

Universidade da Beira Interior - Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura

**Curso:**

**Nature-Based Carbonation: From Biomass and Wool to Circular Construction Materials**

## 1. Estrutura do Curso

O curso foi estruturado em 4 (quatro) módulos conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Estruturação do curso.

Módulo	Título	Objetivo
<b>Módulo 1</b>	Introdução à Carbonatação Natural e Acelerada	Compreender os princípios científicos da carbonatação e seu papel na construção sustentável.
<b>Módulo 2</b>	Biomassa e Lã como Recursos Circulares	Explorar o potencial de resíduos regionais (biomassa e lã) como matéria-prima de baixo carbono.
<b>Módulo 3</b>	Processos e Tecnologias de Carbonatação	Entender métodos laboratoriais e de campo para acelerar a carbonatação e reduzir emissões.
<b>Módulo 4</b>	Parte prática - Preparação e carbonatação acelerada de misturas com lã e biomassa	Demonstrar a eficácia da lã e da biomassa na produção de materiais circulares por carbonatação acelerada e a sua aplicação em componentes de construção modular
	Avaliação Final	Avaliação o conhecimento adquirido.

## Módulo 1 – Introdução à Carbonatação Natural e Acelerada

### 1.1 Introdução

O curso “Nature-Based Carbonation: From Biomass and Wool to Circular Construction Materials” integra-se na European Bauhaus Academy (NEBA - New European Bauhaus Academy Alliance), financiada pela Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU) ao abrigo do programa Horizon Europe (Grant Agreement nº 101160532).

Trata-se de um curso prático de laboratório, desenvolvido no espírito da Nova Bauhaus Europeia, que promove a aprendizagem por meio da experimentação, do trabalho colaborativo e da interdisciplinaridade. Reúne estudantes, investigadores, empresas, associações e gabinetes de arquitetura, com o objetivo de explorar a capacidade coletiva de desenvolver inovação circular a partir de materiais e recursos regionais.

O curso centra-se na aprendizagem de como transformar resíduos em materiais circulares – misturas que endurecem com a absorção de CO<sub>2</sub> e que incorporam lã e biomassa. Estes materiais, à base de escórias de forno de arco elétrico e de outros subprodutos ricos em cálcio e magnésio, endurecem por meio de um processo denominado carbonatação acelerada.

A lã e a biomassa não participam diretamente da reação química, mas desempenham um papel fundamental ao aumentar a porosidade do material, favorecendo a difusão do CO<sub>2</sub> e melhorando as propriedades térmicas e mecânicas das peças produzidas.

### 1.2 O que é mineralização ou carbonatação?

À escala geológica, o ciclo carbonato-silicato é um processo natural que transforma o CO<sub>2</sub> atmosférico em ácido carbónico, o qual reage com minerais de cálcio e magnésio, originando carbonatos estáveis, rochas sedimentares que armazenam carbono durante milhões de anos, Figura 1. A baixa taxa de reação deve-se à reduzida concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico [1]. Esse processo também é conhecido como carbonatação mineral.

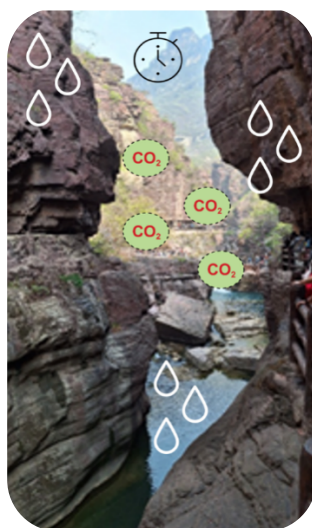
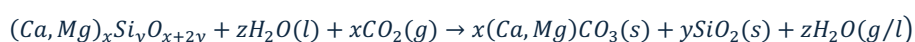


Figura 1: Ilustração de rocha calcária carbonatada a milhares de anos.

(1)

Reação para a formação de carbonatos e sílica a partir de silicatos



A equação química (1) representa, de forma geral, o processo de carbonatação mineral, onde minerais silicatados reagem com água ( $H_2O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para formar carbonatos sólidos de cálcio e magnésio -  $(Ca,Mg)CO_3$ , sílica sólida -  $SiO_2$  e água (na forma líquida ou gasosa) [2].

### 1.3 Diferença entre carbonatação natural e acelerada.

Ao contrário da carbonatação natural, que pode levar milhares ou milhões de anos, a carbonatação acelerada é um processo rápido, inspirado no processo natural, mas realizado em apenas algumas horas sob condições controladas de laboratório.

A carbonatação acelerada baseia-se na reação entre o  $CO_2$  e materiais ricos em cálcio e magnésio. Quando expostos ao gás em condições adequadas de temperatura, pressão e humidade, formam-se carbonatos estáveis ( $CaCO_3$  e  $MgCO_3$ ), que atuam como ligantes, conferindo resistência e durabilidade ao material [3].

Por exemplo, no caso das escórias de forno de arco elétrico, a presença de óxidos livres de cálcio e magnésio é determinante para a eficácia do processo. A cura é realizada numa câmara de carbonatação, na qual os parâmetros de temperatura e pressão são cuidadosamente ajustados para otimizar a absorção de  $CO_2$  [4].

### 1.4 Papel do $CO_2$ e dos minerais no processo.

Durante o processo, o  $CO_2$  difunde-se pela humidade presente nos poros do material e forma ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ). Este ioniza-se em iões bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) e carbonato ( $CO_3^{2-}$ ), que reagem com os iões de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e de magnésio ( $Mg^{2+}$ ), produzindo carbonatos sólidos. Este mecanismo pode ocorrer por carbonatação de filme fino, quando o  $CO_2$  circula em torno das partículas, ou em meio aquoso, quando as partículas estão parcialmente imersas, como ilustrado na Figura 2.

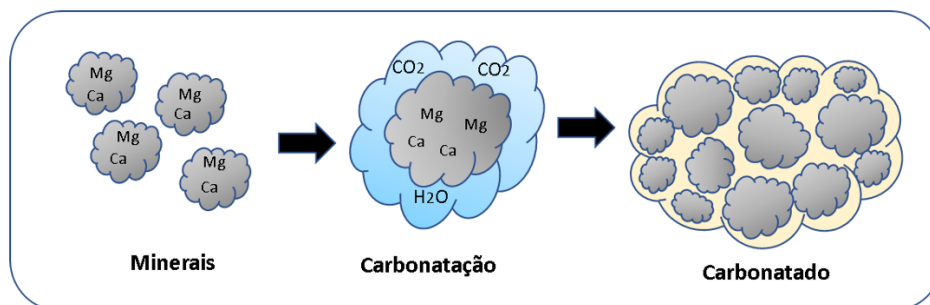


Figura 2: ilustração do filme de água reagindo com  $CO_2$  e minerais, formando carbonatos.

A tecnologia pode ser aplicada a diversos resíduos industriais e minerais ricos em cálcio e magnésio, como escórias siderúrgicas (EAFS, BOFS, GGBFS), poeiras de cimento, cinzas de biomassa e até salmouras de processos de dessalinização. O princípio é simples: reutilizar resíduos que contêm óxidos reativos, transformando-os em materiais de construção com balanço de carbono negativo [4].

A eficiência da carbonatação depende de diversos parâmetros. Entre os mais importantes estão a concentração de  $CO_2$ , a temperatura, a pressão, o teor de humidade, o tamanho das partículas, a área superficial e o tempo de reação. Concentrações mais elevadas de  $CO_2$  e temperaturas moderadas promovem reações mais rápidas e completas. Pressões mais altas aumentam a solubilidade do  $CO_2$ , enquanto a presença adequada de humidade é essencial para dissolvê-lo e iniciar a reação. Partículas mais finas e porosas oferecem uma maior área de contacto e, portanto, maior eficiência [5].

Um dos principais desafios do processo é garantir a carbonatação uniforme na superfície e no interior dos produtos. O  $\text{CO}_2$  reage primeiro na superfície, formando uma camada externa que pode dificultar a penetração do gás nas zonas internas. A porosidade e a pressão de compactação determinam a facilidade com que o  $\text{CO}_2$  se difunde no interior da amostra, conforme Figura 3. É necessário encontrar o equilíbrio entre uma estrutura suficientemente aberta para permitir a difusão e suficientemente densa para assegurar resistência e durabilidade.

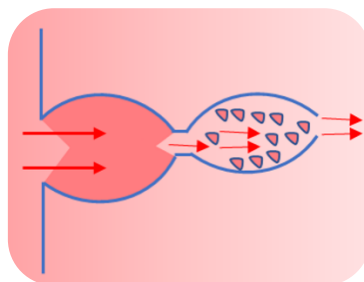


Figura 3: Dinâmica do  $\text{CO}_2$  penetrando pelos poros da amostra.

A utilização de diferentes tipos de resíduos pode melhorar significativamente o processo. As cinzas volantes de biomassa, por exemplo, ajudam a criar uma porosidade mais equilibrada, permitindo que o  $\text{CO}_2$  penetre melhor no material. Essa microestrutura mais aberta favorece a difusão do gás e aumenta o grau de carbonatação.

A incorporação de fibras naturais, como a lã, ou de têxteis reciclados, entre 1 e 3%, tem igualmente um efeito importante. As fibras criam percursos adicionais de difusão para o  $\text{CO}_2$ , aumentando a absorção e a uniformidade da reação. Além disso, atuam como microreforços, melhorando a resistência mecânica e o comportamento térmico dos materiais.

### 1.5 Como a carbonatação contribui para reduzir emissões na construção.

A tecnologia de carbonatação acelerada tem potencial para ser integrada em modelos regionais e nacionais de economia circular. Permite a valorização de resíduos provenientes da indústria siderúrgica, da biomassa, da construção e de outros setores, gerando novos materiais de construção com baixo impacto ambiental. Este modelo promove sinergias entre diferentes indústrias e comunidades, reduz as emissões de  $\text{CO}_2$  e cria oportunidades locais de inovação sustentável[6].

A carbonatação acelerada demonstra que é possível capturar  $\text{CO}_2$  e transformá-lo em matéria sólida útil, integrando resíduos industriais e naturais num ciclo produtivo sustentável. O processo combina conhecimento científico, tecnologia e valorização de recursos locais, traduzindo o espírito da Nova Bauhaus Europeia – unir beleza, sustentabilidade e inclusão na criação de novos materiais para a construção do futuro.

O desenvolvimento de novos produtos na construção civil capazes de capturar  $\text{CO}_2$  já é uma realidade. Por exemplo, a DarkCO2 e ECOBLOCKS utilizaram escória e  $\text{CO}_2$  para desenvolver blocos de 25 kg [7], enquanto a Carbon8 empregou resíduos industriais para produzir agregados denominados CircaBuild [8].

## Módulo 2 – Biomassa e Lã como Recursos Circulares

### 2.1 Biomassa

A biomassa refere-se amplamente à matéria orgânica, incluindo plantas, animais e microrganismos, tornando-a uma matéria-prima abundante, renovável e de baixa poluição [9].



## 2.2 Fontes regionais de biomassa

- Biomassa florestal/resíduos florestais: Este é o tipo de biomassa mais significativo em Portugal. Inclui restos de exploração florestal, como ramos, folhagem e madeira proveniente do corte de árvores, bem como resíduos da indústria de pasta e papel. A Figura 4 ilustra o processo de preparação da biomassa para a produção de energia.



*Figura 4: A vegetação é triturada para ser usada na produção de energia.*

- Resíduos agrícolas ou agroindustriais/de exploração animal Biomassa proveniente de culturas agrícolas, sobras de culturas, resíduos de produção agrícola ou pecuária. Por exemplo, a lã é um recurso orgânico renovável proveniente de animais, principalmente ovinos, conforme a Figura 5. Por natureza, encaixa-se na categoria de biomassa animal. Em Portugal, existe produção de lã ligada sobretudo às regiões com tradição de pastorícia: como Beira Interior (ex.: Covilhã — histórica indústria lanífrica)



*Figura 5: Ovelhas no pasto.*

## Módulo 3 – Processos e Tecnologias de Carbonatação

### 3.1 O processo de Carbonatação

O processo de carbonatação acelerada é composto por várias etapas, cada uma desempenhando uma função específica. A etapa de moagem, por exemplo, consiste na preparação da matéria-prima, com o objetivo de tornar o material ligante mais reativo. Em seguida, ocorre a etapa de mistura, destinada à homogeneização dos materiais, garantindo que os componentes estejam distribuídos proporcionalmente na pasta final.

Após a mistura, o material é introduzido em moldes com o formato desejado e submetido à compactação estática, o que permite que as partículas se unam e formem uma massa coesa (por exemplo, blocos ou painéis). Esses elementos moldados são posteriormente colocados em uma câmara preenchida com CO<sub>2</sub>, sob condições controladas de pressão, temperatura e humidade. Cabe destacar que cada um desses parâmetros influencia diretamente o processo de cura dos provetes.

Após um período de cura, geralmente de 24 horas, os provetes são retirados e colocados em estufa pelo mesmo período para estabilização. Concluída essa etapa, os produtos são então submetidos aos ensaios e testes laboratoriais. A Figura 1 ilustra o processo de carbonatação passo a passo.

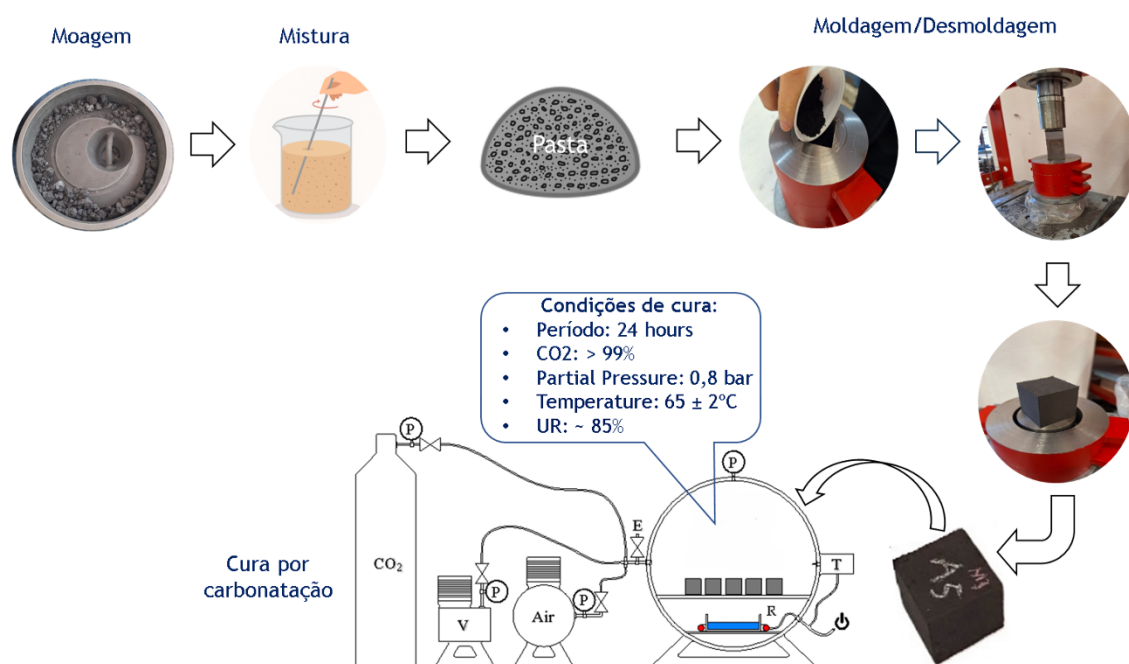


Figura 6: Passo a passo do processo de carbonatação.

## Módulo 4 – Parte prática - Preparação e carbonatação acelerada de misturas com lâ e biomassa

### 4.1 Introdução

Neste módulo, os participantes aprendem a preparar misturas à base de escórias de forno de arco elétrico e outros subprodutos ricos em cálcio e magnésio, que endurecem com a absorção de CO<sub>2</sub> num processo designado por carbonatação acelerada, incorporando também lâ e biomassa.

O processo envolve a preparação das misturas, conformação e compactação estática, e a carbonatação direta, realizada numa câmara de carbonatação em condições controladas de humidade, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, conforme estudado no módulo anterior.

Serão produzidas e testadas diferentes composições em protótipos de pequenas dimensões, integrando materiais e conhecimentos provenientes da comunidade local. A atividade visa exemplificar como podem ser desenvolvidos materiais circulares a partir de resíduos e

subprodutos capazes de endurecer pela absorção de CO<sub>2</sub>, incorporando subprodutos regionais e gerando peças leves e resistentes, adequadas à construção modular.

A presença de fibras de lã, biochar e outras fibras vegetais altera as propriedades das peças, aumentando a porosidade e os percursos internos para a difusão do CO<sub>2</sub>, o que facilita a carbonatação. Por outro lado, pode melhorar suas propriedades mecânicas.

As misturas podem ser preparadas sem necessidade de água potável; a água utilizada não é absorvida pelas escórias nem pelos resíduos minerais e pode ser totalmente recuperada, podendo mesmo ser água do mar ou água residual.

Durante a componente experimental, serão realizadas medições simples de verificação da absorção de CO<sub>2</sub>, de avaliação qualitativa da resistência à passagem de calor e de avaliação quantitativa da resistência à compressão, com o objetivo de compreender o comportamento e o potencial desses materiais.

**Objetivo geral:** demonstrar a eficácia da lã e da biomassa na produção de materiais circulares por carbonatação acelerada e sua aplicação em componentes de construção modular, capazes de sequestrar CO<sub>2</sub>, reduzir o impacto ambiental e melhorar o desempenho térmico das construções.

## 4.2 Procedimentos Experimentais

### 4.2.1 Preparação da matéria-prima

Nessa etapa, o ligante (escória) é moído num moinho de disco (Figura 7) para torná-lo mais fino e reativo, enquanto os agregados (por exemplo, lã e biomassa) são processados para aumentar a porosidade da mistura, característica essencial para a penetração do CO<sub>2</sub>. Para isso, a lã e a biomassa passam por um processo de corte em moinho de lâminas (Figura 7).



Figura 7: Moagem da escória e corte da lã.

### 4.2.2 Misturas a serem produzidas

A Tabela 2 abaixo ilustra as misturas para a produção de peças de aproximadamente 30 x 16 cm, com 1,5 cm de espessura.

Tabela 2: Formulações Experimentais e Parâmetros de Mistura.

Mistura	Escória de forno de arco elétrico	Areia de rio	Lã	Fibras de biomassa	Óxido de magnésio reativo	Areia de Escória	Água
M1	700g	18g	45g/45g	-	200g	-	240g
M2	500g	-	70g	-	120g	200g	200g
M3	500g	-	-	60g	120g	200g	200g

#### 4.2.3 Preparação e moldagem das misturas

O primeiro passo é selecionar uma ou duas formulações da tabela anterior. Em seguida, pesar e misturar os componentes, homogeneizando-os a seco antes de adicionar a lã, o biochar e/ou as fibras. Segue o exemplo da mistura M3 (ver Figura 8).



Figura 8: Formulação da pasta.

Após a homogeneização (Figura 9) dos materiais secos, adiciona-se água conforme a formulação escolhida, podendo ser utilizada água não potável ou água residual.



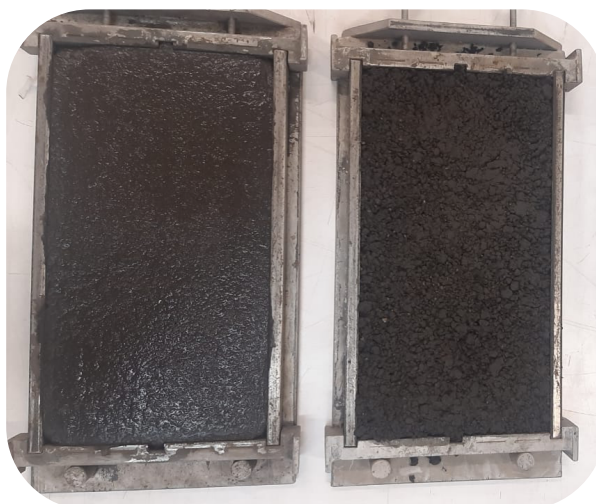
Figura 9: Homogeneização do material



Em seguida, a mistura é colocada em moldes ou placas disponíveis (Figura 10), realizando-se a compactação estática e, posteriormente, o acabamento da superfície (ver Figura 11).



*Figura 10: Preparação dos moldes*



*Figura 11: Provetes preparados.*

#### 4.2.4 Carbonatação acelerada

As peças são colocadas na câmara de carbonatação com controle de humidade, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, conforme a Figura 12.

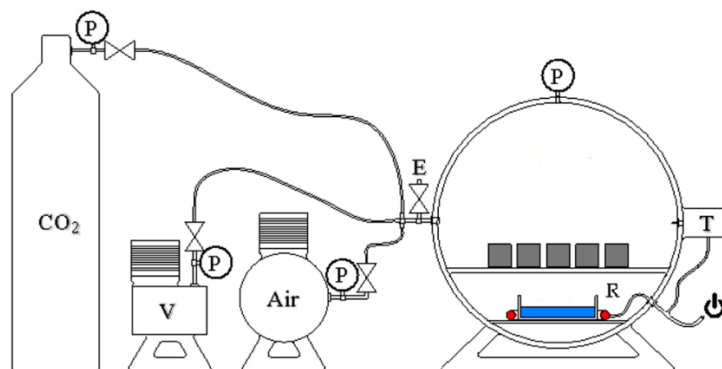


Figura 12: Sistema de cura por carbonatação.

As condições de operação são de 0,8 bar de pressão diferencial, 60 °C de temperatura e 24 horas de exposição.

Após o processo de carbonatação, deve-se garantir ventilação adequada ao abrir a câmara e utilizar sempre equipamentos de proteção individual (EPI).

#### 4.2.5 Verificação e medições após carbonatação

No dia seguinte, após 24 horas de exposição, verificar as peças produzidas e observar se apresentaram ganho de resistência (ver Figura 13).



Figura 13: Abertura da câmara e verificação dos provetes.

Em seguida, colocar as peças numa estufa a 60-70 °C durante 1 hora, deixar arrefecer e pesar a massa das peças após a carbonatação, conforme Figura 14.



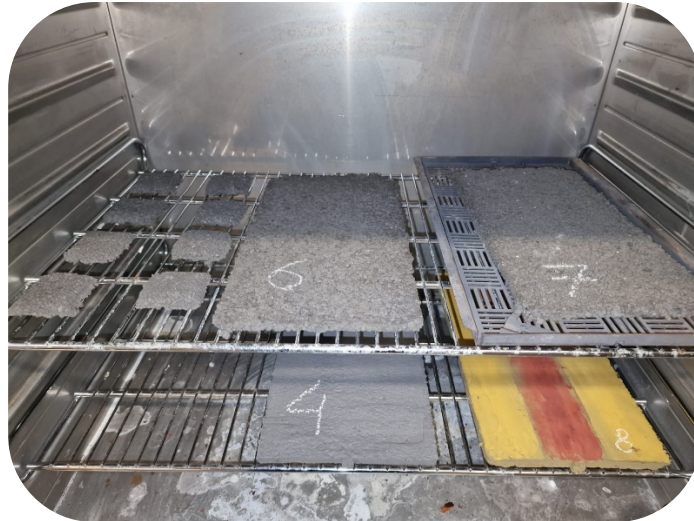


Figura 14: Estabilização dos provetes em estufa.

Com o objetivo de determinar a diferença de massa resultante do processo de carbonatação ( $\Delta m$ ), é necessário calcular a diferença entre a massa final ( $m_f$ ) da amostra após o ensaio com a massa inicial da mistura ( $m_i$ ) e a massa inicial ( $m_{H_2O}$ ), desconsiderando a água presente inicialmente ( $m_{H_2O}$ ).

$$\Delta m = m_f - (m_i - m_{H_2O})$$

Concluir com base nos resultados observados e discutir o ganho de massa associado à absorção de  $CO_2$ . Deve-se observar que o valor de  $\Delta m$  representa o ganho ou a perda de massa associada à reação de carbonatação. Se  $\Delta m > 0$ , ocorre um ganho de massa, geralmente devido à incorporação de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na amostra. Por outro lado, se  $\Delta m < 0$ , verifica-se uma perda de massa, o que indica a liberação de componentes voláteis ou a decomposição de produtos.

Em paralelo, realizar os ensaios de resistência à compressão nos provetes pequenos produzidos, conforme Figura 15.



Figura 15: Ensaio de compressão.

Proceder também à avaliação comparativa de resistência térmica, utilizando uma placa de aquecimento ajustada a 40-50 °C. Após 5 minutos em contacto com a fonte de calor, medir a temperatura superficial com um termómetro laser em duas placas comparáveis e registar qual apresenta o menor aumento de temperatura, conforme a Figura 16.



*Figura 16: Teste de resistência térmica.*

Registar todos os dados relativos às massas, às condições de exposição, à resistência mecânica, ao comportamento térmico e às observações visuais.

#### 4.2.6 Resultados Esperados e Análise

Espera-se que a adição de lã e de biomassa aumente o grau de carbonatação da escória, devido à maior porosidade e à difusão mais eficaz do CO<sub>2</sub>.

As amostras tratadas com lã e biomassa poderão apresentar menor densidade e ligeira redução da resistência mecânica, mantendo, contudo, boa resistência mecânica.

Prevê-se melhoria do comportamento térmico e maior capacidade de isolamento e de retenção de calor.

#### 4.2.7 Conclusão

Concluir sobre a eficácia da lã e da biomassa na carbonatação da escória e sobre as implicações desse processo para a indústria da construção sustentável, considerando seu potencial uso como material de revestimento, isolamento térmico e componentes modulares de baixo impacto ambiental.

## 5. Avaliação Final

**Objetivo:** Consolidar o conhecimento adquirido e avaliar a compreensão.

### Quiz Final (10 Perguntas)

- 1) O que é carbonatação acelerada?
- 2) O que diferencia a carbonatação natural da carbonatação acelerada?
- 3) Cite dois exemplos de fontes regionais de biomassa.
- 4) Qual é o principal benefício ambiental da carbonatação?
- 5) Qual o papel da lâ nos materiais carbonatados?
- 6) Quais variáveis influenciam a velocidade da carbonatação?
- 7) Qual é a reação química principal que ocorre durante a carbonatação?
- 8) Cite uma aplicação prática de materiais carbonatados na construção civil.
- 9) Qual o tempo médio de carbonatação acelerada em laboratório?
- 10) Por que é importante moer os materiais a serem usados como ligantes?

## Referências

- [1] A. Ćwik, I. Casanova, K. Rausis, K. Zarębska, Utilization of high-calcium fly ashes through mineral carbonation: The cases for Greece, Poland and Spain, *Journal of CO2 Utilization* 32 (2019) 155–162.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2019.03.020>.
- [2] W. Liu, L. Teng, S. Rohani, Z. Qin, B. Zhao, C.C. Xu, S. Ren, Q. Liu, B. Liang, CO2 mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments, *Chemical Engineering Journal* 416 (2021) 129093.  
<https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129093>.
- [3] M. Lim, G.-C. Han, J.-W. Ahn, K.-S. You, Environmental Remediation and Conversion of Carbon Dioxide (CO2) into Useful Green Products by Accelerated Carbonation Technology, *Int J Environ Res Public Health* 7 (2010) 203–228. <https://doi.org/10.3390/ijerph7010203>.
- [4] P.S. Humbert, J. Castro-Gomes, CO2 activated steel slag-based materials: A review, *J Clean Prod* 208 (2019) 448–457.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>.
- [5] E. Grünhäuser Soares, J. Castro-Gomes, Carbonation curing influencing factors of Carbonated Reactive Magnesia Cements (CRMC) – A review, *J Clean Prod* 305 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127210>.
- [6] G.B. Silva Junior, J. Castro-Gomes, M. Magrinho, Carbon capture and utilisation technologies: A systematic analysis of innovative applications and supercritical CO2 viability strategies, *Journal of CO2 Utilization* 97 (2025) 103115. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2025.103115>.
- [7] DARKCO2, DARKCO2: Like Trees - Using CO<sub>2</sub> as a resource for environment infrastructures and building applications, (2024).  
<https://www.inovcexhibition.org/?cix=1056&ixgal=1097&lang=4> (accessed September 30, 2024).
- [8] Carbon8, CircaBuild – Aggregate Information Sheet, (2022).  
<https://www.carbon8.co.uk/s/CircaBuild-General-Information-Sheet-260520222.pdf> (accessed April 2, 2025).
- [9] A. Dindi, D.V. Quang, L.F. Vega, E. Nashef, M.R.M. Abu-Zahra, Applications of fly ash for CO2 capture, utilization, and storage, *Journal of CO2 Utilization* 29 (2019) 82–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.11.011>.