

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
ARGAMASSAS COM USO DE CIMENTO LC³ COM DIFERENTES
PROPORÇÕES DE FÍLER CALCÁRIO E ARGILA CALCINADA**

ANANDA DE CÁSSIA DO NASCIMENTO LAURENT ROCCHI
JULIANA MARTINS DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA
CO-ORIENTADORA: DIANA NASCIMENTO LINS

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS**

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
ARGAMASSAS COM USO DE CIMENTO LC³ COM DIFERENTES
PROPORÇÕES DE FÍLER CALCÁRIO E ARGILA CALCINADA**

**ANANDA DE CÁSSIA DO NASCIMENTO LAURENT ROCCHI
JULIANA MARTINS DE OLIVEIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**EUGÊNIA FONSECA DA SILVA, D. Sc. (UnB)
(ORIENTADORA)**

**JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, D. Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ENEÁS DE ANDRADE BARBALHO
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 de JULHO de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

ROCCHI, ANANDA DE CÁSSIA DO N. L.; OLIVEIRA, JULIANA MARTINS. Avaliação da resistência à compressão de argamassas com o uso de cimento LC ³ com diferentes proporções de fíler calcário e argila calcinada. [Distrito Federal] 2017. x, 80 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017) Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Cimento LC ³	2. Resistência à compressão
3. Emissão de gases poluentes	4. Adições
I. UnB/ FT/ Engenharia Civil	II. Índice de desempenho

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROCCHI, A.C.N.L.; OLIVEIRA, J.M. (2017). Avaliação da resistência à compressão de argamassas com o uso de cimento LC³ com diferentes proporções de fíler calcário e argila calcinada. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Ananda de Cássia do N. L. Rocchi e Juliana Martins de Oliveira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da resistência à compressão de argamassas com o uso de cimento LC³ com diferentes proporções de fíler calcário e argila calcinada

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ananda de Cássia do N. L. Rocchi
QI 05, lote 1480/1580, Apto. 1102 - Gama
72445-050 – Brasília/DF - Brasil

Juliana Martins de Oliveira
SHIN QI 10 conj. 06 casa 11 - Lago Norte
71525-060 – Brasília/DF - Brasil

RESUMO

O aumento da demanda de cimento cresce no mundo todo e no Brasil, país emergente, não é diferente. A produção de cimento é responsável pela maior parcela de emissões de CO_2 relacionadas ao concreto. Em busca da redução da quantidade de carbono produzida, há estudos recentes no sentido de utilizar adições minerais ao cimento para reduzir a quantidade de clínquer necessária para sua fabricação, como as adições de argila calcinada e fíler calcário. Tendo como motivação a redução da poluição atmosférica, este trabalho objetiva avaliar os parâmetros de resistência à compressão de quatro tipos de traços diferentes de uma argamassa feita com cimento LC³, mistura ternária de clínquer, argila calcinada e fíler calcário. Após caracterizar as adições minerais e obedecendo a proporção de 55% de cimento Portland CP I e 45% de substituição, foram estudados quatro traços, variando em cada um deles a proporção das adições, além do traço de referência feito 100% com CP I. Com os ensaios de resistência à compressão da NBR 7215 (1996), os resultados das substituições de 2:1 e 3:1 (argila calcinada: fíler calcário) mostram-se totalmente satisfatórios, alcançando cerca de 92% e 98%, respectivamente, da resistência à compressão da argamassa de referência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que até aqui nos ajudou, nos fortaleceu e nos deu as condições necessárias para que alcançássemos mais esta vitória.

Aos nossos pais, por todo o apoio, toda a ajuda ao longo de nossa jornada e por nos ajudarem a prosseguir todas as vezes em que nossas forças se acabaram.

Aos nossos familiares e amigos, pelo incentivo e por nos impulsionar sempre para maiores conquistas.

A nossa orientadora, Eugenia Fonseca, por aceitar caminhar juntamente conosco neste projeto e nos ensinar a sermos alunas e profissionais melhores e, o mais importante, seres humanos melhores.

Por fim, nosso agradecimento especial a nossa co-orientadora Diana Lins, por se fazer presente em todos os momentos da reta final do nosso curso e por nos dar todo o apoio e condições necessárias para que pudéssemos realizar este projeto.

A todos o nosso muito obrigada!

SUMÁRIO

Capítulo	Página
<u>1. INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>5</u>
2.1 CIMENTO PORTLAND	5
2.1.1 DEFINIÇÃO E BREVE HISTÓRICO.....	5
2.1.2 FABRICAÇÃO E COMPOSIÇÃO.....	5
2.1.3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	8
2.1.4 ADIÇÕES	9
2.1.5 TIPOS DE CIMENTOS E SUAS APLICAÇÕES	10
2.2 ARGILA CALCINADA	13
2.2.1 BREVE HISTÓRICO	13
2.2.2 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS	15
2.2.3 INFLUÊNCIA DA ARGILA CALCINADA NA DURABILIDADE	17
2.3 FÍLER CALCÁRIO	18
2.3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS	18
2.4 LC ³ - CIMENTO DE ARGILA CALCINADA E FÍLER CALCÁRIO (LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT)	19
2.4.1 AS SUBSTITUIÇÕES	20
2.5.2 PROPORÇÕES JÁ ESTUDADAS	22
2.5.3 DESEMPENHO DO CIMENTO LC ³	25
<u>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</u>	<u>31</u>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	31
3.1.1 ADIÇÕES MINERAIS	32
3.1.2 CIMENTO PORTLAND.....	32
3.1.3 AGREGADO MIÚDO (AREIA)	32

3.1.4	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES	33
3.2.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER.....	33
3.2.2	MASSA ESPECÍFICA.....	34
3.2.3	BLAINE	34
3.2.4	DIFRATOMETRIA DE RAIO-X	36
3.2.5	FLUORESCÊNCIA POR RAIO-X.....	37
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	38
3.3.1	DETERMINAÇÃO DA FINURA DO CIMENTO	38
3.3.2	MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	39
3.3.3	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DO CIMENTO	40
3.3.4	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA.....	41
3.3.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	42
3.4	FABRICAÇÃO DAS ARGAMASSAS	42
3.4.1	COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS	42
3.4.2	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	44
3.4.3	ÍNDICE DE DESEMPENHO DO LC ³	48
3.4.4	ÍNDICE DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS.....	49
4.	<u>ANÁLISE DE RESULTADOS.....</u>	<u>50</u>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	50
4.1.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA À LASER.....	50
4.1.2	MASSA ESPECÍFICA E BLAINE.....	53
4.1.3	DIFRATOMETRIA DE RAIO-X	55
4.1.4	FLUORESCÊNCIA POR RAIO-X.....	57
4.1.5	DETERMINAÇÃO DA FINURA DO CIMENTO.....	58
4.1.6	MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	58
4.1.7	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA.....	59
4.2	ANÁLISE DAS ARGAMASSAS	59
4.2.1	CONSISTÊNCIA DO ESTADO FRESCO.....	59
4.2.2	ÍNDICE DE DESEMPENHO DO LC ³	61
4.2.3	VARIABILIDADE DOS RESULTADOS.....	67
5	<u>CONCLUSÃO.....</u>	<u>68</u>

5.1 SINOPSE E CONCLUSÃO	68
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>71</u>
<u>APÊNDICE A.....</u>	<u>77</u>
<u>APÊNDICE B.....</u>	<u>80</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Desenvolvimento das resistências dos compostos puros (Bogue, 1955).	7
Figura 2.2: Processo de desidroxilação da caulinita (San Nicolas, 2011).	16
Figura 2.3 - Resistência à compressão de misturas para 1, 7, 28 e 90 dias (ANTONI, 2013).	24
Figura 2.4 – Resistências à compressão relativas ao cimento Portland comum para 1, 7, 28 e 90 dias (ANTONI, 2013).	24
Figura 2.5 - Resultados de porosidade para LC ³ e cimento Portland comum (OPC- <i>Ordinary Portland Cement</i>) (Scrivener, 2014).	26
Figura 2.6 - Estimativa da redução de CO ₂ pela substituição do clínquer por argila calcinada e fíler calcário (Scrivener, 2014).	27
Figura 2.7 - Resistências desenvolvidas em misturas contendo 50% de clínquer, 5% de gipsita, 15% de fíler calcário e 30% de argila calcinada proveniente de diversos países (Scrivener, 2014).	28
Figura 2.8 – Relação entre a caulinita presente na argila e a resistência à compressão (Scrivener, 2014).	29
Figura 3.1 – Organograma dos ensaios de caracterização.	31
Figura 3.2 – Aparelho utilizado no ensaio de granulometria à laser.	33
Figura 3.3 – Permeabilímetro de Blaine.	35
Figura 3.4 – Arranjo óptico de um difratômetro de raio-x (FORMOSO, 1984).	36
Figura 3.5 – Representação esquemática do EDX-720 <i>Shimadzu</i> .	37
Figura 3.6 – Peneiramento do cimento na peneira 200.	39
Figura 3.7 – Frascos com amostras para determinação da massa específica do cimento.	40
Figura 3.8 – Aparelho de Vicat no ensaio de tempo de início de pega.	41
Figura 3.9 – Mistura da água, superplastificante, cimento, argila e fíler.	45
Figura 3.10 – (a) Adição da areia na mistura e (b) Mistura em repouso.	46
Figura 3.11 – (a) Colocação da argamassa no tronco de cone e (b) Golpes aplicados às camadas de argamassa.	47
Figura 3.12 – (a) Retirada do tronco de cone e (b) Medição do espalhamento com o paquímetro.	47

Figura 3.13 – (a) Aplicação da carga para determinação da carga de ruptura (b) Corpos de prova após a ruptura.	49
Figura 4.1 – Curva granulométrica do cimento Portland.	51
Figura 4.2 – Curva granulométrica da argila calcinada.	51
Figura 4.3 – Curva granulométrica do fíler calcário.	52
Figura 4.4 – Curvas granulométricas do CP I, argila calcinada e fíler calcário.	53
Figura 4.5 – Difratoograma do CP I..	55
Figura 4.6– Difratoograma da argila calcinada.	56
Figura 4.7 – Difratoograma do fíler calcário.	56
Figura 4.8 – Desenvolvimento da resistência à compressão dos traços de referência, 1:2, 2:1, 3:1 e 1:1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.	63
Figura 4.9 – Resistências à compressão relativas à referência para 1, 3, 7 e 28 dias.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais Compostos do Cimento Portland (NEVILLE, 2016).	6
Tabela 2.2 – Limites aproximados da composição do cimento Portland (NEVILLE, 2016).	8
Tabela 2.3 - Composição dos cimentos Portland (ABCP, 2002).	13
Tabela 2.4 – Proporções de argila calcinada, fíler calcário e clínquer utilizadas no estudo de Antoni (ANTONI, 2013).	23
Tabela 3.1 – Exigências físicas e mecânicas (Fonte: adaptado de NBR 5732/1991)	38
Tabela 3.2 – Proporções das adições ao cimento Portland.	42
Tabela 3.3 - Quantidades de materiais utilizados nas argamassas de referência (Adaptado de NBR 7215/1996).	43
Tabela 3.4 - Quantidades de materiais utilizados nas argamassas (Adaptado de NBR 7215/1996).	44
Tabela 3.5 – Idades de ruptura (Adaptado de NBR 7215/1996).	48
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica e determinação da finura pelo Método de Blaine).	54
Tabela 4.2 – Composição química do CP-1, argila calcinada e fíler calcário obtida pelo FRX.	57
Tabela 4.3- Resultado do índice de finura.	58
Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de massa específica do cimento.	59
Tabela 4.5 – Espalhamentos obtidos no ensaio de abatimento.	60
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias.	62
Tabela 4.7 – Desvios relativos máximos	67

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

Al_2O_3 : Alumina

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$: Metacaulinita

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$: Silicato de Alumínio Hidratado

ASTM: American Society for Testing and Materials

BET: Brunauer Emmett e Teller

CaCO_3 : Carbonato de Cálcio

CaO : Calcário

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hidróxido de Cálcio

CO_2 : Gás Carbônico

C_3A : Aluminato tricálcico

C_4AF : Ferroaluminato tetracálcico

C-S-H: Silicato de Cálcio Hidratado

C_3S : Silicato tricálcico

C_2S : Silicato dicálcico

Fe_2O_3 : Óxido de Ferro

H_2O : Água

K_2O : Óxido de Potássio

LC^3 : Cimento com adição de argila calcinada e fíler calcário

MgO : Óxido de Magnésio

NaO : Óxido de sódio

NBR: Norma Brasileira Registrada

NM: Norma Mercosul

pH: Potencial Hidrogeniônico

RAA: Reação Álcali-agregado

SiO_2 : Sílica

SNIC: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

1. INTRODUÇÃO

A construção civil cresce a cada ano no Brasil e no mundo, refletindo o desenvolvimento dos países e de suas infraestruturas. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o crescimento do consumo de cimento no Brasil foi de aproximadamente 2% no ano de 2013. A indústria cimenteira cresceu com a inauguração de novas fábricas e aumento da capacidade de produção das fábricas existentes. A produção brasileira atingiu o patamar de 70 milhões de toneladas de cimento produzidas no ano de 2013.

Assim como no Brasil, o crescimento da demanda por cimento cresce no mundo todo e sabe-se que boa parte dessa demanda virá dos países emergentes e em desenvolvimento, que já constituem 80% da produção global. Do crescimento da demanda de concreto surge o desafio: aumentar a produção, porém reduzir os impactos ambientais (MÜLLER et al., 2008).

Com relação aos impactos ambientais, sabe-se que a produção do cimento é responsável pela maioria das emissões de CO₂ associadas ao concreto e ao seu processo produtivo. Na produção de cimento, cerca de 40% dessas emissões estão relacionadas com os combustíveis e a eletricidade, já os outros 60% são derivados da decomposição da principal matéria prima, o calcário (SCRIVENER, 2014).

A parcela relacionada às fontes de energia possui outras alternativas nos dias atuais, como fontes de energias renováveis e biocombustíveis; porém, não é foco deste trabalho. Esta pesquisa visa procurar alternativas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa sob a ótica da química do cimento.

Dentre as inúmeras opções de compostos químicos que podem ser usados na produção do cimento, é interessante estudar aqueles formados pelos elementos mais abundantes na Terra, como o silício, alumínio, ferro, cálcio e magnésio. Isso porque deve-se ter materiais alternativos para se utilizar como adição em quantidades suficientes para suprir a crescente demanda por cimento prevista.

Alguns materiais já foram estudados, porém não se mostraram viáveis para tal objetivo, como é o caso das cinzas volantes (alta variabilidade e baixa disponibilidade) e as pozolanas naturais (muitas vezes têm baixa reatividade e são bastantes variáveis) (SCRIVENER, 2014).

Outro material já estudado é a argila calcinada. Sabe-se que as argilas calcinadas, quando usadas em porcentagens adequadas, apresentam um bom desempenho. Porém, quando utilizadas em porcentagens elevadas, deixam de ser uma opção economicamente viável, já que seu custo de calcinação é alto.

Para compensar o custo elevado de calcinação e melhorar a sinergia das reações, estudos indicam que é possível adicionar fíler calcário, fazendo uma maior economia do uso de clínquer. Segundo estudos realizados por Scrivener (2014), utilizando 30% da mistura de argila calcinada e 15% de fíler calcário como substituição ao clínquer, percebe-se que não há redução no desempenho mecânico da mistura.

As argilas em questão são produto do intemperismo de rochas, por isso estão disponíveis em abundância na crosta terrestre. São elas constituídas de óxidos de silício e óxido de alumínio. Por sua vez, o calcário está sempre disponível em fábricas de cimento e até aqueles inadequados para a produção de clínquer também podem ser usados como adição mineral. (SCRIVENER, 2014).

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A crise de mudança climática exige soluções eficazes e estudos evidenciam que o mundo precisa reduzir em 80% os níveis de emissão de gases de efeito estufa. Sabe-se que a indústria de cimento é responsável por 8% das emissões globais de CO₂ (MULLER, 2008).

As fábricas de cimento devem sustentar seus negócios, atendendo as demandas, mas, ao mesmo tempo, devem reduzir a quantidade de carbono produzida. Isso porque projeções futuras mostram que haverá um aumento da produção e construção de novas fábricas de cimento. E, em um mundo com restrições de emissões de gases, a competitividade dessas fábricas dependerá da sua eficiência e da intensidade de CO₂ produzido.

Globalmente existem acordos que pautam a redução dos níveis de emissão de gases efeito estufa; por conseguinte, para seguir a tendência de redução, deve-se transformar a produção de cimento em um modelo sustentável.

Até então, o uso de adições minerais, como argila calcinada e fíler calcário, tem se mostrado a medida de maior sucesso na redução de emissões de CO₂ (MULLER, 2008). Contudo é uma medida desafiadora, já que modifica a química de um produto amplamente conhecido e testado há vários anos, que é o cimento Portland.

Dentro desse contexto, surge uma nova proposta cujo princípio é o uso de uma mistura ternária: o cimento LC³. Ele é uma mistura composta pela adição de fíler calcário e argila calcinada ao clínquer; fazendo com que a emissão de CO₂ reduza substancialmente, sem comprometer a oferta de cimento demandada pelo crescimento da construção civil.

O cimento LC³ apresenta bom desempenho, uma vez que existe um efeito sinérgico com substituições em conjunto de calcário e argila calcinada. A argila calcinada reage mais na presença do calcário; assim como o fíler calcário reage mais rapidamente quando em conjunto com a argila calcinada (ANTONI et al. 2012).

Então sabe-se que o aumento da necessidade de cimento em função do crescimento dos países em desenvolvimento lança um desafio para a engenharia: atender à demanda da população e reduzir, ao mesmo tempo, os impactos ambientais, assunto de extrema importância nos dias atuais.

Sendo assim, esta pesquisa busca novas alternativas para que o cimento possa ser produzido em larga escala, aumentando sua oferta, porém reduzindo as emissões de CO₂, a fim de diminuir a poluição decorrente de seu processo de produção. O foco é avaliar a viabilidade técnica do cimento LC³, em termos de resistência à compressão, com diferentes proporções de argila calcinada e fíler calcário.

Este trabalho é parte integrante da linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção” sobre LC³ do programa de pós-graduação na área de Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília; e foi desenvolvido paralelamente à

pesquisa de mestrado de Diana Nascimento Lins, em cuja dissertação serão incorporados os resultados deste estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

O presente estudo tem como objetivo geral estudar diferentes proporções entre as substituições de argila calcinada e fíler calcário, já partindo da proporção de 55% de cimento Portland CP I para 45% de substituição, proporção essa já estudada por SANCHEZ BERRIEL et al (2016), SCRIVENER (2014) e ANTONI (2013).

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar, por meio de ensaios, as adições minerais utilizadas na formação do cimento LC³: a argila calcinada e o fíler calcário. Caracterizar também o cimento Portland utilizado.
- Estudar diferentes proporções entre as substituições de argila calcinada e fíler calcário, já partindo da proporção de 55% de cimento Portland CP I para 45% de substituição. As proporções estudadas serão: 1:2, 1:1, 2:1 e 3:1, considerando argila calcinada:fíler calcário.
- Avaliar os parâmetros de resistência à compressão e os respectivos índices de desempenho de acordo com a NBR 7215 (1996) nas seguintes idades: 1, 3, 7 e 28 dias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

2.1.1 Definição e breve histórico

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, pois endurece sob a ação da água e permanece estável à ação desta, produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sintetizado, produzido quando uma mistura de matérias-primas (farinha) de composição pré-determinada é aquecida a altas temperaturas (AMBROZEWICZ, 2012). Assim, o cimento Portland consiste no cimento resultante da mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro; o clínquer é o resultado da queima dessa mistura a dada temperatura (NEVILLE, 2016).

O cimento Portland foi criado e patenteado em 1824, pelo construtor inglês Joseph Aspdin. Era comum nas construções da época, na Inglaterra, o uso de uma pedra, de cor acinzentada, típica da ilha de Portland, localizada ao Sul do país; devido às semelhanças na cor e na dureza da invenção de Joseph e da pedra de Portland, nomeou-se então tal invenção de cimento Portland (AMBROZEWICZ, 2012).

2.1.2 Fabricação e composição

Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o calcário e a argila são as matérias-primas fundamentais que, após passarem por processos específicos, resultam em um ligante hidráulico resistente, denominado clínquer. Primeiramente ocorre a britagem da rocha calcária, seguida da moagem e mistura em proporções adequadas com argila moída. Esses componentes são, então, aquecidos em um forno, cuja temperatura alcança até 1400°C, em que o calor elevado ao qual são submetidos é o responsável por transformar a mistura em um novo material: clínquer. O clínquer formado é resfriado bruscamente ao sair do forno e moído finamente, transformando-se em um pó que, em presença de água, endurece e adquire durabilidade e resistência. Por fim, adiciona-se ao clínquer uma quantidade de gipsita (sulfato

de cálcio), com o intuito de evitar a pega instantânea do cimento, sendo novamente moído até resultar em um pó fino denominado cimento Portland (NEVILLE, 2016).

O calcário, a sílica, a alumina e o óxido de ferro presentes no cimento se combinam no forno e geram uma série de outros compostos, atingindo um equilíbrio químico. Os quatro principais constituintes do cimento estão listados na Tabela 2.1 com suas respectivas abreviações, ou seja, $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ e $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$.

Tabela 2.1 – Principais Compostos do Cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF

Os principais compostos são o C_3S e o C_2S , pois são os responsáveis por conferir resistência à pasta de cimento hidratada. Já o C_3A contribui pouco para a resistência, exceto nas primeiras idades. O C_4AF , por sua vez, está presente em pequenas quantidades no cimento e pouco influencia em suas propriedades; no entanto, ele reage com a gipsita formando sulfoferrito de cálcio e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2016). A Figura 2.1 mostra o desenvolvimento da resistência dos quatro compostos do cimento ao longo do tempo.

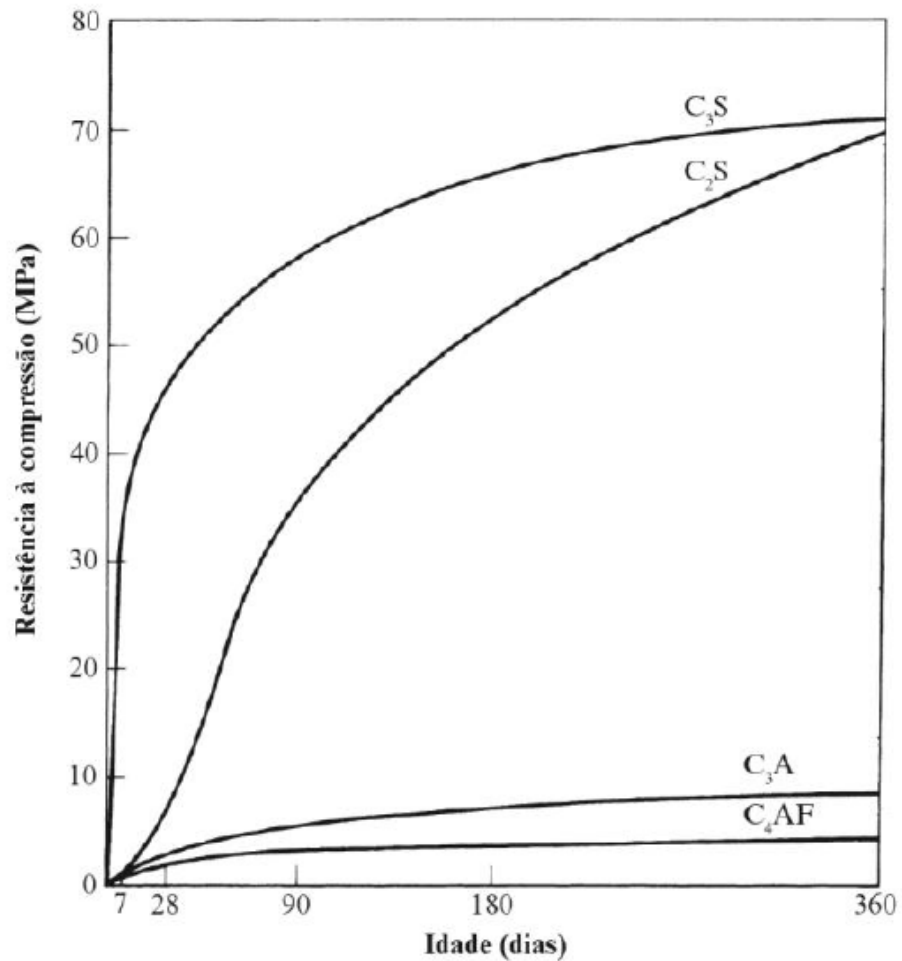


Figura 2.1: Desenvolvimento das resistências dos compostos puros (Bogue, 1955).

Existem ainda os compostos secundários, encontrados em menores quantidades, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . Os óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O), conhecidos como *álcalis*, recebem atenção especial, pois, ao reagirem com alguns agregados, geram uma reação denominada *álcali-agregado* que, por sua vez, causa desintegração do concreto (NEVILLE, 2016). A Tabela 2.2 apresenta os compostos do cimento Portland e seus respectivos teores.

Tabela 2.2 – Limites aproximados da composição do cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Óxido	Teor (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-6,0
MgO	0,1-4,0
Álcalis	0,2-1,3
SO ₃	1-3

2.1.3 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento Portland ocorre ao longo do tempo, tendo, aos 28 dias de cura, cerca de 70 a 80% de grau de hidratação (GUÉNOT-DELAHAIE, 1996; TAYLOR, 1997) e praticamente se completando aos 365 dias (TAYLOR, 1997).

O tipo e a finura do cimento, a relação entre água e cimento, a temperatura de cura e a presença de aditivos químicos e minerais serão os fatores determinantes na velocidade do processo de hidratação do cimento. A reação de hidratação consiste basicamente na formação de silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monossulfoaluminato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio, a partir da reação dos compostos do cimento (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) com a água. Quando adições minerais de elevada atividade pozzolânica, como a metacaulinita, são incorporados à matriz de cimento, eles podem reagir com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, formando uma quantidade de produto hidratado adicional na matriz de cimento hidratada. A quantidade deste pode reduzir a porosidade da matriz, a porosidade da zona de transição dos concretos e a permeabilidade do material cimentício, resultando em um incremento em sua durabilidade (FAIRBAIRN et al., 2006).

A hidratação do C_3S produz o composto hidratado microcristalino $C_3S_2H_3$ com a liberação de cal na forma cristalina de $Ca(OH)_2$. O C_2S apresenta comportamento semelhante, porém contém menos cal. Os silicatos de cálcio hidratados são denominados C-S-H (NEVILLE, 2016).

A hidratação dos compostos do cimento tem como consequência a liberação de calor, sendo caracterizada assim como uma reação exotérmica. Define-se como calor de hidratação a quantidade de calor liberada (em Joule) por grama de cimento anidro até a hidratação completa a uma dada temperatura. (NEVEILLE, 2010).

2.1.4 Adições

Atualmente, há disponíveis no mercado diversos tipos de cimento Portland com propriedades diferentes para fins específicos. Essas diferenças são resultado das adições realizadas ao clínquer em diferentes proporções; as matérias-primas utilizadas para esse fim são o gesso, as escórias de alto forno, os materiais pozzolânicos e os materiais carbonáticos.

Segundo a ABCP (2002), o gesso é responsável por retardar o tempo de pega, ou seja, a perda da fluidez da pasta. Sem a presença do gesso, uma vez em contato com a água, o clínquer endureceria rapidamente, inviabilizando o uso adequado na construção. Sendo assim, é uma adição indispensável a qualquer tipo de cimento Portland, na proporção de aproximadamente 4% de gesso para 96% de clínquer em adições em massa.

As escórias de alto forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e possuem propriedades de um ligante hidráulico muito resistente. Na presença de água, a escória de alto forno reage adquirindo propriedades muito semelhantes às do clínquer, podendo ser misturada a este, em proporções adequadas, resultando na melhoria de algumas propriedades, como a resistência e a durabilidade, embora a velocidade da reação seja mais lenta.

Conforme descreve a ABCP (2002), os materiais pozzolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas e derivados da queima de carvão mineral. Os materiais pozzolânicos

também apresentam propriedades de ligante hidráulico na presença de água juntamente com o clínquer, o qual é responsável por liberar hidróxido de cálcio em sua hidratação que, por sua vez, reage com a pozolana formando C-S-H. A principal vantagem adquirida com esta adição é o aumento da impermeabilidade do cimento.

Os materiais carbonáticos, conhecidos como fíler calcário, quando presentes no cimento, são rochas moídas, constituídos de carbonato de cálcio, o qual é responsável por conferir maior trabalhabilidade aos concretos e argamassas.

2.1.5 Tipos de cimentos e suas aplicações

Em função de sua composição, da presença e da quantidade de aditivos, existem diferentes tipos de cimento, cada qual ideal para um fim específico, dependendo das características da construção e dos objetivos que se deseja atingir. Os principais tipos de cimento no mercado são:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland composto;
- cimento Portland de alto-forno;
- cimento Portland pozolânico.
- cimento Portland de alta resistência inicial.

Há, ainda, tipos de cimento utilizados em menor escala

- cimento Portland resistente aos sulfatos;
- cimento Portland branco;
- cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- cimento para poços petrolíferos.

2.1.5.1 Cimento Portland Comum

O Cimento Portland Comum (CP I) tem em sua composição teores entre 95% e 100% de clínquer e 0% a 5% de compostos secundários, que podem ter propriedades cimentantes ou fíler para melhorar a trabalhabilidade ou a retenção de água. Sua utilização é limitada apenas para construções simples que não exigem propriedades especiais do cimento, onde não haja água subterrânea ou presença de sulfatos. Devido à elevada quantidade de clínquer, há um alto gasto energético no seu processo de fabricação. O CP I é normalizado pela NBR 5732:1991 e possui duas especificações: CP I quando constituído apenas de clínquer e sulfato de cálcio, e CP I-S, que pode conter até 5% de pozolana, fíler calcário e escória de alto forno (NEVILLE, 2016).

2.1.5.2 Cimento Portland Composto

O Cimento Portland Composto, regido pela NBR 11.578, é caracterizado pela adição de compostos que reduzem o calor de hidratação no processo de fabricação. O CP II-E possui adição de escória, o que lhe confere um menor calor de hidratação. É recomendado para construções que exijam desprendimento de calor lento ou que possam sofrer ataques de sulfatos (LACERDA e MELO, 2016).

O CP II-Z contém adição de pozolana na proporção de 6 a 14% em massa, o que reduz a permeabilidade, sendo recomendado para obras marítimas, em indústria e em obras subterrâneas. É possível encontrar fíler calcário, na quantidade máxima de 10%, nesse tipo de cimento (LACERDA e MELO, 2016).

O CP II-F é acrescido de fíler carbonático, em cerca de 6 a 10% em massa. Sua utilização é recomendada para pisos e tijolos de solo-cimento (material obtido pela mistura de solo, cimento e água), preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, elementos pré-moldados, artefatos, pisos e pavimentos de concreto, dentre outros.

2.1.5.3 Cimento Portland de alto forno

Com a adição da escória granular de alto-forno, é conferida ao cimento menor permeabilidade, maior durabilidade e resistência à expansão devido à reação álcali-agregado (reação química entre constituintes mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos, resultando a formação de um gel expansivo), além de ser resistente a sulfatos. São mais adequados para obras de grande porte, em ambientes agressivos tais como barragens, fundações de máquinas, pilares, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos. O Cimento Portland de Alto Forno é regido pela NBR 5735.

2.1.5.4 Cimento Portland pozolânico

O cimento com adição de pozolana, regido pela NBR 5736, possui maior impermeabilidade, durabilidade e resistência à compressão. Devido ao seu endurecimento mais lento, é indicado para obras com grandes volumes de concreto ou ainda expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos; é usado sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

2.1.5.5 Cimento Portland de alta resistência inicial

Devido a uma dosagem específica de calcário e argila e a uma moagem mais fina, o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), regido pela NBR 5733, atinge altas resistências em um curto intervalo de tempo, sendo recomendado então para obras que exijam resistência inicial elevada e desforma rápida.

Na Tabela 2.3 é mostrada a composição dos diversos tipos de cimento Portland.

Tabela 2.3 - Composição dos cimentos Portland (ABCP, 2002)

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer+gesso	Escória de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I	100	1-5			NBR 5732
	CP I-S	99-95				
Composto	CP II-E	94-56	6-34	6-14	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76			0-10	
	CP II-F	94-90			6-10	
Alto-forno	CP III	65-25	35-70		0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	15-50		0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5			NBR 5733

2.2 ARGILA CALCINADA

2.2.1 Breve histórico

Segundo Lea (1970), por volta de 1909, era empregada uma mistura de cimento Portland com argila calcinada na Inglaterra, conhecida como “Cimento Vermelho de Potter” (“*Potter’s Red Cement*”), cujo uso era principalmente para obras expostas à ação da água. Na França, até aproximadamente o ano de 1915, pozolanas de argila calcinada também eram utilizadas em cimentos “não passíveis de decomposição”, produzido pela Companhia Lafarge. Foi somente a partir de 1923 que os cimentos Portland pozolânicos passaram a ter um papel importante como material de construção, quando, na Itália, começou a fabricação de cimentos elaborados com pozolanas naturais de origem vulcânica (PAPADAKIS e VENUAT, 1968).

No Brasil, as pozolanas de argilas calcinadas têm sido pouco estudadas até o presente momento, todavia houve uma importante contribuição de Souza Santos (1966) e de estudos realizados por técnicos e pesquisadores envolvidos com a construção de grandes barragens brasileiras que utilizaram esse material.

A presença de agregados potencialmente reativos com os álcalis do cimento na construção de barragem de Jupia (MS) foi um fator determinante para uma das primeiras utilizações de argilas calcinadas com fins pozolânicos no Brasil. Inicialmente a solução encontrada para minimizar a reação álcali-agregado foi a utilização de cimentos com baixo teor de álcalis, da ordem de 0,2%. Contudo, tornava-se cada vez mais difícil a obtenção de grandes quantidades desse tipo tão específico de cimento, além dos custos onerosos. Sendo assim, os estudos técnicos desenvolvidos entre as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A. (CELUSA) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) concluíram que a solução mais eficaz seria a fabricação de pozolanas a partir das argilas existentes nas proximidades da obra. Foi selecionada, então, uma argila caulinítica bastante plástica, com baixo conteúdo de areia (CASTRO SOBRINHO, 1970), localizada nas proximidades do Rio Paraná, cujos ensaios complementares confirmaram a qualidade da pozolana obtida a partir desse jazimento argiloso.

Andriolo (1975) descreve o processo de fabricação: inicialmente a argila é seca ao sol e armazenada em um depósito coberto. Em seguida, é feita a homogeneização do material e, com a ação dos gases quentes de exaustão do forno, ocorre a calcinação prévia a temperatura de 200°C. A próxima etapa consiste na queima em forno rotativo, operando a temperatura de 750°C; após a calcinação, o material é submetido a um resfriamento rápido para evitar a recristalização e manter a máxima reatividade da pozolana. Por fim, o processo é finalizado com a moagem da pozolana até uma finura otimizada de 8500 cm²/g.

Desde a primeira utilização em Jupia, as pozolanas de argilas calcinadas continuaram sendo utilizadas pelas indústrias cimenteiras brasileiras, devido aos benefícios proporcionados na construção da barragem.

2.2.2 Definição e características

A argila calcinada é um tipo de material ideal para substituir parte do clínquer que compõe o cimento Portland devido, principalmente, a sua disponibilidade em todo o mundo; somente nos Estados Unidos, o montante de argila caulinítica é estimado em cerca de 1 bilhão de toneladas (KENNEDY, 1990). O aproveitamento da argila caulinítica calcinada, conhecida como metacaulinita, como adição pozolânica moderna para argamassas e concreto tem-se popularizado nos últimos anos, embora seu uso como mistura pozolânica de cimento seja conhecido desde o tempo dos romanos. A principal propriedade de uma pozolana é a capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, liberado no processo de hidratação do cimento Portland, formando compostos estáveis com caráter aglomerante, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. (BARBOSA, 2009).

A adição de pozolanas em concretos traz consigo uma série de benefícios, tais como: a diminuição da permeabilidade pelo refinamento de poros, a menor liberação de calor, a redução da reação álcalis agregado, uma possível melhoria na resistência a cloretos, sulfato e água do mar, além de vantagens econômicas, uma vez que o consumo de clínquer é reduzido.

As argilas mais utilizadas para a produção de pozolana são as caulinitas, montmorilonitas e as ilitas (SOUZA SANTOS, 1992); dentre estas, a caulinita tem o maior potencial para atividade pozolânica, segundo estudos realizados por Sabir (2001). Quando submetida a procedimentos térmicos, com temperaturas entre 650 e 800°C, a argila caulinítica sofre alterações em suas propriedades físicas e químicas, e é somente a partir de processos térmicos que a argila passa a apresentar reatividade; por meio do fornecimento de energia na forma de calor, torna-se possível quebrar a estrutura cristalina da argila, tornando-a amorfa e quimicamente reativa, a qual reage prontamente com a cal, à temperatura ambiente (BARBOSA, 2009). Portanto, as argilas se tornam termicamente ativas por meio do aquecimento cujo o objetivo é remover as moléculas de água, em um processo denominado desidroxilação (MIELENZ, 1953), conforme a Figura 2.2.

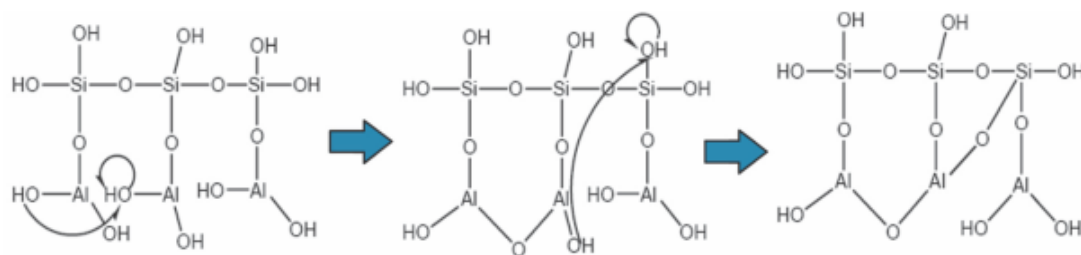


Figura 2.2: Processo de desidroxilação da caulinita (San Nicolas, 2011)

Entretanto, nem todas as argilas calcinadas apresentam comportamento pozolânico. Argilas compostas por grande quantidade de minerais muito cristalinos, como quartzo e feldspato, não produzem um material reativo com cal (MEHTA apud PINHEIRO, 2008). Como exemplo, tem-se a montmorilonita rica em cátions de sódio livres; caso isso ocorra, seu uso em concretos deve ser evitado, devido a possíveis reações álcali-agregado (RAA). Já as argilas ricas em vermiculita, clorita e mica não apresentam atividade pozolânica satisfatória, se calcinadas abaixo de 1100 °C. A possibilidade do uso da metacaulinita e dos resíduos de produção de tijolos cerâmicos queimados (argila calcinada) e finamente moídos, como constituintes do cimento Portland, substituindo parte do clínquer, foi estudada por Farias Filho et al. (2000). Os autores determinaram as características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais, bem como o índice de atividade pozolânica com cimento Portland. De acordo com Lea (1938) apud Farias Filho et al. (2000), a atividade pozolânica das argilas calcinadas está intimamente ligada com o teor Al_2O_3 : quanto maior o teor, maior será a atividade pozolânica.

As reações pozolânicas envolvendo argilas calcinadas e o hidróxido de cálcio são essencialmente reações de dissolução e formação de novas fases. Em meio altamente alcalino, típico das misturas contendo hidróxido de cálcio, os argilominerais ativados termicamente apresentam forte desequilíbrio químico, levando à dissolução do alumínio e do silício. Posteriormente, devido à grande disponibilidade de cálcio, tem-se a formação de aluminatos ($\text{C}_4\text{ACH}_{13}$ e carboaluminato), silicatos (gel de C-S-H) e alumino-silicatos de cálcio hidratados (C_2ASH_8 – gehlenita hidratada) (ZAMPIERI, 1989).

2.2.3 Influência da argila calcinada na durabilidade

O ataque por sulfato, um dos principais agentes maléficos à durabilidade de concretos, ocorre pela interação entre os íons sulfatos com as fases de hidratação do cimento Portland que contém alumina ou o próprio aluminato tricálcico não hidratado, produzindo estrigita secundária. Outra possibilidade é da interação dos íons agressivos com o hidróxido de cálcio produzindo gipsita (COSTA, 2005). Há, ainda, o ataque com formação de taumasita, a qual reduz a coesão do concreto em função do ataque ao C-S-H, que libera dióxido de silício necessário à formação do cristal, transformando-o em um material semelhante a uma massa, branca e pastosa, muito fraca (CZEREWKO et al., 2003).

O uso de argilas calcinadas é, em geral, favorável à durabilidade do concreto, o que está diretamente ligado à diminuição da porosidade devido à reação pozolânica. Segundo Ramlochan et al (2000), maiores adições de argila caulínica calcinada resultam em reduções de ataques por sulfatos, sendo que cimentos com porcentagem de 25% desse tipo de adição são classificados como cimentos altamente resistentes a sulfatos.

Skaropoulou et al (2013) relatou ainda que a argila calcinada conduz a uma maior resistência em concretos contra os efeitos causados pela formação da taumasita, quando comparada a cimentos contendo outros tipos de misturas.

Outro fator prejudicial à durabilidade de concretos é a reação álcali-agregado. Este problema, porém, pode ser reduzido com adição de argila calcinada (RENAUDIN, 2009). Em meados de 1982, baseado no exemplo da construção da barragem de Jupia nos anos 1960, no Brasil, Saad et al (1983) mostrou que substituições da ordem de 30% a 50% do cimento por argila calcinada poderiam evitar problemas de expansão devido à RAA. Segundo Chappex (2012), esse efeito ocorre devido à redução da dissolução de silicatos, bem como à redução de álcali na mistura.

2.3 FÍLER CALCÁRIO

2.3.1 Definição e características

A adição de fíler calcário aos cimentos Portland pode ser justificada pela redução do consumo energético e consequente redução do custo. O calcário é um material de fácil moagem e o gasto energético de produção do fíler é baixo; já o clínquer requer uma elevada quantidade de energia para sua produção, resultando em altos custos. Ainda existem controvérsias quanto aos benefícios da adição de fíler calcário ao cimento: muitos pesquisadores questionam os efeitos negativos que esta adição pode causar em algumas propriedades dos cimentos, argamassas e concretos, incluindo perda de resistência; em contrapartida, Campiteli (1990) cita que pesquisadores já provaram a reatividade da adição por meio da formação de carboaluminatos e sua contribuição física por meio dos efeitos gerados por sua granulometria.

O fíler calcário consiste em um pó fino proveniente da rocha calcário e foi considerado como um material inerte por muito tempo. De acordo com sua composição química, pode ser classificado em calcítico ou dolomítico. Em geral, apresenta superfície rugosa e estrutura porosa (FELEKOGLU, 2009). Segundo Modler et al. (2007), as adições inertes são adicionadas ao concreto para proporcionar melhor coesão e viscosidade no estado fresco, para refinamento dos poros da pasta de cimento hidratada e melhorar o desempenho quanto ao ataque de agentes agressivos.

Além das funções citadas, o fíler calcário contribui no processo de hidratação do cimento, pela ação da precipitação dos hidratos de aluminato de cálcio (C_3A) e da interação entre o silicato tricálcio (C_3S) e o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (PERA et al., 2003). Este efeito é denominado nucleação heterogênea, pois o fíler calcário age como agente de nucleação, acelerando a hidratação do cimento, o que resulta na cristalização desorientada do hidróxido de cálcio (IRASSAR, 2009).

2.4 LC³ - CIMENTO DE ARGILA CALCINADA E FÍLER CALCÁRIO (*Limestone Calcined Clay Cement*)

Os materiais suplementares do cimento tratados acima são agora comumente usados para reduzir a proporção de clínquer de cimentos, uma vez que a indústria do concreto tem um desafio: encontrar maneiras de viabilizar o uso do concreto e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais.

Mesmo o cimento sendo responsável por elevada emissão de gases poluentes, a sua ampla disponibilidade e seu baixo custo de fabricação o tornam o material mais utilizado na construção civil. Ainda que, quando comparado a outros materiais, o cimento seja um material eco-eficiente, os enormes volumes de concreto fazem com que a sua produção seja responsável por cerca de 5 a 8% das emissões de CO_2 provocadas pelo homem (SCRIVENER, 2014).

A disponibilidade de subprodutos industriais comumente utilizados como adição, tais como as cinzas volantes e as escórias de alto-forno, é localmente desequilibrada e as quantidades produzidas são muito inferiores à produção mundial de cimento. Tendo em vista a sua disponibilidade, sabe-se que as argilas calcinadas e o fíler calcário são excelentes opções de adições para o cimento.

O LC³ consiste em uma mistura de cimento Portland com argila calcinada e fíler calcário, podendo atingir resistências equivalentes ao cimento Portland comum, mesmo com proporções de clínquer chegando a apenas 40%; isto é possível porque o componente de alumínio presente na argila calcinada reage com o carbonato de cálcio do calcário e com o hidróxido de cálcio formando carboaluminato (SCRIVENER, 2014).

Este novo tipo de mistura, embora pouco estudada, assegura contribuir com a sustentabilidade ao reduzir emissões de gases poluentes, consumo de energia, custos de produção e desperdício de matéria-prima.

Esta inovação, denominada LC³, tem sido desenvolvida e estudada mais minuciosamente por meio de uma cooperação internacional entre a Universidade de Las Villas, em Cuba, e a Escola Politécnica Federal de Lausanne, na Suíça. O uso de fíler calcário e argila

calcinada, juntamente com proporções menores de clínquer, possibilita custos de produção inferiores àqueles referentes aos cimentos Portland comuns e pozolânicos. Criado pela Agência de Desenvolvimento e Cooperação da Suíça (*Swiss Agency for Development and Cooperation*), este projeto tem sido estudado e desenvolvido com o principal objetivo de inovar a indústria cimentícia com este novo tipo de cimento, apto a ser utilizado em diversas aplicações.

Pesquisas realizadas pelos Institutos Indianos de Tecnologia de Déli, Madras e Mumbai têm como foco desenvolver o LC³ para a indústria cimentícia da Índia. Para isso, estes estudos são focados na análise ecológica, na economia de energia, na redução de emissões, no uso em menor escala de matéria-prima, atendendo à trabalhabilidade da mistura e estudando a demanda de água, bem como as propriedades de resistência à compressão e à tração e durabilidade, o que envolve corrosão devido à carbonatação, ataques de sulfatos e reação álcali-agregado.

2.4.1 As substituições

As argilas calcinadas são materiais potencialmente disponíveis para reduzir o teor de clínquer em cimentos misturados. As argilas cauliníticas, por exemplo, estão amplamente disponíveis na crosta terrestre em ambientes tipicamente tropicais e subtropicais, onde a maior parte do aumento da procura de cimento está prevista para ocorrer, como é o caso do Brasil.

Argilas contendo entre 50% e 60% de caulinita podem ser usadas na composição do LC³, garantindo qualidade no produto final, segundo experimentos realizados na Índia. Essas argilas são encontradas em abundância no país, porém são inadequadas para outros tipos de aplicações, devido à presença de impurezas que limitam o seu uso; portanto, a demanda por esse tipo de argila para uso na indústria cimentícia não seria prejudicada por outros ramos industriais (BISHNOI, 2012).

A calcinação da argila ocorre a temperaturas entre 700°C e 800°C, valor significativamente inferior à temperatura de 1450°C necessária na produção do clínquer, e tem a função de remover os grupos hidroxila, conferindo-lhe reatividade (SCRIVENER, 2014). A calcinação tem grande vantagem ambiental de não emitir CO₂ e pode ser realizada com

equipamentos já existentes, como fornos rotativos, não sendo necessária, desta forma, a construção de novas estruturas.

Já o calcário está sempre disponível em fábricas de cimento. De acordo com Scrivener (2014), as misturas LC³ admitem pedras calcárias cuja qualidade é inadequada para a produção de clínquer, ou seja, não haverá concorrências entre os usos de materiais.

A adição de cargas de calcário ao clínquer é cada vez mais comum pois reduz a pegada ecológica do cimento. A pedra calcária, em vez de ser inerte, participa da reação de hidratação. A adição de calcário ao clínquer ou a cimentos Portland estabiliza o hidrato de monocarboaluminato de cálcio, C_4ACH_{11} e a etringita, $C_6AS_3H_{32}$, enquanto o monossulfato, $C_4AS_3H_{12}$, é desestabilizado. Além disso, a etringita pode incorporar até 9% de carbonato a 25°C, o que aumentaria ainda mais as propriedades de preenchimento do espaço dos sólidos uma vez que o calcário estabiliza a etringita (DAMINOT, 2011).

Segundo Antoni (2012), o calcário reage com a alumina na presença de hidróxido de cálcio. Esta reação é reforçada pela presença de alumina extra encontrada na argila calcinada, então carboalumi-hidratos são formados e preenchem o espaço poroso, o que faz aumentar a resistência de toda a argamassa. Isso porque o monocarboaluminato de cálcio e o hemicarboaluminato são formados ao invés do monossulfoaluminato, que libera mais sulfato para formar etringita.

Outro efeito da substituição de uma fração do cimento por calcário finamente moído é a aceleração da reação de hidratação como mostrado pela calorimetria. A pedra calcária finamente moída acelera a hidratação do cimento, pois fornece superfície adicional para a nucleação e o crescimento de produtos de hidratação (LOTHENBACH, 2008).

Ainda de acordo com Antoni (2012), pode-se observar que as reações de metacaulim e calcário consomem hidróxido de cálcio, o qual pode estar completamente ausente em misturas com altos níveis de substituição em idades tardias. O metacaulim parece reagir mais rapidamente no sistema com calcário do que na mistura de apenas cimento Portland e metacaulim. Além disso, o fíler calcário reage mais rapidamente no sistema com metacaulim

do que na mistura binária de cimento Portland e calcário. Estes resultados apontam para fortes efeitos sinérgicos com substituições acopladas deste tipo.

2.5.2 Proporções já estudadas

Diversas proporções já foram estudadas ao longo dos anos para o cimento LC³. O presente estudo partirá de certas proporções já estudadas e ainda verificará novas proporções ainda não investigadas. Algumas recomendações e proporções foram pesquisadas para que se inicie o trabalho.

Segundo Daminot (2011), a presença de pequenas quantidades de calcário (até cerca de 5%) aumenta o volume total de sólidos hidratados e assim diminui a porosidade total, aumentando a resistência à compressão. Em contrapartida, o fíler calcário em excesso satura os sólidos e dilui os outros hidratos, reduzindo, assim, o seu volume total. Mais Al_2O_3 deve, portanto, resultar em mais etringita na presença de calcário, aumentando o volume total e diminuindo a porosidade residual em comparação com o cimento Portland.

Sobre a substituição apenas de argila calcinada, só é recomendável na proporção de até cerca de 30%, já que o custo de calcinação normalmente não faz desta uma opção economicamente viável. A solução seria fazer uma substituição acoplada de argila calcinada com fíler calcário; um adicional de 15% ou mais de clínquer pode ser substituído por fíler calcário sem redução no desempenho mecânico, de modo que a economia adicional de clínquer pode compensar o custo de calcinação (SCRIVENER, 2014).

A mistura de LC³ contendo cerca de 45% de substituição com argila calcinada e fíler calcário na proporção 2:1 culminou em uma resistência aos 28 dias de idade similar à de uma mistura com CP comum, utilizando o mesmo clínquer, segundo estudos realizados. A resistência inicial do LC³, entretanto, entre 1 e 7 dias, mostrou-se ligeiramente menor que a do CP comum e superior a do cimento pozolânico. Sabe-se, no entanto, que, quanto maior a taxa de substituição, mais forte é a diminuição relativa no conteúdo de C-S-H (ANTONI, 2013).

O presente estudo então partirá da proporção fixa de 55% de clínquer e 45% de substituição. Artigos como SANCHEZ BERRIEL et al (2016), ANTONI (2013) e

SCRIVENER (2014) utilizaram essa proporção para experimentos com LC³. Nos 45% de substituição ainda determinaram 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário como a proporção que oferece melhores resultados.

No estudo realizado por Antoni (2013), em sua tese de doutorado “*Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone*”, um dos objetivos era avaliar o desempenho obtido por diferentes proporções de substituições de argila calcinada e fíler calcário, comparando os resultados obtidos de resistência à compressão do LC³ com o cimento Portland comum. As proporções utilizadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Proporções de argila calcinada, fíler calcário e clínquer utilizadas no estudo de Antoni (ANTONI, 2013).

	OPC	MK-B15	MK-30	MK-B45	LS15	MK-B60
Clínquer (%)	100	85	70	55	85	40
Argila calcinada (%)	0	10	30	30	0	45
Fíler calcário (%)	0	5	0	15	15	15

Foram ensaiadas amostras com substituições variando entre 15 e 60% do total da mistura, além do cimento Portland comum (OPC – *Ordinary Portland Cement*) puro. Destas, a mistura denominada MK-B45 representa um dos traços estudados neste trabalho: 45% de substituição, na proporção 2 de argila para 1 de fíler. Os valores das resistências à compressão para as misturas da Tabela 2.4 são apresentados na Figura 2.3 e as resistências relativas ao CP comum são dadas na Figura 2.4.

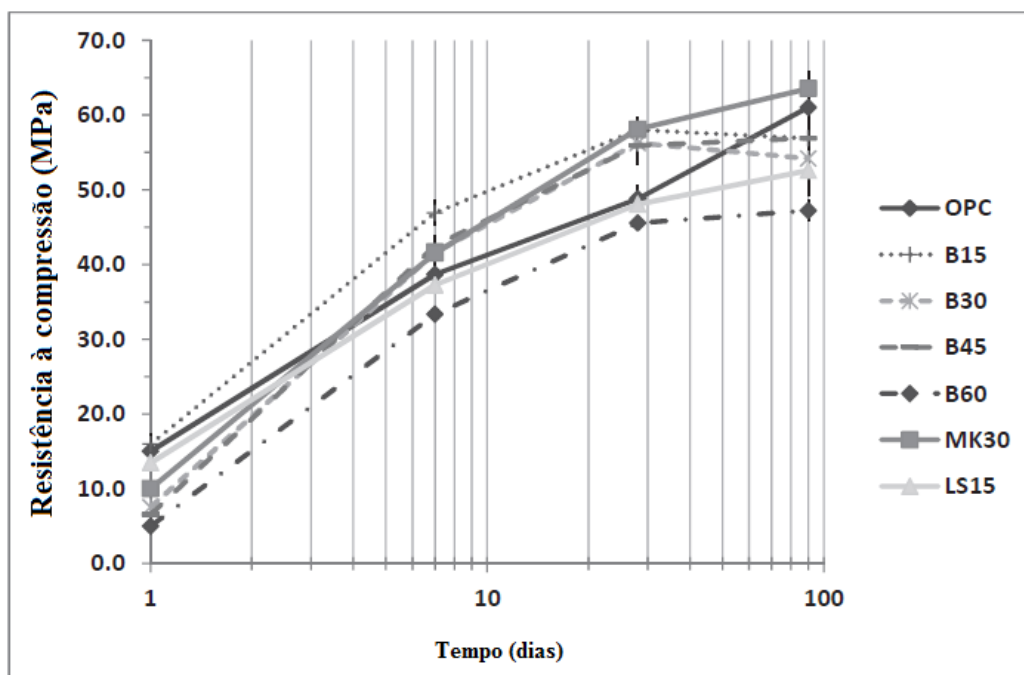


Figura 2.3 - Resistência à compressão de misturas para 1, 7, 28 e 90 dias (ANTONI, 2013).

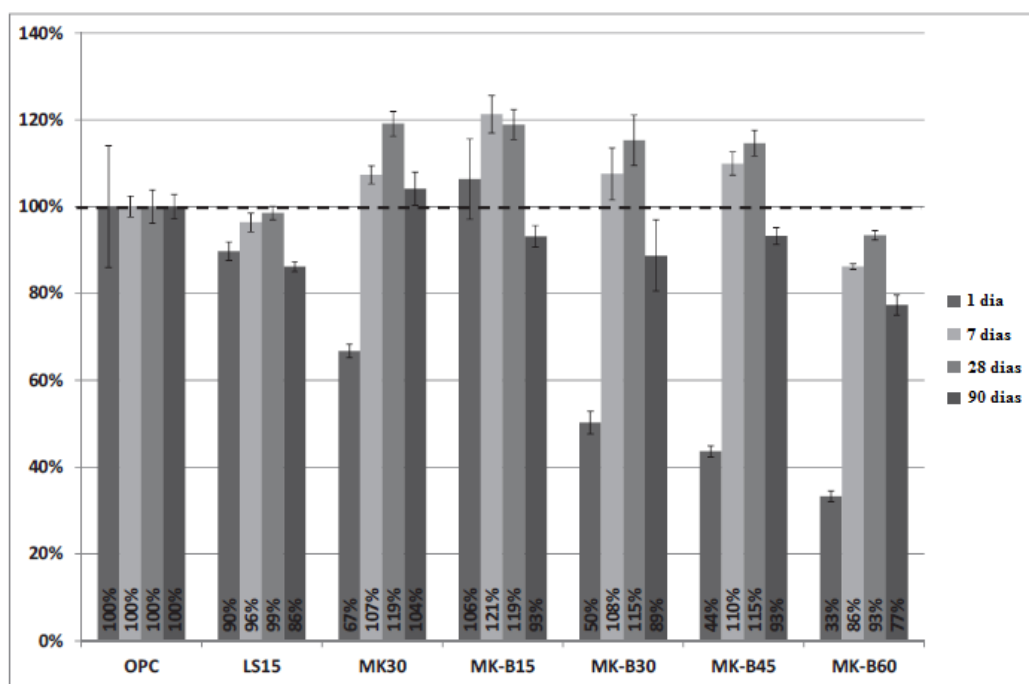


Figura 2.4 – Resistências à compressão relativas ao cimento Portland comum para 1, 7, 28 e 90 dias (ANTONI, 2013)

As misturas com substituições de argila e fíler calcário nas proporções de 15, 30 e 45% (MK-B15, MK-B30 e MK-B45) apresentam resultados positivos, com resistências aos 7 e 28 dias superiores à referência. Apesar da mistura MK-B15, com 85% de clínquer, 10% de argila e 5% de fíler, apresentar os maiores índices de desempenho, vale ressaltar que possivelmente ela não seja a melhor opção, pois este melhor desempenho pode não compensar os custos com o clínquer. Já a mistura MK-B45, com 45% de substituição, sendo 30% de argila e 15% de fíler, proporção estudada no presente trabalho, atinge índices satisfatórios de desempenho e a redução de custos proveniente do menor teor de clínquer a torna ainda mais vantajosa.

Como explicitado nos objetivos do trabalho, estudaremos novas proporções entre as adições de argila calcinada e fíler calcário para então comparar com resultados já existentes e corroborar com as conclusões obtidas por autores internacionais. As proporções testadas serão 1:2, 2:1, 3:1 e 1:1, sendo argila e fíler respectivamente.

2.5.3 Desempenho do cimento LC³

Como já mencionado, espera-se que o LC³ seja menos poroso que o cimento Portland comum e possua maior durabilidade contra corrosão, ataques de sulfatos e outras deteriorações físicas, tornando-o ideal para ambientes agressivos (ANTONI, 2013). A Figura 2.5 mostra a porosidade obtida nas misturas de LC³ em comparação ao cimento Portland comum. Observa-se que, para raios maiores que 0,005 μm , a porosidade acumulada do cimento com substituições (LC³) é sempre inferior àquela do CP comum, segundo as curvas apresentadas.

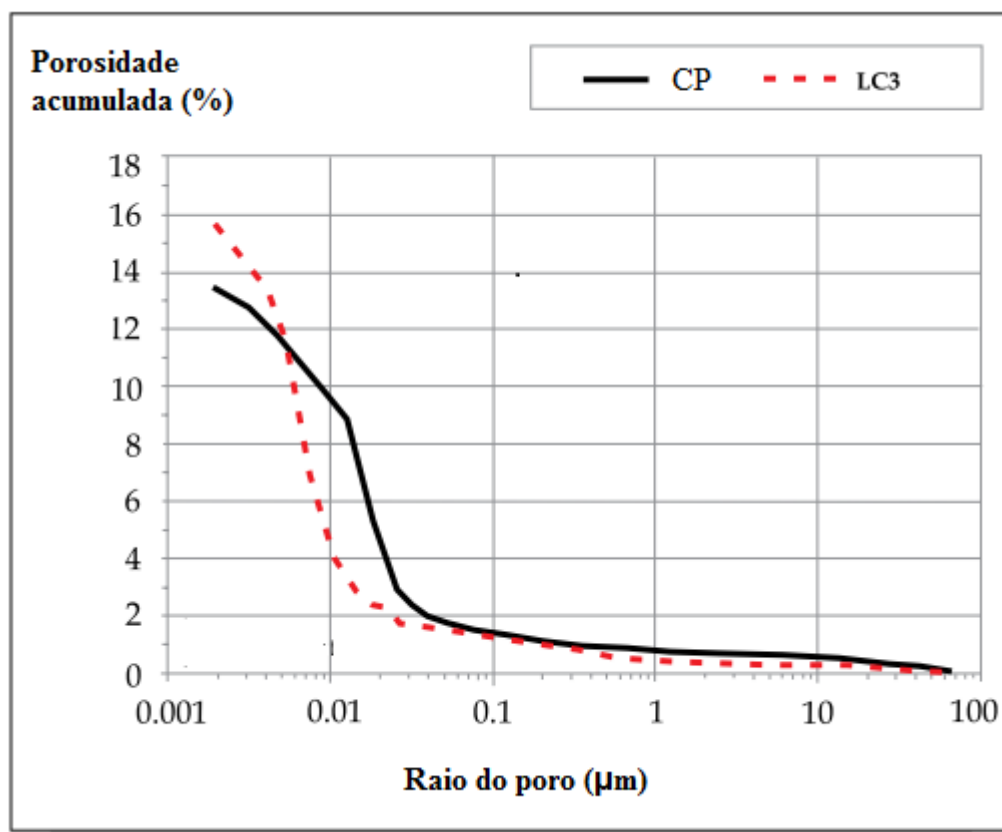


Figura 2.5 - Resultados de porosidade para LC³ e cimento Portland comum (OPC- *Ordinary Portland Cement*) (Scrivener, 2014).

O LC³ significa um grande avanço para solucionar dois grandes problemas enfrentados pela fabricação de materiais de construção civil atualmente: elevadas emissões de CO₂ e uso em grande escala de matéria-prima. Tais vantagens decorrem dos fatores já citados acima – a calcinação da argila se dá em temperaturas muito inferiores às temperaturas de produção do clínquer, reduzindo as emissões de gases poluentes, e as substituições utilizadas para compor o cimento são encontradas em abundância, pois, entre outros fatores, não requerem uma qualidade elevada. Estudos realizados por Scrivener (2014) mostraram uma estimativa do impacto referente à redução das emissões de CO₂ pelo uso de substituições de parte do clínquer em contraste com as reduções advindas de uma maior eficiência energética, usos de combustíveis e captura e armazenamento de carbono (Figura 2.6), sendo possível determinar o

benefício gerado ao longo dos anos. O gráfico mostra que as substituições do clínquer são a alternativa mais eficaz e mais viável atualmente, uma vez que a prática de captura e armazenamento de carbono, que também representa uma promessa para contribuir com reduções significativas das emissões provenientes de combustíveis fósseis, ainda requer estudos mais aprofundados e custos maiores.

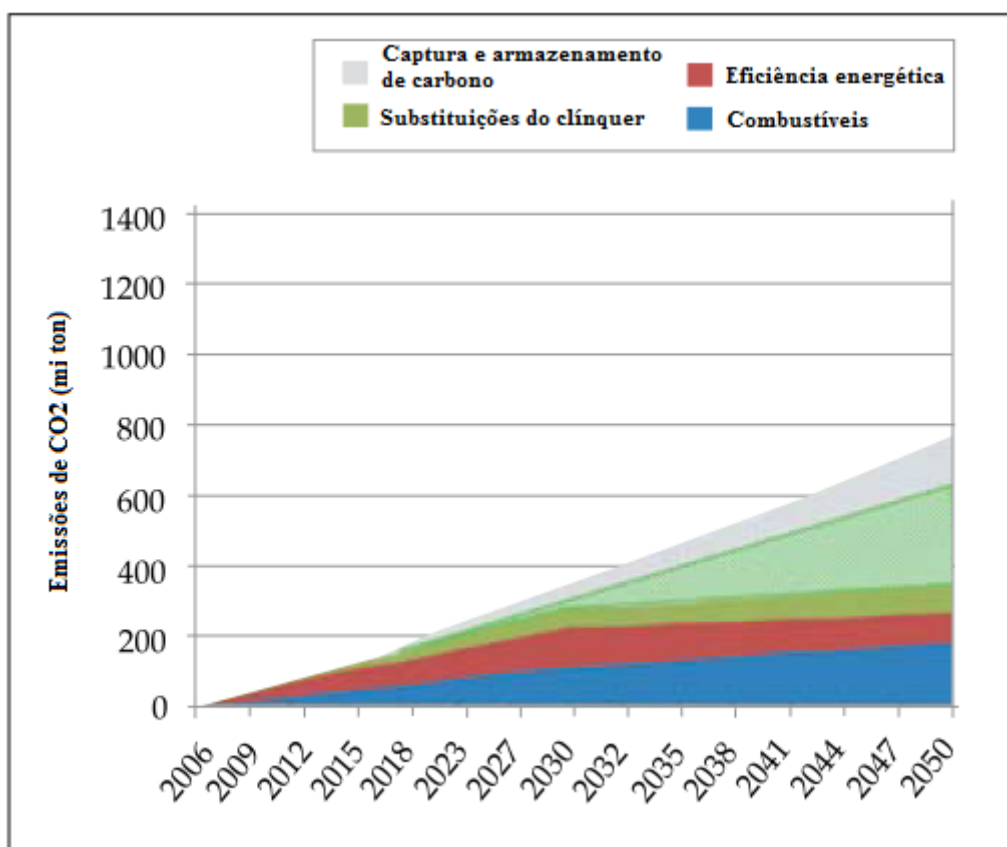


Figura 2.6 - Estimativa da redução de CO₂ pela substituição do clínquer por argila calcinada e filer calcário (Scrivener, 2014)

Outros estudos sobre misturas de clínquer, argila calcinada e filer calcário têm sido realizados, utilizando argila de diversos países, incluindo Brasil, Cuba, Índia e Tailândia. A Figura 2.7 mostra as resistências obtidas com o uso de argilas provenientes dos quatro países listados. Analisando os gráficos, é possível concluir que, para idades superiores a 7 dias,

misturas de LC³ compostas por argilas contendo ao menos 51% de caulinita apresentam resistências à compressão superiores às obtidas para o cimento Portland comum.

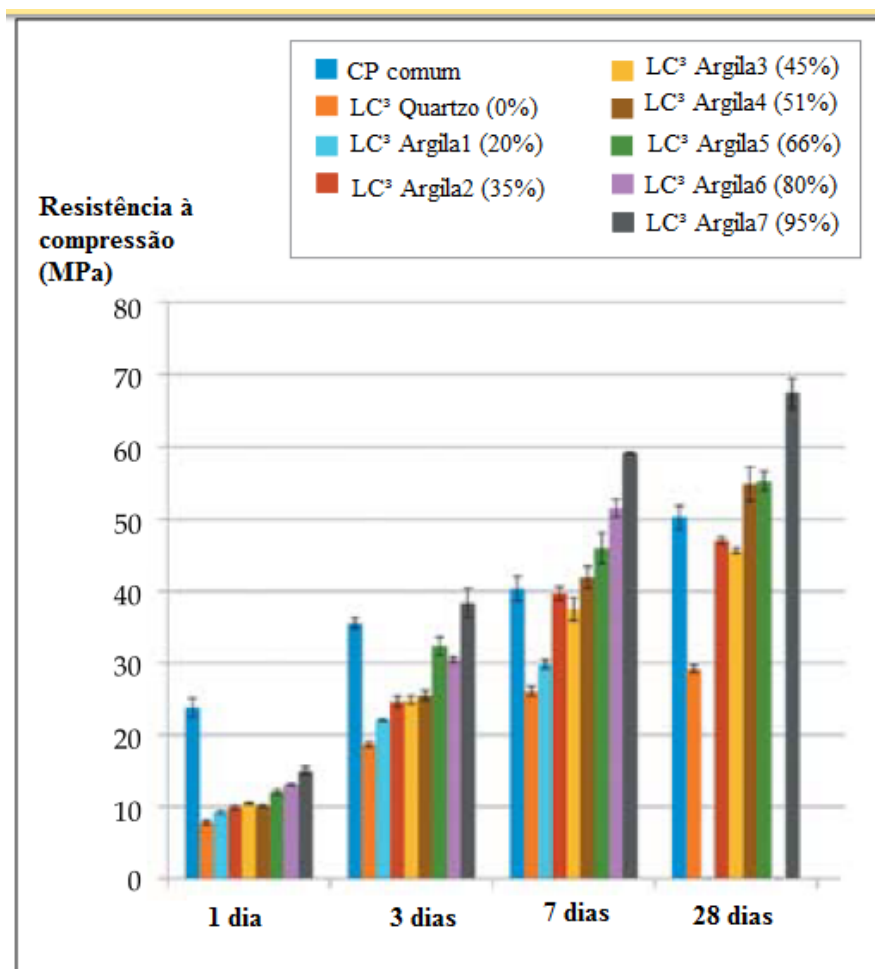


Figura 2.7 - Resistências desenvolvidas em misturas contendo 50% de clínquer, 5% de gipsita, 15% de filer calcário e 30% de argila calcinada proveniente de diversos países (Scrivener, 2014).

O estudo reforçou, ainda, que a presença da caulinita é de fundamental importância para a obtenção da resistência à compressão, conforme a Figura 2.8. Para todas as idades, quanto maior o teor de caulinita presente na argila, maior é a resistência equivalente.

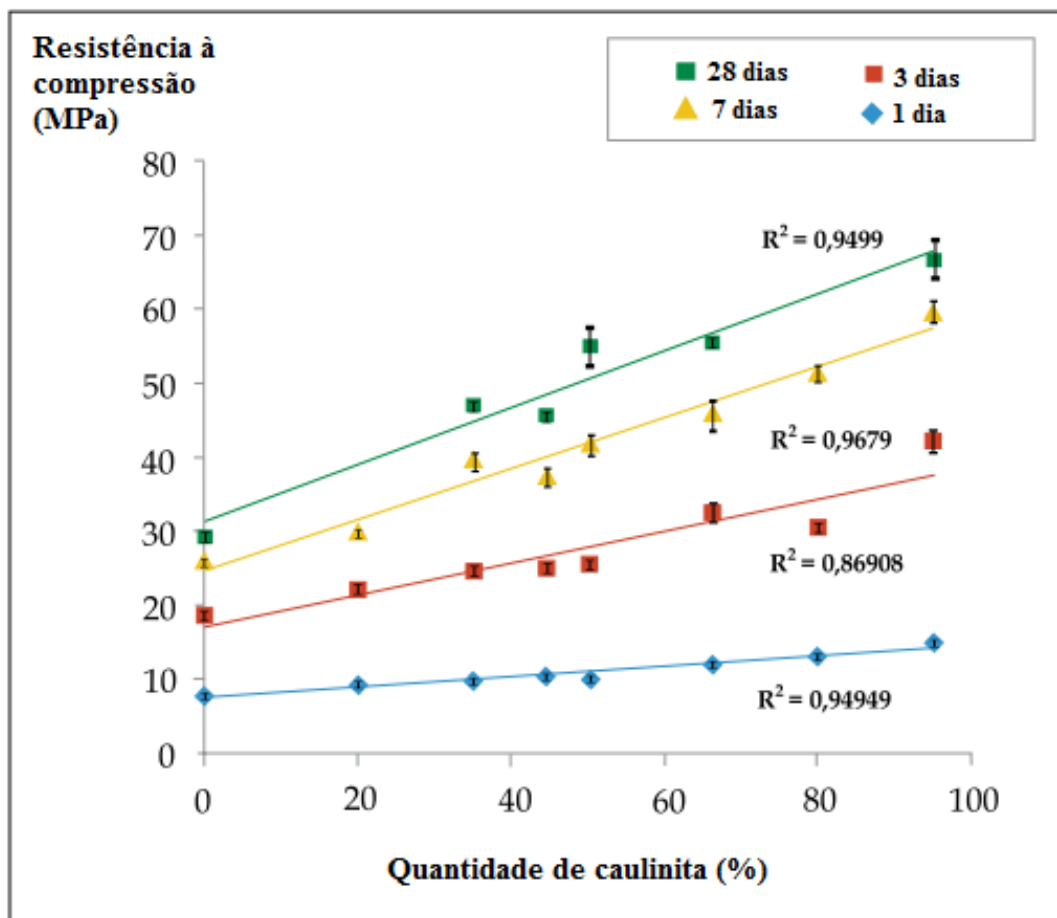


Figura 2.8 - Relação entre a caulinita presente na argila e a resistência à compressão (Scrivener, 2014)

É de suma importância controlar a finura da argila, uma vez que essa propriedade pode aumentar a demanda por água no cimento. Por outro lado, a presença do fíler calcário reduz a quantidade de água necessária na mistura.

Das vantagens mais importantes intrínsecas ao cimento LC³, pode-se dizer que sua fabricação e seu uso não precisam de grandes mudanças nas tecnologias hoje conhecidas e amplamente difundidas, por isso é possível usar equipamentos já existentes em fábricas de cimento; a química do LC³ não difere da química do cimento atualmente usado em todo o

mundo. Além disso, vale destacar que o LC³ é mais barato que o cimento convencional porque os materiais usados são menos demandados pelas indústrias.

De acordo com Scrivener (2014), outro aspecto importante a ser abordado é a durabilidade do cimento LC³, afinal é necessário que o novo cimento tenha um bom desempenho ao longo da sua vida útil. Como sua composição não difere drasticamente do cimento Portland, espera-se que a sua durabilidade seja semelhante ou ainda maior. A porosidade do LC³ é extremamente satisfatória, o que beneficia ainda mais um aumento da vida útil desse material.

Nota-se que este cimento tem o potencial de proporcionar uma solução em larga escala para os desafios principais da produção de materiais de construção nos dias atuais. Ele permite que países em desenvolvimento satisfaçam à crescente demanda, reduzindo as emissões de CO₂ de suas atividades, sendo, portanto, uma opção ambiental e econômica muito promissora.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta etapa são apresentados os materiais utilizados, sua obtenção, coleta e estocagem. Além disso, serão tratadas as composições das misturas feitas e a avaliação das suas propriedades.

As propriedades analisadas têm por objetivo principal a avaliação do índice de desempenho das proporções de adições do cimento LC³, proporções essas que variam entre a quantidade de fíler calcário e argila calcinada, dentro da porcentagem de 45% de substituição.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os experimentos realizados foram feitos em argamassas composta por: cimento Portland CP I, fíler calcário, argila calcinada, areia normal brasileira e água.

Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização nas adições minerais e no cimento Portland CP I, de acordo com a Figura 3.1 abaixo:

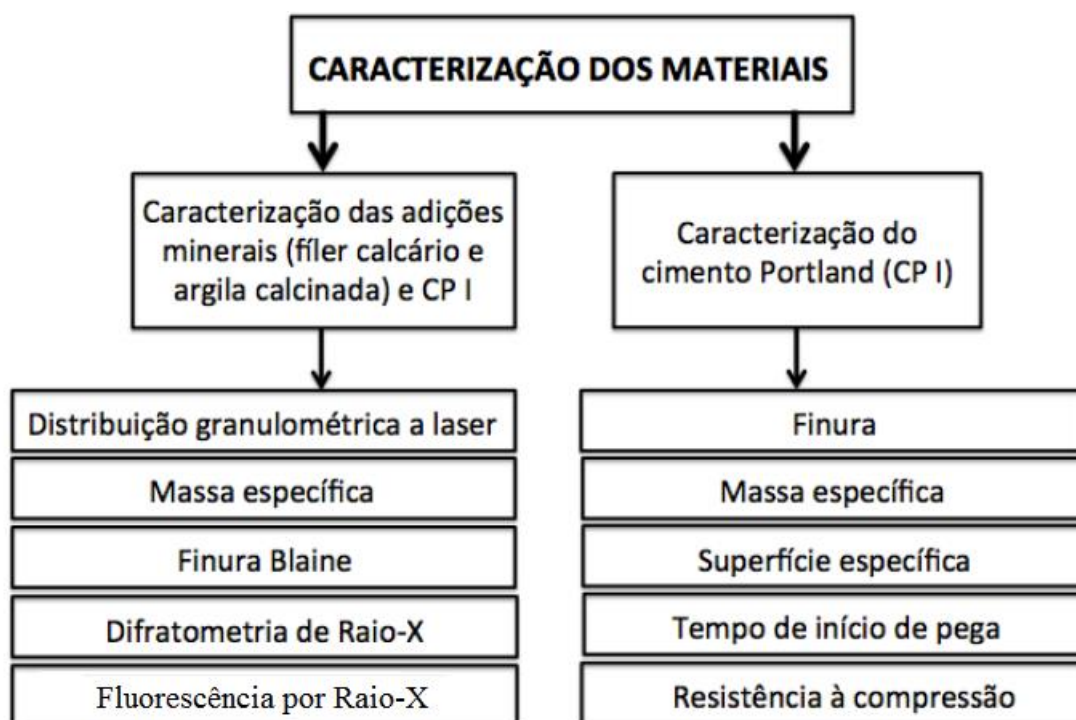


Figura 3.1 – Organograma dos ensaios de caracterização

3.1.1 Adições minerais

Conforme mencionado anteriormente, as adições minerais utilizadas foram fíler calcário e argila calcinada. Esses componentes são usados para substituir uma parte da massa de cimento Portland.

Tanto o fíler calcário quanto a argila calcinada foram obtidos por meio de doação de uma cimenteira do Distrito Federal. Ambos foram acondicionados em sacos plásticos lacrados e protegidos de qualquer umidade e armazenados em uma central dosadora de concreto do DF.

Essas adições estão presentes na produção de cimentos convencionais e, por essa razão, optou-se por utilizar os materiais com os mesmos padrões de moagem já utilizados na indústria cimenteira, com o objetivo de analisar materiais já conhecidos e amplamente utilizados nos dias de hoje.

3.1.2 Cimento Portland

Na composição da argamassa foi usado o cimento CP I e, já que o trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de um cimento com maior teor de adição, optou-se por utilizar um cimento livre de qualquer adição mineral pré-existente em sua composição.

Assim pode-se avaliar a ação do fíler calcário e da argila calcinada no desempenho da argamassa produzida de maneira isolada e com maior precisão.

3.1.3 Agregado miúdo (areia)

A areia utilizada na produção das argamassas foi a areia normal brasileira, a fim de que os ensaios estejam de acordo com as especificações da NBR 7214 (2015), que trata da especificação de requisitos para areia normal destinada à execução do ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento Portland.

Produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a areia normal brasileira é um material referência utilizado pelos laboratórios do Brasil que realizam ensaios de resistência em cimento Portland.

3.1.4 Aditivo superplastificante

Respeitando as propriedades estabelecidas na NBR 11768 (2011), o aditivo químico superplastificante Tecflow 50N, com teor máximo de 1,2%, foi utilizado nas argamassas produzidas. Esse aditivo é um produto que aumenta o índice de consistência da argamassa, mantendo fixa a quantidade de água do amassamento.

O uso desse aditivo se torna dispensável quando a consistência obtida nas argamassas é maior ou igual à consistência da argamassa de referência.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES

Obtidas as adições, procedeu-se com a caracterização de cada uma delas conforme diversos ensaios descritos a seguir.

3.2.1 Distribuição granulométrica a laser

Baseada na norma ISO 13320 (2009), esse ensaio tem por objetivo determinar a distribuição do tamanho das partículas por meio da análise das propriedades de dispersão de luz. Essa norma se aplica para partículas com tamanho entre 0,1 nm e 3 mm.

Com o equipamento que produz um feixe de laser, pode-se analisar as distribuições granulométricas de cada uma das adições, medindo a variação angular da intensidade de luz quando esta interage com as partículas do material. Foi utilizado o equipamento mostrado na Figura 3.2 de um laboratório local de Brasília/DF.



Figura 3.2 – Aparelho utilizado no ensaio de granulometria a laser.

A técnica de análise de tamanho de partículas por difração de laser é um método no qual as partículas são dispersas em um fluido em movimento, gerando descontinuidades no fluxo do fluido, as quais são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho da partícula. O princípio do método é que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. A luz incidente, ao encontrar-se com as partículas, forma um invólucro tridimensional, cujo tamanho e formato dependem do índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, do comprimento de onda da luz e do tamanho e formato da partícula. Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores, por sua vez, é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula com o auxílio de softwares matemáticos.

3.2.2 Massa específica

Este ensaio foi realizado em um laboratório local de Brasília/DF e foi utilizado na execução do ensaio Blaine, seguindo as prescrições da NM 23. Para se calcular a massa específica de cada adição, determina-se o volume ocupado por uma quantidade de material a partir de um pentapicnômetro.

3.2.3 Blaine

Para se determinar a finura, utiliza-se o método de permeabilidade ao ar (Blaine), o qual é guiado pela norma NBR NM 76 (1998). Sua finura é medida em função do tempo em que um certo volume de ar leva para atravessar uma camada compactada do material ensaiado, utilizando um equipamento denominado permeabilímetro (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Permeabilímetro de Blaine.

O valor da finura é obtido por meio da comparação entre o tempo que o ar leva para passar em uma amostra de valor de porosidade conhecida e o tempo medido no ensaio realizado nas adições.

A determinação da superfície específica é utilizada principalmente para verificar a uniformidade do processo de moagem de uma fábrica e é dada pela Equação 3.1:

$$S = \frac{K}{\rho} x \frac{\sqrt{\varepsilon^3}}{(1-\varepsilon)} x \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

K é a constante do aparelho;

ε é a porosidade da camada;

t é o tempo medido, em segundos;

ρ é a massa específica do cimento, em gramas por centímetro cúbico;

η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio, em pascal por segundo.

Este ensaio foi realizado com o auxílio do permeabilímetro, em um laboratório local de Brasília/DF.

3.2.4 Difratometria de Raio-X

Usada para caracterizar a microestrutura de um material cristalino, a difratometria de Raio-X foi realizada para as adições de argila calcinada e fíler calcário no Instituto de Geociências da UnB.

Esse ensaio é realizado por um difratômetro de Raio-X (Figura 3.4) e é baseado na difração dos Raios-X, ou seja, quando os fótons colidem com os elétrons do material, sua trajetória se modifica. Então, a partir do espalhamento dos raios, pode-se entender melhor a disposição dos materiais na estrutura cristalina.

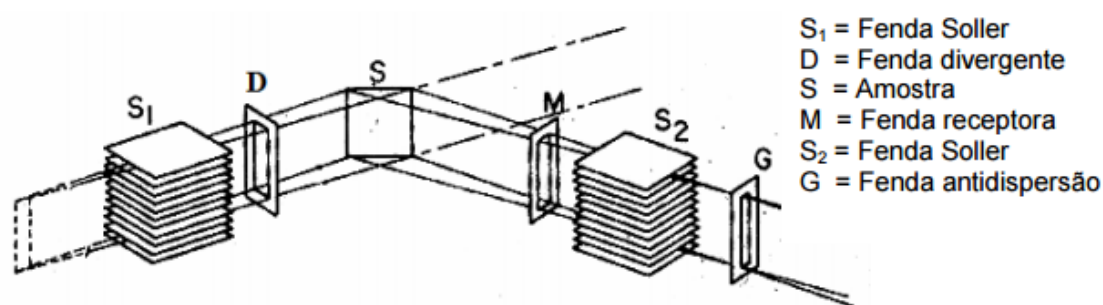


Figura 3.4 – Arranjo óptico de um difratômetro de Raio-X (FORMOSO, 1984).

A partir do tubo, os Raios-X atravessam primeiramente a fenda Soller (S1), que controla a divergência axial da radiação; em seguida atravessa a fenda de divergência (D), que age na divergência lateral da radiação e, juntamente com a utilização de uma máscara, define a área da superfície da amostra que será irradiada. Posteriormente, os Raios-X irradiam a superfície da amostra (S). Os raios difratados em determinado ângulo convergem para a fenda receptora (M), que capta a radiação proveniente unicamente da área irradiada da amostra, e seguem para a fenda Soller (S2). Antes ou depois da fenda Soller, pode ser colocada uma fenda de

antidispersão (G), que exclui toda a radiação de fundo não proveniente da amostra, porém o mais usual consiste em substituir a fenda de antidispersão por um monocromador (FORMOSO, 1984). Os difratogramas gerados foram analisados e os minerais identificados.

3.2.5 Fluorescência por Raio-X

Utilizando radiações eletromagnéticas, pode-se induzir transições eletrônicas entre orbitais, as quais possibilitam identificar a espécie atômica que provocou essa transição.

A espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) corresponde a uma técnica analítica multielementar para determinação de composição química de diversos materiais (DUTRA E GOMES, 1984). Como este processo envolve níveis de energia que são característicos de cada elemento, a radiação emitida para cada transição é também característica. Desta forma, a energia da radiação emitida pode ser diretamente utilizada na identificação do elemento em questão. Por outro lado, como a intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à concentração da espécie, a técnica também fornece informações que podem ser utilizadas para fins quantitativos (NAGATA et al., 2001).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Química da UnB, utilizando o equipamento EDX-720 Shimadzu, representado na Figura 3.5.

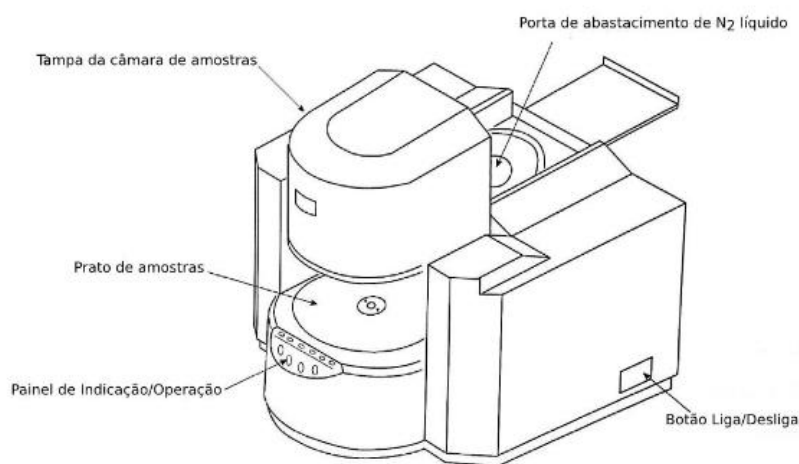


Figura 3.5 – Representação esquemática do EDX-720 Shimadzu.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Baseando-se na norma NBR 5732, a qual tem por objetivo fixar as condições exigíveis no recebimento dos cimentos Portland comuns, o cimento CP I utilizado também passou por algumas avaliações conforme os ensaios a seguir.

Foram analisadas as exigências físicas e mecânicas contidas da norma, as quais podem ser resumidas na Tabela 3.1, retirada da NBR 5732 (1991).

Tabela 3.1 – Exigências físicas e mecânicas (Fonte: adaptado de NBR 5732/1991)

Características e Propriedades		Unidades	Limites de Classe		
			25	32	40
Finura	Resíduo na peneira $75\mu m$	%	≤ 12		≤ 10
	Área específica	m ² /kg	≥ 240	≥ 260	≥ 280
Tempo de início de pega		h	≥ 1		
Tempo de expansibilidade a quente		mm	≤ 5		
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 8	≥ 10	≥ 15
	7 dias de idade	MPa	≥ 15	≥ 20	≥ 25
	28 dias de idade	MPa	≥ 25	≥ 32	≥ 40

3.3.1 Determinação da finura do cimento

A propriedade de finura do cimento utilizado foi determinada de acordo com o ensaio guiado pela norma NBR 11579 (1991). O objetivo é determinar, em massa, a porcentagem de cimento cuja dimensão dos grãos é superior a $75\mu m$ (peneira nº 200). A Figura 3.6 mostra o peneiramento realizado durante o ensaio.

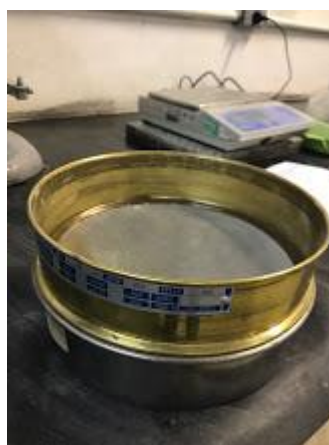


Figura 3.6 – Peneiramento do cimento na peneira 200.

O índice de finura do cimento é calculado pela expressão:

$$F = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

F é o índice de finura do cimento, em porcentagem;

R é o resíduo do cimento na peneira 75 μm , em g;

M é a massa inicial do cimento, em g;

C é o fator de correção da peneira utilizada no ensaio, determinado de acordo com o disposto na EB-22, devendo estar compreendido no intervalo de $1,00 \pm 0,20$; neste caso, foi adotado $C=1$.

3.3.2 Massa específica do cimento

Determinada com o auxílio do frasco de Le Chatelier, a massa específica do cimento corresponde à massa de uma unidade de volume do material. O ensaio para determinar essa propriedade segue a NM 23 (2001).

Sabe-se o volume inicial de fluido colocado dentro do frasco de Le Chatelier (V1). Dentro dele coloca-se uma certa massa conhecida de cimento Portland (m) e realiza-se a

mistura. Ao final determina-se o volume total (V2) e então pode-se calcular a massa específica do material.

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (\text{Equação 3.3})$$

A Figura 3.7 mostra as duas amostras contidas no frasco de Le Chatelier, as quais terão suas respectivas massas específicas determinadas e, como resultado final, faz-se a média desses dois valores.



Figura 3.7 – Frascos com amostras para determinação da massa específica do cimento.

3.3.3 Superfície específica do cimento

De acordo com a NBR NM 76, o ensaio para determinar a superfície específica do cimento foi o Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine). Sabe-se que o tamanho dos poros na camada de cimento tem correlação com o tamanho das partículas de cimento.

Então, em condições normatizadas, a superfície específica do cimento é proporcional ao tempo em que uma quantidade de ar leva para atravessar a camada compactada de cimento. Os procedimentos para a realização deste ensaio são os mesmos para as adições no item 3.2.3.

3.3.4 Tempo de início de pega

Utilizando o aparelho de Vicat e tendo como base a NBR NM 65 (2002), determina-se o tempo de pega da pasta de cimento Portland. Essa propriedade é de suma importância pois indica a partir de quando o cimento começa a perder sua trabalhabilidade.

O conceito de início de pega é quando a agulha de Vicat penetra na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa da base e consiste no tempo transcorrido desde a adição de água até isso ocorrer.

O tempo de início de pega é determinado por interpolação dos resultados de todas as penetrações, sendo o tempo em que a distância entre a agulha e a placa base seja de (4 ± 1) mm.



Figura 3.8 – Aparelho de Vicat no ensaio de tempo de início de pega

3.3.5 Resistência à compressão

Parâmetro de grande importância, a resistência à compressão do cimento Portland é determinada em ensaio normatizado pela NBR 7215 (1996). Desde a preparação dos corpos de prova até o procedimento de ruptura, todos os procedimentos para determinação da resistência à compressão do cimento estão descritos no próximo item, sendo representados pela argamassa de referência.

3.4 FABRICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.4.1 Composição das argamassas

Partindo de experiências anteriores, as argamassas fabricadas consistiram na proporção de 55% de clínquer e 45% de substituição. Foram feitas misturas ternárias, com a seguinte composição: CP I, fíler calcário e argila calcinada.

Para analisar a capacidade de substituição ao cimento Portland, o desempenho das adições será avaliado a partir das diferentes proporções, conforme apresentado na Tabela 3.2 abaixo:

Tabela 3.2 – Proporções das adições ao cimento Portland

TRAÇO	Argila Calcinada (A)	Fíler Calcário (F)
REF.	0	0
T1	1	2
T2	1	1
T3	2	1
T4	3	1

A quantidade de materiais, em massa (g), descrita na NBR 7215 (1996) é: $624 \pm 0,4$ de cimento Portland; $300 \pm 0,2$ de água e $468 \pm 0,3$ de cada fração de areia normal (grossa, média grossa, média fina e fina). Como o objetivo do trabalho é analisar as substituições, a quantidade de cimento CP I foi reduzida, exceto para a argamassa de referência cuja composição está evidenciada abaixo na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Quantidades de materiais utilizados nas argamassas de referência (Adaptado de NBR 7215/1996).

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624
Água	300
Areia Normal (Fração grossa)	468
Areia Normal (Fração média grossa)	468
Areia Normal (Fração média fina)	468
Areia Normal (Fração fina)	468
Total	2796

3.4.2 Preparação das argamassas

O procedimento de produção das argamassas foi baseado da norma NBR 5752 (2014). Sabe-se que a mistura de materiais, moldagem de corpos de prova, condições de cura e determinação da carga de ruptura à compressão são inferidos da norma NBR 7215 (1996).

A avaliação do desempenho das argamassas é realizada a partir da determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos com altura de 100 mm e base de 50 mm. Sua relação água/cimento (a/c) é de 0,48 e a proporção de materiais consiste em uma parte de cimento para três partes de areia.

Inicialmente são pesados todos os componentes da mistura: as frações de areia, o fíler calcário, a argila calcinada, o cimento CP I, a água e o superplastificante.

A quantidade dos materiais de cada mistura realizada está evidenciada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Quantidades de materiais utilizados nas argamassas (Adaptado de NBR 7215/1996)

	Cimento (g)	Água (g)	Areia (g)	Argila (g)	Fíler (g)
0:0	624	300	1872	0	0
1:2	343,2	300	1872	93,6	187,2
2:1	343,2	300	1872	187,2	93,6
3:1	343,2	300	1872	210,6	70,2
1:1	343,2	300	1872	140,4	140,4

Já próximo ao misturador mecânico que realiza a mistura da argamassa, coloca-se a água, o superplastificante e a mistura de argila, fíler e cimento no recipiente do misturador. Anota-se a hora em que a mistura entrou em contato com a água e inicia-se a mistura por 30 segundos na velocidade 1, conforme a Figura 3.9.



Figura 3.9 - Mistura da água, superplastificante, cimento, argila e fíler

Nos próximos 30 segundos, a areia normatizada é adicionada à mistura, segundo a Figura 3.10 (a); coloca-se as 4 frações misturadas durante 30 segundos de forma uniforme. Procede-se na velocidade 2 por mais 30 segundos e então para-se o misturador. Nos próximos 30 segundos deve-se uniformizar a mistura e limpar as paredes e deixar o material por 1 minuto em repouso coberto com pano úmido de modo a evitar perda d'água, como mostra a Figura 3.10 (b).



Figura 3.10 - (a) Adição da areia na mistura e (b) Mistura em repouso.

Após o repouso, liga-se o misturador por mais 1 minuto na velocidade 2 e então encerra-se a mistura. O próximo passo é o ensaio de consistência, descrito na NBR 7215 (1996). A consistência das argamassas contendo substituição deve ser determinada a fim de estabelecer uma uniformidade em relação à referência; desta forma, o espalhamento das misturas LC³ deve ser semelhante ao da referência, respeitando o intervalo de ± 10 mm. Como as adições de argila calcinada e fíler calcário elevam o teor de finos da mistura, torna-se necessário o uso do aditivo superplastificante para alcançar os valores de espalhamentos estabelecidos.

A moldagem para o ensaio de consistência é realizada imediatamente após a preparação da argamassa. Em posse do tronco de cone, do soquete e da mesa normatizada, inicia-se o ensaio. É colocada, sobre a mesa limpa, a forma troncônica, com sua base maior apoiada na mesa. Com o auxílio de uma espátula, é colocada a argamassa na forma, em três camadas de mesma altura, em que cada uma recebe 15, 10 e 5 golpes uniformes, respectivamente, com o soquete normal. Feito isto, deve-se alisar o topo com um régua, limpando a mesa em volta do molde. Retira-se, então, a forma e inicia-se a movimentação da manivela do aparelho para

medida da consistência, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em 30 s. Mede-se, com o auxílio de um paquímetro, dois diâmetros ortogonais e determina-se a média aritmética desses valores. O procedimento do ensaio de consistência pode ser entendido por meio das Figuras 3.11 e 3.12 a seguir:

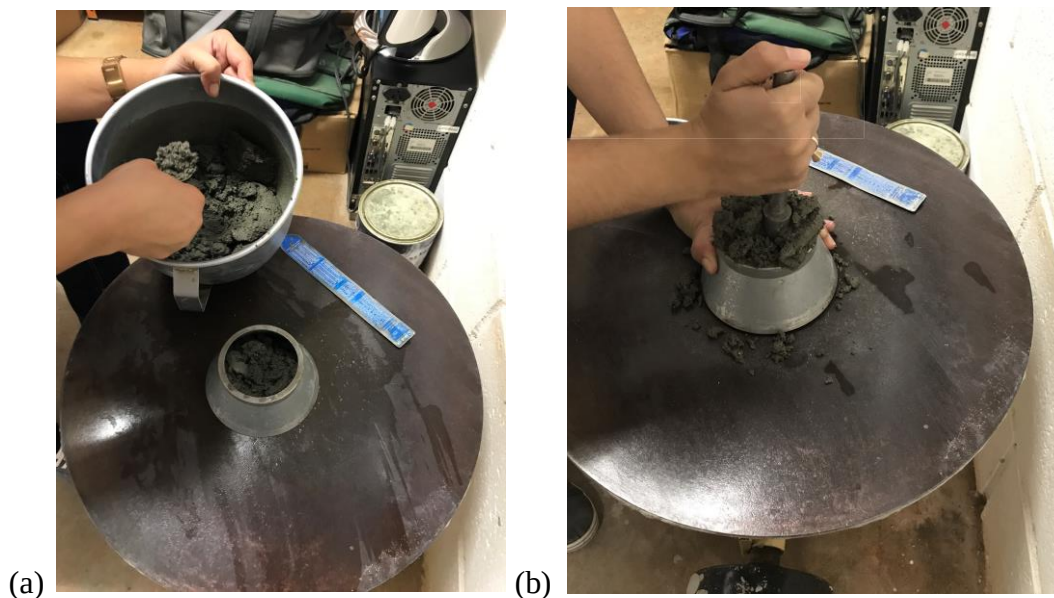


Figura 3.11 – (a) Colocação da argamassa no tronco de cone e (b) Golpes aplicados às camadas de argamassa.

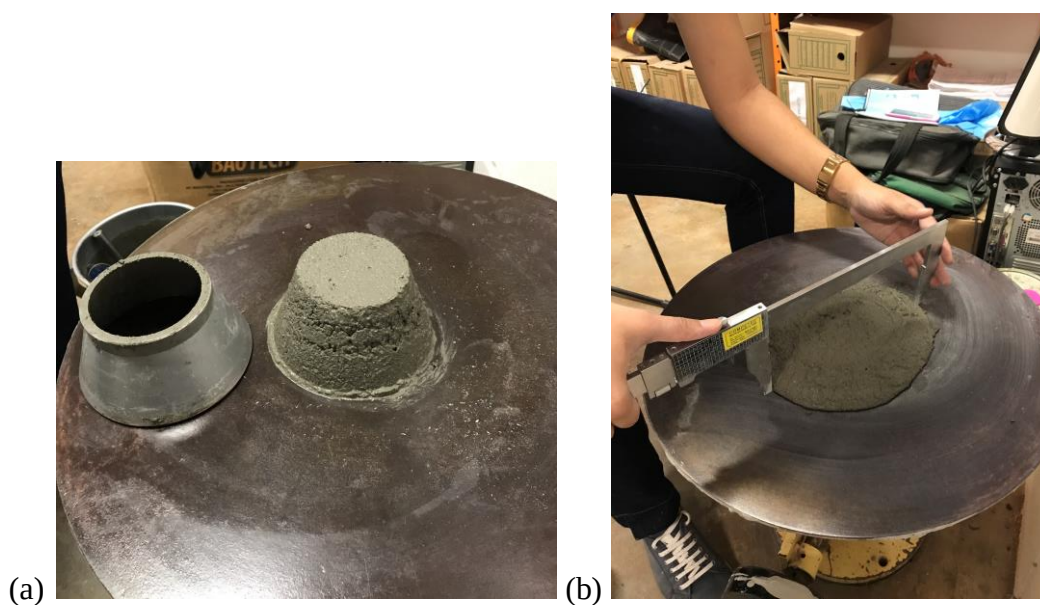


Figura 3.12 – (a) Retirada do tronco de cone e (b) Determinação do espalhamento com o paquímetro.

Com a consistência correta, as argamassas são compactadas manualmente nas formas. São 4 camadas com 30 golpes em cada. Identificados, os corpos de prova devem ser mantidos durante 20 a 24h na atmosfera úmida para uma cura inicial, protegidos com uma placa de vidro na face superior. Passado o período da cura inicial, o próximo passo é desmoldar os corpos de prova e passar para a cura em água saturada de cal, até a sua data de ruptura.

3.4.3 Índice de desempenho do LC³

Após as caracterizações dos materiais utilizados e estando os corpos de prova com a idade correta, procede-se então com a avaliação das resistências à compressão das misturas de cimento Portland com as adições propostas de fíler calcário e argila calcinada. As idades de ruptura e as tolerâncias estão apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Idades de ruptura (Adaptado de NBR 7215/1996).

Idade de ruptura	Tolerância
24 horas	± 30 minutos
3 dias	± 1 hora
7 dias	± 2 horas
28 dias	± 4 horas

Os corpos de prova foram moldados no laboratório da concreteira Grupotecno, localizada em Ceilândia/DF, e foram rompidos no Laboratório de Materiais da UnB . Portanto, para seu transporte, utilizou-se areia para os envolver e não gerar vibrações e aparecimento de fissuras.

3.4.4 Índice de desempenho das argamassas

A NBR 7215 (1996) recomenda que seja executada a ruptura de quatro corpos de prova para cada idade descrita acima, porém optou-se por moldar 5 corpos de prova para cada traço e para cada idade, em que será descartado aquele que apresentar a carga de ruptura mais discrepante. Como são quatro traços diferentes, além do traço de referência, foram moldados um total de 100 corpos de prova para a avaliação da resistência à compressão.

Os corpos de prova na sua idade correspondente (1, 3, 7 e 28 dias) foram rompidos na prensa do Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília. Seguindo os procedimentos da norma, foi feita a preparação da máquina de ensaio, limpando os pratos e ajustando a escala adequada. Utilizando o neoprene, cada corpo de prova foi devidamente posicionado no centro do prato inferior da prensa, recebendo o carregamento uniforme e sofrendo, por fim, a ruptura. Com a carga de ruptura fornecida pela máquina, foi possível determinar a resistência à compressão da argamassa. A Figura 3.13 mostra a realização deste ensaio.

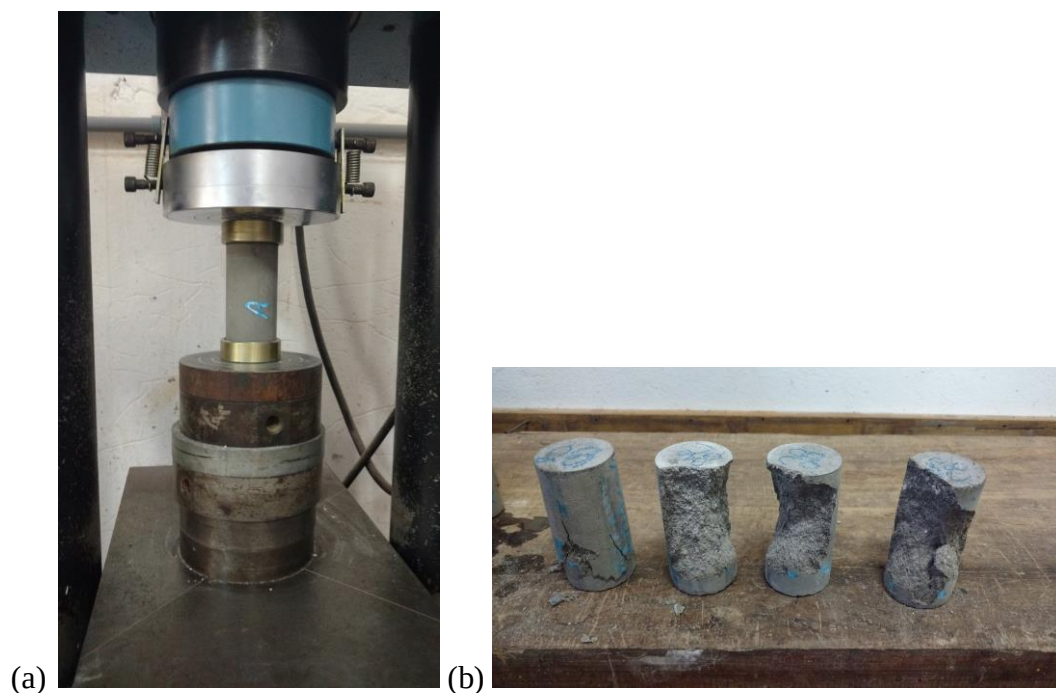


Figura 3.13 – (a) Aplicação da carga para determinação da carga de ruptura (b) Corpos de prova após a ruptura.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios de resistência à compressão para os cinco traços, sendo um deles de referência, ou seja, sem substituição, e quatro com proporções diferentes das substituições de argila calcinada e fíler calcário, resultando em 45% de substituição do total da mistura, conforme apresentado na Tabela 3.4. Os corpos de prova foram rompidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Além disso, são apresentados os ensaios de caracterização das adições e do cimento propostos no programa experimental.

A partir dos resultados obtidos, faz-se uma análise do desempenho de resistência à compressão das argamassas com substituição em relação à argamassa de referência, avaliando o comportamento e a influência que a argila calcinada e o fíler calcário exercem quando substituem parte do cimento Portland.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Distribuição granulométrica à laser

Foram determinadas as distribuições granulométricas das adições, argila calcinada e fíler calcário, e também do cimento Portland comum, CP I. As partículas foram dispersas em um fluído em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluído, as quais foram detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula. A análise granulométrica foi realizada pela técnica de difração a laser e os gráficos foram gerados por um software. Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentados os resultados obtidos, onde o eixo das abscissas indica o diâmetro em μm e o eixo das ordenadas, a porcentagem acumulada passante.

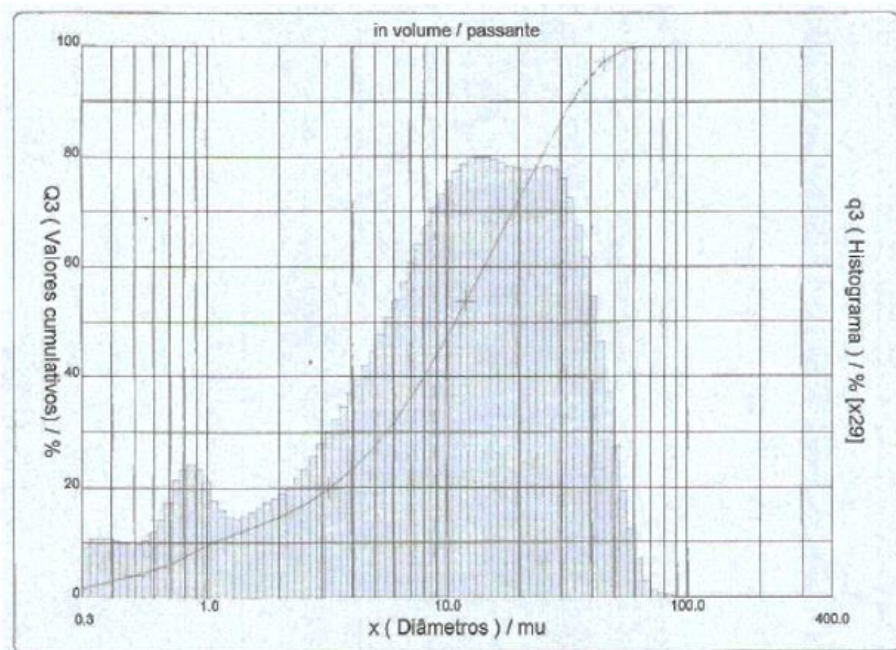


Figura 4.1 – Curva granulométrica do cimento Portland.

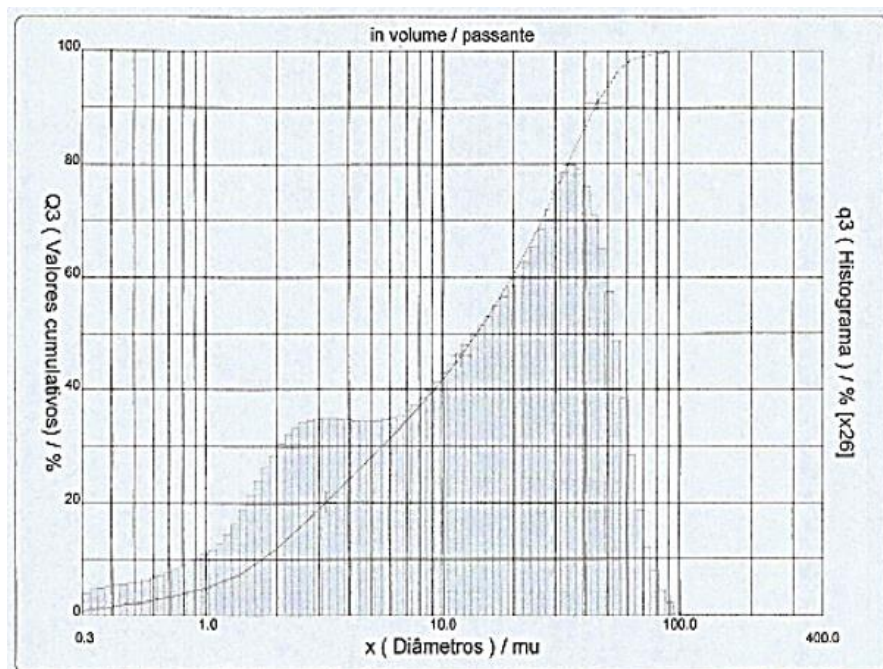


Figura 4.2 – Curva granulométrica da argila calcinada.

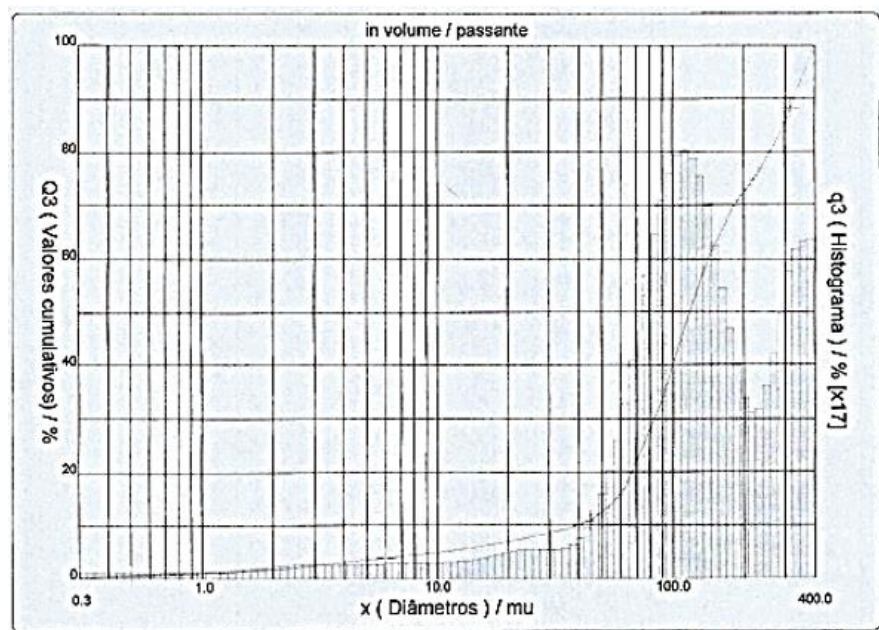


Figura 4.3 – Curva granulométrica do filer calcário.

Os materiais utilizados (cimento, argila e fíler) são caracterizados por serem extremamente finos. Tal afirmação se comprova quando se analisa as curvas apresentadas: primeiramente, a unidade do diâmetro, em μm , já é um forte indicativo do tamanho pequeno dos grãos; em segundo lugar, a porcentagem passante acumulada de grãos chega a 100% para pequenos diâmetros em todos os materiais. Para o cimento, 100% dos matérias são mais finos que $60\ \mu\text{m}$ e o diâmetro médio é de aproximadamente $14,5\ \mu\text{m}$; a argila, por sua vez, apresenta todos os seus grãos com tamanhos inferiores a $90\ \mu\text{m}$ e diâmetro médio de $19\ \mu\text{m}$; e o fíler tem 100% de seus grãos passando na peneira de diâmetro $400\ \mu\text{m}$ e um diâmetro médio de $152\ \mu\text{m}$.

Para fins de comparação, foi feito um gráfico contemplando as curvas de distribuição granulométrica do cimento, da argila e do fíler (Figura 4.4).

Curvas granulométricas

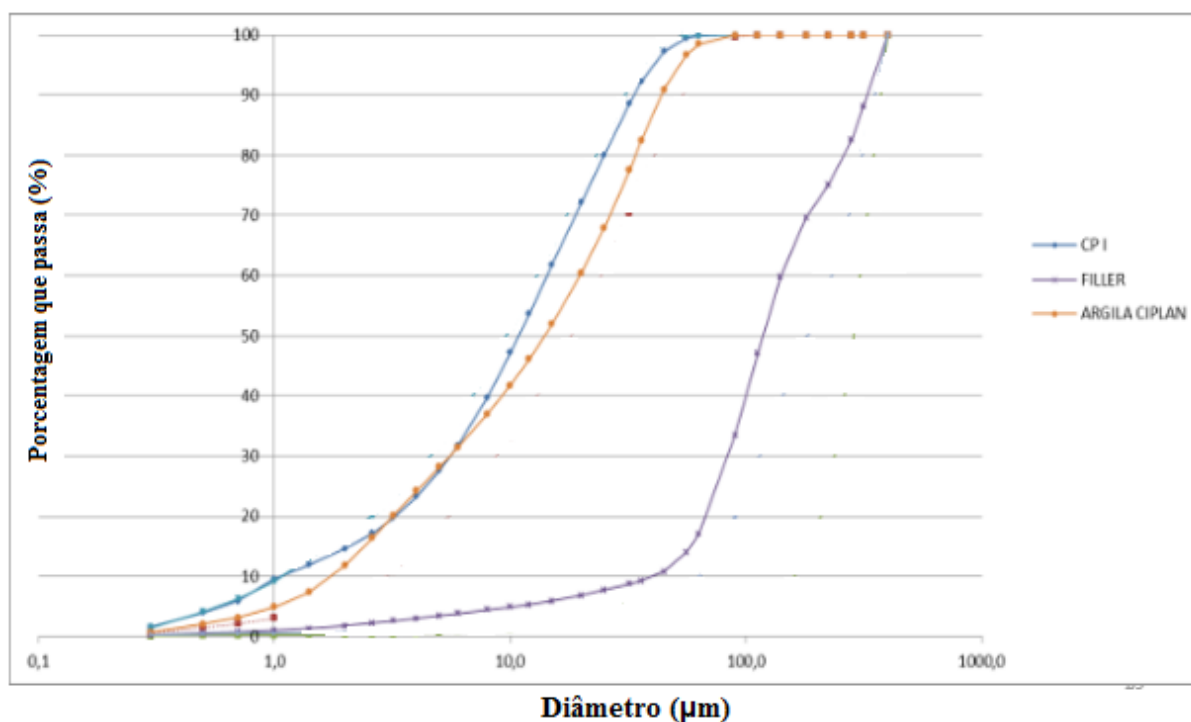


Figura 4.4 – Curvas granulométricas do CP I, argila calcinada e fíler calcário.

Observa-se então que o cimento é o material mais fino, com menor dimensão dos grãos, seguido da argila e do fíler.

4.1.2 Massa específica e Blaine

Primeiramente a massa específica foi determinada usando o frasco de Le Chatelier, segundo a NM 23. Utilizando 10 g de cada material, obteve-se os valores de massa específica para cada um deles. Em seguida, seguindo as prescrições da NM 76, determinou-se a superfície específica pela Equação 3.1. Os resultados obtidos para essas propriedades estão registrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica e determinação da finura pelo Método de Blaine.

Material	Massa específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
CP I	3,19	3.554
Argila	2,64	14.599
Fíler	2,77	5.045

A massa específica do cimento é um dado necessário para o cálculo da finura pelo método da permeabilidade ao ar, além de ser importante no cálculo do rendimento de concretos e argamassas. Devido à variação da massa específica, não existe norma que defina seu valor. Desta forma, a análise é comparativa com resultados obtidos em ensaios já realizados e a variação dos valores está entre 2,85 g/cm³ a 3,20 g/cm³. Portanto, o valor da massa específica encontrada para o cimento (3,19 g/cm³) está de acordo com o esperado.

A argila calcinada, por sua vez, apresentou um valor de massa específica (2,64 g/cm³) fora do intervalo esperado (2,0 a 2,6 g/cm³), segundo dados fornecidos por fabricantes; porém não representa uma discrepância significativa, ultrapassando menos de 2% do máximo pré-estabelecido.

Por fim, a massa específica do fíler calcário determinada aqui (2,77 g/cm³) se aproximou satisfatoriamente daquele obtido em um ensaio semelhante realizado em um trabalho de conclusão de curso (HASSE, 2014), no valor de 2,73g/cm³.

Em relação à superfície específica, o CP I apresentou resultado dentro do intervalo esperado de 3.500 e 3.800 cm²/g (NEVILLE, 2016). Além de ser fator preponderante para a desidroxilação e pozolanicidade, a elevada superfície específica é importante para assegurar uma boa distribuição das partículas e o maior preenchimento dos vazios da argamassa ou do concreto, aumentando assim a sua durabilidade (KALOUMENOU et al., 1999); e é justamente um alto valor de superfície específica que se encontra para a argila e para o fíler. Entretanto, os resultados de superfície específica encontrados pelo Método Blaine não estão coerentes com a granulometria dos materiais, pois o CP I deveria ter a maior superfície específica por ser mais fino, seguido da argila e do fíler, e não é o que se observa.

4.1.3 Difractometria de Raio-X

Utilizando a técnica qualitativa, baseada na interação de ondas na frequência de Raio-X com os planos de repetição do retículo cristalino dos materiais, foi possível identificar seus compostos principais. A identificação desses compostos se dá pelos picos presentes nos difratogramas, os quais são apresentados na Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. O eixo das ordenadas contém a raiz quadrada da intensidade de cada composto.

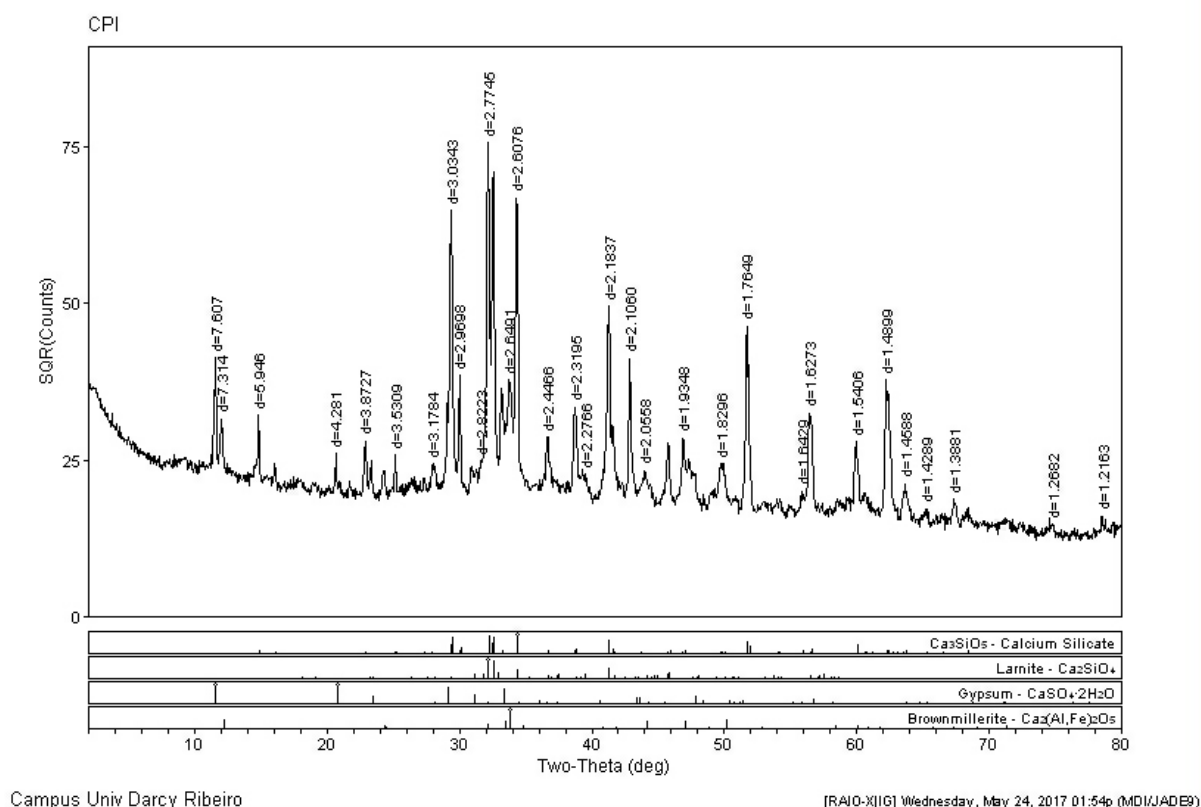


Figura 4.5 – Difractograma do CP I.

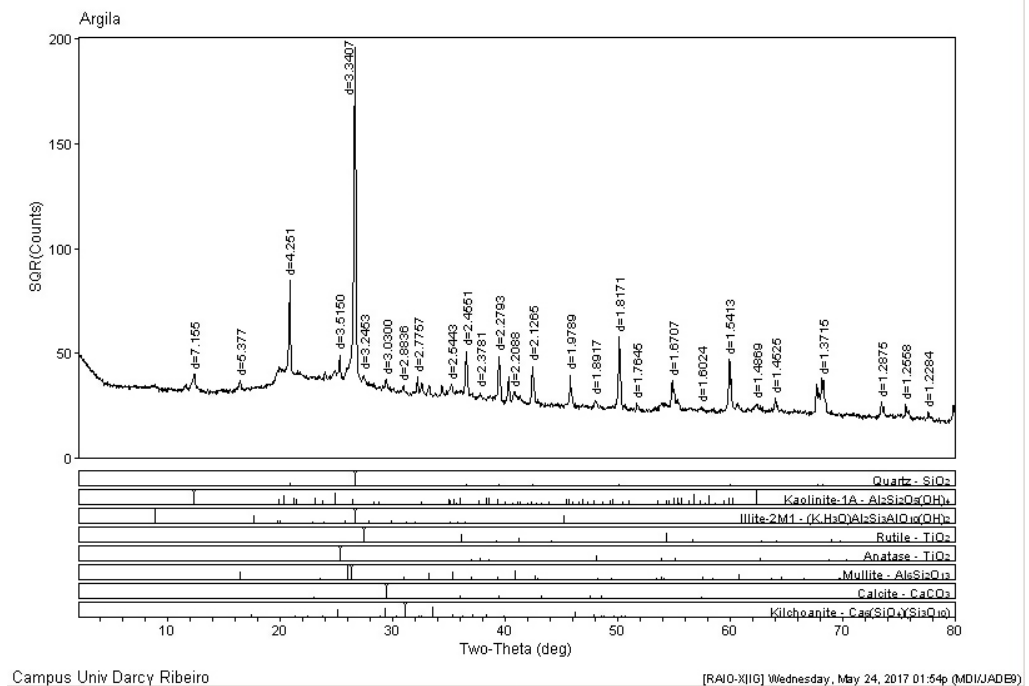


Figura 4.6 – Difratoograma da argila calcinada.

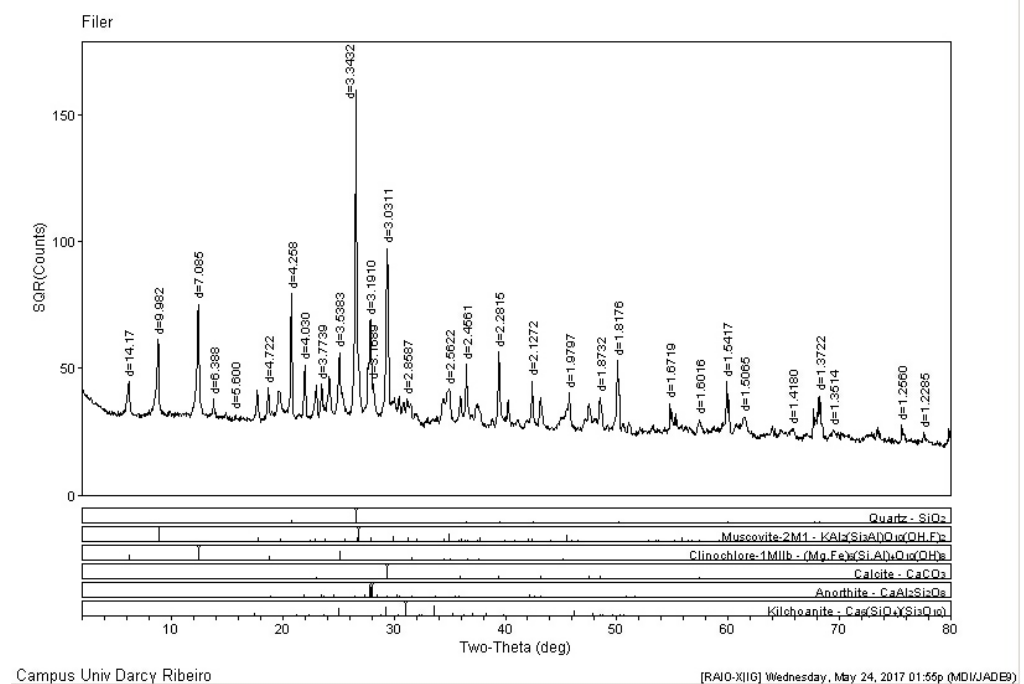


Figura 4.7 – Difratoograma do filer calcário.

Os picos identificados em cada um dos difratogramas indicaram a predominância de silicato de cálcio para o cimento e óxido de silício para a argila e para o fíler. Os resultados são coerentes, exceto pelo fíler, pois era esperado que este tivesse o carbonato de cálcio predominante em sua composição.

4.1.4 Fluorescência por Raio-X

Além da análise granulométrica, a identificação da composição química dos materiais é essencial para um maior conhecimento de suas propriedades, possibilitando avaliar como cada um deles (CP I, argila calcinada e fíler calcário) influenciará na composição das argamassas ou concretos. Com esta finalidade, os componentes do LC³ foram ensaiados em laboratório usando a técnica de fluorescência por Raio-X. Na Tabela 4.2 são indicados os valores da composição química dos materiais em questão, obtidos por meio deste ensaio.

Tabela 4.2 – Composição química do CP I, argila calcinada e fíler calcário obtida pelo FRX.

Material	Composição química (%)											Outros óxidos
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	SrO	MnO	BaO	
CP-1	66,04	16,82	3,94	4,25	3,76	3,74	0,91	0,24	0,21	-	-	0,10*
Argila	2,56	55,27	35,89	0,73	0,48	2,08	0,49	2,01	-	-	0,36	0,14**
Fíler	12,35	55,85	16,57	2,61	0,46	7,27	3,52	0,99		0,14	-	0,23***

*MnO, CuO, ZnO;

**ZrO₂, Cr₂O₃, SrO, NiO, Ga₂O₃, Y₂O₃, NbO, Rb₂O

***SrO, ZnO, Rb₂O, Y₂O₃

O cimento Portland utilizado apresenta uma composição química coerente de acordo com a Tabela 2.2 (NEVILLE, 2016), que indica seus principais compostos, no item 2.1.2. A predominância dos óxidos CaO e SiO₂ é um excelente indicador, pois formam os compostos C₃S (silicato tricálcio) e o C₂S (silicato dicálcio), responsáveis por conferir resistência à pasta de cimento quando hidratada.

A argila é composta predominantemente por SiO₂ e Al₂O₃, e os altos teores desses compostos estão relacionados diretamente com a resistência à compressão do produto final. O

fíler, entretanto, não apresentou resultados satisfatórios devido ao baixo teor de calcário, o que indica uma baixa qualidade do material.

A composição química dos materiais e suas proporções mostram-se coerentes com os resultados obtidos no ensaio de DRX.

4.1.5 Determinação da finura do cimento

Segundo descrito no item 3.3.1, foi feito o ensaio de determinação da finura do cimento com o uso da peneira nº200. Utilizou-se um fator de correção da peneira igual a 1, 50g de massa inicial de cimento e a massa retida pesada na peneira 75 µm foi de 0,23g. Utilizando a Equação 3.2, determinou-se o valor da finura do CP I. Na Tabela 4.3 são apresentados os dados do ensaio bem como o índice de finura obtido.

Tabela 4.3- Resultado do índice de finura

Massa inicial de cimento (g)	50
Massa retida na peneira (g)	0,23
Fator de correção	1
Índice de Finura (%)	0,46

O índice de finura de 0,46% atende à prescrição da NBR 5732 (1991), a qual estabelece o valor máximo de 10% para classe de resistência de 40MPa.

4.1.6 Massa específica do cimento

Embora tenha sido determinada a massa específica dos materiais no ensaio de determinação da superfície específica pelo Método Blaine, este ensaio de massa específica foi realizado novamente especificamente para o cimento. Para tanto, fez-se uma média de duas amostras e estes dados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de massa específica do cimento

	Amostra 1	Amostra 2
Massa cimento (g)	60	60
V1 (cm³)	0,1	0,1
V2 (cm³)	19,9	19,8
Massa específica (g/cm³)	3,03	3,05
Média (g/cm³)	3,04	

A massa específica do CP I encontrada (3,04 g/cm³) está dentro do intervalo esperado (2,85 a 3,20 g/cm³) e está muito próxima ao valor determinado no ensaio da finura pelo Método Blaine (3,19 g/cm³).

4.1.7 Tempo de início de pega

Inicialmente foi preparada a pasta de consistência normal de acordo com a NM 43 (2002). Encontrou-se uma quantidade de água que resultou em uma pasta na qual a sonda de Tetmajer acoplada ao aparelho de Vicat penetrou no molde até uma distância de 6 mm da base da placa. Para 500 g de cimento, encontrou-se uma quantidade de água de 135,5 g; desta forma, a porcentagem de água para a consistência normal da pasta de cimento foi de:

$$A = \frac{m_a}{m_c} \times 100 = \frac{135,5}{500} \times 100 = 27,1 \% \quad (\text{Equação 4.1})$$

O tempo de início de pega foi encontrado por meio da interpolação dos resultados obtidos nas medições entre os intervalos estabelecidos. Com precisão de 5 minutos, o valor encontrado para o início de pega da pasta de cimento foi de 2h35min, superior ao mínimo exigido (1h) pela NBR 5732.

4.2 ANÁLISE DAS ARGAMASSAS

4.2.1 Consistência do estado fresco

A consistência da argamassa no estado fresco é avaliada no ensaio de espalhamento. A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa, após o espalhamento, é feita com auxílio do paquímetro e expressa em milímetros. O índice de consistência da argamassa é a

média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais, sendo que não pode haver diferença superior a 5 mm entre as duas medidas. Os resultados determinados experimentalmente estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Espalhamentos obtidos no ensaio de abatimento

Idade	Traço	Superplastificante (%)	Espalhamento (mm)
1	0:0	0,00	219
	1:2	0,27	215
	1:1	0,48	224
	2:1	0,62	214
	3:1	0,79	225
3	0:0	0,00	216
	1:2	0,29	215
	1:1	0,48	218
	2:1	0,62	220
	3:1	0,80	229
7	0:0	0,00	219
	1:2	0,30	226
	1:1	0,49	222
	2:1	0,75	218
	3:1	0,80	219
28	0:0	0,00	220
	1:2	0,29	218
	1:1	0,49	223
	2:1	0,62	217
	3:1	0,81	222

* Teor máximo de superplastificante fornecido pelo fabricante: 1,2%.

Para que a comparação entre os traços e a referência fosse consistente, houve a preocupação de que as argamassas fossem produzidas sob as mesmas condições, inclusive que tivessem aproximadamente a mesma consistência; assim, admitiu-se como aceitáveis os espalhamentos que não diferissem mais que 10 mm do espalhamento medido na argamassa de referência, tendo sido determinado um espalhamento de referência para cada idade. Como se

observa na Tabela 4.5, foi necessário utilizar superplastificante em todos os traços, pois as substituições de argila e fíler reduzem a consistência da pasta e não seria possível atingir o espalhamento esperado. Todos os teores do aditivo superplastificante estão dentro do limite de 1,2% estabelecido pelo fabricante.

Sabe-se que a finura da argila calcinada deve ser rigorosamente controlada, pois uma finura elevada pode aumentar a demanda por água. Como comprovado pelos ensaios de caracterização das adições, a argila é um material extremamente fino; isso justifica a necessidade de um maior teor de superplastificante nas misturas onde há maior quantidade de argila, a proporção 3:1, com teores de 0,80% de aditivo em relação à massa de cimento.

4.2.2 Índice de desempenho do LC³

A fim de determinar o índice de desempenho de cada um dos traços das argamassas, inicialmente faz-se necessário calcular a resistência à compressão, em MPa, de cada corpo de prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção correspondente. Em seguida, procede-se à determinação da média dos quatro corpos de prova.

De acordo com a NBR 5752 (2014), o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias deve ser calculado de acordo com a equação abaixo:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (\text{Equação 4.2})$$

$I_{cimento}$: índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

f_{cB} : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassas com utilização da adição para substituição de parte do aglomerante;

f_{cA} : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassas sem teor de substituição do cimento Portland por alguma adição mineral, ou seja, a mistura de referência realizada.

No presente estudo, foi realizada uma adaptação da norma, determinando-se o índice de desempenho para as demais idades, além dos 28 dias, e usando-se CP I ao invés do CP II prescrito na NBR 5752.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos traços estão apresentados na Tabela 4.6, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Idade (dias)	Traço (A:F)	Resist. (MPa)	<i>I</i>_{cimento} (%)
1	0:0	16,0	100,0
	1:2	5,3	33,0
	1:1	7,7	48,0
	2:1	8,9	55,9
	3:1	7,6	47,5
3	0:0	26,9	100,0
	1:2	18,2	67,5
	1:1	21,0	78,0
	2:1	22,9	84,9
	3:1	22,3	83,0
7	0:0	33,0	100,0
	1:2	27,3	82,5
	1:1	29,3	88,8
	2:1	35,0	105,8
	3:1	32,0	96,9
28	0:0	45,2	100,0
	1:2	35,5	78,6
	1:1	39,4	87,2
	2:1	41,6	92,1
	3:1	44,1	97,7

Na Figura 4.8, é apresentado o desenvolvimento da resistência à compressão de cada traço ao longo de 28 dias.

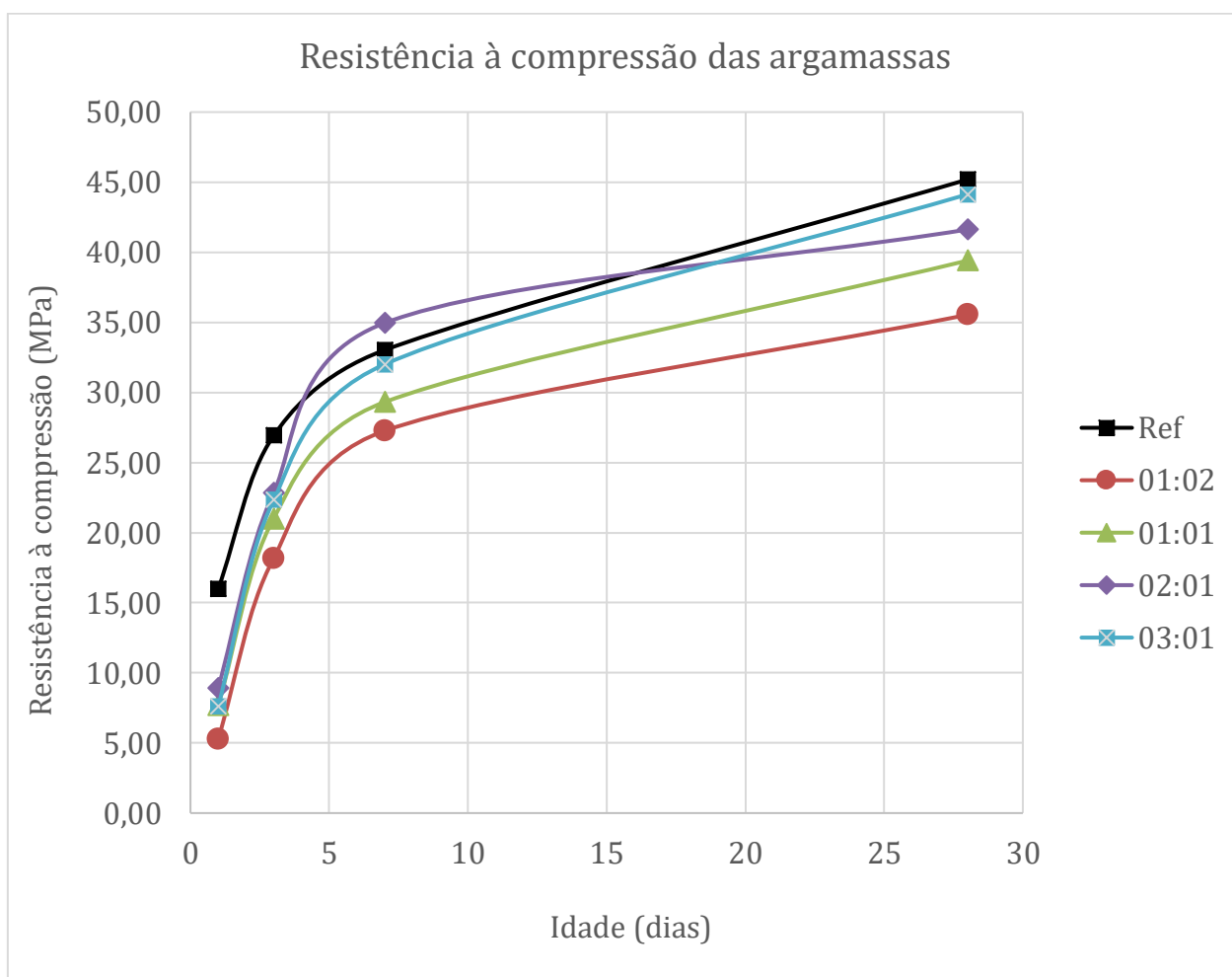


Figura 4.8 – Desenvolvimento da resistência à compressão dos traços de referência, 1:2, 1:1, 2:1 e 3:1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Analisando as curvas da Figura 4.8, observa-se que: primeiramente, as proporções de 1:1 e 1:2 (argila e fíler, respectivamente) apresentaram os menores valores de resistência em relação à referência; em contrapartida, as proporções 2:1 e 3:1 atingem resultados muito semelhantes à referência, o que indica que a argila calcinada contribui de maneira mais eficaz para a resistência à compressão da argamassa, uma vez que essas proporções possuem maiores teores de argila do que de fíler.

Para uma melhor visualização do desempenho do LC³ em relação à argamassa sem substituição, foi elaborado um gráfico comparativo entre as diferentes proporções, onde é

possível analisar os valores relativos de resistência à compressão de cada uma delas frente à referência (Figura 4.9).

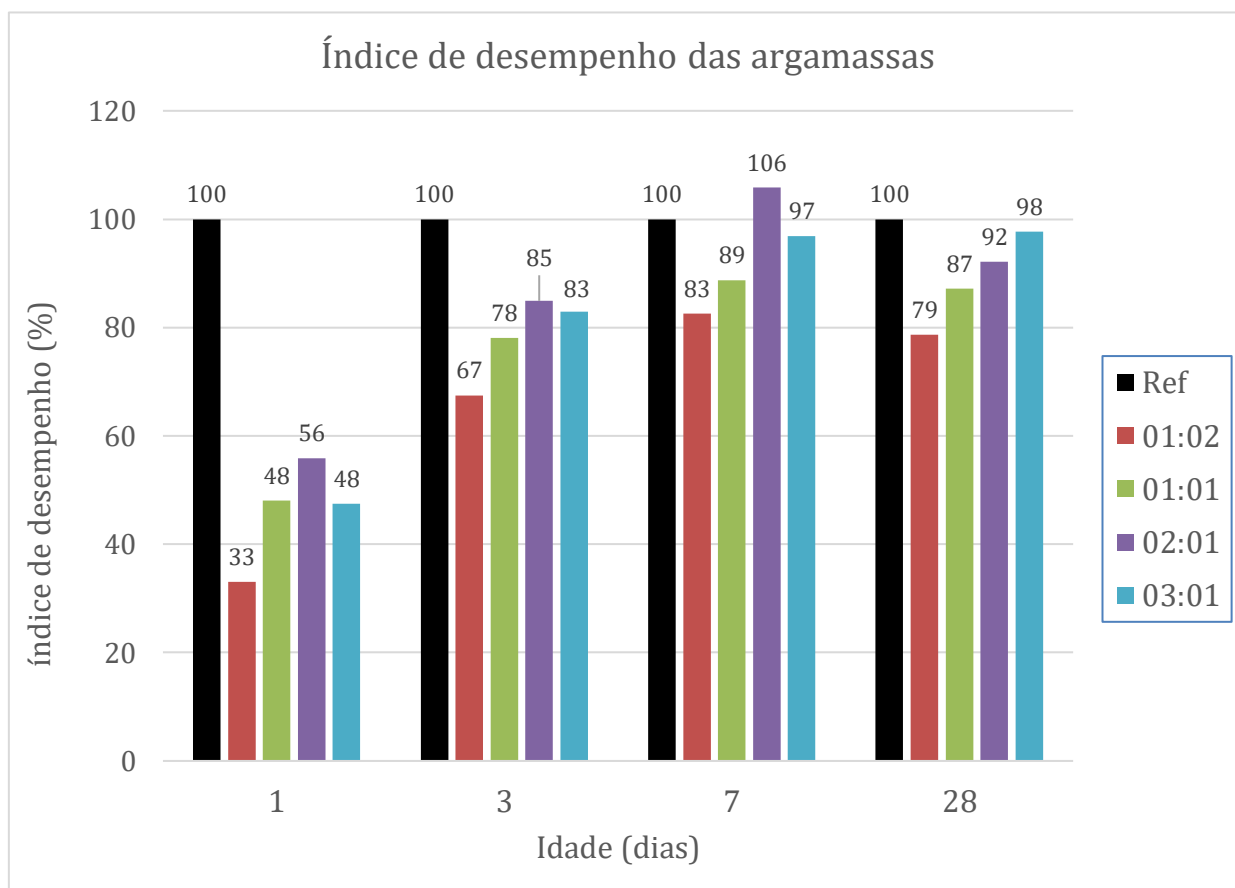


Figura 4.9 – Resistências à compressão relativas à referência para 1, 3, 7 e 28 dias.

De modo geral, a proporção de argila para fíler 2:1 apresentou os melhores resultados, seguida das proporções 3:1, 1:1 e 1:2, principalmente sob a ótica econômica e ambiental. Na idade de 1 dia, o melhor desempenho foi do traço 2:1, atingindo 56% da resistência de referência; o menor desempenho, por outro lado, foi de 33% para 1:2, o que já era esperado devido à maior quantidade de fíler, que, por ser um material inerte, contribui de maneira menos eficiente para ganho de resistência. Em 3 dias, os índices de desempenho começaram a crescer de forma mais satisfatória, sendo o menor referente à proporção 1:2, equivalente a 67%, e o maior de 2:1, chegando a 85%. Com 7 dias, os traços 1:2 e 1:1 apresentaram uma perda de 17%

e 11%, respectivamente, em relação à referência, resultados já bastante expressivos; a proporção 2:1 ultrapassa a referência em 6% e a de 3:1 foi inferior à referência em apenas 2%. Por fim, aos 28 dias, os traços 2:1 e 3:1 mostram-se extremamente satisfatórios, alcançando 92% e 98%, respectivamente, da resistência à compressão da argamassa de referência.

Dentre as proporções de cimento LC³ estudadas, percebe-se que, entre 7 e 28 dias, apenas a proporção 3:1 continua com ganho de resistência crescente, enquanto, nas outras proporções, há uma pequena redução de desempenho. Esse fato pode ser explicado pelo maior teor de argila calcinada na proporção 3:1, que, conseqüentemente, possui uma maior atividade pozolânica e, em idades mais avançadas, essa reatividade contribui com a formação de produto hidratado adicional na matriz da pasta de cimento hidratada.

Deve-se ressaltar que os resultados poderiam ser ainda mais positivos, atingindo valores maiores de resistências, caso fossem utilizadas adições com maior qualidade. Em primeiro lugar, estudos mostram que, para garantir um bom desempenho do produto final, seja argamassa ou concreto, as argilas utilizadas como adição devem conter entre 50% e 60% de caulinita, a qual influencia de forma direta na resistência à compressão (BISHNOI, 2012). No presente estudo, não foi possível determinar o teor de caulinita, porém a presença da alumina (Al_2O_3), com aproximadamente 36%, pode ser diretamente correlacionada ao ganho de resistência, e esse ganho será tanto maior quanto maior for o teor na mistura. Em segundo lugar, conforme apresentado no resultado de caracterização, o fíler utilizado nos ensaios apresentou baixo teor de calcário, indicando uma baixa qualidade do material.

De maneira geral, os resultados obtidos mostraram-se muito satisfatórios, uma vez que a substituição de 45% do clínquer por adições minerais é bastante expressiva; ao se retirar quase metade de clínquer, conseqüentemente perde-se parte significativa dos compostos C_3S e C_2S , responsáveis por conferir resistência à pasta de cimento quando hidratada, formando C-S-H. Portanto, a pequena perda que se tem no desempenho da resistência é compensada pela redução do uso de energia na produção do clínquer.

Os valores de resistência das argamassas feitas com 45% a menos de clínquer bastante semelhantes à referência se devem ao fato de as adições minerais serem materiais extremamente finos, com tamanho médio dos grãos de 19 μm e 152 μm para a argila e filer respectivamente, o que faz com que os poros sejam cada vez mais preenchidos, diminuindo expressivamente os vazios no material endurecido.

Outra possível explicação para as resistências semelhantes ao traço de referência é a análise química dos compostos formados, a qual precisa ser melhor investigada em estudos futuros. Ao analisarmos a composição química desses compostos, podemos inferir que: o monocarboaluminato formado nas reações de hidratação do cimento LC^3 é um composto mais estável por apresentar ligação química iônica, diferente do monossulfoaluminato, que possui ligação covalente, considerada mais fraca. A entringita, que também é estabilizada na presença do calcário, mostra-se um composto estável já que ocorre a polimerização dos seus compostos constituintes.

As proporções de 2:1 e 3:1 foram as mais eficazes ao atingirem resistências muito próximas à resistência de referência, principalmente para 7 e 28 dias. Embora 3:1 tenha tido desempenho superior para 28 dias, o traço 2:1 apresenta-se como mais viável econômica e ambientalmente; o fato deste conter menor teor de argila exige menos energia de calcinação, levando a custos menores e a uma diminuição das emissões de gases poluentes no processo de fabricação da argila calcinada.

4.2.2.1 Estudos já realizados

Os resultados de desempenho das misturas contendo 45% de substituição do clínquer por adições minerais obtidos neste trabalho confirmam aqueles apresentados em estudos anteriores, como o de Antoni (2013) e Scrivener (2014), embora estes tenham tido melhores desempenhos.

Segundo a pesquisa de Antoni (2013), o mesmo teor de substituição (45%) e o mesmo traço de 2:1, adquiriram índices de desempenho de 43%, 110% e 115% para as idades de 1, 7

e 28 dias, respectivamente. Scrivener (2014), por sua vez, apresentou resultados muito próximos aos deste trabalho com o uso de argilas contendo 45% de caulinita. Analisando a Figura 2.7, tem-se índices de desempenho de 41%, 70%, 92% e 90% para 1, 3, 7 e 28 dias respectivamente, enquanto aqui os resultados foram de aproximadamente 56%, 85%, 106% e 92%.

4.2.3 Variabilidade dos resultados

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são aceitáveis quando o valor do desvio relativo máximo é inferior a 6%. Ele é determinado dividindo-se o valor absoluto da diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afasta desta média pela resistência média e multiplicando este quociente por 100. Caso o valor encontrado seja superior a 6%, deve-se calcular uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, segundo a NBR 7215 (1996). Os resultados são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Desvios relativos máximos.

	Desvio relativo (%)				
	Ref	1:2	2:1	3:1	1:1
1	1,59	2,57	3,21	0,84	2,49
3	5,08	4,56	2,70	0,84	2,49
7	4,70	3,70	4,43	1,75	4,89
28	3,63	0,97	4,13	2,83	5,27

A prescrição quanto ao desvio relativo máximo foi cumprida para todos os traços e em todas as idades. Isso ocorreu devido às condições e à execução uniforme dos ensaios.

5 CONCLUSÃO

5.1 SINOPSE E CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolvido buscou estudar alguns aspectos relacionados a um novo cimento chamado cimento LC³, onde existe uma adição de argila calcinada e fíler calcário para diminuir a porcentagem de clínquer e então fazer com que o material seja menos poluente.

Os objetivos específicos eram analisar as adições usadas no cimento, rodar cinco traços de argamassas e por fim avaliar o desempenho de cada traço por meio do ensaio de resistência à compressão. Procurou-se comparar os valores de resistência obtidos para diferentes teores de adição sempre respeitando a proporção de 55% de clínquer e 45% de adição.

Analisando inicialmente as caracterizações dos componentes das argamassas (cimento CP I, argila calcinada e fíler calcário), um ponto que deve ser comentado é o resultados das composições químicas dos materiais. O resultado do cimento Portland foi bastante satisfatório; mostrou um alto teor dos compostos CaO e SiO₂ que são responsáveis por conferir resistência ao cimento hidratado.

Já a composição química do fíler não apresentou a quantidade de calcário esperada, uma porcentagem muito baixa. A argila apresentou boa composição, com alto teor de SiO₂, como esperado, e com quantidade suficiente de alumina para desenvolver boa resistência no cimento.

Os ensaios de massa específica usando diferentes métodos para o cimento foram satisfatórios e dentro dos intervalos esperados, assim como a massa específica das adições. E para início de pega foi obtido um valor condizente com o que é estipulado para um cimento de pega normal, o ensaio foi realizado apenas com o CP I usado nas argamassas.

Percebeu-se que, nas primeiras idades, a referência com 100% de cimento CP I resultou em resistências maiores do que as outras misturas, o que já era esperado pois a quantidade de C₃S foi reduzida. Porém, para 7 e 28 dias, os valores de resistência foram bastante próximos da referência, especialmente os traços 2:1 e 3:1, o que mostra um resultado extremamente satisfatório, já que, mesmo retirando 45% de clínquer, não houve uma perda de desempenho significativa em relação à argamassa com 100% de CP I.

As proporções de 2:1 e 3:1 foram as mais eficazes ao atingirem resistências muito próximas à resistência de referência, principalmente para 7 e 28 dias, como já explicitado no estudo de Scrivener (2014) no caso de 2:1. Por isso, constatou-se que a argila calcinada é a maior responsável por conferir resistência às argamassas, já que as misturas com maiores teores de filer calcário (1:1 e 1:2) não resultaram em índices de desempenho tão bons quanto as misturas com maior teor de argila.

A melhor mistura, do ponto de vista econômico e ambiental, é a argamassa com duas partes de argila calcinada para uma parte de filer (2:1), pois a utilização de uma quantidade inferior de argila em relação à proporção 3:1 implica em menores custos de calcinação, em que esse material deve passar por altas temperaturas para adquirir boa reatividade.

Vale ainda destacar que a mistura com a proporção de duas partes de argila calcinada para uma parte de filer calcário é também a mistura mais interessante do ponto de vista ambiental. Pode-se argumentar que se utiliza uma menor quantidade de argila calcinada, o que faz com que as emissões diminuam ainda mais, já que não será necessário usar uma grande quantidade de material que deverá ser calcinado.

É importante ressaltar que, mesmo utilizando um filer pobre em calcário, os resultados obtidos se mostraram bastante convincentes e evidenciam que, mesmo substituindo 45% de clínquer (produto mais importante para garantir a resistência do cimento), os valores de resistência à compressão praticamente se igualaram aos valores da argamassa de referência. Isso pode ser explicado por meio de análises químicas das moléculas formadas: o carboaluminato e a etringita, que são compostos com ligações fortes e estáveis. Além disso, o refinamento dos poros é um importante aspecto que contribui para os valores das resistências obtidos, já que as adições são materiais finos e fazem com que os vazios sejam preenchidos por seus grãos.

Este trabalho buscou comparar valores de resistência à compressão de argamassas utilizando cimento LC³ com valores já encontrados na literatura internacional. Os resultados obtidos foram satisfatórios e podem abrir caminho para diversos outros estudos no mesmo

segmento aqui no Brasil, buscando acrescentar adições ao cimento Portland e assim diminuir as emissões provenientes da sua fabricação.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Repetir os ensaios de resistência à compressão, com as mesmas proporções de substituição, utilizando um fíler com maior teor de $CaCO_3$;
- Repetir os ensaios de resistência à compressão incluindo a ruptura aos 91 dias a fim de verificar o desenvolvimento da resistência a um prazo maior;
- Ensaiar outras proporções de substituição, além dos 45% aqui realizado;
- Analisar o ciclo de vida do cimento LC^3 para comprovar suas vantagens do âmbito ambiental;
- Aplicar o cimento LC^3 em casos reais, realizando sua produção em fábricas de cimento já existentes e executando elementos estruturais para avaliar seu desempenho;
- Analisar quimicamente os compostos formados no processo de hidratação do cimento LC^3 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROZEWICZ, P. K.; Materiais de Construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012.

ANDRIOLO, F. R.; A utilização de pozolana na construção do conjunto hidroelétrico de Urubupungá. São Paulo, 1975.

ANTONI, P. H. L.; Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone. EPFL PhD THESIS N°6001, 2013. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/190756/files/EPFL_TH6001.pdf>.

ANTONI, M et al., Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research. (2012).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n°200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto. ABNT, 1991.

BARBOSA, A.H.; Estudo da Aplicação de Resíduo Cerâmico como Substituto Parcial do Aglomerante e do Agregado Miúdo do Concreto. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2009, Niterói-RJ.

BERRIEL, S. S. et al.; Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba, *Journal of Cleaner Production* 124 (2016) p. 361-369

BISHNOI, S., MAITY, S., MALLIK, A., JOSEPH, S., KRISHNAN, S., JOSEPH, A.M., SHAH, V., Pilot scale manufacture of Limestone Calcined Clay Cement: The Indian experience. *Indian Concrete Journal*, This issue, 2014.

CABRERA, J.G.; LYNSDALE, C.J.; The effect of superplasticisers on the hydration of normal Portland cement. *L'Industria Italiana del Cimento*, v.7-8, p.532-542, 1996.

CHAPPEX, T. and K.L. SCRIVENER. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous sílica and its relation to álcali sílica reaction. *Cement and Concrete Research*, 2012. P.1645-1649.

CAMPITELI, V.C.; The Influence of Limestone Additions on Optimum Sulfur Trioxide Content in Portland Cements, Carbonate Additions to Cement, ASTM STP 1064, P. Klieger and R. D. Hooton, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

CASTRO, J.F; Pozolana como material de construção: sua fabricação artificial em Urubupungá. São Paulo, 1970.

COSTA, J.S.; MARTINS, S.A; BALDO, J.B; Argamassa de Alvenaria Usando Agregado Reciclado da Indústria de Piso Cerâmico. Cerâmica Industrial, 2005.

CUNHA, M.F.; SILVA, B.I.; Tendências da normalização de metacaulim para uso em concretos. In: REUNIÃO ANUAL IBRACON 52 – NOVAS TECNOLOGIAS DO CONCRETO PARA O CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL, 2010.

CZEREWKO, M.A. et al. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol, 2003.

DETWILLER, R.J.; BHATTY, J.I.; BHATTACHARJA, S.; Supplementary cementing materials for use in blended cements. Research and development bulletin RD112T, Portland Cement Association, EUA, 1996.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. A Fluorescência de Raios X na Geologia. . In: GOMES, C. B. (Org.). Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia, São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1984, p. 85-120.

FAIRBAIRN, E. M. G. et. al. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. (2006).

FARIAS FILHO, J; ROLIM, J.S; FILHO, R.D.T; Potencialidades da Metacaolinita e do Tijolo Queimado Moído como Substitutos Parciais do Cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.3, p.437-444. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

FELEKOGLU, B. A new approach to the characterisation of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry. Construction and Building Materials, v.23, n.2, p.1154-1162, 2009.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de Raios X. In: GOMES, C. B. (Org.). Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia, São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1984, p.1-43.

FRIAS, M.; CABRERA, J. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. Cement and Concrete Research, Espanha, 1999.

GARTNER, E.; HIRAO H. A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete, Cement and Concrete Research, 2015.

GUÉNOT-DELAHAIE, I. Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton. These de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1996.

HASSE, J.A. Influência do uso de adição de filer cerâmico no controle de segregação e exsudação de concretos auto adensáveis. Pato Branco, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13320: Particle size analysis - Laser diffraction methods. 2009.

JUENGER, M.C.G.; SINDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, Cement and Concrete Research. (2015)

IRASSAR, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. Cement and Concrete Research, v.39, n.3, p.241-254, 2009.

KALOUMENOU, M., Badogiannis, E., Tsivilis, S., & Kakali, G. Effect of the kaolin particle size on the pozzolanic behaviour of the metakaolinite produced. Athenes: Journal of Thermal analysis and calorimetry Vol. 56, 901-907, 1999.

KENNEDY, B.A., M. Society for Mining, and Exploration, Surface Mining: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1990.

LACERDA, M. M.; MELO, M.; Controle da Qualidade do Concreto de Cimento Portland com Enfoque em Métodos Estatísticos. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos/controle-da-qualidade-do-concreto-de-cimento-portland-com-enfoque-em-metodos-estatisticos/140564/>>

LEA, F.M; The Chemistry of Pozzolans. In: Symposium of The Chemistry of the Cement. Estocolmo, 1938.

LEA, F.M; The Chemistry of Cement and Concrete. Londres, 1970.

MASSAZZA, F.; Pozzolana and pozzolanic cements. In: Lea's chemistry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

MASSAZZA, F.; COSTA, U.; Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements. II Cemento 76:3-18, 1979.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P.; Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.

MIELENZ, R.C., SCHIELTZ, N.C, and KING, M.E.; Thermogravimetric analysis of clay and clay-like minerals. *Clays and Clay Minerals*, 1953. 2: p. 285-314.

MODLER, L.E.; RUPP, R.F.; PREDIGER, P.W.; BOEIRA, F.D. Concreto bombeável com adição de finos basálticos – Análise das características físicas. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. São Paulo: IBRACON, 2007.

MONTE, M.B.M.; PAIVA, P.R.P.; TRIGUEIRO; F.E.; Técnicas alternativas para modificação do caulim. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Série Rochas e Minerais Industriais, Vol 8, 2003.

MÜLLER, N. et. al. A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry: How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World, 2008.

NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementares na análise quantitativa por fluorescência de raios X. *Química Nova*, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.

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

PAPADAKIS, M. & VENUAT, M.; Empleo em los cementos y hormigones: fabricacion, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento. Barcelona, Técnicos Asociados, 1968.

PERA, J.; HUSSON, S.; GUILHOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement & Concrete Composites*, v.21, n.2, p.99-105, 1999).

RAMLOCHAN, T. and M. Thomas. Effect of metakaolin on external sulfate attack. *ACI Special Publication*, 2000. 192.

RENAUDIN, G., et al., Structural characterization of C-S-H and C-A-S-H samples--Part I: Longrange order investigated by Rietveld analyses. *Journal of Solid State Chemistry*, 2009. p. 3312-3319.

SAAD, M.N.A.; ANDRADE, W.P. Propriedades do concreto massa contend pozzolana de argila. IBRACON. São Paulo, 1983.

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

SANTOS, P.S. Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. Primeira edição, volume 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1975.

SCRIVENER, K., FAVIER, A.; *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, 2015.

SCRIVENER, KAREN. Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, Issue 7, pp 11-21, Julho 2014.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J.; Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete. A review. *Applied Clay Science*, v.43, Issues 3-4, p.392-400, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual de indicadores de cimento 2013. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016.

SKAROPOULOU, A., et al.; Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 2013.

SOUZA SANTOS, P.; *Argilas para pozolanas*. P.294-1311. São Paulo, 1966.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

WONG, H.S.; RAZAK, H.A.; Efficiency of calcined kaolin and sílica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*, Inglaterra, 2005.

ZAMPIERI, V.A; *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. São Paulo, 1989.

APÊNDICE A

I. RESULTADOS COMPLETOS OBTIDOS NO ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER

a) Cimento Portland

Ref da amostra	: CPI - CIPLAN	Ultrasom	: 60	s
Produto	: Cimento	Concentração	: 171	
Cliente	: CIPLAN	Diâmetro a 10%	: 1.06	mu
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 10.82	mu
Líquido	: Water (eau)	Diâmetro a 90%	: 33.44	mu
Agente dispersante	: nenhum	Diâmetro médio	: 14.58	mu
Operador	: Romario Melo	Fraunhofer		
Empresa	: Votorantim Cimentos	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Sobradinho - DF	Superfície específica	-----	
Data : 15/05/2017	Hora : 08:30:20	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1228	Medida./Limp.	: 60/60/4	
		SOP : ACIL & Weber		

Valores cumulativos particulares					in volume / passante					
x	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
Q3	0.15	2.99	4.86	7.20	9.57	14.65	18.93	23.31	27.60	31.79
x	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	25.00	30.00	35.00
Q3	39.81	47.18	53.68	59.33	64.18	68.41	72.15	80.09	86.53	91.43

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Valores cumulados característicos					in volume / passante					
x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	1.62	4.01	5.89	9.57	11.96	14.65	17.18	19.81	23.31	27.60
q3	0.94	1.10	1.32	2.43	1.67	1.78	2.27	2.98	3.69	4.52
x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	31.79	39.81	47.18	53.68	61.85	72.15	80.09	88.67	92.23	97.28
q3	5.40	6.56	7.76	8.38	8.60	8.42	8.36	8.17	7.11	5.32
x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	99.52	99.89	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	2.40	0.75	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

b) Argila calcinada

Ref da amostra : ARGILA - CIPLAN
 Produto : Quartzo
 Cliente : CIPLAN
 Comentários :
 Líquido : Álcool
 Agente dispersante : nenhum
 Operador : Romario Melo
 Empresa : Votorantim Cimentos
 Localização : Sobradinho - DF
 Data : 15/05/2017 Hora : 08:59:23
 Índice med. : 1231

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 152
 Diâmetro a 10% : 1.72 μ
 Diâmetro a 50% : 13.91 μ
 Diâmetro a 90% : 43.91 μ
 Diâmetro médio : 19.06 μ
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ACIL & Weber

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
Q3	0.06	1.45	2.64	3.78	4.92	11.93	19.01	24.23	28.22	31.52
x	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	25.00	30.00	35.00
Q3	37.00	41.76	46.10	50.10	53.79	57.24	60.47	67.93	74.86	81.26

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	0.75	2.07	3.20	4.92	7.35	11.93	16.42	20.18	24.23	28.22
q3	0.42	0.59	0.76	1.10	1.64	2.92	3.88	4.12	4.12	4.07
x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	31.52	37.00	41.76	46.10	51.98	60.47	67.93	77.51	82.43	90.93
q3	4.11	4.33	4.85	5.41	5.99	6.71	7.59	8.82	9.51	8.66
x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	96.80	98.56	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	6.09	3.40	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μ Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

c) Fíler calcário

Ref da amostra : FILLER - CIPLAN
 Produto : Quartzo
 Cliente : CIPLAN
 Comentários :
 Líquido : Álcool
 Agente dispersante : nenhum
 Operador : Romario Melo
 Empresa : Votorantim Cimentos
 Localização : Sobradinho - DF
 Data : 15/05/2017 Hora : 09:44:25
 Índice med. : 1232

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 220
 Diâmetro a 10% : 39.89 μ m
 Diâmetro a 50% : 117.90 μ m
 Diâmetro a 90% : 327.33 μ m
 Diâmetro médio : 152.05 μ m
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ACIL & Weber

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
Q3	0.03	0.45	0.69	0.86	1.02	1.76	2.51	3.05	3.47	3.83
x	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	25.00	30.00	35.00
Q3	4.45	4.94	5.34	5.72	6.10	6.49	6.88	7.78	8.52	9.17

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	0.27	0.59	0.78	1.02	1.31	1.76	2.23	2.63	3.05	3.47
q3	0.15	0.14	0.13	0.15	0.19	0.28	0.41	0.43	0.42	0.42
x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	3.83	4.45	4.94	5.34	5.91	6.88	7.78	8.78	9.31	10.82
q3	0.45	0.48	0.49	0.50	0.57	0.75	0.90	0.92	0.99	1.52
x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	14.06	17.10	33.50	47.06	59.83	69.62	75.15	82.60	88.09	100.00
q3	3.33	5.79	10.32	13.90	12.84	8.74	5.67	7.49	10.45	11.19

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

APÊNDICE B

II) RESULTADOS COMPLETOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os valores marcados com * são os que tiveram desvio relativo máximo superior a 6% e houve a necessidade de eliminar um dos valores e calcular uma nova média.

Idade (dias)	Traço	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					Desvio (%)	Índ de desempenho (%)
		CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	Média		
1	0:0	15,74	15,97	16,12	16,14	15,99	1,59	-
	1:2	6,42*	5,14	5,35	5,35	5,28	2,57	33,01
	2:1	8,81	9,22	8,84	8,86	8,93	3,21	55,85
	3:1	7,54	7,59	7,64	7,64	7,60	0,84	47,53
	1:1	7,84	7,64	7,49	7,74	7,68	2,49	48,01
3	0:0	26,05	28,29	26,51	26,84	26,92	5,08	-
	1:2	18,49	17,47	17,72	19,00	18,17	4,56	67,49
	2:1	23,48	22,56	22,87	22,54	22,86	2,70	84,91
	3:1	22,26	22,31	22,77	22,00	22,33	1,94	82,95
	1:1	21,54	21,85	20,73	19,91	21,01	5,21	78,03
7	0:0	32,80	31,70	35,88*	34,58	33,03	4,70	-
	1:2	27,73	29,92*	27,81	26,25	27,26	3,70	82,55
	2:1	33,41	34,99	34,96	36,47	34,96	4,43	105,84
	3:1	31,45	31,78	32,16	32,65	32,01	1,75	96,92
	1:1	27,88	29,31	30,00	30,07	29,32	4,89	88,76
28	0:0	45,51	45,28	46,42	43,54	45,19	3,63	-
	1:2	35,70	35,45	35,19	35,80	35,54	0,97	78,64
	2:1	41,69	43,34	41,05	40,41	41,62	4,13	92,11
	3:1	45,38	43,29	44,31	43,54	44,13	2,83	97,66
	1:1	41,10	39,27	37,33	39,93	39,41	5,27	87,21