# Produção de concreto sustentável para elementos pré-fabricados: **aplicação de ultrassom de potência**

**RICARDO COUCEIRO BENTO** – PROF. DR. – https://orcid.org/0000-0002-6069-306X (ricardobento@usp.br) — **PUC MINAS/ FZEA-USP**
**JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO** – PROF. DR. – https://orcid.org/0000-0001-7246-7345 (rossignolo@usp.br) — **FZEA-USP**

**RESUMO**

PESQUISADORES ESTÃO CONTINUAMENTE INVESTIGANDO E IMPLEMENTANDO FORMAS DE REDUZIR AS EMISSÕES DE $CO_2$ DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. UMA CONTRIBUIÇÃO PARA ATINGIR ESSE OBJETIVO É A REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. A APLICAÇÃO DO ULTRASSOM DE POTÊNCIA PARA A PRODUÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS PRÉ-FABRICADOS SE APRESENTA COMO UMA TECNOLOGIA PROMISSORA PARA AUMENTAR A REATIVIDADE DO CIMENTO PORTLAND, ACELERANDO O GANHO DE RESISTÊNCIA EM IDADES INICIAIS E, COM ISSO, PARA OBTER A REDUÇÃO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE E AUMENTAR AS TAXAS DE PRODUÇÃO. ESTE ARTIGO DESCREVE O CAMPO PROMISSOR E POUCO CONHECIDO SOBRE OS MECANISMOS PELOS QUAIS O ULTRASSOM ATUA EM SISTEMAS CIMENTÍCIOS E SEUS EFEITOS COMO UM MÉTODO PARA PROMOVER A ACELERAÇÃO NA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND. TAMBÉM APRESENTA OS PRIMEIROS AVANÇOS EM PESQUISAS COM CIMENTO BRASILEIRO EFETUADAS PELO AUTOR NO BRASIL E EM RECENTE ESTÁGIO NA ALEMANHA COMO PARTE DE SEU PROJETO DE PÓS-DOUTORADO.

**PALAVRAS-CHAVE:** ULTRASSOM, CONCRETO, PRÉ-FABRICADOS, SUSTENTABILIDADE, GASES DE EFEITO ESTUFA.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Sustentabilidade na produção de elementos pré-fabricados

Nos últimos anos, a eficiência e a sustentabilidade entraram no foco das indústrias devido às mudanças climáticas. No setor de construção não é diferente. A discussão internacional sobre recursos e clima leva, cada vez mais, ao desenvolvimento e teste de novos conceitos na produção de cimento e concreto. Atualmente, está ocorrendo uma intensa investigação e desenvolvimento na área de cimentos alternativos e mais sustentáveis. Para tanto, conceitos inovadores estão sendo testados na produção de concreto.

Devido aos requisitos de construção, qualidade e durabilidade dos edifícios, os elementos pré-fabricados de concreto apresentam, muitas vezes, vantagens em comparação com as estruturas de concreto convencionais. É necessário, porém, discutir o processo de produção de concreto na fábrica de elementos pré-fabricados, para possibilitar uma produção eficiente e sustentável. Especialmente na produção de concreto pré-fabricado é imprescindível uma alta resistência inicial para a manutenção dos ciclos de produção. Para garantir altas resistências iniciais, cimentos altamente reativos são usados em combinação com altos teores de cimento no concreto, além de tratamento térmico. Esses procedimentos contradizem o conceito de concreto sustentável [1].

Além das abordagens normalmente aplicadas para melhorar o processo de hidratação, o ultrassom de potência (UP) apresenta-se como uma alternativa mais sustentável para acelerar a hidratação do cimento [2] [3].

### 1.2 Mecanismos de hidratação do cimento Portland

Os mecanismos de hidratação do cimento são considerados de alta complexidade devido ao número de compostos presentes e, principalmente, pela interação entre os mesmos. Dentre os compostos encontrados no cimento, o silicato tricálcico (C3S) pode ser considerado o de maior relevância. Em concordância ao maior percentual de C3S na composição total do cimento, em geral na faixa de 50 a 70%, sua influência em propriedades como resistência e o calor de hidratação o qualificam como componente fundamental do cimento Portland.

Os produtos da hidratação são originados pela nucleação e crescimento de cristais dos óxidos hidratados na superfície dos grãos de clínquer, atendendo a certas condições de saturação dos compostos anidros em meio aquoso. O principal produto da hidratação do C3S são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), em uma fase quase amorfa, seguido pela portlandita, etringita e o monossulfato. De acordo com a teoria da nucleação, a taxa de hidratação é condicionada pela nucleação e o crescimento do C-S-H formado nos estágios iniciais da hidratação. Nesse sistema, os processos de nucleação e crescimento dos cristais seguem leis fundamentais de termodinâmica e dependem de propriedades, como concentração, tamanho e forma dos cristais, presença de partículas, entre outras [4].

A ocorrência do fenômeno de cristalização depende da condição básica

de supersaturação do sistema. Contudo, a formação dos núcleos cristalinos é fundamental para o desencadeamento do processo de crescimento e das características como tamanho, propriedades físicas e pureza dos cristais formados [5]. A nucleação consiste na formação de novos cristais, enquanto o crescimento é o processo pelo qual os cristais já existentes se tornam maiores. A nucleação e o crescimento dos cristais são fenômenos competitivos, já que ambos consomem massa de soluto durante o processo de cristalização. A nucleação pode se dar por diferentes mecanismos: ela divide-se em nucleação primária, quando ocorre em uma solução totalmente isenta de cristais do soluto; e nucleação secundária, quando já existe em solução cristais do soluto.

Muitos fatores afetam a formação e o crescimento de cristais, incluindo a hidrodinâmica do cristalizador, a temperatura e a presença de impurezas suspensas ou dissolvidas. Dois outros fenômenos podem se fazer presentes e, apesar de não consumirem massa de soluto da solução, alteram a distribuição de partículas nos diversos tamanhos: a aglomeração e a quebra de cristais.

### 1.3. Efeito do ultrassom de potência (UP) no cimento Portland

O UP é utilizado para produzir cavitação. A onda ultrassônica aplicada a um material é transmitida como uma onda sonora por meio de uma série de ciclos de compressão e rarefação para a produção de cavitação A consequência da cavitação é a formação, crescimento e colapso de microbolhas de gases na fase líquida, o que resulta em efeitos químicos e físicos em um meio. “Ondas de choque” e “correntes de jato” são formadas devido a implosão das bolhas de cavitação, direcionando jatos de líquido às superfícies sólidas de material em suspensão, o que resulta na redução do tamanho, colisões e ativações das superfícies das partículas.

A aplicação de UP nas pastas de cimento não pode acelerar a formação das fases de C-S-H na ausência de partículas previamente formadas, mas quebra e remove parcialmente as primeiras fases de C-S-H cristalizadas nas superfícies de C3S, produzindo novas regiões na solução para a posterior cristalização (nucleação secundária).

Estudos em pastas, utilizando microscopia de varredura, indicam um teor de C-S-H significativamente maior em pastas ultrassonificadas, principalmente no período de 2 a 6 horas, o que resulta em um aumento de resistência à compressão inicial. Após 24 horas, os resultados são semelhantes aos das pastas não ultrassonificadas. A resistência aos 28 dias do concreto ultrassonificado sofre uma redução, geralmente entre 5 - 10%, que se deve a um aumento do teor de vazios de ar decorrente do processo [6].

O tratamento por UP com o propósito de acelerar a hidratação do cimento, devido à indução de energia, resulta em aumento da temperatura, tal qual a incorporação de aditivos químicos, o tratamento térmico e os traços com alto consumo de cimento aplicados com o mesmo propósito. O curso do desenvolvimento da temperatura de pastas de cimento ultrassonificadas e não ultrassonificadas é encurtado como resultado do tratamento ultrassônico.

As elevadas temperaturas internas dos elementos de concreto durante a hidratação do cimento podem resultar na formação de etringita instável ou à incorporação de sulfatos em outras fases. Após o endurecimento do concreto, isto pode levar à formação de etringita tardia (DEF sigla em inglês para *delayed ettringite formation*) dentro da fase C-S-H ou no contato entre a pasta e os agregados, levando à geração de pressões expansivas, causando a formação de fissuras e, consequentemente, a resistências inferiores aos 28 dias [7]. Devido a isso, as normas de produção de estruturas de concreto pré-fabricadas estabelecem que as temperaturas máximas do concreto devem ser limitadas entre 65°C e 70°C. O aumento de temperatura é resultado da entrada de energia específica, que depende da amplitude da onda e do período de tratamento, devendo, portanto, serem controlados.

**FIGURA 1**
Ultrassom com a sonda inserida na amostra dentro do becker

## 2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia foi dividida em duas etapas de ensaios experimentais com a utilização de cimento nacional.

A primeira etapa foi executada no Brasil, na Universidade de São Paulo, nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e teve como objetivo a obtenção do conhecimento básico sobre a influência do UP na suspensão de cimentos em que parâmetros adequados do equipamento  e comportamento da pasta precisaram ser identificados.

A segunda etapa foi conduzida na Alemanha, abrangendo um estágio em uma empresa desenvolvedora da tecnologia e uma visita técnica a uma planta de pré-fabricados que utiliza o ultrassom de potência (UP) em suas operações. Nesta fase, o foco principal foi a aplicação do UP em concretos. Complementarmente, a viagem técnica incluiu investigações em pastas realizadas na Faculdade de Engenharia Civil do Instituto F. A. Finger para Ciência dos Materiais de Construção da Universidade Bauhaus de Weimar.

### 2.1 Primeira etapa de investigações

#### 2.1.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado Cimento Portland CPV-ARI de alta resistência inicial

(ABNT NBR 16697:2018). A escolha deste tipo de cimento deve-se ao fato de ser constituído predominantemente por clínquer e, no máximo, 10% de material carbonático em sua composição, além de ser de uso comum em indústrias de pré-fabricados.

Foram preparadas dosagens de pastas de cimento com relação água/cimento fixa de 0,5 e avaliadas diferentes condições de aplicação do UP quanto às variações de tempo e amplitudes do equipamento ultrassônico. Os resultados da influência do ultrassom na configuração inicial da suspensão foram obtidos quanto ao calor liberado, efeito da velocidade ultrassônica e energia inserida.

Para aplicação do ultrasson nas pastas de cimento Portland no estado fresco foi utilizado um equipamento fabricado pela Sonics and Materials, modelo VC505, potência de 500 w e frequência constante de 20 KHz. O aumento de temperatura da suspensão de cimento devido à aplicação do UP foi limitado a 60°C.

O recipiente onde foi colocada a suspensão de cimento e água foi um becker com capacidade para 500 ml. O diâmetro de sonda utilizado na pesquisa foi de 19 mm conforme indicado pelo fabricante do equipamento para volumes de 100 ml a 500 ml. A amostra foi misturada em um equipamento IKA Eurostar 60 (200 rpm) por três minutos. Em seguida o material foi acondicionado em um becker com a quantidade de 300 ml e a sonda ultrassônica foi inserida até o meio da amostra juntamente com um medidor de temperatura (Figura 1).

### 2.1.2 RESULTADOS

Para o equipamento de UP disponível, a amplitude máxima produzida com a utilização de uma sonda de 19mm é de 60µm para volumes de 100 a 500ml segundo especificações do fabricante.

Por meio da leitura no visor do equipamento, durante o tratamento do UP, foi obtida a entrada de energia específica de 37.000 Joules para o limite de temperatura de 59°C, aproximadamente. Para os 300 ml da amostra, esta energia representa 123 J/ml.

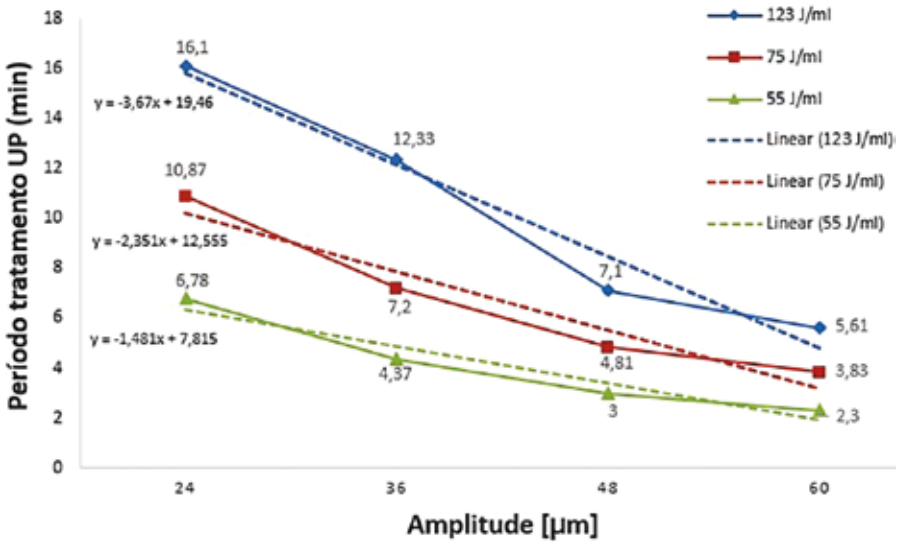


**FIGURA 2**
Período de tratamento com o UP na suspensão de cimento relativo à amplitude e à entrada de energia específica

À partir da amplitude máxima de 60µm, foram geradas várias amplitudes de 80%, 60% e 40% abaixo da amplitude máxima: 48µm, 36µm e 24µm, respectivamente, e entradas de energia de 75J/ml (26.500J) e 55J/ml (16500J) para execução dos testes e verificação dos resultados com o intuito de cobrir uma ampla faixa de verificação. Foi medido o período de tratamento com o UP na suspensão de cimento de 300ml para atingir as três entradas de energia específicas (123J/ml, 75J/ml e 55J/ml) com as quatro amplitudes pré-selecionadas (24µm, 36µm, 48µm e 60µm). A partir da Figura 2, verifica-se que em amplitude do UP constante, o aumento da entrada de energia específica requer tempos de ultrassonificação mais longos. A comparação entre os tempos de ultrassonificação necessários para a entrada de energia específica

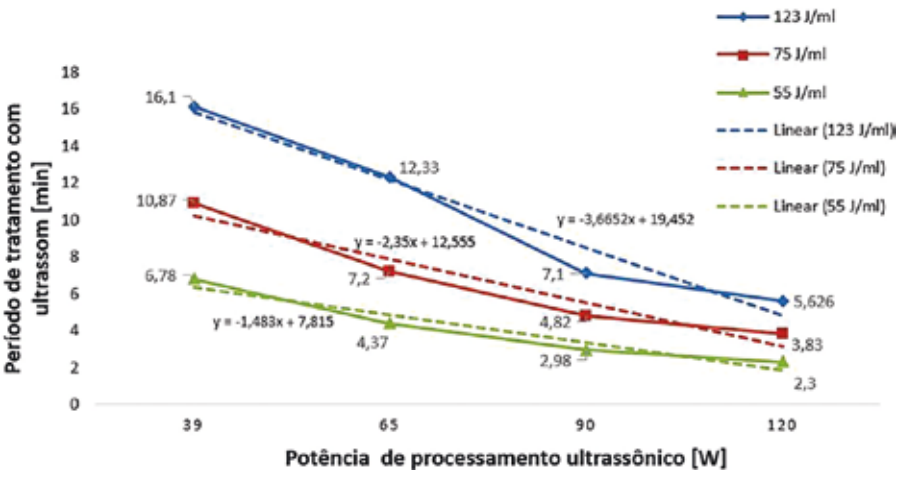


**FIGURA 3**
Período de tratamento UP relativo à potência emitida e à entrada de energia específica

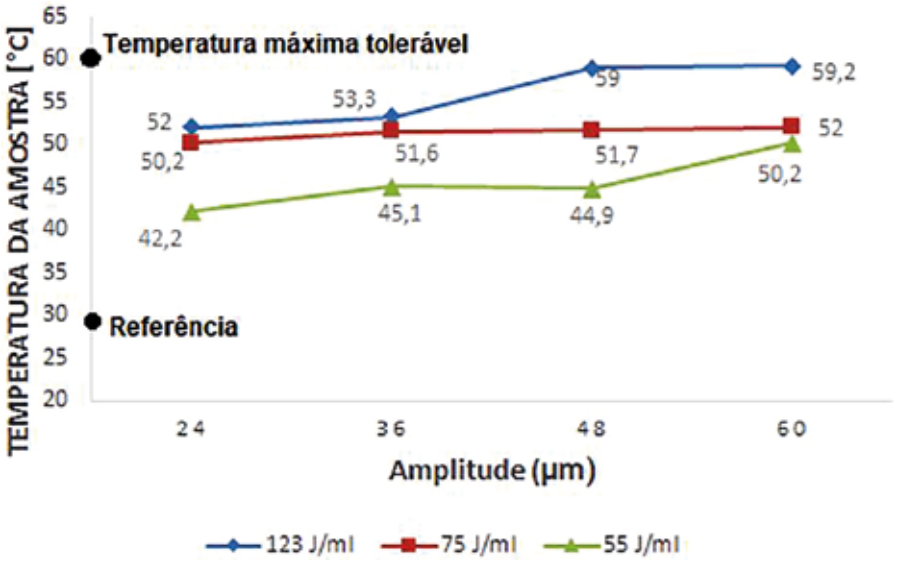


**FIGURA 4**
Temperatura na suspensão de cimento devido à aplicação do UP relativa à amplitude e à entrada de energia específica

**FIGURA 5**
Conjunto de dois corpos de prova cúbicos de 10 cm de lado, sendo pesados

constante, para o mesmo diâmetro da face frontal da sonda ultrassônica para gerar diferentes amplitudes de UP, demonstra que uma amplitude maior reduz o tempo de ultrassonificação.

Para as amplitudes de 24µm, 36µm, 48µm e 60µm, a potência de processamento aplicada foi de 39W, 65W, 90W e 120W respectivamente. Na Figura 3, verifica-se que, considerada a potência acústica emitida, uma dependência quase linear da duração dos tempos de ultrassonificação é observada e quanto maior a potência emitida, menor foi o tempo necessário de tratamento.

A Figura 4 exibe o aumento de temperatura correspondente da suspensão de cimento induzida pela ultrassonificação. Os resultados demonstram que o aumento de temperatura é dependente da entrada de energia específica. Quanto maior a energia introduzida, maiores as temperaturas da amostra após a aplicação do UP.

## 2.2 Segunda etapa de investigações

### 2.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A fase da pesquisa executada na Alemanha foi iniciada pelo autor com o envio do Brasil de 80kg de cimento CP-V à vácuo para a execução das investigações.

Para a execução de ensaios de progresso da resistência, foi produzido concreto para uma classe de 60 MPa com um consumo de cimento de 400kg/m³ de concreto, uma relação água/cimento de 0,42, agregados, aditivo plastificante e filler (Tabela 1).

Foram executados dois tipos de concreto: um de referência, sem tratamento de ultrassom e outro com o tratamento de UP.

O UP foi aplicado em uma parcela 20% da pasta após 2 horas da mistura de água e cimento. O diâmetro da sonda do ultrassom foi de 40mm, aplicada entre 1 a 2 minutos a uma amplitude de 43µm e 75 J/ml de energia. Após o procedimento, a pasta ultrassonificada foi adicionada e misturada junto com o

**FIGURA 6**
Instalação de sensores Almemo® 2590 para acompanhamento da temperatura

**TABELA 1**
Composição do concreto (Kg/m³)

| Cimento | Água | Plastificante | Filler | Areia 0/2mm | Brita 2/8mm | Brita 8/16mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 400 | 165 | 1,3% | 180 | 645,6 | 484,2 | 484,2 |

**FIGURA 7**
Equipamento para execução de microscopia de varredura Instituto F. A. Finger Bauhaus — Weimar

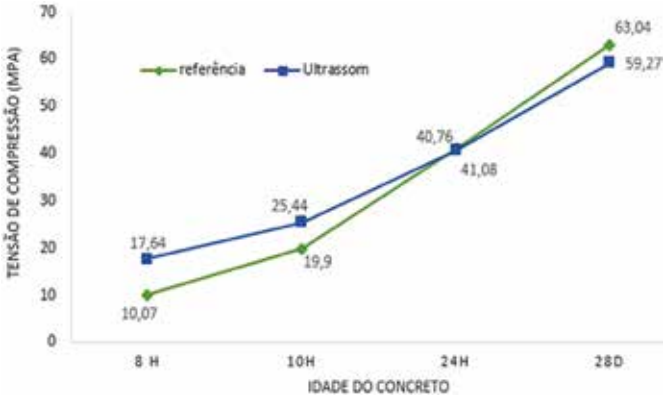


**FIGURA 8**
Tensão de compressão nas idades de 8h, 10h, 24h e aos 28 dias

restante dos componentes do concreto.

Foram moldados corpos de prova cúbicos de 10cm de lado e acondicionados no laboratório para posterior rompimento em diversas idades e instalados sensores Almemo® 2590 para acompanhamento da evolução da temperatura dos corpos de prova (Figuras 5 e 6).

Nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Civil do Instituto F. A. Finger para Ciência dos Materiais de Construção da Universidade Bauhaus de Weimar, foi empregada, para exame da precipitação das fases CSH, a microscopia eletrônica de varredura de alta resolução por meio do equipamento Nova NanoSEM 230, FEI, Holanda (Figura 7).

### 2.2.2 RESULTADOS

A hidratação e ganho de resistência nas idades iniciais foram significativamente aceleradas como pode ser observado na Figura 8.

Com a idade de 8 horas, o concreto tratado com UP apresentou uma tensão à compressão 75,17% maior que o de referência. Após 10 horas, o aumento da tensão de compressão com UP foi de 27,84% em relação ao de referência e, em 24 horas, as duas tensões se equivaleram. A tensão à compressão aos 28 dias apresentou redução do concreto tratado com UP de 5,98% em relação ao de referência, o que vai ao encontro de outros estudos devido à incorporação de ar.

O curso do desenvolvimento da temperatura é encurtado como resultado do tratamento ultrassônico como mostra a Figura 9. O início da solidificação da amostra ultrassonificada ocorre significativamente mais cedo do que na amostra de referência. A amostra ultrassonificada (UP) atingiu uma temperatura de 33,2°C após 8,1 horas e a de referência temperatura semelhante de 32,7°C após 9,75 horas.

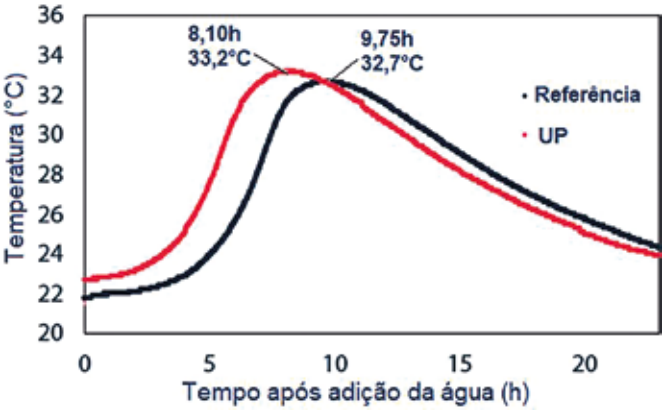


**FIGURA 9**
Desenvolvimento da temperatura dos corpos de prova de referência e Ultrassonificado (UP)

A Figura 10 mostra a microestrutura do C3S após 1 hora de hidratação: para a pasta de referência não ultrassonificada (esquerda) e a pasta ultrassonificada (direita). Uma impressionante diferença pode ser notada: na pasta de referência, estão presentes partículas de alita com alguma etringita em nanoescala e nenhum C-S-H; em contrapartida, na pasta ultrassonificada estão presentes partículas de alita, com presença de C-S-H em estágio inicial.

A Figura 11 mostra a microestrutura do C3S após 2 horas de hidratação: para a pasta de referência não ultrassonificada são notadas partículas de alita, com algumas fases de C-S-H e etringita em nanoescala. A pasta ultrassonificada, por outro lado, apresenta muitas fases C-S-H em estágio inicial e vazios de dissolução.

Em contraste com a referência, na pasta ultrassonificada podem ser vistos significativamente mais aglomerados de fases C-S-H e locais de crescimento. As fases C-S-H existentes aparecem distribuídas homogeneamente por toda a superfície do C3S.

## 3. CONCLUSÕES

A primeira etapa experimental deste estudo demonstrou que a aplicação do ultrassom de potência (UP) em suspensões cimentícias permite o controle preciso de variações operacionais críticas, como amplitude, entrada de energia específica, tempo de ultrassonificação e elevação de temperatura.

Na segunda etapa, os resultados evidenciaram o potencial do UP para antecipar a hidratação inicial do cimento Portland, criando condições para um ganho inicial de resistência mecânica do concreto, sem a necessidade de aditivos químicos ou tratamentos térmicos de alta energia.

A tecnologia permite a produção dos componentes de concreto pré-fabricados com uma quantidade significativamente menor de cimento e, consequente, redução do $CO_2$ incorporado e/ou aceleração do processo produtivo por meio do saque antecipado das fôrmas.

A produção de concreto pré-fabricado pode dar um grande passo em direção à sustentabilidade proporcionada pela aplicação da tecnologia, visando não só à redução de emissão de $CO_2$, como também à diminuição dos custos de produção.


## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a dois pesquisadores alemães que forneceram subsídios essenciais para a execução desta pesquisa: Dr. Ricardo Remus e Drª Christiane Rößler.


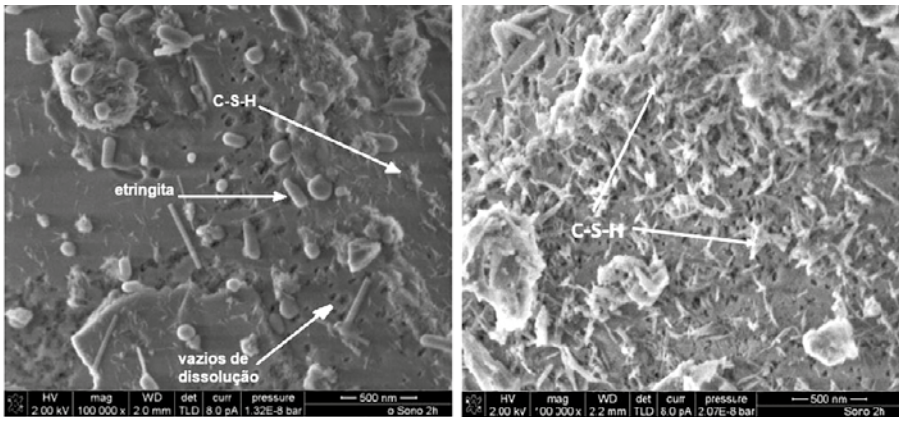


**FIGURA 10**
MICROESTRUTURAS DE C3S HIDRATADO OBTIDAS NO MEV APÓS 1 HORA DE HIDRATAÇÃO PARA A AMOSTRA DE REFERÊNCIA (ESQUERDA) E A AMOSTRA ULTRASSONIFICADA (DIREITA)

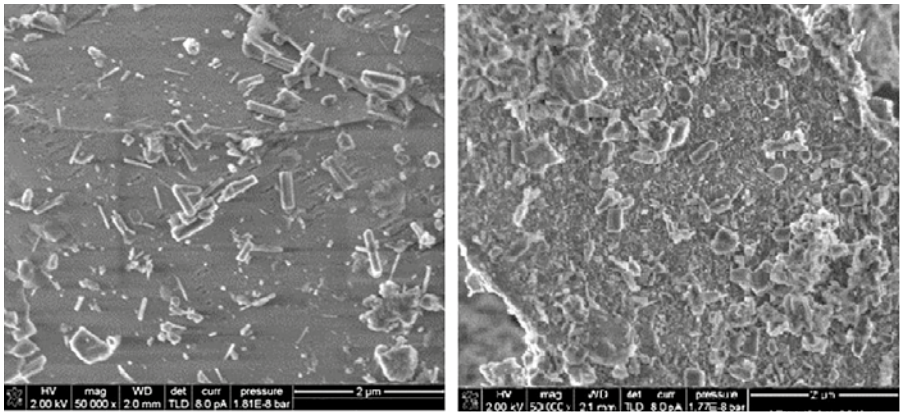

**FIGURA 11**
MICROESTRUTURAS DE C3S HIDRATADO OBTIDAS NO MEV APÓS 2 HORAS DE HIDRATAÇÃO PARA A AMOSTRA DE REFERÊNCIA (ESQUERDA) E A AMOSTRA ULTRASSONIFICADA (DIREITA)

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] REMUS, R; RößLER, P., HESSE, S.; NUNE, S.; LUDWIG, H-M. *Power ultrasound assisted production of sustainable concrete*. 16th *International Congress on the Chemistry of cement – "Further Reduction of $CO_2$ – Emissions and Circularity in the Cement and Concrete Industry"*, 23rd – 26th September, Bangkok, Thailand, 2023.

[2] RÖßLER, C., PETERS, S., LUDWIG, H. *Power Ultrasound: An Effective Method to Accelerate Strength Development of Cementitious Materials*. CPI – *Concrete Plant International* (2012).

[3] PETERS, S. *The Influence of power ultrasound on setting and strength development of cement suspensions* Weimar: Bauhaus Universitat, Weimar, 2016.

[4] MULLIN, L. Crystallization. London, Butterworth-Heinemann, 2001. 610p.

[5] COSTA, C. B. B.; GIULIETTI, M. Introdução à cristalização: princípios e aplicações. São Carlos. EdUFCSCar, 2010. 91p.

[6] REMUS, R. *Ultraschallgestutzte Betonherstellung Konzept fur eine ressourcenschonende Betonproduktion, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. an der Fakultat Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universitat Weimar*, 2022.

[7] TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*. 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London, 1997.