

## CARACTERIZAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO HIDRATADAS E CALCINADAS VISANDO A OBTENÇÃO DE MATERIAIS AGLOMERANTES ALTERNATIVOS

CLEUSA MARIA ROSSETTO<sup>1</sup>; LUIZ GALLEGO MARTINEZ<sup>2</sup>; MARCELO PECCHIO<sup>3</sup>; NATHALIA  
MARQUEZ DOS SANTOS<sup>1</sup>; XABIER TURRILLAS<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fatec São Paulo - Departamento de Edifícios

<sup>2</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo

<sup>3</sup>Associação Brasileira de Cimentos Portland – ABCP, São Paulo

<sup>4</sup>Instituto de Ciências de Materiais de Barcelona, CSIC, Barcelona, Spain

cleusa.rossetto@fatec.sp.gov.br

*Characterization of hydrated and calcined cements pastes aimed at obtaining alternative binding materials*

Eixo Tecnológico: *Controle de Processos Industriais*

### Resumo

A reciclagem de finos obtidos de concreto endurecido em materiais aglomerantes alternativos é uma estratégia fundamental para promover a sustentabilidade na indústria da construção, conservando recursos e reduzindo as emissões de carbono. Este estudo investiga as transformações térmicas de três pastas cimentícias simuladas já hidratadas — M1 (cimento puro), M2 (cimento com carga carbonática) e M3 (cimento com carga carbonática e sílica ativa) — submetidas a temperaturas que variam de 30 °C a 1200 °C. Utilizando difração de raios X síncrotron de alta resolução, a pesquisa avalia a evolução e a estabilização de fases minerais essenciais, particularmente alita e belita, juntamente com a formação de silicatos de alta temperatura, como merwinita, mulita e wollastonita. Os resultados mostram que a belita se torna a fase dominante em temperaturas mais altas, enquanto a sílica ativa promove a cristalização de fases estruturalmente estáveis. Os resultados fornecem insights críticos sobre a reatividade e a estabilidade das pastas hidratadas recicladas e sob tratamentos térmicos, oferecendo um caminho para otimizar os protocolos de reciclagem. Este trabalho contribui para as metas da economia circular ao apoiar o desenvolvimento de ligantes sustentáveis e de baixa emissão para aplicações na construção.

**Palavras-chave:** *Análise Mineralógica, Estabilização da Belita, Concreto Reciclado, Economia Circular.*

### Abstract

The recycling of fines obtained from hardened concrete into alternative binder materials is a key strategy to promote sustainability in the construction industry, conserving resources and reducing carbon emissions. This study investigates the thermal transformations of three cement pastes — M1 (pure cement), M2 (cement with carbonate filler), and M3 (cement with carbonate filler and silica fume) — subjected to temperatures ranging from 30 °C to 1200 °C. Using high-resolution synchrotron X-ray diffraction, the research evaluates the evolution and stabilization of essential mineral phases, particularly alite and belite, along with the formation of high-temperature silicates such as merwinite, mullite, and wollastonite. The results show that belite becomes the dominant phase at higher temperatures, while silica fume promotes the crystallization of structurally stable phases. These findings provide critical insights into the reactivity and stability of recycled and calcined hydrated pastes under thermal treatment, offering a pathway to optimize recycling protocols. This work contributes to circular economy goals by supporting the development of sustainable, low-emission binders for construction applications.

**Key-words:** *Mineralogical Analysis, Belite Stabilization, Recycled Concrete, Circular Economy.*

## 1. Introdução

A sustentabilidade na construção civil tornou-se fundamental diante dos crescentes desafios ambientais e da escassez de recursos naturais. Uma das abordagens promissoras é a reciclagem do concreto, transformando-o em materiais hidráulicos alternativos, o que contribui para conservar matérias-primas, reduzir resíduos em aterros e diminuir as emissões de carbono

ligadas à produção de cimento. Essa estratégia se insere no contexto da economia circular, que prioriza o reuso de materiais e a minimização de resíduos como caminho para práticas mais sustentáveis no longo prazo.

Apesar das vantagens, a reciclagem do concreto ainda enfrenta obstáculos relevantes. A uniformidade na qualidade dos materiais reciclados, a eficiência dos processos de reaproveitamento e os entraves técnicos e regulatórios limitam sua aplicação em larga escala. Avanços recentes, especialmente em tratamentos térmicos, têm mostrado potencial para reativar componentes cimentícios e ou aglomerantes. Este estudo analisa transformações mineralógicas em pastas recicladas, simuladas, submetidas a temperaturas entre 30 °C e 1200 °C, por meio de difração de raios X de alta resolução em síncrotron. A investigação abrange três misturas em diferentes mesclas e contribui para compreender o comportamento térmico desses materiais, apoiando o desenvolvimento de protocolos de reciclagem mais eficazes e ambientalmente responsáveis.

### **1.1. Revisão da Literatura**

A indústria do cimento e da construção enfrentam desafios urgentes em relação à sustentabilidade, com esforços significativos voltados para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a promoção da reciclagem de materiais. Segundo Benhelal et al. [1], a produção de cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, sendo, portanto, um dos maiores contribuintes industriais para os gases de efeito estufa. As estratégias para mitigar essas emissões incluem a adoção de tecnologias de baixo carbono e a reciclagem de resíduos em novos produtos cimentícios.

A sustentabilidade na produção de cimento envolve estratégias globais para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. [1] destacam inovações em eficiência energética, captura de carbono e uso de combustíveis alternativos. [2], propõem cimentos ecoeficientes com matérias-primas alternativas. [3] comparam o cimento Portland tradicional com tecnologias alternativas, evidenciando ganhos ambientais por meio de avaliações do ciclo de vida.

O uso de materiais reciclados em sistemas de cimento oferece tanto promessa quanto complexidade. [4] destacam o potencial dos resíduos de demolição como agregado reciclado, ao mesmo tempo em que apontam preocupações com a qualidade. [5] mostram como cal, cinza volante e escória melhoram pastas de cimento com finos reciclados, enfatizando a otimização do ligante. [6] exploram o uso de resíduos finos de concreto em cimento Portland, enfatizando o processamento avançado para melhor desempenho.

O uso de tratamentos térmicos para reativar materiais cimentícios tem se mostrado promissor na reciclagem. [7] demonstram que a escória de alto-forno pode recuperar suas propriedades hidráulicas com desidratação e reidratação controladas. [8] comprovam a eficácia desses materiais reativados em argamassas. [9], por sua vez, utiliza técnicas avançadas para otimizar esse processo, visando melhor desempenho em aplicações sustentáveis.

Processos inovadores de reciclagem, como a carbonatação acelerada e transformações em alta temperatura, permitem reutilizar resíduos cimentícios. [10] mostram que é viável reciclar pó de concreto celular autoclavado em cimento Portland. [11] exploram a transformação de pasta de cimento hidratado em novo clínquer. Esses métodos se destacam como alternativas sustentáveis.

Apesar dos benefícios da reciclagem, persistem preocupações ambientais. [12] comparam as emissões de CO<sub>2</sub> na produção do cimento Portland comum com o reciclado, mostrando que este reduz as emissões, mas ainda exige alta energia no processamento térmico. [13] alertam para

os impactos ambientais da fabricação do concreto. Soluções integradas são necessárias para equilibrar desempenho e sustentabilidade.

Estudos de [14] [15] mostram que resíduos podem ser transformados em ligantes hidráulicos de alto desempenho e baixa emissão, alinhados à economia circular. Os avanços incluem reativação térmica, técnicas de processamento e otimização de composições. Apesar de desafios com emissões e consistência na produção, há forte potencial para práticas sustentáveis. Essas pesquisas sustentam o desenvolvimento de materiais de construção de baixo carbono, contribuindo para metas globais de sustentabilidade.

## **2. Materiais e métodos**

### 2.1. Materiais

Foram preparadas três misturas utilizando cimento CPV-ARI como ligante principal. As misturas foram: M1 (cimento puro, relação água/cimento de 0,5), M2 (70% de cimento com 30% de fíler carbonático, relação água/cimento de 0,3) e M3 (60% de cimento, 30% de fíler carbonático, 10% de sílica ativa, relação água/aglomerante de 0,52). As misturas foram preparadas em misturador de argamassa. Moldes cilíndricos de 37,5 x 75 mm foram preenchidos com a pasta usando espátula. Oito corpos de prova foram moldados para cada tipo de pasta. Após a moldagem, as amostras foram cobertas com uma placa de vidro e mantidas em repouso por 48 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e armazenados em tanque de cura com água saturada com cal por três meses à temperatura ambiente. Após a cura, foram retirados do tanque e deixados secar ao ar por 24 horas antes de serem rompidos em fragmentos para processamento posterior.

### 2.2. Metodologia

#### 2.2.1. Calcinação

A calcinação dos fragmentos foi realizada em uma mufla Jung. O forno foi aquecido a uma taxa de 10 °C por minuto e mantido nas temperaturas-alvo de 300 °C, 400 °C, 500 °C, 700 °C, 900 °C e 1200 °C por 4 horas. Cada ciclo térmico partiu da temperatura ambiente. Após o fim do aquecimento, as amostras permaneceram dentro do forno para resfriamento gradual até a temperatura ambiente.

#### 2.2.2. Cominuição

As misturas endurecidas e calcinadas foram inicialmente fragmentadas com martelo sobre uma bandeja metálica, seguidas de cominuição com almofariz e pistilo de cerâmica. A fração mais fina foi obtida com almofariz e pistilo de ágata até obter um material particulado passante em peneira de 75 µm. Para análises térmicas e de difração de raios X (DRX), utilizou-se a fração menor que 45 µm. As amostras preparadas foram armazenadas em recipientes plásticos selados, protegidas contra umidade, carbonatação e contaminação.

#### 2.2.3. Difração de raios X Síncrotron

Experimentos de DRX com luz síncrotron de alta resolução foram realizados na linha de luz ID31 da European Synchrotron Radiation Facility (ESRF). As amostras em pó foram inseridas em cavidades cilíndricas de aproximadamente 1 mm de espessura, mantidas entre janelas de

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJJ*

Kapton em um suporte de amostras de alto rendimento. As medidas foram feitas no modo de transmissão, com energia incidente de 75,00 keV ( $\lambda = 0,1653 \text{ \AA}$ ). As intensidades medidas foram registradas com um detector Pilatus CdTe 2M, com  $1679 \times 1475$  pixels ( $172 \times 172 \mu\text{m}^2$  cada), posicionado de modo que o feixe incidente atingisse o canto do detector. A distância amostra-detector foi ajustada para cerca de 1,5 m, visando alta resolução. Medições de fundo com as janelas de Kapton vazias foram realizadas e subtraídas dos dados das amostras.

#### 2.2.4. Quantificação

A análise mineralógica dos espécimes cimentícios foi realizada com o software *TOPAS 6 Academic* [16], ferramenta de ponta para refinamento *Rietveld* e análise de perfil completo. O TOPAS foi escolhido por sua alta precisão, eficiência computacional e flexibilidade no tratamento de dados complexos de difração.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Resultados

**Tab. 1-** Composição mineralógica da amostra M1 após tratamento nas temperaturas apresentadas. As colunas mostram os valores percentuais com o desvio padrão afetando os últimos dígitos.

Temperature(°C)	30	300	400	500	700	900	1200
Alite	4.5(6)	2.0(4)	1.8(3)	2.9(6)	7.9(3)	2.9(2)	1.2(1)
Belite	6.9(8)	10.5(5)	8.9(4)	9.7(6)	17.6(6)	52.1(7)	63.2(9)
C3A_cub	-	-	-	-	0.3(1)	1.3(3)	0.2(1)
C3A_orth	1.2(5)	1.0(3)	1.5(4)	0.8(2)	6.5(6)	1.2(5)	-
Ferrite	5(1)	5.1(7)	5.9(7)	3.5(5)	2.2(4)	5.6(5)	13.2(3)
Portlandite	21.5(5)	24.5(4)	21.2(4)	15.8(3)	7.3(2)	11.4(2)	14.1(2)
Periclase	-	-	-	-	-	-	1.1(1)
Quartz	0.7(2)	0.7(1)	1.0(2)	0.7(1)	0.4(1)	0.1(1)	-
Arcanite	2.8(5)	1.3(3)	0.5(3)	0.4(2)	-	-	0.1(1)
Langbeinite	2.1(5)	3.5(3)	6.8(3)	2.2(2)	2.9(2)	1.1(1)	0.2(1)
Aphthitalite	0.2(2)	0.5(2)	0.5(2)	0.4(1)	0.2(1)	0.5(1)	0.3(1)
Anhydrite	-	0.2(1)	0.1(1)	-	0.5(1)	0.3(1)	-
Gypsum	1.7(3)	0.8(2)	0.6(2)	0.6(1)	-	-	-
Bassanite	3.5(4)	0.7(3)	1.4(2)	0.4(2)	0.6(1)	0.4(1)	-
Calcite	41.3(9)	47.9(8)	48.0(8)	33.5(5)	10.4(2)	3.7(3)	1.5(1)
Dolomite	1.1(3)	1.3(2)	1.7(2)	2.6(4)	0.6(2)	0.2(2)	-
Mullite	-	-	-	1.4(2)	0.6(3)	2.3(2)	0.2(1)
Ettringite	7.9(5)	-	-	-	-	-	-
Gehlenite	-	-	-	2.2(2)	-	-	-
Albite	-	-	-	9.2(4)	5.6(3)	2.3(3)	0.7(2)
Kaolinite	-	-	-	1.2(2)	0.3(2)	0.9(2)	-
Merwinite	-	-	-	6.3(2)	1.4(2)	0.6(2)	0.9(1)

Fonte: (Rossetto, 2024).

Os resultados deste estudo são apresentados em três tabelas abrangentes que detalham as composições mineralógicas dos três corpos de prova de pasta (M1, M2 e M3) submetidos a

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ*

diversos tratamentos térmicos (Tab. 1 – 3). Esses dados são essenciais para a compreensão das transformações que ocorrem nas fases minerais durante o processo de calcinação e do potencial de reatividade de materiais cimentícios reciclados.

A Tab. 1, apresentada anteriormente, mostra a evolução das fases mineralógicas na amostra M1 (cimento puro, relação água/cimento de 0,5) em temperaturas de 30 °C a 1200 °C.

A Tab. 2 resume as alterações mineralógicas na amostra M2 (70% de cimento, 30% de fíler carbonático, relação água/cimento de 0,3) com o aumento da temperatura.

**Tab. 2-** Composição mineralógica da amostra M2 após tratamento nas temperaturas apresentadas. As colunas mostram os valores percentuais com o desvio padrão afetando os últimos dígitos.

Temperature(°C)	30	300	400	500	700	900	1200
Alite	1.2(3)	1.9(3)	2.7(3)	2.4(3)	5.5(3)	2.4(2)	1.0(1)
Belite	2.0(4)	7.9(4)	9.2(5)	8.3(4)	12.0(6)	41.6(5)	54.6(9)
C3A_cub	-	-	-	-	-	0.9(2)	-
C3A_orth	1.3(4)	1.3(3)	1.1(3)	1.2(3)	2.8(5)	-	-
Ferrite	2.6(7)	3.7(6)	3.7(6)	3.1(5)	2.1(4)	3.9(4)	9.9(3)
Portlandite	0.4(1)	11.7(2)	11.7(4)	10.6(2)	9.6(2)	9.0(2)	21.1(3)
Periclase	-	-	-	-	1.0(1)	3.4(1)	4.7(1)
Quartz	1.1(1)	0.7(2)	0.6(2)	0.4(1)	0.1(1)	0.3(1)	-
Arcanite	3.0(3)	0.4(3)	0.9(3)	1.8(2)	-	-	-
Langbeinite	4.1(3)	4.5(3)	4.3(3)	1.6(2)	3.1(2)	2.5(2)	0.2(1)
Aphthitalite	-	-	0.3(2)	0.3(1)	-	0.3(7)	-
Anhydrite	-	-	0.3(1)	-	0.5(8)	0.2(1)	-
Gypsum	1.8(2)	1.0(2)	0.9(2)	0.5(1)	-	-	-
Bassanite	-	1.0(2)	0.3(2)	-	0.6(1)	0.3(1)	-
Calcite	79(1)	57.2(7)	56(2)	45.9(6)	18.6(3)	17.4(2)	2.8(1)
Dolomite	0.8(2)	5.8(2)	7.9(3)	4.3(2)	0.5(1)	-	-
Mullite	-	2.2(4)	-	1.8(2)	4.8(6)	1.8(2)	-
Ettringite	2.2(3)	-	-	-	-	-	-
Gehlenite	-	-	-	1.4(2)	-	-	-
Albite	-	-	-	7.4(4)	6.2(3)	4.4(3)	0.9(2)
Kaolinite	-	-	-	0.8(2)	0.2(1)	0.8(2)	0.4(1)
Merwinite	-	-	-	0.4(2)	27.9(8)	5.1(3)	0.4(1)
Wollastonite	-	-	-	2.2(3)	2.6(3)	4.2(2)	2.4(3)
Jennite	-	-	-	4.3(2)	1.1(2)	0.6(1)	0.8(1)

**Fonte:** (Rossetto, 2024).

A Tab. 3 detalha as transformações térmicas na amostra M3 (60% cimento, 30% carbonato de fíler, 10% sílica ativa, relação água/agregado de 0,52).

**Tab. 3-** Composição mineralógica da amostra M3 após tratamento nas temperaturas apresentadas. As colunas mostram os valores percentuais com o desvio padrão afetando os últimos dígitos.

Temperature(°C)	30	300	400	500	700	900	1200
Alite	1.4(4)	1.9(3)	3.2(4)	1.5(2)	4.1(3)	4.9(4)	2.1(1)
Belite	6.9(7)	3.8(4)	8.3(8)	6.0(4)	9.8(5)	52.4(7)	77(1)

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ*

C3A_cub	-	0.5(2)	-	0.4(2)	1.7(3)	2.4(2)	1.0(1)
C3A_orth	-	1.4(2)	-	1.2(3)	2.7(5)	0.9(1)	-
Ferrite	1.3(6)	1.8(7)	3.2(8)	1.5(4)	1.9(4)	4.1(6)	9.0(2)
Portlandite	7.6(2)	-	8.6(7)	5.3(1)	-	6.2(2)	1.1(1)
Periclase	-	-	-	-	1.1(1)	3.9(1)	4.5(1)
Quartz	1.6(2)	1.5(2)	2.0(2)	1.8(2)	0.5(1)	-	-
Arcanite	6.6(4)	1.6(2)	1.7(3)	2.3(3)	-	-	-
Langbeinite	1.7(4)	4.7(3)	4.4(4)	2.8(3)	3.7(2)	2.3(2)	-
Aphthitalite	0.7(3)	0.6(2)	1.0(2)	0.7(2)	0.8(1)	1.0(1)	0.3(1)
Gypsum	3.7(3)	0.7(2)	1.0(2)	1.2(2)	-	-	-
Calcite	60(1)	72(1)	58(4)	49.7(7)	27.8(4)	4.0(2)	1.4(1)
Dolomite	1.3(2)	6.3(2)	7.8(6)	4.5(2)	0.4(1)	-	-
Mullite	-	2.4(4)	-	2.3(3)	3.0(4)	1.2(2)	-
Ettringite	6.2(4)	-	-	-	-	-	-
Gehlenite	-	-	-	1.1(3)	0.4(2)	1.1(2)	-
Albite	-	-	-	7.3(5)	6.4(3)	1.8(2)	0.4(1)
Kaolinite	-	-	-	0.7(3)	0.2(1)	0.3(1)	0.2(1)
Merwinite	-	-	-	1.2(3)	31.4(7)	9.8(4)	0.6(1)
Wollastonite	-	-	-	3.9(4)	1.3(2)	0.8(2)	0.5(1)
Jennite	-	-	-	3.8(2)	1.0(1)	0.8(1)	0.5(1)

Fonte: (Rossetto, 2024).

### 3.2. Discussão

Este estudo utiliza um modelo simplificado de misturas cimentícias para melhor compreender as transformações mineralógicas sob aquecimento, com o objetivo de contribuir para estratégias eficazes de reciclagem de concreto. Embora limitado à quantificação de fases cristalinas, o método empregado evidencia mudanças importantes entre temperatura ambiente e 300 °C. A interação com a umidade e o CO<sub>2</sub> durante o resfriamento pode alterar a composição cristalina final.

#### 3.2.1. Transformações Térmicas

M1 – Cimento puro: Com o aumento da temperatura, a alita diminui e a belita se torna dominante (63,2% a 1200 °C). Novas fases como merwinita e albite surgem acima de 500 °C, indicando potencial de M1 como material reciclado.

M2 – 70% cimento + 30% carga carbonática: A calcita e a dolomita se decompõem até 900 °C. A belita aumenta (54,6% a 1200 °C) e a merwinita surge como fase relevante, reforçando a estabilidade em altas temperaturas.

M3 – 60% cimento + 30% carga carbonática + 10% sílica ativa: A sílica ativa promove formações de mullita (3% a 700 °C) e wollastonita, com a belita atingindo 77% a 1200 °C, evidenciando a importância da sílica na estabilidade estrutural.

#### 3.2.2. Comparação entre amostras

- Ettringita: Presente em M1 (7,9% a 30 °C), mas reduzida em M2 e M3.
- Portlandita: Influenciada pela exposição à umidade após o aquecimento.
- Belita: Aumenta em todas, mais estável em M3.
- Merwinita: Aparece principalmente em M2 e M3.

- Carbonatos: Rápida decomposição em M2 e M3.
- Sílica ativa: Crucial em M3 para fases como mulita e wollastonita.

### 3.2.3. Implicações para a Reciclagem

As transformações térmicas observadas nos três espécimes demonstram caminhos claros para a reciclagem de resíduos de concreto em materiais sustentáveis:

- Estabilidade de Fase: A estabilização da belita e a formação de silicatos de alta temperatura (merwinita, mulita) destacam o potencial para a produção de materiais hidráulicos a partir de concreto reciclado.
- Otimização das adições: A adição de sílica ativa aumenta a formação de fases benéficas, tornando-se um parâmetro crucial para a otimização de protocolos de reciclagem.
- Gestão da carbonatação: A compreensão do comportamento de decomposição de carbonatos informa estratégias para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> durante tratamentos térmicos.

## **4. Considerações finais**

Os principais resultados revelam mudanças significativas de fase, especialmente a decomposição da alita e a estabilização da belita em temperaturas mais altas. A mistura M3, enriquecida com sílica ativa, apresenta maior estabilização da belita, destacando sua adequação para aplicações com materiais reciclados.

A decomposição dos carbonatos em M2 e M3 leva à formação de cal (CaO), que reage com silicatos formando fases de alta temperatura como merwinita e wollastonita, especialmente pronunciadas em M3. A sílica ativa em M3 acelera a formação de silicatos estáveis, reforçando seu papel na melhora da reatividade e estabilidade térmica dos materiais reciclados.

Em conclusão, o estudo avança na compreensão do comportamento térmico de concretos reciclados, oferecendo base sólida para o desenvolvimento de protocolos sustentáveis de reciclagem. Ao explorar transformações de fase, otimizar composições e aplicar tratamentos térmicos controlados, o concreto reciclado pode ser reintroduzido como ligante hidráulico reativo e ecológico. Esses achados contribuem para a redução de resíduos, emissões de carbono e promovem a eficiência de recursos na construção civil, em consonância com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

## **Agradecimentos**

Agradecemos à European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) pela disponibilização das instalações de radiação síncrotron e à equipe de Momentum Transfer pelo apoio nas medições. Ao CPS - Centro Paula Souza / CPRJI pela aprovação do Projeto de Pesquisa junto à CPRJI, ao Prof. Dr. Davinson Mariano – pela autorização de uso do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais – LPCM / Fatec-SP. Aos Auxiliares docentes Dr. Silvano Leal dos Santos e Dr. Abrão Chiaranda Merij, pela orientação e acompanhamento dos ensaios no LPCM.

## **Referências**

[1] BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E., RASHID, M. I. Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *J Clean Prod.* 2013;51:142-61. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJJ*

- [2] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cem Concr Res.** 2018;114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
- [3] HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: Comparing the traditional process with alternative technologies. **J Clean Prod.** 2009;17(7):668-75. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.007
- [4] AKHTAR, A., SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **J Clean Prod.** 2018;186:262-81. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085
- [5] PROŠEK, Z. et al. Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines. **Constr Build Mater.** 2019. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.227
- [6] ZHUUTOVSKY, S.; SHISHKIN, A. Portland cement production from fine fractions of concrete waste. **In: Sustainable Construction Materials and Technologies.** Springer; 2020. p. 42-6. DOI: 10.1007/978-3-030-43332-1\_9
- [7] BALDUSCO, R. et al. Dehydration and rehydration of blast furnace slag cement. **J Mater Civ Eng.** 2019;31(8):04019132. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725
- [8] SERPEL, R., LOPEZ, M. Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. **Cem Concr Compos.** 2015;64:16-26. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003
- [9] SILVA, R. B. **Rehydration of blast furnace slag cement: Analysis and optimization by combined characterization techniques** [master's thesis]. São Paulo: University of São Paulo; 2018.
- [10] QIN, L.; GAO, X. Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. **Waste Manag.** 2019;89:254-64. DOI: 10.1016/J.WASMAN.2019.04.018
- [11] ZHUTOVSKY, S.; SHISHKIN, A. Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker. **Constr Build Mater.** 2021;280:122510. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122510
- [12] HE, Z. et al. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from OPC and recycled cement production. **Constr Build Mater.** 2019;211:965-973. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.289
- [13] FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. **Int J Life Cycle Assess.** 2007;12(5):282-8. DOI: 10.1065/lca2007.05.327
- [14] WANG, J; MU, M.; LIU, Y. Recycled cement. **Constr Build Mater.** 2018;190:1124-32. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181
- [15] GUILGE, M. S. **Desenvolvimento de ligante hidráulico a partir de resíduos de Cimento Hidratado, Tijolo Cerâmicos e Metacaulinita** [master's thesis]. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; 2011.
- [16] COELHO, A. A. TOPAS and TOPAS-Academic: An optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++. **J Appl Crystallogr.** 2018;51(1):210-8. <https://doi.org/10.1107/S1600576718000183>