



Engenharia Civil UM

desde 1995



Os Editores:

José Barroso de Aguiar

Sandra Cunha

NÚMERO

Especial **66**

2023

e-ISSN 2795-5982
ISSN 0873-1152



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil



Editores

José Luís Barroso de Aguiar, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Sandra Cunha, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Conselho Editorial

Aires Camões, Universidade do Minho, Portugal

Álvaro Cunha, Universidade do Porto, Portugal

Anabela Paiva, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

António Tadeu, Universidade de Coimbra, Portugal

António Correia, Universidade do Minho, Portugal

António Baptista, Oregon Health & Science University, USA

António Pais Antunes, Universidade de Coimbra, Portugal

António Madaleno, Universidade Agostinho Neto, Angola

António Matos, Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique

Antônio Silva, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Carlito Junior, Universidade de São Paulo, Brasil

Cristina Alvarez, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Daniel Oliveira, Universidade do Minho, Portugal

Eduardo Julio, Universidade de Lisboa, Portugal

Eliane Viviani, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Enio Figueiredo, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Fernando Branco, Universidade de Lisboa, Portugal

Fernando Veloso Gomes, Universidade do Porto, Portugal

Fernando Pacheco Torgal, Universidade do Minho, Portugal

Flávio Silva, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Flávio Cunto, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Francisco Martins, Universidade do Minho, Portugal

Glicério Trichês, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Guilherme Parsekian, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Guillermo Etse, National University of Tucumán, Argentina

Gustavo Ayala, National Autonomous University of México, México

Hélder Sousa, Universidade do Minho, Portugal

Holmer Savastano Jr, Universidade de São Paulo, Brasil

Ignacio Perez, Universidad de La Coruña, Espanha

Jaume Avellaneda, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

Joan Casas, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

João Castro Gomes, Universidade da Beira Interior, Portugal

Joaquim Barros, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Brito, Universidade de Lisboa, Portugal

Jorge Pais, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Jose Adam, Universitat Politècnica de València, Espanha

José Teixeira, Universidade do Minho, Portugal

José Vieira, Universidade do Minho, Portugal

José Valente, Universidade do Porto, Portugal

José Marques, Universidade de Coimbra, Portugal

José Matos, Universidade de Lisboa, Portugal

José Mendes, Universidade do Minho, Portugal

José Catarino, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

José Luís Pinho, Universidade do Minho, Portugal

Juan Marriaga, Universidad Nacional de Colombia, Colômbia

Khosrow Ghavami, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Lígia Silva, Universidade do Minho, Portugal

Luis Loria-Salazar, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Luís Lopes, Universidade do Minho, Portugal

Luís Simões da Silva, Universidade de Coimbra, Portugal

Luís Picado Santos, Universidade de Lisboa, Portugal

Maisa Tobias, Universidade Federal do Pará, Brasil

Manuel Matos Fernandes, Universidade do Porto, Portugal

Marcial Blondet, Pontificia Universidad Católica del Perú, Peru
Márcio Farias, Universidade de Brasília, Brasil
Maria Almeida, Universidade do Minho, Portugal
Maria Bortolucci, Universidade Federal de São Carlos, Brasil
Maria Antunes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal
Maria Jacques, Universidade de Brasília, Brasil
Marta Pagola, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Miguel Angel del Val, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha
Naim Haie, Universidade do Minho, Portugal
Newsha Ajami, University of Stanford, USA
Normando Perazzo, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Paulo Lourenço, Universidade do Minho, Portugal
Paulo Vila Real, Universidade de Aveiro, Portugal
Resende Nsambu, Universidade Agostinho Neto, Angola
Ricardo Fakury, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
Rodrigo Alvarado, Universidad del Bío-Bío, Chile
Rui Ramos, Universidade do Minho, Portugal
Said Jalali, Universidade do Minho, Portugal
Tan Yigitcanlar, University of Queensland, Australia
Teresa Barbosa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
Vasco Freitas, Universidade do Porto, Portugal
Vladimir Benincasa, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

O volume inclui alguns dos melhores trabalhos apresentados no Congresso Construção 2022, organizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Produção Editorial

Apoio Editorial: Vítor Costa, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Design da Capa: Vítor Costa

URL: <https://revistas.uminho.pt/>

E-mail: revistaengenhariacivil@civil.uminho.pt

Centro de Território, Ambiente e Construção
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães - Portugal

© Autores / Centro de Território, Ambiente e Construção



Este trabalho está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

e-ISSN: 2795-5982 | **ISSN:** 0873-1152

A Engenharia Civil UM é financiada por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto UIDB/04047/2020 (financiamento base) e UIDP/04047/2020 (financiamento programático).



Artigos publicados

Estudo de Formulações de Argamassas para Sistemas de Pavimento Radiante com Incorporação de Agregado Siderúrgico

A. Figueira, F. Rebelo, H. Paiva, A. Figueiredo, R. Almeida, R. Vicente, V. Ferreira

6

Atualizações de Revisão de Preços comparadas com custos reais de mercado(s) dos materiais: Estudo de Caso

R.A.F. de Oliveira, M.I. Abreu, J. Lopes

14

Análise Dinâmica do Desempenho Energético de um Envidraçado Termocrómico em Diferentes Zonas Climáticas de Portugal

H. Teixeira, M.G. Gomes, A.M. Rodrigues, D. Aelenei

28

Monitorização de estruturas de construção a partir de varões compósitos entrançados (BCRs)

J. Sousa, C. Mota, J. Bessa, F. Cunha, R. Fangueiro

38

Incorporação de lamas provenientes do corte de rochas ornamentais em materiais cimentícios

O. Moreira, R. Malheiro, C. Jesus, A. Camões, M.J. Ribeiro

51

Durabilidade de Estruturas Mistas em Aço-Betão Coladas

A. Rocha, J.B. Aguiar, I.B. Valente

65

Estudo de Formulações de Argamassas para Sistemas de Pavimento Radiante com Incorporação de Agregado Siderúrgico

Study of Mortar Formulations for Underfloor Heating Systems Incorporating Steel Aggregate

A. Figueira^{a†}, F. Rebelo^a, H. Paiva^a, A. Figueiredo^a, R. Almeida^{b,c}, R. Vicente^a, V. Ferreira^a

^a *RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal*

^b *Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal*

^c *CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: adrianamargarida@ua.pt*

RESUMO

Considerando as metas europeias para a eficiência energética e descarbonização, sem comprometer o conforto térmico, é necessário definir soluções de climatização mais eficientes e sustentáveis, nas vertentes da conceção, do uso de materiais e ainda da eficiência de sistemas. A melhoria das propriedades térmicas das argamassas utilizadas nos sistemas de pavimento radiante é uma estratégia promissora para o aumento da eficiência térmica e energética destes sistemas que têm ganho quota de mercado não só no norte e centro da Europa, bem como na América do Norte. A eficiência térmica e energética dos sistemas de pavimento radiante hidráulicos é dependente da geometria e constituição das camadas, dos materiais empregues e das condições de operação, tendo grande impacto as propriedades termofísicas da argamassa utilizada para envolver as tubagens. Numa perspetiva de valorização de um resíduo industrial como contributo específico para a sustentabilidade na construção, é objeto de estudo deste trabalho a incorporação de um Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) como substituto parcial do agregado natural de uma argamassa fluída autonivelante para melhorar o seu desempenho em sistemas de pavimento radiante. Para além da caracterização térmica e mecânica de argamassas com diferentes teores de ASIC, o desempenho das argamassas neste tipo de aplicação foi também aferido através de um modelo numérico calibrado.

ABSTRACT

Considering the European targets for energy efficiency and decarbonization, without compromising thermal comfort, it's necessary to define more efficient and sustainable air conditioning solutions, in terms of design, use of materials and even system efficiency. Improving the thermal properties of mortars used in underfloor heating systems is a promising strategy for increasing the thermal and energy efficiency of these systems, which have gained market share not only in northern and central Europe, but also in North America. The thermal and energy efficiency of hydraulic underfloor heating systems depends of the geometry and constitution of the layers, the materials used and the operating conditions, with a great impact on the thermophysical properties of the mortar

Palavras-chave:

Pavimento Radiante;
Argamassas; Resíduo
Siderúrgico;
Transferência de Calor.

Keywords:

Underfloor heating;
Mortars; Steel
Aggregate; Heat
Transfer.

used to surround the pipes. From a perspective of valuing industrial waste as a specific contribution for sustainability in construction, the object of study of this work is the incorporation of an Inert Steel Aggregate for Construction (ASIC) as a partial substitute for the natural aggregate of a self-levelling fluid mortar to improve its performance in underfloor heating systems. In addition to the thermal and mechanical characterization of mortars with different ASIC contents, the performance of mortars in this type of application was also measured using a calibrated numerical model.

1. Introdução

O consumo de energia elétrica usada para a climatização de edifícios tem vindo a aumentar e, para o minimizar sem comprometer o conforto dos utentes, é essencial intensificar a investigação sobre estratégias de aquecimento e arrefecimento passivos, bem como o desenvolvimento de novos materiais e soluções construtivas com menor impacto ambiental e energia incorporada [1, 2].

Os sistemas de pavimento radiante são uma resposta à necessidade da evolução dos edifícios com maior eficiência energética, promovendo uma distribuição uniforme da temperatura ambiente e oferecendo a oportunidade de aplicar recursos de elevada eficiência energética como, por exemplo, o aproveitamento solar, uma vez que quando instalados em conjunto com os sistemas de pavimento radiante permitem economizar cerca de 60% de energia para o seu funcionamento [3, 4].

A utilização de resíduos como matérias-primas alternativas tem vindo a aumentar, tornando-se bastante importante na ótica da sustentabilidade na construção ao permitirem a redução da extração e utilização de agregados naturais em diversos materiais de construção. Existem na literatura muitos exemplos de diversas aplicações de resíduos de diferentes proveniências, mas destacam-se aqui alguns exemplos de valorização de resíduos da indústria metalúrgica. Foram utilizados vários tipos de resíduos de escórias metalúrgicas para aplicação em argamassas, em substituição quer do ligante como dos agregados. Santamaría et al., (2020) [5] estudaram a incorporação de escórias de forno a arco elétrico (EAFS) como agregado e escórias de forno de panela de alta sílica (LFS), onde substituíram 30% de ligante e 70% de agregado fino, tendo verificado que a densidade das argamassas com agregado de EAFS aumentou cerca de 11% bem como a sua resistência mecânica. Já em relação à substituição apenas dos agregados das argamassas Ozturk et al., (2018) [6], assim como outros autores [7-10], aplicaram escórias de forno a arco elétrico em argamassas cimentícias, alcançando um aumento da resistência mecânica à flexão e à compressão de cerca de 30% e 18%, respetivamente, quando incorporaram 40% daquele resíduo. Neste trabalho procurou-se usar um outro resíduo siderúrgico (ASIC) resultante da produção do aço, com o intuito de, por via da sua maior densidade, melhorar a transmissão térmica das argamassas usadas na envolvente dos pavimentos radiantes.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram os seguintes: cimento, agregados naturais, agregado siderúrgico, água, redutor e retentor de água. O cimento e os agregados naturais foram fornecidos pela empresa Saint-Gobain Portugal, S.A. e o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) foi proveniente da empresa SN Maia (grupo MEGASA) através da empresa Harsco Environmental.

O cimento utilizado nas argamassas foi um cimento tipo CEM II/A-L 42.5 R. Os agregados naturais são duas areias com diferentes granulometrias, em que o agregado mais fino é um filler e o agregado de dimensão média é uma areia siliciosa e, por fim, contém ainda um agregado calcário mais grosso com dimensões entre 1.5 e 3.0 mm, com massas volúmicas de, respetivamente, 2660, 2600 e 2700 kg/m³. O ASIC é proveniente de um resíduo da indústria do aço com uma massa volúmica de 3480 kg/m³. A água utilizada foi a da rede de consumo e, em

termos de adjuvantes nas formulações, foi usado um agente redutor de água, com base num éter policarboxilato com a função de melhorar o espalhamento e um agente retentor de água, cuja substância base é o hidroxipropilmetilcelulose, tendo este último a função de evitar a perda de água em substratos porosos e absorventes.

2.2. Procedimentos

O estudo realizado tem como principal objetivo o desenvolvimento de argamassas com incorporação de um resíduo siderúrgico para aplicação em sistemas de pavimentos radiantes. Neste contexto, o plano experimental tomou duas linhas de ação. A primeira, ao nível dos materiais, que consistiu no desenvolvimento de argamassas e sua avaliação no estado fresco e no estado endurecido, sendo o alvo de estudo formulações cuja incorporação do ASIC foi realizada em substituição total do agregado médio e em substituição total do agregado médio e grosso (Tabela 1). Foi desenvolvida uma formulação de referência, denominada de AR, e posteriormente, duas formulações com incorporação de diferentes teores de resíduo siderúrgico, as quais foram avaliadas ao nível das suas características. No estado fresco foi determinada a consistência por espalhamento, e no estado endurecido foi avaliada a densidade, a resistência mecânica e, por fim, a condutibilidade térmica. Na segunda linha de ação, foram utilizados em estudos de simulação numérica os resultados obtidos na fase experimental, para se avaliar o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas quando aplicadas num sistema de pavimento radiante hidráulico. Para tal foi usado o software FEMIX num modelo anteriormente calibrado e validado [11].

Tabela 1 - Formulações desenvolvidas.

Denominação	Cimento	Filler	Agregado Médio	Agregado Grosso Calcário	ASIC	Água	Agente Redutor de água (SP)	Agente Retentor de água (EC)
AR	15%	35%	35%	15%	0%	9%	0%	0%
A35ASIC	15%	35%	0%	15%	35%	9%	0%	0%
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	15%	35%	11%	1,5%	0,08%
A35ASIC_13W	15%	35%	0%	15%	35%	13%	0%	0%
A50ASIC	15%	35%	0%	0%	50%	9%	0%	0%
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	0%	50%	11%	1,5%	0,08%
A50ASIC_13W	15%	35%	0%	0%	50%	13%	0%	0%

Os ensaios realizados seguiram as normas vigentes. No caso do ensaio da consistência por espalhamento seguiu-se o especificado pela norma europeia EN 1015-3 [12]. Após a produção das argamassas, foram moldados os provetes de ensaio com dimensões de 40×40×160 mm³ e acondicionados em câmara climática a 20°C e 95% de humidade relativa durante 28 dias, após os quais se seguiram os ensaios no estado endurecido, nomeadamente, a densidade determinada segundo a norma europeia EN 1015-10 [13], a resistência mecânica à flexão e à compressão, segundo a norma europeia EN 1015-11 [14] e, por fim, a condutibilidade térmica foi determinada em provetes de forma circular, com diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm, com recurso ao equipamento Holometrix C-Matic (modelo TCA-200).

De seguida, para avaliação do impacto da incorporação do agregado siderúrgico na camada de enchimento, foi realizada uma simulação numérica, cujo software (FEMIX) recorre ao Método dos Elementos Finitos e se desenvolve segundo a forma geral, em coordenadas cartesianas tridimensionais, pela equação da transferência de calor.

Na presente simulação, foram utilizadas temperaturas prescritas para simular a temperatura da água e a condição de convecção na superfície superior da laje. Para as condições de teste, foi definido que a temperatura do ar é de 18°C e que o sistema de circulação de água funciona durante 6 horas contínuas, em que a temperatura da água aumenta de forma progressiva até aos 45°C, com início aos 20°C, conforme se mostra na Figura 1.

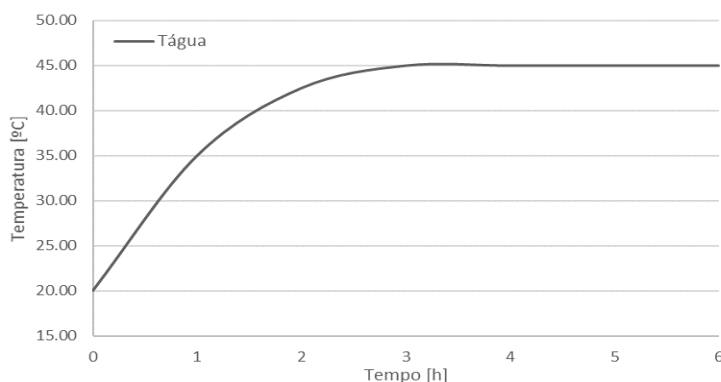


Figura 1 - Perfil da temperatura da água.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais das formulações desenvolvidas a partir da argamassa de referência (AR). Duas formulações distintas foram desenvolvidas neste estudo preliminar, uma com 35% de ASIC a substituir o agregado médio (areia siliciosa) e outra em que se aumentou a quantidade do resíduo ASIC (para 50%) por substituição do agregado grosso calcário para além do agregado médio. Em ambos os sistemas foram também feitas formulações com maior teor de água e de adjuvantes para melhorar o comportamento no estado fresco sem comprometer as propriedades no estado endurecido. Estas formulações estão descritas detalhadamente na Tabela 1. Como se pode ver na Tabela 2, as argamassas formuladas inicialmente com o teor base de água da argamassa de referência (de apenas 9%) não apresentam trabalhabilidade adequada para o fim a que se propõe, ou seja, a aplicação em sistemas de pavimento radiante. Por esse motivo, foi necessário aumentar o teor de água e de adjuvantes para que o espalhamento aumentasse de forma a provocar um bom envolvimento das tubagens do pavimento radiante.

Tabela 2 - Resultados laboratoriais obtidos.

Denominação	Espalhamento [mm]	Massa volúmica [kg/m ³]	Resistência à flexão [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Condutibilidade térmica [W/m.K]
AR	100	2029 ± 17,5	4,0 ± 0,1	19,3 ± 0,5	0,71 ± 0,05
A35ASIC	100	2325 ± 10,7	5,8 ± 0,1	26,6 ± 1,0	0,75 ± 0,02
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	160	2258 ± 10,0	5,3 ± 0,2	17,9 ± 0,3	0,75 ± 0,14
A35ASIC_13W	200	2305 ± 5,3	4,4 ± 0,1	16,2 ± 0,7	0,87 ± 0,02
A50ASIC	100	2359 ± 8,8	4,9 ± 0,1	23,2 ± 0,3	0,74 ± 0,01
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	140	2306 ± 179,3	5,0 ± 0,0	19,1 ± 0,2	0,66 ± 0,05
A50ASIC_13W	210	2389 ± 18,3	4,4 ± 0,3	19,2 ± 0,8	0,77 ± 0,06

De facto, a introdução de teores mais elevados de água e a introdução dos agentes reductor e retentor de água leva a um aumento progressivo da consistência por espalhamento (para 160 a 200 mm). Por outro lado, em relação à densidade, comparando as amostras com 9% de água, esta aumenta com o aumento do teor de agregado denso nas misturas, devido à elevada densidade do agregado ASIC. No entanto, ao contrário da trabalhabilidade, com o aumento do teor de água e adjuvantes, a densidade de cada mistura diminui. Mais especificamente, as argamassas com adjuvantes na sua constituição apresentam uma densidade inferior em comparação com as restantes formulações, que é explicado pelo facto de no caso das argamassas com adjuvantes poderem promover a introdução de ar na matriz, que provoca uma diminuição na densidade das misturas, obtendo-se todavia materiais mais trabalháveis [10, 15]. A amostra A50ASIC é uma exceção que, com 13% de água, a sua densidade é a mais elevada, devido ao grande conteúdo de

um agregado de densidade superior, o ASIC.

Relativamente à resistência mecânica, focando nas formulações com 9% de água, apesar de o aumento do teor de ASIC nas misturas apresentar um aumento da densidade das mesmas, neste caso, o facto de a mistura A35ASIC conter ainda teor de agregado grosso calcário o que já não sucede na mistura A50ASIC, faz com que o empacotamento da matriz seja diferente em relação à referência (AR), e se traduza num valor 31% e 27% superior na resistência mecânica à flexão e à compressão, respetivamente. Em relação à amostra A50ASIC, o aumento relativo à referência AR é de apenas 15% e 13%, respetivamente. Julga-se que este efeito pode ser explicado pela combinação do agregado calcário e do agregado siderúrgico na matriz. Ainda em relação à resistência mecânica, para todas as formulações desenvolvidas, a resistência diminuiu ligeiramente mas não de forma significativa com o aumento progressivo de água e adjuvantes que causou um aumento considerável do espalhamento destas argamassas.

Por fim, a condutibilidade térmica das argamassas cujo teor de água é 9%, aumenta com a maior incorporação do teor de resíduo siderúrgico. Por outro lado, quando se aumenta o teor de água e se incorpora adjuvantes, o mesmo não acontece. Uma vez que a condutibilidade depende da densidade e da porosidade da matriz, não sendo uma relação linear, ao incorporar maior percentagem de ASIC, a densidade da amostra global irá aumentar. No entanto, pode não significar um aumento de condutibilidade térmica, uma vez que o aumento do teor de ASIC poderá também conduzir a um aumento da porosidade da matriz criada por dificuldades de empacotamento e conseqüente diminuição da condutibilidade térmica.

Após os resultados laboratoriais obtidos, foram selecionadas as formulações que teriam uma melhor relação entre todas as propriedades analisadas, e as suas características foram introduzidas no modelo numérico, bem como os restantes materiais utilizados na simulação (ver Tabela 3). Sucintamente, o modelo foi utilizado para avaliar o impacto da utilização de uma argamassa, considerada de referência e outras formulações estudadas na distribuição das temperaturas à superfície.

Tabela 3 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo.

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutibilidade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa AR	2029	0,71	800
Argamassa A35ASIC_13W	2305	0,87	800
Argamassa A50ASIC_13W	2389	0,77	800
Material de Isolamento	2500	2,00	1000
Betão	70.5	0,04	1000

Os resultados obtidos mostraram que a incorporação de agregado siderúrgico ASIC na camada de argamassa provoca um aumento da temperatura superficial atingida, e desse modo, afeta positivamente a eficiência dos sistemas de pavimento radiante. A Figura 2 representa a distribuição da temperatura superficial do pavimento, para as diferentes formulações de argamassa utilizada.

A Figura 3 representa o perfil da evolução da temperatura superficial para diferentes formulações de argamassa. Pela análise dos resultados a argamassa com a condutibilidade térmica mais elevada, resulta conseqüentemente numa transferência de temperatura para a superfície também mais elevada. A temperatura máxima atingida pelo sistema de pavimento radiante com a argamassa A35ASIC_13W atingiu o valor de 35.77°C. No caso da argamassa de referência e a argamassa A50ASIC_13W, as temperaturas máximas atingidas à superfície foram, respetivamente, 34.64°C e 34.99°C.

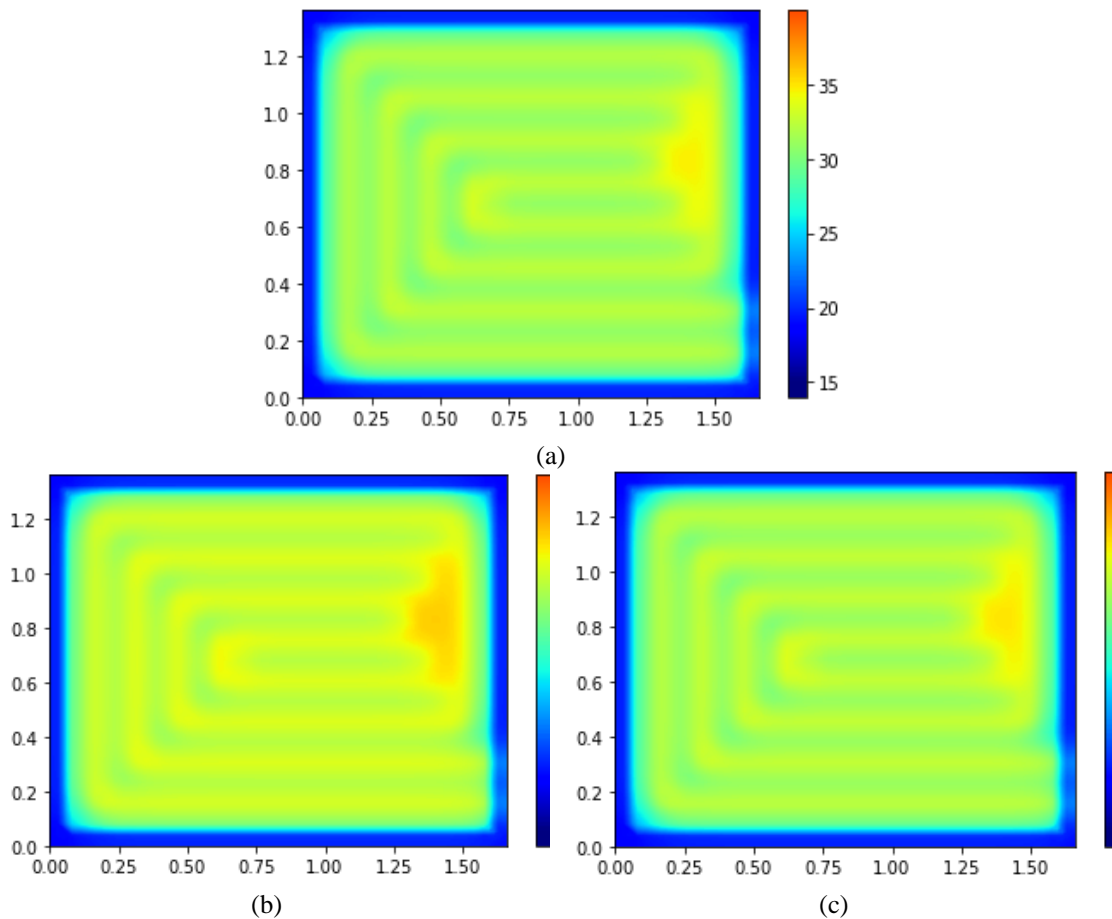


Figura 2 - Distribuição da temperatura na superfície do pavimento radiante para diferentes formulações de argamassas: (a) Argamassa de referência; (b) A35ASIC_13W; (c) A50ASIC_13W.

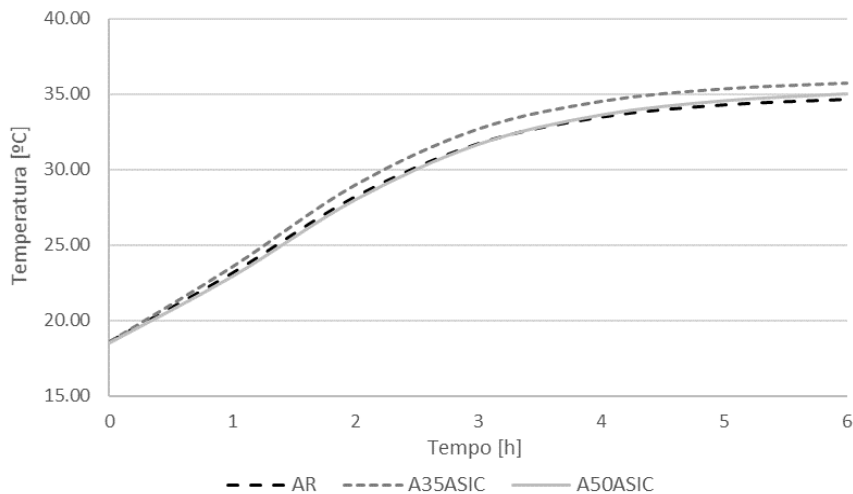


Figura 3 - Perfil da temperatura à superfície do pavimento para diferentes formulações de argamassa.

A utilização de uma argamassa com 35% de agregado siderúrgico e 13% de água na sua constituição, apresentou-se como a mais vantajosa em termos de temperatura à superfície e, conseqüentemente, na eficiência térmica dos pavimentos, na medida que poderá conduzir a um tempo de operação mais reduzido. Esta formulação também apresentou um maior crescimento da temperatura à medida que o sistema de aquecimento de água está em funcionamento, sempre com

temperaturas mais elevadas à superfície ao longo do tempo de aquecimento de 6 horas. O contrário acontece na formulação da argamassa sem agregado siderúrgico e com 50% deste agregado denso, em que, até às 3 horas de funcionamento, a introdução do agregado denso não aparenta contribuir para uma temperatura à superfície mais elevada. Após as 3 horas de funcionamento do sistema e quando a temperatura da água já circula a 45°C, a argamassa com 50% de ASIC provoca no sistema de pavimento radiante maiores temperaturas à superfície do que a argamassa de referência, no entanto, esta diferença registada é, no máximo, de 1%.

4. Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento e caracterização de formulações de argamassas com incorporação de resíduo siderúrgico como agregado e posterior simulação numérica do desempenho térmico de um sistema de pavimento radiante com as diferentes formulações desenvolvidas, para efeitos de comparação e avaliação do efeito do agregado denso na camada de enchimento do sistema na temperatura superficial do mesmo.

A densidade e a resistência mecânica das argamassas aumentaram com o acréscimo de incorporação do agregado denso ASIC nas formulações, para uma mesma quantidade de água. Por outro lado, a adição de mais água e de adjuvantes, apesar de aumentar a consistência por espalhamento, fator favorável ao tipo de aplicação aqui em causa, conduz a uma diminuição, embora ligeira, da densidade e da resistência mecânica à flexão e à compressão, pelo aumento da porosidade interna da matriz.

Em relação à condutibilidade térmica, um maior teor de agregado denso não representa automaticamente um aumento desta característica, uma vez que existe um balanço entre o aumento de densidade trazido pela incorporação de um agregado mais denso (ASIC) na mistura, que pode ser contrariado pelo efeito da sua introdução induzir uma matriz mais porosa pelo empacotamento gerado, que acaba por contribuir para o ligeiro decréscimo da condutibilidade térmica.

As melhores formulações foram testadas numericamente num sistema de pavimento radiante, obtendo-se, para a amostra com maior condutibilidade térmica, um aumento de cerca de 1°C na temperatura superficial, durante as 6 horas de funcionamento do sistema. A argamassa com 35% de agregado siderúrgico e com 13% de água foi a que apresentou o melhor desempenho térmico. Concluiu-se assim que é possível obter uma argamassa com este agregado siderúrgico (ASIC) com desempenho térmico melhorado e sem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica para este tipo de aplicação em pavimentos radiantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do projeto Super Energy Radiant Floor Systems – SEERFloor, PTDC/ECI-COM/3436/2020.

Referências

- [1] J. Lee, S. Wi, S.G. Jeong, S.J. Chang, S. Kim, Development of thermal enhanced n-octadecane/porous nano carbon-based materials using 3-step filtered vacuum impregnation method, *Thermochim. Acta*, 655 (2017) 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.06.013>.
- [2] R. Vicente, T. Silva, Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach, *Appl. Therm. Eng.*, 67 (2014) 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069>.
- [3] G. Zhou, J. He, Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes, *Appl. Energy*, 138 (2015) 648-660. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.058>.
- [4] V. Echarri-Iribarren, C. Rizo-Maestre, J.L. Sanjuan-Palermo, Underfloor heating using ceramic thermal panels and solar thermal panels in public buildings in the Mediterranean: Energy savings and healthy indoor environment, *Appl. Sci.*, 9 (2019) 1-18. <https://doi.org/10.3390/app9102089>.

- [5] A. Santamaría, J.J. González, M.M. Losáñez, M. Skaf, V. Ortega-López, The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate, *Cem. Concr. Compos.*, 111 (2020) 103627. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>.
- [6] M. Ozturk, O. Akgol, U.K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, E. Unal, Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag, *Constr. Build. Mater.*, 165 (2018) 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.031>.
- [7] H.Y. Wang, W.C. Wang, J.C. Wang, Y.W. Chen, Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag, *Constr. Build. Mater.*, 280 (2021) 122498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122498>.
- [8] M. Baawain, H. Shoukry, K. Al-Jabri, An Investigation into the Thermo-Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Mortar Incorporating Hybrid Waste Slags, *Int. J. Civ. Eng.*, 19 (2021) 17-26. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00554-z>.
- [9] J. Castro Mendes, R.R. Barreto, V. de Freitas Vilaça, A.V. Lopes, H.A. de Souza, R.A.F. Peixoto, Coating mortars based on mining and industrial residues, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 22 (2020) 1569-1586. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01051-0>.
- [10] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars, *Mater. Des.*, 97 (2016) 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.080>.
- [11] R.M.S.F. Almeida, R.S. Vicente, A. Ventura-Gouveia, A. Figueiredo, F. Rebelo, E. Roque, V.M. Ferreira, Experimental and Numerical Simulation of a Radiant Floor System: The Impact of Different Screed Mortars and Floor Finishings, *Materials (Basel)*, 15 (2022) 1015. <https://doi.org/10.3390/ma15031015>.
- [12] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-3:1998, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1998.
- [13] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-10:1999, Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, 1999.
- [14] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-11:1999, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [15] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 95 (2015) 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164>.

ORCID

Adriana Margarida Marques Figueira

0009-0006-5881-3874

(<https://orcid.org/0009-0006-5881-3874>)

Filipe José da Silva Rebelo

0000-0002-2776-468X

(<https://orcid.org/0000-0002-2776-468X>)

António José Pereira de Figueiredo

0000-0003-4324-7006

(<https://orcid.org/0000-0003-4324-7006>)

Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

0000-0002-9846-6081

(<https://orcid.org/0000-0002-9846-6081>)

Romeu da Silva Vicente

0000-0002-5456-1642

(<https://orcid.org/0000-0002-5456-1642>)

Victor Miguel Carneiro Sousa Ferreira

0000-0002-6295-1333

(<https://orcid.org/0000-0002-6295-1333>)

Atualizações de Revisão de Preços comparadas com custos reais de mercado(s) dos materiais: Estudo de Caso

Comparison between Price Adjustment Indices and real costs of construction materials to calculate escalation: a case study

R.A.F. de Oliveira^{a†}, M.I. Abreu^a, J. Lopes^a

^a Instituto Politécnico de Bragança, Departamento Construções Cívicas e Planeamento, Bragança, Portugal

[†] Autor para correspondência: roliveira@ipb.pt

RESUMO

O controlo de custos de empreitadas exige metodologias de gestão cada vez mais ajustadas às especificidades das respetivas obras. Os consideráveis aumentos de custos de materiais, causados pela atual conjuntura de mercado global, exigem tomadas de decisão ajustadas à realidade.

A revisão de preços aplicável às empreitadas de construção tem em consideração a atualização de preços com base nos índices atualizados de materiais, mão-de-obra e de equipamentos, onde, por vezes, não compensam a efetiva subida desses preços.

A recente legislação (Decreto-Lei 36/2022) que alterou o regime jurídico de revisão de preços contempla a possibilidade de os cocontratantes interessados apresentarem correção ou alteração da fórmula de revisão de preços, quando a apresentada esteja desajustada às especificidades da empreitada ou quando a mesma esteja omissa no caderno de encargos.

O artigo envolve a simulação de um caso real de uma obra onde foi aplicada revisão de preços, fazendo-se a comparação entre a compensação retribuída ao empreiteiro atendendo ao preço de determinados materiais na data considerada base de cálculo, e a resultante da efetiva subida de preços desses materiais, sob a forma de diferentes cenários de revisão com base na recente legislação.

Este estudo demonstra que, mantendo as fórmulas que servem de base ao cálculo da revisão de preços, o empreiteiro pode ter retribuições que podem ser suficientes para compensar as eventuais subidas de preços de mercado. Em oposição, a utilização de determinados ajustamentos da fórmula-tipo de revisão de preços pode revelar retribuições superiores aos custos reais de mercado dos materiais.

ABSTRACT

Construction materials have been experiencing significant price increases, and these prices are causing a rise of construction costs of buildings and other construction structures. The rise in material prices is causing construction managers to undertake cost control mechanism to adjust the escalation of construction costs.

Price adjustment applied to construction works considers the updating of prices based on the current index values of construction material, labour and plant, which do not sometimes reflect the actual market prices.

The recent legislation (Decree-Law n° 36/2022) that amended the regime of price adjustment of construction contracts considers the possibility of interested contractors to present proposals for amending the price adjustment formulae, when these do not either reflect the changes in the costs of inputs or are omitted

Palavras-chave:

Revisão de preços; fórmulas de revisão de preços; coeficientes de atualização mensal; coeficientes; regime excepcional e temporário de revisões de preços.

Keywords:

Price adjustment; price adjustment formulae; monthly price adjustment factor; coefficients; exceptional regime of price adjustment.

in the contract documents.

The object of the paper involves the simulation of a real case of a construction contract, where price adjustment provisions were used to account for the changes of construction costs. A comparison was, then, made between the recompense given to the contractor based on the price adjustment format agreed in the construction contract, and that derived from the application of different adjustment provisions contained in the aforementioned Decree-Law.

The results of the study show that the use of the original price adjustment indices was generally suitable to account for the increase in construction costs. On the other hand, the application of some adjustment provisions contained in the recent legislation resulted in the overvaluation of the actual costs of construction materials.

1. Introdução

Têm-se assistido a um substancial aumento da inflação, resultante do aumento de custos, motivada por várias razões apontadas, tais como a pandemia Covid 19, mas sobretudo pelo conflito entre Rússia e Ucrânia [1]. Numa guerra, em qualquer lugar, os países em conflito podem gerar inflação e desemprego em simultâneo, movendo-se estas variáveis juntas e quase proporcionalmente [2]. Prichet et al. (2011) definiram a inflação como: “*um aumento no nível de preços de um bem ou serviço ou cesta de mercado de bens e/ou serviços*” [3].

A taxa de inflação afeta negativamente a indústria da construção com a subida do orçamento estimado da obra, levando à revisão de preços (materiais, mão-de-obra, equipamentos) e que por vezes termina com o projeto por excesso de custos, causando sérios constrangimentos aos stakeholders [4]. Verifica-se que muitos stakeholders estão a adotar critérios ESG (Environmental, Social and Governance) nos seus investimentos, indo ao encontro de uma procura de maior estabilidade nos mercados e com riscos ponderados [5].

Especificamente, o preço de muitos dos produtos transacionados nos mercados têm vindo a aumentar substancialmente, como é possível verificar na taxa de variação homologa desses produtos [6]. O preço dos materiais de construção não tem sido diferente do resto dos produtos, com subidas de preços, escassez de matérias-primas para o seu fabrico (processo produtivo), falta de mão de obra, e mesmo relacionado com a falta de oferta (processo logístico), agravados também pela instabilidade de preços da energia. O Decreto-lei 36/2022 de 20 de maio cita que, “*no período em questão e a título de exemplo, que o aço em varão e perfilados aumentou 41,7%, a chapa de aço macio, 44,0%, o fio de cobre revestido, 38,5%, betumes a granel, 61,2%, derivados de madeira, 65,2%, vidro, 28,1%, e tubo de PVC, 71,3%*” [7].

No entanto, esta subida de preços é sempre refletida no final da cadeia, através do aumento de preços do produto da construção, tais como da habitação, de empreitadas de construção. Segundo o INE, “*No 1º trimestre de 2022, o preço mediano de alojamentos familiares em Portugal foi de 1 454 €/m², correspondendo a uma taxa de variação homóloga de +17,2%*”, com o valor mais elevado em Faro, seguindo-se Lagoa [8].

Embora seja expectável um abrandamento dos níveis de construção em Portugal, a breve prazo não parece que seja um cenário já enraizado, pois a construção de edifícios desceu para 2% em junho 2022, quando em maio registou 2,2% de crescimento homologo, tendo a engenharia civil aumentado de 1,2% em maio 2022 para 1,5% em junho 2022. No entanto os índices de emprego e de remunerações na construção, registou-se em junho 2022 um panorama de desaceleração do índice de produção, constatando-se 2% (emprego) e 6,2% (remunerações), tendo em maio índices na ordem de 2,1% e 6,5% respetivamente [9]. Já a taxa de variação homologa em junho 2021 era de 2,9% (emprego) e de 9,5% (remunerações), o que representa um abrandamento e conseqüente desaceleração em junho 2022 [9]. Já a nível europeu, segundo o Eurostat, a produção na construção na zona Euro subiu 0,1% e na União Europeia 0,6%, comparativamente com junho 2021, mas recuou -1,3% (zona euro) e -1,2% (União Europeia), face a maio de 2022 [10].

De referir que, com a subida abrupta de preços dos materiais, e frequente escassez de mão-de-obra, muitas empreitadas submetidas a concurso não tiveram concorrentes, outras foram

abandonadas pelos empreiteiros já durante a construção, entre outros problemas. O Governo Português em reação a este fenómeno publicou recentemente o “*Regime Excepcional e Temporário no âmbito do aumento dos custos com impacto em contratos públicos*”, através do Decreto-lei 36/2022 [7], onde sob determinadas condições é possível mudanças significativas da revisão de preços, de modo a atenuar prejuízos. Sabe-se que a revisão de preços é a forma que os empreiteiros têm de atualização de preços decorrentes de inflação, face à distância temporal entre o contrato formalizado com preços acordados e o tempo efetivo de realização da empreitada [11]. No entanto, em algumas situações deixa-se a questão se a revisão de preços expressa a efetiva atualização de preços face à conjuntura de mercado, situação que se pretende clarificar com este artigo.

O artigo encontra-se estruturado com introdução, contexto da revisão de preços, metodologia e caso de estudo, e principais conclusões.

2. O contexto da Revisão de Preços

2.1. Revisão de preços e seu enquadramento histórico

A revisão de preços consiste na determinação das variações, para mais ou para menos, dos custos de mão-de-obra, dos materiais e dos equipamentos, tendo como base os correspondentes valores considerados no mês anterior à data-limite fixada para a entrega das propostas. Ora seja, as variações são estudadas tendo como base o mês anterior à entrega das propostas e com base no plano de pagamentos elaborado em fase de proposta pelo empreiteiro, abrangendo até à data do termo do prazo de execução contratualmente estabelecido, considerando ainda as prorrogações legais. A revisão de preços é obrigatória, tendo em consideração o Decreto-lei n.º 6/2004 (e demais alterações) e segundo cláusulas específicas inseridas nos cadernos de encargos e nos contratos.

Em termos de contexto histórico, a Lei 1578 de 10 abril 1924 considera que a revisão de preço passou a ser possível nos contratos devendo o caderno de encargos incluir uma cláusula sobre essa temática [12]. Posteriormente em 1967 surge o Decreto-Lei n.º 47945 de 16 de setembro, surge o regime jurídico da revisão de preços, onde fica instituída a obrigatoriedade da revisão em obras com mais de 180 dias, atendendo aos valores do mês em que tenham sido abertas as propostas. Neste diploma, os trabalhos não previstos em projeto são abrangidos na revisão de preços, “*desde que a sua realização tenha resultado de contrato adicional ou de alterações impostas ou aprovadas pela entidade competente*” [13]. Em 1975 o Decreto-lei n.º 273-B/75, de 3 de junho, surge na perspectiva de corrigir as falhas consagradas no Decreto-lei n.º 781/74, de 31 de dezembro, revogando o diploma de 1967, considerando importantes alterações no regime da revisão de preços e esclarecendo que os índices são publicados “*por despacho do Secretário de Estado das Obras Públicas, sob proposta de uma comissão permanente que para o efeito nomeará, e em que terão assento representante ou representantes dos industriais da construção civil e obras públicas*” [14].

Posteriormente, em 1986, surge a publicação do Decreto-lei n.º 348-A/86, de 16 de outubro, contemplando alterações no anterior regime de revisão de preços aprovado, o regime de revisão de preços é alterado, sofrendo ajustamentos e melhorias resultantes da evolução da conjuntura económica e da experiência adquirida com a aplicação da legislação anterior. Mais tarde em 1988, passou a funcionar como Comissão especializada a Comissão de Índices de Fórmulas e Empreitadas (CIFE) enquadrada no exercício das funções do Conselho de Mercados de Obras Públicas e Particulares (CMOPP) [15]. O Decreto-lei n.º 6/2004 de 6 de Janeiro trouxe consideráveis alterações aos diplomas legais vigentes até à data sobre revisão de preços, aperfeiçoando mecanismos para maior adequação à realidade das empreitadas [11], salientando-se: a compatibilização com as disposições do regime jurídico de empreitadas de obras públicas [16]; Redução do limite mínimo do coeficiente de atualização de 3% para 1%, quando a revisão de preços é feita por fórmula (harmonização com a dinâmica de custos atual) e de 4% para 2%, no caso de revisão de preços por garantia de custos; Substituição do cronograma financeiro pelo plano de pagamentos, como referência nos cálculos de revisão de preços; entre outras.

Recentemente, o Decreto-Lei n.º 73/2021 de 18 de Agosto procede à primeira alteração do Decreto-lei n.º 6/2006, salientando-se no mesmo: a possibilidade de no caso de omissão no caderno de encargos ou de a considerarem desajustada às especificidades da empreitada, os interessados poderem apresentar a fórmula de revisão de preço; Substituição da necessidade de homologação da atualização dos índices de revisão de preços pelo membro do Governo (da área das infraestruturas) pela sua submissão à aprovação do conselho diretivo do Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção (IMPIC); O valor apurado, resultante da revisão de preços, no final do prazo contratual, acrescido das prorrogações legais, não está sujeito ao limite imposto pelo preço base, nem aos limites que determinaram a escolha do procedimento [17].

2.2. Abrangência e metodologia de aplicação da Revisão de Preços

O regime de revisão de preços das empreitadas de obras públicas e de obras particulares e de aquisição de bens e serviços tem como âmbito de aplicação aos “*contratos de aquisição de bens móveis e os contratos de aquisição de serviços regulados no CCP, bem como os contratos de empreitadas de obras particulares em que se estipule o direito à revisão de preços*” [11].

A Revisão de preços nas obras públicas prevê as seguintes modalidades: Fórmula; Garantia de custos; Fórmula e garantia de custos. A fórmula é denominada polinomial e tem a seguinte configuração (Eq. 1):

$$C(\text{índice } t) = a \times \frac{S(\text{índice } t)}{S(\text{índice } o)} + b \times \frac{M(\text{índice } t)}{M(\text{índice } o)} + b' \times \frac{M'(\text{índice } t)}{M'(\text{índice } o)} + b'' \times \frac{M''(\text{índice } t)}{M''(\text{índice } o)} + \dots + c \times \frac{E(\text{índice } t)}{E(\text{índice } o)} + d \quad (1)$$

Sendo:

- C (índice t) é o coeficiente de atualização mensal a aplicar ao montante sujeito a revisão, obtido a partir de um somatório de parcelas com uma aproximação de seis casas decimais e arredondadas para mais quando o valor da sétima casa decimal seja igual ou superior a 5, mantendo -se o valor da sexta casa decimal no caso contrário;

- S (índice t) é o índice dos custos de mão -de -obra relativo ao mês a que respeita a revisão;

- S (índice o) é o mesmo índice, mas relativo ao mês anterior ao da data-limite fixada para a entrega das propostas;

- M (índice t), M' (índice t), M'' (índice t),... são os índices dos custos dos materiais mais significativos incorporados ou não, em função do tipo de obra, relativos ao mês a que respeita a revisão, considerando -se como mais significativos os materiais que representem, pelo menos, 1 % do valor total do contrato, com uma aproximação às centésimas;

- M (índice o), M' (índice o), M'' (índice o),... são os mesmos índices, mas relativos ao mês anterior ao da data limite fixada para a entrega das propostas;

- E (índice t) é o índice dos custos dos equipamentos de apoio, em função do tipo de obra, relativo ao mês a que respeita a revisão;

- E (índice o) é o mesmo índice, mas relativo ao mês anterior ao da data-limite fixada para a entrega das propostas;

- a, b, b', b'', (...), c são os coeficientes correspondentes ao peso dos custos de mão -de -obra, dos materiais e dos equipamentos de apoio na estrutura de custos da adjudicação ou da parte correspondente, no caso de existirem várias fórmulas, com uma aproximação às centésimas;

- d é o coeficiente que representa, na estrutura de custos, a parte não revisível da adjudicação, com aproximação às centésimas; o seu valor é 0,10 quando a revisão de preços dos trabalhos seja apenas feita por fórmula.

O Somatório de “a + b + b' + b'' + ... + c + d” deve ser igual à unidade. O monómio “a” pode ser transformado num polinómio com diferentes profissões desde que representem cada uma, mais de 1% do valor contratual, sendo os respetivos S(índice t) e S(índice 0) aplicados a cada uma dessas profissões. Por sua vez, o Despacho n.º 22 637/2004 (2ª série), de 12 de outubro, e o Despacho n.º 1592/2004 (2ª série), de 8 de janeiro consideram fórmulas tipo de revisão de preços com base em diferentes tipologias de obras, definindo assim os coeficientes “a, b, b', b'', ..., c”, que atendem à especificidade de cada. Os despachos definem um total de 23 fórmulas tipo que atendem a diversas tipologias de obras. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de a, b, b', b'', ..., c,

das fórmulas tipo F05 (Reabilitação Ligeira de Edifícios) e F21 (Redes de abastecimento de água e de águas residuais).

Tabela 1 - Coeficientes das fórmulas tipo de revisão de preços F05 e F21.

	a	b*												c	d
		b03	b10	b13	b18	b20	b22	b23	b24	b29	b32	b42	b43		
F05	0.45	0.01	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01		0.22		0.02			0.07	0.10
F21	0.28	0.04			0.01	0.01	0.04		0.01		0.07		0.01	0.25	0.10

No entanto é recomendável que cada obra tenha uma ou várias fórmulas de revisão de preços que atendam o mais possível à realidade da obra a executar, devendo ser alvo de estudo detalhado. A aplicação rege-se pelo plano de pagamentos apresentado pelo empreiteiro aquando da fase de apresentação das propostas, existindo também a consideração de ajustamentos na fórmula em caso de adiantamentos concedidos pelo Dono de Obra ao empreiteiro. No entanto, durante a realização da obra há desvios de prazo e dificilmente se consegue que a obra decorra de acordo com o estipulado no descrito plano. Para tal, é de considerar o disposto no artigo 14º, nomeadamente [17]:

- *“Sempre que se verifique atraso por caso de força maior ou imputável ao dono da obra, o empreiteiro deve submeter à aprovação do dono da obra um novo plano de pagamentos reajustado, que serve de base ao cálculo da revisão de preços dos trabalhos por executar.*

- *Quando se verifique atraso por facto imputável ao empreiteiro, os indicadores económicos a considerar na revisão de preços são os correspondentes ao período em que os trabalhos por ela abrangidos deveriam ter sido executados, exceto quando o C (índice t) resultante desse cálculo for inferior ao que resultaria da aplicação dos indicadores económicos do mês em que os trabalhos foram efetivamente executados, caso em que deve ser considerado o C (índice t) de menor valor.*

- *Quando se verifique avanço no cumprimento do plano de trabalhos e do correspondente plano de pagamentos aprovados, os indicadores económicos a considerar na revisão são os correspondentes ao período em que os trabalhos por ela abrangidos foram efetivamente executados”.*

2.3. O contexto do Regime excecional e temporária de revisão de preços

O regime excecional da revisão de preços está publicado no Decreto-Lei n.º 36/2022, de 20 de maio e pretende adequar o modo de revisão de preços existente no contrato à estrutura de custos real da empreitada, através do desenvolvimento de um mecanismo de revisão que atenda as sucessivas alterações dos preços dos materiais, mão de obra e equipamentos de apoio, nos termos definidos pelo Decreto-Lei 6/2004 de 6 de janeiro. A aplicação deste depende da iniciativa do empreiteiro e atende especialmente para os contratos de empreitadas de obras públicas com revisão de preços obrigatória (artigo 382.º do CCP [16]), podendo ter aplicação noutros regimes [7].

O empreiteiro pode apresentar um pedido de revisão extraordinária de preços desde que um determinado material, tipo de mão de obra ou equipamento de apoio, carecendo de critérios de elegibilidade (n.º 1 do artigo 3º), nomeadamente [7]: *“a) Represente, ou venha a representar durante a execução, pelo menos 3 % do preço contratual; e b) A taxa de variação homóloga do custo seja igual ou superior a 20%”.*

O Dono de Obra tem de se pronunciar no prazo de 20 dias da receção do pedido sobre a forma de revisão de preços proposta, pelo empreiteiro, estando esta aprovada tacitamente caso não o faça nesse prazo, podendo, em alternativa o Dono de Obra propor [7]: *“a) Apresentar, de forma devidamente fundamentada, uma contraproposta; b) Realizar a revisão de preços segundo a forma contratualmente estabelecida, sendo, para os casos de revisão por fórmula, os coeficientes de atualização (Ct) resultantes dos respetivos cálculos multiplicados por um fator de compensação de 1,1; c) Incluir determinados materiais e mão de obra com revisão calculada pelo método de garantia de custos, aplicando -se aos restantes a fórmula constante do contrato, sem qualquer majoração”.* Em caso de divergência ou não acordo sobre a forma de revisão extraordinária em causa, os preços são revistos atendendo à contraproposta do dono da obra, ou,

se esta não existir, com base nas alíneas b) e c) referidas anteriormente. A revisão extraordinária de preços é aplicada a todo o período de execução da obra. Em termos gerais, a substancial subida de preços de um ou diversos materiais, ou eventualmente de mão-de-obra, pode gerar aumento dos índices a, b, b', b''...e de certo modo ao aumento da percentagem (acima de 3%) que estes representam no preço contratual da obra. Esta situação repercute-se na necessária adaptação da fórmula de revisão de preços utilizada para o efeito no Caderno de Encargos da Empreitada, mas não sendo a única possibilidade de aplicação. Assim, perante eventuais prorrogações de prazos, sempre que se verifique atraso no cumprimento do plano de trabalhos, por motivos de não obtenção dos materiais necessários à execução por motivos não imputáveis ao empreiteiro devidamente comprováveis, o dono de obra pode aceitar “no prazo de 20 dias a contar da receção do pedido, sob pena de aceitação tácita, prorrogar o prazo de execução, pelo tempo estritamente necessário, sem qualquer penalização e sem qualquer pagamento adicional ao empreiteiro” [7]. Nestes casos, “o empreiteiro submete à aprovação do dono da obra um novo plano de pagamentos reajustado, que serve de base ao cálculo da revisão de preços dos trabalhos por executar” [7].

3. Metodologia de investigação e aplicação de Caso de Estudo

3.1. Metodologia utilizada e aplicação de estudo de caso

Como metodologia para o estudo, é utilizado um caso real de um edifício, apresentando-se a fórmula de cálculo de Revisão de preços prevista no Caderno de Encargos, bem como o Plano de Pagamentos previstos e o respetivo Plano de Trabalhos submetido pelo empreiteiro. A partir desta informação procede-se à aplicação do cálculo da Revisão de preços para os meses envolvidos, chamada de “Cenário 1”.

Procede-se à análise da fórmula de revisão de preços presente no Caderno de Encargos e procede-se ao longo do estudo à aferição se estas são efetivamente as mais ajustadas para a obra, com base nos preços dos materiais mais significativos aplicados na obra, à data de início do procedimento de concurso, procedendo-se posteriormente ao cálculo de revisão de preços com base nesta fórmula reajustada, proposta pelo empreiteiro, a que se designa “Cenário 2”. Posteriormente aplica-se a revisão extraordinária de preços, através da proposta da nova fórmula justificada para materiais que representem mais de 3% do valor contratual e cuja taxa de variação homologa do custo de materiais que seja superior a 20%, procedendo-se à respetiva aplicação do cálculo de revisão de preços, a que se designa “Cenário 3 - Opção B”. O “cenário 3 - Opção A” é uma possibilidade através da majoração dos coeficientes de atualização mensal, mas pouco ajustada a esta obra. Com o estudo, algumas conclusões e recomendações são de explorar nas conclusões.

A obra objeto de estudo não é considerada abrangida pelo regime de contratos públicos, mas está sujeita às regras de contratação pública, não podendo ser realizadas descrições mais precisas quanto aos seus detalhes, carecendo de anonimato, com autorização para divulgação dos dados apresentados.

Numa breve descrição, o “Edifício” objeto de estudo, envolve a edificação da estrutura de suporte e remate de coberturas de um edifício existente com 5 pisos, procedendo-se previamente ao desmonte da estrutura interior em madeiras de pavimentos, paredes divisórias e coberturas, aproveitando-se as paredes exteriores em alvenaria de pedra.

a) **Cenário 1 - convencional sem aplicação do Regime excecional e temporário de RP**

Para este edifício procedeu-se à entrega das propostas em maio 2021, tendo obra iniciado em julho 2021 (prazo de 10 meses – final de abril 2022), acabando por terminar em junho 2022 (2 meses depois do contratualizado). Esta obra teve como fórmula de Revisão de Preços presente no Caderno de Encargos, uma fórmula que atende à tipologia da obra e dos materiais aplicados (Eq. 2).

$$\begin{aligned}
C(t) = & 0,40 \times \frac{S(t)}{S(o)} + 0,03 \times \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,04 \times \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,02 \times \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,04 \times \frac{M15(t)}{M15(o)} \\
& + 0,04 \times \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,02 \times \frac{M31(t)}{M31(o)} + 0,01 \times \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,04 \times \frac{M41(t)}{M41(o)} \\
& + 0,02 \times \frac{M43(t)}{M43(o)} + 0,11 \times \frac{M45(t)}{M45(o)} + 0,06 \times \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01 \times \frac{M56(t)}{M56(o)} \\
& + 0,01 \times \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,05 \times \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10
\end{aligned} \tag{2}$$

Nota: M3-inertes; M7- telhas cerâmicas; M14- Rede electrossoldada; M15-chapa de aço galvanizada; M20-cimento em saco; M31- Membrana betuminosa; M40- Caixilharia em alumínio termolacado; M41-Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos; M43- Aço para betão armado; M45-Perfilados pesados e ligeiros; M51- Tintas para Construções Metálicas; M56- Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETIC); M57- Isolamentos térmicos e acústicos.

Esta fórmula foi desenvolvida atendendo às quantidades previstas para a obra e considerando os preços unitários associados a essas quantidades de material e consequentemente determinadas as percentagens de custo desses materiais, com base no preço contratualizado para a obra, determinando-se assim os valores de b (excluindo 10% ao preço contratualizado para consideração da parcela “d” de 0,10). Sabe-se que o adjudicatário não propôs, junto com a proposta, o reajustamento da fórmula apresentada, de acordo com a possibilidade descrita no n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 6/2004, nomeadamente [17]: “(...) os concorrentes poderão propor outras em alternativa, devidamente justificadas, ainda que o programa de concurso não admita expressamente propostas condicionadas ou variantes”. A obra foi adjudicada por 741.697,1€, com o seguinte plano de pagamentos proposto pelo empreiteiro em fase de concurso, tabela 2.

Tabela 2 - Valores mensais e acumulados do Plano de Pagamentos contratualizado.

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Plano Pagamentos €	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2
Valor acumulado €	49.767,6	118.492,6	200.402,4	295.736,4	399.494,7	477.980,2	558.314,3	633.648,3	693.415,9	741.697,1

No 4º mês, o empreiteiro solicitou prorrogação de prazo, alegando atrasos na entrega de materiais, situação não considerada pelo Dono de Obra por não se justificar o argumento, apresentando, no entanto, foi apresentado um plano de pagamentos reajustado. Foi concedida a prorrogação de prazo de 2 meses (término em junho 2022), (mas não de forma graciosa, não se aplicando multas contratuais, pelo que não foi atendido o disposto no artigo 13º do Decreto-lei n.º 6/2004 em favor do empreiteiro [16]). Aplicando revisão de preços com base nos índices ponderados de custos de mão-de-obra, materiais e equipamentos de apoio, publicados para os meses de intervenção em obra, nos anos 2021 e 2022. Assim os resultados provenientes do cálculo dos coeficientes de atualização atendendo ao Plano de Pagamentos (artigo 4º do DL 6/2004) para os meses decorrentes do prazo contratual, descrito na Tabela 3. Com o resultado da revisão de preços, a obra tem um custo total de 796.950,23€, cerca de 7,4% acima do valor contratualizado.

Tabela 3 - Montante de Revisão de Preços aplicado ao Plano de Pagamentos contratualizado.

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,040153	1,045096	1,044284	1,051702	1,054817	1,055922	1,083384	1,092116	1,142558	1,193948	-
PP (€)	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
MRP (€)	1.998,3€	3.099,2€	3.627,3€	4.929,0€	5.687,7€	4.389,1€	6.698,6€	6.939,5€	8.520,4€	9.364,1€	55.253,1€

NOTAS: CAM-Coefficiente de Atualização Mensal; PP-Plano de Pagamentos; MRP-Montante de Revisão de Preços

b) Cenário 2 - com aplicação do Regime excecional e temporário de revisão de preços

Nesta obra aplica-se o n.º 1 do artigo 2º do Decreto-lei n.º 36/2022, transcrevendo-se [7]: “O presente Decreto-lei é aplicável aos contratos públicos, em execução ou a celebrar, e aos procedimentos de formação de contratos públicos iniciados ou a iniciar”.

Para aplicação da Revisão extraordinária de Preços, o empreiteiro tem solicitar um pedido de revisão extraordinária de preços, é necessário que exista elegibilidade com base no disposto no n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022, transcrevendo-se [7]: “a) Represente, ou venha a representar durante a execução, pelo menos 3 % do preço contratual; e b) A taxa de variação homóloga do custo seja igual ou superior a 20%”. Aplicando a referida alínea a) do n.º 1 do artigo 3º, conforme acima descrito, é necessário perceber quais os materiais que cumprem o requisito de representarem mais de 3% do valor contratual. O quadro seguinte, apresentado pelo empreiteiro, contempla as quantidades transpostas a partir dos mapas de medições da obra aferidos do preço unitário desse material, e neste caso à data de 30 maio 2022. Assim, os materiais “inertes para betão” (M03), “chapa colaborante” (M15), “cimento em saco” (M20), “pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos” (M41), “aço em varão” (M43), “perfis metálicos” (M45) e “tintas para construções metálicas” (M51), têm representação em percentagem igual ou superior a 3% face ao valor do preço contratualizado (zona sombreado), Tabela 4.

Tabela 4 - Cálculo que cada material de obra representa face ao valor contratual.

	Quantidade	Unidade	Preço unit. (€)	Preço total	% Preço contratual	Código RP
Cobertura (godo)	25	m ²	15	375,0€	0,00	M01
Inertes p/ betão	620	m ³	35	21.700,0€	0,03	M03
Telha	620	m ²	20	12.400,0€	0,02	M07
Beirais	110	ml	40	4.400,0€	0,01	M07
Alvenaria	204	m ²	16	3.264,0€	0,01	M08
Rede electrossoldada	3250,0	m ²	5	16.250,0€	0,02	M14
Chapa colaborante	1476	m ²	25	16.250,0€	0,06	M15
Cimento saco	8680	un	3	26.040,0€	0,04	M20
Impermeabilizações	350	m ²	45	15.750,0€	0,02	M31
Caixilharia alumínio	22	un	400	8.800,0€	0,01	M40
Laje aligeirada	650	m ²	25	16.250,0€	0,02	M41
Aço varão	17620,3	kg	1,2	21.144,3€	0,03	M43
Perfis metálicos	83635,9	kg	1,2	100.363€	0,15	M45
Pinturas	2650	m ²	17,5	46.375€	0,07	M51
Etic	180	m ²	50	9.000,0€	0,01	M56
Isolamento térmico	600	m ²	15	9.000,0€	0,01	M57

O empreiteiro aplicou posteriormente a referida alínea b) do n.º 1 do artigo 3º, onde perante os materiais com percentagem igual ou superior a 3% do preço contratual, procedeu ao cálculo da taxa de variação homóloga de custo atendendo aos meses de decurso da obra, com base no prazo contratual (10 meses com início em julho 2021). Na fórmula da taxa de variação homóloga do custo procedeu ao respetivo cálculo utilizando os índices dos custos dos materiais mais significativos considerando o mês em causa comparativamente com o índice desse mês no ano anterior, de acordo com a expressão seguinte, e aplicando o exemplo de cálculo para o material M3 considerando julho 2021 com julho 2020 respetivamente (eq.º 3).

$$TxVH_{jul2021-jul2020} = \left(\frac{M03_t}{M03_{t-12}} - 1 \right) \times 100; e.g.: TxVH = \left(\frac{M03_{jul2021}}{M03_{jul2020}} - 1 \right) \times 100 = \left(\frac{107,7}{101,7} - 1 \right) \times 100 = 5,9\% \quad (3)$$

A tabela 5 contempla o cálculo das taxas de variação Homóloga de custos de mão-de-obra, materiais (03, 15, 20, 41, 43, 45 e 51), e equipamentos, calculados no período contratual. A análise deste quadro permite concluir que a taxa de variação homóloga de custo para os materiais M43 (Aço para betão armado) e M45 (Perfilados pesados e ligeiros) está sempre acima de 20% para os meses descritos. O material M43 apresentou um pico de taxa homóloga de variação em abril 2022-2021 de 80,41% e no mês transato de 65,31% respetivamente. O material M15 (Chapa de aço galvanizada) está acima de 20% na comparação julho 2021-2022 a abril 2021-2022, tendo esta vindo a descer. Já os materiais M41 (pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos) e M51 (Tintas para Construções Metálicas) apresentam taxa homóloga acima de 20% nos últimos 3 meses, o que é indicador de consecutiva subida de preço. Os restantes materiais descritos, não têm taxa homóloga acima de 20%, mas denota-se por comparação entre os diversos meses, que as mesmas estão a aumentar, o que poderá ser um sinal de a curto prazo poderem estar acima da percentagem dos 20%. Relativamente à taxa de variação

homologa de mão-de-obra e de equipamentos para os meses comparados, apenas a mão-de-obra teve a referida taxa acima de 20% no mês de abril 2022-2021, o que se considera sazonal. Esta situação que aconteceu enquanto valor mais elevado, também para esse mês em quase todos os materiais, conforme já descrito, situação justificada em parte pela reação dos mercados ao conflito entre Rússia e Ucrânia e consequente subida de preços, de inflação em bens e serviços.

Tabela 5 - Cálculo da taxa de variação homologa no prazo contratual dos materiais mais significativo em obra.

	tx Homol julho 2021- 2020	tx Homol agosto 2021- 2020	tx Homol set 2021- 2020	tx Homol out 2021- 2020	tx Homol nov 2021- 2020	tx Homol dez 2021- 2020	tx Homol jan 2022- 2021	tx Homol fev 2022- 2021	tx Homol mar 2022- 2021	tx Homol abril 2022-2021	tx Homol maio 2022-2021
MO	5,87%	6,24%	7,00%	8,78%	8,95%	8,96%	9,33%	14,84%	17,58%	21,29%	16,79%
M03	5,90%	7,00%	6,49%	4,90%	6,17%	7,06%	8,50%	12,17%	10,44%	16,20%	15,82%
M15	44,36%	45,46%	44,56%	43,88%	42,99%	32,58%	22,13%	20,73%	24,40%	21,00%	9,34%
M20	2,34%	2,77%	3,48%	3,52%	4,26%	4,33%	3,44%	1,68%	2,54%	16,84%	17,27%
M41	7,81%	8,28%	11,29%	13,76%	13,39%	12,93%	14,31%	12,40%	19,93%	24,62%	27,91%
M43	59,20%	52,29%	48,61%	53,60%	51,22%	35,19%	28,27%	28,08%	65,31%	80,41%	51,08%
M45	50,48%	54,78%	54,30%	52,68%	53,81%	46,94%	27,59%	25,34%	39,48%	47,65%	32,57%
M51	5,73%	5,88%	5,48%	6,16%	8,72%	7,75%	7,98%	10,38%	25,83%	24,98%	23,79%
Eq	3,44%	3,60%	3,85%	4,18%	4,69%	5,01%	5,33%	5,47%	6,12%	6,59%	7,14%

NOTAS: MO – Mão de Obra; M* - Material * que representa pelo menos 3% do valor contratual; Eq - Equipamentos

Perante este cenário, esta obra está enquadrada na revisão extraordinária de preços, pois cumpre com o disposto do n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022 [7]. Neste sentido, o empreiteiro, no seu pedido de revisão extraordinária de preços, apresentou nova fórmula de revisão de preços, uma vez que a obra ainda estava a decorrer, nomeadamente atendendo às alíneas a) e b) do n.º 2 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022, e com base no prazo estabelecido no artigo 8º do mesmo diploma legal. A justificação tem enquadramento nas alíneas a) e b) do n.º 1 do artigo 3º do DL 36/2022, onde há pelo menos um material que representa mais de 3% do valor da obra e tem taxa de variação homologa de custo superior a 20%. A justificação descrevia ainda que a fórmula presente no Caderno de Encargos não atende de uma forma correta com as percentagens efetivas de materiais perante o atual cenário de subida de preços, apresentando nova fórmula para a revisão de preços reajustada (eq.º4), situação analisada dentro dos 20 dias (n.º 3 do art.3º do Decreto-lei n.º 36/2022).

$$C(t) = 0,36x \frac{S(t)}{S(o)} + 0,03x \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,03x \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,02x \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,06x \frac{M15(t)}{M15(o)} + 0,04x \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,02x \frac{M31(t)}{M31(o)} + 0,01x \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,02x \frac{M41(t)}{M41(o)} + 0,03x \frac{M43(t)}{M43(o)} + 0,15x \frac{M45(t)}{M45(o)} + 0,07x \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01x \frac{M56(t)}{M56(o)} + 0,01x \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,04x \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10 \quad (4)$$

No âmbito de aplicação do “*Regime excecional de revisão de preços*”, o empreiteiro solicitou ainda prorrogação de prazo ao abrigo do n.º 1 do artigo 4º, nomeadamente a “*impossibilidade de o empreiteiro obter materiais necessários para a execução da obra, por motivos que comprovadamente não lhe sejam imputáveis*” [7], facto que já se verificava em obra na entrega de telhões de beiral dadas como esgotadas da marca selecionada. O empreiteiro, apresentou junto com o pedido o novo “*plano de pagamentos reajustado*” (n.º 2 do artigo 4º), que efetivamente foi o plano real de pagamentos. O Dono de Obra na sua análise ao abrigo do n.º 3 do artigo 3 do Decreto-lei n.º 36/2022, não aceitou o pedido de prorrogação de prazo, uma vez que no mês 4 o empreiteiro já estava atrasado sem se provar o fundamento, alegando-se má gestão de obra e que foi dada prorrogação de 2 meses, de forma graciosa, aplicando-se para efeito de revisão de preço o Plano de pagamentos contratualizado e a revisão de preços convencional. Nesta data, o pedido de prorrogação vem com base nesse atraso para poder enquadrar a revisão extraordinária de preço, embora sem fundamento justificável, pois os materiais objeto da justificação no 4º mês eram diferentes do atual pedido de prorrogação, e os materiais enquadráveis no âmbito da revisão foram previstos e aplicados antes da subida descontrolada desses preços, não tendo, portanto, fundamento.

Assim, não foi aplicada a revisão extraordinária de preços, nem outra forma de reposição do equilíbrio financeiro do contrato, mas neste artigo procedeu-se ao cálculo do montante de revisão de preços com base no plano de pagamentos reajustado, considerando ainda a fórmula de revisão de preços reajustada pelo empreiteiro, para efeitos de estudo nesta possível modalidade. Aplicando a nova fórmula de revisão de preços revista, e com base no “*Plano de pagamentos reajustado*”, o montante total a rever seria de 78.147€, tabela 6.

Tabela 6 - Cálculo do Montante de Revisão de Preços Reajustado com base no Plano de Pagamentos Reajustado.

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	Σ
CAM	1,050947	1,057111	1,055713	1,061964	1,065457	1,065936	1,092539	1,100364	1,160417	1,210707	1,203207	1,183045	-
PPR	32.292,00	46.790	58.338	71.692,1	78.158,32	79.545,8	81.757,05	80.665,2	58.945,3	52.814,2	54.455,6	46243,5	741.697,13€
MRPR	1.645,2€	2.672,2€	3.250,2€	4.442,3€	5.116,0€	5.244,9€	7.565,7€	8.095,9€	9.455,8€	11.128,3€	11.065,8€	8.464,6€	78.147€

NOTAS: CAM-Coeficiente de Atualização Mensal; PPR-Plano de Pagamentos Reajustado; MRPR-Montante de Revisão de Preços face ao Plano de Pagamentos Reajustado

No entanto, a título comparativo, caso a revisão de preços pela nova fórmula fosse aplicada ao Plano de pagamentos contratualizado, o valor total a rever seria de 63.653,7€, ou seja 8.400,1€ acima do considerado pela aplicação da fórmula de revisão de preços e plano de pagamentos contratualizados. No entanto, caso o Dono de Obra tivesse considerado a aceitação da proposta do empreiteiro com enquadramento no “*Regime excepcional e temporário*” de revisão de preços, o montante a rever seria 22.893,9€ acima do considerado efetivamente (78.147€-55.253,1€). E ainda, a obra teria um custo total de 819.844,13€, cerca de 10% acima do preço contratualizado.

c) Cenário 3 - outras possibilidades previstas no Regime excepcional e temporário de RP
Perante os cenários apresentados e solucionados para a obra (consideração do cenário 1 em a), importa ainda perceber se, neste caso, o empreiteiro, independentemente da razão dos argumentos apresentados e não aceites pelo Dono de Obra, se ficou prejudicado nesta obra, face à subida descontrolada de preços dos materiais. Ou seja, o Dono de Obra não aceitou a nova fórmula de revisão de preços proposta pelo empreiteiro (eq.º4), nem aceitou a prorrogação de prazo, e conseqüentemente a não aplicação do Plano de Pagamentos Reajustado e da fórmula de revisão de preços reajustada (eq.º4), face a não aceitar os atrasos como inerentes de enquadramento do âmbito do regime citado. No entanto estudam-se seguidamente, para efeitos de comparação, outras soluções, enquadráveis com base no n.º 3 do artigo 3º do Decreto-lei 36/2022, nomeadamente [7]:

“a) *Apresentar, de forma devidamente fundamentada, uma contraproposta;*

b) *Realizar a revisão de preços segundo a forma contratualmente estabelecida, sendo, para os casos de revisão por fórmula, os coeficientes de atualização (Ct) resultantes dos respetivos cálculos multiplicados por um fator de compensação de 1,1;*

c) *Incluir determinados materiais e mão de obra com revisão calculada pelo método de garantia de custos, aplicando -se aos restantes a fórmula constante do contrato, sem qualquer majoração.”*

Seguidamente são analisadas as opções das alíneas b) e c) acima citadas, considerando-se as mais expressivas para o estudo, não se abordando a alínea a), por motivos de ser suficiente aplicar ligeiros reajustes nos índices da fórmula de revisão de preços, o que à partida terá menor impacto que o conteúdo de qualquer uma das outras alíneas objeto do estudo.

Opção A – majoração de Ct com o fator 1,1

Nesta opção é possível aplicar a majoração 1,1 ao Coeficiente de atualização mensal, que de acordo com os cálculos elaborado na tabela 3 e tendo por base o Plano de Pagamentos contratualizado inicialmente, obtendo-se os seguintes resultados, tabela 7.

O valor de cálculo do montante de revisão de preços é de 134.948,1€, utilizando o coeficiente de majoração 1,1, que representaria quase 20% acima do valor contratual. No entanto, esta opção prevista na legislação parece ser algo majorada, o que poderá ter ajustada aplicação em obras muito específicas em que se desconheçam o índice dos custos de materiais aplicados, ou onde existem muitos materiais com taxa de variação homologa muito acima de 20% nos meses

de aplicação, ou em casos significativos de expressiva quantidade de um material com taxa de variação homologa considerável. Não se descarta também a hipótese deste coeficiente de majoração ser suficiente para abranger eventuais subidas de custos não considerados nas fórmulas de revisão de preços, mas existentes nas obras (materiais abaixo de 1%), ou ainda para situações de pressões próprias da gestão de obra. No entanto, em situações normais o resultado do montante de revisão de preços é muito acima do valor expectável para a obra, mesmo em época de inflação.

Tabela 7 - Montante de Revisão de Preços com coeficiente de atualização mensal de 1,1.

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,040153	1,045096	1,044284	1,051702	1,054817	1,055922	1,083384	1,092116	1,142558	1,193948	
CAMx1.1	1,144168	1,149605	1,148712	1,156873	1,160299	1,161514	1,191722	1,201328	1,256814	1,313343	
PP	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
MRP1.1	7.174,9€	10.281,6€	12.181,0€	14.955,3€	16.632,3€	12.676,5€	15401,8€	15.166,9€	15.349,2€	15.128,6€	134.948,1€

NOTAS: CAM-Coeficiente de Atualização Mensal; PP-Plano de Pagamentos; MRP1.1-Montante de Revisão de Preços face a atualização 1.1 ao coeficiente de atualização mensal.

Opção B – aplicar garantia de custos a alguns materiais e FRP aos restantes (regime misto)

Situação de aplicação de Revisão de preços por fórmula para a generalidade dos materiais/mão-de-obra-equipamentos e garantia de custos para aqueles que se tenha demonstrado terem sido afetados. Assim para a aplicação desta opção de cálculo importa saber que materiais se vão aplicar para cálculo da garantia de custos, onde através da tabela 5 (cálculo da taxa de variação homologa), decide-se pelos materiais que têm maior impacto nesta variável, considerando-se os materiais b15, b43 e b45 (valores acima de 20% em todos os meses analisados, com exceção de b15 que não atinge 20% no último mês). Posteriormente foi necessário retirar do cronograma de trabalhos de cada mês, a quantidade de trabalhos afetos a b15, b43 e b45 respetivamente, e aplicar a esses materiais os preços unitários desses materiais, com base no custo unitário dos mesmos no mês anterior ao da entrega da proposta (abril 2021), de modo a perceber o montante monetário a retirar em cada mês ao plano de pagamentos contratualizado (tabela 8).

Tabela 8 - Quantidade de materiais significativos e respetivo custo a retirar ao plano de pagamentos inicial

Mat.	un	set/21			out/21			nov/21			dez/21			jan/22			fev/22			
		Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	
b15	m2							492	20	9.840	492	20	9.840	492	20	9.840				
b43	kg	9.799,1	1	9.799,1	1.708,00	1,00	1.708	1.754,2	1	1.754,2	1.754,2	1	1.754,2	1.754,2	1	1.754,2	850,6	1	850,6	
b45	kg				46367	0,9	41.730	10.731	0,9	9.658	10.731	0,9	9.658	10.731	0,9	9.658	5.076	0,9	4.568,4	
Totais				9.799,1			43.438			21.252			21.252			21.252			5.419	122.412,6

Posteriormente a fórmula de RP do contrato terá de ser ajustada, retirando os materiais b15, b43 e b45, e redistribuindo de modo proporcional a soma das suas percentagens em b pelos restantes fatores da fórmula (mão-de-obra, materiais e equipamentos), ficando a fórmula reajustada (eq.º5).

$$C(t) = 0,49x \frac{S(t)}{S(o)} + 0,04x \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,05x \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,03x \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,05x \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,03x \frac{M31(t)}{M31(o)} + 0,01x \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,05x \frac{M41(t)}{M41(o)} + 0,07x \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01x \frac{M56(t)}{M56(o)} + 0,01x \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,06x \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10 \quad (5)$$

Aplicando a nova fórmula de revisão de preços descontando ao Plano de Pagamentos o valor das quantidades de materiais retirados na fórmula de revisão de preços (tabela 8), resultando num Plano de Pagamentos Corrigido com respetivos Montante de Revisão de Preços ajustados, tabela 9.

Seguidamente procedendo-se ao cálculo por garantia de custos, atendendo à situação de preços reais para os materiais b15, b43 e b45, com preços reais aos meses de aplicação, aplicando-se as quantidades expressas na tabela 8, mas com os preços unitários reais, obtendo-se tabela 10.

Tabela 9 - Cálculo montante de revisão de preços com fórmula reajustada (sem materiais significativos).

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,014152	1,015640	1,015549	1,025171	1,028460	1,030412	1,057905	1,067333	1,097051	1,145238	
PPI	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
TR	-	-	9.799,1	43.438	21.252	21.252	21.252	5.419	-	-	122.412,6
PPC	49.767,6€	68.725,0€	72.110,7€	51.896,0€	82.506,3€	57.233,5€	59.082,0€	69.915,0€	59.767,6€	48.281,2€	619.285,0€
MRP	704,3€	1.074,9€	1.121,2€	1.306,3€	2.348,2€	1.740,6€	3.421,1€	4.707,6€	5.800,5€	7.012,3€	29.236,9€

NOTA: CAM – Coeficiente de Atualização Mensal; PPI – Plano de Pagamentos Inicial; TR – Trabalhos a Retirar; PPC – Plano de Pagamentos Corrigido; MRP – Montante de Revisão de Preços

Tabela 10 - Quantidade de materiais significativos e custos reais no mês de cálculo enquanto garantia de custo

Mat.	un	set/21			out/21			nov/21			dez/21			jan/22			fev/22			
		Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	
b15	m2							492	25	12.300	492	25	.	492	24,5	12.054				
b43	kg	9.799,1	1,1	10.779	1.708,00	1,15	1.964,2	1.754,2	1,15	2.017,3	1.754,2	1,15	20.17,3	1.754,2	1,25	2.192,8	850,6	1,25	1.063,3	
b45	kg				46.367	1,10	51.003	10.731	1,1	11.804	.	1,10	11.804	10.731	1,2	12.877	5076	1,2	6.091,2	
Totais				10.779			52.967			26.122			26.122			27.124			7.154,5	150.268,1

Nota: Preços fornecidos por empresas, a preços de venda convencionais com alguma margem de desconto comercial

Ora obtendo-se a diferença entre resultado calculado com preços unitários reais (tabela 10) com o calculado com preços unitários à data de apresentação da proposta (abril 2021 – tabela 8), obtém-se o excedente de custo com estes materiais e que simbolizam o equivalente à margem de inflação dos mesmos (atualização de preços dos materiais por garantia de custos), obtendo-se 27.855,5€ (150.268,1€-122.412,6€). Calculando este resultado com o resultado da revisão de preços descrito na tabela 9 (29.236,9€), obtém-se o montante de 57.092,4€, valor que seria a compensação ao empreiteiro realizando a situação mista de fórmula de revisão de preços, conforme descrito, considerando assim o impacto da variação de preço desses materiais.

d) Resumo e comparações entre os diferentes cenários estudados

Após realização dos cálculos com as diferentes possibilidades, discutem-se resultados, tabela 11.

Tabela 11 - Quadro resumo com os cenários estudados.

Cenário	Descrição	MRP
1	Cálculo normal sem aplicação do regime excepcional e temporário de RP.	55.253,1€
2	Aplicação do regime excepcional de RP, envolvendo Plano de pagamentos Reajustado (3 materiais com mais de 3% do valor contratual e taxa de variação homologa acima de 20%.	78.147€
3-Opção A	Aplicação da majoração 1,1 ao Coeficiente de Atualização Mensal	134.948,1€
3-Opção B	Fórmula RP reajustada e Aplicação de garantia de custos aos materiais mais significativos	57.092,4€

De modo geral, o cenário 3-Opção B (57.092,4€) é aquele que à partida se assemelha mais à situação real da inflação dos materiais mais significativos para a obra, pois contempla cálculo dos materiais significativo com base em garantia de custos (custos reais) da quantidade utilizadas e nos meses de aplicação, e por outro lado fórmula de revisão de preços reajustada sem considerar esses materiais significativos. Ora este resultado não difere muito da situação de preços normal ou convencional (55.253,1€ - Cenário 1). A situação de majoração dos coeficientes de atualização mensal em 1,1 parecem desproporcionais aos valores reais desta obra, mas se tendo justificado a perspectiva dos autores. O cenário B, apresentado pelo empreiteiro e não aceite pelo Dono de Obra, por motivos descritos, contempla uma situação real da obra, mas que diverge do Plano de pagamentos inicial, o que é frequente, mas indesejável na gestão de obra, resultando em prejuízos.

4. Principais conclusões

Este artigo permite analisar o disposto no Decreto-lei n.º 36/2022 [7], e com base numa obra real com materiais expressivos que foram objeto de subida descontrolada de preço. Problema é

levantado muito vezes pelas fórmulas de revisão de preços gerem genéricas e desajustadas à tipologia de obra, mas podendo ser alvo de reajuste em fase de concurso. Estas fórmulas contemplam como que uma média de aplicação todos os meses, podendo em alguns meses de aplicação até existirem prejuízos com alguns materiais, mas noutros meses há vantagens económicas com esses mesmos materiais, mesmo não sendo aplicados nesses meses.

Este artigo vem provar a necessidade de se cumprir, ou pelo menos o mais possível, o Plano de Pagamentos contratualizado, atendendo à tipologia dos trabalhos descritos. Atrasos podem trazer consideráveis prejuízos para o empreiteiro caso as prorrogações de prazos não serem aceites, mesmo que justificadas, podem resultar de problemas de gestão e não do frequente projeto. Assim, o “cenário 2” vai no sentido da ótica do empreiteiro e de alguma majoração à situação real da obra (montante de 78.147€), cuja gestão tem de se ajustar ao que se propõe fazer em fase de concurso.

Considerando o “cenário 3 - Opção A” e conforme já referido, considera a majoração de 1,1 aos coeficientes de atualização mensal é 1,1, sendo desproporcional para esta obra, mas possível e aplicável em obras com especificidades muito próprias, mas ficando a ressalva na sua utilização.

O “cenário 3 - Opção B” demonstra ser o mais realista, baseando-se no cálculo por garantia de custos com os materiais mais significativos e com base nos custos unitários reais nos meses de aplicação (acréscimo de 27.855,5€ face ao preço contratual desses materiais), e aplicação de fórmula de revisão de preços reajustada aos restantes materiais (montante de 29.236,9€). O total de compensação ao empreiteiro segundo este cenário é de 57.092,4€, que se compararmos com o “cenário 1”, dito convencional e sem aplicação do “Regime excepcional e temporário” de Revisão de Preços, o resultado é de 55.253,1€, o que perfaz diferença de apenas 3% entre estes cenários (1839,3€), e que no preço contratual da obra cerca de 0,24% apenas, o que é pouco expressivo neste caso. Considera-se importante a revisão de preços enquanto mecanismo dito “extraordinário”, aplicando o Regime publicado [7], mas cuja análise carece de devida ponderação para não existir desperdício económico baseado em argumentos que podem ser resultantes de problemas de gestão. No entanto é importante um método de revisão de preços desenvolvido e ajustado à tipologia da obra e com um Plano de Pagamento exequível e realista, carecendo toda a gestão de stocks da obra numa vertente a não descuar, logo desde a fase de concurso, o que em muitos casos não sucede.

Referências

- [1] M. Khudaykulova, H. Yuanqiong, A. Khudaykulov, Economic Consequences and Implications of the Ukraine-Russia War, *Int. J. Manag. Sci. Bus. Adm.*, 8 (2022) 44-52. <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.84.1005>.
- [2] R. Estrada, M. Arturo, How Much Inflation and Unemployment Worldwide Can Generate the Russo-Ukrainian War Crisis?, (2022). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4131388>.
- [3] M. Prichett, P. Griesmyer, D. Mcdonald, V. Venters, L. Dysert. AACE international certified cost technician primer, AACE International Inc., 2011.
- [4] M.A. Musarat, W.S. Alaloul, M.S. Liew, Impact of inflation rate on construction projects budget: A review, *Ain Shams Eng. J.*, 12 (2021) 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.009>.
- [6] E. Orhan, The effects of the Russia-Ukraine war on global trade, *J. Int. Trade Logist. Law.*, 8 (2022) 141-146.
- [5] D. Salerno, ESG Criteria in Alternative Investments. In: *The Evolution of Sustainable Investments and Finance*. Palgrave Macmillan, Cham, 2021.
- [8] Instituto Nacional de Estatística. Estatísticas de Preços da Habitação ao Nível Local – 1º trimestre de 2022; Informação à Comunicação Social, 2022.
- [9] Instituto Nacional de Estatística; Índices de Produção, Emprego e Remunerações na Construção - Junho 2022. Informação à Comunicação Social, 9 agosto 2022.
- [10] Eurostat – Estatísticas Europeias, https://ec.europa.eu/info/departments/eurostat-european-statistics_pt, 2022 (acesso em 5 de setembro de 2022).
- [7] Decreto-lei n.º 36/2022 de 20 de maio, DR n.º 98 – série I. Presidência do Conselho de

Ministros. Lisboa.

- [11] Decreto-lei 6/2004 de 6 de janeiro, DR n.º 4 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Habitação. Lisboa.
- [12] Lei 1578 de 10 abril 1924, Diário do Governo n.º 79- série I. Min. do Comércio e Comunicações. Lisboa.
- [13] Decreto-Lei n.º 47945 de 16 de setembro, Diário do Governo n.º 217-série I. Min. das Obras Públicas. Lisboa.
- [14] Decreto-lei n.º 273-B/75, de 3 de junho, DR n.º 127- Série I. Min. do Equip. Social e do Ambiente. Lisboa.
- [15] Decreto-lei n.º 99/88, de 23 de março, DR n.º 69 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- [16] Decreto-lei 18/2008 de 29 de janeiro, DR n.º 20 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- [17] Decreto-Lei n.º 73/2021 de 18 de agosto, DR n.º 160 – série I. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.

ORCID

Rui Alexandre Figueiredo de Oliveira	0000-0003-4444-2591 (https://orcid.org/0000-0003-4444-2591)
Maria Isabel Lopes Marcelino Dias de Abreu	0000-0003-1817-9363 (https://orcid.org/0000-0003-1817-9363)
Jorge Pedro Lopes	0000-0002-4799-0166 (https://orcid.org/0000-0002-4799-0166)

Analise Dinâmica do Desempenho Energético de um Envidraçado Termocrómico em Diferentes Zonas Climáticas de Portugal

Dynamic Simulation of the Energy Performance of a Thermochromic Glazing Under Different Climate Zones of Portugal

H. Teixeira^{a†}, M. Glória Gomes^a, A. Moret Rodrigues^a, D. Aelenei^b

^a Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, DECivil, CERIS, Lisboa, Portugal

^b NOVA School of Science and Technology, UNINOVA-CTS and LASI, Caparica, Portugal

[†] Autor para correspondência: henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Fachadas de edifícios com grandes áreas envidraçadas tendem a promover trocas térmicas significativas que resultam em necessidades energéticas para climatização elevadas. Os envidraçados termocrómicos podem alterar de forma autónoma e reversível as suas propriedades térmicas e óticas dependendo da sua temperatura, promovendo a mitigação de ganhos térmicos e a melhoria de condições de conforto interior e eficiência energética. Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico instalado num gabinete orientado a sudeste. Para esse fim, foi utilizado um modelo de simulação dinâmica, anteriormente calibrado com dados experimentais, para avaliar o desempenho energético anual do vidro termocrómico comparativamente ao de um envidraçado convencional incolor com e sem uma película refletora de controlo solar. As necessidades energéticas (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético (aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial) foram obtidos para as diferentes soluções de envidraçados nas cidades de Bragança, Lisboa e Faro, representativas de diferentes zonas climáticas de Portugal. Com o envidraçado termocrómico obteve-se uma redução significativa, até 65%, das necessidades energéticas para arrefecimento. Apesar do comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico e da diminuição das condições de iluminação natural do gabinete, foi possível obter uma redução do consumo anual energético total até 50%.

ABSTRACT

Highly glazed facades are usually responsible for significant heat exchanges that increase climatization energy needs. Thermochromic glazing, an innovative glazing solution, can autonomously and reversibly alter its properties depending on the temperature of the thermochromic layer laminated between the external glass panes, promoting the reduction of thermal gains and the increase of indoor comfort and energy efficiency. This study aims at assessing the energy performance of a thermochromic glazing against a conventional static glazing with and without a reflective solar control film, considering an individual office room oriented southeast as case study. A dynamic simulation, previously calibrated with experimental data, was used to compute the monthly and yearly energy needs (heating and cooling) and energy use (climatization and artificial lighting) with the different glazing solutions installed in the cities of Braganza, Lisbon and Faro, representative of different climate zones of Portugal. A reduction up to 65% of the cooling energy needs was obtained with the thermochromic glazing. The dynamic behaviour of the thermochromic glazing reduced indoor daylight levels,

Palavras-chave:

Envidraçado termocrómico;
Desempenho energético;
Simulação dinâmica

Keywords:

Thermochromic glazing; Energy performance;
Dynamic simulation

consequently increasing artificial lighting energy use. However, it was possible to achieve a reduction up to 50% of the total energy use (climatization and artificial lighting) with the dynamic glazing.

1. Introdução

Por motivos de estética e/ou de otimização de utilização de iluminação natural, as fachadas de edifícios com elevada área envidraçada têm-se tornado um elemento usual em edifícios novos nos últimos anos, particularmente em edifícios de comércio e serviços [1]. Os elementos envidraçados, comparativamente aos elementos opacos, são responsáveis por trocas de calor expressivas entre os ambientes interior e exterior devido à sua transmitância elevada, originando necessidades energéticas para climatização significativas [2].

A utilização, isolada ou simultânea, de diferentes soluções de controlo solar, tais como estores, portadas, palas e películas para vidros, melhora o desempenho dos envidraçados. As películas de controlo solar, compostas por múltiplas camadas de poliéster e adesivos com absorção de radiação ultravioleta, possibilitam o melhoramento do desempenho do vidro ao alterarem as propriedades óticas e térmicas do sistema vidro+película [3], [4]. Apesar destas películas estarem presente no mercado com uma grande variedade de propriedades e de tipos de instalação, estas têm como limitação o facto de apresentarem um comportamento estático que não lhes confere a possibilidade de se adaptarem às condições do ambiente onde se encontram.

Assim, tecnologias inovadoras têm vindo a surgir e a ser investigadas pela comunidade científica com o objetivo de melhorar o desempenho dos envidraçados sob diferentes condições ambientais e de contrabalançar diferentes requisitos de desempenho numa solução de envidraçado singular [5].

Os envidraçados termocrómicos [6], enquanto solução inovadora de envidraçados dinâmicos passivos, reagem a um estímulo térmico e alteram autonomamente as suas propriedades térmicas e óticas devido à presença de um material termocrómico (TC) laminado. A alteração das propriedades ocorre quando o material TC atinge temperaturas superiores ou inferiores a valores de transição específicos do material em questão, provocando uma reação química que de forma reversível aumenta ou diminui o escurecimento do vidro, respetivamente. O comportamento dinâmico desta solução de envidraçados permite regular os ganhos solares e de iluminação natural de forma autónoma, adaptando as propriedades do envidraçado às condições ambientais. No entanto, este tipo de envidraçado tem uma desvantagem: pode não atingir a temperatura necessária à transição cromática e, assim, não ser ativado o comportamento dinâmico, isto é, não transitar para o estado escurecido.

Estudos anteriores [7-15] que avaliam numericamente o desempenho energético de envidraçados termocrómicos concluem que este tipo de envidraçado promove a redução do consumo e pico energéticos comparativamente a um envidraçado incolor convencional. Esta redução é mais notória considerando climas quentes com níveis de radiação solar elevados, como é o caso do clima de Portugal. A maioria dos estudos anteriores [8-12] analisa envidraçados termocrómicos teóricos ou em fase de protótipo, avaliando o seu desempenho energético através de modelos numéricos de edifícios tipo. O presente estudo pretende complementar a investigação existente ao analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico disponível no mercado através da simulação da sua instalação num gabinete sob diferentes zonas climáticas de Portugal.

2. Métodos

A metodologia adotada no presente estudo encontra-se esquematizada na Figura 1. Um gabinete individual, localizado em Lisboa, foi utilizado como caso de estudo para a avaliação numérica do desempenho energético de um envidraçado duplo TC comparativamente a duas soluções de envidraçados estáticos (envidraçado incolor com e sem película refletora de controlo solar).

As propriedades térmicas e óticas dos envidraçados foram determinadas com recurso aos programas Optics [16] e Window [17]. Em paralelo, foi também desenvolvido um modelo de simulação energética do gabinete em EnergyPlus, anteriormente calibrado com dados experimentais [18], para estimar as necessidades energéticas anuais (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético anual (climatização e iluminação artificial), em kWh/m² (m² de área de pavimento), do gabinete na presença das várias soluções de envidraçados. Foram considerados os ficheiros climáticos representativos de diferentes zonas climáticas de Portugal (zona I3 e V2 – Bragança; zona I1 e V2 – Lisboa; zona I1 e V3 – Faro) para avaliar a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico.

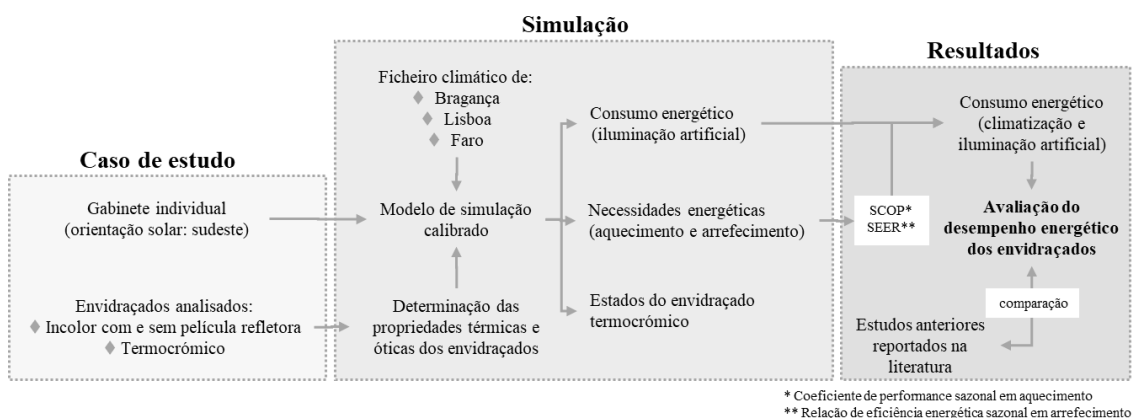


Figura 1 –Metodologia adotada no presente estudo.

2.1. Caso de estudo

O gabinete do caso de estudo situa-se no último piso de um edifício universitário do Instituto Superior Técnico (Figura 2), Lisboa, e apresenta uma área de pavimento de, aproximadamente, 19m² e uma área de envidraçado orientada a sudeste de, aproximadamente, 10,38m² (rácio de envidraçado de 81%). Estores venezianos de lâminas metálicas horizontais instalados no interior do gabinete atuam como dispositivos de sombreamento. A climatização do gabinete é realizada por um sistema de ar-condicionado (relação de eficiência energética sazonal em arrefecimento: 7.98; coeficiente de performance sazonal em aquecimento: 4.43) controlado pelo ocupante e com um intervalo de temperatura pré-definido ($22 \pm 2^\circ\text{C}$). O gabinete é iluminado artificialmente por um candeeiro de teto (110 W).



Figura 2 –Identificação do gabinete (contorno a cinzento) utilizado como caso de estudo.

As soluções de envidraçados analisadas no presente estudo encontram-se representadas na Figura 3. Os envidraçados estáticos são formados por dois panos de vidro incolor, sem e com uma película de controlo solar refletora, separados por uma câmara de ar (6+12+4 mm). O envidraçado dinâmico, correspondente ao envidraçado termocrómico, é constituído por um vidro TC laminado

e um vidro de baixa emissividade, separados por uma câmara de ar (12+12+6 mm). O envidraçado TC apresenta um comportamento dinâmico entre 5°C (estado transparente) e 95°C (estado escurecido).

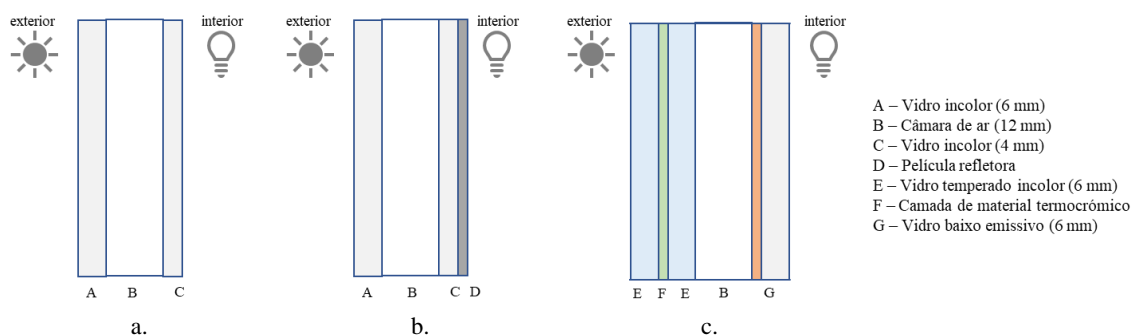


Figura 3 – Configuração dos envidraçados analisados no presente estudo: a. Envidraçado incolor; b. Envidraçado incolor com película refletora; c. Envidraçado termocrômico.

Os valores das principais propriedades térmicas e óticas das soluções de envidraçados analisadas no presente estudo mostram-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** O envidraçado termocrômico apresenta valores do coeficiente de transmissão térmica, do fator solar e da transmitância solar inferiores aos dos envidraçados incolores com e sem proteção solar, sendo, por isso, expectável uma redução dos ganhos solares excessivos. No entanto, esta redução pode traduzir-se numa penalização do conforto térmico durante os meses mais frios, em que os ganhos solares são benéficos na atenuação das necessidades de climatização para aquecimento. Contrariamente ao envidraçado incolor com película, que pode penalizar a iluminação natural do gabinete devido à sua transmitância visível reduzida, o envidraçado termocrômico apresenta um intervalo de valores desta propriedade (1% a 49%), tornando-se assim mais versátil. Refira-se ainda que o envidraçado incolor com película de controlo solar e o envidraçado TC bloqueiam 99% da radiação ultravioleta, beneficiando a saúde dos ocupantes e a durabilidade dos materiais no gabinete.

Tabela 1 – Principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados analisados no presente estudo obtidas a partir do Optics [16] e do Window [17]: coeficiente de transmissão térmica, U; fator solar, g; transmitância solar, τ_{sol} ; transmitância visível, τ_{vis} ; transmitância ultravioleta, τ_{UV} .

Envidraçado	Estado	Temperatura de transição [°C]	U [W/(m ² .K)]	g [-]	τ_{sol} [%]	τ_{vis} [%]	τ_{UV} [%]
Incolor			2.7	0.75	70	81	51
Incolor com película refletora			2.6	0.39	17	27	1
Termocrômico			1.6				1
	Transparente	5		0.32	19	49	
	Intermédio 1	15		0.31	18	47	
	Intermédio 2	25		0.29	17	43	
	Intermédio 3	45		0.21	10	23	
	Intermédio 4	65		0.13	3	6	
	Intermédio 5	85		0.10	1	1	
	Escurecido	95		0.10	1	1	

2.2. Simulação dinâmica

Para aferir o desempenho energético de diferentes soluções de envidraçados, foi desenvolvido um modelo de simulação do gabinete do caso de estudo, calibrado com dados experimentais [18], recorrendo aos programas SketchUp, OpenStudio e EnergyPlus. Todas as superfícies do gabinete foram consideradas adiabáticas com exceção da parede exterior ($U = 2.6 \text{ W/m}^2.\text{K}$) e da cobertura

($U = 0.77 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Os estores venezianos não foram considerados na simulação para se isolar o impacto das soluções de envidraçados do impacto do sistema de sombreamento no desempenho energético. O controlo da iluminação artificial na simulação foi realizado através da opção “continuous off”, que permitiu obter as necessidades de iluminação para alcançar as condições de conforto (500 lx na secretária). O sistema de ar condicionado foi considerado como estando em funcionamento durante o horário laboral com um intervalo de temperatura de conforto entre 20 °C e 24 °C. As seguintes variáveis foram selecionadas como output da simulação: estados do envidraçado termocrómico; necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento; consumo energético de iluminação artificial.

Considerou-se o ficheiro climático de três cidades portuguesas (Bragança, Lisboa e Faro) com o objetivo de melhor se compreender a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico. As três cidades selecionadas são representativas de zonas climáticas de Portugal (zona I3 e V2 – Bragança; zona I1 e V2 – Lisboa; zona I1 e V3 – Faro). A temperatura mensal média exterior e a radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul das diferentes cidades mostram-se na Figura 4. A temperatura mensal média exterior das cidades de Lisboa e Faro é semelhante, sendo significativamente superior à da cidade de Bragança nos meses mais frios e de meia-estação. A radiação solar acumulada é superior na cidade de Faro, particularmente durante os meses mais frios.

A Figura 5 apresenta a simulação anual da transmitância visível, em %, representativa do comportamento dinâmico do envidraçado TC para as três zonas climáticas. No período da manhã o envidraçado fica mais escurecido devido ao aumento da temperatura causado pela radiação solar incidente, nunca atingindo o estado totalmente escurecido. Durante o horário laboral, o envidraçado encontra-se normalmente nos estados intermédios de escurecimento 1 a 3. O envidraçado termocrómico encontra-se no estado intermédio 3, correspondente a uma temperatura do material termocrómico entre 25°C e 45°C, durante 33% das horas laborais simulando a sua instalação sob o clima mais fresco da cidade de Bragança. Em contrapartida, o envidraçado dinâmico encontra-se no seu estado transparente durante 43% das horas laborais quando simulado sob o clima quente da cidade de Faro.

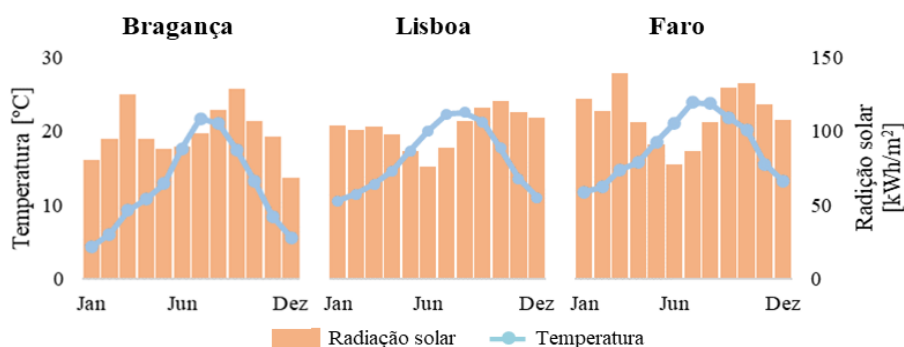


Figura 4 – Temperatura mensal média exterior, em °C, e radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul, em kWh/m², das diferentes cidades.

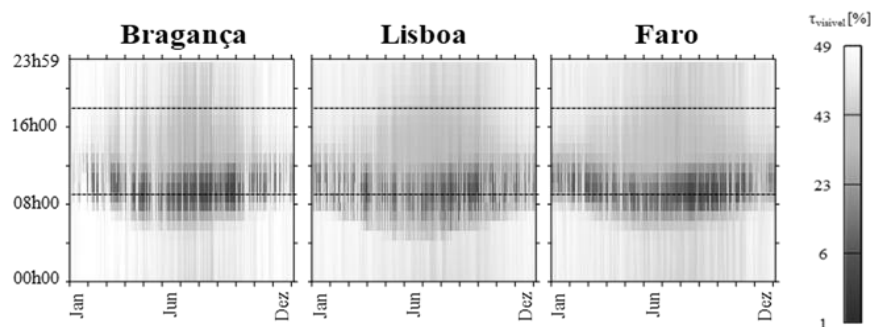


Figura 5 – Comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico no modelo de simulação ao longo do ano para as diferentes zonas climáticas (linhas a picotado – delimitação do horário

laboral).

3. Resultados do desempenho energético do envidraçado termocrómico

As necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete foram estimadas pelo modelo de simulação considerando um sistema de ar condicionado ideal.

A Figura 6 apresenta as necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete, em kWh/m² de pavimento, na presença dos vários envidraçados e considerando as diferentes zonas climáticas.

Para cada zona, as necessidades energéticas para aquecimento são inferiores na presença do envidraçado incolor sem película devido ao seu fator solar elevado. Para as cidades de Lisboa e Faro, todos os envidraçados são responsáveis por ganhos solares excessivos todo o ano, que se traduzem em necessidades energéticas para arrefecimento elevadas e necessidades para aquecimento nulas. Apesar do envidraçado dinâmico ter permitido reduzir de modo geral as necessidades energéticas ao longo do ano, considerando as diferentes zonas, a sua transmitância solar e fator solar reduzidos originaram um ligeiro aumento das necessidades para aquecimento nos meses mais frios na cidade de Bragança. As necessidades energéticas para climatização durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro são nulas considerando a instalação do envidraçado TC nas cidades de Lisboa e Faro.

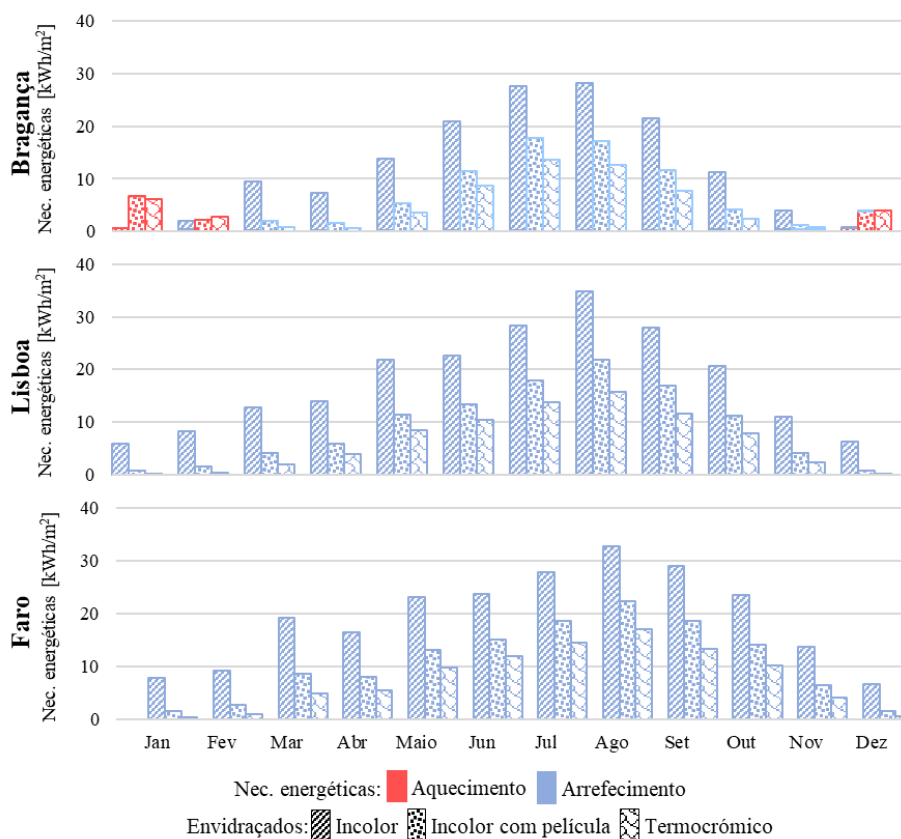


Figura 6 – Necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

A Figura 7 apresenta as necessidades energéticas anuais, em kWh/m² de pavimento, para os vários envidraçados considerando as diferentes zonas climáticas.

Apesar de originarem um aumento das necessidades para aquecimento, já referido anteriormente, os envidraçados com proteção solar permitiram reduzir as necessidades para arrefecimento em todas as zonas climáticas, particularmente o envidraçado TC. Uma redução significativa das necessidades energéticas anuais para arrefecimento foi obtida com o envidraçado

termocrómico em todas as cidades (Bragança – 65%; Lisboa – 64%, Faro – 60%), comparando com o envidraçado incolor sem película.

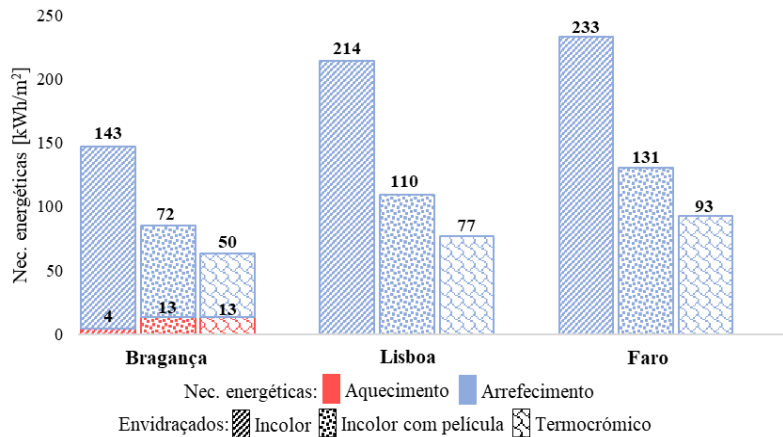


Figura 7 – Necessidades energéticas anuais para aquecimento e arrefecimento, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

O consumo energético para climatização foi estimado a partir das necessidades energéticas apresentadas anteriormente e da eficiência do sistema de ar condicionado do gabinete. O consumo energético para iluminação artificial foi estimado pelo modelo de simulação considerando um ponto de referência no centro da secretária e um valor mínimo de iluminância durante o horário laboral de 500 lx.

A Figura 8 apresenta o consumo energético mensal para aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial do gabinete, em kWh/m² de pavimento, estimado na presença dos vários envidraçados instalados nas diferentes zonas climáticas.

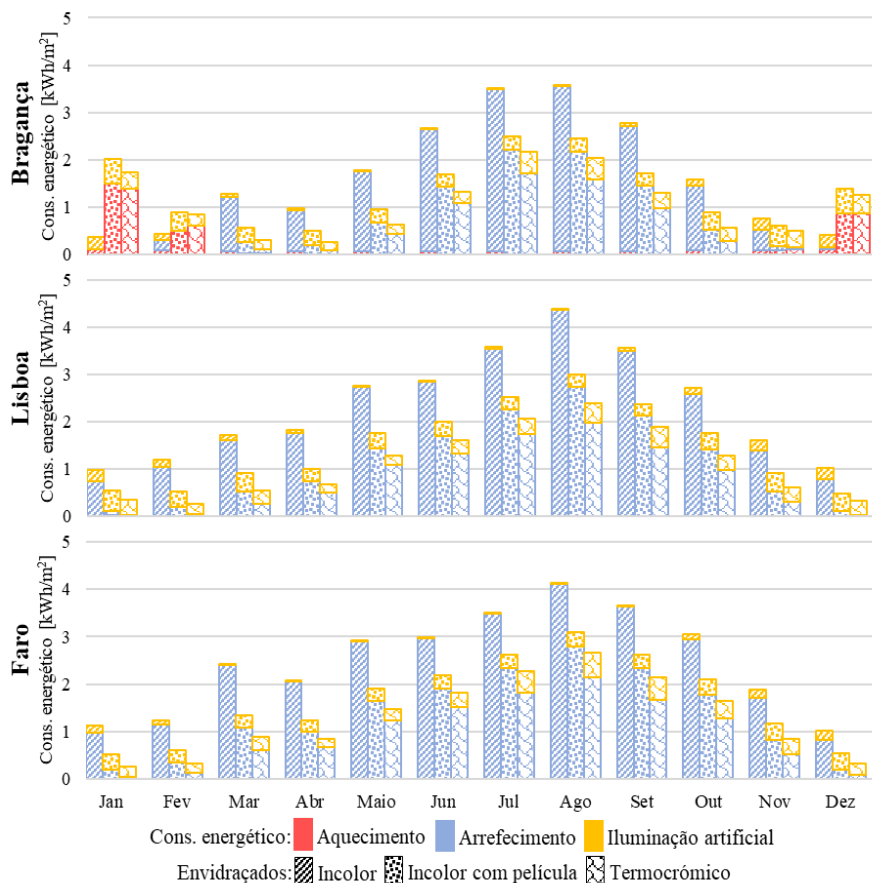


Figura 8 – Consumo energético mensal para climatização e iluminação artificial, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

O comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir o consumo energético para arrefecimento ao longo do ano, nas várias zonas climáticas. Devido à sua elevada transmitância, o envidraçado incolor possibilitou a iluminação natural do gabinete nas três cidades, sem ser necessário recorrer-se à iluminação artificial nos meses com níveis de radiação mais elevados (abril a agosto). Por outro lado, os envidraçados com proteção solar originaram um aumento do consumo de iluminação artificial, maioritariamente nos meses com níveis de radiação mais elevados.

A Figura 9 apresenta o consumo energético anual, em kWh/m² de pavimento, estimado para os vários envidraçados considerando as diferentes zonas climáticas.

Para as várias zonas climáticas, o consumo energético anual para iluminação artificial é inferior ao consumo energético para climatização na presença de qualquer um dos envidraçados. Apesar da radiação incidente variar entre cidades, o consumo energético anual de iluminação artificial é semelhante para um determinado envidraçado sob os diferentes climas. O envidraçado dinâmico originou uma redução do consumo energético total (climatização e iluminação) de 35%, 50% e 47% quando simulado sob os climas de Bragança, Lisboa e Faro, respetivamente, comparando com o envidraçado incolor sem película.

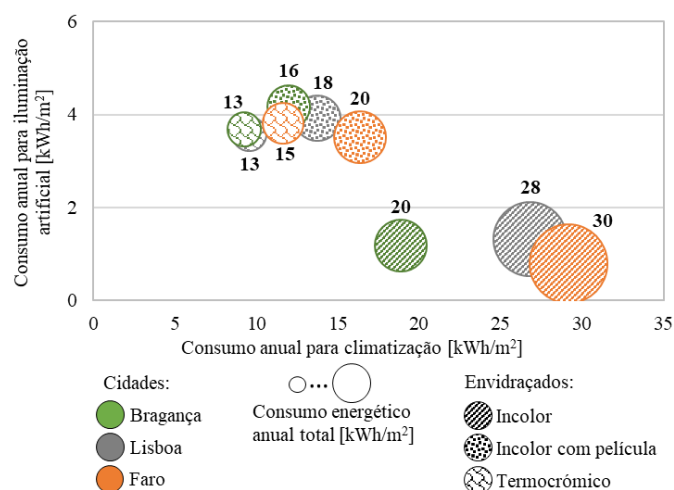


Figura 9 – Consumo energético anual para climatização e iluminação artificial, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

4. Discussão

O presente estudo complementa a investigação existente ao avaliar o desempenho energético de um envidraçado termocrômico (TC) existente no mercado através de uma simulação dinâmica representativa de um caso de estudo real e calibrada anteriormente com dados experimentais. A análise do desempenho do envidraçado TC considerando diferentes zonas climáticas de Portugal é importante para se compreender o impacto do clima no comportamento dinâmico.

A redução das necessidades energéticas para arrefecimento, particularmente para o clima quente da cidade de Lisboa, foi possível graças à redução dos ganhos solares pelo comportamento dinâmico do envidraçado termocrômico. Contrariamente ao esperado, apesar do clima da cidade de Faro apresentar níveis de temperatura e radiação superiores, a instalação do envidraçado TC nesta zona resultou nas poupanças energéticas para arrefecimento mais baixas.

Ainda que ambos os envidraçados com proteção solar tenham promovido o aumento do consumo energético para iluminação artificial, foi possível alcançar poupanças energéticas totais (climatização e iluminação artificial) significativas com a instalação destes envidraçados nas três zonas climáticas (entre 35% e 50%).

Os resultados obtidos para o desempenho energético do envidraçado TC vão de encontro

aos de estudos anteriores [7-15], chegando a ultrapassar no caso da instalação no clima de Lisboa. Esta tecnologia inovadora tem potencial de aplicação sob o clima de Portugal e, por isso, deverão ser realizados estudos futuros para melhor compreender o seu desempenho, incluindo a nível económico e ambiental.

5. Conclusões

Os resultados obtidos através da simulação dinâmica do desempenho energético do envidraçado termocrómico (TC) instalado num gabinete sob diferentes zonas climáticas de Portugal, possibilitaram retirar as seguintes conclusões:

- o envidraçado TC apresentou um maior escurecimento no período da manhã devido à elevada radiação solar incidente na fachada, nunca atingindo o estado totalmente escurecido;
- o envidraçado TC apresentou um melhor desempenho energético do que os envidraçados incolor com e sem proteção solar, considerando as diferentes zonas climáticas;
- o comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento, mas originou um aumento das necessidades energéticas de aquecimento e do consumo energético de iluminação natural;
- o envidraçado TC permitiu uma redução do consumo energético anual total (climatização e iluminação artificial) de 35%, 50% e 47% quando instalado sob o clima das cidades de Bragança, Lisboa e Faro, respetivamente, demonstrando que é uma solução eficiente para as várias zonas climáticas de Portugal analisadas no presente estudo.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID, Associação do Instituto Superior Técnico para a Investigação e Desenvolvimento e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento da unidade de investigação CERIS (UIDB/04625/2020). Os autores desejam estender o seu agradecimento à empresa IMPERSOL e à European Window Film Association pelo apoio técnico. O primeiro autor deseja expressar o seu agradecimento à FCT pelo financiamento da sua bolsa de doutoramento (PD/BD/150576/2020).

Referências

- [1] R. Romano, L. Aelenei, D. Aelenei, E.S. Mazzucchelli, What is an adaptive façade? Analysis of recent terms and definitions from an international perspective, *J. Facade Des. Eng.*, vol. 6 (2018) 065-076. <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2478>.
- [2] M. Boubekri, N. Boubekri, A Review of the Current State-of-the-Art Smart Glazing and Building Skin Materials Designed to Enhance Daylighting Design and Reduce Energy Consumption in Office Buildings, *The Journal of Macro Trends in Energy and Sustainability*, 4 (2016) 47-58.
- [3] H. Teixeira, M.G. Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Pereira, Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films, *Build. Environ.*, vol. 168 (2020) 106474. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106474>.
- [4] J. Pereira, M.G. Gomes, A.M. Rodrigues, M. Almeida, Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making, *Energy Build.*, 198 (2019) 431-443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003>.
- [5] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 94 (2010) 87-105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>.
- [6] M. Aburas, V. Soebarto, T. Williamson, R. Liang, H. Ebendorff-Heidepriem, Y. Wu, Thermochromic smart window technologies for building application: A review, *Appl. Energy*, 255 (2019) 113522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522>.
- [7] R. Tällberg, B.P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, M. Hamdy, Comparison of the energy saving

- potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 200 (2019) 109828. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041>.
- [8] S. Hoffmann, E.S. Lee, C. Clavero, Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 123 (2014) 65-80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.12.017>.
- [9] G.E. Arnaoutakis, D.A. Katsaprakakis, Energy Performance of Buildings with Thermochromic Windows in Mediterranean Climates, *Energies (Basel)*, 14 (2021) 6977. <https://doi.org/10.3390/en14216977>.
- [10] V. Costanzo, G. Evola, L. Marletta, Thermal and visual performance of real and theoretical thermochromic glazing solutions for office buildings, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 149 (2016) 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.01.008>.
- [11] R. Liang, Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson, Y. Wu, Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China, *Energy Build.*, 176 (2018) 216-231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.009>.
- [12] M. Arnesano, G. Pandarese, M. Martarelli, F. Naspi, K.L. Gurunatha, C. Sol, M. Portnoi, F.V. Ramirez, I.P. Parkin, I. Papakonstantinou, G.M. Revel, Optimization of the thermochromic glazing design for curtain wall buildings based on experimental measurements and dynamic simulation, *Solar Energy*, 216 (2021) 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.013>.
- [13] F. Favoino, L. Giovannini, A. Pellegrino, V. Serra, Building performance of thermochromic glazing, in *Eco-efficient Materials for Reducing Cooling Needs in Buildings and Construction*, Elsevier Ltd., (2021) 401-437. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820791-8.00017-1>.
- [14] E. S. Lee, X. Pang, S. Hoffmann, H. Goudey, A. Thanachareonkit, An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 116 (2013) 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.043>.
- [15] H. Teixeira, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, D. Aelenei, Assessment of the visual, thermal and energy performance of static vs thermochromic double-glazing under different European climates, *Build Environ*, 217 (2022) 109115. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109115>.
- [16] Optics | Windows and Daylighting, <https://windows.lbl.gov/software/optics>, (acesso em 24 fevereiro 2020).
- [17] C. Curcija, S. Vidanovic, R. Hart, J. Jonsson, R. Mitchell, WINDOW Technical Documentation. Lawrence Berkeley Natl. Lab., 2018.
- [18] H. Teixeira, M. da Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Pereira, In-Service Thermal and Luminous Performance Monitoring of a Refurbished Building with Solar Control Films on the Glazing System, *Energies (Basel)*, 14 (2021) 1388. <https://doi.org/10.3390/en14051388>.

ORCID

H. Teixeira	0000-0003-3391-1495	https://orcid.org/0000-0003-3391-1495
M. Glória Gomes	0000-0003-1499-1370	https://orcid.org/0000-0003-1499-1370
A. Moret Rodrigues	0000-0002-6501-9189	https://orcid.org/0000-0002-6501-9189
D. Aelenei	0000-0002-1007-1756	https://orcid.org/0000-0002-1007-1756

Monitorização de estruturas de construção a partir de varões compósitos entrançados (BCRs)

Monitoring of building structures from braided composite reinforcing bars (BCRs)

J. Sousa^a, C. Mota^a, J. Bessa^{a†}, F. Cunha^a, R. Figueiro^{a,b}

^a *Fibrenamics-Universidade do Minho, Guimarães, Portugal*

^b *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Têxtil, Guimarães, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: joabessa@fibrenamics.com*

RESUMO

O presente trabalho surge no âmbito de um estudo em que foram desenvolvidos varões de compósito entrançados (BCRs) piezoresistivos através da incorporação de um filamento de fibra de vidro impregnado com nanotubos de carbono (CNTs). Diferentes concentrações mássicas de CNTs [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] foram dispersas em formulações poliméricas de resina epóxi e ácido polilático (PLA). Estas formulações foram, em seguida, utilizadas para impregnar os filamentos de fibra de vidro com pré-tratamento alcalino. O efeito do pré-tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro dos BCRs foi caracterizado pela técnica de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O desempenho piezoresistivo dos BCRs funcionalizados foi avaliado usando um set-up dedicado para medir, simultaneamente, a resposta de deformação mecânica e variação de resistência elétrica, durante cargas de tração cíclicas. Através dos resultados, verificou-se que o sensor piezoresistivo estrutural obtido apresenta uma sensibilidade adequada para substituir varões de aço de alta densidade e suscetíveis à oxidação nas armaduras de betão, por uma estrutura de monitorização inteligente.

ABSTRACT

The present work arises from a study in which piezoresistive braided composite rods (BCRs) were developed by incorporating a glass fibre filament impregnated with carbon nanotubes (CNTs). Different mass concentrations of CNTs [0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% and 2.5%] were dispersed in epoxy resin and polylactic acid (PLA) polymer formulations. These formulations were then used to impregnate the glass fibre filaments with alkaline pre-treatment. The alkaline pre-treatment effect of the BCRs glass fibre filaments was characterised by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) technique. The piezoresistive performance of the functionalised BCRs was evaluated using a dedicated set-up to, simultaneously, measure the mechanical strain and electrical resistance variation response, during cyclic tensile loads. Through the results, it was found that the obtained structural piezoresistive sensor presents a suitable sensitivity to replace high density and oxidation susceptible steel bars in concrete reinforcement with a smart monitoring structure.

Palavras-chave:

BCRs; CNTs;
Piezoresistividade;
Monitorização.

Keywords:

BCRs; CNTs;
Piezoresistivity;
Monitoring.

1. Introdução

Preocupações com a durabilidade de armaduras de betão em aço relacionadas com elevados níveis de carga e exposição a elementos corrosivos, impulsiona respostas tecnológicas inovadoras que incluem a implementação de varões poliméricos reforçados com fibras, uma nova classe de material não corrosivo, de alta resistência mecânica e composta por materiais leves [1], [2], [3]. Esta é uma tecnologia promissora que pode diminuir o tempo de instalação em obra e, sendo quimicamente inerte, mitiga o fenómeno de corrosão. Os polímeros reforçados com fibra de vidro surgem como a solução mais económica [4]. Em comparação com os metais, os compósitos de fibra de vidro, com composição e orientação adequadas, têm uma resistência semelhante à do aço e são mais rígidos do que o alumínio [5]. Estima-se que até 2020 o mercado de compósitos gerou 90 mil milhões de euros a nível global, com a fibra de vidro a ser utilizada como reforço em 90% da produção de todos os compósitos reforçados com fibras [6].

As aplicações de sensores aumentaram drasticamente de 1980 para os dias atuais, onde foi estudada uma grande e ampla aplicabilidade nas nossas rotinas diárias, devido aos avanços recorrentes neste campo da tecnologia [7]. Um sensor deve satisfazer algumas características essenciais, tais como, ser de pequenas dimensões e multifunções, apresentar baixo custo, alta sensibilidade e fiabilidade. Uma grande área de superfície específica, bem como uma estrutura altamente porosa, são necessárias para uma resposta rápida em função do tempo [8]. Para aplicações de deteção adequadas, os sensores devem replicar o seu comportamento de resposta em função do tempo, para permitir a sua reutilização [9]. Sensores piezoresistivos dependem da variação de pressão externa que se traduz numa modificação da sua resistência eléctrica [10]. Estes materiais têm uma grande variedade de aplicações, desde acelerómetros a sensores de pressão [11].

Os nanomateriais apresentam uma posição importante na produção e fabrico de uma grande variedade de gadgets e materiais funcionais devido às suas características físicas e químicas que incluem também elevada resistência mecânica, propriedades estruturais e maior relação área superficial-volume [12]. As nanopartículas de carbono, têm sido amplamente exploradas para objetivos distintos de aplicação, a condutividade eléctrica dos materiais poliméricos pode ser potenciada através da incorporação de partículas condutoras, como estruturas de carbono [13]. Os nanotubos de carbono (CNTs) são moléculas cilíndricas que consistem em átomos de carbono especialmente organizados, que resultam numa rede hexagonal de átomos híbridos [14]. As aplicações de CNTs em nanotecnologia incluem principalmente funções de sensorização, que podem monitorizar alterações devido a flutuações na frequência de vibração dos CNTs, cujo seu arranjo atómico hexagonal garante uma elevada condutividade eléctrica [15].

A impregnação têxtil [16] e as técnicas de revestimento [17] podem ser utilizadas para funcionalizar a fibra de vidro com uma formulação polimérica em combinação com um nanomaterial condutor, como o CNTs, de modo a promover o comportamento piezoresistivo ao longo de todo o comprimento do filamento. O tratamento alcalino das fibras a partir do NaOH [18] é um método económico e comum para diminuir a hidrofobia, o que facilita a impregnação dos CNTs [19].

Este estudo teve como objetivo otimizar e implementar filamentos de fibras de vidro piezoresistivos em BCRs, através da sua funcionalização com CNTs. Pretendia-se, ainda, obter uma maior compreensão do impacto do tratamento alcalino no processo de funcionalização, bem como a sua influência na condutividade eléctrica. Este estudo salvaguarda a repetibilidade de monitorização de estruturas sujeitas a pressões cíclicas, otimização da compatibilidade e conservação do desempenho entre o filamento funcional e os varões compósitos estruturais, resultando numa estrutura de monitorização inteligente com tecnologia piezoresistiva.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Respeitante aos materiais utilizados no presente estudo, o filamento de fibra de vidro, com uma massa linear de 100 TEX, foi adquirido à Owens Corning®. Os pellets de NaOH, utilizados no

tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro, pertencia ao fornecedor Normax. Nas formulações de impregnação de funcionalização dos filamentos de fibra de vidro foram utilizados os constituintes: clorofórmio de pureza 99,8% (Sigma-Aldrich®), pellets de PLA (NatureWorks), nanotubos de carbono (*Thomas Swan & Company Ltd.*) e, por fim, a resina epóxi adicionada foi a *Biresin*® CR141 da *Sika*.

2.2. Métodos de funcionalização

A funcionalização dos filamentos de fibra de vidro iniciou-se com a sua imersão numa solução aquosa de NaOH 4% (m/v) durante uma hora à temperatura ambiente, com agitação mecânica de 350 rpm. As fibras foram, de seguida, lavadas com água destilada, para a remoção de NaOH residual e submetidas a secagem em estufa, a 80°C durante duas horas [20]. Para efeitos de comparação, as amostras sem tratamento alcalino foram submetidas às mesmas formulações de funcionalização que os filamentos com tratamento alcalino.

Com a finalidade de ser comparada a influência de soluções de formulação de funcionalização da matriz a impregnar os filamentos, foi estudada a utilização de bases termoendurecível (epóxi), termoplástica (PLA) e da sua combinação. Assim, os filamentos de fibra de vidro foram impregnados com as formulações a seguir apresentadas (Formulação A, B e C). Estes filamentos foram funcionalizados a partir de matrizes com CNTs, utilizando o método *Dip-Pad-Dry*, numa gama de [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] CNTs (m/v), utilizando as seguintes formulações:

- **Formulação A:** CNTs dispersos em acetona com epóxi *Biresin*® CR141 [21], agitação mecânica durante uma hora e banho de ultrassons durante uma hora;
- **Formulação B:** CNTs dispersos numa solução de clorofórmio com PLA 6% (m/v), através de agitação mecânica durante uma hora, seguido de banho de ultrassons durante uma hora;
- **Formulação C:** Combinação de ambas as formulações anteriores aplicando a matriz epóxi *Biresin*® CR141 como um revestimento às fibras de vidro funcionalizadas com a formulação B.

Esta gama de formulações permite inferir a influência de diferentes comportamentos elásticos em diferentes amostras.

De acordo com a visualização dos filamentos com e sem impregnação de solução de funcionalização, (Figura 1), verifica-se que o processo de *Dip-Pad-Dry* permite uma distribuição homogénea da formulação em todo o comprimento dos filamentos, esta aplicação foi realizada, aplicando as formulações de funcionalização aos filamentos de fibra de vidro num equipamento *Foulard* vertical, seguido de secagem em estufa a 100°C durante 5 min [16] (Figura 1).

2.3. Métodos de produção

A incorporação dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados, pelos métodos descritos anteriormente, baseou-se em adicionar o filamento funcionalizado, juntos com os restantes multifilamentos de fibra de vidro que compõem os BCRs. Esta adição é realizada no início do processo de produção dos varões compósitos entrançados, na zona de alimentação das fibras. É possível visualizar, (Figura 2), as diferentes zonas e equipamentos referentes ao processo de produção de BCRs, inclusive a referida zona de alimentação das fibras [22].

Os BCRs testados foram produzidos utilizando seis multifilamentos de fibra de vidro (SE1200 9600 [23]) com um filamento, do mesmo material, funcionalizado no seu núcleo. Este conjunto de fibras foi imerso para impregnação em resina epóxi *Biresin*® CR141. Posteriormente, no entrançamento, as fibras impregnadas foram envolvidas por filamentos de poliéster. Na fase seguinte, as fibras impregnadas e entrançadas passam numa câmara de cura durante 5 min a 140°C. Por fim, os BCRs saem curados, após zona de tiragem, como produto final, disponível para ser seccionado da forma pretendida.

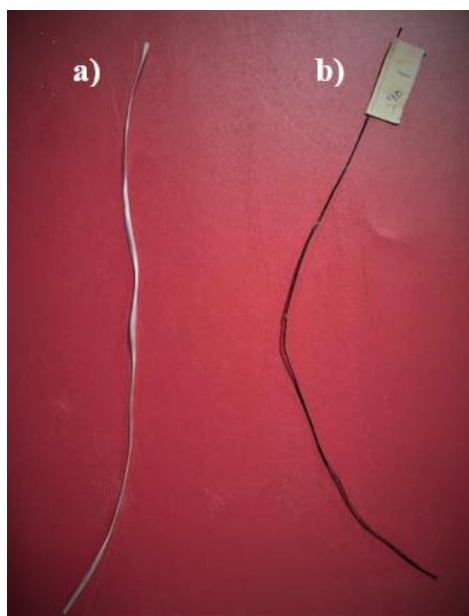


Figura 1 - Filamento de fibra de vidro TEX 100 sem impregnação, a) e filamento de fibra de vidro impregnado com Formulação B com 2% CNTs, b).

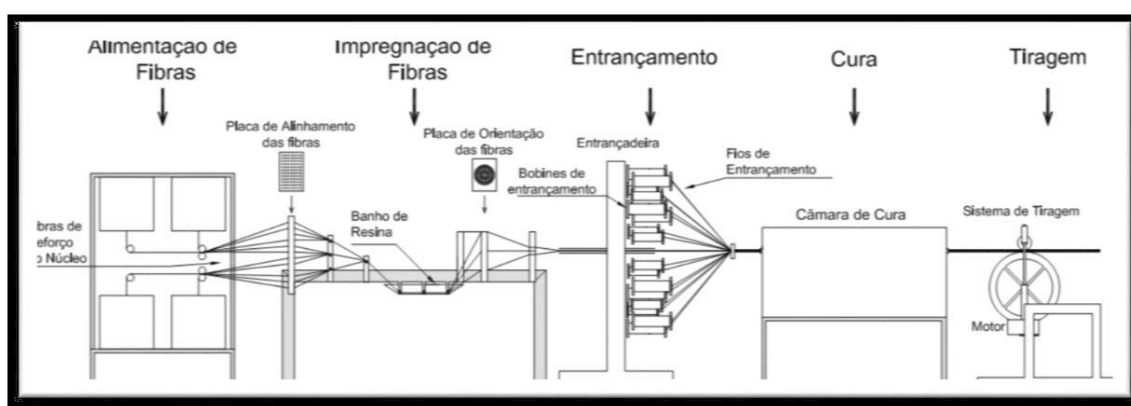


Figura 2 - Esquema do processo de fabrico dos Varões Compósitos Entrançados (BCRs) [22].

2.4. Métodos de caracterização

Para avaliar o desempenho dos filamentos com e sem tratamento alcalino após funcionalização, a espectroscopia de infravermelhos por transformada de *Fourier* (FTIR) permite verificar a presença de CNTs nos filamentos. Os testes de resistividade elétrica foram efetuados com recurso a uma fonte *Keitley 487 Picoammeter/Voltage Source*, através da aplicação de uma diferença de potencial entre -1 a 1 V, a temperatura ambiente. De modo a ser possível medir valores de resistência elétrica, utilizou-se um sistema de eléctrodos de cobre, com uma área de eléctrodo de ($5 \times 1 \text{ mm}^2$) e a distância entre eléctrodos de 3 mm. São apresentados os equipamentos utilizados para a medição da resistividade elétrica (Figura 3).

O comportamento piezoresistivo dos filamentos de fibra de vidro impregnados com a formulação B apresentada, foi avaliado através de ensaios cíclicos de tração, constituídos por cinco ciclos e velocidade de ensaio de 2mm por minuto, aplicando 0,5% e 1% de extensão ao comprimento entre as mandíbulas do dinamómetro (170mm) e ligando aos eléctrodos, com a distância de 1cm no centro do filamento, os terminais de um multímetro digital [24]. O comportamento piezoresistivo foi apenas avaliado em amostras impregnadas com a formulação B, por se tratar das amostras que apresentaram valores de resistividade mais adequados ao objetivo. Esta explicação surge, mais detalhadamente, no capítulo referente aos resultados deste

estudo. Pode ser visualizado o *set-up* utilizado nos ensaios de piezoresistividade na imagem abaixo (Figura 4).

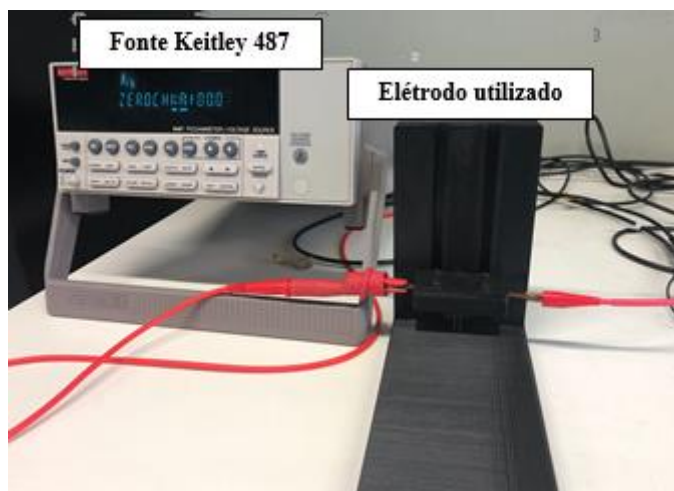


Figura 3 - Equipamentos utilizados na medição de resistividade elétrica.

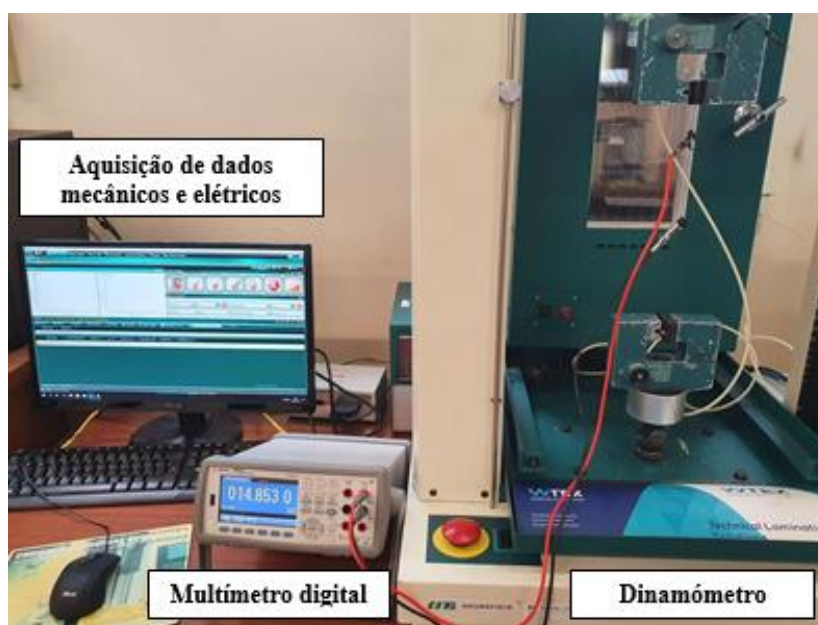


Figura 4 - *Set-up* utilizado nos ensaios de piezoresistividade.

Os testes de piezoresistividade foram realizados de forma a determinar-se a capacidade destes filamentos funcionalizados se comportarem como material piezoresistivo. Assim, o comportamento elétrico (resistência elétrica) e mecânico (extensão) do filamento foram avaliados simultaneamente e ao longo dos ensaios cíclicos de tração, para avaliar também a repetibilidade deste comportamento. Após a caracterização e seleção das formulações, com base no seu desempenho, os filamentos de fibra de vidro funcionalizados foram incorporados nos varões compósitos reforçados, aquando da sua produção, de acordo com o método de produção acima abordado.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização FTIR

A análise FTIR realizada aos filamentos de fibra de vidro não funcionalizados, com e sem tratamento alcalino foi realizada entre os comprimentos de onda de 4000 a 400 cm^{-1} e com resolução de 4 cm^{-1} . A partir do espectro FTIR (Figura 5), detalhado anteriormente, podem ser observados os resultados apresentados de seguida. O espectro demonstra que um pico de absorção é conservado a cerca de 1750 cm^{-1} para ambas as amostras, correspondente à frequência de alongamento de C=O, assim como a banda a 1050 cm^{-1} relativa a Si-O-Si, comumente encontrada em fibra de vidro e ainda a banda 1200 cm^{-1} C-OH de alongamento [25]. A existência de uma banda expressiva a 720 cm^{-1} para a amostra de fibra de vidro com tratamento alcalino resulta do evento de infravermelhos de flexão Si-OH causada pelo NaOH durante o pré-tratamento alcalino [26], já o pico nos 3400 cm^{-1} é também característico da vibração de alongamento OH [27]. Verifica-se a partir do mesmo espectro que ambos os picos nos 720 cm^{-1} e 3400 cm^{-1} não se aplicam à amostra de fibra de vidro não tratada. Este resultado demonstra a remoção da maioria dos grupos não polares e a implementação de grupos hidroxilo, que promovem a impregnação dos CNTs [28].

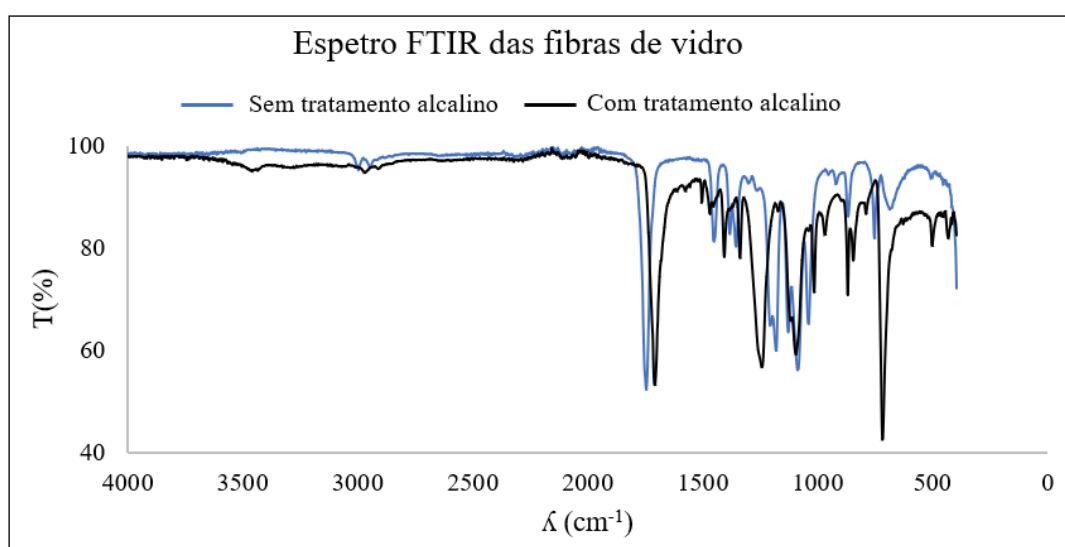


Figura 5 - Espectro FTIR das fibras de vidro com tratamento alcalinos, a cor preta e sem tratamento alcalino, a cor azul.

3.2. Caracterização Elétrica

Dada a discrepância entre os filamentos, impregnados com as diferentes formulações, a variação da resistividade elétrica destes (Tabela 1), mostra que os melhores resultados são apresentados pelas amostras impregnadas com a Formulação B, as quais demonstraram uma resistividade elétrica mais baixa e, portanto, maior condutividade, resultando numa aplicação para materiais piezoresistivos mais adequada e promissora. Por outro lado, verificou-se a existência, também, com problemas de incompatibilidade na formulação C, retratados pela maior resistividade apurada para a concentração de 2,5% de CNTs em comparação com 2% de CNTs.

3.3. Influência da concentração de CNTs

Relativamente aos filamentos de fibra de vidro funcionalizados com a formulação B e com diferentes percentagens de CNTs adicionados, os resultados dos ensaios de piezoresistividade mostram que para as percentagens de 0,5% de CNTs (Figura 6-Figura 7) e 1% de CNTs (Figura 8-Figura 9), não existe uma sobreposição clara entre a variação da resistência elétrica ($\Delta R/R_0$) e a variação da extensão mecânica ($\Delta L/L_0$). Embora exista um padrão para filamentos funcionalizados com 1% de CNTs, a sua resposta elétrica permanece estática para um

determinado limiar de extensão. No que respeita aos picos da curva de $\Delta R/R_0$, estes sobrepõem-se e são mais consistentes para as amostras com 1,5% (Figura 11) e, mais concretamente, 2% de CNTs (Figura 12-Figura 13). No que diz respeito às amostras de filamentos de fibra de vidro com a adição de 2,5% de CNTs (Figura 14-Figura 15), estas apresentam comportamento piezoresistivo de qualidade inferior em comparação com 1,5% e 2% de CNTs, principalmente no ensaio de 1% de extensão, o que não invalidou a sua utilização na incorporação em BCRs, de forma a ser avaliado o comportamento piezoresistivo nos varões compósitos.

Tabela 1 - Resistividade elétrica dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados.

% CNTs (m/v)	R (Ω/cm)		
	Formulação A	Formulação B	Formulação C
0,50	1,08E+05	9,07E+03	1,23E+05
1,00	2,67E+04	3,99E+01	4,65E+02
1,50	8,38E+03	4,95E+00	5,56E+01
2,00	4,06E+03	4,24E+00	1,46E+01
2,50	6,36E+02	2,42E+00	2,81E+01

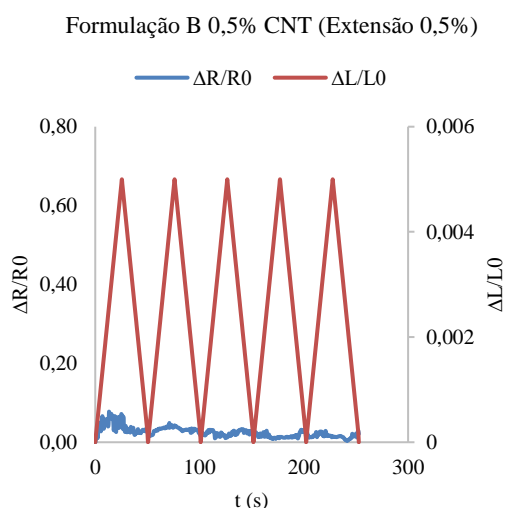


Figura 6 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

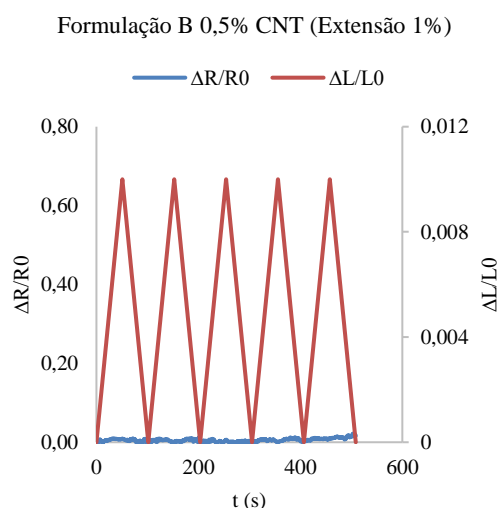


Figura 7 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

3.4. Varões compósitos entrançados (BCRs)

Depois de incorporar filamentos impregnados com a Formulação B, adicionados com 1,5% a 2,5% de CNTs nos varões compósitos entrançados (BCR) de 50cm, de modo a otimizar-se a leitura do sinal elétrico, procedeu-se ao polimento e revestimento das extremidades dos BCRs com cola condutora. Este procedimento permitiu, posteriormente uma leitura mais eficaz do sinal elétrico nestes pontos durante os ensaios de piezoresistividade realizados aos varões funcionalizados, (Figura 16).

O comportamento piezoresistivo dos varões compósitos foi avaliado através de ensaios de tração cíclica, consistindo em cinco ciclos com velocidade de extensão de 2mm por minuto, aplicando uma extensão de 0,5% e 1% ao comprimento dos BCRs entre amarras do dinamómetro (400mm) e ligando ambas as extremidades do varão às garras do multímetro utilizado para medição da resistência elétrica durante os ensaios [24].

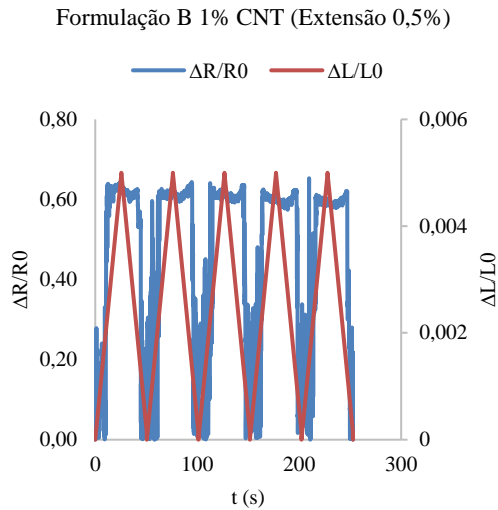


Figura 8 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

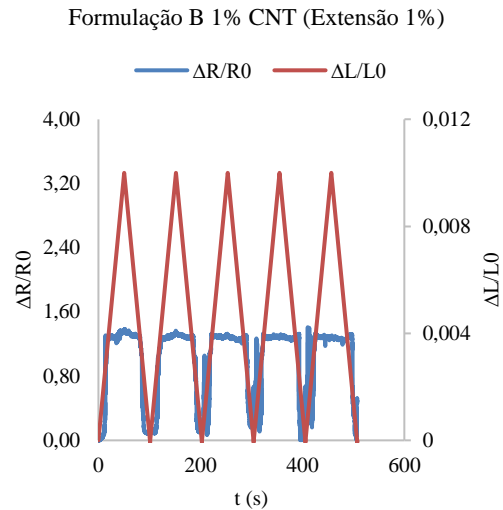


Figura 9 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

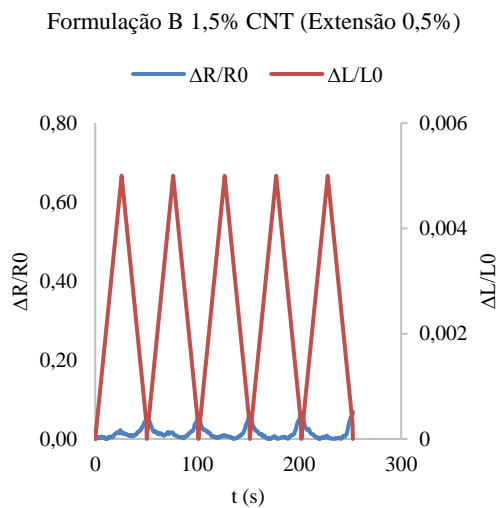


Figura 10 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

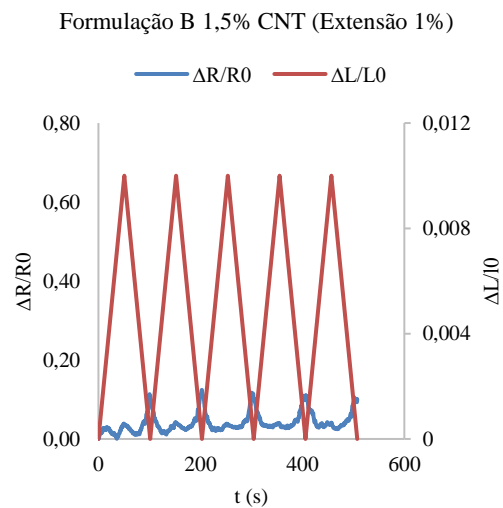


Figura 11 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

Os gráficos relacionados com o comportamento piezoresistivo obtido a partir dos ensaios de piezoresistividade dos BCRs funcionalizados (Figura 17) apontam que, para o mesmo BCR, o seu comportamento é semelhante quando aplicados diferentes deformações, nota-se também que os picos têm mais amplitude e consistência para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. Por outro lado, os BCRs com concentração de 1,5% de CNTs não mostram o mesmo comportamento piezoresistivo, desejado, devido à sua inconsistência na variação de resistência elétrica.

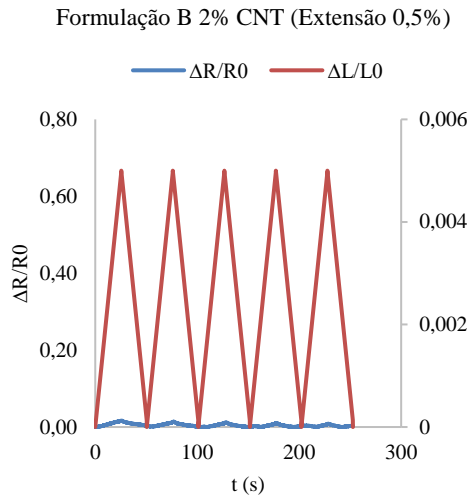


Figura 12 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

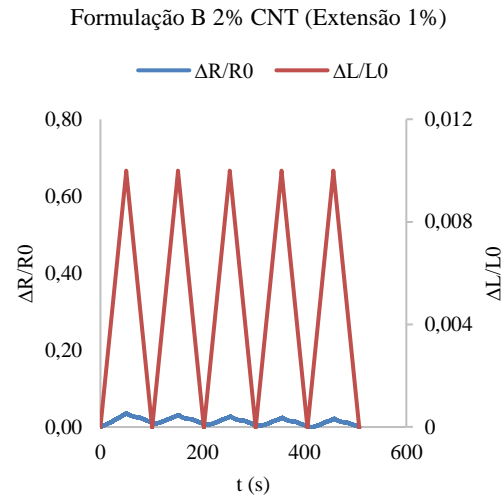


Figura 13 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

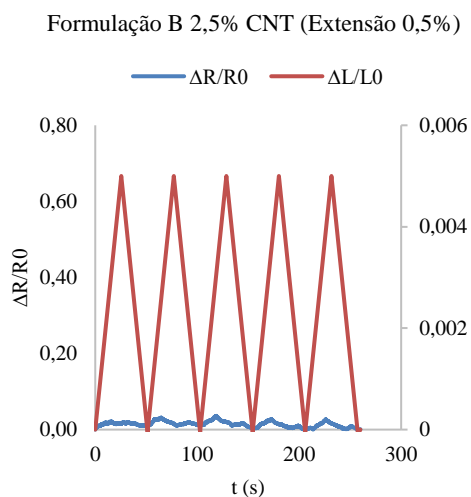


Figura 14 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

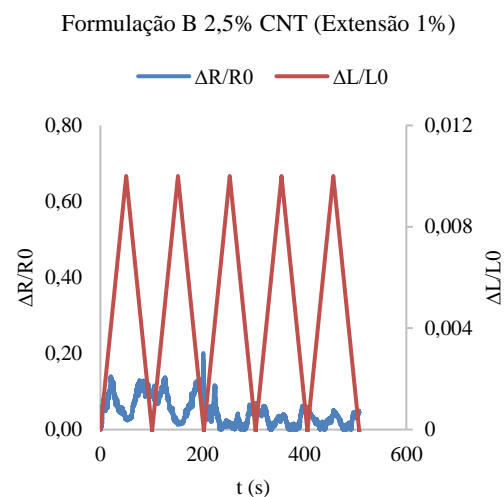
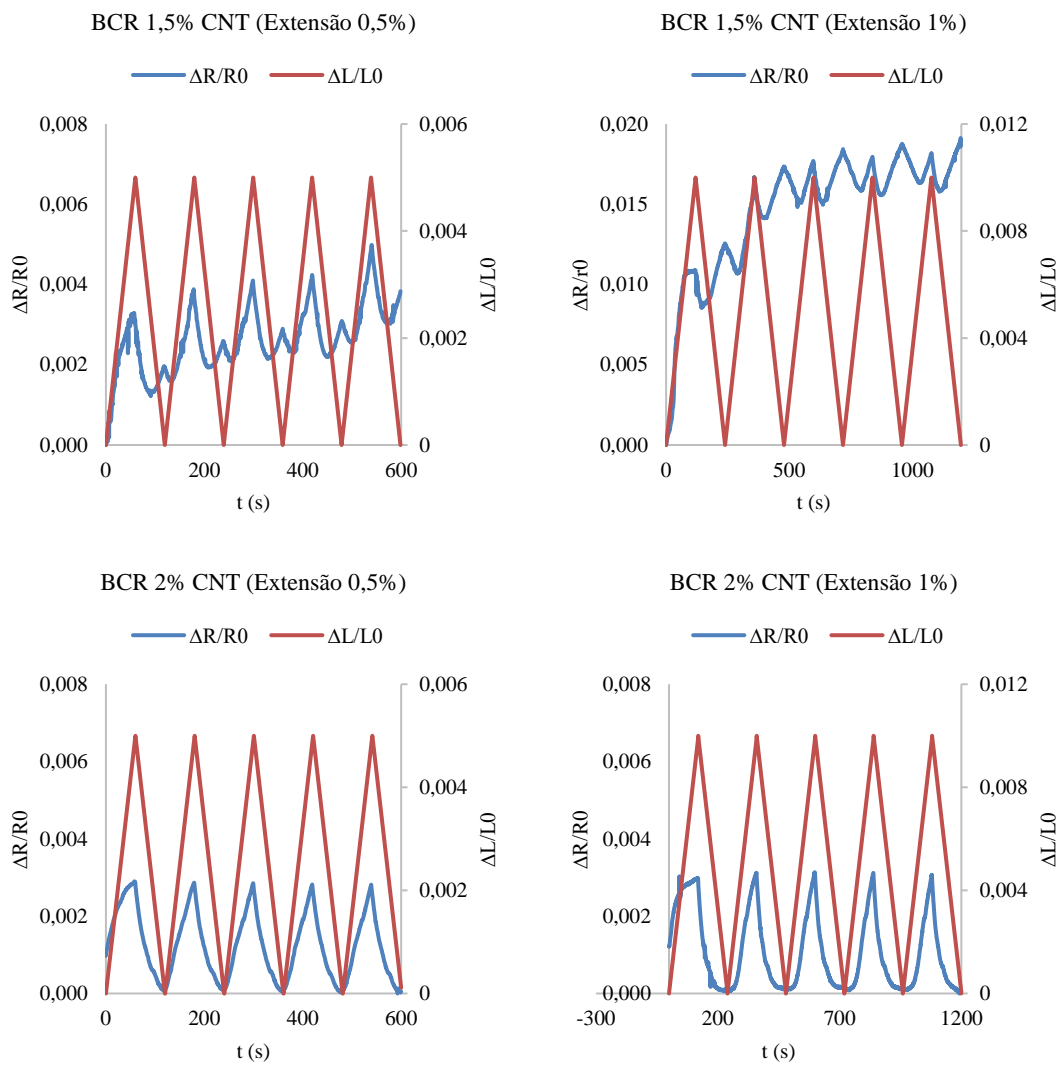


Figura 15 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

Os *gauge factors* apresentados nos gráficos prévios determinados atendendo ao terceiro ciclo de deformação, no intervalo da curva ascendente (Tabela 2). Os filamentos de fibra de vidro funcionalizados demonstram que, ao aumentar a percentagem de CNTs, o material perde a sua capacidade de sensorização devido ao princípio do limite de percolação, o mesmo ocorre aumentando a deformação do varão, o que pode estar a perturbar o sinal condutor obtido a partir da malha construída pelos CNTs. Ao serem obtidos resultados semelhantes com diferentes extensões, a elasticidade do PLA destaca-se, mantendo a integridade do filamento ao longo do seu comprimento. Os valores de *gauge factor* mostram ainda que, quanto maior for a concentração de CNTs, menor é a sensibilidade do material piezoresistivo. No entanto esta diferença é quase insignificante quando se comparam os gráficos associados à concentrações de 1,5% da CNTs aos referentes à concentração de 2% CNTs (Figura 17).



Figura 16 - BCRs após colocação de cola condutora nas suas extremidades.



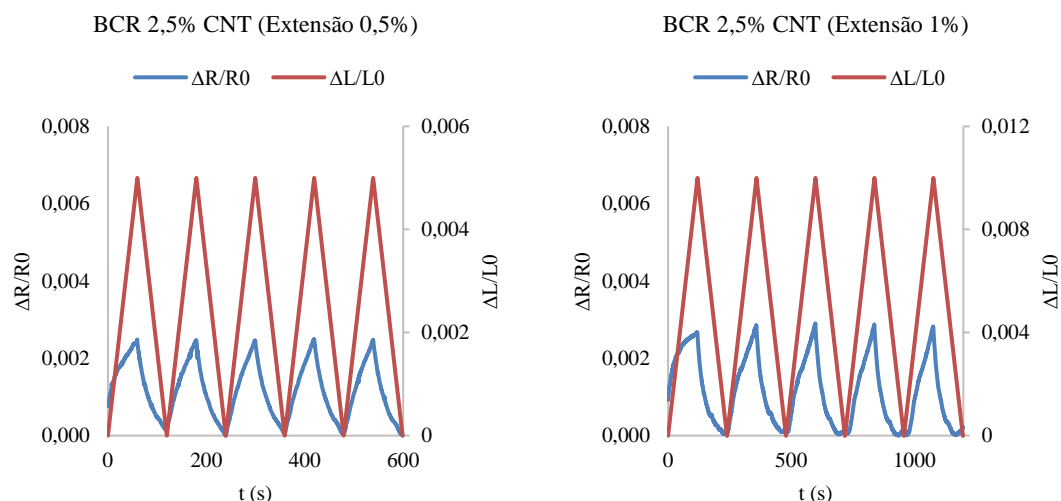


Figura 17 - Comportamento piezoresistivo dos ensaios realizados às amostras de BCRs funcionalizadas com a formulação B, submetidas a tração cíclica, a extensões de 0,5 e 1%.

Tabela 2 - Determinação de *Gauge Factor* dos BCRs funcionalizados testados.

% CNTs (m/v)	Gauge Factor	
	Extensão 0,5%	Extensão 1%
1,50	0,61	0,59
2,00	0,58	0,44
2,50	0,48	0,28

4. Conclusões

A combinação de sensores piezoresistivos e varões compósitos estruturais resulta num material de monitorização inteligente que pode resistir à abrasão e corrosão, enquanto facilita a sua instalação e manutenção. Para atingir estes objetivos, combinando a funcionalização dos CNTs com materiais dúcteis através da impregnação num material bem conhecido e fiável, a fibra de vidro, o que resulta num material piezoresistivo capaz de monitorizar a variação da sua deformação através da variação de resistência elétrica. Neste caso, a formulação B, que combina o PLA com CNTs, quando implementada nos BCRs revelou resultados impressionantes, destacando-se a formulação B com concentração de 2% CNTs, a qual apresentou um comportamento consistente entre ciclos de tração e um *gauge factor* adequado.

Os ensaios piezoresistivos de filamento de fibra de vidro isolado demonstraram um melhor desempenho do que os atuais disponíveis no mercado, com uma diferença mais notória quando incorporados nos BCRs. No entanto, os ensaios piezoresistivos de tração cíclica iniciais para filamentos condutores isolados revelaram melhores resultados para as concentrações de 1,5% e 2% de CNTs. Dado o maior comprimento de medição elétrica e uma possível presença de materiais não condutores na sua periferia, os resultados melhores para os BCRs com filamento condutor incorporado, mudaram esta gama ideal para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. A combinação dos BCRs com esta tecnologia satisfaz o propósito deste estudo, proporcionando uma abordagem multifuncional e inteligente ao mercado da engenharia estrutural.

Referências

- [1] J. Saliba, A. Loukili, F. Grondin, Acoustic emission monitoring and quantitative evaluation of damage in concrete beams under creep, in Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete: Fundamentals and Applications, Woodhead Publishing, 2015, pp. 113-136.

- [2] A. Poursaeed, Corrosion sensing for assessing and monitoring civil infrastructures, in *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, Woodhead Publishing, 2014, vol. 1, pp. 357-382.
- [3] M. Motavalli, C. Czaderski, A. Schumacher, D. Gsell, Fibre reinforced polymer composite materials for building and construction, in *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 69-128.
- [4] A. Mufti, N. Banthia, B. Benmokrane, M. Boulfiza, J. Newhook, Durability of GFRP composite rods: Results from preliminary field tests don't match data from accelerated lab tests, *Concr. Int.*, 2007.
- [5] R.S. Chen, Y.H. Muhammad, S. Ahmad, Physical, Mechanical and environmental stress cracking characteristics of epoxy/glass fiber composites: Effect of matrix/fiber modification and fiber loading, *Polym. Test.*, 96 (2021) 107088. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107088>.
- [6] S.T. Bashir, L. Yang, J.J. Liggat, J.L. Thomason, Kinetics of dissolution of glass fibre in hot alkaline solution, *J. Mater. Sci.*, 53 (2018) 1710-1722.
- [7] M. Kimura, A. Ando, D. Maurya, S. Priya, Lead Zirconate Titanate-Based Piezoceramics, in *Advanced Piezoelectric Materials*, Elsevier, 2017, pp. 95-126.
- [8] R. Nayak, R. Padhye, L. Arnold, Melt-electrospinning of nanofibers, in *Electrospun Nanofibers*, Elsevier Inc., 2017, pp. 11-40.
- [9] R. Viter, I. Iatsunskyi, Metal Oxide Nanostructures in Sensing, in *Nanomaterials Design for Sensing Applications*, Elsevier, 2019, pp. 41-91.
- [10] T. Kenny, W. Kester, G. C. Low, Strain Gages, in *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Inc., 2005, pp. 501-529.
- [11] M.H. Bao, Piezoresistive sensing, in *Handbook of Sensors and Actuators*, vol. 8, Elsevier, 2000, pp. 199-239.
- [12] T.A. Saleh, V.K. Gupta, Synthesis, Classification, and Properties of Nanomaterials, in *Nanomaterial and Polymer Membranes*, Elsevier, 2016, pp. 83-133.
- [13] P. Cassagnau, Rheology of Carbon Nanoparticle Suspensions and Nanocomposites, in *Rheology of Non-Spherical Particle Suspensions*, Elsevier Inc., 2015, pp. 59-75.
- [14] A.M. Holban, A.M. Grumezescu, E. Andronescu, Inorganic nanoarchitectonics designed for drug delivery and anti-infective surfaces, in *Surface Chemistry of Nanobiomaterials: Applications of Nanobiomaterials*, Elsevier Science Ltd., 2016, pp. 301-327.
- [15] V. Harik, Nanotechnology of Carbon Nanotubes, in *Mechanics of Carbon Nanotubes*, Elsevier, 2018, pp. 1-24.
- [16] J. Mack and R. Schledjewski, Filament winding process in thermoplastics, in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, 2012, pp. 182-208.
- [17] W.C. Smith, Overview of textile coating and lamination, in *Smart Textile Coatings and Laminates: A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 3-9.
- [18] W. Ouarhim, N. Zari, R. Bouhfid, A.E.K. Qaiss, Mechanical performance of natural fibers-based thermosetting composites, in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2018, pp. 43-60.
- [19] M.H. Zin, K. Abdan, M.N. Norizan, The effect of different fiber loading on flexural and thermal properties of banana/pineapple leaf (PALF)/glass hybrid composite, in *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2018, pp. 1-17.
- [20] D. Panesar, R. Leung, M. Sain, S. Panthapulakkal, The effect of sodium hydroxide surface treatment on the tensile strength and elastic modulus of cellulose nanofiber, in *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 17-26.
- [21] Sika, Biresin ® CR141 1 / 3 Biresin ® CR141 Composite resin system for heat curing, 2020.
- [22] S. Patinha, F. Oliveira, F. Cunha, C. Mota, Desenvolvimento e Caracterização de Varões Compósitos Híbridos para Reforço de Betão, 2014.
- [23] Owens Corning, SE 1200 Single End Roving for Knitting, Weaving, Filament Winding, and LFTP product description product information. Brussels, 2012.
- [24] X. Wang, J. Wang, S. Biswas, H. Kim, I. Nam, Characteristics of Epoxy-Based Composites

- Incorporating Hybridized Networks of Carbon or Graphite Nanoplatelets, Sensors, 2020, pp. 1-17.
- [25] A.M. Mhatre, S. Chappa, S. Ojha, A.K. Pandey, Functionalized glass fiber membrane for extraction of iodine species, *Sep. Sci. Technol.*, 54 (2019) 1469-1477. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1520729>.
- [26] A.J. Bonon, M. Weck, E.A. Bonfante, P.G. Coelho, Physicochemical characterization of three fiber-reinforced epoxide-based composites for dental applications, *Mater. Sci. Eng. C*, 69 (2016) 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.002>.
- [27] H. Sosiati, Y.A. Shofie, A.W. Nugroho, Tensile properties of Kenaf/E-glass reinforced hybrid polypropylene (PP) composites with different fiber loading, *Evergreen*, 5 (2018) 1-5.
- [28] V. Fiore, G. Di Bella, A. Valenza, The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites, *Compos. Part B Eng.*, 68 (2015) 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>.

ORCID

- José Duarte Pereira Cunha Sousa 0009-0002-3850-6077
<https://orcid.org/0009-0002-3850-6077>
- João Luís Sousa Bessa Soares 0000-0003-0950-4961
<https://orcid.org/0000-0003-0950-4961>

Incorporação de lamas provenientes do corte de rochas ornamentais em materiais cimentícios

Incorporation of sludge from the cutting of ornamental rocks in cementitious materials

O. Moreira^{a†}, R. Malheiro^a, C. Jesus^a, A. Camões^a, M.J. Ribeiro^b

^a Universidade do Minho, CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Guimarães, Portugal

^b Instituto Politécnico de Viana do Castelo, UIDM – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais, Viana do Castelo, Portugal

[†] Autor para correspondência: othonmoreira@gmail.com

RESUMO

O desenvolvimento mundial impulsiona a procura por cimento e os desafios ambientais associados à sua fabricação preocupam os investigadores. O setor de cimento é o terceiro maior consumidor industrial de energia e o segundo maior emissor de CO₂. Neste sentido, algumas medidas têm sido implementadas. Para além da redução da relação clínquer/cimento, a redução do consumo de cimento através da utilização de Materiais Cimentícios Suplementares em substituição parcial do cimento é uma estratégia eficiente e atual. O uso de resíduos industriais como, por exemplo, as lamas provenientes do corte de rochas ornamentais, tem sido uma aposta que favorece, também, a economia circular. Neste sentido, foi desenvolvida uma pesquisa experimental com o objetivo de avaliar o comportamento de argamassas cuja composição utiliza lamas provenientes do corte de rochas ornamentais produzidas em Portugal, nomeadamente, travertino, gabro, granada e basalto. Foram estudadas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido após 28 e 90 dias de cura. O índice de atividade pozolânica foi determinado. Os resultados sugerem um desempenho satisfatório face às argamassas de referência. As lamas estudadas promovem a economia circular e têm potencial para se apresentar como substituto parcial do cimento na produção de materiais cimentícios com utilizações específicas.

ABSTRACT

The development of the world drives the demand for cement and the environmental challenges associated with its manufacture concern researchers. The cement sector is the third largest industrial consumer of energy and the second largest emitter of CO₂. In this sense, some measures have been implemented. In addition to reducing the clinker/cement ratio through use of composite cements, reducing cement consumption using Supplementary Cementitious Materials in partial replacement of cement is an efficient and up-to-date strategy. The use of industrial waste, such as sludge from cutting ornamental rocks, has been a bet that also favors the circular economy. In this sense, experimental research was carried out to evaluate the behavior of mortars whose composition uses sludge from the cutting of ornamental rocks produced in Portugal, namely, travertine, gabbro, garnet and basalt. Mortar properties were studied in the fresh and hardened state after 28 and 90 days of curing. The pozzolanic activity index was determined. The results suggest a satisfactory performance compared to the reference mortars. The sludge studied promoting the circular economy and has the potential to be a partial substitute for cement in the production of cementitious materials with specific uses.

Palavras-chave:

Lamas, basalto, materiais cimentícios, sustentabilidade, economia circular.

Keywords:

Sludge, basalt, cementitious materials, sustainability, circular economy.

1. Introdução

Temas como aquecimento global, escassez de energia, extinção de recursos naturais, deposição adequada de resíduos e economia circular tornaram-se um assunto quotidiano, fruto das constantes notícias dos efeitos vivenciados atualmente como: temperaturas extremas, desastres naturais, poluição, pandemias, extinção de espécimes, dentre outros.

A União Europeia visando mudar este cenário estipulou metas conjuntas, em diversas frentes de trabalho. Entre as mais importantes cita-se a procura pela neutralidade carbónica e a redução dos consumos energéticos. Neste contexto, a indústria do cimento passou a ser objeto de muitas investigações, pois é considerada um dos alvos prioritários.

O betão é um dos produtos mais consumidos no planeta. São cerca de 14 bilhões de metros cúbicos utilizados a cada ano, sendo que este número deve crescer entre 12 e 23% até 2050 [1].

A emissão de gases de efeito estufa do setor é tão grande que se fosse considerada como um país, seria o terceiro mais poluente, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. A produção de cimento, ligante base do betão, gera cerca de 7% das emissões globais de CO₂ [2]. Este percentual supera em três vezes o volume produzido por todo o tráfego aéreo do planeta. Para cada tonelada de cimento fabricada são lançados exatamente o mesmo volume de CO₂ na atmosfera [2]. Os números são tão expressivos que qualquer ação que possa vir a apresentar melhorias neste processo, mesmo que pequenas, permitirá ganhos enormes, pois os efeitos serão potencializados devido ao seu elevado uso.

Passados longos anos após os primeiros registos de seu uso, ainda não se desenvolveu um substituto à altura para o cimento. Sendo assim, é necessário assumir uma postura de torná-lo mais ecológico, reduzindo ao máximo os seus impactos ao meio ambiente. A indústria do cimento reduziu o CO₂ em 19,2% por tonelada de cimento desde 1990 [1]. Alterações no processo produtivo têm produzido redução no consumo de energia. O uso de aditivos minerais na produção de cimento vem crescendo ano a ano. A quota de clínquer de cimento reduziu de 85% em 2003 para 77% em 2010, estimando-se que possa chegar, na Europa, a 71% em 2050 [3,42,43]. O consumo de energia durante a produção de cimentos com aditivos é muito menor do que no caso da produção de cimento Portland CEM I [4].

Investigações atuais têm procurado encontrar substituições parciais do cimento, tentando não só reduzir o consumo de matéria-prima nobre, como também possibilitando a inserção de resíduos no processo, alguns inclusive já consolidados.

Em Portugal, utilizava-se as cinzas volantes oriundas da geração de energia a partir da queima do carvão, porém as centrais a carvão foram encerradas, no âmbito das medidas implementadas para atingir a meta da neutralidade carbónica, e com isto surgiu a necessidade de encontrar, de maneira célere, um substituto para elas. Em 2011, 3,6 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas em todo o mundo [5], com previsão de que este número chegue a 5,8 bilhões de toneladas até 2050 [6]. As cinzas volantes e as escórias apresentam mundialmente produções anuais na ordem de 1 bilhão de toneladas e 360 milhões de toneladas, respetivamente [6,7]. Porém, não se pode assumir que esta produção seja suficiente e garanta volumes necessários. A decisão por uma redução das emissões de CO₂ tende a afetar esta produção e deve-se considerar também questões logísticas quanto ao local onde se produz o resíduo e as fábricas de cimento. É preciso haver uma análise minuciosa neste processo, com uma perspectiva de ciclo de vida, pois os ganhos gerados com a introdução do resíduo podem ser facilmente perdidos no transporte da matéria-prima. A questão é complexa, pois a solução deve ter em conta não só os requisitos técnicos, como também fatores que possam afetar a cadeia de produção e que permita alcançar os efeitos desejados.

Na literatura, a utilização de resíduos de rochas ornamentais em compósitos cimentícios tem sido objeto de alguns estudos: o resíduo do polimento de granito foi utilizado na fabricação de betão, resultando em melhor empacotamento de partículas, redução de porosidade e ganho de resistência, com teor ótimo de 20%, de acordo com M.A. Alves [8]; nos estudos de A.A. Aliabdo et al. [9] verificou-se a manutenção e melhora das propriedades mecânicas dos betões produzidos com a adição de pó de mármore; M. Sardinha et al. [10] e H.S.Arel [11] pesquisaram o comportamento mecânico do betão com substituição parcial do cimento, observando bons resultados para níveis de substituição de 10%; [12] avaliou as propriedades pozolânicas de

resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico a 1200 °C, observando um aumento significativo da resistência mecânica, principalmente para os betões com adição de 10%.

Tendo estes conceitos como base, fez-se este estudo na tentativa de obter um material com características semelhantes, que fosse abundante, barato, com disponibilidade local, que permitisse agregar valor a um resíduo e que não alterasse de maneira relevante as propriedades do betão. Para tal testaram-se alguns resíduos da exploração de pedras ornamentais, nomeadamente lamas de travertino (calcário), granada, gabros (rochas ígneas) e basalto, analisando o comportamento de pastas produzidas com a substituição, em volume, de 25% do ligante (cimento) comparadas a uma pasta convencional.

Pretende-se analisar o impacto na resistência à compressão relativamente à pasta de referência e verificar a pozolanicidade destas lamas.

2. Materiais e métodos

As lamas utilizadas são um resíduo gerado durante a extração e processamento de pedras ornamentais, usadas na construção. Esses resíduos, após a secagem tornam-se um pó, que representa um alto risco ambiental. A poeira libertada na atmosfera contribui significativamente para a acumulação e dispersão nociva de sólidos finos no ar, água e solo [13].

A composição química e mineral da lama é a mesma do leito rochoso de onde tem origem, com a ressalva de que o resíduo gerado pode ser contaminado durante o processo de sua extração e/ou tratamento de acordo com o método utilizado.

O seu uso em betão e argamassa ocorre principalmente como aditivos inertes e o seu efeito positivo em algumas propriedades das argamassas e betões está relacionado principalmente com o efeito de filler (material fino de enchimento), que resulta no adensamento da estrutura da matriz cimentícia e, assim, na melhoria dos parâmetros mecânicos e na durabilidade. No entanto, nem todas as lamas oriundas do processamento de agregados minerais são totalmente inertes [2]. No entanto, alguns estudos demonstram efeitos pozolânicos nas lamas de calcário [14] e basalto [15,16].

Globalmente, a indústria de rochas ornamentais processa cerca de 68 milhões de toneladas de rocha por ano. A produção mundial é dominada por: China, Itália, Índia, Portugal, Brasil, Turquia, EUA, Grécia, França e África do Sul, todos com produção superior a um milhão de toneladas por ano [17]. O processo produtivo usa água para arrefecer e lubrificar as máquinas de serrar e polir. Este tipo de extração e preparação da pedra resulta na produção de cerca de 20 a 30% de resíduos na forma de lama [9-22]. Algumas investigações indicam que até 58% da rocha extraída é desperdiçada, dos quais 18% são resíduos (lama) resultantes do polimento [23]. O mais importante não é precisar as percentagens deste desperdício, mas sim observar que o volume é bastante significativo e que, independentemente do processo explorativo, o resíduo produzido é extremamente danoso para o ambiente. A lama é armazenada em tanques para decantação e em seguida é depositada em aterro, gerando a redução da permeabilidade do solo, afetando não só o nível do lençol freático como também a fertilidade do solo [13,23]. Por outro lado, após a secagem desta lama, parte do material dissipa-se através de um pó, extremamente fino, contaminando também o ar.

A indústria de exploração de pedras trabalha com uma grande diversidade de rochas. A escolha das pedras deste estudo deveu-se ao facto de serem materiais com grande presença nacional e pelo fato de não haver um uso corrente para o resíduo produzido no processo de exploração.

2.1. Caracterização física dos materiais

2.1.1 Granulometria laser

Diversos estudos têm sido feitos utilizando-se métodos para melhorar a condição do material através da calcinação ou redução do tamanho das partículas. Sob a ótica de uma análise de ciclo de vida, evitou-se ao máximo estas ações para não haver incremento de gastos energéticos no

processo de reintrodução destes resíduos. Os resíduos foram utilizados nos ensaios no estado “in natura”, ou seja, conforme vieram das empresas de processamento.

O material foi seco em estufa (a 105°C) para garantir que a relação água / ligante não fosse afetada por eventual água residual incorporada.

O material apresentava-se em forma de pequenos pedriscos (pedras miúdas) que eram facilmente convertidos em pó, conforme se pode observar na Figura 1. Para garantir que pequenos grânulos fossem dispersos, eles passaram por uma mistura prévia de 30 segundos, em água da própria amassadura.



Figura 1 - Lamas após a secagem (pó de rocha).

Apenas o basalto passou por um processo de moagem, devido ao fato de se apresentar originalmente em forma de pedras (não era pó como os demais). Este material, foi processado primeiramente no britador de mandíbulas, através de dois ciclos sucessivos de britagem, e depois passou por 35 ciclos de moagem, de 15 minutos cada, em moinho de bolas (Los Angeles), com 20 esferas de ferro fundido (massa igual a 8,408 kg), conforme descrito na NP EN 1097-2 [24], até que fosse possível aferir a sua granulometria dentro da mesma faixa dos demais (80% de passagem), através da peneiração a 63 μm .

A solução adotada para a determinação da curva granulométrica foi o método de difração a laser, através do equipamento Malvern – Mastersizer 3000. Desta forma foi possível obter valores mais precisos e detalhados. Analisando o gráfico da Figura 2, pode-se afirmar que as lamas apresentam uma granulometria semelhante à do cimento utilizado, ou seja, um tamanho de partícula da mesma ordem de grandeza.

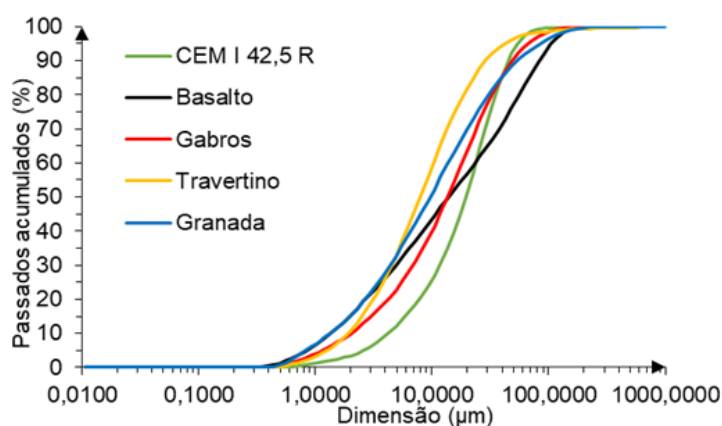


Figura 2 - Curva granulométrica dos materiais estudados.

Nos diâmetros característicos, apresentados na Tabela 1, pode-se notar que os valores de D10 de todas as lamas ficaram ligeiramente abaixo, porém na mesma ordem de grandeza daqueles apresentados pelo cimento utilizado. Em relação ao D50 e ao D90, nota-se que as lamas apresentam grãos característicos menores que os do cimento, sendo o travertino (calcário) o material que apresenta a maior diferença, principalmente na faixa dos grãos maiores (D90). De um modo geral, as lamas possuem grãos ligeiramente mais finos que os do cimento utilizado.

Tabela 1 - Diâmetros característicos dos materiais em estudo.

Material	D10	D50	D90
CEM I 42.5R	3,53	24,00	109,00
Travertino	2,89	11,40	36,40
Gabros	2,22	15,00	52,50
Granada	1,48	10,00	59,90
Basalto	1,48	15,40	94,70

A granulometria do resíduo pode variar de acordo com o processo de beneficiamento da rocha. Para evitar a influência deste fator procurou-se utilizar materiais oriundos da mesma fonte de extração, embora no caso específico do basalto, houvesse a necessidade de moer posteriormente o material.

2.1.2 Superfície específica / Massa volúmica

É de suma importância a finura do material na determinação de seus efeitos pozolânicos. Sendo assim, determinou-se a superfície específica de Blaine (NP EN 196-6) [25] e a massa volúmica (EN 1097-6) [26] do cimento e das lamas, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa Volúmica e Superfície Específica dos materiais em estudo.

Material	Massa Volúmica			Superfície Específica			
	Massa(g)	V1	V2	P (cm ³ /g)	Se (cm ² /g)	D. P.	C. Var.
CEM I 42.5R	65,07	0,45	20,90	3,182	4026	-	-
Travertino	53,06	0,60	19,65	2,785	8665	545,86	6,30%
Gabros	55,04	0,45	20,20	2,787	5946	181,45	3,05%
Granada	58,89	0,75	20,05	3,051	7816	388,61	4,97%
Basalto	65,02	0,35	21,80	3,031	5164	105,36	2,04%

Os resultados apresentados na Tabela 2 confirmam que as lamas são muito finas, da mesma ordem de grandeza da do cimento, porém mais finas e com uma maior superfície específica.

2.1.3 Composição química dos materiais

A composição química da lama, obtida por FRX (Hitachi – EA1000VX), tem uma influência significativa na sua reação no compósito de cimento. Na Tabela 3, nota-se que no travertino o componente predominante foi o óxido de cálcio (82,51%). O gabro possui um alto teor de sílica (66,93%). A granada apresenta óxido de cálcio (39,67%), ferro (21,10%) e sílica (30,65%) como principais componentes. Em relação ao basalto o componente predominante é a sílica. (54,38%).

Tabela 3 - Composição Química dos materiais em estudo.

	CEM I 42.5R	Travertino	Gabros	Granada	Basalto
CaO	62,77	82,51	6,10	39,67	9,05
Fe ₂ O ₃	3,06	1,11	6,85	21,10	14,93
SiO ₂	20,25	13,23	66,93	30,65	54,38
Al ₂ O ₃	4,43	2,01	16,32	4,77	15,63
MnO	-	0,02	0,11	0,58	0,29
MgO	2,01	-	-	-	-
SO ₃	3,11	0,37	0,26	0,33	-
TiO ₂	-	0,10	0,46	2,22	3,05
K ₂ O	0,76	0,57	2,92	0,62	1,75
Na ₂ O	0,25	-	-	-	-
NaOeq	0,75	-	-	-	-
PF	2,74	-	-	-	-
RI	1,23	-	-	-	-

2.2 Procedimentos e ensaios

2.2.1 Dosagem

Para determinar a massa de resíduo (substituição) a utilizar na amassadura respectiva, primeiro calculou-se o volume de cimento a substituir (VC) e, depois, foi determinada a massa de resíduo correspondente que ocupava esse mesmo volume (VC), para cada material correspondente, levando-se em consideração a massa volúmica de cada um dos materiais, conforme Tabela 4.

Isto foi feito mantendo-se a quantidade de areia e água e substituindo 25% do ligante (volume de cimento) por quatro tipos diferentes de lamas (travertino, gabros, granada e basalto). A relação água / ligante foi mantida em 0,50. Usou-se areia fina, natural e siliciosa com diâmetro máximo de 500 μm , módulo de finura 2,10 e densidade de 2620 kg/m^3 .

Partindo de uma mistura de referência com o traço 1:1, composta por: cimento Portland CEM I 42,5R, areia fina monogranular e água, estabeleceu-se a composição conforme se indica na Tabela 4.

Foram moldados provetes de 20 x 20 x 20 mm, para serem ensaiados à compressão, 5 amostras por idade, aos 7, 28 e 90 dias.

Tabela 4 - Identificação e composição das argamassas (kg/m^3).

Material	Cimento	Areia	Água	Resíduo
CEM I 42.5R	835,38	835,38	417,69	-
Travertino	626,52	835,38	417,69	187,39
Gabros	626,52	835,38	417,69	187,39
Granada	626,52	835,38	417,69	205,27
Basalto	626,52	835,38	417,69	203,94

2.2.2 Amassadura

Utilizando-se uma balança, com precisão de 0,01g, e misturadora mecânica, efetuou-se para cada composição a pesagem dos materiais e a posterior homogeneização das misturas conforme se indica em seguida:

- Para a mistura de referência, começou-se por combinar a areia com o cimento. Depois adicionou-se a água;
- Para as restantes misturas, começou-se por dispersar as lamas (pedriscos) na água e só depois se juntou o cimento e a areia.

2.2.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade e a consistência são importantes propriedades dos materiais cimentícios. A demanda de água e a trabalhabilidade dependem em grande parte da área superficial específica dos componentes da mistura. Entretanto, A.M. Neville [27] observou que a trabalhabilidade não depende simplesmente da superfície específica do material; partículas de agregado menores que 150 μm não requerem humedecimento tão elevado quanto no caso de grãos grossos. A influência da área superficial específica de grão fino na trabalhabilidade da mistura de material cimentício não é, no entanto, definida com precisão [27]. A elevação da quantidade de material de grão fino na massa de cimento altera as suas propriedades reológicas, afetando a trabalhabilidade.

A substituição do cimento por um material de mais fino contribui para o aumento do consumo de água, que está relacionada com o aumento da área superficial específica do grão. No entanto, o aumento da área superficial específica nem sempre leva ao aumento do consumo de água. A adição de cinzas volantes à mistura de material cimentício pode reduzir a necessidade de água para a mesma trabalhabilidade em 5 a 15%, o que está relacionado ao formato dos grãos das cinzas volantes [27]. A forma esférica e a superfície lisa dos grãos das cinzas volantes produzem o efeito "rolamento de esferas". Este fenómeno contribui para a redução do atrito interpartículas e, deste modo, para melhorar a trabalhabilidade.

Alguns autores [28,29] demonstraram que a adição de lamas, em substituição ao cimento, em alguns casos melhora as propriedades reológicas das argamassas e das misturas de betão e tem

um efeito positivo na interação física. Devido ao tamanho de grão muito pequeno, ocorre um aumento na densidade de empacotamento, reduzindo o volume de vazios. Isto ocorre porque a alta densidade de empacotamento de partículas faz com que menos água fique presa entre os grãos e, portanto, mais água esteja disponível para hidratar os grãos.

Após a amassadura das misturas, efetuou-se para cada uma delas o ensaio de espalhamento, utilizando a mesa de espalhamento conforme a EN 1015-3 [30]. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 3.

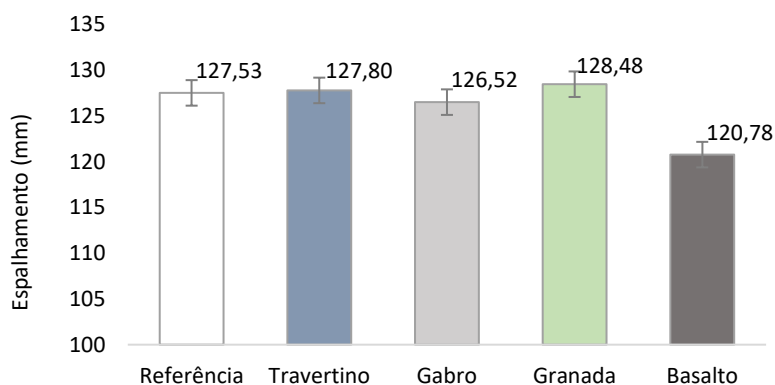


Figura 3 - Resultado do ensaio de espalhamento dos materiais.

Nos ensaios realizados percebe-se que não houve perdas ou ganhos significativos com a introdução dos materiais utilizados. Aquele que apresentou uma melhor condição em comparação à referência foi a granada, que ficou em torno de 1% acima. Já o basalto apresentou um valor abaixo do valor de referência, na ordem de 5%. Porém, as percentagens estão dentro de uma faixa aceitável, não chegando, portanto, a comprometer a trabalhabilidade da mistura.

2.2.4 Moldagem e cura dos provetes

Utilizando moldes cúbicos de 20mm de aresta, fizeram-se 15 provetes de cada uma das argamassas. Encheram-se os moldes com o auxílio de colher pequena, realizando o enchimento por camadas, para minimizar a presença de vazios. Colocou-se os moldes na mesa de espalhamento para compactar (15 pancadas) e retirar o excesso de ar. A superfície foi então regularizada com o auxílio de uma espátula.

Após o preenchimento dos moldes com as misturas, estes foram cobertos com filme de plástico e armazenados em câmara húmida ($18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $93 \pm 2\%$ HR) durante 48 horas. Em seguida, os provetes de argamassa foram retirados dos moldes e colocados num tanque com água. Após os diferentes períodos de cura, aos 7, 28 e 90 dias, o ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NP EN 196-1 [31].

3. Resultados

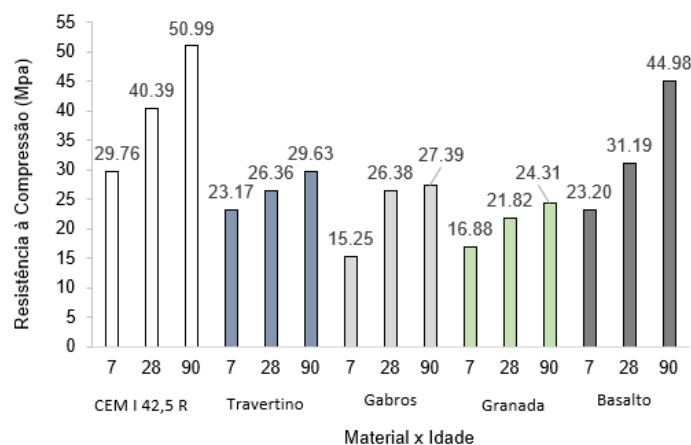
3.1 Resistência à compressão

Uma hora antes do início dos ensaios, em cada uma das idades, os provetes foram retirados da água e secos em estufa (105°C). Após a secagem os provetes foram numerados, pesados em balança de precisão e tiveram as suas dimensões aferidas com paquímetro. Para a compressão foi utilizado prensa hidráulica Loyd com capacidade para 50 kN e os resultados obtidos constam na Tabela 5 e são graficamente apresentados na Figura 4.

Tabela 5 - Resistência à compressão das composições estudadas.

Mistura		Tempo de cura (dias)	Densidade (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)	Tensão de ruptura à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Referência CEM I 42.5	0%	7	2041,43	10,34	0,51	29,76	1,51	5,08
		28	2061,87	12,01	0,58	40,39	3,55	8,80
		90	2071,83	27,94	1,35	50,99	0,94	1,85
Travertino	25%	7	1991,92	14,39	0,72	23,17	1,92	8,29
		28	2075,75	9,85	0,47	26,36	1,70	6,45
		90	1993,02	35,66	1,79	29,63	2,66	8,99
Gabros	25%	7	1949,36	25,61	1,31	15,25	0,97	6,36
		28	2009,45	23,95	1,19	26,38	1,77	6,70
		90	1992,96	25,86	1,30	27,39	1,96	7,17
Granada	25%	7	1966,76	13,89	0,71	16,88	0,98	5,78
		28	2001,43	20,05	1,00	21,82	1,71	7,85
		90	1972,67	18,71	0,95	24,31	1,48	6,11
Basalto	25%	7	2100,98	28,45	1,35	23,20	1,48	6,37
		28	2164,99	9,40	0,43	31,19	2,13	6,84
		90	1987,34	14,49	0,73	44,98	1,94	4,31

De acordo com a Figura 4, em geral existe uma tendência de redução nos valores de resistência à compressão para as argamassas com incorporação de lamias provenientes de rochas ornamentais, independentemente da idade, quando em comparação com a argamassa de referência. O material que apresentou a maior redução (na ordem de 50%) foi a granada. Em relação ao basalto, apesar de haver também uma redução, nota-se uma evolução ao longo do tempo, apresentando valores mais próximos à referência (88% aos 90 dias), o que pode ser considerado bastante promissor, confirmando deste modo os resultados apresentados na literatura atual.

**Figura 4** - Evolução da resistência à compressão das composições estudadas.

A substituição parcial do cimento por lamias (pó de pedra) geralmente resulta na deterioração dos parâmetros de resistência da argamassa, fruto do menor teor de cimento. A incorporação de novos materiais na mistura altera o processo de hidratação do cimento, através de interações físicas e/ou químicas. A reação química está principalmente relacionada às suas propriedades pozolânicas. Aditivos pozolânicos ativos são normalmente dissolvidos nas zonas porosas de elevada alcalinidade da pasta de cimento, libertando íons siliciosos na fase líquida (H_3SiO_4) - [4,32]. Esses íons reagem em solução com íons de cálcio para produzir uma fase CSH, tanto nos poros da pasta como também na superfície das partículas do aditivo.

Investigações disponíveis indicam alguma atividade pozolânica de algumas lamias (calcário e basalto) [33-35]. No entanto, na maioria dos casos, o impacto da lama na hidratação do cimento

está relacionado principalmente com a sua interação física, fruto de fenômenos sobrepostos: aumento da relação água / ligante efetiva e o preenchimento dos poros por partículas duras e de alta resistência mineral.

No caso do basalto, a influência na taxa de hidratação do cimento não parece estar relacionada apenas com o efeito físico, mas também químico. Uma grande área de pó de basalto pode facilitar a cristalização dos produtos de hidratação do cimento, o que contribui para o aumento do grau de hidratação. M.E.I. Saraya [35] observou que o efeito da adição do basalto de grão fino na hidratação do cimento pode ser dividido em duas etapas. No primeiro estágio o basalto atua como um enchimento e o seu efeito na hidratação inicial do cimento está relacionado com a interação física, o que é consistente com os resultados de trabalhos de outros autores sobre o efeito de vários aditivos cristalinos de granulação fina, na hidratação do cimento [36,37]. A segunda etapa consiste em reações minerais mais lentas no agregado, com os íons em solução na pasta de cimento. Alguns minerais encontrados no basalto reagem mais facilmente com os íons majoritariamente presentes nas zonas porosas do betão (argamassa), para formar uma fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) amorfa ou microcristalina e uma fase intermédia de silicato aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) [35].

A substituição parcial do cimento por um material com granulometria mais fina e maior área superficial específica do que o cimento leva ao aumento do número de sítios de nucleação dos produtos de hidratação. Como os hidratos podem ser cristalizados não apenas nas partículas de cimento, mas também na superfície do grão da lama, a taxa e o grau de hidratação das fases do clínquer são aumentados. Isso resulta numa quantidade adicional de fase CSH, menor porosidade da matriz de cimento e, portanto, maior resistência da pasta, especialmente no início do período de hidratação [29].

3.2 Atividade pozolânica (NP 450-1)

A pozolanicidade de um material, ou a sua capacidade de consumir hidróxido de cálcio (portlandite, CH) e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), é determinante para conferir condições a este material como substituto do cimento. Existem vários métodos em uso para medir a pozolanicidade de um material. Tendo como referência a NP 450-1 [38], determinou-se o índice de atividade para cada uma das misturas (nas devidas idades), conforme se apresenta na Tabela 6.

Tabela 6 - Índice de atividade dos materiais por idade.

Mistura		Tempo de cura (d)	Índice de atividade (%)
Travertino	25%	7	78
		28	65
		90	58
Gabros	25%	7	51
		28	65
		90	54
Granada	25%	7	57
		28	54
		90	48
Basalto	25%	7	78
		28	77
		90	88

A NP 450-1 [38] estabelece que o índice de atividade deve ser superior a 75% aos 28 dias, e 85% aos 90 dias. Estabelece, ainda, um limite inferior de 70% para 28 dias e 80% para 90 dias.

Conforme se pode notar nos dados da Tabela 6, o único material que atendeu aos requisitos normativos foi o basalto, indicando que este material tem contributo positivo na mistura, mesmo apresentando alguma redução no que diz respeito à resistência à compressão. Os restantes materiais ficaram bastante abaixo dos mínimos requeridos pela norma, o que permite afirmar que nas condições em que foram utilizados, sem qualquer tratamento prévio (“in natura” desde a origem) tendem a não possuir atividade pozolânica significativa e o seu uso na mistura pode ser

definido como inerte, com redução considerável no desempenho mecânico devido a alteração no processo de hidratação da pasta, uma consequência das alterações na relação efetiva água / ligante.

3.3 Análise termogravimétrica (ATG)

O ensaio de termogravimetria tem sido utilizado cada vez mais para a determinação da atividade pozolânica dos materiais. A avaliação das regiões de variação de massa e energia em função da temperatura permite identificar as reações de desidratação do material. A perda de massa na temperatura em que a portlandite se decompõe, na faixa de 450-550°C [39], permite confirmar a ocorrência da reação pozolânica.

Se um material pozolânico é adicionado na pasta, ocorre consumo de parte do Ca(OH)_2 pelas reações pozolânicas durante a cura. Então, o teor de Ca(OH)_2 detectado na ATG da pasta com pozolana é menor do que em uma pasta de cimento sem adições. Ou seja, quanto maior a pozolanicidade do material, menor será o teor de Ca(OH)_2 detectado na ATG [40]. Percentagem de Portlandite por material estudado, relativamente à referência pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7 - Percentagem de Portlandite por material, relativamente à referência.

Material	Simples = CaOH/ Massa inicial		Residual = CaOH/ Massa 500°C		Normalizado = Residual/ 0.75		% em relação à Referência	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
Referência	11,85	11,73	15,68	15,08	15,68	15,08	-	-
Travertino	8,83	9,35	11,24	11,33	14,98	15,11	95,56	100,18
Gabros	9,75	8,99	12,35	10,77	16,46	14,35	104,99	95,19
Granada	9,76	9,19	12,49	11,14	16,66	14,86	106,23	98,54
Basalto	9,10	9,91	11,65	12,32	15,53	16,42	99,05	108,91

Na hidratação do cimento, alguns produtos podem ser detectados pelo método das curvas de ATG e DTG (diferencial da ATG). Nomeadamente o gesso não reagido na faixa de temperatura entre 140-170 °C, o gel do C-S-H a temperaturas abaixo de 150°C, etringita em temperaturas de 120-130°C, hidróxido de cálcio na faixa de 450-550°C, e carbonato de cálcio a 750-850 °C [39,41].

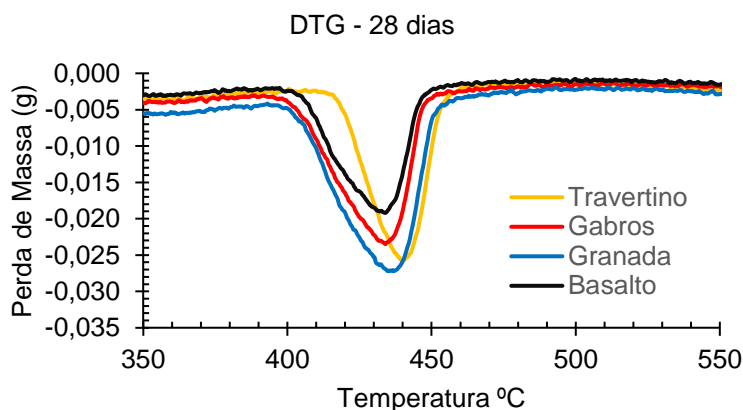


Figura 5 - Gráfico da DTG dos materiais aos 28 dias, na zona de decomposição do CH.

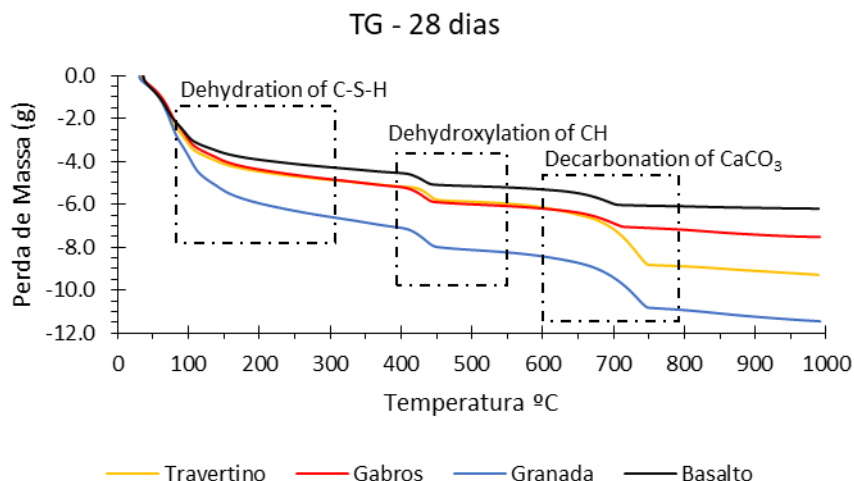


Figura 6 - Gráfico da ATG dos materiais estudados, aos 28 dias.

Conforme se pode notar nas Figuras 5 e 6, o basalto foi o material que apresentou melhor desempenho, ou seja, evidenciou uma menor perda de massa com o aumento da temperatura.

Quando se analisa a evolução das percentagens de portlandite normalizada, devido à percentagem de 25% de substituição (Tabela 7), nota-se, porém, que não houve grandes variações em relação à pasta de referência, pois as percentagens variaram entre 95,19% e 108,91%, estando numa faixa semelhante às ocorridas nas amostras dos ensaios à compressão (coeficiente de variação). Aos 28 dias, travertino (calcário) e o basalto apresentaram índices praticamente iguais ao da pasta sem incorporações, enquanto gabros e granada apresentaram pequena variação positiva na ordem de 5%, o que pode indicar que o efeito físico destes materiais, provavelmente, permitiu uma melhor hidratação do cimento nas primeiras idades. Aos 90 dias, ocorreu uma ligeira inversão nesta tendência. O travertino (calcário) permanece praticamente igual à referência, enquanto o basalto se mostrou ligeiramente superior, aproximadamente 9% maior. Já quanto aos gabros e à granada apresentaram índices ligeiramente inferiores, não chegando a 5% de redução.

Os resultados demonstraram que o efeito físico das incorporações afetou a formação da portlandita nas pastas. As variações das percentagens de portlandite identificadas, após normalização, foram muito pequenas, o que nos leva a crer que não existiu atividade pozolânica significativa. Apesar disto, os resultados são promissores e indicam a necessidade de ampliar os estudos em relação à incorporação do basalto.

4. Conclusões

De um modo geral houve diminuição acentuada da resistência à compressão nas argamassas com incorporação dos resíduos em estudo, exceto no caso do basalto, cuja redução foi menos intensa, mas ainda assim relevante.

Esse resultado deve-se à presença do material inerte, como substituto do cimento, alterando o processo de hidratação do cimento e com influência direta na razão água/ligante efetiva.

O basalto indicou ser um material interessante, requerendo, no entanto, estudos mais detalhados sobre seu uso, incluindo os seus efeitos a longo prazo (durabilidade). Segundo a NP 450-1 [38] o mesmo atinge os requisitos para ser considerado um material pozolânico. No entanto, tendo em consideração as análises termogravimétricas este fato não foi evidenciado de forma muito relevante, pois após a normalização a percentagem de portlandite ficou muito próxima da referência.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020 e UIDP/04047/2020, e no âmbito do projeto com a referência 2000.03197.PTDC, GlassCON.

Referências

- [1] Global Cement and Concrete Association (GCCA). <http://gccassociation.org>, 2022 (acesso em 15 de agosto de 2022).
- [2] M. Dobiszewska, Waste materials used in making mortar and concrete, *J. Mater. Educ.*, 39 (2017) 133-156. <https://oai:dlibra.pbs.edu.pl:1169>.
- [3] M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 78 (2015) 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- [4] W. Kurdowski, *Cement and concrete chemistry*, first edition, Springer Dordrecht, Berlim, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- [5] Cembureau, The European Cement Association. <http://cembureau.eu/library/reports/activityreport>, 2011 (acesso em 15 de agosto de 2022).
- [6] K. Scrivener, Issues in sustainability in cements and concrete, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 91 (2012) 47-50. http://ceramics.org/wp-content/uploads/2012/06/bulletin_jul12.
- [7] V.M. Malhotra, Reducing CO₂ emissions: the role of fly ash and other supplementary cementitious materials, *Concr. Int.*, 28 (2006) 42-45.
- [8] M.S. Alves, Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos, Dissertação de M.Sc, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008.
- [9] A.A. Aliabdo, A.E.M.A. Elmoaty, E.M. Auda, Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, *Constr. Build. Mater.*, 50 (2014) 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>.
- [10] M. Sardinha, J. Brito, R. Rodrigues, Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge, *Constr. Build. Mater.*, 119 (2016) 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>.
- [11] H.S. Arel, Recyclability of waste marble in concrete production, *J. Clean. Prod.*, 131 (2016) 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.052>.
- [12] S.H.M. Mittri, M.K. Degen, G.L. Vieira, J.S. Vazzoler, L.H.C.H. Rodrigues, Análise da caracterização pozolânica do resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente e seu efeito nas propriedades mecânicas de concretos, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 11 (2018) 1186-1207. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600004>.
- [13] K. Vardhan, S. Goyal, R. Siddique, M. Singh, Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement, *Constr. Build. Mater.*, 96 (2015) 615-621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071>.
- [14] M. Heikal, H. El-Didamony, M.S. Morsy, Limestone-filled pozzolanic cement, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 1827-1834. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00402-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00402-6).
- [15] C. Yüksel, A. Mardani-Aghabaglou, A. Beglarigale, H. Yazici, K. Ramyar, O. Andic-Cakir, Influence of water/powder ratio and powder type on alkali-silica reactivity and transport properties of self-consolidating concrete, *Mater. Struct.*, 49 (2016) 289-299. <http://doi.org/10.1617/s11527-014-0497-y>.

- [16] M.A. Abd-El-Aziz, S. Abd-El-Aleem, W.M. Menshawy, Effect of fine minerale in local quarry dust of limestone and basalt on the properties of Portland cement paste and mortars, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 3 (2014) 1038-1056.
- [17] N. Almeida, F. Branco, J. de Brito, J.R. Santos, High-performance concrete with recycled stone slurry, *Cem. Concr. Res.*, 37 (2007) 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.003>.
- [18] H.Y. Aruntas, M. Gürü, M. Dayi, I. Tekin, Utilization of waste marble dust as an additive in cement production, *Mater. Des.*, 31 (2010) 4039-4042. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.036>.
- [19] E. Bacarji, R.D.T. Filho, E.A.B. Koenders, E.P.Figueiredo, J.L.M.P. Lopes, Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers, *Constr. Build. Mater.*, 45 (2013) 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.
- [20] H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete, *Sci. Res. Essay.*, 2 (2007) 372-379.
- [21] B. Demirel, The effects of waste marble dust applying as a fine sand on the mechanical properties of concrete, *Cem. Wapno Beton*, 5 (2010) 259-267.
- [22] M. Gesoglu, E. Guneyisi, M.E. Kocabag, V. Bayram, K. Mermerdas, Fresh and hardened characteristics of self compacting concrete made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, *Constr. Build. Mater.*, 37 (2012) 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>.
- [23] A. Rana, P. Kalla, H. K.Verma, J. K. Mohnot, Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review, *J. Clean. Prod.*, 135 (2016) 312-331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>.
- [24] European Committee for Standardization (CEN). EN 1097-2:2002, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação, 2002.
- [25] European Committee for Standardization (CEN). EN 196-6:2019, Métodos de ensaio de cimentos - parte 6: determinação da finura, 2019.
- [26] European Committee for Standardization (CEN). EN 1097-6:2004, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água, 2004.
- [27] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, fourth ed., Longman, Essex 1995.
- [28] M. Nehdi, S. Mindess, P. C. Aitcin, Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles, *Cem. Concr. Res.*, 28 (1998) 687-697. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00022-2).
- [29] Y. Knop, A. Peled, R. Cohen, Influences of limestone particle size distributions and contents on blended cement properties, *Constr. Build. Mater.*, 71 (2014) 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.004>.
- [30] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-3:2001/A2:2007, Methods of test for mortar for masonry - part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2007.
- [31] European Committee for Standardization (CEN). NP EN 196-1:2017, Métodos de ensaio de cimentos - parte 1: determinação das resistências mecânicas, 2017.
- [32] H. Uchikawa, Effect of blending components on hydration and structure formation, In: eighth International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.
- [33] L. Laibao, Y. Yunsheng, Z. Wenhua, Z. Zhiyong, Z. Lihua, Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of

- cement, *Constr. Build. Mater.*, 28 (2013) 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.021>.
- [34] I. Soroka, N. Setter, The effect of fillers on strength of cement mortars, *Cem. Concr. Res.*, 7 (1977) 449-456. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(77\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(77)90073-4).
- [35] M.E.I. Saraya, Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amounts of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study, *Constr. Build. Mater.*, 72 (2014) 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>.
- [36] E.M.J. Berodier, Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration, Ph.D. Thesis, Federal Institute of Technology in Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2015.
- [37] E. Berodier, K. Scrivener, Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H, *J. Am. Ceram. Soc.*, 97 (2014) 3764-3773. <https://doi.org/10.1111/jace.13177>.
- [38] European Committee for Standardization (CEN). EN 450-1:2006, Cinzas volantes para betão - parte 1: definição, especificações e critérios de conformidade, 2006.
- [39] J.H.S. Rêgo, As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas, dissertação de Ph.D., UNB, Brasília, Brasil, 2004.
- [40] L.M. Costa, Influência da pozolanicidade na ativação alcalina, dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2020.
- [41] V.S. Ramachandram, Thermal analysis, In: *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, J. Build. Material Series, (2001) 127-173. <https://doi.org/10.1016/B978-081551437-4.50007-2>.
- [42] International Energy Agency, *Cement Roadmaps*. <https://www.iea.org/roadmaps>, 2009 (acesso em 15 de agosto de 2022).
- [43] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolioc, Sustainable cement production present and future, *Cem. Concr. Res.*, 41 (2011) 642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.

ORCID

O. Moreira	0009-0004-6843-446X (https://orcid.org/0009-0004-6843-446X)
R. Malheiro	0000-0001-6922-9813 (https://orcid.org/0000-0001-6922-9813)
C. Jesus	0000-0001-5119-3867 (https://orcid.org/0000-0001-5119-3867)
A. Camões	0000-0002-9677-3627 (https://orcid.org/0000-0002-9677-3627)
M.J. Ribeiro	0000-0001-5744-3011 (https://orcid.org/0000-0001-5744-3011)

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.

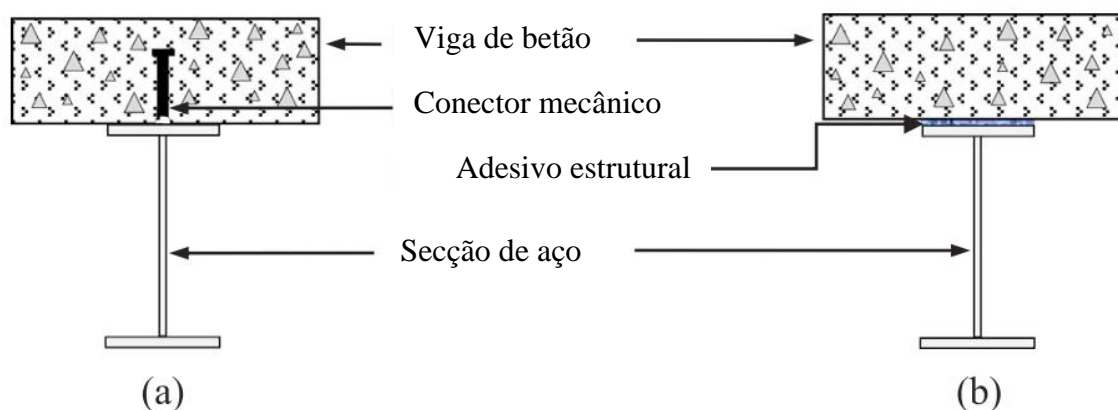


Figura 1 – Elemento composto, mecanicamente conectado (a), colado (b) [3].

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].

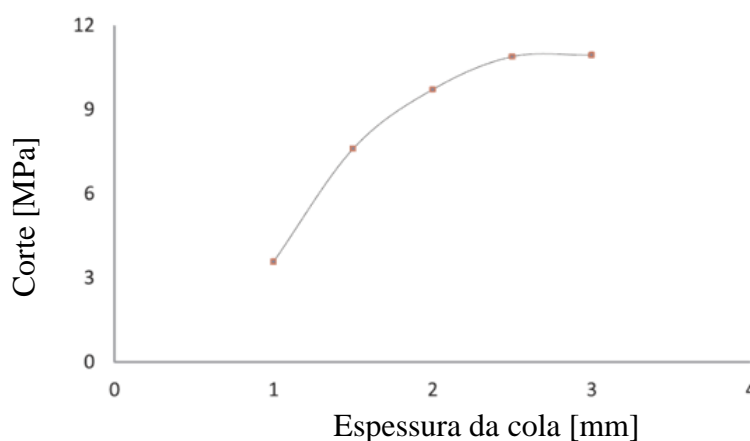


Figura 2 – Variação da resistência ao corte em função da espessura de colagem [3].

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

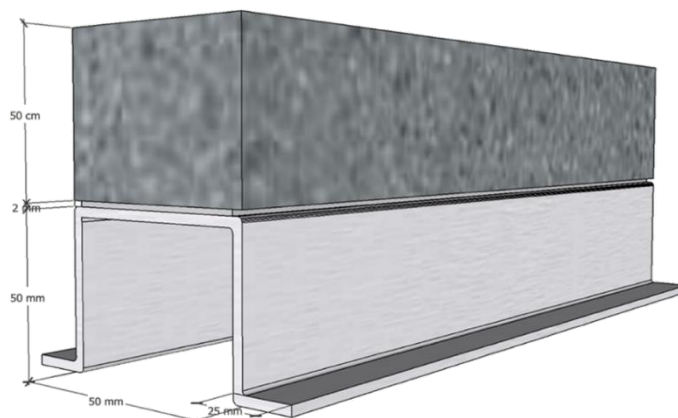
A decisão de utilizar uma resina epoxídica como elemento de ligação é resultado do reconhecido desempenho deste tipo de cola nas ligações entre os mais diversos tipos de materiais, inclusive na união entre elementos de materiais distintos.

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.

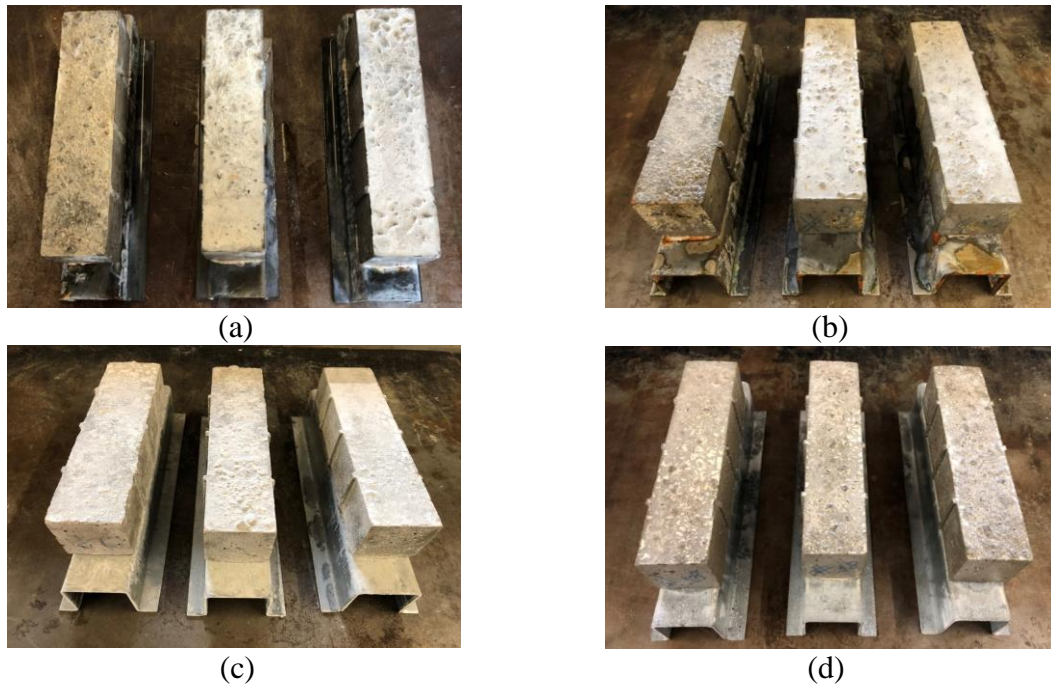


Figura 4 – Provetes após exposição de 30 (a) e 60 (b) dias a solução concentrada de NaCl e após exposição de 30 (c) e 60 (d) dias a solução concentrada de MgSO₄.

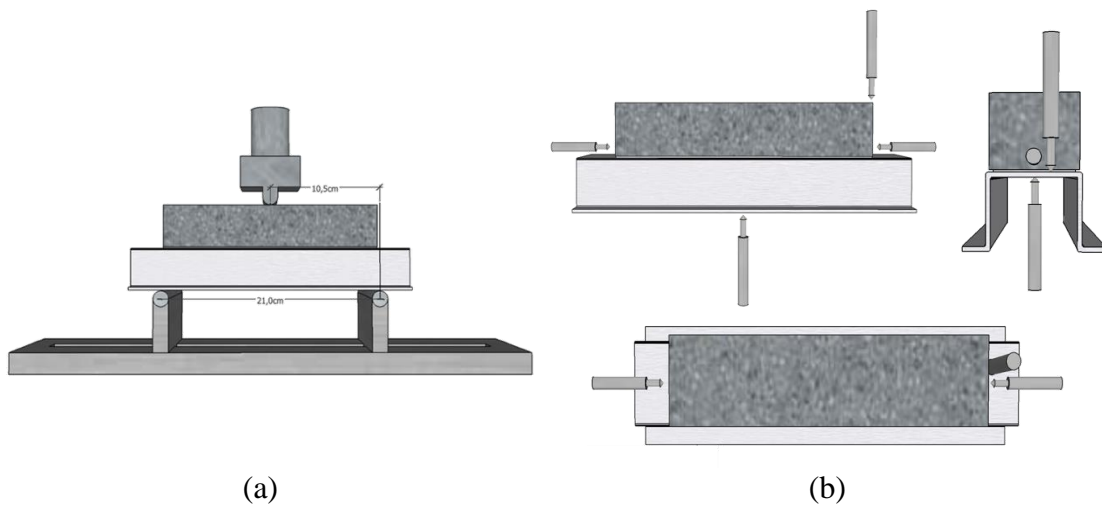


Figura 5 – (a) Desenho esquemático do posicionamento dos apoios e aplicação de carga e (b) disposição dos LVDT's.

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.

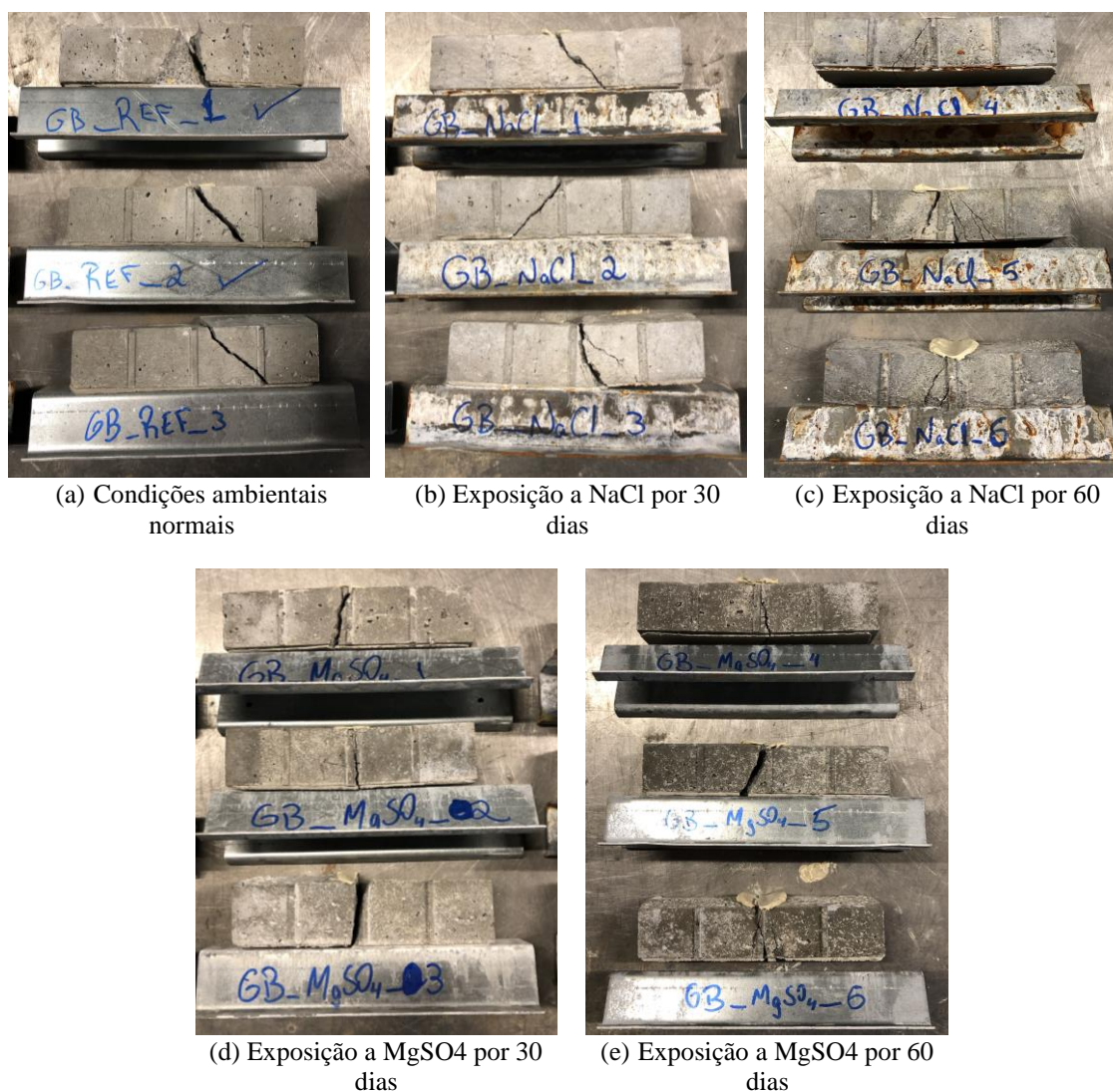


Figura 6 – Provetes após ensaios de flexão em 3 pontos.

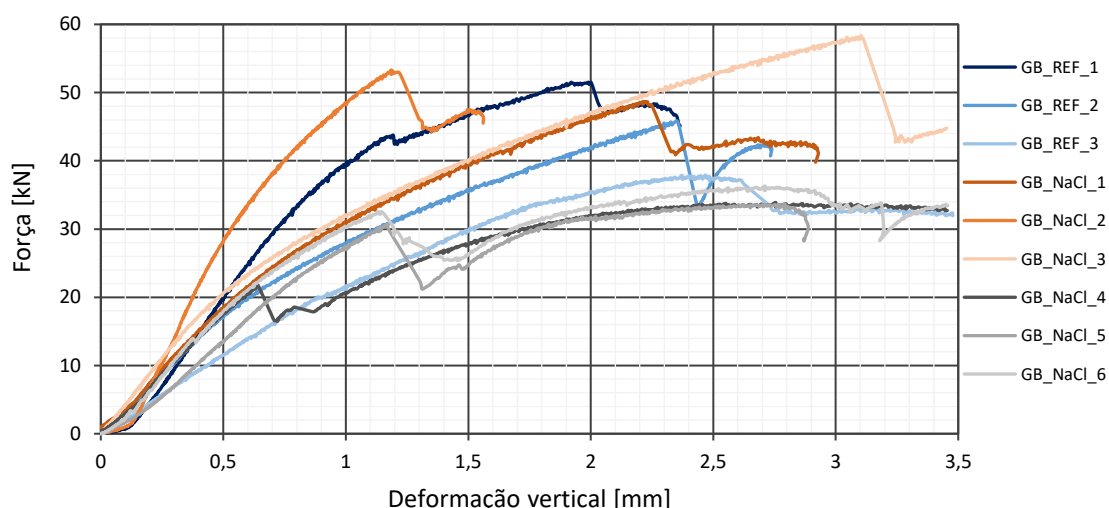
A Tabela 4 resume os resultados referentes à carga máxima atingida e à forma de rotura de cada um dos quinze provetes ensaiados. Os resultados são subdivididos considerando os cinco grupos definidos com três provetes cada, que estiveram sob as mesmas condições e, portanto, pertencem à mesma família.

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.

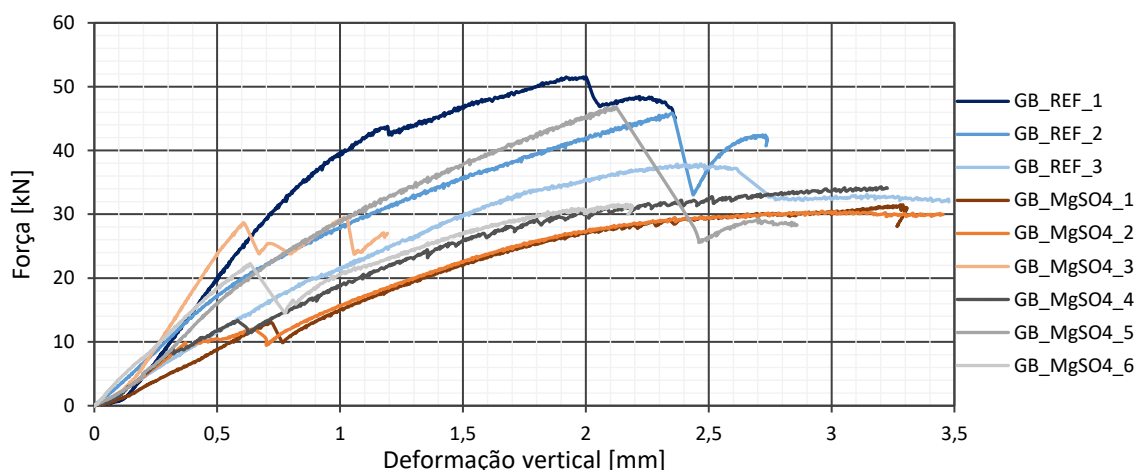


Figura 8 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$)

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)