



## XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção  
São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016

# PRODUÇÃO DE CIMENTO BELÍTICO A PARTIR DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA USO EM ARGAMASSAS DE RESTAURO<sup>1</sup>

**MENDES, Beatryz Mendes (1); ALVARENGA, Rita de Cássia S. S. (2); FASSONI, Délio Porto (3); PEDROTI, Leonardo Gonçalves (4); RIBEIRO, José Carlos Lopes (5)**

(1) UFV, e-mail: beatryz.mendes@ufv.br; (2) UFV, e-mail: rcassia.alvarenga@gmail.com; (3) UFV, e-mail: delioporto@gmail.com; (4) UFV, e-mail: leonardo.pedroti@ufv.br; (5) UFV, e-mail: jcarlos.ribeiro@ufv.br

### RESUMO

No intuito de adequar o setor da construção civil ao desenvolvimento sustentável proposto nas últimas décadas, muito tem-se investigado acerca da criação de materiais de construção alternativos, com menor impacto ambiental. O presente trabalho teve por objetivos a produção de um cimento belítico a partir de resíduos industriais e a avaliação deste quanto ao uso em argamassas para obras de restauro. Foi preparada uma mistura binária com os resíduos então mencionados na relação molar Ca/Si igual a 1,4. A mistura foi calcinada à 950°C e, em seguida, submetida a resfriamento rápido por injeção de ar comprimido. A análise da composição mineralógica deste novo clínquer, realizada por meio da técnica de DRX, revelou a presença do silicato dicálcico. Ensaio de caracterização física e química também foram realizados. Argamassas simples foram produzidas com o aglomerante, sendo avaliadas quanto a resistência à compressão. Os resultados mostraram que o novo clínquer desenvolvido possui aspectos que o caracterizam como um cimento de pega rápida, estável e durável. Esta pesquisa mostra a possibilidade de se produzir aglomerantes hidráulicos sustentáveis, com largo potencial de utilização na construção civil e que contribuem para minimizar a emissão de gases poluentes e o consumo de recursos naturais e energia.

**Palavras-chave:** Cimento belítico. Sustentabilidade. Resíduos.

### ABSTRACT

*In order to better align the construction industry to the sustainable development proposed in the last decades, a lot of work has been done to create alternative building materials, with a lower environmental impact. The objective of this project is to develop a belite cement through the association of granite wastes and "grits", from cellulose industry, similar to the Roman Cement, and evaluate its usage in mortars for restoration and facade decoration. A binary mix between wastes in the ratio of 1.4 (Ca/Si) was prepared. The mix was burned at 950 °C and then submitted to a quick cooling by compressed air injection. The analysis of the mineralogical composition of the clinker, made by DRX techniques, indicated the presence of dicalcium silicate. Physical and chemical characterization tests were also performed. Simple mortars samples were produced with the binder and its compressive strength were evaluated. The results show that the clinker was some features which characterize it as a quick setting, stable and durable cement. The research shows the possibility of making*

---

<sup>1</sup> MENDES, Beatryz; ALVARENGA, Rita de Cássia; FASSONI, Délio; PEDROTI, Leonardo; RIBEIRO, José Carlos. Produção de cimento belítico a partir de resíduos industriais para uso em argamassas de restauro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

*sustainable hydraulic binders, with a wide potential usage in construction and with the capacity to reduce the emission of greenhouse gases and the consumption of natural resources and energy.*

**Keywords:** Belite cement. Sustainability. Wastes.

## 1 INTRODUÇÃO

Aglomerantes são materiais pulverulentos empregados na construção civil para fixar ou aglomerar materiais entre si (HAGEMANN, 2011). São produtos que, misturados com água, formam uma pasta que endurece por simples secagem ou pela ocorrência de reações químicas de hidratação.

Os aglomerantes podem ser classificados como aéreos ou hidráulicos, de acordo com a capacidade de endurecer sob a influência exclusiva da água e conservar suas propriedades na presença desta.

Existem alguns tipos de cimento, tais como o cimento Portland, o cimento Romano (ou natural), o cimento aluminoso, entre outros. O cimento Portland é o ligante hidráulico mais utilizado nos dias de hoje, sendo um material extensamente aplicado em materiais do setor da construção como argamassas e concretos (BURUBERRI, 2014).

O alto consumo do produto torna o ramo de produção do cimento Portland um dos maiores consumidores de recursos naturais e energia, e responsável por uma elevada emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Segundo a CIMPOR (2011)<sup>2</sup>,

a nível global, a indústria cimenteira produz atualmente cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, das quais metade é intrínseca ao próprio processo químico de produção, 40 % é proveniente dos combustíveis utilizados e os restantes 10%, emitidos de forma indireta, em consequência da utilização de energia elétrica e transportes.

Diante à necessidade cada vez maior de se estabelecer mundialmente uma sustentabilidade à longo prazo, na qual o crescimento econômico deve respeitar os limites ecológicos, tem-se buscado cada vez mais formas alternativas de produção do cimento. Estas investigações estão centradas, principalmente, na redução das emissões de CO<sub>2</sub> e na utilização de materiais alternativos, como os resíduos industriais, em substituição às matérias-primas convencionais.

Neste âmbito, destacam-se os cimentos belíticos, que retomam a ideia do antigo cimento Romano ou natural. Na produção de ambos, as temperaturas típicas para um cimento ótimo são na ordem de 750 a 1000°C (HUGHES, 2012). Isso implica em menor consumo de energia e emissão de gases tóxicos à atmosfera.

O cimento Romano apresenta ainda outras características que tornam interessante a sua utilização. Eles se distinguem dos outros aglomerantes hidráulicos principalmente pelo curto tempo de pega, cor e textura agradáveis, pouca retração na pega e excelente durabilidade (KOSLOWSKI;

---

<sup>2</sup> CIMPOR - CIMENTOS DE PORTUGAL, SGPS, S.A.

HUGHES; WEBER, 2010). Por isso, foi muito aplicado em argamassas destinadas ao ornamento e conservação de fachadas de monumentos históricos em meados do século XIX.

Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento de um clínquer belítico, com características bastante próximas das do cimento Romano, e sua aplicação na fabricação de argamassas a serem utilizadas em obras de restauro. Todavia, o material foi produzido somente a partir de resíduos industriais, provenientes das indústrias de celulose e beneficiamento de rochas ornamentais, o que colabora ainda mais com o desenvolvimento sustentável almejado.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Recebimento, preparação das matérias-primas e calcinação

O procedimento inicial para a realização deste trabalho foi a obtenção dos resíduos a serem empregados na produção do novo cimento. O *grits*, resíduo proveniente da indústria da celulose, foi recebido diretamente da empresa fornecedora. O resíduo do corte de granito (RCG), por sua vez, foi coletado da lama resultante das operações de corte, na indústria geradora, armazenado em sacos plásticos e transportado até o Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizados na presente pesquisa 20 kg e 25 kg dos resíduos RCG e *grits*, respectivamente.

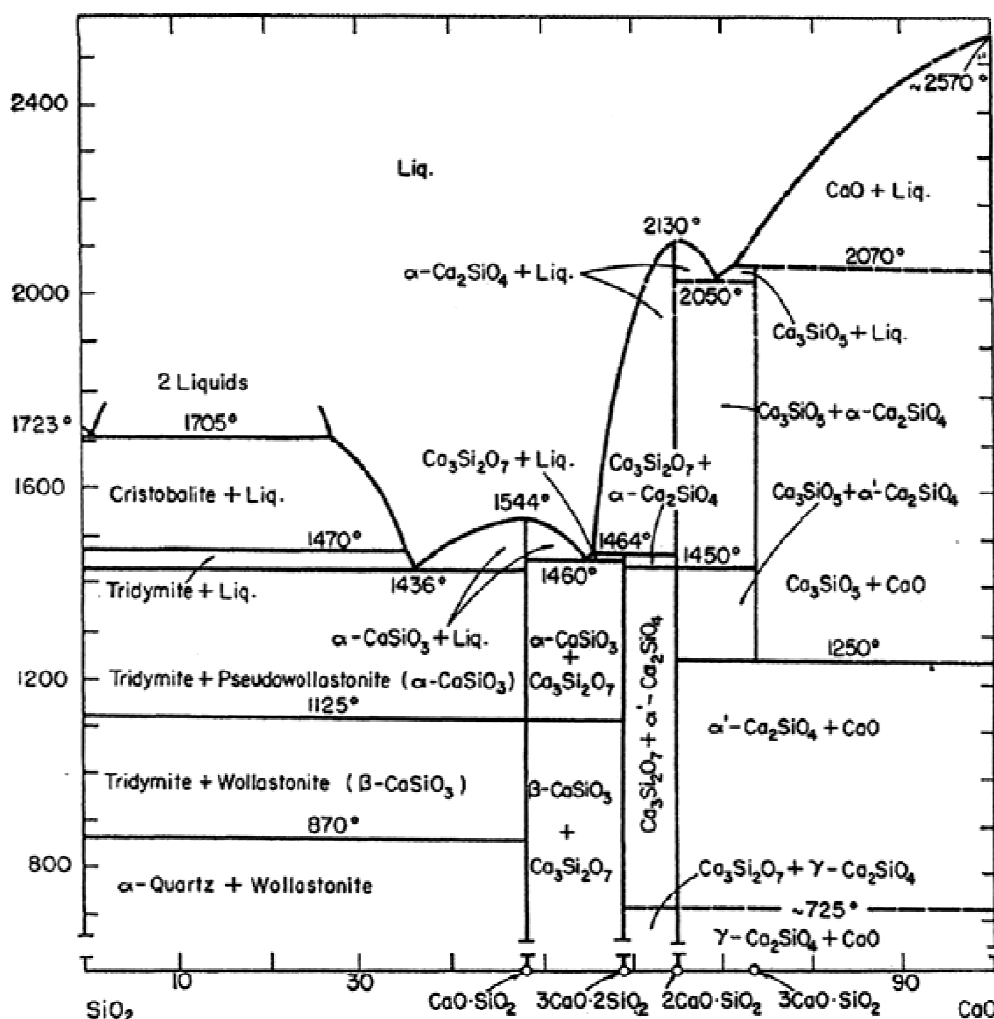
Após o recebimento, as matérias-primas foram caracterizadas quimicamente através da técnica de fluorescência de raios x por energia dispersiva (EDX). Partindo dos resultados obtidos, fez-se um proporcionamento da quantidade de cada um dos resíduos para a obtenção de uma relação molar Ca/Si igual a 1,4. Este valor foi adotado com base nas pesquisas de Kacimi et al. (2009) e Boudizi et al. (2014), que também abordaram a fabricação de cimentos belíticos.

Para obedecer a relação 1,4 citada acima, obteve-se a proporção 1:0,65 de *grits* para RCG. Os materiais foram misturados e homogeneizados em via úmida, em um recipiente plástico, e blocos prismáticos de dimensões 24x11x12 cm foram moldados para a calcinação em forno elétrico tipo mufla, da marca *Linn*, linha *Elektro Therm* e temperatura máxima igual a 1350°C.

A temperatura de sinterização foi adotada após análise do diagrama de fases do sistema CaO-SiO<sub>2</sub> (Figura 1), a fim de se obter as fases  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S e  $\beta$ -C<sub>2</sub>S. Observa-se que este composto cristalino é formado a partir dos 725°C, em quantidades crescentes até a temperatura de 1250°C. Eckel (1905) sugere que a temperatura de queima para a produção de cimento romano esteja entre 900-1200 °C. No entanto, como um dos objetivos é a redução do teor de CO<sub>2</sub> liberado quando da produção do clínquer, a temperatura máxima de alcance adotada na presente pesquisa foi 950°C. Os blocos permaneceram no forno durante um intervalo de tempo de cinco horas,

com uma taxa de aquecimento igual a 3,08 °C/min, e mantidos ainda por mais trinta minutos sob a temperatura de 950°C.

Figura 1 – Diagrama de fases do sistema CaO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Raupp (2006)

O clínquer obtido após a sinterização foi resfriado através da injeção de ar comprimido. Após, o material foi submetido por um período de uma hora no moinho de bolas. A finura desejada foi a passante na peneira #200. Amostras do material foram recolhidas e submetidas a ensaios de caracterização física, química e mineralógica, sem adição de outro componente. Na Figura 2 é mostrado o material resultante.

Figura 2 – Material obtido após a calcinação da mistura de resíduos e ser submetido ao moinho de bolas



Fonte: Os autores

## 2.2 Caracterização física, química e mineralógica

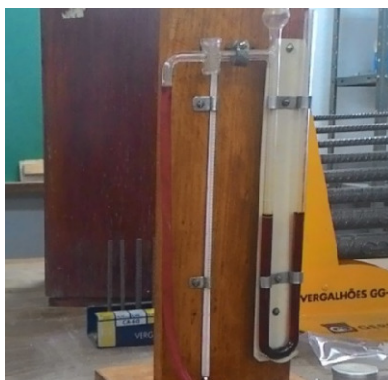
### 2.2.1 Determinação da massa específica

A massa específica foi determinada a partir dos procedimentos da NM 23:2001. O reagente líquido usado durante o ensaio foi querosene, e tomou-se uma amostra de 60g do clínquer.

### 2.2.2 Determinação da área específica do novo clínquer

O ensaio de determinação da área específica foi executado segundo a ABNT NBR 7224:1996, mediante o emprego do “permeabilímetro de Blaine” (Figura 3). A amostra foi preparada e a massa foi determinada por tentativas, como recomenda a norma. A temperatura da sala de ensaio foi controlada e o tempo de percolação do ar na amostra foi medido com o auxílio de um cronômetro. Todos os dados obtidos foram anotados para o posterior cálculo da área específica em massa.

Figura 3 – Permeabilímetro de Blaine



Fonte: Os autores

### 2.2.3 Determinação da expansibilidade de Le Chatelier

Determinou-se a expansibilidade a quente do aglomerante através das prescrições da ABNT NBR 11582:1991. Preparou-se, previamente, a pasta de cimento e água necessária para a consistência normal e prosseguiu-se com a moldagem dos três corpos de prova com o uso das agulhas de Le Chatelier (Figura 4). Realizou-se os demais procedimentos obtendo-se assim os resultados necessários.

Figura 4 – Ensaio de expansibilidade a quente do novo clínquer



Fonte: Os autores

### 2.2.4 Determinação dos tempos de pega

Inicialmente, foram feitos os procedimentos para a determinação dos tempos de pega segundo a ABNT NBR NM 65:2002. Antes, foi obtido o índice de consistência normal, de acordo com a ABNT NBR NM 43:2002.

No entanto, o comportamento do novo clínquer difere muito em relação ao cimento Portland, de modo que os procedimentos aplicados para a determinação do tempo de pega não levaram à obtenção de resultados válidos. Mesmo utilizando o teor de água para consistência normal da pasta, ao colocá-la no molde tronco-cônico, houve alta exsudação, o que acabou inviabilizando o ensaio.

Por não haver dados concretos sobre os tempos de pega, inferiu-se sobre o mesmo através da observação do comportamento de pastas e argamassas produzidas com relação água/cimento igual a 0,55.

Sabendo-se que os tempos de pega são propriedades importantes a serem verificadas, estes estão sendo objetos de estudo desta mesma equipe, em um projeto paralelo, no qual se está avaliando a influência da adição do ácido cítrico em pastas e argamassas com o novo clínquer.

### 2.2.5 Determinação da composição química (EDX)

A composição química do novo clínquer foi determinada através da análise por fluorescência de raios-X por energia dispersiva, ou EDX. O ensaio foi realizado na Sala de Instrumentação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, através do aparelho MicroEDX-1300, da marca Shimadzu.

### 2.2.6 Análise por Difração de Raios X (XRD)

A análise mineralógica do material foi feita a partir da aplicação dos métodos de difração de raios x. Os parâmetros e respectivas condições de execução da técnica são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros e condições da análise por DRX

Parâmetros	Condições
Radiação	Cu Ka ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ )
Faixa angular de varredura ( $2\theta$ )	20 a 80°
Passo angular ( $2\theta$ )	0.05°
Tempo de varredura total	20 min

Fonte: Os autores

### 2.2.7 Análises qualitativas

Realizaram-se também análises visuais, portanto qualitativas, em pastas feitas com o cimento, para avaliar melhor características tais como: cor, textura e aplicabilidade em rebocos e outros revestimentos.

## 2.3 Produção de argamassas e determinação da resistência mecânica

A fim de avaliar o possível emprego do novo aglomerante em argamassas de restauro, produziram-se argamassas simples, contendo somente o clínquer, areia e água. Segundo Koslowski, Hughes e Weber (2010), argamassas para reboco produzidas com cimento romano devem ter uma proporção de cimento para agregado fino 1:1,5 em volume; portanto, este foi o traço escolhido.

Utilizou-se areia úmida, peneirada e fina, com módulo de finura igual a 1,74 e dimensão máxima característica de 1,2 mm. A adição de água foi controlada durante a mistura até obter-se a textura desejada para uma massa de reboco. O fator água/cimento obtido foi de 0,36, incluindo a água presente na areia.

Os procedimentos para a fabricação da argamassa seguiram as prescrições da ABNT NBR 13276: 2002. Após a preparação desta, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões 5x10 cm, para a realização de ensaios de resistência à compressão aos 21, 28 e 42 dias. Estes foram levados para a câmara úmida, onde permaneceram em cura até as datas de ruptura.

Foram ensaiados dois exemplares em cada idade (previamente capeados) obtendo-se assim a resistência média.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As composições químicas dos resíduos utilizados na produção do clínquer, obtida através da técnica de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX), estão apresentadas no Quadro 2.

No Quadros 3, 4 e 5 são apresentados os dados coletados e os resultados obtidos nos ensaios de determinação da massa específica, área específica e expansibilidade a quente, respectivamente.

Eckel (1905) apresenta a especificação que os cimentos naturais americanos deveriam possuir massa específica em torno de 2,5 a 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Seguindo esse critério, observa-se que a massa específica do clínquer produzido está dentro dos limites estabelecidos.

Quadro 2 – Composição química dos resíduos *grits* e RCG, empregados como matérias-primas

<b>Caracterização química dos resíduos</b>		
Composto	Grits	RCG
	%	%
SiO <sub>2</sub>	0,78	65,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,10	12,84
CaO	95,4	3,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22	7,89
K <sub>2</sub> O	0,08	4,19
Na <sub>2</sub> O	0,76	2,39
MgO	0,85	1,47
MnO	0,01	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,93
PF*	41,67	1,33

Fonte: Os autores

Quadro 3 – Determinação da massa específica do novo clínquer

<b>Determinação da Massa Específica</b>		
Massa da amostra:	60,0	g
Medida inicial:	0,3	ml
Medida final:	22,7	ml
Massa específica:	<b>2,679</b>	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Os autores



Quadro 4 – Determinação da área específica do novo clínquer

<b>Determinação da Área Específica pelo Método de Permeabilidade ao Ar</b>			
Parâmetros	Amostra 1	Amostra 2	
Massa (m)	2,13	2,14	g
Tempo (t)	87" 63	87" 58	s
Massa Específica ( $\rho$ )	2,679	2,679	g/cm <sup>3</sup>
Volume da camada (Vcam)	1.663	1.663	cm <sup>3</sup>
Constante do aparelho (k)	0,829	0,829	Pa <sup>1/2</sup> m <sup>-1</sup>
Temperatura	32	32	°C
Viscosidade do ar ( $\eta$ )	18,67	18,67	x10 <sup>-6</sup> Pa.s
Área Específica (Am):	529,0	522,0	m <sup>2</sup> /kg
Área Específica média (Am):	<b>525</b>		m <sup>2</sup> /kg

Fonte: Os autores

Quadro 5 – Determinação da expansibilidade do novo clínquer

<b>Determinação da Expansibilidade</b>			
Hora da leitura inicial:	15:00		
	CP 1	CP2	CP3
Leitura inicial (mm)	1,5	2,5	1,0
Leitura final (mm)	2,5	2,5	1,0
Diferença (mm)	1,0	0,0	0,0
Expansibilidade média (mm):	<b>0,3</b>		

Fonte: Os autores

Os valores típicos de área específica para os cimentos romanos são entre 400-800 m<sup>2</sup>/kg (HUGHES, 2012). O valor encontrado enquadra-se nesta faixa, como era o esperado. Ressalta-se que a área específica do cimento Portland gira em torno de 240 m<sup>2</sup>/kg, correspondendo a menos de 50% da área específica do cimento belítico.

A área específica elevada, além de aumentar a exsudação, interfere na reatividade do material, governando a velocidade das reações de hidratação do mesmo.

Segundo Petrucci (2005), para que um cimento seja estável, é necessário que nenhum de seus compostos sofra, uma vez endurecido, uma expansão prejudicial. A cal e a magnésia, livres e cristalizadas, são os principais responsáveis por uma marcada expansão, pois se hidratam lentamente e sem dissolução prévia.

O resultado do ensaio de expansibilidade a quente mostra que o cimento não apresentou expansão além dos limites estabelecidos pela norma, sendo, portanto, estável. Isto significa, também, que o teor de cal livre presente no

material não é significativo o bastante para afetar a estabilidade do mesmo.

Os resultados obtidos na análise da composição química do clínquer, através do EDX, são mostrados no Quadro 6. O teor de óxido de cálcio presente na amostra foi considerável, sendo aproximadamente 29%. No entanto, esta porcentagem engloba tanto a cal livre como os óxidos de cálcio combinados aos silicatos, predominantes na matriz cimentícia.

Hughes (2012) estabelece critérios de composição para o cimento Romano, sendo que as porcentagens de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  devem ser superiores a 20% e 6%, respectivamente. Além disso, o teor de  $\text{SO}_3$  deve ser inferior a 4% e o de cloro, a 0,1%. Ele apresenta, ainda, intervalos ótimos para os valores dos módulos hidráulico e de sílica. Os critérios que não foram atendidos pelo novo aglomerante foi o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , apresentando-se inferior ao mínimo estabelecido, e os módulos hidráulico e de sílica.

Estas diferenças entre a composição requerida para a classificação como cimento Romano e a do novo aglomerante ocorreram devido às matérias-primas empregadas na produção deste, que se distinguem daquelas que dão origem ao antigo cimento Romano ou Natural.

Quadro 6 – Composição química do novo clínquer produzido

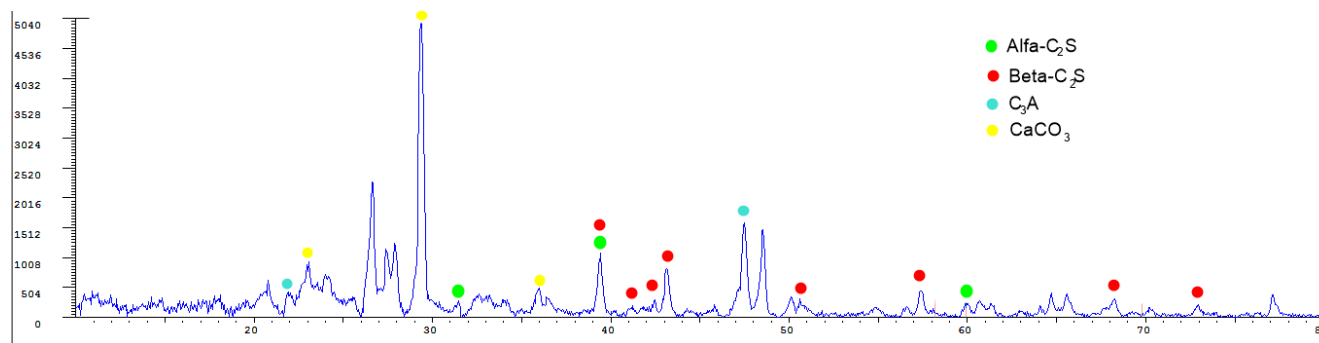
<b>Composição química do novo clínquer produzido</b>	
Composto	%
CaO	28,86
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,82
$\text{SiO}_2$	28,65
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,50
$\text{K}_2\text{O}$	1,78
MgO	0,18
$\text{Na}_2\text{O}$	1,39
$\text{TiO}_2$	0,03
$\text{SO}_3$	1,04
Cl	0,11
$\text{CO}_3$	30,99

Fonte: Os autores

O difratograma obtido na análise por DRX é mostrado na Figura 5. Neste, foi possível identificar a presença das fases  $\alpha'$ - $\text{C}_2\text{S}$  e  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$ , as mais reativas e que apresentam, portanto, maior hidraulicidade. Observa-se também a presença do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ).

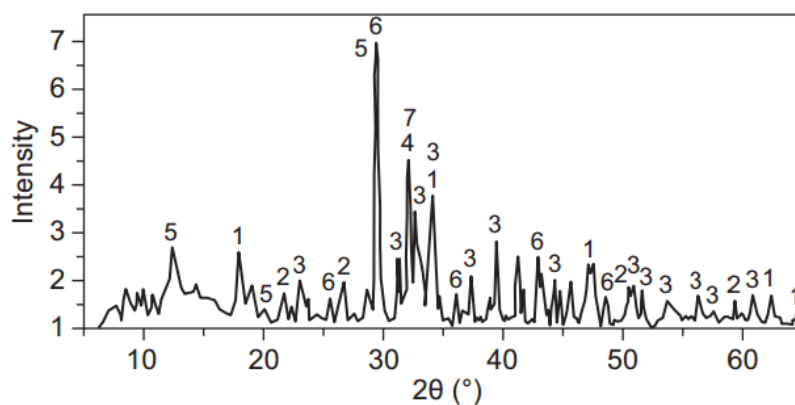
Heikal et al. (2015), em seu trabalho, também abordou sobre cimentos naturais e obteve o difratograma apresentado na Figura 6 para o clínquer estudado. Comparando-se os dois difratogramas, percebe-se que existe semelhança entre os mesmos, com alguns picos e fases em comum.

Figura 5 – Difratoograma do clínquer, obtido pela análise DRX



Fonte: Os autores

Figura 6 – Difratoograma do cimento natural estudado por Heikal et al. (2015) (1 -  $\text{Ca(OH)}_2$ ; 2 -  $\text{SiO}_2$ ; 3 -  $\text{C}_2\text{S}$ ; 4 -  $\text{C}_3\text{A}$ ; 5 -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 6 -  $\text{CaCO}_3$ ; 7 -  $\text{C}_2\text{AS}$ )



Fonte: Heikal et al. (2015)

Na análise qualitativa das pastas de cimento pode-se observar os aspectos de coloração uniforme e textura fina, assim como ocorre nas pastas produzidas com cimento Romano.

A resistência à compressão da argamassa produzida, nas três idades de ruptura, está apresentada no Quadro 7. A evolução do ganho de resistência pode ser melhor observada no Gráfico 1.

Ressalta-se que, já a partir do 21º dia, a argamassa apresentou resistência à compressão superior aos 3 MPa, comportamento que se mostrou satisfatório para a finalidade prevista. Aos 42 dias, a resistência alcançou aproximadamente 4,2 MPa.

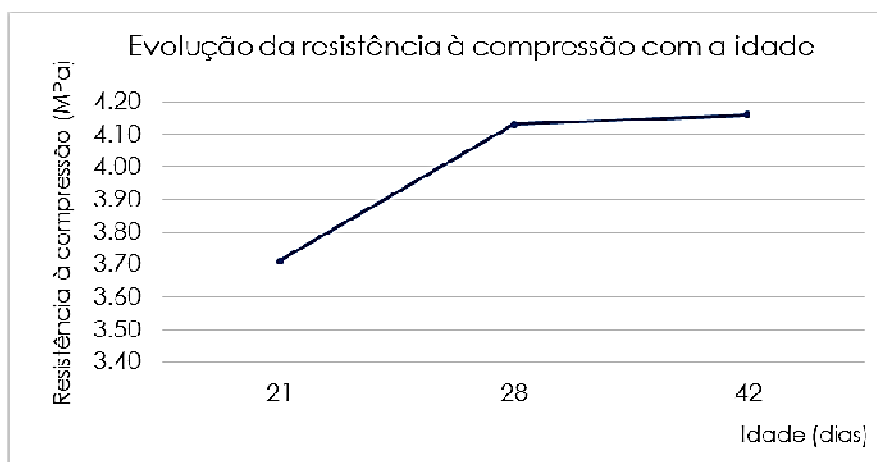
Embora houve a confirmação da presença das fases  $\alpha'$ - $\text{C}_2\text{S}$  e  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$  no clínquer, o ganho de resistência após os 28 dias de idade foi abaixo do esperado, fato que indica a necessidade de continuidade da presente investigação.

Quadro 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas

C.P.	Idade (dias)	Área (cm <sup>2</sup> )	Força (N)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)
1	21	19,67	7378,10	3,75	3,71
2	21	19,60	7175,03	3,66	
3	28	19,71	7784,24	3,95	4,13
4	28	19,67	8461,13	4,30	
5	42	19,60	8122,68	4,14	4,16
6	42	19,63	8190,37	4,17	

Fonte: Os autores

Gráfico 1 – Evolução da resistência à compressão com a idade



Fonte: Os autores

A argamassa apresentou um bom aspecto visual, sem desagregação da areia e fissuração superficial. Observou-se que a mesma é um tanto porosa, semelhante às argamassas produzidas com cimento Romano (Figura 7). No entanto, características como porosidade e absorção não foram ainda quantificadas. Estes ensaios serão realizados posteriormente.

Figura 7 – Corpos de prova rompidos aos 42 dias



Fonte: Os autores

## 4 CONCLUSÕES

A caracterização feita até então revela que o novo clínquer, além de possuir propriedades aglomerantes, assemelha-se ao antigo cimento Romano ou Natural, atendendo aos objetivos previstos. Desta forma, justifica-se o seu uso potencial em argamassas para obras de restauro e conservação de fachadas de monumentos históricos.

A análise mineralógica por difração de raios X mostrou que a temperatura de queima e o resfriamento do material foram suficientes para a formação e estabilização do silicato dicálcico em suas fases mais reativas.

As composições químicas do novo clínquer e as definidas para cimentos Romanos são próximas, porém alguns compostos não estiveram presentes em quantidades ideais. Isto se deve às matérias primas empregadas, que diferem daquelas que dão origem ao cimento Romano ou Natural.

Observa-se que o cimento não apresentou expansibilidade significativa, sendo este um aspecto positivo. A argamassa produzida a partir do mesmo mostrou desempenho mecânico satisfatório para o uso ao qual se destina.

Outros ensaios de caracterização do clínquer e das argamassas ainda devem ser feitos, como a determinação do óxido de cálcio livre, determinação da porosidade e absorção.

O presente trabalho experimental mostra a possibilidade de obtenção de um clínquer belítico utilizando como matérias-primas apenas resíduos industriais produzidos em larga escala no Brasil. Sua produção, que ocorre sob menores temperaturas de queima, contribui ainda com a redução da emissão de gases na atmosfera. Tem-se uma alternativa mais sustentável, economicamente viável e promissora, desde que seja mais bem estudada e otimizada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras CNPQ, CAPES e FAPEMIG e ao Laboratório de Materiais de Construção da UFV pelo suporte dado ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 23**: Cimento Portland e Outros Materiais em pó - Determinação da massa específica. 1 ed. [s.l.], 2000. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7224**: Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1984. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002. 4 p.

BOUDIZI, M. A.; TAHAKOURT, A.; BOUDIZI, N.; MERABET, D. Synthesis and characterization of belite cement with high hydraulic reactivity and low environmental impact. **Arab J Sci Eng**, v.39, p.8659–8668, 2014.

BURUBERRI, Leire Hernando. **Uso de lamas de cinzas volantes e cinzas da indústria da celulose em clínquer**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014.

CIMENTOS DE PORTUGAL. **Relatório de Sustentabilidade**: O desafio da sustentabilidade. Lisboa: CIMPOR, 2011, 128p.

ECKEL, Edwin C.. **Cements, Limes and Plasters**. New York: John Wiley & Sons, 1905

HAGEMANN, S. E. **Materiais de Construção Básicos**. Universidade Aberta do Brasil, Instituto Federal Sul-rio-grandense, Porto Alegre, 2011. 143 p.

HEIKAL, Mohamed et al. Hydration characteristics of prompt cement in the presence citric acid as retarder. **Ceramics – Silikáty**, S.l., v. 1, n. 59, p.17-23, mar. 2015.

HUGHES, D (Ed.). **Manual on best practice in the application of roman cements**: Roman cement, past and present Conservation theory and practice. 2. ed. [s.l.]: Rocare Project, 2012. 113 p.

KACIMI, L.; SIMON-MASSERON, A.; SALEM, S. GHOMARI, A. DERRICHE, Z. Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 39, p.559–565, 2009.

KOZLOWSKI, Roman; HUGHES, David; WEBER, Johannes. Roman cements - key materials of the built heritage of the nineteenth century. In: DAN, M. Boştenaru; PĚKRYL, R.; TÖRÖK, Á.. **Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures**. [s.l.]: [s.n.], 2010. p. 28.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 14. ed. São Paulo: Globo, 2005.

RAUPP, Fabiano Pereira. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral**: composições cerâmicas e cimentícias. 2006. 77 f. Tese (Doutorado), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.