

Universidade da Beira Interior - Faculdade de Engenharia

23 e 24 de outubro, 2025

**Curso:****Construir com Biomassa e Lã Carbonatada – Materiais Circulares em Construção Modular****Parte Teórica**

O curso “Construir com Biomassa e Lã Carbonatada – Materiais Circulares em Construção Modular” 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 pela experimentação, o trabalho colaborativo e a 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 incorporam lã e biomassa. Estes materiais, à base de escórias de forno de arco elétrico e outros subprodutos ricos em cálcio e magnésio, endurecem através de um processo designado por carbonatação acelerada.

A lã e a biomassa não participam diretamente na 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.

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. A tecnologia de carbonatação acelerada inspira-se neste processo natural, mas realiza-o em apenas algumas horas, em condições controladas de laboratório.

A carbonatação acelerada baseia-se na reação entre o CO<sub>2</sub> e materiais ricos em cálcio e magnésio. Quando expostos ao gás em condições adequadas de temperatura, pressão e humidade, formam-se carbonatos estáveis (CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub>) que atuam como ligantes, conferindo resistência e durabilidade ao material.

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, onde os parâmetros de temperatura e pressão são cuidadosamente ajustados para otimizar a absorção de CO<sub>2</sub>.

Durante o processo, o CO<sub>2</sub> difunde-se na humidade presente nos poros do material e forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este ioniza-se em iões bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), que reagem com os iões de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>), produzindo carbonatos sólidos. Este mecanismo pode ocorrer por carbonatação de filme fino, quando o CO<sub>2</sub> circula em torno das partículas, ou em meio aquoso, quando as partículas estão parcialmente imersas.

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.

A eficiência da carbonatação depende de vários parâmetros. Entre os mais importantes estão a concentração de  $\text{CO}_2$ , a temperatura, a pressão, o teor de humidade, o tamanho das partículas, a área superficial e o tempo de reação. Concentrações mais elevadas de  $\text{CO}_2$  e temperaturas moderadas promovem reações mais rápidas e completas. Pressões mais altas aumentam a solubilidade do gás, enquanto a presença adequada de humidade é essencial para dissolver o  $\text{CO}_2$  e iniciar a reação. Partículas mais finas e porosas oferecem uma maior área de contacto e, portanto, maior eficiência.

Um dos principais desafios do processo é garantir a carbonatação uniforme. 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. É necessário encontrar o equilíbrio entre uma estrutura suficientemente aberta para permitir a difusão e suficientemente densa para assegurar resistência e durabilidade.

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. Esta microestrutura mais aberta favorece a difusão do gás e aumenta o grau de carbonatação.

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

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.

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.

**Curso:****Construir com Biomassa e Lã Carbonatada – Materiais Circulares em Construção Modular****Parte prática - Preparação e carbonatação acelerada de misturas com lã e biomassa**

Neste curso prático, 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 lã e biomassa.

O processo envolve duas fases: 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>.

Durante o curso, serão produzidas e testadas diferentes composições em protótipos de pequenas dimensões, integrando materiais e conhecimento provenientes da comunidade local. A atividade visa exemplificar como podem ser desenvolvidos materiais circulares a partir de resíduos e subprodutos capazes de endurecer por 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 as 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 avaliação quantitativa da resistência à compressão, com o objetivo de compreender o comportamento e o potencial destes materiais.

**Objetivo geral:** 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, capazes de sequestrar CO<sub>2</sub>, reduzir o impacto ambiental e melhorar o desempenho térmico das construções.

**1. Introdução**

- **Objetivo:** Investigar os efeitos do uso da lã e da biomassa na carbonatação da escória e as suas implicações nas propriedades físicas do material.
- **Justificação:** A necessidade de desenvolver materiais de construção sustentáveis que possam sequestrar CO<sub>2</sub> e/ou melhorar as propriedades térmicas.

## 2. Procedimentos Experimentais

### 2.1. Ensaio rápido de absorção de CO<sub>2</sub> com escória

Antes da preparação das misturas, realizar um pequeno ensaio para observar a interação direta da escória com o CO<sub>2</sub>.

Pesar 1000 g de escória e repetir o ensaio em dois casos: escória seca e escória misturada com 100 g de água.

Colocar cada amostra dentro de um saco plástico com CO<sub>2</sub>, fechar e pousar sobre uma balança previamente tarada.

Observar e registar a eventual redução do volume do saco, a variação de massa ao longo de 5 a 10 minutos e as diferenças entre a amostra seca e a amostra húmida.

Registar massas iniciais e finais e observações visuais.

Registar temperaturas iniciais e finais com recurso a um termómetro laser.

### 2.2. Processo de corte de lãs e biomassa com moinho de lâminas

Apresentar e discutir processos de corte de lã e biomassa

Determinar a densidade aproximadamente a densidade das lãs e algumas fibras de biomassa

### 2.3 Apresentar protótipos produzidos por carbonatação acelerada com lã e biomassa



Tabela de misturas para produção de peças de 30 x 16 cm aproximadamente com 15, cm de espessura

Mistura	Escória de forno de arco elétrico	Cimento Portland	Areia de sílica (rio)	Lã	Biochar	Fibras de biomassa	Óxido de magnésio reativo	Areia de Escória	Água
M3	700g	-	18g	45g/45g	-	-	200g	-	240g
M13	500g	-	-	70g	-	-	120g	200g	200g

#### 2.4. Preparação e moldagem das misturas

Selecionar uma ou duas formulações da tabela anterior.

Pesar e misturar os componentes, homogeneizando a seco antes de adicionar a lã, o biochar e as fibras.

Ajustar a relação água/sólidos conforme a formulação escolhida, podendo usar água não potável ou água residual.

Medir o pH das misturas frescas com pHmetro ou tiras indicadoras e registar o valor obtido.

Colocar a mistura nos moldes ou placas disponibilizados e realizar a compactação estática, procedendo depois ao acabamento da superfície.

Medir o pH das misturas frescas com pHmetro ou tiras indicadoras e registar o valor obtido.

Cada grupo deve também produzir dois pequenos provetes para ensaio de resistência à compressão (mas com água reduzida - e.g. 100 g . Registar a quantidade água)

Identificar e registar as composições e os provetes produzidos.

#### 2.5. Carbonatação acelerada

Colocar as peças na câmara de carbonatação com controlo de humidade, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>.

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

Após carbonatação, garantir ventilação adequada ao abrir a câmara e utilizar sempre equipamentos de proteção individual.

## 2.6. Verificação e medições após carbonatação

No dia seguinte, após 24 horas de exposição, verificar as peças produzidas e observar se ganharam resistência.

Colocar as peças numa estufa a 60-70 °C durante 1 hora, deixar arrefecer e pesar a massa das peças depois da carbonatação.

Comparar essa massa com a massa inicial correspondente à mistura, excluindo a água, e registar a diferença.

Concluir sobre os resultados observados e discutir o ganho de massa associado à absorção de CO<sub>2</sub>.

Em paralelo, realizar os ensaios de resistência à compressão nos provetes pequenos produzidos por cada grupo.

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 termómetro laser em duas placas comparáveis e registar qual apresenta menor aumento de temperatura.

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

## 3. Resultados Esperados e Análise

Espera-se que a adição de lã e 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 retenção de calor.

## 4. Conclusão

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