



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Eduardo Freire Mariano

INFLUÊNCIA DO TIPO DE MOAGEM NO COMPORTAMENTO DE CIMENTOS LC³

Ouro Preto

2023

Influência do tipo de moagem no comportamento de cimentos LC³

Eduardo Freire Mariano

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Jorge Brigolini Silva – UFOP

Orientadora: M.Sc. Fernanda Pereira da Fonseca Elói – UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M333i Mariano, Eduardo Freire.
Influência do tipo de moagem no comportamento de cimentos LC³.
[manuscrito] / Eduardo Freire Mariano. - 2023.
49 f.: il.: color.. + Fluxograma.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Coorientadora: Ma. Fernanda Pereira da Fonseca Elói.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto,
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Moinhos e trabalhos em moinhos. 2. Materiais cimentícios
suplementares (SCMs). 3. Cimento - Cimento LC³. I. Silva, Guilherme
Jorge Brigolini. II. Elói, Fernanda Pereira da Fonseca. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Freire Mariano

INFLUÊNCIA DO TIPO DE MOAGEM NO COMPORTAMENTO DE CIMENTOS LC³

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 03 de abril de 2023

Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Fernanda Pereira da Fonseca Elói - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Bruna Silva Almada - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Vanessa Pereira Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Guilherme Jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2023, às 21:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0563871** e o código CRC **51267AEB**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar nesses anos de estudo e no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a minha família e amigos por me incentivarem e me apoiarem em todos os momentos. Não conseguiria sem vocês.

Agradeço ao professor Guilherme e ao grupo ATIVE da UFOP que me ensinou muito e me deu suporte com a estrutura do laboratório para realizar esse trabalho.

Agradeço à Fernanda, que me acolheu desde o meu primeiro contato com o laboratório de materiais, por toda atenção, paciência e ensinamentos ao longo desse tempo.

Agradeço à Bruna pela colaboração, disponibilidade e ensinamentos no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto por me proporcionar um ensino de qualidade ao longo desses anos e agradeço, também, a todo o Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas.

Agradeço a Intercement pela disponibilização de materiais que fizeram esse trabalho ser possível.

RESUMO

A demanda de cimento no mundo aumenta cada vez mais e a sua produção é responsável por grande parcela das emissões globais de CO₂. Em busca de reduzir a quantidade de carbono produzido, materiais cimentícios suplementares vêm sendo incorporados ao cimento para reduzir a quantidade de clínquer, porém possuem limitações no teor de substituição e na disponibilidade para utilização. Visando reduzir o teor de clínquer e acompanhar a crescente produção do cimento, estudos recentes vêm sendo desenvolvidos sobre a incorporação de argila calcinada e calcário, gerando o cimento LC³ (Limestone calcined clay cement). O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do tipo de moagem do clínquer, do gesso, da argila calcinada e do calcário na produção dos cimentos LC³ a partir da comparação de três argamassas produzidas. Dois cimentos LC³ foram produzidos a partir da composição de massa em 50% de clínquer, 5% de gesso, 30% de argila calcinada a 800°C e 15% de calcário. A diferença entre os cimentos LC³ consistiu na moagem, em que um teve os materiais (clínquer, gesso, argila calcinada e calcário) moídos conjuntamente por 120 minutos, enquanto o outro obteve uma moagem individualizada dos materiais, também por 120 minutos, para só depois serem misturados. Também foi produzida uma argamassa de cimento Portland convencional de referência, obedecendo a proporção de 95% de clínquer e os 5% restantes de gesso. Para todas as argamassas foram fixados o fator água/cimento de 0,5, o traço 1:3 (cimento:areia) e o teor de aditivo de 2,5% em massa de clínquer. Foi realizada a caracterização dos cimentos LC³ a partir da análise granulométrica a laser e, em seguida, foram produzidas argamassas dos três traços de cimento, que no estado fresco foram analisadas com relação à consistência e no estado endurecido com relação a resistência à compressão e à absorção de água. Os resultados indicaram que a moagem separada dos materiais no cimento LC³ tornou a granulometria do cimento mais fina, e por consequência, obteve um menor espalhamento. Além disso, ambos os cimentos LC³ produzidos apresentaram desempenho superior com relação a resistência mecânica quando comparado ao cimento Portland de referência, principalmente o de moagem conjunta. No entanto, as taxas de absorção de água e de índice de vazios foram superiores à da argamassa de referência.

Palavras-chaves: Moagem, Cimento LC³, Materiais cimentícios suplementares.

ABSTRACT

The demand for cement worldwide is increasing and its production is responsible for a large portion of global CO₂ emissions. In an attempt to reduce the amount of carbon produced, supplementary cementitious materials have been incorporated into cement to reduce the amount of clinker, however, they have limitations in terms of replacement and availability for use. Aiming at reducing the clinker content and accompanying the growing cement production, recent studies have been presented on the incorporation of calcined clay and limestone, generating LC³ cement. The objective of this work was to evaluate the influence of the type of grinding in the production of calcined clay and limestone cement from the comparison of three produced mortars. Two LC³ cement were made with 42.75% content, by cement mass, of mineral additions, being 28.50% clay calcined at 800 °C and 14.25% limestone, in addition to a content of 2.5% in cement mass of superplasticizer additive. The difference between the LC³ cement exists in the grinding, in which the materials (clinker, gypsum, calcined clay, and limestone) were ground together for 120 minutes, while the other had an individualized grinding of the materials, also for 120 minutes, and only then being mixed. A reference conventional Portland cement was also produced, obeying a proportion of 95% clinker and the remaining 5% gypsum. For all cement, the water/cement factor of 0.5 and the ratio 1:3 were fixed (cement:sand). The characterization of the LC³ cement was carried out based on the laser granulometric analysis and, then, mortars of the three cement mixes were produced, which in the fresh state were presented about consistency and in the resisted state about compressive strength and water absorption resistance. The results demonstrated that the separate grinding of the materials in the LC³ cement made the cement granulometry finer, and consequently, it obtained a smaller spreading. In addition, both LC³ cement produced showed superior performance in terms of mechanical strength when compared to the reference Portland cement, especially the joint-grinding cement. However, the water absorption and void index rates were higher than the reference mortar.

Keywords: Grinding, LC³ cement, Supplementary cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise térmica diferencial dos argilominerais.....	20
Figura 2 - Distribuição geográfica e reservas lavráveis de calcário do Brasil para o ano de 2010.....	21
Figura 3 - Modelo termodinâmico da hidratação de um cimento Portland sem adições.....	23
Figura 4 - Modelo termodinâmico da hidratação de um cimento Portland com adição de 4% de calcário.....	23
Figura 5 - Fluxograma da metodologia a ser adotada.....	27
Figura 6 – Calcário.....	28
Figura 7 - Argila em estado natural.....	29
Figura 8 - Argila destorroada.....	29
Figura 9 - Argila calcinada a 800°.....	30
Figura 10 - Aditivo superplastificante MC-POWERFLOW 4001.....	31
Figura 11 - Materiais moídos separadamente por 120 minutos na proporção para mistura do cimento LC ³	32
Figura 12 - Ensaio de consistência.....	34
Figura 13 - Cone de cimento e abatimento do material.....	34
Figura 14 - Moldagem do corpo de prova.....	35
Figura 15 - Corpos de prova desmoldados.....	36
Figura 16 - Prensa servo-controlado universal - EMIC 20000/PC200 do LMC/UFOP.....	36
Figura 17 - Curva granulométrica dos cimentos LC ³	38
Figura 18 - Resistência média à compressão.....	40

Figura 19 - Representação gráfica dos valores de absorção de água e índice de vazios dos traços de argamassa.41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensão das partículas da matéria-prima para produção de cimento LC ³	26
Tabela 2 - Composição dos cimentos produzidos.	32
Tabela 3 - Quantidade de material por amassamento.	33
Tabela 4 - Resultados do ensaio de consistência.....	39
Tabela 5 - Resultados do ensaio de absorção de água.....	41

LISTA DE SIGLAS

MCS: material cimentício suplementar

LC³: limestone calcined clay cement

CP: corpo de prova

P8: argila calcinada a 800 °C

MS: moagem separada

MC: coagem conjunta

LC³ P8 MS 120: cimento de argila calcinada a 800 °C e calcário preparada com moagem separada de 120 minutos

LC³ P8 MC 120: cimento de argila calcinada a 800 °C e calcário preparada com moagem conjunta de 120 minutos

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivo.....	14
1.1.1	Objetivos Específicos.....	14
2	Revisão Bibliográfica.....	15
2.1	Cimento Portland.....	15
2.1.1	Clínquer Portland.....	15
2.1.2	Gipsita.....	18
2.2	Cimento LC ³	19
2.2.1	Argila calcinada.....	19
2.2.2	Calcário.....	21
2.2.3	Moagem do cimento LC ³	24
3	Metodologia.....	26
3.1	Materiais e plano experimental.....	27
3.1.1	Clínquer.....	27
3.1.2	Gesso.....	28
3.1.3	Adições minerais.....	28
3.1.4	Agregado miúdo.....	30
3.1.5	Aditivo químico.....	30
3.1.6	Composição das argamassas.....	31
3.2	Ensaio de granulometria à laser.....	33
3.3	Ensaio de consistência (flow table).....	33
3.4	Ensaio de resistência à compressão.....	35

3.5	Ensaio de absorção de água	37
4	Resultados	38
4.1	Análise granulométrica à laser.....	38
4.2	Consistência	39
4.3	Resistência à compressão.....	40
4.4	Absorção de água.....	41
5	CONCLUSÃO.....	42
6	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O cimento é o segundo material mais consumido do mundo, tendo acumulado no ano de 2020, 60,8 milhões de toneladas vendidas (ABCP, 2021). A maior proporção desse material é dada pelo clínquer (aproximadamente 95% da mistura no cimento CPI), que é o produto da calcinação de calcário e argila a 1450° C. Nessas condições, aproximadamente 10% das emissões globais de CO₂ estão ligadas a produção de cimento, sendo que dessas, 52% estão diretamente relacionadas a reação química que gera a descarbonatação do calcário na produção do clínquer, enquanto o restante está ligado ao consumo energético dessa queima (THOMAS, 2013).

Neste contexto, um dos mecanismos buscados para produção de cimentos com impacto ambiental reduzido é a substituição parcial do clínquer. Assim, os materiais cimentícios suplementares (MCS), possuidores de propriedades cimentantes, pozolânicas ou com potencial de ativação, como cinzas volantes, escória e calcário, são a alternativa mais estudada (THOMAS, 2013). No entanto, esses materiais apresentam limitações de disponibilidade com relação ao crescimento da produção do cimento. As cinzas volantes estão disponíveis em cerca de 30% da produção total de cimento, sendo que menos de um terço dessa porcentagem apresenta qualidade adequada para a mistura (SCRIVENER *et al.*, 2018). A escória, por sua vez, corresponde a apenas 5 a 10% da produção total do cimento, não sendo capaz de acompanhar o consumo do material (ZUNINO *et al.*, 2021). Por último, o calcário está presente em grandes quantidades, no entanto, a proporção de substituição do clínquer por esse material é limitada a 15%, em média, para que não acarrete em um produto muito poroso nem com propriedades pobres (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Desta forma, os principais materiais cimentícios suplementares acabam limitados pelas condições citadas. Com isso, uma alternativa que vem sendo explorada em estudos e pesquisas é a utilização da argila, que está presente em diversas partes do mundo de maneira abundante, principalmente em regiões tropicais e subtropicais (SCRIVENER *et al.*, 2018). Esse material pode possuir caulinita em sua composição, apresentando potencial como MCS quando calcinado a temperaturas entre 600 e 850 °C. O processo de calcinação torna a argila altamente reativa, passando a agir como

pozolana, reagindo com o hidróxido de cálcio e formando silicato de cálcio hidratado, o que garante o desenvolvimento das propriedades mecânicas (ZUNINO *et al.*, 2019).

Neste sentido, surgiram os cimentos de argila calcinada e calcário ou cimentos LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), compostos por clínquer, gesso, calcário não calcinado e argila calcinada. Essa composição, além de apresentar materiais em quantidades abundantes, não necessita de grandes mudanças no processo produtivo, já que tanto os fornos de calcinação, quanto os aparelhos de moagem e mistura são os mesmos do processo convencional (SHARMA *et al.*, 2021). Além disso, a mistura do cimento LC³ garante grande interação entre os materiais, permitindo a substituição de até 45% do clínquer (SCRIVENER *et al.*, 2018), de modo a manter a qualidade do produto final e, ainda, reduzir as emissões de carbono na produção em mais de 30% (VIZCAÍNO-ANDRÉS *et al.*, 2015).

No entanto, a presença de uma maior variedade de materiais na produção do cimento LC³ gera maior diversificação de granulometria, de dureza e de outras propriedades entre os compostos. Assim, o entendimento dos parâmetros para moagem é fundamental. Uma alternativa é a intermoagem, em que o clínquer, a argila calcinada, o calcário e o gesso são todos moídos juntamente, o que pode levar o material de maior dureza, o clínquer, a agir como corpo moedor (SCRIVENER *et al.*, 2018). Uma outra alternativa é a moagem parcialmente agrupada, tendo em um primeiro momento a moagem apenas do clínquer e do gesso, seguida da mistura dos demais materiais, tornando o clínquer um material mais fino antes da moagem com o calcário e a argila calcinada (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Desta forma, este trabalho propõe a avaliação de como o tipo de moagem adotada (individual ou conjunta) influenciam na caracterização do cimento LC³ pelos ensaios de granulometria a laser, índice de consistência, resistência mecânica e de absorção de água, visando a contribuição para comunidade acadêmica dentro do tema.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência do tipo de moagem no comportamento do cimento LC³.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do tipo de moagem dos materiais na granulometria do cimento LC³ produzido;
- Avaliar a influência do tipo de moagem dos materiais na consistência do cimento LC³ produzido;
- Avaliar a influência do tipo de moagem dos materiais na resistência mecânica do cimento LC³ produzido;
- Avaliar a influência do tipo de moagem dos materiais na absorção de água do cimento LC³ produzido;
- Avaliar a influência do aditivo fixado nos cimentos produzidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material hidráulico produzido a partir da moagem e mistura de clínquer, sulfato de cálcio (gesso) e possíveis materiais cimentícios suplementares (ABCP, 2021). No processo produtivo, o clínquer, composto por calcário e argila, é produzido a partir de processos de homogeneização, britagem e calcinação visando a obtenção de uma farinha fina. Essa farinha, é então, misturada aos outros componentes do cimento, como o gesso e outros MCS, tendo ambos sido moídos, preparados e homogeneizados na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Por fim, para aplicação do cimento, adiciona-se a água, visando a hidratação do material que levará a ocorrência de reações capazes de dar ao material diversas aplicabilidades, sendo o segundo material mais consumido do mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a incorporação de materiais cimentícios suplementares na produção de cimento Portland, como fíler, escória e outros, que são adicionados a mistura já visando a redução do fator clínquer. No entanto, esses MCSs têm sua quantidade limitada, tanto na disponibilidade para utilização, quanto na capacidade de incorporação na produção do cimento, reduzindo o fator clínquer em até 50% (Joseph *et al.*, 2015).

Sabendo que a incorporação desses materiais cimentícios suplementares é capaz de trazer mudanças significativamente positivas para a indústria, é necessário entender melhor como a incorporação desses materiais alteram o processo de hidratação do cimento e as possíveis outras fases que surgem na matriz cimentícia, o que influencia diretamente nas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Além disso, entender qual o fator de substituição do clínquer é possível de ser substituído sem comprometer as propriedades do material.

2.1.1 Clínquer Portland

O clínquer é o principal componente do cimento Portland, sendo o grande responsável pelo caráter hidráulico do cimento, e ainda, fundamental para resistência mecânica do produto final (ABCP, 2002). No entanto, até se chegar ao clínquer, que

é incorporado ao cimento, existem processos a serem realizados com o calcário e a argila.

Ao serem extraídos de depósitos, esses materiais passam por pesquisas geológicas e análises químicas a fim de qualificá-los (PÉRTILE, 2013). O calcário, sobretudo constituído por carbonato de cálcio, deve conter baixo teor de magnésio (inferior a 4%) para evitar a expansão excessiva do material ao entrar em contato com a água, e conseqüentemente o surgimento de rachaduras após o endurecimento do cimento. Além disso, ele também passa por um processo de britagem visando a adequação da granulometria a seqüência da produção (PÉRTILE, 2013). A argila, por sua vez, já apresenta as condições ideais granulométricas para a produção do clínquer, sendo relevante por sua qualidade reativa, contendo alumínio, ferro e magnésio (PÉRTILE, 2013).

Tendo os materiais extraídos e analisados, é realizada a pré-homogeneização dos mesmos, visando uma inicial mistura dos materiais, que posteriormente são encaminhados ao britador secundário, tendo ainda, as partículas superiores a 0,05 milímetro. O material pré-homogeneizado é levado ao moinho de bolas ou de rolos, onde será preparada a farinha crua (composta principalmente por cálcio, silício, alumínio e ferro), com partículas de até 75 micrometros, o que torna a queima mais fácil e permite uma homogeneização melhor da mistura. Por fim, a farinha crua é encaminhada a um forno rotativo, o qual é levado a uma temperatura de 1450°C, tendo como produto da calcinação o clínquer, que antes da fabricação do cimento ainda passa por mais um processo de moagem (PÉRTILE, 2013; NEVILLE, 2015; MONTEIRO, 2006). Nessa última etapa para a obtenção do clínquer, ao levar os materiais ao processo de queima, em especial o calcário, uma grande quantidade de dióxido de carbono é emitida, o que é um grande ponto negativo dessa produção. Sendo que ainda conta com um elevado gasto energético para atingir a temperatura necessária. Esse gás liberado no processo de calcinação corresponde a 440kg a cada 1000 kg de calcita (CaCO_3) calcinada, enquanto o consumo energético gera, aproximadamente, 815 kg de CO_2 a cada 1000 kg de clínquer produzidos, sendo a calcita o principal composto do calcário (WORRELL *et al.*, 2001).

É evidente que o tratamento térmico para formação do clínquer causa impactos ao meio ambiente, no entanto, a dificuldade e necessidade de estudos aprofundados se deve as reações químicas que ocorrem nesse processo e a importância delas. Durante a calcinação, em sistema fechado, é formada a composição mineralógica básica do clínquer, sendo a Alita (Silicato Tricálcico – C_3S), Belita (Silicato Dicálcico – C_2S), Aluminato Tricálcico (C_3A) e Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF) os principais elementos. Esses, ao resfriarem subitamente, desenvolvem a capacidade de reagir de maneira quase instantânea com a água, o que dão o caráter hidráulico ao cimento, além influenciarem na estabilidade química dos compostos e na resistência mecânica das primeiras idades (MARINGOLO, 2001; ABCP, 2002). É relevante destacar ainda que para a formação ideal desses compostos minerais, a moagem e a homogeneização pré-calcinação é fundamental (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Cada um dos principais compostos formados no tratamento térmico tem sua função para que as propriedades finais do cimento, principalmente após a hidratação, atendam as necessidades para qual é o seu destino. Os silicatos de cálcio (Alita e Belita) são os principais e mais abundantes componentes do cimento Portland, responsáveis pela resistência do material e pela formação, após o contato com a água, do Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) e do Hidróxido de Cálcio (CH) (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O C-S-H é a fase mais importante da matriz cimentícia e fundamental para que o produto final seja resistente e durável, já que é o principal componente do gel de hidratação, responsável por ligar os grãos do cimento, agregados e outros materiais presentes, gerando resistência e coesão (GOBBO, 2003). Já a Portlandita, como também é conhecido o Hidróxido de Cálcio, um material altamente alcalino e de área superficial menor, é capaz de contribuir para passivação das armaduras em concreto armado. No entanto, é solúvel em temperatura ambiente, podendo acarretar em maior porosidade ao produto final e conseqüente diminuição da resistência, além de poder reagir com o CO_2 e formar carbonato de cálcio, levando ao surgimento de fissuras no material ao longo do tempo (GOBBO, 2003; TAYLOR, 1990).

No entanto, apesar do CH em excesso ser prejudicial ao cimento, na presença de MCS pozolânicos, ele é consumido e gera C-S-H adicional, melhorando ainda mais

as propriedades finais (DAL MOLIN, 2005). Por fim, os Aluminatos de Cálcio e os Ferroaluminatos, ao serem hidratados, reagem e formam Hidróxidos de Cálcio, Alumínio e Ferro, importantes para a resistência e durabilidade do cimento, além de serem responsáveis pela formação da etringita na presença de íons sulfato. Essa, por sua vez, é capaz de reduzir a porosidade do material e melhorar sua resistência química por consequência, porém, em excesso, compromete a durabilidade, já que pode levar a expansão e aumento da permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1990).

2.1.2 Gipsita

A gipsita é um mineral extraído de depósitos sedimentares de minas subterrâneas ou a céu aberto e tem o gesso como seu principal produto. Ao ser extraída, ela é levada a um processo de trituração e, posteriormente, a moagem, até atingir a granulometria que atenda as especificações necessárias para produção do cimento. Ainda no processo de preparação para obtenção do gesso que corresponda as características necessárias para ser incorporado ao cimento, esse material é levado a calcinação visando a remoção da água e a produção de Sulfato de Cálcio Hemihidratado. O Hemidrato de Cálcio, como também é conhecido o Sulfato de cálcio produzido na calcinação, é então incorporado na produção de cimento, possuindo granulometria fina a média, maciça e sendo um material homogêneo (BALTAR et al., 2005).

A função do gesso, ao ser incorporado na produção de cimento, está diretamente relacionada a hidratação do Aluminato Tricálcico. O C_3A presente no clínquer, ao ser hidratado, reage quase instantaneamente, iniciando o endurecimento do material. Com a introdução do gesso nessa mistura, essa reação é atrasada pela formação de uma membrana ao redor das partículas, retardando a hidrólise e, por consequência, o enrijecimento do cimento. Assim, ao ser adicionado nessa produção, o gesso é capaz de controlar melhor o tempo de pega, permitindo um tempo mais adequado para mistura, manuseio e transporte do material, sendo capaz, ainda, de contribuir para melhoria da qualidade do cimento, já que reduz o empenamento e a ocorrência de fissuras, além de contribuir a evitar a formação de compostos como o Sulfato de Cálcio Anidro que é capaz de afetar a durabilidade do material (PEREIRA, 2010).

2.2 Cimento LC³

O cimento LC³ é um material que surgiu como uma alternativa ambientalmente viável ao cimento Portland, já que objetiva a redução de até 50% do clínquer. Essa redução implica, diretamente, na diminuição da quantidade de energia necessária para produzir o cimento, além de apresentar menor emissão de gases estufa. Para isso, o cimento LC³ conta com a incorporação de calcário não calcinado e argila calcinada à mistura de clínquer e gesso. Estes cimentos apresentam, ainda, propriedades relevantes, como um melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade. Além disso, são capazes de reduzir o custo de produção quando comparado ao cimento convencional, já que a redução do fator clínquer gera uma menor quantidade de eletricidade necessária para a calcinação, necessitando, ainda, o alcance de menores temperaturas para se calcinar a argila (MARTIRENA SCRIVENER, 2015; JOSEPH *et al.*, 2015).

2.2.1 Argila calcinada

A argila é um material resultante do intemperismo de diversas rochas, contendo em sua composição diversos argilominerais, matéria orgânica e até impurezas. Os argilominerais, presentes nesse material, são minerais de silicato de alumínio hidratado, possuindo uma estrutura cristalina, ou seja, são organizados em centenas de camadas empilhadas, incluindo a caulinita, a illita e a montmorilonita (ANTONI *et al.*, 2012). Ao submeter a argila a um tratamento térmico de 600°C a 900°C, a estrutura cristalina dos minerais argilosos sofre o processo de desidroxilação, se tornando amorfo, deixando o material mais reativo e dando a ele características pozolânicas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A temperatura mais assertiva referente ao momento da desidroxilação depende da estrutura mineral e da composição química de cada argila, dos argilominerais e das impurezas presentes, o que pode ser observado na figura 1.

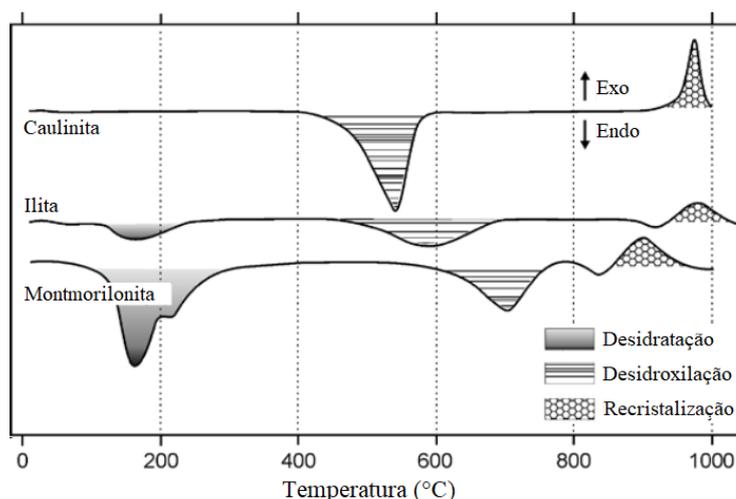


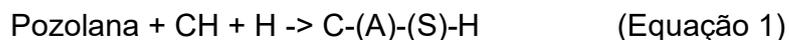
Figura 1 - Análise térmica diferencial dos argilominerais.

Fonte: adaptado de Snellings, Mertens e Elsen (2012).

A reatividade da argila tem relação direta com a natureza e pureza dos materiais, quantidade de argilominerais e com as condições de calcinação, tendo a atividade pozolânica máxima em temperaturas entre a desidroxilação e a recristalização. Portanto, para as caulinitas, por exemplo, é interessante que o processo seja realizado entre 600°C e 850°C, aproximadamente, visando a obtenção de um composto pozolânico (BERNAL *et al.*, 2017).

Assim, a argila calcinada com o desenvolvimento e alteração das suas propriedades se torna um material cimentício suplementar, podendo ser incorporada na produção do cimento. Após a desidroxilação da argila, o principal produto gerado é o metacaulim, que está diretamente associada a quantidade de caulinita que compõe a estrutura do material e apresenta propriedades pozolânicas. Arelado a isso, sabe-se que existem dois principais produtos de hidratação do cimento, o Silicato de Cálcio Hidratado e o Hidróxido de Cálcio, como citado anteriormente, sendo que o CH, se presente em excesso, é capaz de comprometer as propriedades do produto final. No entanto, na presença de MCS com propriedades pozolânicas, a portlandita (CH) é consumida no processo de hidratação, reduzindo a quantidade de hidróxido de cálcio (CH) e formando, ainda, Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) adicional, Aluminato de Cálcio Hidratado (C-A-H) e/ou Aluminossilicato de Cálcio Hidratado (C-A-S-H), como apresentado na equação 1. Esses compostos são capazes de conferir um maior

desenvolvimento da resistência mecânica e refinamento da porosidade do cimento (BULLARD *et al.*, 2011; DAL MOLIN, 2005).



Esta mistura, então, permite uma maior proporção de Silicato de Cálcio Hidratado na hidratação do cimento, e conseqüentemente, um melhor desempenho com relação a resistência do que misturas convencionais de cimento (MARTIRENA SCRIVENER, 2015). Avet e Scrivener (2018) analisaram o ganho de resistência do cimento LC³ a partir de reações químicas até 90 dias após a hidratação, mostrando que já no sétimo dia a resistência à compressão se aproximava da indicada para cimento Portland CPI, ainda tendo um acréscimo de resistência nos próximos dias devido a continuidade das reações da argila calcinada, o que gerou maior produção de C-A-S-H.

2.2.2 Calcário

O calcário é composto por carbonato de cálcio (CaCO₃), o principal material para a produção do clínquer, sendo fundamental para a formação das propriedades necessárias no cimento e também, responsável pelo grande impacto ambiental negativo dessa produção. Ele é encontrado em reservas ao longo de todo território nacional, se concentrando nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, onde estão a maior parte das indústrias cimenteiras, como pode ser observado na figura 2 (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

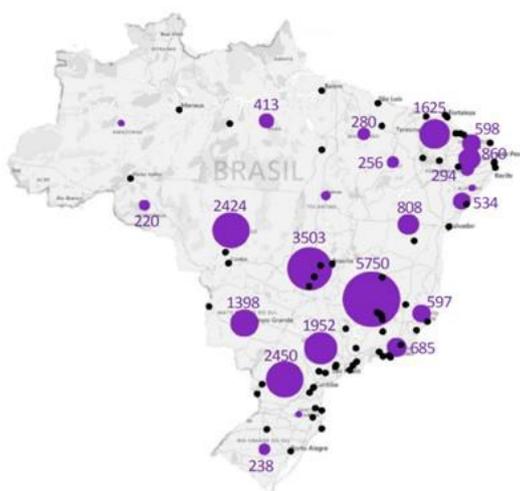


Figura 2 - Distribuição geográfica e reservas lavráveis de calcário do Brasil para o ano de 2010.

Fonte: Abrão (2019).

A partir de estudos e análises, viu-se que o calcário não calcinado pode ser empregado como material cimentício suplementar, o que torna sua utilização extremamente conveniente pela localização das indústrias e, principalmente, por contribuir para redução do impacto ambiental nessa produção, reduzindo a emissão de CO₂ e economizando energia, já que não necessita de um tratamento térmico. Essa capacidade de contribuição para questão ambiental está relacionada a capacidade do calcário de fornecer cálcio para a hidratação do cimento, possibilitando a redução da quantidade de clínquer para a produção. Além disso, essa adição ainda pode contribuir para uma melhora da resistência à compressão, da trabalhabilidade e da durabilidade do material, já que pode, ainda, reduzir a alcalinidade do cimento e atuar como fíler (SCRIVENER, JOHN e GARTNER, 2016).

Esse impacto nas propriedades do cimento está diretamente relacionado a hidratação do C₃A, que com a presença do calcário irá reagir formando fases carboaluminatos ao invés de sulfoaluminatos, permitindo que mais sulfato esteja livre para formação de etringita (DAMIDOT *et al.*, 2011). Nas figuras 3 e 4, pode-se observar a comparação entre a formação de produtos de hidratação de um cimento Portland sem adições e de um cimento Portland com a adição de 4% de calcário realizada por Lothenbach *et al.* (2008).

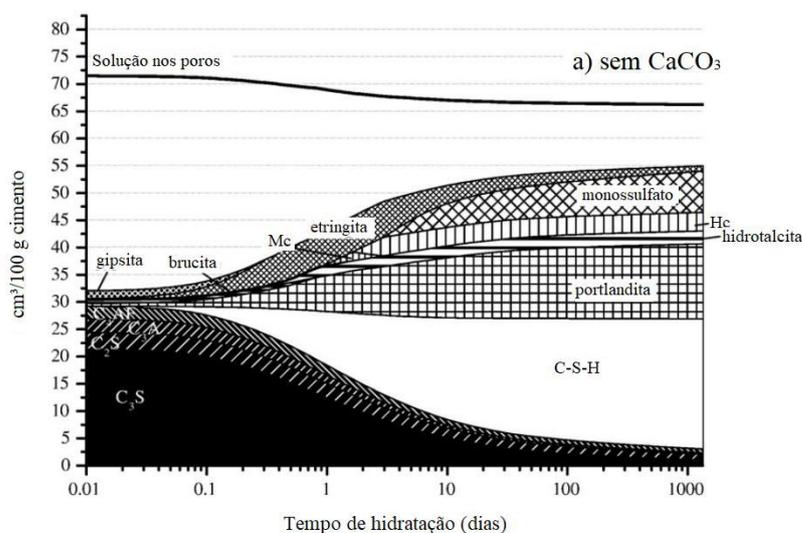


Figura 3 - Modelo termodinâmico da hidratação de um cimento Portland sem adições.

Fonte: Lothenbach et al. (2008).

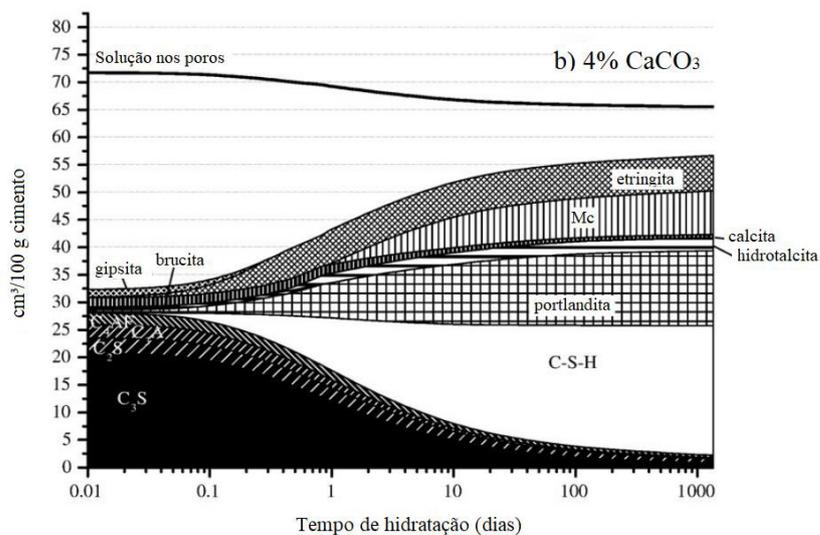


Figura 4 - Modelo termodinâmico da hidratação de um cimento Portland com adição de 4% de calcário.

Fonte: Lothenbach et al. (2008).

Na modelagem apresentada, é evidente que logo de início as principais fases de hidratação (C-S-H, portlandita e etringita) surgem em quantidades significativas. No entanto, após 10 dias, no cimento Portland sem adições, a etringita é consumida e

são formados monocarboaluminato (Mc) e hemicarboaluminato (Hc), enquanto aquele com a adição de 4% de calcário é capaz de manter a quantidade de etringita presente no material. Essa diferença de estabilização da etringita implica diretamente no volume de produtos hidratados, acarretando diferença na porosidade e na resistência mecânica dos cimentos (LOTHENBACH *et al.*, 2008).

Assim, percebe-se que o calcário influencia nas proporções dos produtos de hidratação do cimento. Além disso, cabe destacar, que em caso de calcário em excesso, não tendo C₃A disponível suficiente para consumí-lo como um todo, ele atuará como fíler, diluindo o clínquer (DAMIDOT *et al.*, 2011). Dessa forma, é fundamental que se encontre a quantidade ideal de calcário a ser incorporado de modo a não comprometer o desempenho do cimento, e para isso, é importante entender os sulfatos e aluminatos presentes no cimento.

Dessa forma, o calcário pode ser utilizado como um MCS para o cimento em diversas proporções, dependendo do tipo de cimento e dos outros componentes do material. Como já visto, a utilização dele como uma adição é capaz de reduzir o impacto ambiental e, ainda, melhorar as propriedades do cimento. A partir disso, uma forma de ampliar a quantidade de adição do calcário é utilizando-o de maneira conjunta a algum MCS que possua óxido de alumínio (Al₂O₃) a ser consumido, tendo disponível maior quantidade de alumina para reagir com o carbonato de cálcio (DAMIDOT *et al.*, 2011).

Como explicado anteriormente, o principal produto ao calcinar uma argila é o metacaulim, um material cimentício suplementar rico em Al₂O₃, ou seja, capaz de reagir com o CaCO₃ (PUERTA FALLA *et al.*, 2015).

2.2.3 Moagem do cimento LC³

Na produção do cimento convencional existem dois principais materiais a serem moídos e misturados, o clínquer e o gesso, que após preparados, são levados ao moinho de bolas simultaneamente. No caso do cimento LC³, sua produção é considerada eficiente e de boa aplicabilidade pelo fato de não necessitar de nenhum alto investimento com novos equipamentos, já que é facilmente integrado no processo de produção do cimento convencional. No entanto, a maior pluralidade de materiais

exige maior cuidado na moagem, já que possuem durezas diferentes (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Dentre os componentes do cimento LC³, o clínquer é o material de maior dureza, ou seja, necessita de um maior tempo de moagem para atingir uma finura desejada. Assim, em uma moagem agrupada, o clínquer pode agir como corpo moedor devido a sua maior granulometria ou pode ser que a necessidade de uma moagem por maior tempo, devido ao clínquer, torne o material final excessivamente fino, tendo suas propriedades e sua durabilidade comprometidas. Assim, possibilidades de moagem vem sendo estudadas, como uma moagem individual dos materiais para se chegar a uma granulometria e depois agrupá-los ou até iniciar a moagem apenas com o clínquer e o gesso e depois incorporar os demais componentes (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Emmanuel *et al.* (2016) produziram e analisaram um cimento LC³ com 50% de clínquer, 31% de argila calcinada, 15% de calcário e 4% de gesso, sendo esses materiais locais e partindo de uma moagem toda agrupada. Além disso, produziu um cimento convencional utilizando o mesmo clínquer e o mesmo gesso, pra fins de comparação. Antes da moagem dos componentes do cimento LC³, por meio de análise granulométrica, foi observada uma diferença no tamanho das partículas, algo já esperado e com influência direta no processo de moagem. A tabela 1 demonstra essa relação.

Materiais	Tamanho do grão (mm)
Clínquer	3
Argila calcinada	0 – 0,5
Calcário	2
Gipsita	2

Tabela 1 - Dimensão das partículas da matéria-prima para produção de cimento LC³.

Fonte: Adaptado de Arun C. Emmanuel *et al.* (2016).

Após a moagem observou-se que existiam partículas de tamanho maior e aquelas superiores a 0,2 milímetros eram separadas e levadas a uma moagem adicional. Durante a moagem, também foi observado que por hora estavam moendo em torno de 15 toneladas de cimento LC³, o que usualmente gira em torno de 5 a 6 toneladas. Isso, justamente, pela redução da quantidade de clínquer, o material de maior tamanho e dureza na produção (EMMANUEL *et al.*, 2016).

Como resultado, Emmanuel *et al.* (2016) observaram que o produto final possuía maior finura que o cimento convencional, mas ainda apresentou, com o mesmo processo de produção já conhecido, propriedades mecânicas comparáveis ao cimento Portland convencional. Logo, observa-se a importância de estudar e analisar possibilidades de moagem e tipos de materiais a serem incorporados, visando o impacto desse processo na qualidade do produto final.

3 METODOLOGIA

A metodologia desse estudo contempla a análise experimental apresentada no fluxograma da figura 5.

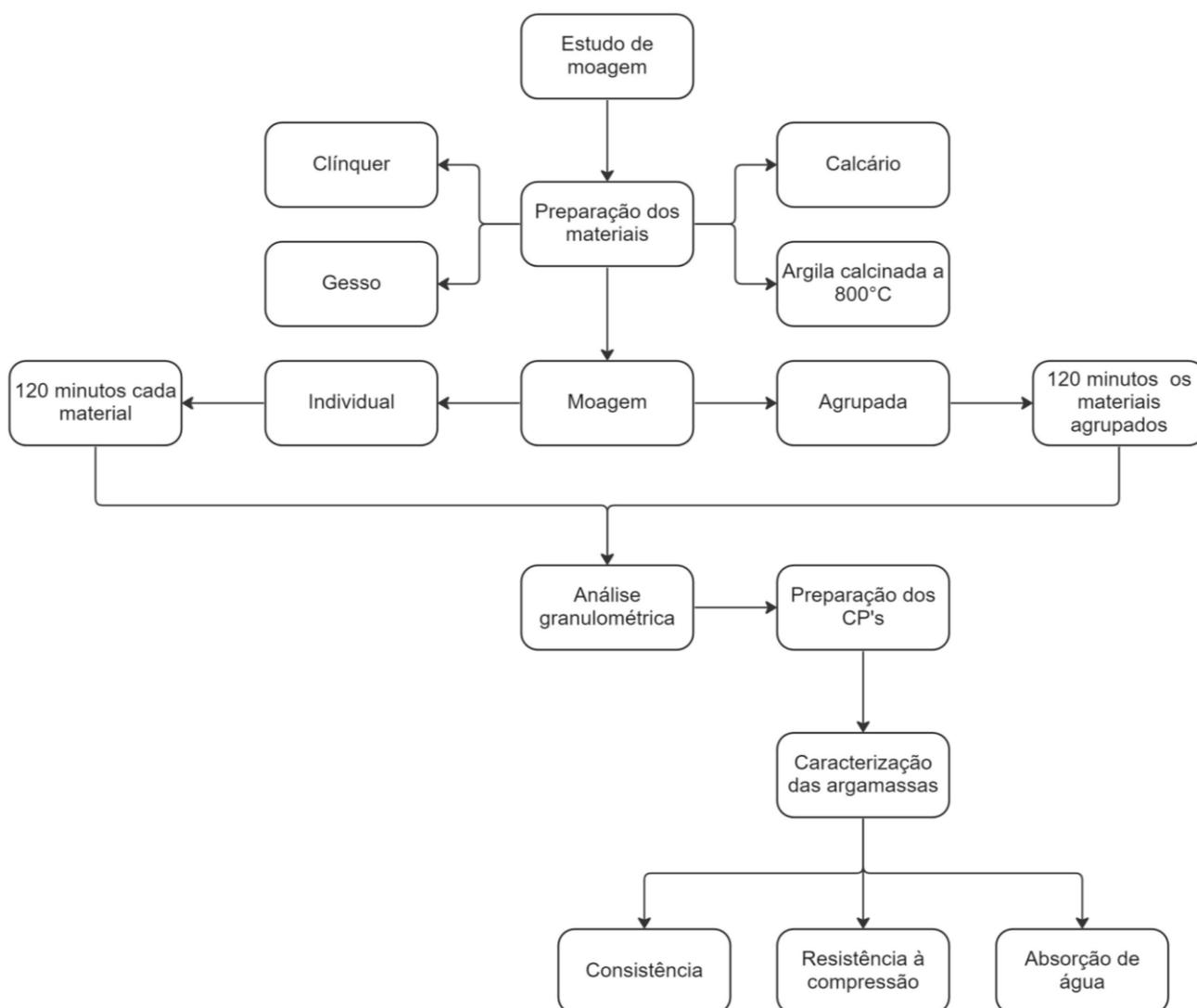


Figura 5 - Fluxograma da metodologia a ser adotada.

Fonte: Autor (2023)

3.1 Materiais e plano experimental

3.1.1 Clínquer

O clínquer utilizado na produção dos cimentos foi fornecido pela empresa Intercement, produzido na planta do município de Ijaci, Minas Gerais e foi estocado em recipiente hermeticamente fechado até a execução dos ensaios.

3.1.2 Gesso

A produção, a utilização e o armazenamento do gesso para a construção civil são regulados pela NBR 13207/2004. Assim, o gesso do estudo foi obtido no município de Ouricuri, Pernambuco, e armazenado conforme as especificidades da norma para a sua utilização.

3.1.3 Adições minerais

As adições minerais utilizadas no estudo foram o calcário e a argila calcinada, utilizados para substituir 45% (em massa) do clínquer na produção do cimento.

O calcário foi obtido no município de Ijaci, Minas Gerais, e está apresentado na figura 6. Este material foi seco em estufa a 100 °C e armazenado em saco plástico protegido de umidade.



Figura 6 – Calcário

Fonte: Autor (2023).

A argila utilizada também foi obtida no município de Ijaci, Minas Gerais. Inicialmente, o material se encontrava em seu estado natural, com torrões, como está apresentado na figura 7. Assim, ela foi submetida a um processo de destorroamento manual, até que se tornasse um material passante na peneira de 1,2 milímetros, o que

pode ser visualizado na figura 8. Tendo sido realizada essa preparação, calcinou-se a argila em forno mufla até 800° C. Inicialmente essa calcinação foi realizada em bandeja por 6 horas e, posteriormente, separada 50 gramas em cadinho, calcinado por mais 1 hora, obtendo-se o material apresentado na figura 9. Esta, assim como o calcário, foi armazenada em saco plástico protegido de umidade.



Figura 7 - Argila em estado natural.

Fonte: Autor (2023).



Figura 8 - Argila destorroada.

Fonte: Autor (2023).



Figura 9 - Argila calcinada a 800°

Fonte: Autor (2023).

3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na produção das argamassas foi a areia lavada e peneirada nas frações da areia normal brasileira, de modo que os ensaios e análises estivessem de acordo com as especificações da NBR 7214/2015, que trata dos requisitos necessários da areia para a execução do ensaio de resistência à compressão.

3.1.5 Aditivo químico

O aditivo incorporado nas argamassas de cimento LC³ foi o superplastificante MC-Powerflow 4001 representado na figura 10, aplicado com teor fixo de 2,5% sobre o peso do cimento, estando dentro da dosagem recomendada que varia de 0,2 a 5%. Ele é um produto redutor de água que apresenta bom funcionamento com uma grande variedade de cimentos, não provocando retardo no tempo de pega (MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2019).



Figura 10 - Aditivo superplastificante MC-POWERFLOW 4001

Fonte: Autor (2023).

A argila calcinada é um material de granulometria mais fina quando comparada ao clínquer, ou seja, torna o cimento mais fino quando incorporada. Dessa forma, para controlar a quantidade de água para hidratação do material, é importante a adição de um aditivo superplastificante.

3.1.6 Composição das argamassas

Para avaliação de como o tipo de moagem influencia nas propriedades do cimento LC³, foram produzidos três cimentos com as composições descritas na tabela 2 e variando o método de preparo dos materiais.

Na tabela 2, a sigla LC³ P8 MS 120 faz referência ao cimento de argila calcinada a 800 °C e calcário preparada com moagem separada de 120 minutos, enquanto a LC³ P8 MC 120 faz referência ao cimento de argila calcinada a 800 °C e calcário preparada com moagem conjunta de 120 minutos.

Amostra	Materiais da mistura em proporção de massa de cimento			
	Clínquer	Gesso	Argila calcinada a 800 °C	Calcário
REF	95%	5%	0%	0%

LC ³ P8 MS 120	50%	5%	30%	15%
LC ³ P8 MC 120	50%	5%	30%	15%

Tabela 2 - Composição dos cimentos produzidos.

Fonte: Autor (2023).

Tanto para as argamassas de cimento Portland convencional quanto de cimentos LC³, o traço determinado foi de 1:3 (cimento:areia), com um fator água cimento de 0,5 e um teor fixo de 2,5% de aditivo sobre a massa do cimento. Para cimentos LC³, a proporção de argila para calcário utilizada foi de 2:1.

Dessa forma, os cimentos e as argamassas foram produzidos para realização dos corpos de prova. O cimento sem adições foi feito a partir da moagem separada, por 120 minutos, do clínquer e do gesso. O cimento LC³ de moagem conjunta passou por um processo em que todos os componentes foram colocados juntamente em um moinho de bolas horizontal de baixa eficiência e moídos por 120 minutos. Já o cimento LC³ de moagem separada passou por um processo de moagem em que cada um dos componentes foi moído, individualmente, em mesmo moinho de bolas, por 120 minutos. Após essa preparação, os materiais foram armazenados para, posteriormente, serem misturados para confecção das argamassas e CP's. A separação dos materiais após a moagem já nas proporções da mistura está representada na figura 11 e quantidade de material por amassamento na tabela 3.

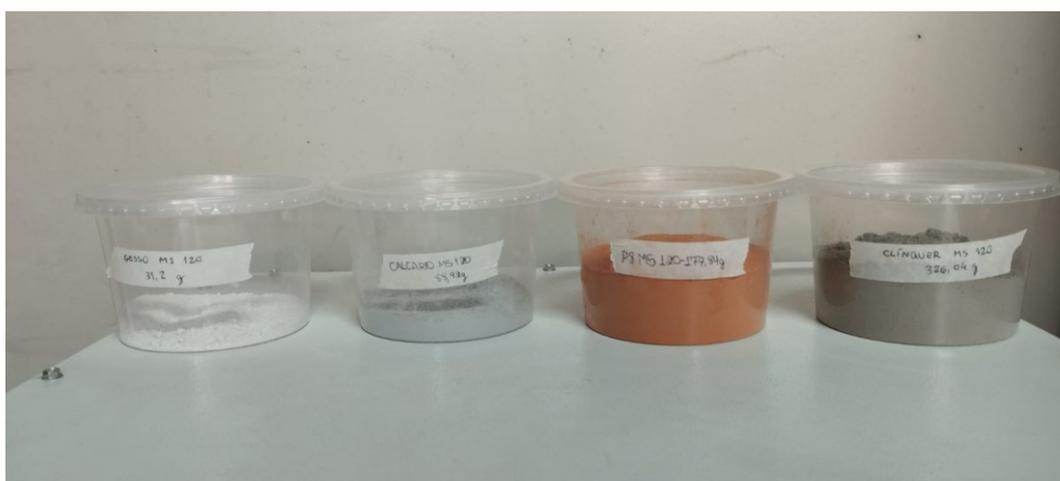


Figura 11 - Materiais moídos separadamente por 120 minutos na proporção para mistura do cimento LC³.

Fonte: Autor (2023).

Amostra	Quantidade de material por amassamento (gramas)						
	Clínquer	Gesso	Argila calcinada	Calcário	Areia	Água	Aditivo
REF	592,8	31,2	0	0	1872	312	8,93
LC ³ P8 MS 120	326,04	31,2	177,84	88,92	1872	312	8,93
LC ³ P8 MC 120	326,05	31,2	177,85	88,92	1872	312	8,93

Tabela 3 - Quantidade de material por amassamento.

Fonte: Autor (2023).

Para a preparação das argamassas, inicialmente, os materiais secos (clínquer, gesso e areia para o cimento de referência e clínquer, gesso, areia, argila calcinada e calcário para os cimentos LC³) foram misturados manualmente no próprio bowl da argamassadeira. Quando a mistura apresentou um estado visualmente homogêneo, ligou-se a argamassadeira na velocidade baixa por 1 minuto, pausando-a após esse período. Após a pausa, durante 1 minuto raspou-se o material acumulado na borda do bowl e mais 1 minuto foi aguardado para, então, religar a argamassadeira na velocidade alta por 3 minutos. Passado esse período, mais uma pausa de 1 minuto foi feita para raspagem do material acumulado, ligando-a uma última vez, na velocidade alta, por 3 minutos.

3.2 Ensaio de granulometria à laser

O ensaio para determinação da distribuição granulométrica a laser é previsto pela ISO 13320 (2020) e tem como objetivo determinar o tamanho das partículas a partir das propriedades de dispersão de luz.

A análise do tamanho das partículas por difração à laser foi realizada com a utilização do equipamento Battersize 2000. Além disso, álcool isopropílico foi utilizado como meio para o clínquer e o calcário, enquanto água foi utilizada para a argila.

3.3 Ensaio de consistência (flow table)

O ensaio para determinação do índice de consistência é previsto pela NBR 5739/2018 e tem como objetivo avaliar a consistência e a plasticidade do material,

permitindo um melhor entendimento com relação a trabalhabilidade e até uma análise de possível exsudação da mistura do cimento.

No desenvolvimento deste trabalho foi realizada a mistura dos materiais e preparada a mesa para medição do índice de consistência, assim como o molde rígido troncônico (125x80x65 mm). Sequencialmente, adicionou-se a mistura no molde em três camadas de mesma altura, aplicando, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes uniformes na primeira, segunda e terceira camada, retirando o excesso de material com uma espátula, como representado na figura 12.



Figura 12 - Ensaio de consistência.

Fonte: Autor (2023).

Após o enchimento, retirou-se a forma verticalmente e moveu-se a manivela da mesa, fazendo com que a mesma caísse 30 vezes em, aproximadamente, 30 segundos, abatendo o cone de cimento, como apresentado na figura 13.



Figura 13 - Cone de cimento e abatimento do material.

Fonte: Autor (2023).

Após o espalhamento da mistura, como auxílio de uma régua, mediu-se dois diâmetros ortogonais, obtendo, então, o índice de consistência a partir da média aritmética dessas medidas.

3.4 Ensaio de resistência à compressão

Inicialmente, nos moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, de material e espessura de acordo com a NBR 7215/2019, aplicou-se desmoldante visando a facilidade e não comprometimento do corpo de prova no seu desmolde. Feito isso, realizou-se a moldagem dos CP's em quatro camadas, compactando cada uma delas com 5 golpes manuais e homogêneos, finalizando com a rasadura dos corpos de prova.



Figura 14 - Moldagem do corpo de prova.

Fonte: Autor (2023).

Concluída a moldagem dos corpos de prova, eles foram deixados em uma caixa térmica com controle de temperatura por 24 horas, ainda nos moldes, para então serem desmoldados. Em seguida, os CP's foram devidamente identificados e caracterizados aos 28 dias de cura pelo ensaio de compressão.



Figura 15 - Corpos de prova desmoldados.

Fonte: Autor (2023).

O ensaio consiste na aplicação de carga compressiva de forma uniaxial, sendo que essa carga é acrescida, continuamente, até o rompimento do CP. Para melhor análise e comprovação de valores, foram produzidos 3 corpos de prova de cada um dos traços realizados no estudo.

O ensaio foi realizado em uma prensa servo-controlada universal – EIMC DL20000/PC200 com esforço máximo de 200 toneladas.



Figura 16 - Prensa servo-controlado universal - EMIC 20000/PC200 do LMC/UFOP.

Fonte: Higor Martins do Valle (2022).

3.5 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água por imersão, seguindo a NBR 9778/2005, tem em seu princípio, conduzir a água a ocupar os poros permeáveis do CP, com o objetivo de ser um indicador de durabilidade.

Para isso, os 9 corpos de prova de 50mm de diâmetro e 100mm de altura foram colocados em estufa à temperatura de (105 ± 5) °C por 72 horas, registrando, em seguida, a massa de cada um. Feito isso, e após o resfriamento natural dos CP's, eles foram imergidos, também por 72 horas, em água à temperatura de (23 ± 2) °C. Completado esse período, a água na qual o material está imergido é levada, progressivamente, a ebulição por 5 horas, determinando a massa dos CP's após o resfriamento natural da água.

A aferição das massas, após esse processo de saturação, foi realizada por meio de uma balança hidrostática, com o corpo totalmente submerso, permitindo a determinação da densidade dos materiais estudados. A absorção (A) é obtida pela média, considerando-se os desvios, da absorção dos corpos de prova.

$$A = \left(\frac{msat - ms}{ms} \right) \times 100$$

msat: massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms: massa da amostra seca em estufa.

Por esse mesmo ensaio ainda é possível determinar o índice de vazios (Iv), em porcentagem, e a massa específica real (ρ_s) dos materiais.

$$Iv = \left(\frac{msat - ms}{msat - mi} \right) \times 100$$

$$\rho_s = \frac{ms}{msat - mi}$$

mi: massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

4 RESULTADOS

4.1 Análise granulométrica à laser

A partir da análise granulométrica à laser, foram determinadas as distribuições granulométricas dos cimentos LC³ de mistura conjunta e de mistura separada, que estão representadas no gráfico da figura 17. Este gráfico foi realizado a partir da técnica de difração a laser e foi gerado pelo software OriginLab.

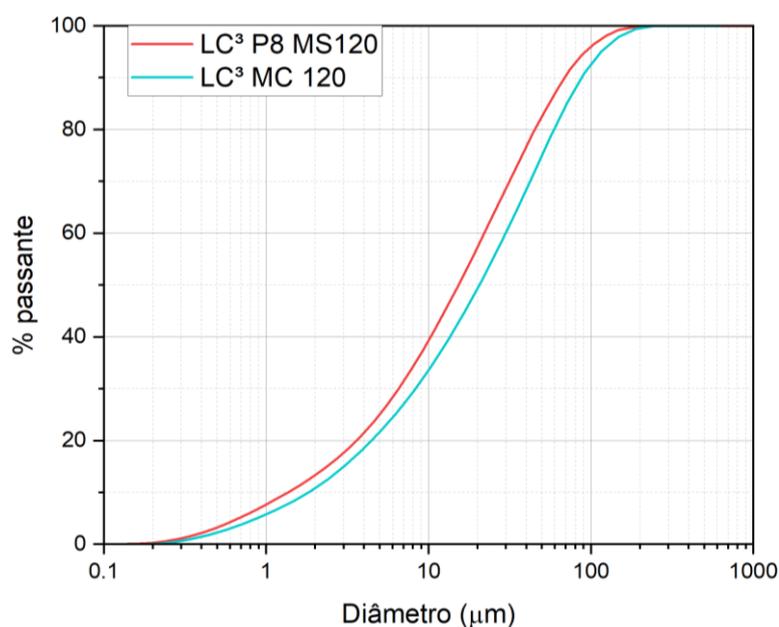


Figura 17 - Curva granulométrica dos cimentos LC³

Fonte: Autor (2023).

A partir da curva granulométrica, pode-se ver que o cimento LC³ de moagem separada apresentou o diâmetro médio de, aproximadamente, 16 µm, com, aproximadamente, 92% do material passante em 75 µm. Já o cimento LC³ de moagem conjunta, apresentou o diâmetro médio de 20 µm, com, aproximadamente, 88% do material passando em 75 µm.

Pela NBR 16697/2018, para os cimentos CPI e CPII, é necessário que 88% do material seja passante na peneira de 75 µm, enquanto para os cimentos CPIII e CPIV, esse valor é de 92%. Assim, é possível perceber que ambas as moagens dos cimentos

LC³ geraram uma granulometria que atende faixa necessária de condições de uso do cimento Portland, tendo como vantagem o reduzido impacto ambiental.

Scrivener *et al.* (2018) destacou que a argila calcinada apresenta uma granulometria mais fina, o que influencia na mistura final, sendo que o cimento mais fino demanda maior quantidade de água para hidratação dos grãos. Assim, a moagem separada, pelo fato de ter apresentado granulometria mais fina e, por consequência, maior área superficial, necessita de mais água ou de mais aditivo superplastificante para a hidratação de todos os grãos.

4.2 Consistência

Os resultados referentes a consistência da argamassa no estado fresco estão descritos na tabela 4. Nela é possível observar os valores de cada um dos corpos de prova, assim como a média de cada traço.

Amostra	Flow table (mm)			Flow table média (mm)	Desvio
LC ³ P8 MS 120	214	205	220	213	6
LC ³ P8 MC 120	235	228	229	231	3
REF	235	235	225	232	5

Tabela 4 - Resultados do ensaio de consistência.

Fonte: Autor (2023).

Para fim de comparação e maior dependência da moagem na variação dos resultados, componentes como água e aditivo superplastificantes foram padronizados, como apresentado anteriormente.

Pelos resultados, o cimento LC³ de moagem conjunta e o cimento Portland de referência apresentaram valores de espalhamento muito próximos, no entanto, foi possível observar a exsudação do material de referência. Já o cimento LC³ de moagem separada apresentou um valor de flow table inferior. Isto pode ser justificado pela menor granulometria apresentada pelo cimento LC³ de moagem separada, o que implica na necessidade de maior demanda de água ou então de maior quantidade de aditivo superplastificante para suprir essas necessidades para hidratação.

4.3 Resistência à compressão

Os resultados referentes à média das resistências à compressão dos três traços de corpos de prova na idade de 28 dias estão descritos na figura 18, além de poder observar os desvios de cada um.

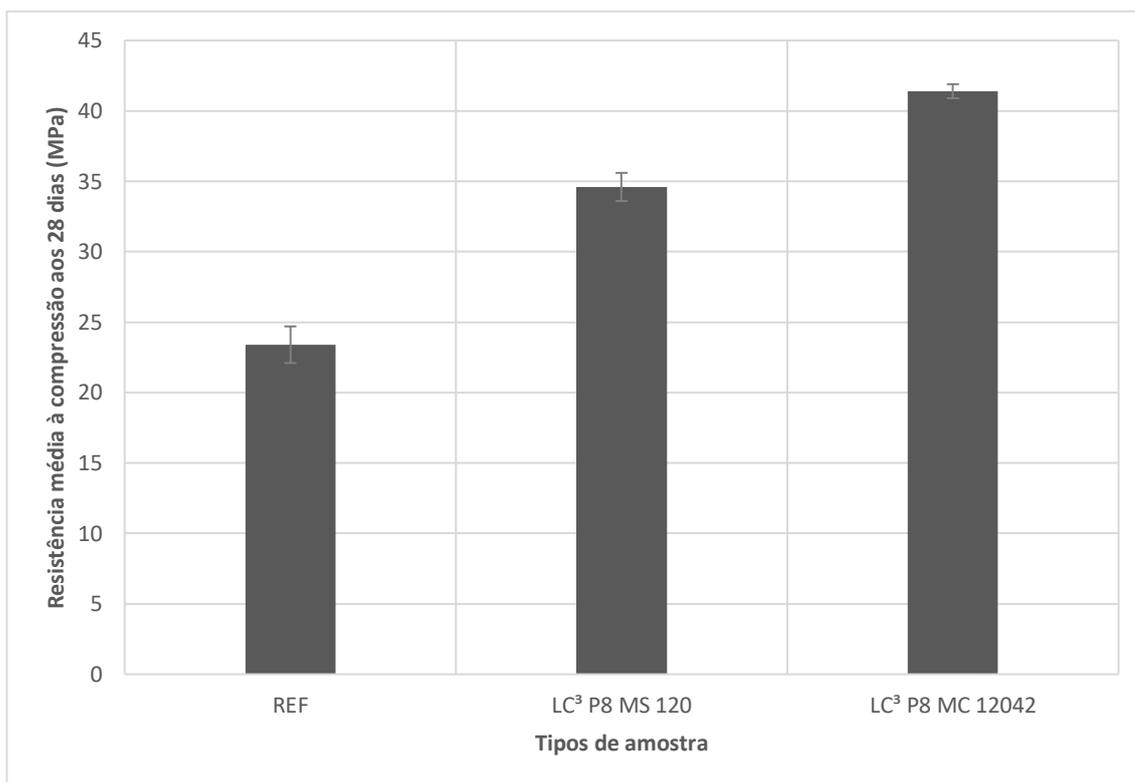


Figura 18 - Resistência média à compressão.

Fonte: Autor (2023).

A partir dos valores obtidos, observa-se que ambos os cimentos LC³ produzidos apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias superiores ao cimento Portland convencional. Isto indica que a menor granulometria dos cimentos de argila calcinada e calcário promoveu um melhor empacotamento e maior grau de hidratação do material. A argila calcinada também pode ter contribuído com a resistência devido a sua alta reatividade, consumindo portlandita, formando silicato de cálcio hidratado e gerando maior desenvolvimento da resistência à compressão, como apresentado por Avet e Scrivener (2018). Além disso, como descrito nos resultados de consistência,

houve a exsudação do cimento sem adições, o que implica diretamente no decréscimo de resistência do material.

4.4 Absorção de água

A partir do ensaio de absorção de água, foram obtidos resultados com relação taxa de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos corpos de prova, estando os valores médios apresentados na tabela 5.

Amostra	Absorção por imersão (%)	Desvio padrão	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm ³)
REF	7,31	0,31	15,18	2,438
LC ³ P8 MS 120	9,25	0,37	17,60	2,459
LC ³ P8 MC 120	9,11	0,14	17,66	2,362

Tabela 5 - Resultados do ensaio de absorção de água.

Fonte: Autor (2023).

Para melhor visualização e comparação dos valores de absorção de água e do índice de vazios, a figura 19 representa, graficamente, esses resultados.

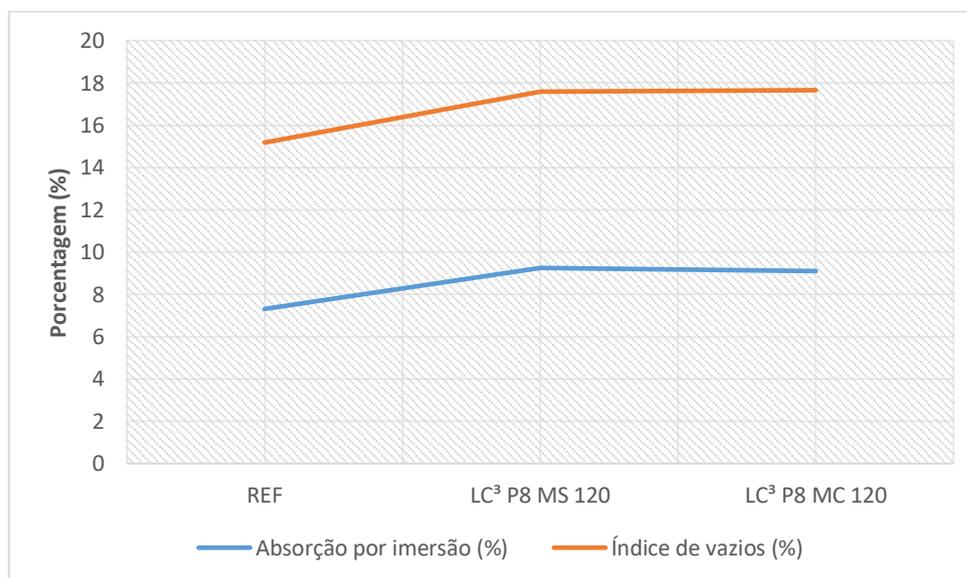


Figura 19 - Representação gráfica dos valores de absorção de água e índice de vazios dos traços de argamassa.

Fonte: Autor (2023).

A partir da análise dos valores obtidos e dos respectivos desvios, pode-se concluir que não houve diferença significativa entre os percentuais de absorção de água e índice de vazios entre as amostras de cimento LC³, o que sugere que os efeitos da moagem conjunta e separada tenha gerado resultados semelhantes nestas propriedades.

Ao comparar com a amostra de referência, pode-se observar que os cimentos LC³ tiveram desempenho inferior quanto à porcentagem de absorção de água e índice de vazios, o que, de forma geral, os tornam mais vulneráveis a ataques danosos de agentes químicos como os sulfatos. No entanto, observa-se na tabela 5, que a diferença entre as massas específicas é quase irrelevante, o que implica que nos cimentos LC³ o volume de sólidos é superior ao cimento de Portland de referência, já que o índice de vazios é obtido a partir da relação entre volume de vazios e volume de sólidos.

Analisando o índice de vazios e relacionando-o com a resistência à compressão, é possível observar que mesmo o cimento de referência apresentando menor índice de vazios, eles ainda apresentaram resistências piores, o que geralmente acontece de maneira inversa. Isto pode ter influência da exsudação do material observada no ensaio de consistência e da conectividade dos poros, o que implica que a maior taxa de absorção de água do mesmo acarrete em problemas de resistência e durabilidade do material.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do tipo de moagem na granulometria, consistência, resistência mecânica e absorção de água de matrizes de cimento LC³. Desse modo, a partir de revisão bibliográfica e ensaios realizados com as amostras produzidas, foi possível entender e identificar como a variação na moagem pode influenciar na produção dos cimentos estudados.

Analisando inicialmente a granulometria obtida a laser, foi perceptível pelos resultados que o cimento LC³ preparado a partir de moagem separada dos materiais apresentou grãos de menores dimensões, o que demandaria mais água para hidratação.

Juntamente aos resultados de granulometria, é relevante destacar o ensaio de consistência, no qual o cimento LC³ de moagem separada apresentou um espalhamento inferior aos outros dois cimentos do estudo. Cabe destacar, ainda, que a proporção de água e de aditivo superplastificante foram fixadas para ambos os cimentos LC³. Dessa forma, o material de moagem separada apresentar menor espalhamento pode ser explicado pela padronização das dosagens citadas, já que um material mais fino, no caso da MS, demandaria mais água ou mais aditivo para suprir essa necessidade para hidratação.

Com relação a absorção de água e o índice de vazios, percebeu-se que a moagem praticamente não interferiu nos resultados, já que para ambos os cimentos LC³ os valores foram muito próximos. Ao comparar esses dados com os do cimento de referência, é visível que há uma queda de desempenho do LC³, no entanto não comprometeu a resistência do material. Isto pode ser possível pela não conectividade dos poros do cimento LC³, que necessita de comprovação a partir de outros estudos e análises.

Em contrapartida, a densidade real de todas as amostras teve valores muito próximos, o que indica que os cimentos LC³, após as reações de hidratação, apresentou, um volume de sólidos superior ao cimento convencional.

Além disso, ambos os cimentos LC³ apresentaram resistência à compressão aos 28 dias superiores ao cimento de referência, o que pode ter sido influenciado pela menor dimensão do material, contribuindo para melhor empacotamento e hidratação dos grãos. Além disso, há a possibilidade da argila calcinada utilizada possuir propriedades pozolânicas capazes de reagir com a portlandita durante a hidratação do cimento, produzindo quantidades superiores de C-S-H e conferindo maior resistência ao produto final. Ainda é relevante destacar que houve a exsudação do cimento sem adições, o que comprometeu a resistência do mesmo.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros a partir dos resultados obtidos nesse trabalho, recomenda-se a realização de mais ensaios investigativos para comprovar efetivamente as características e argumentos trazidos, como a determinação do índice de atividade pozolânica. Além disso, não fixar os teores de água e aditivo para todos os tipos de cimento produzidos, de modo que seja possível obter os melhores

resultados para os ensaios. Também se recomenda analisar o desempenho dos cimentos LC³ em um período tempo maior, a fim, principalmente, de verificar como o valor superior de taxa de absorção de água e de índice de vazios podem impactar a resistência mecânica do produto final.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778:
Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação Da Absorção de Água

Por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Portal ABCP: **Cimentos.** São Paulo, 2021.

SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S., **Calcined Clay Limestone Cements (LC3)**, Cement and Concrete Research, v. 114, p. 49-56, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades E Materiais.** 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

THOMAS, M. **Supplementary Cementing Materials In Concrete.** Nova Iorque: CRC Press, 2013.

VIZCAÍNO-ANDRÉS, L.; SÁNCHEZ-BERRIEL, S.; DAMAS-CARRERA, S.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, A.; SCRIVENER, K. L.; FERNANDO, M.-H., **Industrial Trial To Produce A Low Clinker, Low Carbono Cement**, Materiales de Construcción, v.. 65, n 317, 2015.

ZUNINO, F.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. **Limestone Calcined Clay Cements (LC3)**. *ACI Materials Journal*. Vol. 118, p49-60, 2021.

ANDRÉS, L. M. V.; ANTONI, M. G.; DIAZ, A. A.; HERNÁNDEZ, J. F. M.; SCRIVENER, K. L. Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements. **Advances in Cement Research**, v. 27, p. 546-556, 2015.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1579–1589, 2012.

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

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (eds.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 273p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, Brasil, 2003

LOTTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCI, E.; SCRIVENER, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 848-860, 2008.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1244-1256, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedade e Materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado**: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Londres: Academic Press, 1990.

ZUNINO, F.; SCRIVENER, S. The influence of the filler effect on the sulfate requirement of blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 126, 105918, 2019.

DAMIDOT, D.; LOTHENBACH, B.; HERFORT, D.; GLASSER, F. P. Thermodynamics and cement science. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 679-695, 2011.

ENVIRONMENT, UN; SCRIVENER, K.; JOHN, M.; GARTNER, E. Eco-efficient cements: Potencial economically viable solutions for a low CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.