 90 graus em relação ao eixo longitudinal do provete. Este modo de rotura é característico de uma rotura por flexão, possibilitada pela baixa de eficiência na ligação entre o betão e o perfil metálico, prejudicando a resistência à flexão do provete.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio dos centros de investigação CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, e ISISE - Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia, e foi desenvolvido com apoio financeiro da FCT ao abrigo da bolsa de doutoramento a referência 2021.05021.BD atribuída ao primeiro autor.

Referências

- [1] F. Torgal, S. Jalali, Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção, 2010.
- [2] L. Bragança, R. Mateus, Life-cycle analysis of buildings: environmental impact of building elements, *Int. J. Sustain. Built Environ.*, 53 (2012) 1689–1699, 2012.
- [3] P. Kumar, A. Patnaik, S. Chaudhary, A review on application of structural adhesives in concrete and steel-concrete composite and factors influencing the performance of composite connections, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 77 (2017) 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.009>.
- [4] P. Kumar, S. Chaudhary, R. Gupta, Behaviour of Adhesive Bonded and Mechanically Connected Steel-concrete Composite under Impact Loading, *Procedia Eng.*, 173 (2017) 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.062>.
- [5] S. Budhe, M.D. Banea, S. de Barros, L.F.M. da Silva, An updated review of adhesively bonded joints in composite materials, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2 (2017) 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>.
- [6] L. Sun, C. Li, Y. Tie, Y. Hou, and Y. Duan, Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 95 (2019) 102402. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102402>.
- [7] C. Meaud, B. Jurkiewicz, E. Ferrier, Steel-concrete bonding connection: An experimental study and non-linear finite element analysis, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 54 (2014) 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.010>.
- [8] R.A. Barnes, G. C. Mays, The transfer of stress through a steel to concrete adhesive bond, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 21 (2001) 495-502. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00031-8).
- [9] P. Upadhyaya, S. Kumar, Pull-out capacity of adhesive anchors : An analytical solution, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 60 (2015) 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.03.006>.
- [10] A. Souici, J.F. Berthet, A. Li, N. Rahal, Behaviour of both mechanically connected and bonded steel-concrete composite beams, *Eng. Struct.*, 49 (2013) 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.014>.
- [11] D. Thevenet, R. Créac'hacdec, L. Sohier, J.Y. Cognard, Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compression-shear cyclic loadings, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 44 (2013) 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.01.011>.
- [12] A. Ghumatkar, R. Sekhar, Experimental study on different adherend surface roughness on the adhesive bond strength, *Mater. Today: Proc.*, 4 (2017) 7801-7809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.115>.

- [13]C.B.G. Brito, R.C.M. Sales, M.V Donadon, Effects of temperature and moisture on the fracture behaviour of composite adhesive joints, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 100 (2020) 102607. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102607>.
- [14]M. Ferrer, F. Marimon, M. Casafont, An experimental investigation of a new perfect bond technology for composite slabs, *Constr. Build. Mater.*, 166 (2018) 618-633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.104>.
- [15]I. Valente, Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges, April (2007). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/8478>.
- [16]S. S. Babu, S. S. Selvan, Study on the flexural and compressive behavior of cold-formed steel sections with and without lips, *Mater. Today Proc.*, 37 (2021) 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.240>.
- [17]P. Samiee, S.E. Niari, E. Ghandi, Fire performance of cold-formed steel shear wall with different steel grade and thicknesses, *Structures*, 29 (2021) 751-770. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.073>.
- [18]Y. Tao, M. Mahendran, W. Review, Fire tests of cold-formed steel walls made of hollow section studs, *J. Constr. Steel Res.*, 178 (2021) 106495. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106495>.
- [19]H.J.F. Diógenes, A.L.H.C. El Debs, I.B. Valente, Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion, interlocking and friction, *J. Constr. Steel Res.*, 110 (2015) 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.012>.
- [20]C. Hsu, S. Punurai, W. Punurai, Y. Majdi, New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Eng. Struct.*, 71 (2014) 187-200. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.04.011>.
- [21]C. Hsu, P. Munoz, S. Punurai, Y. Majdi, W. Punurai, Behavior of composite beams with cold-formed steel joists and concrete slab, in 21st International specialty conference on cold-formed steel structures, 2012.
- [22]J. F. Berthet, I. Yurtdas, Y. Delmas, A. Li, Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 31 (2011) 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.11.004>.
- [23]O. Volkersen, Die Nietkraftverteilung in zugbean spruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, 15 (1938) 41-47.
- [24]P. Kumar, Experimental investigations for shear bond strength of steel and concrete bonded by epoxy, 2013.
- [25]Instuto Português da Qualidade (IPQ). NP EN 1994-1 Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão. 2011.
- [26]SIKA, Sikadur -31 EF, (2018) 2-5.
- [27] American Society for Testing Materials (ASTM). C 88-05. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, *Annu. B. Am. Soc. Test. Mater. ASTM Stand.*, i (2005) 1-5, 2005. <https://doi.org/10.1520/C0088-05.2>.

ORCID

Alexandre Rocha Salles	0000-0003-4147-2787 (https://orcid.org/0000-0003-4147-2787)
José Luís Barroso de Aguiar	0000-0003-3954-5721 (https://orcid.org/0000-0003-3954-5721)
Maria Isabel Brito Valente	0000-0003-0502-9956 (https://orcid.org/0000-0003-0502-9956)