

## **Avaliação da resistência à compressão e cor de cimentos LC<sup>3</sup> Amazônicos**

### **Compressive strength and color evaluation of Amazonian LC<sup>3</sup> cements**

DOI:10.34117/bjdv7n11-326

Recebimento dos originais: 12/10/2021

Aceitação para publicação: 19/11/2021

#### **Euler Santos Arruda Junior**

Mestre em Arquitetura e Urbanismo  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: euler\_arruda@hotmail.com

#### **Márcio Santos Barata**

Doutor em Geologia e Geoquímica  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: marciobarata@ufpa.br

#### **Nallyton Tiago de Sales Braga**

Mestre em Arquitetura e Urbanismo  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: nallyton.tiago@gmail.com

#### **Christianne Ferreira de Jesus**

Graduada em Arquitetura e Urbanismo  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: ttianni@hotmail.com

#### **Elias Soares Carvalho**

Graduado em Arquitetura e Urbanismo  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: arq.eliascarvalho@gmail.com

#### **Ana Paula Braga Delgado**

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo  
Universidade Federal do Pará  
R. Augusto Corrêa, 01. Guamá, Belém, Pará.  
E-mail: anapaulabraga99@gmail.com

### **RESUMO**

O emprego de adições minerais como substituição parcial do clínquer no cimento Portland tem sido uma das principais estratégias para redução da emissão de CO<sub>2</sub> por

parte da indústria mundial do cimento. Contudo, a disponibilidade de escórias de alto forno e cinza volante não suprem a demanda. Na Amazônia, há grandes depósitos de caulins, todos constituídos por concentrações expressivas de caulinita extremamente fina. Uma alternativa para a região seria o emprego destas adições ao cimento Portland, combinando com matérias-primas abundantes como calcário. Estes cimentos são denominados na literatura de LC3 e caracterizam-se por serem cimentos de baixa emissão de CO<sub>2</sub>. O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades dos cimentos LC3 produzidos com elevadas incorporações de caulim calcinado e calcário. Os níveis de substituição das adições minerais sobre a massa de cimento Portland comum foram de 45% e 60%. As variáveis investigadas foram massa específica, área superficial específica Blaine, água de consistência e tempos de pega inicial e final dos cimentos, além da cor proveniente das misturas em pasta e resistências à compressão de argamassas. As incorporações das misturas metacaulim-calcário aumentaram a demanda de água e reduziram os tempos de pega em razão da elevada finura da caulinita. Entretanto, houve acréscimos significativos de resistência à compressão em comparação aos cimentos Portland comum e composto. Os resultados são promissores, mas requerem estudos mais aprofundados, principalmente no que tange aos aspectos de durabilidade frente à alta demanda de água destes cimentos.

**Palavras-chave:** caulim, metacaulinita, calcário, LC3, cimento de baixa emissão de CO<sub>2</sub>

## ABSTRACT

The use of mineral additions as a partial replacement of clinker in Portland cement has been one of the main strategies for reducing CO<sub>2</sub> emissions by the global cement industry. However, the availability of blast furnace slag and fly ash does not supply the demand. In the Amazon, there are large deposits of kaolin, all consisting of expressive concentrations of extremely fine kaolin. An alternative for the region would be the use of these additions to Portland cement, combining with abundant raw materials such as limestone. These cements are called LC3 in the literature and are characterized as low CO<sub>2</sub> emission cements. The objective of this work was to evaluate the properties of LC3 cements produced with high incorporations of calcined kaolin and limestone. Substitution levels of mineral additions over common Portland cement mass were 45% and 60%. The investigated variables were specific mass, Blaine specific surface area, water consistency and initial and final setting times of cements, in addition to color from paste mixtures and compressive strengths of mortars. The incorporation of metakaolin-limestone mixtures increased water demand and reduced setting times due to the high fineness of kaolinite. However, there were significant increases in compressive strength compared to common and composite Portland cements. The results are promising, but require further studies, especially with regard to the durability aspects in view of the high water demand of these cements.

**Keywords:** kaolin, metakaolin, limestone, LC3, low CO<sub>2</sub> emission cement.

## 1 INTRODUÇÃO

Com um histórico de serviços de mais de 200 anos, o cimento Portland provou ser um material confiável para construção em uma ampla gama de condições ambientais e de trabalho. O sucesso desse cimento é atestado pelo fato de o concreto de cimento Portland

ser o material mais produzido no mundo. Embora durante esses 200 anos o processo de produção e as aplicações do cimento tenham passado por muitas mudanças, a robustez e a versatilidade do cimento garantiram que sua química básica permanecesse inalterada. Portanto, não é surpresa que a maioria das melhorias modernas praticamente viáveis para o cimento envolva uma substituição parcial do clínquer Portland e não a introdução de um processo químico completamente novo.

A preocupação com a sustentabilidade da produção de cimento levou ao desenvolvimento de muitas tecnologias amplamente utilizadas em todo o mundo. Enquanto o primeiro conjunto de desenvolvimentos se concentrou na redução da energia necessária para a produção de clínquer, a maioria dos fornos de clínquer modernos estão próximos da eficiência termodinamicamente máxima possível. A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios complementares (SCMs) permite a redução do impacto ambiental da produção de cimento sem reduzir a facilidade de uso e versatilidade do cimento. A maioria dos cimentos disponíveis na maioria dos países hoje são misturados com SCMs, como cinza volante, escória e calcário. Embora cimentos excelentes possam ser produzidos usando esses SCMs, cada um deles altera o desempenho do cimento sob várias condições. Com o desenvolvimento de uma ampla variedade de cimentos misturados, nenhum tipo de cimento é conhecido como o mais adequado para todas as aplicações possíveis.

No início dos anos 2000, percebeu-se que o teor de clínquer no cimento não estava mais diminuindo e outras reduções com os SCMs disponíveis pareciam ser improváveis. Por exemplo, no caso da cinza volante, apesar da ampla disponibilidade do material, ela só pode substituir o clínquer até certo ponto devido à sua menor reatividade e, no caso da escória, embora sejam possíveis níveis de substituição mais elevados, é disponível em quantidades limitadas. Cimentos mistos ternários ofereceram o benefício de níveis mais altos de substituição de clínquer, reduzindo os efeitos indesejáveis que um determinado SCM pode ter no desempenho do cimento (BERRY, 1980; ANTONI et al., 2012; DHANDAPANI et al., 2020).

O cimento de argila calcinada de calcário (LC<sup>3</sup>) é um desses cimento misturado ternário recentemente desenvolvido em que a alumina da argila calcinada e o carbonato do calcário também reagem um com o outro, junto com a reação pozolânica tradicional da argila calcinada e o efeito de enchimento de calcário, criando uma sinergia entre os três componentes primários (clínquer, argila calcinada e calcário) (ANTONI et al., 2012). Isso permite uma maior substituição de clínquer e leva ao desenvolvimento de uma

microestrutura mais fina e menos conectada que dá ao cimento um excelente desempenho mecânico e relacionado à durabilidade (ANTONI et al., 2012). Enquanto a substituição do clínquer por calcário é geralmente limitada a 15%, um máximo de 25% de substituição por argila calcinada é usual. Misturas LC<sup>3</sup> com até 40% de clínquer foram produzidas em laboratório (ANTONI et al., 2012). Ao mesmo tempo, como as argilas e o calcário estão amplamente disponíveis em todo o mundo, a produção de LC<sup>3</sup> é praticamente viável. Além disso, o cimento pode ser produzido com tecnologias amplamente disponíveis e familiares à indústria cimenteira, embora seu uso não requeira nenhum treinamento especial (BISHNOI, et al., 2014; EMMANUEL, et al., 2016). Isso dá ao cimento uma vantagem distinta em relação aos produtos que requerem manuseio e produção especiais.

Por tudo isso, a LC<sup>3</sup> foi identificada como a tecnologia mais promissora que pode ajudar a indústria do cimento a atingir suas metas de emissão (DAVID ELLIOTT, 2020). Dentro de duas décadas das ideias originais que levaram ao seu desenvolvimento, o cimento já está disponível comercialmente em vários países. O conhecimento sobre este cimento também aumentou exponencialmente ao mesmo tempo. Este artigo analisa o conhecimento atual sobre a produção, características e desempenho do LC<sup>3</sup>, identificando também as áreas-chave onde mais pesquisas são necessárias.

O Brasil possui grande potencial para a produção deste cimento de baixa emissão de CO<sub>2</sub> por conta da ampla disponibilidade de caulim e calcário. Em regiões onde não há disponibilidade de escórias e cinzas volantes, como, por exemplo, na Amazônia, cimentos pozolânicos eram até então fabricados com até 35% de caulim calcinado (BARATA, 2007).

Nos trabalhos desenvolvidos pelo LC<sup>3</sup> Project as argilas calcinadas empregadas na composição dos cimentos LC<sup>3</sup> não possuem teor de caulinita superior a 65% por questões econômicas, visto que o metacaulim (MC) custa três vezes o preço do cimento Portland (AVET e SCRIVENER, 2018). Entretanto, na Amazônia, a situação é diferente, pois, além de possuir os mais variados tipos de depósitos de caulim, de baixa a elevada concentração de caulinita, com e sem a presença de hidróxidos e óxidos de ferro, são também gerados e depositados resíduos ricos em caulinita oriundos das atividades de mineração e beneficiamento dos caulins secundários como cobertura de papel.

O Brasil é classificado como o quinto produtor mundial de caulim, com uma produção de cerca de 1,74 milhões de toneladas por ano (BRASIL, 2017). As reservas de caulim secundário, cujas características são as mais apropriadas para o uso como cobertura de papel por causa da alta concentração de caulinita com partículas inferiores a

2µm, estão localizadas na Amazônia, principalmente no Estado do Pará, onde estão instaladas as principais empresas de beneficiamento de caulim do mundo: a Imerys Rio Capim Caulim (IRCC), a Pará Pigmentos SA (PPSA) e a CADAM SA (LOUGH BROUGH, 1993; KENDALL, 1996).

Diante desta constatação científica, parte-se da hipótese que ao se empregar na produção do LC<sup>3</sup> um metacaulim de alta reatividade (MCAR), proveniente do caulim *flint* (CF), com alto teor de caulinita (> 90% caulinita), seria possível um percentual maior de substituição do clínquer pela mistura de argila calcinada-calcário, algo em torno de 45% a 60%, sem que houvesse perda de resistência. A folga de resistência proporcionada pelo MCAR proveniente dos resíduos cauliniticos poderia permitir a produção de LC<sup>3</sup> com percentuais de substituição de clínquer superiores aos 45% que vem sendo empregado nas pesquisas internacionais, sem detrimento da resistência em comparação a do CP II F. O que ocasionaria em ganhos ambientais e econômicos, tendo em vista a grande redução de clínquer em prol da mistura de argila calcinada e calcário, materiais de menor gasto energético e de menor emissão de CO<sub>2</sub>.

Além das questões ambientais e do âmbito do desempenho a pouco comentadas, uma outra consequência da possibilidade de produção de LC<sup>3</sup> a partir da argila calcinada em conjunto com o calcário seria a produção de cimento com tons mais claros (alvos). Isto ocorreria porque estes resíduos possuem elevada alvura, mesmo sendo um caulim não processado, o que ilustra bem o quão elevada é a concentração de caulinita deste minério de caulim. Um cimento com tons mais alvos possui uma maior aceitação de mercado e poderia viabilizar e restabelecer o emprego em maior escala de concretos e argamassas coloridas, uma vez que o cimento branco possui um custo de aquisição três vezes superior ao do cimento Portland comum cinza e sua fabricação foi interrompida no Brasil desde 2008 (SNIC, 2013).

## **2 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi dividido em três etapas: caracterização dos materiais de partida; produção dos cimentos com adições e a avaliação das propriedades físicas, mineralógicas, mecânicas e colorimétricas destes aglomerantes.

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA**

Os materiais de partida empregados no trabalho foram o caulim *flint* (CF), calcário e gipsita. O cimento empregado na pesquisa tanto como aglomerante de

referência como para a composição dos cimentos LC<sup>3</sup> foi o CP I 40, produzido por uma indústria cimenteira do Estado do Pará. O CF foi proveniente dos depósitos do vale médio do Rio Capim, localizados no município de Ipixuna, região nordeste do Estado do Pará. O calcário e a gipsita estudados foram os mesmos empregados pelas cimenteiras da região nordeste do Pará. O primeiro, procedente das ocorrências calcíferas denominadas Formação Pirabas, oriundas de sedimentos terciários marinhos fossilíferos. A gipsita foi proveniente do município de Codó, no Maranhão.

O CF, assim como o calcário e a gipsita, encontrava-se em torrões, com cerca de 18-20% de umidade. Foram submetidos a secagem prévia para destorroamento em fragmentos menores e subsequente pulverização antes de serem submetidos à caracterização. A secagem dos materiais de partida ocorreu por meio de estufa (modelo Q-317B, marca Quimis) de aquecimento elétrico, à temperatura de 105°C até a atingirem constância de massa. A moagem ocorreu durante uma hora, em moinho de bolas (modelo CT 242, marca SERVITECH). O jarro do moinho de 10 litros teve 2/3 do volume preenchido, sendo 1/3 por carga de esferas de alta alumina e os outros 1/3 pela amostra a ser moída. O restante foi destinado ao espaço necessário para a mobilidade dos materiais durante a moagem. A carga de material correspondente a 1/3 foi de aproximadamente 1,5 kg. Foram utilizadas bolas de alumina de 13mm e 30mm, com a massa de seis quilogramas e três quilogramas respectivamente.

Para o processo de produção do MC a partir da calcinação e moagem do CF seco, foram pesadas 800g de caulim para cada batelada de calcinação. O procedimento de calcinação consistiu em dispor as amostras em cadinhos de aço inox dentro de uma mufla quando a mesma encontrava-se na temperatura de 800°C. O tempo de permanência de cada amostra na mufla foi de 90 minutos. Após o resfriamento, o CF calcinado foi pesado para averiguação da perda ao fogo, parâmetro de controle de eficiência da calcinação. Após a calcinação, o metacaulim foi moído durante três horas, com o mesmo equipamento e procedimento de moagem descrito anteriormente. A mufla é da marca Quimis, modelo Q-318D, aquecimento elétrico, temperatura máxima de 1200°C com controlador digital.

As características físicas avaliadas foram a massa específica e a distribuição granulométrica das partículas. A massa específica foi determinada de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 16605, que se baseia na picnometria. À exceção do CPI 40, no qual foi empregado xilol, para os demais materiais de partida (CF, MC e calcário), o ensaio de massa específica foi realizado com água desmineralizada. A

distribuição granulométrica das partículas foi determinada por difração a laser. O equipamento empregado foi o granulômetro laser, da marca MARVERN, modelo MASTERSIZER 300. O procedimento consistiu em misturar e deflocular 500g de amostra em líquido dispersante com aplicação de tratamento ultrasônico por 15 minutos. Os índices de refração e absorção das partículas e do líquido dispersante assim como o tempo de obscuração variaram para grupo de amostra. Para o CF e para o MC, empregou-se água deionizada com 0,01% de ácido poliacrílico (pH 10); no cimento, álcool isopropílico e para o calcário, apenas água deionizada.

A mineralogia foi determinada por difração de raios-X (DRX). As amostras de cimento Portland CPI 40, CF, MC e calcário foram submetidas às análises de DRX pelo método do pó para identificação dos minerais existentes. O equipamento empregado foi o difratômetro de raios-X de feixes divergentes, modelo Emyrean da PANalytical, com goniômetro  $\theta - \theta$ , tubo de raios-X cerâmico selado de cobre (Cu), foco fino longo de 2.200W e filtro  $k\beta$  de Ni, detector liner (PSD) modelo X'Ceerator, com abertura (active length) de  $2,122^\circ 2\theta$  e 128 canais. As condições instrumentais utilizadas serão: voltagem de 40kV e corrente de 35mA; fendas soller de  $0,04^\circ$  rad (nos feixes incidentes e difratado); faixa de varredura de  $9$  a  $92^\circ 2\theta$ ; tamanho do passo de  $0,01^\circ 2\theta$  com 20 s de tempo/passos no modo de varredura contínuo; fenda divergente de  $1/4^\circ$  rad e anti-espalhamento de  $1/2^\circ$  rad; tamanho irradiado da amostra de 15mm; fenda de anti-espalhamento do feixe difratado de 5,0 mm e amostra em movimentação circular com frequência de 1 rotação/s. O tempo total de coleta será de 10 min. Os difratogramas gerados foram interpretados com auxílio do software X'Pert High Score da PHILIPS.

As análises químicas foram realizadas por fluorescência de raios-X (FRX), por meio do equipamento Bruker Ranger S2 (fonte Pd – Paládio) para os seguintes óxidos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Pb}_2\text{O}_5$ , além da perda ao fogo (PF).

## 2.2 PRODUÇÃO DOS CIMENTOS DE METACAULIM E CALCÁRIO

Seis tipos de cimentos de MC e calcário foram produzidos a partir do beneficiamento, e mistura dos materiais de partida (MC, calcário, gipsita e cimento Portland CP I 40). As adições minerais empregadas nas substituições do cimento Portland foram oriundas das combinações do MC proveniente do CF calcinado e moído e do calcário nas proporções 2:1, 1,5:1 e 1:1, respectivamente. Dois percentuais de substituição do cimento Portland CP I 40 pelas adições foram adotados: 45 e 60%.



Teores adicionais de gipsita foram incluídos nas composições destes cimentos de modo que todos os LC<sup>3</sup> contivessem o mesmo percentual de 5%. As composições dos cimentos são mostradas na Tabela 1. Além dos LC<sup>3</sup>, foram incluídos no programa experimental dois cimentos de referência: o CP I e o CII F, ambos de categoria de resistência de 40 MPa. O CP II F, de uso comercial na região, ao passo que o CP I, não.

Tabela 1 - Composição dos cimentos de MC e calcário (LC<sup>3</sup>)

TIPO	COMPOSIÇÃO (%)			
	CLÍNQUER	GIPSITA	CF CALCINADO	CALCÁRIO
LC3 – 50 2:1	50	5	30	15
LC3 – 50 1,5:1	50	5	27	18
LC3 – 50 1:1	50	5	22,5	22,5
LC3 – 35 2:1	35	5	40	20
LC3 – 35 1,5:1	35	5	36	24
LC3 – 50 1:1	35	5	30	30

Vale salientar que a adição mineral na proporção 2:1 se deve aos estudos anteriores que indicam que a mistura com 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário é a proporção ideal do ponto de vista estequiométrico para a formação dos monocarboaluminatos (ANTONI et al., 2012). As outras adições minerais, de proporções CF calci-nado: calcário de 1,5:1 e 1:1 foram investigadas em razão dos benefícios na redução dos impactos ambientais observados no trabalho de LIMA (2004). O pesquisador constatou que estas misturas apresentaram resistências à compressão superiores ao CP I devido à alta reatividade do MC produzidos com caulins da Amazônia, devido à alta concentração de caulinita e à elevada área superficial específica.

## 2.3 PROPRIEDADES DOS CIMENTOS

### 2.3.1 Ensaios no cimento anidro

Para os cimentos na condição anidra foram determinadas a área superficial específica Blaine ( $ASE_{Blaine}$ ) e a massa específica, conforme as prescrições das normas ABNT NBR 16372 e ABNT NBR 16605, respectivamente.

### 2.3.2 Ensaios em pastas

Nas pastas foram determinadas a: água de consistência, conforme a norma ABNT NBR 16606 e os tempos de pega inicial e final, realizado de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 16607. A determinação da água de consistência normal é um teste de preparação para a determinação dos tempos de pega inicial e final e não prevê a



correção da plasticidade da pasta com aditivos redutores de água, mas sim apenas com água.

### **2.3.3 Resistência à compressão (argamassas)**

As resistências à compressão dos cimentos, tanto para os LC<sup>3</sup> quanto para os de referência, foram determinadas de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7215. A avaliação foi realizada em argamassas de cimento e areia padrão brasileira, na proporção 1:3 (em massa) e relação água/cimento de 0,48, para as idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias. De modo a proporcionar condições semelhantes de moldagem, foram empregadas dosagens de aditivo superplastificante a base de policarboxilato nas argamassas com LC<sup>3</sup>.

### **2.3.4 Mineralogia das pastas hidratadas**

A mineralogia dos produtos de hidratação e das reações pozolânicas nos cimentos em análise foram realizadas em pastas de relação água/aglomerante de 0,40. Foram moldadas três pastas, uma com o cimento CP I, as outras duas com as composições LC<sup>3</sup> 50 (2:1) e LC<sup>3</sup> 35 (1,5:1). De modo a evitar a carbonatação imediatamente após a moldagem, as pastas foram seladas com filme de polietileno e dispostas em dessecador sob condição de vácuo. Para as análises de DRX, na idade de interesse de 28 dias, as pastas foram removidas do dessecador, fragmentadas rapidamente e a hidratação interrompida por meio da imersão destes fragmentos em álcool isopropanol. As condições de ensaios e os equipamentos foram descritos no item 2.1.

### **2.3.5 Colorimetria**

A capacidade de pigmentação proporcionada pelos cimentos LC<sup>3</sup> nas pastas e as suas diferenças cromáticas ao longo de 24 h e 28 dias em condições de ambiente de laboratório foram avaliadas por colorimetria em relação aos cimentos de referência (CPI 40 e CPII F 40).

A cor e suas variações foram determinadas através do espaço de cor CIELAB, a partir de medições sucessivas dos parâmetros L\*, a\* e b\*. O equipamento empregado foi o espectrofotômetro da marca KONICA MINOLTA, modelo CR-400, iluminação padrão D65, observador colorimétrico padrão de 2°, diâmetro da área de medição de 8mm. As diferenças de cor em um mesmo ponto para tempos distintos de medição foram calculadas pela fórmula CIE 2000, que foi desenvolvida para resolver o problema das

diferenças entre as avaliações instrumentais e o olho humano que ocorrem no sistema de cor CIELAB (espaço de cor  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), mostrada na Equação 01.

$$\sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:  $\Delta E^*$  = Diferença total da cor, em unidade Judd;  $\Delta L^*$  = variação da luminosidade;  $\Delta a^*$  = variação cromática no eixo verde/vermelho;  $\Delta b^*$  = variação cromática no eixo amarelo/azul.

Foram realizadas medições cromáticas para as idades de 1 e 28 dias. Nestes ensaios, para cada tipo de pasta foram moldados três corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 10 mm. No laboratório, os corpos de prova ficaram sob condições controladas de temperatura e umidade, no caso  $65 \pm 5\%$  e  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , respectivamente. Para cada corpo de prova foram realizadas duas medidas de cor sobre a superfície de 100 x 100  $\text{cm}^2$ . O valor da variação cromática  $\Delta E_{00}^*$  por corpo de prova será obtido a partir da média de seis medições.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação e discussão dos resultados foi dividida em caracterização dos materiais de partida e dos cimentos investigados, associando o desempenho mecânico com suas características físicas e mineralógicas.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

##### 3.1.1 Caracterização química e mineralógica

Os difratogramas de raios-X do CF, do calcário, do MC e do CP I 40 são mostrados nas Figuras 1 a 3, respectivamente. Na Tabela 2 são apresentadas as análises químicas por FRX. O espectro de raios-X do CF mostra ser constituído essencialmente por uma caulinita de elevado grau de desordem, aspecto evidenciado pelo pico principal da caulinita (001), que se mostra alargado na base. Além disto, o primeiro triplete, situado entre  $19,9^\circ$  e  $23,8^\circ 2\theta$  ( $4,7$  a  $3,73 \text{ \AA}$ ), é constituído por apenas um pico a  $4,45 \text{ \AA}$  e os outros dois tripletres localizados entre  $35^\circ$  e  $40^\circ 2\theta$  ( $2,55$  a  $2,24 \text{ \AA}$ ) são formados somente por duas reflexões mal definidas (Figura 1). Na FRX é possível quantificar o percentual de 97% de caulinita a partir dos valores teóricos de perda de massa e da razão Si/Al. No

caso da caulinita são de 13,96 e 1,178 enquanto que no CF a perda ao fogo foi de 13,84% e a razão Si/Al foi de 1,23, muito próximos dos valores teóricos.

Figura 1 - Difratoograma de raios-X do CF in natura (a) CF calcinado e moído (b).

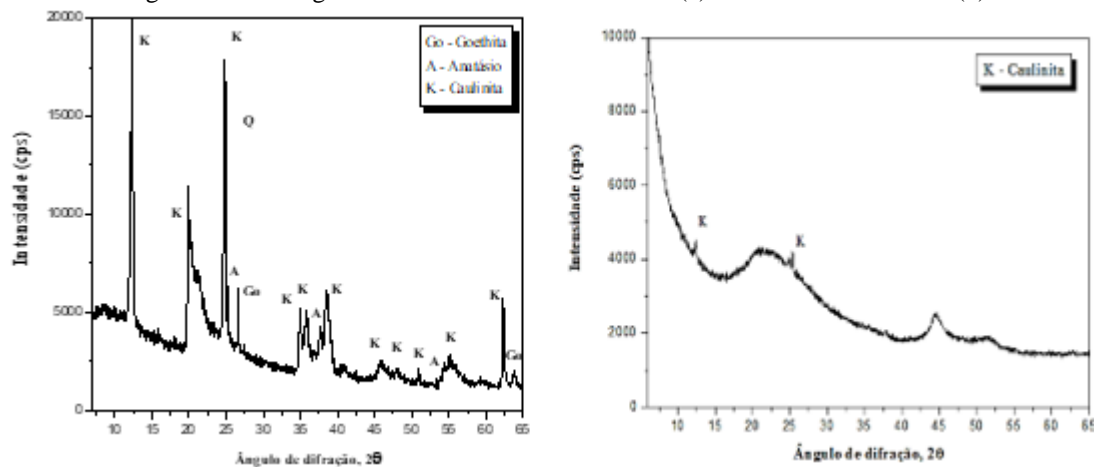


Figura 2 - Difratoograma de raios-X do calcário.

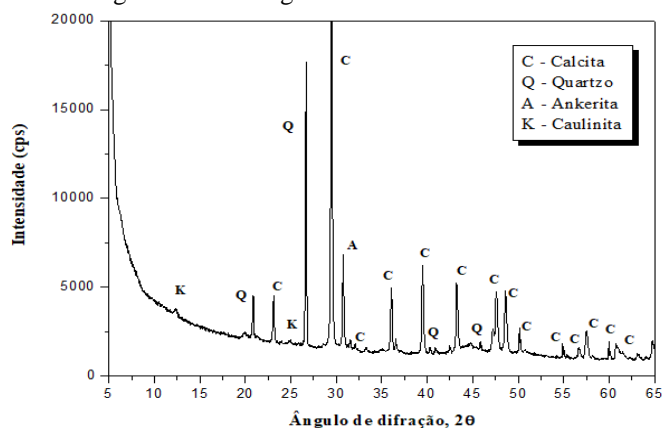


Figura 3 - Difratoograma de raios-X do CPI 40.

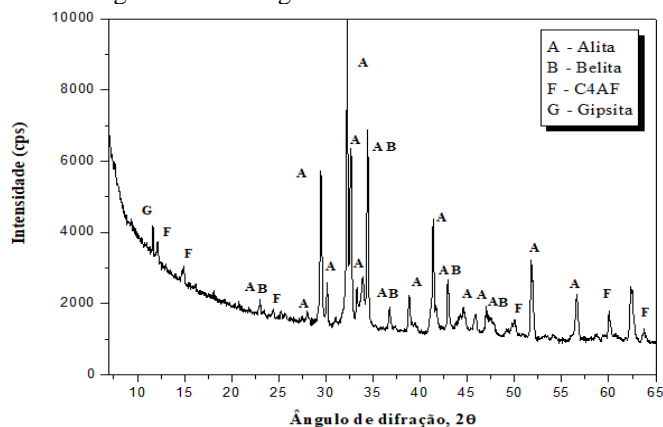


Tabela 2 - Análises químicas dos materiais de partida.

ÓXIDOS	CPI 40	CAULIM (CF)	METACAULIM	CALCÁRIO
MgO (%)	3,76	0,52	0,73	2,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,41	37,60	44,77	0,73
SiO <sub>2</sub> (%)	17,15	46,49	52,74	3,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,47	-	-	0,58
SO <sub>3</sub> (%)	4,35	0,35	-	0,44
K <sub>2</sub> O (%)	0,58	-	-	0,33
CaO (%)	63,70	-	-	50,37
TiO <sub>2</sub> (%)	0,21	0,54	0,21	0,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,80	0,66	3,79	0,62
Perda ao Fogo (%)	2,26	13,85	0,37	42,26

O fato do CF ser constituído basicamente por caulinita demonstra a excelente qualidade como matéria-prima para a produção da MC de alta reatividade a um custo baixo. A alta pureza dos caulins da Amazônia faz com que não haja a necessidade da aplicação de rígidos parâmetros de controle para remoção de impurezas, aspecto esse que pode reduzir os custos de produção da pozolana e viabilizar o LC<sup>3</sup> do ponto de vista econômico.

O espectro do CF calcinado mostra duas expressivas bandas de amorfização entre os ângulos 2θ de 10° e 30°, intervalo caracterizado pelas reflexões fortes e agudas da caulinita. As duas bandas de amorfização evidenciam a presença da metacaulinita nos caulins calcinados. A calcinação foi eficiente, praticamente toda a caulinita sofreu desordenamento estrutural, não havendo picos referentes às maiores intensidades do argilomineral. No caso do calcário, a calcita é o mineral predominante, com cerca de 78%, além de quartzo, ankerita e caulinita.

O cimento CP I 40 é constituído por picos referentes aos silicatos de cálcio (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S), além da gipsita e da fase C<sub>4</sub>AF (ferroaluminado de cálcio), sendo o clínquer constituído por 66% de CaO, descontando a gipsita do somatório. Verifica-se também que o CPI 40 está de acordo com os limites de óxido de magnésio (≤ 6,5), e trióxido de enxofre (≤ 4,5), estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018).

### 3.1.2 Caracterização física

A Figura 4 mostra os resultados da distribuição granulométrica das partículas do CF, do calcário, do meta-caulim (MC) produzido a partir da queima do CF, moído e não moído e do cimento Portland CP I. Na Tabela 3 são apresentados os valores de massa específica e do diâmetro das partículas D10%, D50% e D90%.

Figura 4 - Curvas granulométricas.

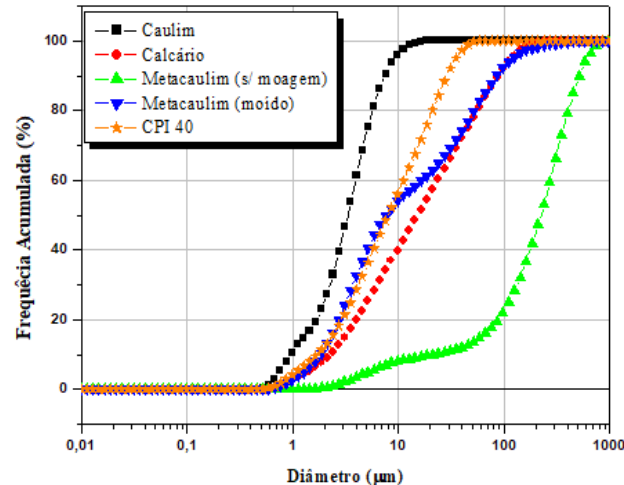


Tabela 3 - Massa específica e Diâmetros referentes a 10%, 50%, 90% do material passante.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	CALCÁRIO	CAULIM (CF)	MC SEM MOAGEM	MC MOÍDO	CPI 40
Diâmetro a 10% (µm)	2,26	0,958	1,84	26,3	1,06
Diâmetro a 50% (µm)	15,5	3,31	7,66	287	14,82
Diâmetro a 90% (µm)	88,7	7,52	85,5	670	33,44
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,75	2,55	2,58	2,58	3,08

Os valores reduzidos de massa específica tanto para o CF quanto para o MC, na ordem de 2,55 e 2,58 g/cm<sup>3</sup>, indicam que o resíduo caulínico é constituído basicamente por caulinita, ratificando os resultados encontrados nas análises química e mineralógica. Houve um aumento da massa específica da caulinita quando submetida ao tratamento térmico (MC). Atribui-se este comportamento a um princípio de sinterização das partículas (BRIDSON, DAVIES E HARRISON, 1985), que ocasionou uma alteração substancial na distribuição granulométrica do MC, aumentando a densidade do material.

O tratamento térmico provocou na caulinita uma substancial aglomeração das partículas, ocasionando uma alteração na sua granulometria e também um aumento na massa específica. A sinterização foi responsável por este fenômeno. No MC não moído, o D50% passou de 3,31 para 287µm, cerca de 87 vezes comparado com o CF “*in natura*”.

A moagem do CF calcinado (MC) é imprescindível para o aproveitamento do material como adição mineral, restabelecendo a uma finura adequada para emprego no cimento. O D50% passou de 287µm para 7,66µm, entretanto, ainda se percebeu uma parcela de partículas de granulometria mais grossa quando se avalia o D90%. No CF *in natura*, 90% do passante é constituído por partículas inferiores a 7,52µm, ao passo que no CF calcinado e moído (MC) o passante a 90% é constituído de partículas inferiores a

85µm. Há famílias de grãos com partículas bem distintas, umas mais finas outras mais grossas, como pode ser observado na curva do MC moído (Figura 4).

O calcário apresentou uma granulometria mais grossa que o MC moído e que o cimento CP I 40, com D50% de 15,5µm. O cimento Portland CPI 40 apresentou uma distribuição granulométrica uniforme, com D10%, D50% e D90% mais próximos entre si, no caso, 1µm, 10µm e 33µm, respectivamente.

O MC moído nas condições experimentais deste trabalho é um material extremamente fino, que alterará substancialmente a área superficial do cimento LC<sup>3</sup> em relação ao cimento CP I e, conseqüentemente, a demanda de água e de aditivo superplastificante. Além disto, a finura das adições pode influenciar também no desempenho mecânico do produto final, principalmente em idades iniciais, em função dos efeitos de nucleação que podem ser favorecidos por adições minerais de finuras mais elevadas. Neste caso, adições minerais finas aceleram o desenvolvimento de resistência nas primeiras idades.

O MC moído pode ter sua granulometria controlada (mais grossa) de modo a mitigar os efeitos da maior demanda de água, da maior retração, fluência e calor de hidratação. Deste modo, entende-se que a aglomeração das partículas do CF ao ser calcinado têm um efeito positivo porque permite o ajuste da granulometria final do MC em função das propriedades de interesse, ou seja, do melhor equilíbrio entre as propriedades mecânicas, de durabilidade e estabilidade dimensional.

A Tabela 04 mostra os resultados de massa específica e de área superficial específica Blaine para todos os cimentos LC<sup>3</sup>, além dos cimentos de referência, CPI 40 e CII F 40. A área superficial específica das adições minerais influenciam diretamente nas propriedades dos cimentos, refletindo no desempenho de concretos e argamassas produzidas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Tabela 4 - Massa específica e ASE<sub>Blaine</sub>.

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA (G/CM <sup>3</sup> )	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA BLAINE (CM <sup>2</sup> /G)
CPI 40	3,08	3490
CPII F 40	3,02	4830
LC <sup>3</sup> 50 2:1	2,86	6210
LC <sup>3</sup> 50 1,5:1	2,87	5850
LC <sup>3</sup> 50 1:1	2,88	5670
LC <sup>3</sup> 35 2:1	2,79	7370
LC <sup>3</sup> 35 1,5:1	2,80	6910
LC <sup>3</sup> 50 1:1	2,81	6410

Os teores de incorporação de 45% e 60% da mistura de MC-calcário propiciaram aos cimentos um aumento demasiado da área superficial específica Blaine. Quanto maior o teor de incorporação, maiores as áreas superficiais. Os cimentos LC<sup>3</sup> 35 apresentaram áreas superficiais entre 6400 e 7300 e os LC<sup>3</sup> 50, entre 5600 a 6200 cm<sup>2</sup>/g, todas muito elevadas em relação aos 4800 do CII F 40 e de 3500 do CP I 40. Dentre de cada grupo de LC<sup>3</sup>, quanto maior a incorporação de calcário menor a área superficial. Isto ocorre em decorrência da menor finura do calcário em comparação ao MC.

Os valores foram elevados em razão da presença da MC, cuja finura é maior dentre os demais constituintes dos cimentos LC<sup>3</sup>. Por esta razão que a medida que se reduz o teor de MC na composição ternária do LC<sup>3</sup>, em prol do aumento do calcário, há uma redução da área superficial específica. Uma solução seria reduzir a finura do MC e do calcário, aplicando uma energia de moagem menor, de modo que alcançasse áreas próximas de 5000 cm<sup>2</sup>/g, valor praticado hoje pelas cimenteiras.

A massa específica dos cimentos LC<sup>3</sup>, a mesma se comportou de maneira inversa à área superficial específica dos cimentos. Para valores crescentes de adição, a massa específica dos cimentos diminuiu razoavelmente, tendo LC<sup>3</sup> 50 maiores valores do que LC<sup>3</sup> 35 o que era esperado pelo fato das adições terem uma massa específica menor. Já dentro dos grupos LC<sup>3</sup>-50 e LC<sup>3</sup>-35, quanto maior a adição de fíler calcário maior a massa específica (1:1>1,5:1>2:1) e menor a área específica superficial (1:1<1,5:1<2:1). Isso também se deve pelo maior tamanho médio das partículas do calcário e maior peso específico em relação ao metacaulim.

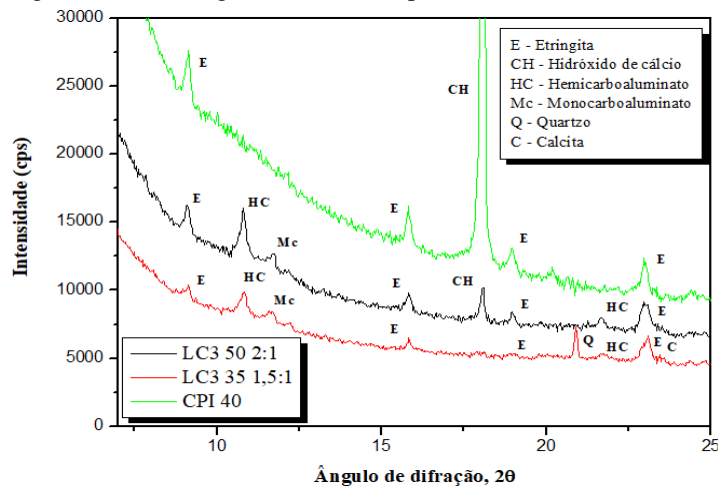
### 3.2 MINERALOGIA DAS PASTAS HIDRATADAS

A Figura 05 mostra os difratogramas de raios-X das pastas hidratadas aos 28 dias dos cimentos LC<sup>3</sup> 50 (2:1) e 35 (1,5:1), além do cimento CP I 40. No sistema de referência constata-se a formação de etringita e portlandita em grande quantidade (pico pronunciado). No sistema do LC<sup>3</sup> 50, com 30% de MC e 15% de calcário, constata-se a formação de etringita, monocarboaluminato e hemicarboaluminato, oriundos da reação da metacaulina com a calcita. Além disto, o pico de portlandita é muito menor em relação a pasta de CP I 40. No sistema LC<sup>3</sup> 35 1,5:1, com 36% de MC e 24% de calcário, novamente se observa a presença de etringita e dos dois carboaluminatos. Entretanto, não foi detectada a presença do pico da portlandita, o que significa uma baixa alcalinidade que pode vir a prejudicar a passivação das armaduras. Além destes, foram detectadas a



presença de quartzo, oriundo do calcário, e de calcita. Ambos devido a elevada incorporação de calcário na mistura.

Figura 05 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 28 dias.



### 3.3 TEMPO DE PEGA E ÁGUA DE CONSISTÊNCIA

A tabela 05 mostra os resultados do tempo de início e fim de pega. Percebe-se uma clara tendência de crescimento na demanda de água quando o teor de adições aumenta nos cimentos. O grupo dos cimentos LC<sup>3</sup> 35, com incorporação de 60% da mistura de MC-calcário, apresenta maior demanda em relação ao grupo LC<sup>3</sup> 50. Dentro de cada grupo de cimento LC<sup>3</sup> não houve um acréscimo significativo à medida que se aumentava ou diminuía as proporções entre MC e calcário, apesar das diferenças de área superficial específica serem significativas.

Tabela 5 - Água de consistência e tempos de pega inicial e final

AMOSTRA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA NORMAL (%)	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA (MIN.)	TEMPO DE FIM DE PEGA (MIN.)
NBR 11578	-	≥ 60	≤ 600
CPI 40	27,8	180	240
CPII F 40	32,0	200	255
LC <sup>3</sup> 50 2:1	39,0	110	185
LC <sup>3</sup> 50 1,5:1	39,2	155	210
LC <sup>3</sup> 50 1:1	39,4	195	250
LC <sup>3</sup> 35 2:1	47,8	90	170
LC <sup>3</sup> 35 1,5:1	48,0	125	200
LC <sup>3</sup> 50 1:1	48,2	180	230

Em relação ao tempo de pega, o principal responsável pela aceleração da hidratação do cimento foi o MC. Neste caso, a aceleração não se deve a presença de aluminatos na composição, mas sim à finura das partículas do MC. O MC através do efeito fíler, promove a aceleração da hidratação do C<sub>3</sub>S porque suas partículas atuam

como ponto de nucleação para formação de hidratos (WILD; KHATIB; JONES, 1996; FRIAS; SÁNCHEZ DE ROJAS; CABRERA, 2000; AMBROISE; MARTIN-CALLE; PÉRA, 1992, ZUNINO, SCRIVENER, 2018). À medida que o C<sub>3</sub>S hidrata, gera C-S-H que absorve sulfatos, antecipando a dissolução do C<sub>3</sub>A e a formação de etringita. Como o calcário é mais grosso que o cimento CP I 40, sua incorporação tende a aumentar o tempo de pega porque não exerce o efeito fíler. Por esta razão que as misturas de LC<sup>3</sup> com maior teor de calcário, no caso aquelas com proporções 1,5:1 e 1,0 (MC- calcário) apresentaram maior tempo de pega. Uma alternativa seria aumentar o teor de gipsita, contudo é necessário avaliar o seu efeito nas propriedades mecânicas do LC<sup>3</sup>.

### 3.4 COLORIMETRIA

Devido as adições minerais apresentarem tons muito próximos ao branco como é o exemplo do metacaulim (Figura 06) modificaram os produtos finais (cimentos LC<sup>3</sup>) em sua luminosidade. A luminosidade (L\*), principal parâmetro analisado neste item, a luminosidade pode ser observada no Tabela 06.

Figura 06: Metacaulim Pós-moagem



Tabela 06 - Parâmetros L\*a\*b\* para cimentos analisados.

Amostra	L*	a*	b*
CPI 40	82,26	-4,97	5,5
CPII F 40	85,52	-4,73	8,45
LC3 50 2:1	99,04	-4,63	2,66
LC3 50 1,5:1	99,02	-4,75	2,36
LC3 50 1:1	99,01	-4,77	2,21
LC3 35 2:1	99,18	-5,15	8,76
LC3 35 1,5:1	99,06	-4,88	5,62
LC3 35 1:1	99,10	-5,27	10,53

O cimento CPI 40 tende a ser mais escuro que os cimentos CPII F 40 devido a este último conter a adição de calcário em sua composição. Já os cimentos LC<sup>3</sup> que

possuem além do calcário o metacaulim em sua posição e em teores de substituição muito mais elevados, obteve resultados de luminosidade superiores.

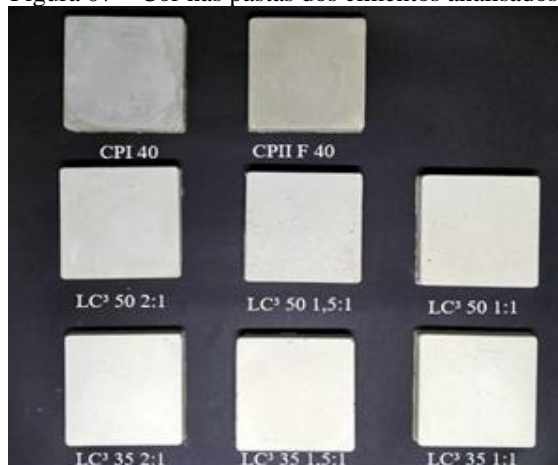
Dentre os cimentos LC<sup>3</sup> quanto maior o teor de incorporação das adições minerais nas misturas, maior o aumento da luminosidade, o mesmo ocorre com a maior proporção de incorporação de metacaulim. Apesar destas diferenças não se mostrarem relevantes dentre os cimentos produzidos, com suas variações estando em no máximo à 0,17 entre o mais escuro para o mais claro.

Tabela 07 - Diferenças de luminosidade, cromáticas e total ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ,  $\Delta E^*$ ).

Amostra	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
CPII F 40	3,26	0,24	2,95	8,07
LC3 50 2:1	16,78	0,34	-2,84	12,37
LC3 50 1,5:1	16,76	0,22	-3,14	12,43
LC3 50 1:1	16,75	0,2	-3,29	12,28
LC3 35 2:1	16,92	-0,18	3,26	12,78
LC3 35 1,5:1	16,8	0,09	0,12	11,98
LC3 35 1:1	16,84	-0,3	5,03	13,55

Como resultado final desta comparação, percebe-se que a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) resultou no valor de 8,07 para o CPII F 40 e média de 12,57 para os cimentos LC<sup>3</sup>, esta diferença evidencia o potencial para possíveis incorporações de pigmentos entre os cimentos LC<sup>3</sup> (Tabela 07). O que também pode ser visualizado a olho nu nas pastas (Figura 07).

Figura 07 – Cor nas pastas dos cimentos analisados.



### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS EM ARGAMASSA

Para que não houvesse redução da resistência mecânica das argamassas em função do aumento da relação água/aglomerante, foi necessária a utilização de aditivo

superplastificante nas misturas produzidas, para que dessa forma, fosse obtido um espalhamento semelhante aquele atingido pela mistura de referência, conforme estabelece a ABNT NBR 5752 (2014).

Na Tabela 08 estão expostos os quantitativos de superplastificante utilizados em cada argamassa produzida, e os respectivos espalhamentos obtidos.

Tabela 08 - Dosagem de aditivo superplastificante e espalhamentos obtidos.

Amostra	Espalhamento (mm)	Aditivo superplastificante
CPI 40	215,00	-
CPII F 40	205,00	-
LC3 50 2:1	215,00	1,602%
LC3 50 1,5:1	205,00	1,683%
LC3 50 1:1	200,00	1,923%
LC3 35 2:1	220,00	2,403%
LC3 35 1,5:1	225,00	2,564%
LC3 35 1:1	200,00	2,644%

Para as argamassas produzidas neste trabalho, a quantidade de aditivo policarboxilato utilizado teve sua dosagem aumentada, à medida que o teor de substituição se tornou maior, pois quanto menor o diâmetro da partícula, maior será a dosagem de superplastificante para obter uma determinada trabalhabilidade.

No que diz respeito a utilização, em função da elevada finura e área superficial específica destas adições, a dosagem do aditivo policarboxilato se mostrou necessária em grandes quantidades, ultrapassando, a dosagem de 1,2% em relação à massa de cimento, recomendada pelo fabricante do produto. Vale ressaltar, que a dosagem elevada do aditivo pode resultar na redução da resistência inicial das argamassas, em função do retardo da hidratação que pode ser ocasionado.

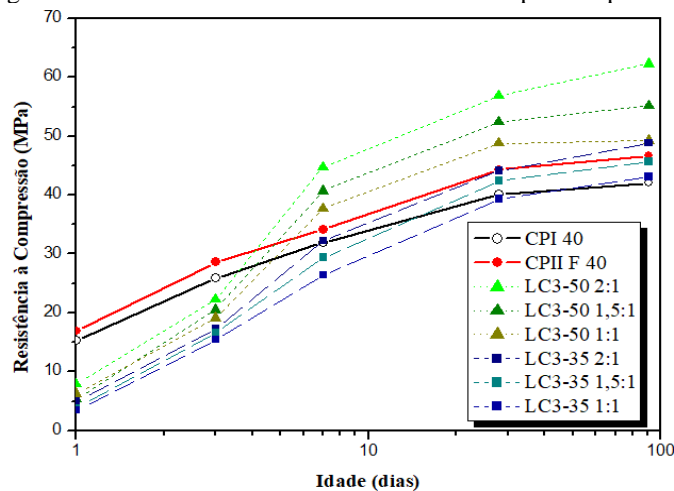
### 3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão das oito argamassas para as idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias são mostradas na Tabela 9 e na Figura 08.

Tabela 9 - Resistência a compressão (MPa) absolutos e normalizados em relação ao CP I (%).

AMOSTRA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)									
	1 DIA		3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS		91 DIAS	
CPI 40	15,25	100%	25,87	100%	31,93	100%	40,1	100%	42,07	100%
CPII F 40	16,89	111%	28,61	111%	34,15	107%	44,34	111%	46,67	111%
LC3 – 50 2:1	7,91	52%	22,27	86%	44,78	140%	56,91	142%	62,31	148%
LC3 – 50 1,5:1	5,42	36%	20,54	79%	40,73	128%	52,47	131%	55,20	131%
LC3 – 50 1:1	6,32	41%	19,11	74%	37,72	118%	48,82	122%	49,31	117%
LC3 – 35 2:1	4,98	33%	17,28	67%	32,27	101%	44,14	110%	48,84	116%
LC3 – 35 1,5:1	3,79	25%	16,60	64%	29,37	92%	42,41	106%	48,84	116%
LC3 – 50 1:1	3,41	22%	15,40	60%	26,43	83%	39,34	98%	43,08	102%

Figura 08 - Desenvolvimento de resistência à compressão para diversas idades.



A partir dos resultados apresentados, verifica-se que o teor de substituição utilizado é inversamente proporcional à resistência à compressão obtida, ou seja, à medida que o teor de substituição aumenta, a resistência diminui. Este comportamento é observado em todas as idades, no entanto, é possível verificar que com o avanço do período de hidratação, a diferença entre os resultados dos cimentos LC<sup>3</sup> em relação aos cimentos de referência se torna menor, chegando até superá-las em idades mais avançadas.

Esta aproximação e até superação entre o desempenho dos cimentos nas idades mais avançadas pode estar correlacionada às reações pozolânicas proporcionadas pela presença da argila calcinada, e também à formação dos compostos carboaluminatos, que segundo pesquisas de Antoni (2013), tendem a serem formados em idades mais tardias.

No que diz respeito ao índice de desempenho dos cimentos LC<sup>3</sup>, nas idades de 1 e 3 dias, nenhum atingiu resistências comparáveis ao cimento de referência (CPI 40). Aos 7 dias, os cimentos: LC<sup>3</sup> 50 (2:1, 1,5:1 e 1:1) e LC<sup>3</sup> 35 2:1 atingiram índice de desempenho superior ao cimento de referência (CPI 40), sendo estes de 140%, 128%, 118% e 101% respectivamente. Para a idade de 28 dias, apenas o cimento LC<sup>3</sup> 35 1:1 não atingiu o índice de desempenho, estando a 98% da referência. Já na idade de 91 dias todos os

cimentos LC<sup>3</sup> atingiram resistências superiores, estando entre 148% e 102% em relação ao CPI 40.

Em relação ao índice de desempenho dos cimentos LC<sup>3</sup>, nas idades de 1, 3 e 7 dias, nenhum dos cimentos produzidos atingiu resistências comparáveis ao cimento de uso comercial (CPII F 40). Para as idades de 28 e 91 dias os cimentos LC<sup>3</sup> 50 (2:1, 1,5:1 e 1:1) e LC<sup>3</sup> 35 2:1 atingiram desempenho superior ao CPII F 40, estando seus índices de desempenho entre: 128% e 100%; 134% e 105% respectivamente.

Os resultados de resistência à compressão dos cimentos LC<sup>3</sup> aos 28 e 91 dias, mostram que a formação do monocarboaluminato ocorre de maneira mais acentuada a partir dos 28 dias. Desta forma, é possível que a sinergia entre as adições minerais, e a formação mais acentuada dos compostos carboaluminatos neste período, justifiquem a taxa de crescimento mais elevada e o desempenho mecânico em idades tardias.

Os resultados também estão de acordo com as afirmações e resultados obtidos por Scrivener (2014), Bishnoi et al. (2014) e Vizcaíno Andrés et al. (2015), que analisaram os cimentos LC<sup>3</sup>, e comprovaram a colaboração com as propriedades mecânicas em função da reação sinérgica que ocorre entre a argila calcinada e o fíler.

Esta mudança do comportamento pode ser atribuída à formação de C-S-H secundário, e também à formação de compostos carboaluminatos, tendo em vista que estes processos acontecem de forma acentuada em idades mais avançadas. Logo, cimentos com maiores teores de substituição tendem a apresentar um maior ganho de resistência à compressão em períodos de hidratação tardios.

No entanto, verifica-se que o cimento LC<sup>3</sup> 35, ou seja, aquele com maior teor de substituição, apresenta resultado de resistência à compressão menor que os demais cimentos LC<sup>3</sup> produzidos neste grupo. Essa redução de resistência pode ser justificada pela elevada quantidade de adições utilizadas, e que pode ter permanecido parcialmente inerte no sistema cimentício, em função da extrapolção do teor ideal, gerando então um menor quantitativo de produtos hidratados.

Com base nos resultados mecânicos expressivos e considerando sobretudo os níveis mais elevados de incorporação de adições minerais em busca de um melhor desempenho ambiental para a produção de cimentos, não somente com baixos níveis de emissão de CO<sub>2</sub>, mas também, com um consumo de energia muito inferior.

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados da pesquisa mostraram que a produção de cimentos de argila calcinada e calcário é extremamente promissora como solução para o atendimento às metas estabelecidas à indústria de cimento na mitigação do aquecimento global e, em específico, para a realidade da Amazônia, tendo em vista a indisponibilidade de adições minerais como EAF e CV.

Os cimentos LC<sup>3</sup> apresentam grande potencialidade na redução de emissões de CO<sub>2</sub> e na demanda de energia, sem que houvesse perda de desempenho ou eficiência do ligante. A alta qualidade dos materiais empregados para a produção da mistura de argila calcinada e calcário foram responsáveis pela produção de cimentos LC<sup>3</sup> com características iguais ou superiores ao cimento empregado em escala comercial.

São necessários estudos mais aprofundados sobre a reologia e a finura destes cimentos, pois neste trabalho foram observadas maiores demandas de água e de aditivo superplastificante, além de reduções significativas no tempo de pega. Também são imprescindíveis estudos de sua viabilidade econômica tendo em vista a necessidade de se calcinar a argila e da distância dos depósitos à fábrica de cimento. Devem ser levados em consideração diversos aspectos como a distância e qualidade das matérias primas e, principalmente, a sinergia do emprego destes tipos de cimentos com as diferentes ações relacionadas à eficiência energética e ao emprego de combustíveis fósseis. Outro aspecto relevante encontrado, foi a maior potencialidade da incorporação de pigmentos ou uso de estruturas aparentes relacionadas a maior alvura dos cimentos produzidos.



## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 16372**. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 5752**. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

AMBROISE, J. MARTIN-CALLE, S. PÉRA, J. Pozzolanic behavior of thermally activated kaolin. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE**. 4. 1992. Istanbul. Turkey. V. 2. P. 731-748.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K.L. (2012) **Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research**. Vol. 42, pp. 1579-1589.

ANTONI, M.; ROSSEN, J; MARTIRENA, F; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, **Cement Concrete Research**, 42 (12) (2012) 1579–1589, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 16606**. Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 16607**. Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 16697**. Cimento Portland Requisitos . Rio de Janeiro: ABNT,2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AVET, F.; SCRIVENER, K.L. (2018) Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**. Vol. 107, pp. 124-135.

BARATA, MARCIO (2007). **Aproveitamento dos resíduos caulínicos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção**. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, Tese de doutoramento.

BERRY, E.E. Strength development of some blended-cement mortars, **Cement Concrete Research**, 10 (1) (1980) 1–11, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90046-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90046-0).

BISHNOI, S. et al. **Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience**. *Indian Concr. J.*, v. 88, n. 6, p. 22-28, 2014.

BISHNOI, S.; MAITY, S.; AMIT, M.; JOSEPH, S.; KRISHNAN, S. (2014) Pilot scale manufacture of limestone Calcined clay cement. **The Indian experience**. Vol. 88, pp. 22-28.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Estadual - Pará 2017**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <[http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/para/amest-2017\\_pa\\_v1/view](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/para/amest-2017_pa_v1/view)> Acesso em: 14 nov. 2019;

BRIDSON, D., DAVIES, T.W., HARRISON, P., “Properties of flash-calcined kaolinite”, **Clays and Clay Minerals**, v.33, n.3, p.258-260, 1985.

DAVID ELLIOTT, **Top 10 Emerging Technologies of 2020**, 2020.

DHANDAPANI, Y; SANTHANAM, M; KALADHARAN, G; RAMANATHAN, S. Towards ternary binders involving limestone additions—a review, **Cement Concrete Research**, 143 (April 2020) (2021), 106396, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396>.

EMMANUEL, A.C; HALDAR, P.K; MAITY, S; BISHNOI, S. Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience, **Indian Concrete**, J. 90 (11) (2016) 22–27.

FRIAS, M. SÁNCHEZ DE ROJAS, M. CABRERA, J. **The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars**. **Cement and Concrete Research**. 2000. Vol. 30 n, 2 p. 209-216.

GOLDINDROPS. **Índice de Cores**. Disponível em: <http://goldindrops.pt/indice-decores/>

KENDALL, A. (1996) Brazil: dancing to a new tone. **Indust. Minerals**. N.350. November, pp.21-38.

LIMA, J. M., “**Estudo de aproveitamento do resíduo do beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de pozolanas para cimentos compostos e pozolânicos**”, 107 f. M.Sc., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

LOUGH BROUGH, R. (1993) Kaolin producer more upmarket. **Indust. Minerals**. October, pp.51-69.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **Ind. Conc. Journal**, v.88, n.7, p.11-21, 2014.

SNIC, Relatório Anual 2012–2012 **Relatório Anual Sindicato Nacional da Indústria do Cimento** / Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Rio de Janeiro (2013) [http://www.snic.org.br/pdf/relatorio\\_anual\\_2012-13\\_web.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/relatorio_anual_2012-13_web.pdf).

VIZCAÍNO ANDRÉS, L. M. et al. **Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements**. *Advances in Cement Research*, v. 27, n. 9, p. 546-556, 2015.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; JONES, A. (1996) Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 26. N. 10, pp. 1537-1544.

ZUNINO, F. SCRIVENER, K.L., “Assessing the effect of calcite impurities in clay on optimal dehydroxylation parameters for enhanced reactivity”. **In: Calcined Clays for Sustainable Concrete**, RILEM Bookseries, vol. 16, p. 7, 2018.