



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**CIMENTOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL (LC³) A PARTIR DOS
RESÍDUOS CAULÍNÍDICOS DA AMAZÔNIA**

Euler Santos Arruda Junior

Belém-PA
Fevereiro de 2020

Euler Santos Arruda Junior

**CIMENTOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL (LC³) A PARTIR DOS
RESÍDUOS CAULINÍTICOS DA AMAZÔNIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, na linha de Tecnologias Construtivas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Santos Barata.

Belém-PA

Fevereiro de 2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S237c Santos Arruda Junior, Euler
CIMENTOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL (LC3) A
PARTIR DOS RESÍDUOS CAULINÍTICOS DA AMAZÔNIA /
Euler Santos Arruda Junior. — 2020.
150 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Márcio Santos Barata
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2020.

1. LC3. 2. cimento de baixa emissão de CO2. 3. Avaliação
do Ciclo de Vida. 4. resíduos cauliniticos Amazônicos. 5.
sustentabilidade. I. Título.

CDD 691

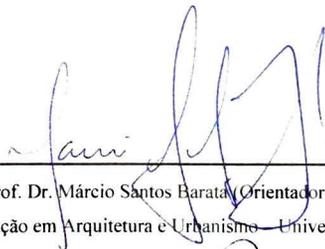
Euler Santos Arruda Junior

**CIMENTOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL (LC³) A PARTIR DOS
RESÍDUOS CAULÍNÍTCOS DA AMAZÔNIA**

Belém, 06 de fevereiro de 2020

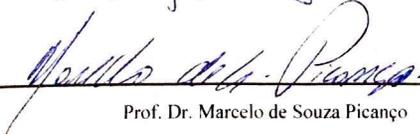
CONCEITO: EXCELENTE

Banca examinadora:



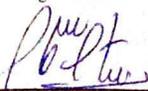
Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Orientador)

Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Oscar Jesus Choque Fernandez

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais – Instituto Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser o criador da vida e o caminho para a paz interior.

À Nossa Senhora de Nazaré, que sempre acompanha minha família em todos os momentos de nossas vidas.

À minha família pela ajuda incondicional durante toda minha formação. Em especial aos meus pais pelos seus bons exemplos de vida, apoio a cada conquista ou dificuldade.

À minha esposa Bruna Norat Bezerra em me apoiar e entender meu cansaço na reta final desta dissertação; e meu filho Gabriel, que é a razão pela qual esta etapa está sendo encerrada.

Agradeço de modo especial ao meu orientador Professor Dr. Márcio Barata que além de orientação e apoio, proporcionou toda a estrutura para o meu desenvolvimento acadêmico, por ter acompanhado o desenvolvimento deste trabalho desde o começo, pela paciência com as minhas dúvidas, por todo cuidado com cada etapa do nosso trabalho, e pela oportunidade de trabalhar com ele dentro de uma área extremamente interessante.

À Universidade Federal do Pará – UFPA pela infraestrutura e a qualidade de ensino com seus professores e laboratórios.

Ao Instituto de Tecnologia (ITEC), pela oportunidade de aprendizado ao longo dos anos do curso de graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo pela oportunidade de defesa deste trabalho e ensinamentos passados em cada disciplina ministrada.

À Votorantim Cimentos pelas informações, materiais fornecidos e treinamentos.

À todos em geral, familiares e amigos, que através de orações e incentivos me deram forças para enfrentar as grandes dificuldades da vida.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein.

RESUMO

O emprego de adições minerais como substituição parcial do clínquer no cimento Portland tem sido uma das principais estratégias para redução da emissão de CO₂ por parte da indústria mundial do cimento. Contudo, a disponibilidade de escórias de alto forno e cinza volante não supre a demanda. Na Amazônia, as indústrias de beneficiamento de caulim como cobertura para papel já depositaram cerca de 70 milhões de toneladas de resíduos constituídos essencialmente por caulinita extremamente fina. Uma alternativa para a região seria o emprego do cimento Portland com adições minerais de calcário e argila calcinada para a produção de um cimento de baixa emissão de CO₂ - LC³ (*limestone calcined clay cement*). O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades desses cimentos LC³ com elevadas incorporações de calcário e da metacaulina proveniente do resíduo do processamento do caulim. Os níveis de substituição das adições minerais sobre a massa de cimento Portland comum foram de 45% e 60%. As variáveis investigadas foram massa específica, área superficial específica Blaine, água de consistência e tempo de pega inicial e final dos cimentos, além das resistências à compressão de argamassas. As incorporações das misturas metacaulina-calcário aumentaram a demanda de água e reduziram os tempos de pega em razão da elevada finura da caulinita. Entretanto, houve acréscimos significativos de resistência à compressão em comparação aos cimentos Portland comum e composto, demonstrando a alta eficiência deste ligante o qual atingiu resistência a compressão de até 62,3 MPa aos 91 dias. Quanto à pegada de carbono produzida pelos cimentos LC³. Os resultados demonstraram uma redução em 20% a 38% das emissões de CO₂ em relação ao CII F 40. Ainda, evidenciou-se a ampla aplicabilidade da ferramenta ACV ao setor da construção. Os resultados são promissores, mas requerem estudos mais aprofundados, principalmente no que tange aos aspectos de reologia, durabilidade frente à alta demanda de água destes cimentos, elevada tendência à retração e à baixa alcalinidade e, principalmente, quanto a viabilidade econômica quando combinada com outras ações de mitigação das emissões como o aumento da eficiência energética combinada com o emprego de combustíveis alternativos.

Palavras-chave: resíduos cauliniticos, LC³, cimento de baixa emissão de CO₂, Avaliação do Ciclo de Vida, cimentos de baixa demanda de energia, Amazônia, sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of mineral additions as a partial replacement of clinker in Portland cement has been one of the main strategies for reducing CO₂ emissions by the global cement industry. However, the availability of blast furnaces and fly ash does not meet demand. In the Amazon, the kaolin processing industries as a cover for paper have already deposited around 70 million tons of waste consisting essentially of extremely fine kaolinite. An alternative for the region would be the use of Portland cement with mineral additions of limestone and calcined clay for the production of a low CO₂ cement - LC³ (limestone calcined clay cement). The objective of this work was to evaluate the properties of these LC³ cements with high incorporations of limestone and metakaolin from the kaolin processing residue. The levels of substitution of mineral additions on the common Portland cement mass were 45% and 60%. The investigated variables were specific mass, specific surface area Blaine, water of consistency and time of initial and final setting of the cement, in addition to the resistance to mortar compression. The incorporations of the metakaolin-lime mixtures increased the water demand and reduced the setting times due to the high fineness of the kaolinite. However, there were significant increases in compressive strength compared to common and compound Portland cements, demonstrating the high efficiency of this binder which reached compressive strength of up to 62.3 MPa at 91 days. As for the carbon footprint produced by LC³ cements. The results showed a 20% to 38% reduction in CO₂ emissions compared to CII F 40. Furthermore, the wide applicability of the LCA tool to the construction sector was evidenced. The results are promising, but require further studies, especially with regard to the aspects of rheology, durability in view of the high water demand of these cements, high tendency to retraction and low alkalinity and, mainly, regarding economic viability when combined with other actions to mitigate emissions such as increasing energy efficiency combined with the use of alternative fuels.

Keywords: kaolinitic waste, LC³, low CO₂ emission cement, life cycle assessment, low energy demand cements, Amazônia, sustainability.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	8
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. IMPACTO AMBIENTAL DO CIMENTO PORTLAND	9
2.2 MEDIDAS MITIGADORAS PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂	15
2.2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	17
2.2.2 UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS.....	18
2.2.3 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO	19
2.2.4 ADIÇÕES MINERAIS	22
2.3 CIMENTO LC³	32
2.3.1 DEFINIÇÃO E PROCESSO	33
2.3.2. PROPRIEDADES.....	34
2.3.3 O CIMENTO LC³ NOS DIAS ATUAIS.....	44
2.3.4 OUTRAS APLICAÇÕES	50
2.4 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV).....	52
2.4.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E SUA APLICAÇÃO A MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	53
2.4.2 ACV E A INDÚSTRIA DO CIMENTO.....	54
2.4.3 ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	56
2.4.3.1 DEFINIÇÃO DE ESCOPO E OBJETIVO	57
2.4.3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	59
2.4.3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA.....	61
2.4.3.4 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA	62
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1. ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA	63
3.2. ETAPA II - PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS LC³..	68
3.2.1 ENSAIOS NO CIMENTO ANIDRO	70
3.2.2 ENSAIOS E MINERALOGIA DAS PASTAS.....	70
3.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	71
3.2.4 COLORIMETRIA	71

3.3. ETAPA III - AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL ATRAVÉS DA DEMANDA DE ENERGIA E DA EMISSÃO DE CO₂	73
3.3.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO	74
3.3.1.1 O SISTEMA DO PRODUTO	74
3.3.1.2 UNIDADE FUNCIONAL	75
3.3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO	75
3.3.2.1 TRANSPORTE	76
3.3.2.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂ NO PROCESSO DE CALCINAÇÃO	77
3.3.2.3 ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNO ROTATIVO	78
3.3.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO AMBIENTAL	78
3.3.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	80
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA	80
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	80
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	84
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS LC³	88
4.2.1 CIMENTOS ANIDROS	88
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS EM PASTA	89
4.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS EM ARGAMASSA	97
4.2.3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	98
4.3 IMPACTO AMBIENTAL ATRAVÉS DA EMISSÃO DE CO₂	103
4.3.1 TRANSPORTE	103
4.3.2 ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNO ROTATIVO	104
4.3.3 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂	106
5. CONCLUSÃO	115
5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	117
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Deposição dos resíduos cauliniticos em lagoas de sedimentação Lançamento das polpas nas lagoas. (b) Bombeamento da polpa de caulim para as lagoas no estágio inicial; (c) Lagoa de sedimentação preenchida com a polpa de caulim, (d) Tubo extravasor por onde a água da polpa é removida da lagoa.	5
Figura 2 - Imagem de satélite das instalações da CADAM SA, em Munguba, Monte Dourado, Município de Almerim-PA.	5
Figura 3 - Perfil esquemático mostrando o caulim "soft", o "flint" e as camadas sobrepostas.	6
Figura 4 - Comparação dos dados de cimento (CEMBUREAU, 2015) e produção de aço bruto (World Steel Association 2015) com população mundial (Divisão de População da ONU 2015).	9
Figura 5 - Etapas de produção do cimento Portland.....	13
Figura 6 - Emissão Específica Kg CO ₂ / Tonelada de Cimento.....	15
Figura 7a - Reduções de emissões de CO ₂ no setor de cimento 2006–2050, para cenários de baixa demanda.	16
Figura 8 - Estimativa aproximada do potencial de mitigação de novas tecnologias de cimento em função da participação de mercado para o cenário de 2050.	22
Figura 9 - Uso de adições minerais do Cimento.	23
Figura 10 - Disponibilidade de adições minerais.	25
Figura 11 - Potencial de mitigação em função da participação de mercado para o cenário de baixa demanda de 2050.....	29
Figura 12 - Impacto do teor de caulinita calcinada na resistência de argamassas para misturas de 50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso em argamassas.	35
Figura 13 - Refinamento da estrutura de poros das pastas com diferentes classes de argilas calcinadas empregadas em cimentos LC3 -50 (50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário, 5% de gesso).	38
Figura 14 – Concentração de Cloreto (a) C35 e (b) concreto C50 (% Cs).....	40
Figura 15 - Limiar de cloretos para o início da corrosão do vergalhão em argamassas CPC, CV e LC3.	41
Figura 16 - Funções de distribuição cumulativa de tempo de início da corrosão.	42
Figura 17 – Emissões por ano de vida útil do Concreto.....	43
Figura 18 - Comparação de custos de fabricação.....	45
Figura 19 - Potencial de aquecimento global (PAG) relativo ao impacto da produção de cimento em Cuba.	47
Figura 20 - Emissões de CO ₂ para concretos de 30 MPa.	48
Figura 21 - Emissões de CO ₂ para concretos de 50 MPa.	48

Figura 22 - Influencia do cimento na cor final.	51
Figura 23 - Emissões médias de CO ₂ na produção de 1 kg de cimento Portland em diferentes regiões.	56
Figura 24 - Fases da ACV.	57
Figura 25 - Categorias de fluxo de materiais de um inventário.	60
Figura 26 - Fluxograma com as atividades desenvolvidas na 1ª etapa.	63
Figura 27 – Localização e distância das matérias primas até a fábrica de cimento: a) calcário, distante 5km; b) CF, distante 230 km; c) gipsita, distante 645 km; d) minério de ferro, distante 813 km.	65
Figura 28 - Fluxograma das atividades desenvolvidas na 2ª etapa.	69
Figura 29 – Medição colorimétrica com gabarito.	72
Figura 30 - Delimitação das fronteiras do estudo de ACV comparativo.	75
Figura 31 – Difratoograma de raios-X do CF in natura.	81
Figura 32 – Difratoograma de raios-X do MC (CF calcinado e moído).	81
Figura 33 – Difratoograma de raios-X do calcário.	82
Figura 34 – Difratoograma de raios-X do CP I 40.	82
Figura 35 – Curvas granulométricas.	84
Figura 36 - Frequência das partículas do metacaulim moído.	86
Figura 37 - Frequência das partículas do calcário moído.	87
Figura 38 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas ao 1 dia.	90
Figura 39 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 3 dias.	91
Figura 40 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 7 dias.	91
Figura 41 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 28 dias.	92
Figura 42 – Tempos de início e fim de pega.	94
Figura 43 – Metacaulim Pós-moagem.	94
Figura 44 – Luminosidade dos cimentos analisados.	95
Figura 45 – Cor nas pastas dos cimentos analisados.	96
Figura 46 – Desenvolvimento de resistência à compressão para diversas idades.	99
Figura 47 – Resistências normalizadas em relação ao CPI 40.	102
Figura 48 – Resistência normalizada em relação ao CII F 40.	102
Figura 49 - As emissões de CO ₂ de cada etapa do processo de produção dos cimentos avaliados.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Óxidos e composição dos compostos de um cimento Portland típico.....	12
Tabela 2 - Fatores de emissão potencial de mitigação.	21
Tabela 3 - – Materiais constituintes e propriedades dos concretos.	39
Tabela 4 – Composição dos cimentos LC ³	69
Tabela 5 – Análises químicas dos materiais de partida.	83
Tabela 6 - Massa específica e Diâmetros referentes a 10%, 50%, 90% do material passante.....	85
Tabela 7 – Massa específica e área superficial Blaine.	88
Tabela 8 – Água de consistência e tempo de pega inicial e final.	93
Tabela 9 - Parâmetros L*a*b* para cimentos analisados.....	95
Tabela 10 - Diferenças de luminosidade, cromáticas e total (ΔL^* , Δa^* , Δb^* ΔE^*).....	96
Tabela 11 - Dosagem de aditivo superplastificante e espalhamentos obtidos.....	97
Tabela 12 – Resistência a compressão (MPa) absolutos e normalizados em relação ao CPI (%).	98
Tabela 13 – Consumo de combustível e emissão de CO ₂ por tonelada transportada..	103
Tabela 14 – Emissão de CO ₂ (kg/Ton de cimento) referente transporte das matérias primas.	104
Tabela 15 - Dados para a estimativa do consumo energético durante a clínquerização.	105
Tabela 16 – Demanda Energética para calcinação.	105
Tabela 17 – Emissão de CO ₂ (Kg/Ton cimento) oriundas da reação química de descarbonatação da calcita.....	107
Tabela 18 - Resultados da pegada de carbono dos cimentos avaliados.....	108
Tabela 19 - Indicadores-chave para a indústria brasileira de cimento até 2050.....	110
Tabela 20 - Indicadores de eficiência dos LC ³ e o fator clínquer.....	112

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

:	Proporção
°C	Graus Celsius
A	Aluminato
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileiro de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ACV	Avaliação do ciclo de vida
Al ₂ O ₃	Trisulfoaluminato (etringita) Alumina
BAT	Melhor Tecnologia Disponível
BMCC	Building Material and Component Combinations
BYF	Belita-yemelita-ferrita e o sulfoaluminato de cálcio
C ₃ A.Cc.H ₁₂	Carboaluminato hidratado
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CAD	Concreto de Alto desempenho
CADAM	Caulins da Amazônia S.A.
CaO	Óxido de cálcio (cal livre)
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
Cc	Carbonato de cálcio (fíler calcário)
CCS	Captura e armazenamento de CO ₂
CCU	Utilização de captura de carbono
CEMBUREAU	<i>European Cement Association</i>
CExD	<i>CumulativeExergyDemand</i>
CF	<i>Caulim Flint</i>
CH	Hidróxido de cálcio
Cm	Centímetros
cm ²	Centímetro quadrado
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

COP	Conferência das Partes
CP	Corpo de prova
CPI	Cimento Portland tipo I
CPC	Cimento Portland comum
Cradle to gate	<i>Berço ao portão</i>
Cs	Concentração de cloreto na superfície
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	Cinza volante
dm³	Decímetro cúbico
DRX	Difração de raios-X
EGAF	Escória de alto forno granulada
EPFL	Escola Politécnica Federal de Lausana
F2O3	Óxido de ferro
Fck	Resistência a compressão (Mpa)
g	Gramas
GEE	Gases de efeito estufa
Hc	Hemicarboaluminatos
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IIT	Instituto Indiano de Tecnologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRCC	Imerys Rio Capim Caulim
K2O	Óxido de potássio
Kg	Quilograma
LC³	<i>Calcined clay limestone cement</i>
m	Metro
MAA	Materiais álcali-ativados
MC	Metacaulim
Mc	Monocarboaluminatos
MCAR	Metacaulim de alta reatividade
MgO	Óxido de magnésio (Magnésio livre)
Min	Minutos
MnO	Óxido de manganês

MPa	Mega Pascal (10 ⁶ Pa)
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma MERCOSUL
PAG	Potencial de aquecimento global
PPC	Cimento pozolânico
PPSA	Pará Pigmentos SA
RBC	Resíduo do beneficiamento do caulim
SINAT	Sistema Nacional de Avaliação Técnica
SiO₂	Óxido de silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
SO₃	Óxido sulfúrico
TiO₂	Dióxido de titânio
UNEP-SBCI	Programa Ambiental das Nações Unidas para a Construção Sustentável e Clima
WBCDS	<i>World Business Council or Sustainable Development</i>
WPC	<i>Whole Process of the Construction</i>
µm	Micrômetro (10 ⁻⁶ m)

1. INTRODUÇÃO

A maior parte do aumento do aquecimento global que vem ocorrendo ao longo dos anos é decorrente de causas associadas às atividades humanas. Essas atividades estão presentes em diversos setores da economia mundial, e são responsáveis pela intensificação do efeito estufa. Os processos industriais, por exemplo, são cruciais no aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa, principalmente de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases mais abundantes e preocupantes na temática do aquecimento global (ISAKSSON, 2016).

A produção do concreto é responsável por cerca de 5 a 8% da emissão de CO₂ mundial, sendo o cimento responsável por 95% deste total (HUNTZINGER, 2009). Em 2014, os países emergentes, dentre os quais China, Índia, Rússia, África do Sul e Brasil, foram responsáveis por 81% do total da produção mundial enquanto que os países industrializados, cujo foco é voltado para a manutenção, responderam por apenas 9% (CEMBUREAU, 2014). A tendência é que os países em desenvolvimento demandem 2,5 vezes a mais por produtos à base de cimento até 2050 (TAYLOR, 2006) o que fará com que a fabricação de cimento seja responsável por aproximadamente 30% das emissões globais antropogênicas de CO₂ (IEA, WBCSD, 2009).

Por mais que as emissões de CO₂ diminuam por conta de ações tomadas pelas indústrias cimenteiras como a melhoria na eficiência dos fornos, a modificação dos combustíveis e a substituição do clínquer por cinzas volantes e escória de alto-forno, estas não serão suficientes para fazer frente ao aumento de produção do cimento. Novas alternativas estão sendo investigadas como os geopolímeros ou o aumento na eficiência dos ligantes (MCLELLAN, 2011; WASSERMANN, 2009; HABERT, 2011), entretanto, são soluções ainda distantes de serem aplicadas em escala industrial.

O aumento do uso de materiais cimentícios e pozolânicos (adições minerais) ainda é uma das melhores alternativas para redução da emissão de CO₂ e do consumo de matéria-prima. Contudo, esta solução esbarra na disponibilidade limitada dos materiais cimentícios. A escória de alto forno representa apenas de 5 a 10% da produção de cimento e a cinza volante cerca de 30%, sendo que há muita variabilidade na qualidade desta, o que faz com que apenas 10% seja aproveitada efetivamente como adição ao cimento (SNELLINGS, 2016).

Entretanto, estudos recentes vêm demonstrando que o uso combinado da argila calcinada e do calcário possui grande potencial para ser empregado em percentuais de até 45% de substituição de clínquer no cimento, sem que haja perda nas propriedades mecânicas. Pelo contrário, o cimento com calcário e argila caulinítica calcinada, denominado na literatura como LC³ (*limestone calcined clay cement*), apresenta resistências à compressão superiores tanto aos 7 quanto aos 28 dias (BERRIEL SANCHEZ, 2016; VISCAÍNO-ANDRÉS, 2015; BISHNOI, 2014).

O carbonato de cálcio presente no calcário reage com os aluminatos da metacaulinita, formando monocarboaluminatos (Mc) e hemicarboaluminatos (Hc) ao invés de monossulfatos, estabilizando a etringita e preenchendo os espaços vazios. Ambos os aspectos contribuem para a durabilidade e o aumento das resistências iniciais e finais (LOTHENBACH, 2008).

Além das vantagens técnicas relacionadas à durabilidade e às propriedades mecânicas, o LC³ atende aos critérios da viabilidade econômica, baixo custo de investimento e disponibilidade fácil de matérias primas, pois emprega os mesmos insumos da produção do cimento: argila e calcário. Por esta razão não requer altos investimentos em equipamentos e o processo de fabricação pode ser mais facilmente adaptado ao sistema de produção existente. Outro aspecto favorável ao novo cimento de mistura ternária é que pode ser produzido a partir a matérias-primas de baixa qualidade, normalmente descartadas nos processos industriais pelo baixo teor do mineral de interesse como, por exemplo, o caulim com reduzidos percentuais de caulinita e os calcários dolomíticos (CANCIO DIAZ, 2017).

Resultados demonstram que o efeito sinérgico da combinação da argila calcinada e do calcário no cimento Portland é muito mais intenso do que se ambos estivessem presentes isoladamente no sistema binário com cimento Portland. No sistema ternário metacaulim-calcário-cimento Portland, todo o hidróxido de cálcio (CH) é consumido, o que torna esse sistema mais vulnerável à carbonatação (ANTONI, 2012). Este e outros aspectos da durabilidade estão sendo estudados. Contudo, resultados demonstraram que os produtos com LC³ apresentam boa proteção às armaduras, excelente resistência à penetração de cloretos, boa mitigação da reação álcali-agregado com agregados reativos, bom desempenho frente à presença de sulfatos e carbonatação, comparável a outros cimentos com adições minerais (SCRIVENER, 2018).

Iniciativas de produção em escala piloto estão sendo desenvolvidas na Índia e em Cuba, que são países com grande potencial de ampliação de sua infraestrutura, que demandarão consumos de cimento em larga escala. Tanto os estudos científicos quanto as tentativas de produção industrial fazem parte do escopo do *LC³ Project*, que é uma iniciativa de pesquisadores suíços, cubanos e indianos, com o aporte financeiro da Agência Suíça para o Desenvolvimento e Cooperação através de seu Programa Global sobre Mudanças Climáticas (www.lc3.ch).

Outro país que possui grande potencial para a produção deste cimento de baixa emissão de CO₂ é o Brasil por conta da ampla disponibilidade de caulim e calcário. O clima do país, que varia de equatorial úmido a subtropical, favoreceu a formação geológica de grandes depósitos de caulins primários e secundários ao longo de toda a sua extensão territorial. No passado, a engenharia brasileira empregou argilas cauliniticas calcinadas na produção de concreto-massa para construção de barragens com intuito de inibir a reação álcali-agregado (SAAD, 1992). Em regiões onde não há disponibilidade de escórias e cinzas volantes, como, por exemplo, na Amazônia, cimentos pozolânicos eram até então fabricados com até 35% de caulim calcinado (BARATA, 2007). Entretanto, com a publicação da norma ABNT NBR 16.697: *Cimento Portland – Requisitos* em julho de 2018, hoje é possível fabricar o cimento CP II F com até 25% de incorporação de calcário ao invés dos 10%, o que fez com que praticamente todas as fábricas de cimento deixassem de produzir cimentos compostos pozolânicos (CP II Z e CP IV) em razão da menor demanda de energia do primeiro.

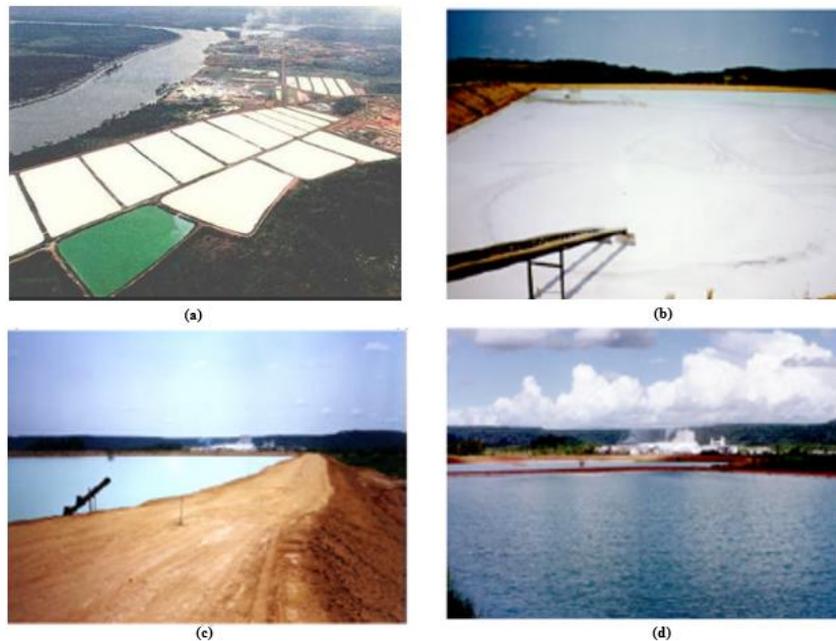
Nos trabalhos desenvolvidos pelo *LC³ Project* as argilas calcinadas empregadas na composição dos cimentos LC³ não possuem teor de caulinita superior a 65% por questões econômicas, visto que o metacaulim (MC) custa três vezes o preço do cimento Portland (AVET, 2018). Entretanto, na Amazônia, a situação é diferente, pois, além de possuir os mais variados tipos de depósitos de caulim, de baixa a elevada concentração de caulinita, com e sem a presença de hidróxidos e óxidos de ferro, são também gerados e depositados resíduos ricos em caulinita oriundos das atividades de mineração e beneficiamento dos caulins secundários como cobertura de papel. Hoje, estes resíduos não possuem nenhum tipo de valor agregado porque são passivos ambientais.

O Brasil é classificado como o quinto produtor mundial de caulim, com uma produção de cerca de 1,74 milhões de toneladas por ano (BRASIL, 2017). As reservas de

caulim secundário, cujas características são as mais apropriadas para o uso como cobertura de papel por causa da alta concentração de caulinita com partículas inferiores a $2\mu\text{m}$, estão localizadas na Amazônia, principalmente no Estado do Pará, onde estão instaladas as principais empresas de beneficiamento de caulim do mundo: a Imerys Rio Capim Caulim (IRCC), a Pará Pigmentos SA (PPSA) e a CADAM SA (LOUGH BROUGH, 1993; KENDALL, 1996). No processo de beneficiamento do caulim é gerado um resíduo com excelentes características técnicas para a produção do metacaulim de alta reatividade (MCAR), o que se constitui em outra vantagem para produção do cimento LC³ porque é extremamente uniforme, constituindo essencialmente por uma caulinita extremamente fina ($> 90\%$, $D_{50} 2\mu\text{m}$), de alta ou baixa cristalinidade, dependendo do tipo de depósito, com teores acima de 90% de caulinita (BARATA, 2007). Na Amazônia, estima-se que as quantidades depositadas deste resíduo do beneficiamento do caulim (RBC) sejam de 14,8 milhões de toneladas e no estágio atual de produção, aproximadamente 450 mil toneladas são depositadas anualmente em lagoas de sedimentação (Figuras 1 e 2) (BARATA, 2007; BRASIL, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016).

Outro resíduo que possui viabilidade de aplicação é o caulim tipo *Flint* (CF), material estéril, descartado no processo de lavra do caulim por não se desmanchar na água e possuir uma coloração bege devido a maior concentração de hidróxidos e óxidos de ferro. O CF é sobreposto ao caulim soft, o minério de interesse para o beneficiamento para a indústria de papel (Figura 1). Normalmente, as camadas de caulim Flint variam entre 6 a 10 metros enquanto o caulim soft, entre 4 a 7 metros. Estima-se a quantidade de CF descartada na lavra um pouco acima dos 50 milhões de toneladas, muito mais significativa que o RBC depositado nas lagoas. Assim como o RBC, o CF é constituído essencialmente por caulinitas extremamente finas, na ordem entre 0,2 a 0,8 μm , cuja cristalinidade varia de maior a menor quantidade de defeitos, dependendo do tipo de jazida e do nível (profundidade) em que a amostra de caulim é extraída. Atualmente uma fábrica de cimento da VOTORANTIM, localizada em Primavera, nordeste do Pará (205 km de Belém), já emprega o CF para correção do percentual de alumínio na produção do clínquer.

Figura 1 - (a) Deposição dos resíduos cauliniticos em lagoas de sedimentação
Lançamento das polpas nas lagoas. (b) Bombeamento da polpa de caulim para as lagoas
no estágio inicial; (c) Lagoa de sedimentação preenchida com a polpa de caulim, (d)
Tubo extravasador por onde a água da polpa é removida da lagoa.



Fonte: Barata (1998)

Figura 2 - Imagem de satélite das instalações da CADAM SA, em Munguba, Monte Dourado, Município de Almerim-PA.

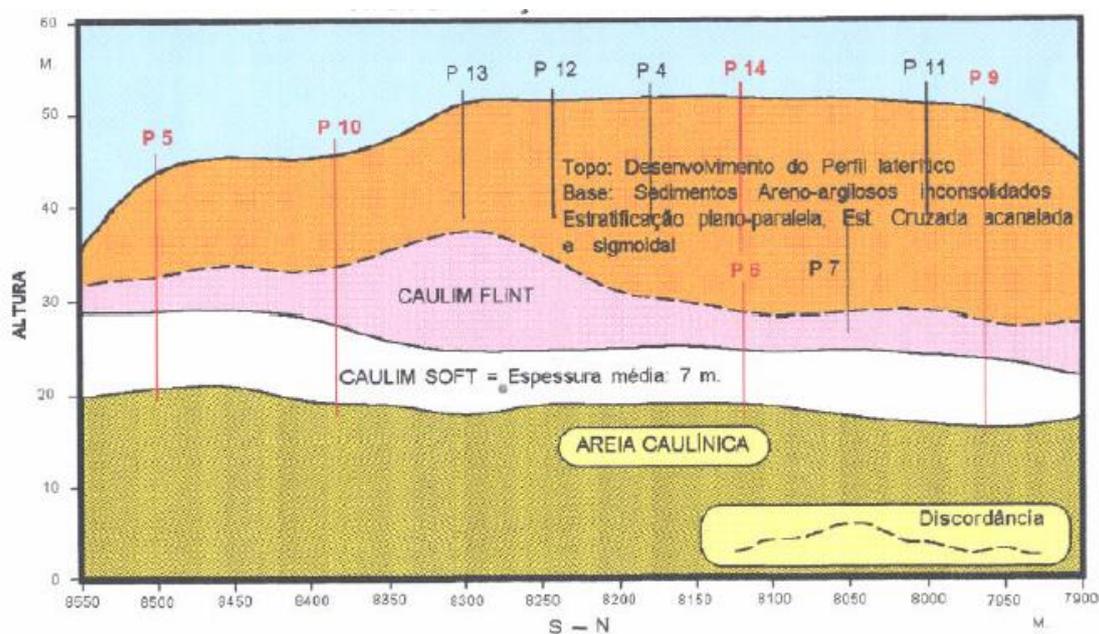


Fonte: elaborado a partir da base de imagens do “software” Google Earth, acessado em 2019.

A diferença entre o CF e o RBC (Figura 3) é que o primeiro possui condições muito mais favoráveis economicamente de emprego na produção de materiais cimentícios suplementares do que o segundo. O CF, como é um material de lavra, sua umidade natural

varia entre 15 e 25%, sendo depositado no próprio local da cava, ao passo que o RBC é despejado nas lagoas de sedimentação, na forma de polpa, com cerca de 65 a 68% de umidade. O CF necessita de quantidades muito menores de energia para transporte e secagem que o RBC. Nesta pesquisa, a investigação foi direcionada para o CF, tendo em vistas suas vantagens econômicas, operacionais e sua relevância ambiental em relação ao RBC, embora este seja um problema cuja magnitude ambiental seja bastante relevante pela forma como é acondicionado, em barragens ou lagoas de sedimentação.

Figura 3 - Perfil esquemático mostrando o caulim "soft", o "flint" e as camadas sobrepostas.



Fonte: Sousa (2000).

A fabricação do cimento Portland além de consumir grande quantidade de energia para a produção do clínquer, também é responsável pela liberação para a atmosfera de grande quantidade de CO₂ em decorrência da decarbonatação do calcário ao ser queimado em torno de 1.450° C. Parte dessas emissões podem ser reduzidas com o uso de argilas caulínicas calcinadas em conjunto com fíler calcário como materiais suplementares ao cimento, constituindo-se em uma alternativa para mitigar o impacto ambiental. A calcinação do CF a temperaturas próximas de 800° C já é amplamente conhecido como uma adição mineral pozolânica de alta reatividade, com características semelhantes as identificadas nas pozolanas comerciais baseadas em metacaulim

(BARATA, 2007; BARATA E ANGÉLICA, 2012; AZEREDO *et al.*, 2015; DIAS *et al.*, 2012; FRÍAS *et al.*, 2012).

Diante desta constatação científica, parte-se da hipótese que ao se empregar na produção do LC³ um metacaulim de alta reatividade (MCAR), proveniente do CF, com alto teor de caulinita (> 90% caulinita), seria possível um percentual maior de substituição do clínquer pela mistura de argila calcinada-calcário, algo em torno de 50% a 65%, sem que houvesse perda de resistência do cimento. A folga de resistência proporcionada pelo MCAR proveniente dos resíduos caulíníticos poderia permitir a produção de LC³ com percentuais de substituição de clínquer superiores aos 45% que vem sendo empregado nas pesquisas internacionais, sem detrimento da resistência em comparação a do CP II F. O que ocasionaria em ganhos ambientais e econômicos, tendo em vista a grande redução de clínquer em prol da mistura de argila calcinada e calcário, materiais de menor gasto energético e de menor emissão de CO₂.

Além das questões ambientais e do âmbito do desempenho a pouco comentadas, uma outra consequência da possibilidade de produção de LC³ a partir dos resíduos caulíníticos em conjunto com o calcário seria a produção de cimento com tons mais claros (alvos). Isto ocorreria porque estes resíduos possuem elevada alvura, mesmo sendo um resíduo caulínítico não processado, o que ilustra bem o quão elevada é a concentração de caulinita deste minério de caulim. Um cimento com tons mais alvos possui uma maior aceitação de mercado e poderia viabilizar e restabelecer o emprego em maior escala de concretos e argamassas coloridas, uma vez que o cimento branco possui um custo de aquisição três vezes superior ao do cimento Portland comum cinza e sua fabricação foi interrompida no Brasil desde 2008 (SNIC, 2012). O emprego de concretos e argamassas coloridos como componente principal de fachadas internas e externas poderia gerar economia no custo das construções porque eliminaria etapas como a aplicação da massa fina de acabamento (reboco), massa corrida e pintura, ou revestimentos cerâmicos. Tentativas estão sendo realizadas para normalização deste tipo de produto no Brasil, como é o caso da Diretriz SINAT para revestimentos decorativos monocamada em argamassa inorgânica (BRASIL, 2019).

Em suma, a realização de um estudo científico que investigue as condicionantes de produção de cimentos LC³ a partir dos resíduos caulíníticos da região Amazônica seria duplamente relevante do ponto de vista ambiental porque não só possibilitaria a produção

de um cimento que emite menores quantidades de CO₂ e demandaria menos energia como também proporcionaria uma destinação muito mais nobre aos resíduos caulínicos, mitigando o passivo ambiental com a redução do volume depositado na lavra ou em barragens. No caso do CF, diminuiria a probabilidade de ocorrência de rompimentos e ou extravasamento da polpa para os corpos hídricos da região. Outro aspecto positivo do ponto de vista de técnico seria a comprovação da hipótese de maior eficiência do LC³ com os resíduos caulínicos. Neste caso, além das vantagens ambientais citadas anteriormente, estaria se produzindo um ligante de alta eficiência, ou seja, de baixo consumo de clínquer por unidade de volume de concreto ou argamassa.

1.2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade de produção de cimento LC³ a partir do emprego de misturas ternárias compostas pelo resíduo não processado de caulim, calcário e cimento Portland.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização físico-química e mineralógica dos materiais de partida, no caso o cimento Portland CP I – 40, o resíduo não processado de caulim, o caulim *flint* (CF), e o calcário;
- Caracterização físico-química, mineralógica e mecânica dos cimentos LC³ produzidos em diferentes proporções de clínquer, CF e calcário;
- Avaliação das propriedades dos cimentos LC³ em relação ao cimento Portland comercial (CPII – F 40);
- Determinar o impacto ambiental da fabricação do cimento LC³ (“cradle to gate”) em comparação ao do cimento Portland produzido atualmente (CPII – F 40), tendo como variáveis de resposta a emissão de CO₂ e a energia de calcinação.

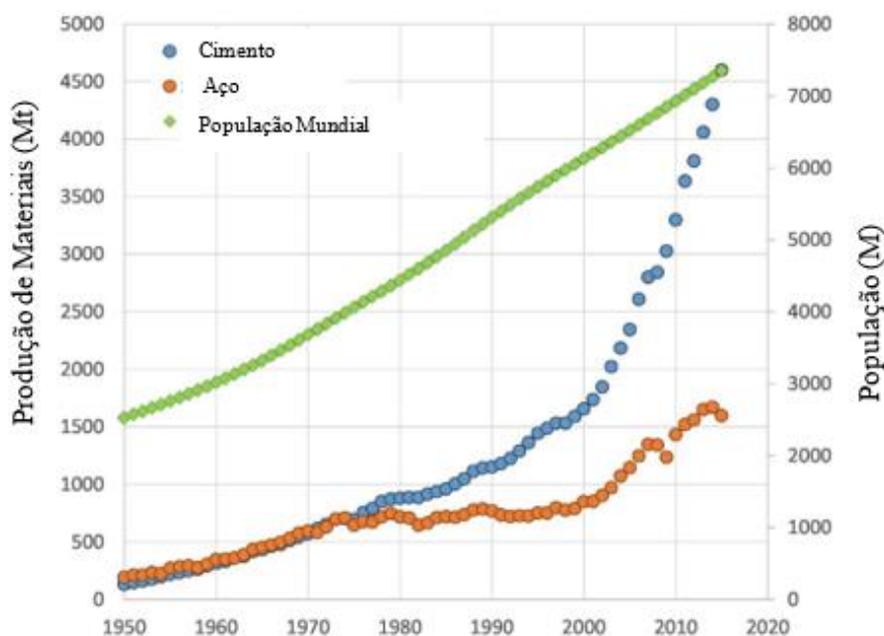
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPACTO AMBIENTAL DO CIMENTO PORTLAND

De acordo com a Associação Europeia de Cimento (CEMBUREAU, 2015), estima-se que em 2015 foram produzidas aproximadamente 4,6 bilhões de toneladas de cimento no mundo, o que resultou em um aumento de 6,3% comparado ao ano anterior.

Sociedades modernas e desenvolvidas exigem um ambiente construído que é inimaginável sem o uso generalizado de materiais à base de cimento que permitem a construção em qualquer lugar, a baixo custo, de formas complexas e maciças. Nos últimos 65 anos, a quantidade de cimento produzida aumentou quase 34 vezes (SNIC, 2012), enquanto isso, a população aumentou menos que três vezes (DIVISÃO DE POPULAÇÃO DA ONU, 2015). Esta taxa de crescimento é muito maior do que outras commodities, como por exemplo o aço (Figura 4) (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2015). A maior disponibilidade per capita de cimento está relacionada a padrões de vida perceptivelmente melhorados na maior parte do mundo.

Figura 4 - Comparação dos dados de cimento (CEMBUREAU, 2015) e produção de aço bruto (World Steel Association 2015) com população mundial (Divisão de População da ONU 2015).



Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2018)

No que diz respeito ao Brasil, o país é o maior produtor da América do Sul e ocupa a 5ª posição entre os maiores produtores de cimento no mundo (SNIC, 2012). Uma elevada produção de cimento, impulsionada por fatores como o crescimento populacional, econômico e das tendências de urbanização mundial, torna-se positiva no âmbito econômico e social. Contudo, apesar de diversos pontos favoráveis e de ser um produto indispensável diante das necessidades de infraestrutura e habitação, a alta da produção de cimento no mundo acarreta também consequências negativas quanto à sustentabilidade e preservação do planeta, causadas principalmente pela elevada taxa de emissão de CO₂ proveniente de seu processo produtivo.

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais e mais abundantes gases na atmosfera, pertencente ao grupo dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Estes gases são apontados como a principal causa de uma das maiores problemáticas ambientais atuais, o aquecimento global.

Este é um problema que atrai a atenção mundial de nações e organizações, que estabeleceram, a partir da Conferência Mundial das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (COP 21), um consenso comum de que o aumento da temperatura global deve ser mantido abaixo de pelo menos 2°C. No entanto, para que esse objetivo seja atingido, são necessárias reduções drásticas no nível de emissões mundiais de GEE, atingindo valores de redução de 41% a 72% até o ano de 2050, e de 78% a 118% até 2100 (ISAKSSON, 2016).

Para que estes valores sejam obtidos e o planeta possa minimizar os efeitos do aquecimento, é necessário que as principais indústrias emissoras de CO₂ realizem inovações que reduzam de forma considerável a emissão de gás carbônico em seus processos produtivos. E dentre estas encontra-se a indústria cimenteira, que apesar de indispensável para a economia e desenvolvimento do planeta, deve reavaliar seus processos produtivos para reduzir sua taxa de emissão de CO₂.

A fabricação de cimento sempre foi classificada na lista das principais fontes de emissão de carbono entre as atividades industriais (BENHELAL *et al.*, 2013). De acordo com Van Ruijven *et al.* (2016), a emissão antropogênica de CO₂ resultante do setor cimenteiro aumentou rapidamente entre os anos de 1980 e 2010, atingindo taxas de crescimento entre 2 e 4% ao ano (SAYGIN, 2012). A China, maior produtora mundial,

aumentou seus índices de emissão em cerca de 71%, do ano de 2005 para 2012 (ZHANG, WORRELL e CRIJNS-GRAUS, 2015).

Nos dias atuais, a indústria do cimento de forma global tem grande notoriedade no que tange os aspectos ambientais do planeta. Estima-se que esta seja responsável por 5% das emissões antropogênicas mundiais de CO₂ (IEA, WBCSD, 2009). Já Scrivener (2014) acredita que esta taxa pode atingir até 8%.

Para que as emissões de CO₂ sejam reduzidas de forma relevante, é necessária a implementação de medidas mitigadoras no processo produtivo do cimento, efetuadas a partir de inovações tecnológicas. No entanto, para que estas tenham sua eficiência analisada, é necessário detalhar a origem do dióxido de carbono gerado no processo produtivo do cimento.

O cimento é constituído essencialmente da mistura de clínquer, material moído em partículas inferiores a 75 µm, e gipsita (CaSO₄.2H₂O), adicionada durante a moagem do primeiro, em quantitativos de aproximadamente 5%, e tem como função principal controlar as reações iniciais de pega.

O clínquer, o principal constituinte do cimento, tem como matérias-primas basicamente o calcário, argila ou materiais silicosos, além de materiais que contenham óxido de ferro e alumínio (NEVILLE e BROOKS, 2013). Seus principais componentes são advindos da extração de rochas calcária e argila, matérias-primas responsáveis pelo fornecimento dos óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, sendo estes essenciais para a formação das principais fases anidras do cimento Portland, conhecidos como silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF).

As rochas calcárias e argilas são as principais matérias-primas para a fabricação do cimento Portland, pois são responsáveis por fornecer cálcio e sílica, que por sua vez, em proporções adequadas, garantem a formação dos silicatos de cálcio (C₃S e C₂S).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), os materiais argilosos contêm também alumina (Al₂O₃) e muitas vezes, óxido de ferro (Fe₂O₃) e álcalis. A presença de íons de alumínio, ferro e magnésio atribuem à mistura uma maior facilidade na formação de silicato de cálcio a temperaturas mais baixas que aquelas exigidas sem a presença destes.

Os minerais de ferro e alumina tornam-se então, relevantes à mistura. Entretanto, quando estes não estão presentes em quantidade necessária na matéria-prima, necessitam ser incorporados a partir da adição de materiais secundários como o minério de ferro. Como resultado desta incorporação, o clínquer produzido contém, além dos compostos de silicato de cálcio, aluminatos (C_3A) e ferro aluminatos de cálcio (C_4AF). Na Tabela 1 é possível analisar a composição dos óxidos de um cimento Portland típico.

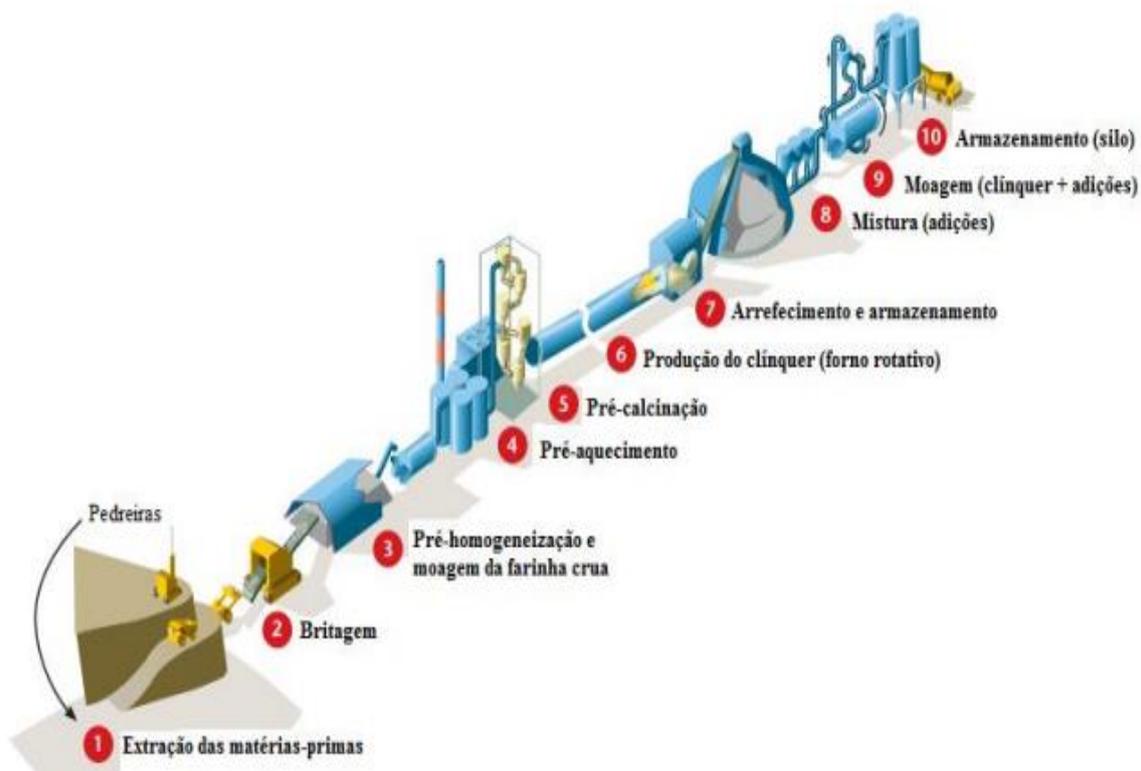
Tabela 1- Óxidos e composição dos compostos de um cimento Portland típico.

Composição de óxidos típica (%)	
CaO	63
SiO₂	20
Al₂O₃	6
Fe₂O₃	3
MgO	1,5
SO₃	2
K₂O	1
Na₂O	1
Perda ao Fogo	2
Resíduo insolúvel	0,5

Fonte: ADAPTADO (NEVILLE e BROOKS, 2013)

Para que os óxidos mencionados na Tabela 1 possam formar os compostos que dão origem ao cimento Portland e garantirem suas propriedades é necessário que as matérias-primas passem por diversos processos fabris, que incluem moagem, secagem, arrefecimento e homogeneização dos materiais. Este processo produtivo do cimento evoluiu ao longo dos anos e através de novas tecnologias se possibilitou a obtenção de maior produtividade, menores custos de produção, e conseqüentemente menores impactos ambientais provenientes, principalmente, da emissão de poluentes. Na Figura 5 é possível analisar cada etapa da fabricação do cimento Portland.

Figura 5 - Etapas de produção do cimento Portland



Fonte: (IEA, WBCSD, 2009).

A produção tem início a partir da extração das matérias-primas, principalmente do calcário, que constitui de 85 a 95% do clínquer (MARTINS *et al.*, 2007). O calcário é extraído por meio de processos explosivos, e passa posteriormente pelo processo de britagem, e é então transportado para a planta.

Após o transporte, as matérias-primas passam por diversas etapas para que o produto final possa ser obtido. Já na planta ocorre primeiramente a etapa de pré-homogeneização, que tem por finalidade obter um material mais homogêneo, e analisar os seus teores de cálcio, silício, alumínio e ferro.

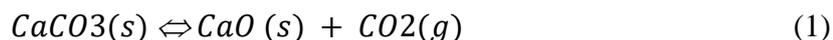
A etapa seguinte é realizada no moinho de cru, com a finalidade principal de obter a composição química ideal para a formação do clínquer. Para isso, o calcário é moído juntamente com determinada quantidade de argila, matéria-prima rica em sílica, ferro e alumínio, podendo receber também a adição de óxidos específicos, como minério de ferro (DE LIMA, 2011).

Em seguida, ocorre o processo de pré-calцинаção na chamada torre de ciclone, onde é realizado o pré-aquecimento do cru, que facilita o processo final de clínquerização que ocorre no forno rotativo. É no interior da torre de ciclones que se iniciam as reações químicas, ocorridas em virtude das elevadas temperaturas, possibilitando que a farinha atinja cerca de 800 °C, temperatura de início da pré-calцинаção do CaCO₃. Nesta etapa de pré-calцинаção, pode ocorrer a liberação de 90% do dióxido de carbono presente na mistura crua (descarbonatação), originando a primeira etapa que colabora com um grau de emissão de CO₂ significativo (DE PAULA, 2009).

Após a saída da torre de ciclone, a farinha passa para o forno rotativo, no qual alcança temperaturas internas de aproximadamente 1450° C, resultando na produção do clínquer a partir da fusão parcial e das reações químicas entre os seus óxidos. Em seguida, o clínquer passa por um processo de resfriamento, no qual a temperatura é reduzida para cerca de 200° C. Por fim, o clínquer é moído, juntamente com adições minerais e algum tipo de sulfato de cálcio, seguindo para as etapas de armazenamento e expedição.

Diante das etapas apresentadas é possível afirmar que algumas destas contribuem de forma mais significativa para a emissão de dióxido de carbono proveniente do processo produtivo do que outras. De acordo com Battagin (2016), a emissão de CO₂ durante as etapas de fabricação do cimento Portland ocorre principalmente na etapa de calcinação, a qual é associada 50% das emissões. A queima dos combustíveis é responsável por 40% das emissões e os 10% restantes estão distribuídos em algumas outras etapas do processo.

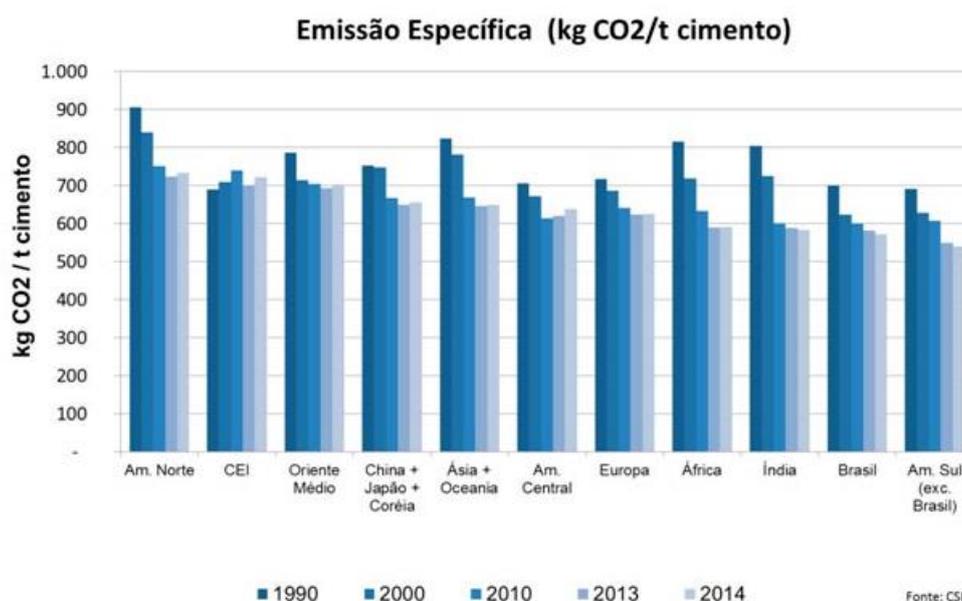
Já de acordo com Scrivener (2014), cerca de 40% destas emissões são provenientes da utilização de combustíveis e eletricidade. No entanto, a grande parcela, representada por 60% das emissões totais, é originária da decomposição da principal matéria-prima do cimento, o carbonato de cálcio, que se decompõe em óxido de cálcio, liberando o gás carbônico, conforme reação demonstrada na Equação 1.



Quando o carbonato de cálcio se decompõe, gera em termos de massa aproximadamente 56% de óxido de cálcio (CaO) e 44% de dióxido de carbono (CO₂) (GOMES; PINTO; PINTO, 2013).

De acordo com Hendriks (2004), estima-se que para cada 1 tonelada de clínquer produzido, a quantidade de dióxido de carbono gerada varia, em média, de 500 à 950 kg. Já Valderrama *et al.* (2012) avalia que a produção de CO₂ seja de aproximadamente 940 a 990 kg. Quando se fala já do produto final, Damtoft *et al.* (2008) afirma que são produzidas 0,8-0,9 toneladas de CO₂ para cada tonelada de cimento produzida. Hasanbeigi, Menke e Price (2010) reitera que o processo emite cerca de 900 kg de CO₂ por cada tonelada de cimento produzido. Vale ressaltar que este teor varia de acordo com o tipo de cimento e processos produtivos. No entanto, observa-se que os teores emitidos são sempre expressivos e prejudiciais do ponto de vista ambiental. Na Figura 6 é possível observar que os teores de emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido variam também de acordo com o país responsável pela produção.

Figura 6 - Emissão Específica Kg CO₂/ Tonelada de Cimento



Fonte: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php> Acesso: maio 2018

2.2 MEDIDAS MITIGADORAS PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

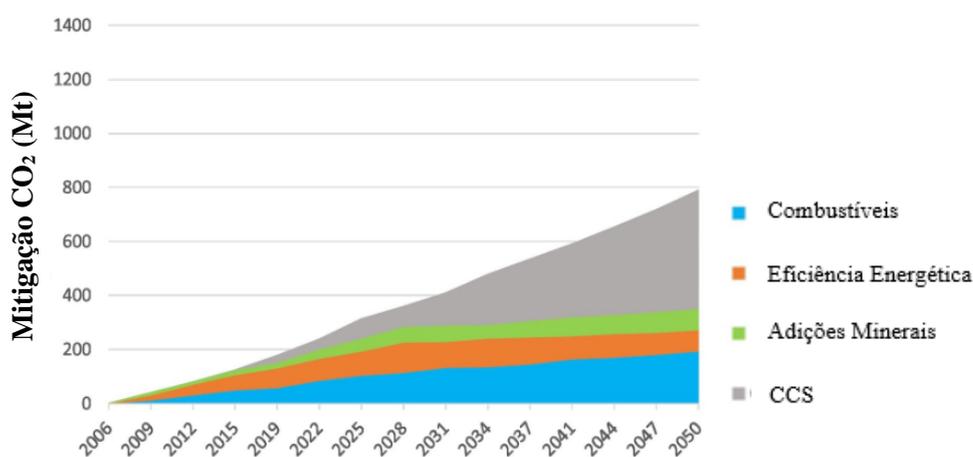
Diversos estudos focados no potencial de sustentabilidade da indústria cimenteira têm obtido resultados semelhantes quanto à aplicação de medidas mais eficazes para reduzir consideravelmente as emissões de dióxido de carbono na atmosfera (IEA, WBCSD, 2009). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) em 2009 as quatro principais medidas mitigadoras são:

- Captura e armazenamento de carbono;
- Eficiência energética;
- Utilização de combustíveis alternativos
- Substituição do clínquer (Adições Minerais).

Desde 1999, com o lançamento da Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) no Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a indústria tem sistematicamente recolhido evidências e aprimorado suas estratégias. Em 2009, o roteiro da Agência Internacional de Energia e do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável IEA / WBCSD propôs vários cenários de atenuação das emissões de CO₂ (CEMBUREAU, 2015).

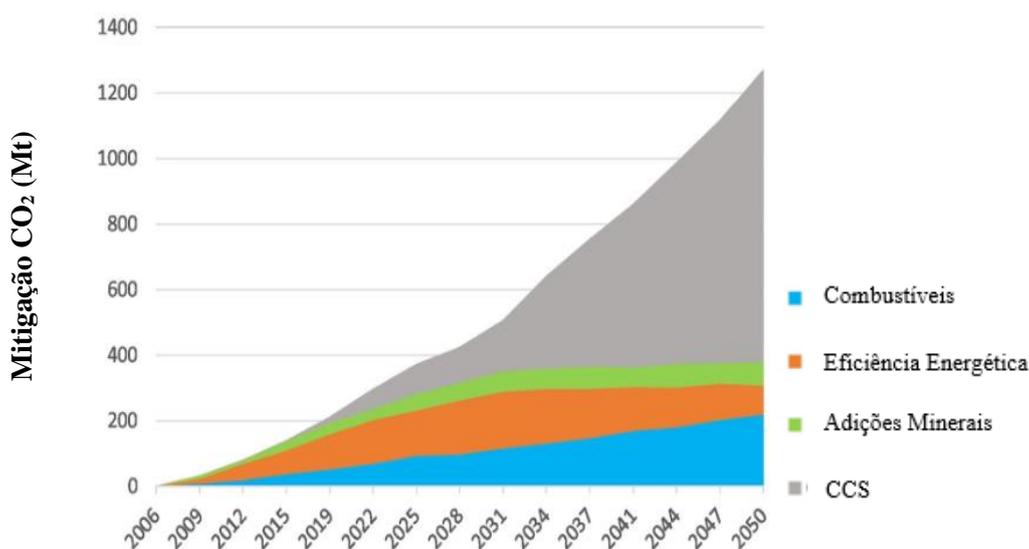
A referência, considerado um cenário de estudo que aborda a meta de 50% de redução global de emissões para manter o aquecimento global a temperaturas inferiores a 2 ° C dos níveis pré-industriais, exigiria um redução geral de 18% no nível de emissão de CO₂ do setor cimenteiro até 2050. Para o ano 2050 este cenário prevê uma produção de cimento de 4.556 Mt. Para atingir a meta de 18% de redução total de CO₂ de um total de cerca de 900Mt, estima-se que 347Mt de redução nas emissões de CO₂ virão das soluções como o emprego de combustíveis e matérias-primas alternativas, maior eficiência energética e o emprego de adições minerais convencionais, além dos restantes 552 Mt de captura e armazenamento de CO₂ (CCS) (Figura 7a).

Figura 7a - Reduções de emissões de CO₂ no setor de cimento 2006–2050, para cenários de baixa demanda.



Fonte: ADAPTADO IEA / CSI, 2009.

Figura 7b - Reduções de emissões de CO₂ no setor de cimento 2006–2050, para cenários de alta demanda.



Fonte: ADAPTADO IEA / CSI, 2009.

A redução de CO₂ mais eficiente atualmente é atribuída à captura e armazenamento de carbono (CCS) no roteiro de 2009 do IEA / WBCSD, no qual observa-se o fator de mitigação significativo das emissões de CO₂ tanto para o cenário de baixa demanda quanto de alta (Figuras 7a e 7b).

2.2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em função do consumo energético está associado às principais etapas produtivas do cimento, o consumo específico de energia é um indicador imprescindível para avaliação da eficiência de uma fábrica, e conseqüentemente do seu desempenho ambiental (MADLOOL *et al.*, 2013). No entanto, a eficiência energética das indústrias cimenteiras depende de diversos fatores, associados principalmente ao tipo de processo utilizado na fabricação do cimento e aos equipamentos empregados na planta industrial (LINS, 2017).

De acordo com MADLOOL *et al.* (2013), para redução do consumo energético, seria necessário à modernização das plantas industriais, como por exemplo, a utilização de sistemas de transporte mais eficientes das matérias-primas, através de dutos substituindo os processos pneumáticos, a utilização de moinhos de rolo em substituição aos moinhos de bola, implementação de separadores de alta eficiência, a utilização de

refratários isolantes mais eficientes para evitar a perda de calor, dentre outras inovações tecnológicas.

Uma medida promissora para o aumento da eficiência energética, e consequente redução da emissão de dióxido de carbono, é a recuperação de calor proveniente dos processos de aquecimento que ocorrem na indústria, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica (BENHELAL *et al.* 2013). O autor complementa que esta medida possibilitaria a minimização destas emissões, porém a dificuldade ocorre principalmente em função da questão econômica, relacionada ao alto investimento de capital para a adoção de novos equipamentos e instalações, além da complexidade que envolve a paralisação do funcionamento das fábricas de cimento para a instalação de novas tecnologias.

2.2.2 UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

A demanda mundial por cimento e concreto aumentou exponencialmente nos últimos vinte anos, resultado da combinação de fortes tendências em curso, como o crescimento da população e a necessidade crescente de infraestrutura e moradia. Conseqüentemente, esta demanda foi satisfeita pela expansão das cimenteiras, aumentando a extração de matérias primas e no consumo de energia fóssil, ambos causando impacto ambiental negativo. A indústria de cimento enfrentou pressões significativas e fez esforços para melhorar sua eficiência de produção (ISHAK e HASHIM, 2015), bem como o seu impacto ambiental (KAJASTE E HURME, 2016). Entre as principais melhorias estão o desenvolvimento de processo de calcinação por via seca ao invés de via úmida, além do aumento do uso de combustíveis alternativos, que reduziu drasticamente o consumo de energia associados à emissões de CO₂ na produção de cimento (DEJA *et al.* 2010; FEIZ *et al.* 2015).

A indústria cimentícia, entre diversas outras, tem capacidade de utilizar combustíveis a partir de variadas misturas, incluindo o uso de combustíveis fósseis, biomassas, resíduos de materiais e subprodutos industriais (CEMBUREAU, 2013).

De modo geral, esta medida mitigadora torna-se necessária que haja uma análise de viabilidade técnica e ambiental para utilização de determinados materiais. Além disso, a mudança na estrutura fabril enfrentará dificuldades econômicas e de disponibilidade.

2.2.3 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO

De acordo com Cembureau (2013), no que diz respeito à eficiência, os resultados iniciais desta medida mitigadora mostram que com as tecnologias atuais disponíveis é possível capturar até 90% do CO₂ emitido na indústria, contribuindo de forma ímpar na redução dos índices de emissão de gás carbônico. Diante do grande potencial sustentável, se torna imprescindível a continuidade de estudos que possibilitem a implementação desta tecnologia. No entanto, a captação de carbono enfrenta desafios cruciais que ameaçam sua competitividade.

Caso a captura de uma parte substancial das emissões de CO₂ seja tecnicamente possível, ainda há a questão do que fazer com o CO₂ que foi capturado. Três possibilidades possíveis estão sendo avaliadas: utilização de captura de carbono (CCU), valorização de captura de carbono e captura e armazenamento de carbono. Além destes fatos, tem a questão do custo para essa captação. A indústria de cimento aumentaria os custos de produção em 25 a 100%, incluído um aumento de energia de 50 a 120%, além da necessidade de grandes mudanças e modernização em suas plantas industriais (CEMBUREAU, 2013).

A captura e armazenamento de CO₂ (CCS) melhorou desde 2009 em termos de tecnologia graças a extensos programas de pesquisa realizados por diferentes setores. Pesquisas também estão sendo feitas para encontrar maneiras de utilizar o CO₂ capturado. A captura e uso de carbono (CCU) é uma alternativa ao CCS que substitui o armazenamento subterrâneo por outro passo industrial que transforma o CO₂ em produtos químicos ou produtos de construção. A CCU tem o potencial de ser significativamente menos dispendiosa do que a CCS, desde que haja um mercado adequado para os produtos resultantes. No entanto, estas são tecnologias que exigem energia e ainda são muito caras nesta fase. Como a maior parte do cimento é e será produzida e utilizada nos países em desenvolvimento, alternativas de baixo custo para o CCS e CCU seriam altamente desejáveis.

Para buscar soluções para esse dilema, em 2015, o Programa Ambiental das Nações Unidas para a Construção Sustentável e Clima (UNEP-SBCI) estabeleceu um grupo de trabalho técnico para revisar tecnologias alternativas práticas para reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a eficiência dos materiais em toda a cadeia de valor da

indústria cimenteira, o que poderia reduzir a necessidade da captura e armazenamento de CO₂ (CCS) (SCRIVENER, 2018). Esta iniciativa gerou um relatório com a participação de mais de 20 especialistas internacionais da academia e da indústria (Anexo I).

Com foco em tecnologia de materiais, uma vez que os combustíveis renováveis e a energia já foram analisados detalhadamente pelo setor de energia. O grupo explorou opções cientificamente alinhadas com o melhor potencial para serem ampliadas e dar uma contribuição real, em oposição a soluções de nicho e abordagens que carecem de uma sólida justificativa científica. O objetivo é demonstrar que existem várias soluções potenciais para a mitigação de CO₂ que são muito menos caras do que a CCS, que poderiam ser usadas a curto e médio prazo, ao mesmo tempo em que afetam significativamente as emissões de CO₂, sem tornar concretos e argamassas muito caros para os consumidores comuns, particularmente em países em desenvolvimento, onde a maior parte do cimento será produzida.

Uma solução apontada como promissora nos últimos anos é a utilização de materiais álcali-ativados (MAA). Entre estes cimentos à base de geopolímeros, as tecnologias de MAA também têm a capacidade de reduzir as emissões globais de CO₂ além do que é possível com o uso otimizado de adições minerais e fíleres. No entanto, muitas tecnologias MAA atuais exigem o uso de escória de alto forno granulada (EGAF) para fornecer desempenho aceitável e, em muitos locais, é mais simples usar os suprimentos limitados (globais) do EGAF como adição mineral ao cimento ao invés de produzir MMA. O uso de silicatos de metais alcalinos como ativadores é também muito custoso em termos econômicos e energéticos caso estes forem produzidos através de rotas de processo convencionais. Portanto, o emprego efetivo dos MAA ainda requer mais pesquisa e desenvolvimento caso queira ter alguma chance de sucesso na mitigação global de CO₂.

O potencial das novas tecnologias de cimento é encorajador. Estima-se que custem mais do que o cimento atual, mas muito menos do que o processo de captura de carbono CCS. Os clínqueres com *y'emelita* como fase mais reativa, no caso os cimentos belita-yemelita-ferrita e o sulfoaluminato de cálcio, podem ser produzidos em fornos de cimento convencionais, mas requerem minerais ricos em alumínio, sulfatos e carbonatos. A captura de carbono CCS utiliza calcário e sílica não tão puros e amplamente disponíveis, processados em fornos de cimento convencionais. Requerem cura em um ambiente rico

em CO₂, de modo a capturar de volta o CO₂. Portanto, seu mercado é limitado a usinas de concreto industrializadas, particularmente para seções finas ou porosas, sem reforço de aço.

Os únicos materiais com potencial substancial para estender a disponibilidade de minerais adequados para geopolimerização seriam as argilas calcinadas. No entanto, no presente, quantidades consideráveis de silicato de sódio são necessárias para ativar as argilas calcinadas. As emissões totais de CO₂ provenientes da calcinação de argila e grandes quantidades de silicato de sódio podem resultar em cimentos com alto teor de CO₂ emissões. A produção global atual de silicato de sódio em todo o mundo é menor que 10 Mt por ano (o suficiente para produzir apenas 40-50 Mt de MAA) e a emissão de energia e CO₂ do processo de produção atualmente utilizado é muito alta. Materiais que poderiam realmente reduzir as emissões de CO₂ no setor exigem o desenvolvimento de um processo de produção de energia mais baixo e um aumento substancial da produção, exigindo investimentos significativos.

A Figura 8 mostra a estimativa aproximada do potencial de mitigação de novas tecnologias de cimento em função da participação de mercado para o cenário de 2050. Essas tecnologias estão no estágio inicial de desenvolvimento e, portanto, há maior incerteza. As linhas cinzas horizontais representam a meta de atenuação do cenário de baixa demanda, que aborda a meta de 50% de redução global de emissões para manter o aquecimento global inferior a 2°C, considerado como referência. E para o CCS, sua parcela na meta total de mitigação onde a linha pontilhada representa a incerteza na estimativa (Figura 8).

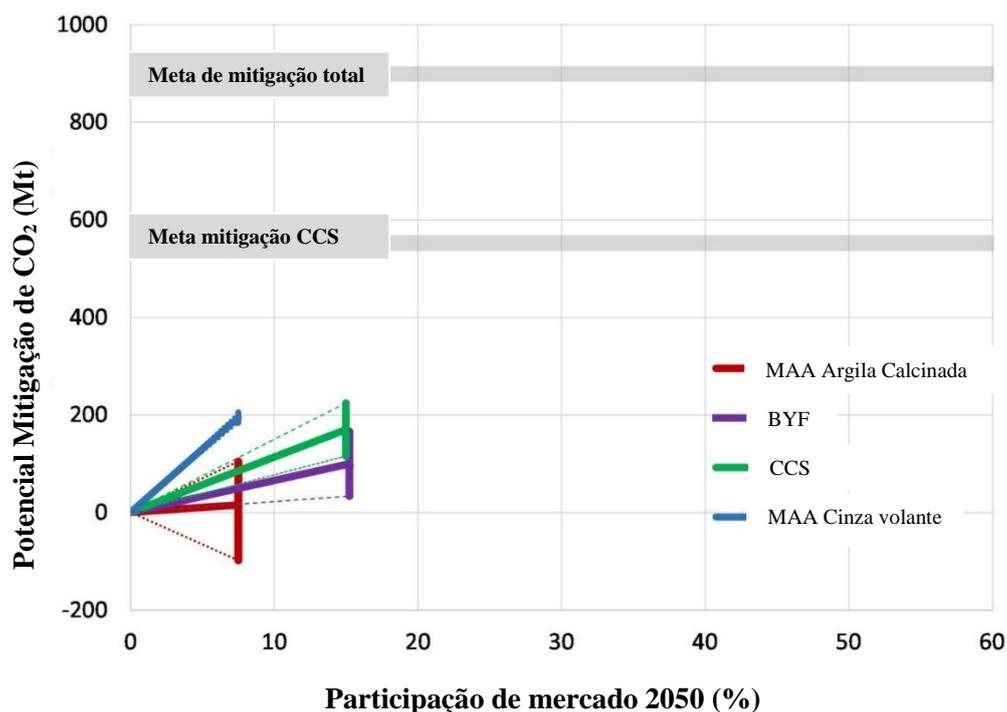
Pode-se observar numericamente os fatores de emissão considerados na estimativa do potencial de mitigação (kg de CO₂ por kg de material produzido) de cada alternativa avaliada pelos especialistas (UNEP-SBCI 2018) (Tabela 2). Observa-se para estas soluções, que os valores de mitigação da emissão de CO₂, supramencionados estão muito abaixo das metas propostas.

Tabela 2 - Fatores de emissão potencial de mitigação.

Clínquer + Gesso	Argila Calcinada	Fíler Calcário	Silicato de Sódio	BYF
0,86	0,2-0,35	0,008	0,9-1,8	0,62 - 0,66

Fonte: ADAPTADO SCRIVENER, 2018.

Figura 8 - Estimativa aproximada do potencial de mitigação de novas tecnologias de cimento em função da participação de mercado para o cenário de 2050.



FONTE: ADAPTADO SCRIVENER, 2018.

2.2.4 ADIÇÕES MINERAIS

Uma outra solução possível para mitigar a emissão de CO₂ é reduzir a quantidade de clínquer utilizado na fabricação do cimento, sem que sejam perdidas as características de resistência e durabilidade. Para tanto, faz-se necessária a utilização de outros materiais, de modo que estes possam contribuir com a manutenção ou melhora das principais propriedades do cimento Portland comum. Os materiais utilizados que possibilitam esta manutenção de características, associadas à redução da relação clínquer/cimento, são as chamadas adições minerais.

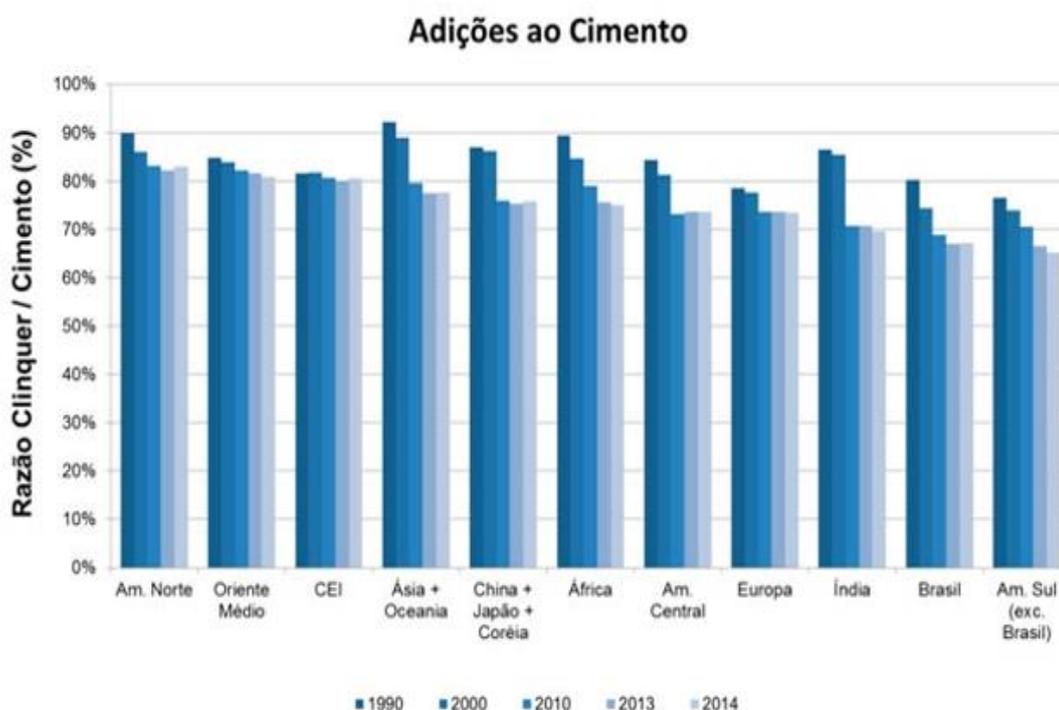
De forma geral, as adições minerais são compostas por material inorgânico, de finura geralmente menor ou igual a do cimento. Estas adições podem ser classificadas em dois grupos em função de sua ação físico-química, sendo um o grupo das adições minerais quimicamente ativas, e o segundo grupo composto pelas adições quimicamente inativas ou inertes (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O primeiro grupo se subdivide entre materiais cimentantes e pozolânicos, sendo o grupo dos cimentantes composto por materiais que não necessitam de hidróxido de cálcio

para formar compostos aglomerantes hidratados, como por exemplo, a escória de alto-forno. No entanto, a auto-hidratação destes materiais é lenta, formando compostos insuficientes para sua utilização com fins estruturais. Já o grupo dos materiais pozolânicos, inclui materiais que reagem quimicamente com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na presença de água, formando compostos com características resistentes, como por exemplo a cinza volante e as argilas calcinadas (GOBBI, 2014).

Diante desta grande parcela de contribuição na emissão de gás carbônico, a redução da proporção clínquer/cimento com o uso de adições minerais se torna imprescindível para que o processo produtivo tenha seu impacto ambiental atenuado. A Figura 9 apresenta o avanço no emprego de adições minerais ao cimento Portland.

Figura 9 - Uso de adições minerais do Cimento.



Fonte: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php> Acesso: Maio 2018.

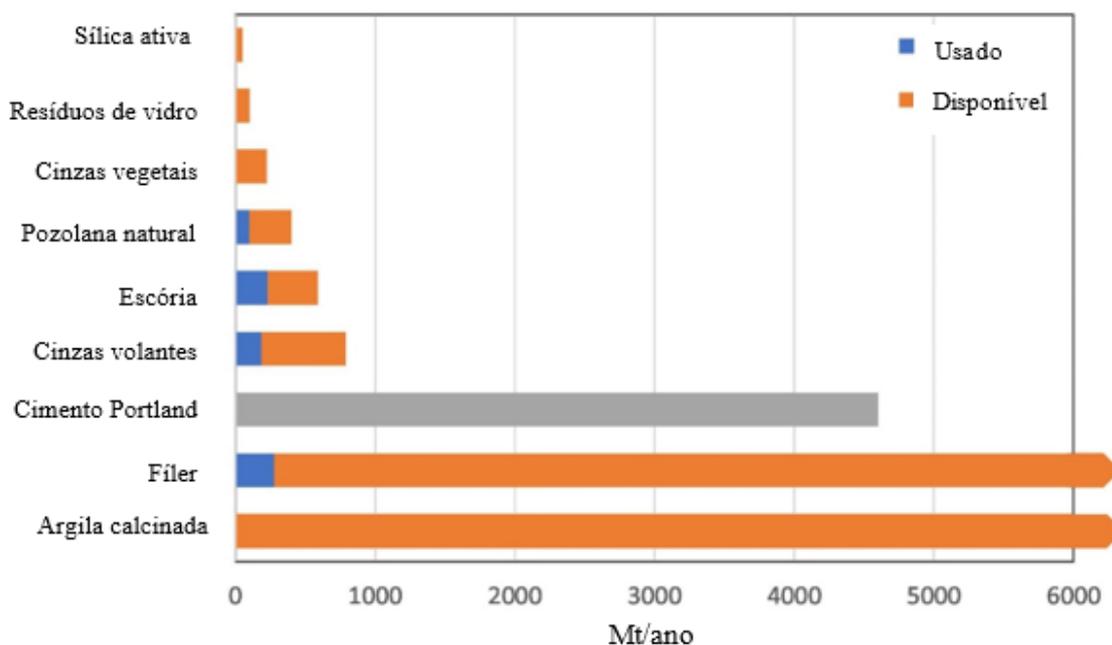
Diversas adições minerais já são utilizadas nos dias atuais como materiais suplementares para substituir o clínquer na composição do cimento Portland, sendo mais comum a utilização de escórias de alto forno e cinzas volante. Contudo, estas adições não estão disponíveis em quantidade suficiente para atender a demanda da indústria cimenteira.

De acordo com Hendriks (2004), as emissões de carbono mundiais da indústria cimenteira podem ser reduzidas em cerca de 20% a partir da utilização de adições minerais, porém, a redução da relação clínquer/cimento depende de diversos fatores. Um destes é a adequação das normas que permitam a utilização de adições minerais em cada país, respaldadas por pesquisas que garantam a eficácia dos materiais. Outro fator determinante e um dos principais desafios enfrentados por esta medida mitigadora é a disponibilidade de materiais alternativos de qualidade nas regiões produtoras de cimento.

A escória disponível no mundo, que tem alta capacidade de substituição nas misturas de clínquer, representa apenas cerca de 5% da quantidade de clínquer produzido. Já a cinza volante, apresenta uma quantidade maior de material disponível no mundo. No entanto, a sua capacidade de substituição ao clínquer no cimento Portland é menor, pois contribui de forma menos significativa quanto à resistência mecânica do material, além de ser ausente em diversos países e apresentar qualidade variável, sendo muitas vezes inadequada para a substituição. Diante da necessidade de novas adições capazes de substituir parte significativa do clínquer produzido no mundo, iniciaram-se pesquisas a fim de buscar materiais que atendessem esta demanda e mantivessem as características de fabricação e desempenho do cimento Portland atual (ANTONI, 2012).

Segundo Scrivener (2018), o relatório do Programa Ambiental das Nações Unidas para a Construção Sustentável e Clima (UNEP-SBCI 2018) aponta que a quantidade de escória disponível em todo o mundo é de cerca de 5% a 10% da quantidade de cimento produzido (Figura 10). A quantidade de cinzas volantes disponíveis é um pouco maior, cerca de 30% em relação ao cimento, mas a qualidade é muito variável, com menos de um terço adequado para a mistura no cimento.

Em relação ao calcário, embora seja abundantemente disponível, a adição superior a 10% de calcário isoladamente ao cimento tende a resultar em maior porosidade e propriedades mecânicas mais fracas caso não sejam utilizados aditivos dispersantes e superplastificantes por profissionais especializados.

Figura 10 - Disponibilidade de adições minerais.

Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2018)

Além disso, com a crescente pressão para reduzir as emissões ambientais, a queima de carvão para produzir eletricidade está sendo questionada em muitos países. Portanto, a longo prazo, a disponibilidade de cinzas volantes também está em dúvida, uma vez que a geração de energia elétrica a partir da queima do carvão está sendo bastante questionada globalmente (MATSCHEI, 2007; SCRIVENER *et al*, 2018). Este aspecto é bastante importante pois há uma tendência de diminuição da geração cinzas volantes em escala global.

Já a demanda por aço não acompanha a produção de cimento, portanto a demanda por aço está aumentando menos rapidamente que a demanda por cimento e geralmente este material é produzido por um grupo reduzido de países de modo que a disponibilidade é ainda mais limitada em países onde a demanda por cimento está crescente. Outro fator importante é que pressões ambientais estão induzindo o crescimento da produção do aço a partir da reciclagem e colocando uma dúvida sobre a disponibilidade de escórias de alto forno no futuro próximo.

As principais adições minerais utilizadas corriqueiramente são a escória de alto forno e a cinza volante, porém, conforme supramencionado, estas não estão disponíveis

em abundância e não serão capazes de suprir a demanda da produção de cimento mundial nos próximos anos (ANTONI, 2012).

A escória de alto forno granulada pode ser substituída em níveis altos (70%), mas a quantidade de escória de alto forno disponível globalmente é de apenas cerca de 330 Mt/ano. Esta disponibilidade para a produção de cimento diminuiu de 17% em 1980 para apenas 8% em 2014. Isso se deve à maior disponibilidade de sucata para reciclagem e à introdução de tecnologias de fabricação de aço mais eficientes. A longo prazo espera-se que a disponibilidade de escória de alto-forno fique abaixo de 8% da produção de cimento. Além disso, a produção de aço concentra-se predominantemente nos países industrializados. Por outro lado, a demanda por cimento deve crescer mais nos países em desenvolvimento.

Para serem eficazes como adições minerais, as escórias de alto forno devem ser extintas rapidamente do estado líquido, geralmente com excesso de água em um granulador, denominada escória granulada de alto forno (EGAF). Assim, a adição mineral efetivamente utilizada é um produto industrial distinto do subproduto gerado sem qualquer beneficiamento. Os granuladores são instalados e operados em fábricas de fabricação de ferro-gusa dedicados à produção de EGAF como um subproduto comercializado como uma adição mineral. Pelo fato desta operação envolver investimento de capital, a EGAF não deve ser considerada como um produto residual, sendo que seu preço de venda é superior ao do cimento Portland. Antes que a EGAF se tornasse valiosa para o uso como adição mineral cimentícia, as escórias de alto-forno eram tipicamente resfriadas a ar, envolvendo investimento mínimo, e então frequentemente britadas e vendidas como agregados densos com muito menor valor de mercado do que a EGAF.

Hoje em dia, mais de 90% da escória de alto-forno já é usada como adição mineral cimentícia, seja no processo de fabricação dos cimentos de alto forno ou como adição às misturas de concreto ou outras baseadas em cimento (SNELLINGS, 2016). Por estas razões, há pouco potencial para redução adicional de CO₂ a partir do uso de escória de alto forno.

As cinzas volantes resultam da combustão de carvão em usinas termoelétricas e, portanto, podem ser realmente consideradas como um produto residual. Existem em

quantidades maiores do que as escórias disponíveis, cerca de 900 Mt/ano, mas a qualidade é muito variável, de tal forma que apenas cerca de um terço desse montante é atualmente usado em cimento e concreto. Provavelmente há algum espaço para aumentar essa proporção através de melhor caracterização e classificação. É improvável que a conversão de cinzas voláteis não reativas em material reativo, ajustando a química, seja economicamente viável. Também deve ser considerado que a queima de carvão para produzir eletricidade é, de longe, a maior fonte de CO₂ antropogênico e, em alguns países, a produção de eletricidade a carvão está sendo gradualmente eliminada. No âmbito global, o carvão continuará sendo uma parte substancial da matriz energética a médio prazo, em grande parte devido à falta de incentivos para o uso de energias alternativas. No entanto, vale a pena notar que a recente disponibilidade de gás de xisto na América do Norte levou a uma escassez de cinzas volantes no continente (ANTONI, 2012).

Como as cinzas volantes e a escória de alto-forno são subprodutos, a disponibilidade varia regionalmente. Originalmente eram comercializados a um preço baixo, reduzindo assim o custo do cimento. Isso está mudando nos últimos anos em muitas regiões devido ao aumento da demanda por estas adições minerais. Os cimentos produzidos com estas adições minerais também foram considerados livres de CO₂, mas a alocação de cargas ambientais está sendo questionada. Se a realocação do CO₂ desencorajasse sua reutilização no cimento, isso seria contraproducente para as emissões globais totais de CO₂. Atualmente, em muitas regiões, há uma escassez destes materiais e não se espera um aumento significativo na proporção de clínquer de cimento Portland que eles possam substituir no cimento.

Além da escória e da cinza volante, outras pozolanas, materiais silicosos amorfos reativos ou pouco cristalinos de fontes naturais estão disponíveis em algumas regiões. A base de dados da CSI GNR (IEA, 2009), indica que cerca de 75 Mt/ano de pozolanas são atualmente empregadas como substitutos do clínquer. As reservas disponíveis são abundantes, mas pontualmente localizadas. A reatividade varia consideravelmente. Ademais, a forma das partículas angulares e a porosidade interna de alguns materiais podem levar a maiores problemas de demanda de água e conseqüentemente problemas na trabalhabilidade das misturas (SCRIVENER, 2018).

No Brasil, um dos países de melhor desempenho ambiental na produção de cimento Portland, estes materiais são consumidos por completo pela indústria cimenteira,

sendo utilizados na fabricação dos cimentos CP II-E, CP II-Z, CP III e CP IV (OLIVEIRA, 2014). Apenas no ano de 2013, foram evitadas 6,2 milhões de toneladas de emissão de CO₂ em função da utilização da escória de alto forno. Entretanto, estima-se que o crescimento deste produto proveniente da produção do aço será vegetativo até o ano de 2050, tendendo a reduzir a sua capacidade de utilização na indústria cimenteira. Já o uso da cinza volante na produção de cimentos no Brasil reduziu em 1,25 milhão de toneladas as emissões de CO₂ no ano de 2013. Contudo, em função do baixo investimento previsto para novas termelétricas a carvão, estima-se que não será possível aumentar a taxa de substituição a partir da utilização deste material (BATTAGIN, 2016).

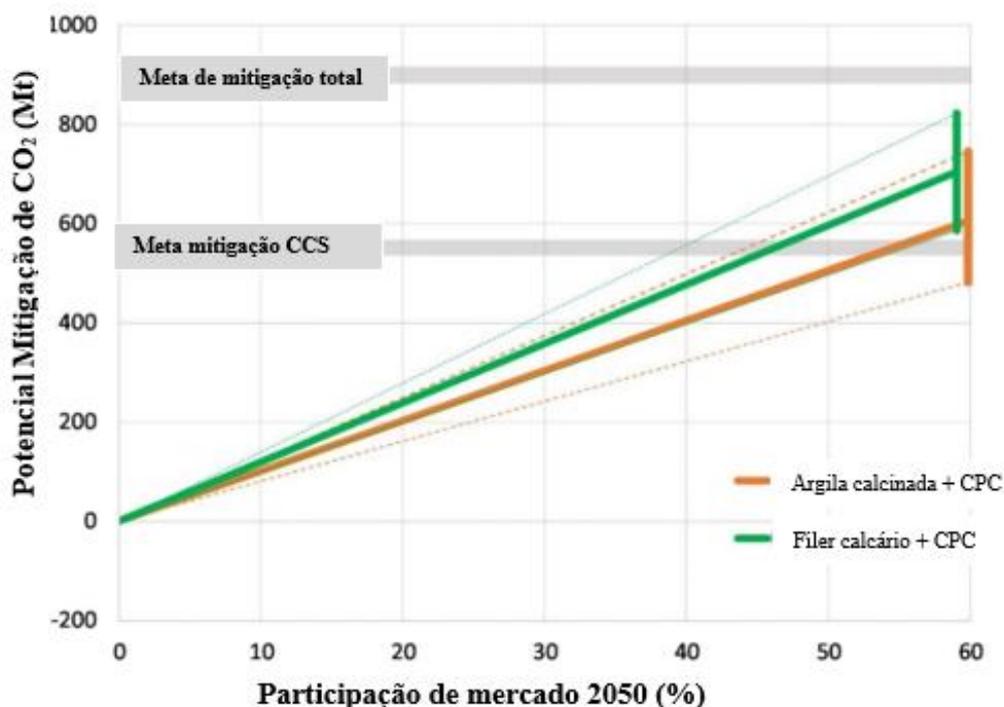
Nos últimos anos, as cinzas de casca de arroz vêm sendo analisadas, porém, a quantidade disponível desta adição é relativamente pequena e geograficamente pouco extensa. Também são avaliadas as cinzas vulcânicas, mas muitas vezes apresentam baixa reatividade e grande variação conforme sua localização. Diante destas problemáticas, de acordo com Scrivener (2014), o único material disponível em quantidade abundante e tecnicamente capaz de suprir a inópia das substituições mais utilizadas atualmente é a argila calcinada.

Para que a indústria cimenteira mundial obtenha o sucesso necessário no que diz respeito à redução da emissão de CO₂, inovações tecnológicas vêm sendo analisadas durante muitos anos. Diversos estudos concentrados no potencial de sustentabilidade da indústria de cimento têm obtido conclusões semelhantes sobre as medidas mais eficientes (IEA, WBCSD, 2009). Dentre as medidas mitigadoras, há duas com maior potencial para reduzir as emissões de CO₂ do setor de cimento e de materiais de concreto nas próximas 2 a 3 décadas, conforme apontado no relatório do Programa Ambiental das Nações Unidas para a Construção Sustentável e Clima (UNEP-SBCI 2018), são elas: Estender o uso de adições minerais no cimento para reduzir ainda mais o conteúdo de clínquer, principalmente pelo desenvolvimento de tecnologia para a adição combinada de argila calcinada e calcário.

Reduzir o conteúdo de clínquer do concreto melhorando os processos de mistura que permitem maior conteúdo de carga, que pode ser adicionado através do cimento ou diretamente durante a mistura de concreto.

Para ilustrar as potencialidades destas duas soluções, as mesmas atingem a meta de mitigação de emissão de CO₂ referente a CCS (Figura 11). O gráfico mostra o potencial de mitigação destas duas medidas em função da participação de mercado para o cenário de baixa demanda de 2050, com as seguintes condições: (a) uma combinação de 25–35% de argila calcinada mais 15% de fíler calcário; (b) substituição de fíler calcário variando entre 25 e 35%.

Figura 11 - Potencial de mitigação em função da participação de mercado para o cenário de baixa demanda de 2050.



FONTE: ADAPTADO SCRIVENER, 2018.

A Figura 11 demonstra potencialidade das soluções através do emprego do fíler calcário ou deste em conjunto com a argila calcinada para alcançar a meta de mitigação de CO₂. O uso do calcário e da argila calcinada em conjunto com o calcário não são limitados pelos recursos disponíveis, que são muito superiores em comparação com a demanda de cimento. São limitados pelo percentual máximo de substituição do clínquer sem que haja perda das propriedades. Portanto, a substituição de clínquer por fíler calcário ou a combinação de argila calcinada e fíler calcário, o chamado LC³, é uma alternativa altamente promissora.

A sugestão da substituição de parte do clínquer por argila calcinada e calcário se trata de uma solução “pronta” (solução de bolsa), não exigindo um nível de qualificação

elevado para aplicação do material, já que o cimento se trata de um material utilizado por pessoas com todos os níveis de qualificação. Outro aspecto é o potencial de emprego em larga escala, podendo ser utilizada em todas as aplicações provenientes do uso do cimento. Diferencia-se da captura de carbono porque esta última possui limitações impostas à aplicação no produto cimentício final. Por exemplo, na CCS há restrição de uso no concreto armado devido a possibilidade de ataque às armaduras por carbonatação (SCRIVENER, 2018).

Por outro lado, no caso dos cimentos com fíleres calcários, desenvolvimentos recentes na Alemanha e no Brasil mostram que é possível produzir cimentos com desempenho aceitável com teor de incorporação maior do que os atuais 35% adotados em muitos códigos normativos internacionais. Processos de moagem mais sofisticados para otimizar a distribuição de tamanho de partículas, juntamente com a adição de aditivos químicos dispersantes na fábrica de cimento para reduzir a demanda de água para alcançar boa trabalhabilidade são necessários para evitar a redução de resistência causada pelo aumento da relação água/cimento (MÜLLER, 2016).

Estudos recentes também confirmam a possibilidade de usar outros minerais como substituição ao invés do calcário de alta pureza, que atualmente predomina nos códigos normativos. O calcário inadequado para a produção de clínquer, com um teor de dolomita bastante elevado, pode apresentar um bom desempenho como adição mineral (ZAJAC, 2014). Neste caso, como não há calcinação da dolomita para produzir periclasio (MgO), não há risco de expansibilidade causada por este mineral. A dolomitação pode ocorrer lentamente, mas não há evidências de deterioração causada por essa reação. O uso mais difundido de calcário inadequado para a fabricação de cimento levaria a uma exploração mais eficiente das pedreiras de calcário e à extensão significativa da vida útil da pedra.

A combinação da engenharia de distribuição de tamanho de partículas com o uso de dispersantes (por exemplo, superplastificantes) permite que o conteúdo das adições minerais inertes seja aumentado para acima de 50% sem perder resistência mecânica, pelo contrário, até aumentar. Isso pode ser feito se a demanda de água por uma trabalhabilidade adequada for reduzida. Menos água significa que há mais sólido (aglomerantes + fíleres) para preencher o espaço entre os grãos de areia, de modo que as propriedades mecânicas sejam mantidas. Esta nova tecnologia exigirá a moagem separada de clínquer e fíleres e mistura e a adição de aditivos dispersantes. A fração reativa de clínquer deve ser

concentrada na fração fina da mistura, favorecendo seu ganho de resistência. Com essa tecnologia, é necessário um aumento no teor de cimento para manter as propriedades mecânicas, o que se traduz numa menor redução da emissão de CO₂ do que aquela indicada pelo *fator clínquer*¹. Essa tecnologia também pode ser adotada no âmbito do concreto.

Pelo exposto, esta solução exige um nível de qualificação elevado para aplicação do material. Já a outra alternativa apontada por Scrivener (2018), empregar conjuntamente argila calcinada e calcário em substituição ao clínquer. É uma solução “pronta” (solução de bolsa) porque se trata de um material utilizado por pessoas com todos os níveis de qualificação, como mencionado anteriormente. Além disto, seu potencial de emprego em grande escala é muito maior, podendo ser utilizada em todas as aplicações provenientes do cimento.

A solução prática de substituir parcialmente a argila calcinada por clínquer é conhecida há muito tempo. Argilas, especialmente aquelas contendo alguma caulinita, produzem materiais reativos quando calcinados a cerca de 700-850°C (MEISSNER, 2015). As reservas de argila são tão vastas que são efetivamente ilimitadas em comparação com a quantidade de cimento produzido. Em países como a Índia e China, com indústrias cerâmicas estabelecidas, reservas substanciais de argilas adequadas estão atualmente armazenadas como resíduos, o ônus excessivo ou insuficiente das operações de extração existentes. A exploração dessas reservas representa um enorme potencial para aumentar a oferta global de adições minerais a partir de argila calcinada. Por uma questão de sustentabilidade, o uso da argila deve seguir a mesma filosofia do emprego das cinzas e escórias. Empregar materiais residuais de outras indústrias ou realizando calcinação na própria fábrica de cimento, evitando o transporte de longa distância.

A elevada área superficial específica e a alta demanda de água, juntamente com o controle de cores, têm sido problemas que as tecnologias recentes estão resolvendo progressivamente. As argilas caulínicas calcinadas têm a vantagem de reagir muito

¹Limite técnico para o nível médio de substituição do clínquer. As taxas médias de substituição aceitas em muitas aplicações são geralmente definidas pela exigência do cliente por uma resistência inicial razoável.

rapidamente, muitas das vezes superior às das cinzas volantes e ainda mais rapidamente que as escórias. O alto teor de alumina das argilas caulínicas calcinadas torna-as particularmente adequadas para a co-substituição com calcário (ANTONI, 2012).

2.3 CIMENTO LC³

Uma adição mineral muito reativa conhecida como “metacaulim” é produzida com base na calcinação de argilas caulínicas de alta pureza. Diante de sua grande disponibilidade e propriedades pozolânicas inerentes, diversas pesquisas envolvendo esta adição mineral vem sendo realizadas. Desde 1932, o metacaulim vem sendo adicionado ao concreto para a construção de pontes em São Francisco, nos EUA, bem como em muitas das grandes usinas hidrelétricas do Brasil desde a década de 1970 (FERNÁNDEZ, 2011). Desde a década de 1970, o Brasil tem uma produção constante de argila calcinada de cerca de 2 Mt anuais.

Estudos apontaram uma capacidade de incrementar o desempenho mecânico de misturas contendo argila calcinada a partir do emprego concomitante com outra adição mineral. Lima (2004), Lima *et al* (2005), Damidot *et al.* (2011), Antoni (2013), Bishnoi *et al.* (2014), Scrivener (2014), Vizcaíno Andrés *et al.* (2015), dentre outros, determinaram que quando adicionado o fíler calcário a cimentos contendo argila calcinada ocorre uma reação sinérgica entre o carbonato de cálcio presente no calcário e os aluminatos da metacaulinita, formando monocarboaluminatos (Mc) e hemicarboaluminatos (Hc) ao invés de monossulfatos, estabilizando a etringita e preenchendo os espaços vazios. Ambos os aspectos contribuem para a durabilidade e o aumento das resistências iniciais e finais (LOTHENBACH *et al*, 2008, AVET, 2014).

Estes resultados científicos são reconhecidos na extensão da norma europeia recentemente proposta, permitindo até 55% de substituição do clínquer (SCRIVENER, 2018). A norma brasileira ABNT NBR 16697 (2018) prevê incorporações de até 55% de adições minerais ativas (pozolanas) e inertes.

A ação sinérgica é particularmente eficaz para a reação rápida de argilas calcinadas contendo metacaulim, pois não há diminuição de resistência ao se aumentar a substituição de adições minerais de 30% para 45%, quando são acrescentados 15% de calcário aos 30% de argila calcinada (ANTONI, 2012).

O consumo de portlandita pelas reações pozolânicas das argilas calcinadas e a diluição do clínquer Portland levam a uma menor quantidade de cálcio disponível para a formação secundária de gipsita e etringita, que é apontada como a principal razão para a excelente resistência ao sulfato destas misturas ternárias (ZHENGUO, 2019).

Esta mistura ternária, composta por cimento, argila calcinada e fíler calcário, denominada LC³ (*Limestone calcined clay cement*), contempla uma nova possibilidade para cimentos sustentáveis, reduzindo a problemática da insuficiência de outras adições minerais. Diante destes fatores favoráveis no âmbito econômico, técnico e sustentável, a utilização do LC³ tem sido considerada uma promissora medida mitigadora, que tem como objetivo principal a redução da relação clínquer/cimento e, conseqüentemente, da emissão de CO₂.

2.3.1 DEFINIÇÃO E PROCESSO

Esta adição conjunta de argila calcinada e calcário usada para substituir parte do clínquer em um cimento é denominada de LC³, conforme visto nos itens anteriores. Em português a denominação é cimentos de argila calcinada e calcário. Na designação LC³ – X, o índice “X” refere-se ao percentual de clínquer no cimento.

O processo de fabricação da LC³ inclui calcinação e moagem. A argila caulínica necessita ser calcinada entre 700 a 850°C. Como esta temperatura de calcinação é baixa, comparada à produção de clínquer, nenhum equipamento sofisticado é necessário para produzir as argilas calcinadas. Esta por sua vez pode ser calcinada em fornos rotativos convencionais, unidades de calcinação, leitos fluidizados, fornos de rolos ou mesmo por calcinação estática em fornos de túnel ou oscilatórios, normalmente utilizados na indústria cerâmica refratária. Todos estes são equipamentos de linha de produção, encontrados comumente no mercado. Foi descoberto que o método de calcinação não tem muito impacto na reatividade para temperaturas e tempo de residência similares (AVENT, 2018).

A moagem também pode ser realizada com equipamento convencional. Devido à natureza multicomponente da LC³, tendo ingredientes com dureza diferente, a moagem separada pode ser preferível (BISHNOI *et al.*, 2014; SCRIVENER, 2014; VIZCAÍNO ANDRÉS *et al.*, 2015).

Quando a argila caulinitica é calcinada, parte da estrutura cristalina do argilomineral é desordenada. Neste novo estado é denominada metacaulim, uma vez que o prefixo meta em grego significa “novo”. Em outras palavras, um novo caulim é formado, na verdade, com a estrutura cristalina parcial ou totalmente desordenada, constituindo-se essencialmente de um aluminossilicato ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Com a calcinação, a estrutura da camada da argila persiste até certo ponto em que as ligações de hidroxilas entre as camadas tetraédricas e octaédricas da argila são parcialmente desorganizadas, resultando em um material altamente amorfo à difração de raios-X. Nestas condições estruturais, está apto a reagir com hidróxido de cálcio para resultar em um aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e em hidratos de aluminato. Além disso, na presença de carbonato de cálcio, a alumina pode reagir com o calcário para produzir hidratos de carboaluminato. Por possuírem menor densidade do que o C-S-H produzido a partir da hidratação do clínquer Portland comum, preenchem os espaços vazios de forma mais eficiente, contribuindo para o incremento das propriedades mecânicas e de refinamento da estrutura de poros (resistência e durabilidade).

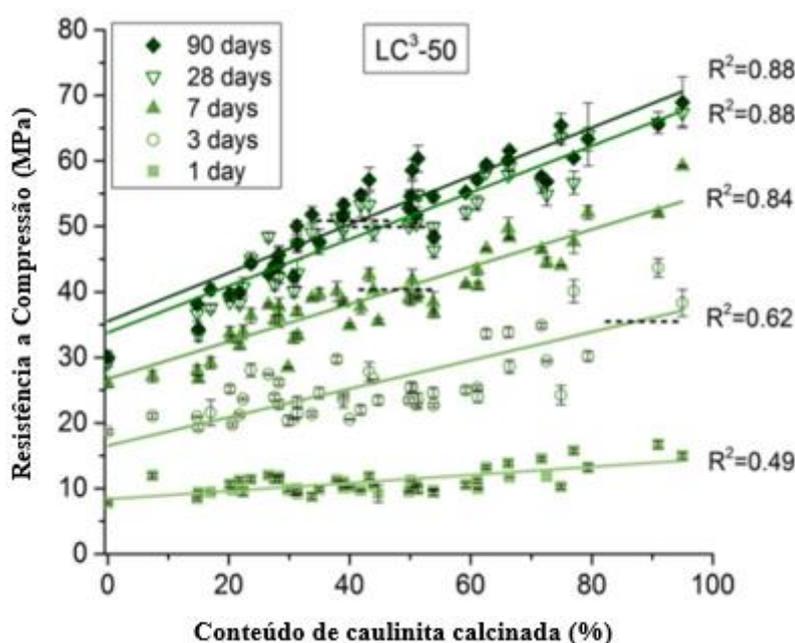
As partículas pseudo-hexagonais da argila calcinada contribuem para o aumento da área superficial específica da mistura cimentícia, o que pode resultar em uma demanda de água ligeiramente maior em comparação aos sistemas de cimento Portland comum. Porém, quanto ao uso do metacaulim no concreto, os mesmos aditivos superplastificantes empregados para o cimento Portland comum apresentam a mesma eficiência para o LC^3 .

2.3.2. PROPRIEDADES

Estudos realizados na Escola Politécnica Federal de Lausana (EPFL), na Suíça, Alujas e Avet (2015) mostraram que um teor de caulinita de apenas cerca de 40% em uma mistura de LC^3 -50 (50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário, 5% de gesso) é suficiente para alcançar propriedades mecânicas comparáveis ao do cimento Portland de referência já aos 7 dias. O estudo foi realizado sob as prescrições da norma europeia EN 196-1, que estabelece argamassas com relação água/cimento de 0,5 na proporção cimento: areia de 1:3. Scrivener (2018) fez um apanhado de inúmeros estudos, que resultou num compêndio com informações sobre o emprego de 46 argilas em diversos locais do mundo (Figura 12). A autora concluiu que não parece haver muito impacto dos materiais secundários presentes nas argilas sobre as propriedades mecânicas do cimento LC^3 , como por exemplo quartzo, outros argilominerais e óxidos de ferro.

A reatividade da argila calcinada é substancialmente dependente do teor de caulinita da argila. As argilas contendo cerca de 40% de caulinita ou acima obtêm resistências comparáveis ao cimento Portland comum quando utilizado em LC³-50 (50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso). As argilas são amplamente disponíveis e por serem uma das matérias-primas necessárias para a produção de cimento, podem até estar disponíveis jazidas localizadas nas proximidades das fábricas de cimento (SCRIVENER, 2018).

Figura 12 - Impacto do teor de caulinita calcinada na resistência de argamassas para misturas de 50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso em argamassas.



Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2017)

Como foi abordado, na literatura atual a proporção ideal para o LC³ é a substituição de 50% do clínquer (ou aproximadamente 55% de cimento) por uma mistura de caulim calcinado e calcário na proporção de 2:1, independentemente do percentual de caulinita na argila (ANTONI, 2012; SCRIVENER, 2014). No caso dos caulins da Amazônia, extremamente finos e com percentuais de caulinita superiores a 93%, há potencialidades de substituições mais elevadas de clínquer, inclusive com incorporações maiores de calcário em relação ao caulim calcinado (LIMA, 2004). O pesquisador substituiu até 60% de cimento (clínquer 96% + 4% de gipsita) por uma mistura de RBC calcinado e calcário de proporção 1,5:1 sem comprometimento das propriedades mecânicas. Pelo contrário, foram obtidas resistências à compressão superiores ao do

cimento Portland comum, em cerca de 4%. Estas composições, por usarem menos clínquer e mais calcário, alcançaram redução de até 50% nas emissões de CO₂ e de 40% na demanda de energia em relação ao cimento Portland comum.

As argilas calcinadas, dependendo do tipo, podem apresentar elevada finura, que pode ser exacerbada se for incorporada ao clínquer. Isso pode causar maior demanda de água ou exigir níveis mais altos de superplastificante. Portanto, o processo de preparar e misturar o LC³ é importante. O mais adequado para esta situação é moer previamente o clínquer e depois adicioná-lo à mistura de argila calcinada e calcário (PILLAI, 2018).

No cimento LC³, a hidratação dos silicatos C₃S e C₂S ocorre de maneira semelhante à dos demais cimentos Portland, formando os produtos de hidratação C-S-H e hidróxido de cálcio, conforme apresentado em itens anteriores. Além disso, em função da reação da argila calcinada e do hidróxido de cálcio, ocorrem ainda as reações pozolânicas, que geram C-S-H secundário para o sistema cimentício.

A partir desta mistura ternária que compõe o LC³, ocorre uma reação sinérgica entre o fíler calcário e a argila calcinada, capaz de contribuir com a resistência mecânica e durabilidade do material no estado endurecido. Isso ocorre a partir da formação do carboaluminato hidratado, que propicia o preenchimento de vazios no sistema cimentício e refina a estrutura de poros do material. Em função da formação do carboaluminato, ocorre também a estabilização da etringita e conseqüentemente a redução do monossulfoaluminato.

A formação do carboaluminato no cimento LC³ tem sua cinética de hidratação semelhante àquela que ocorre no caso de cimentos com adição exclusiva de fíler calcário. No entanto, neste último caso, a principal fonte de alumina é o C₃A, fase que tem o seu quantitativo limitado na composição dos cimentos Portland por normas técnicas que visam limitar a redução das manifestações patológicas por ataque de sulfatos. Assim, a formação de carboaluminato se torna limitada em função da fonte de alumina reduzida. Diante disso, torna-se essencial uma nova fonte de alumina no sistema cimentício para que possam ser adicionados maiores teores de fíler calcário e conseqüentemente um quantitativo maior de carboaluminato hidratado seja formado, que no caso seria a argila calcinada.

No cimento LC³, a formação dos novos produtos de hidratação ocorre principalmente pela reação do aluminato proveniente da argila calcinada com o carbonato de cálcio, componente principal do fíler calcário e o hidróxido de cálcio, formando então o carboaluminato hidratado, conforme demonstrado na Equação 2 (SCRIVENER, 2014).



A: aluminato

Cc: carbonato de cálcio (fíler calcário)

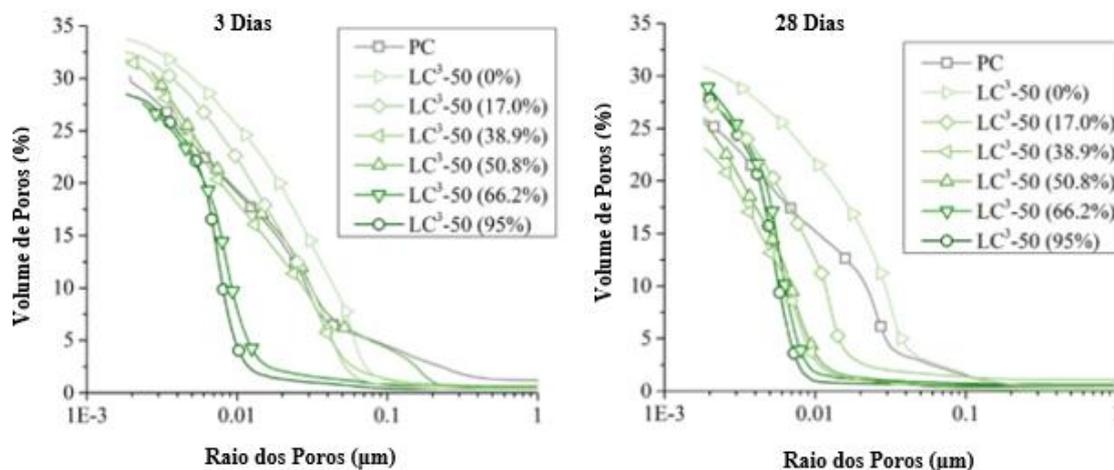
CH: hidróxido de cálcio

C₃A.Cc.H₁₂: carboaluminato hidratado

Está em curso um extenso programa de testes voltados para a durabilidade em ambientes de exposição natural, desenvolvidos pelo *LC³ Project*. Os resultados até o momento indicam que os concretos com LC³ proporcionam boa proteção às armaduras, excelente resistência à penetração de cloretos, boa mitigação da reação álcali-agregado, bom desempenho frente a sulfatos e com carbonatação compatível a outros cimentos pozolânicos (PILLAI, 2018).

As fases presentes nos cimentos LC³ são as mesmas observadas nos cimentos pozolânicos amplamente utilizados nas construções. No entanto, há um grau muito alto de refinamento de poros da pasta de cimento quando se emprega o LC³ (Figura 13). O raio limite dos poros obtidos por porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) indica o tamanho dos poros e a interconectividade entre eles através do material. A cinética do refinamento dos poros depende do teor de caulinita da argila calcinada. Nas misturas de LC³-50, as argilas calcinadas com um elevado teor de caulinita original (>65%) originam um raio limite de poro reduzido, cerca de 10nm, já aos 3 dias. Aos 28 dias, argilas calcinadas com um teor de caulinita de até 40% também proporciona uma estrutura de poro bem refinada. De fato, aos 28 dias, todas as pastas de cimento confeccionadas com LC³ com argilas calcinadas, mesmo para aquelas com baixíssimo teor de caulinita; tem uma estrutura de poros mais refinada do que as das pastas com cimento Portland.

Figura 13 - Refinamento da estrutura de poros das pastas com diferentes classes de argilas calcinadas empregadas em cimentos LC3 -50 (50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário, 5% de gesso).



Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2017)

Na Figura 13 os valores entre parênteses indicam o teor de caulinita presente na argila antes da calcinação. Este refinamento dos poros é especialmente vantajoso em relação ao ingresso de cloreto. A entrada de cloreto é a principal causa de problemas de durabilidade do concreto armado devido à corrosão das armaduras.

Recentemente pesquisadores indianos confirmaram a boa perspectiva em relação a durabilidade, principalmente no quesito de resistência à penetração de cloretos (PILLAI, 2018). No trabalho, empregou-se concretos com três tipos de cimento: o primeiro com cimento Portland comum, do tipo 53 (contendo 7,2% de C₃A), de acordo com a norma indiana I.S. 12 269 (2013). Os demais concretos com cimento com 30% de cinza volante Classe F (CCV) e com LC³ de composição de 50% de clínquer, 31% de argila calcinada, 15% de calcário 4% de gesso. Todos os concretos foram produzidos em escala industrial. A Tabela 3 apresenta o proporcionamento para as diferentes misturas de concreto estudadas e seus parâmetros relevantes.

Tabela 3 - – Materiais constituintes e propriedades dos concretos.

Materiais constituintes e propriedades dos concretos	C35				C50			
	CPC-1	CV-1	LC3-1S	LC3-1P	CPC-2	CV-2	LC3-2	
Tipo de Ligante	CPC	CPC+CV	LC3	LC3	CPC	CPC+CV	LC3	
Quantidade Ligante (kg/m ³)	310	360	310	360	360	380	340	
Água (kg/m ³)	155	162	155	162	144	133	136	
Relação a/c	0,5	0,45	0,5	0,45	0,4	0,35	0,4	
Agregado miúdo (kg/m ³)	695	721	708	687	703	699	704	
Agregado graúdo (kg/m ³)								
	10 mm	496	463	491	476	477	475	488
	20mm	744	694	736	715	716	713	732
28 dias Resistência à compressão	-	45,4	37,6	38,8	40,7	60	54,6	56,7
	cov	0,01	0,04	0,004	0,005	0,03	0,03	0,004
Coefficiente de difusão	-	18,7	3,5	3,3	1,3	15,6	1,9	1,7
365 dias (x 10 ¹² m ² /s)	cov	0,34	0,2	0,08	0,12	0,17	0,22	0,07
Condutividade Elétrica mS/m								
	28 dias	11,87	7,79	0,65	0,51	9,79	4,67	0,51
	90 dias	10,19	3,4	0,39	0,27	8,38	2,46	0,25
	365 dias	4,87	1,03	0,18	0,14	6,23	1,06	0,14
Coefficiente de envelhecimento, m	μ	0,26	0,7	0,5	0,53	0,17	0,55	0,54
	cov	0,3	0,14	0,27	0,14	0,31	0,15	0,19
Cs	μ	0,06	0,05	0,02	0,03	0,07	0,05	0,02
(% agl/concreto)	cov	0,28	0,32	0,39	0,39	0,28	0,32	0,39
Total de emissões de CO ₂ /m ³ de concreto (kgCO ₂ eq./m ³)	-	335	290	255	280	380	300	270

Nota: % agl/concreto representa o percentual de aglomerante sobre o peso do concreto.

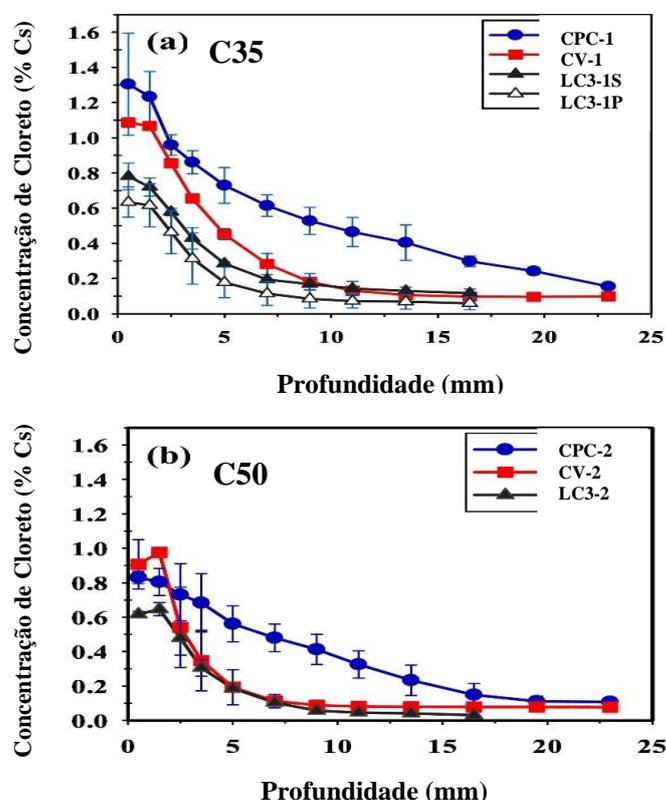
FONTE: ADAPTADO (PILLAI 2018).

Sete misturas de concreto em duas categorias de resistência (C35 e C50) foram adotadas para o estudo com base no concreto típico usado na prática construtiva. Na Tabela 3, nas misturas C35, os concretos com CPC-1 (cimento Portland comum) e CV-1 (CPC + cinza volante), foram dosados empregando diferentes teores de aglomerantes e relações água/aglomerante para atingir uma resistência característica de 28 dias de 35 MPa. Na mesma categoria de resistência (C35), duas misturas de concreto LC³ (LC³-1S e LC³-1P) foram dosadas, uma de tal forma que o concreto LC³-1S apresentasse resistência semelhante ao do concreto CPC-1 e CV-1 e outra em que concreto LC³-1P tivesse proporções de mistura iguais ao CV-1, mas com resistências diferentes, no caso, superiores. Nas misturas C50, o concreto CPC-2, CV-2 e LC3-2 foram produzidos

empregando diferentes teores de aglomerantes e relações água-aglomerante para atingir a resistência característica de 50 MPa. Em todos os casos, o abatimento de tronco (*slump test*) das misturas foi uniformizado, variando entre 80-120 mm através do emprego de dosagens distintas de superplastificantes à base de éter policarboxílico, na faixa de 0,2 a 1% de sólidos, dependendo do tipo de concreto.

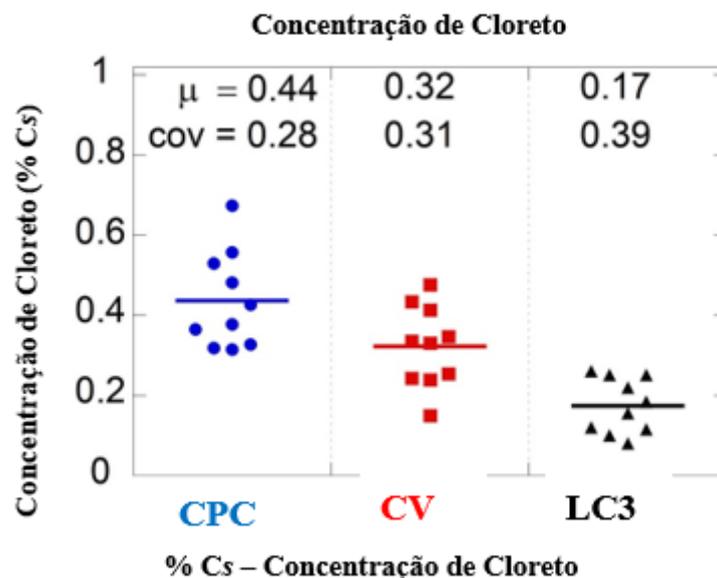
As Figuras 14 e 15 mostram os perfis de concentração de cloretos ao longo da profundidade de recobrimento dos concretos após 56 dias de exposição à solução de cloreto. As misturas de concreto CPC apresentaram maiores taxas de entrada de cloreto em ambas as categorias (C35 e C50), com um perfil que é distintamente diferente das misturas com CV e LC³. Este comportamento pode ser atribuído à microestrutura mais refinada que reflete na alta resistência iônica das fases aglomerante nos concretos CV e LC³ (DHANDAPANI, 2017; DHANDAPANI 2018). As diferenças na concentração de cloreto na superfície são governados principalmente pela porosidade próxima da superfície do concreto. Os concretos LC³-1S, LC³-1P, LC³-2, CV-1 e CV-2 exibiram baixa porosidade e menores quantidade de poros largos, o que resultou em menores concentrações de cloretos na superfície.

Figura 14 – Concentração de Cloreto (a) C35 e (b) concreto C50 (% Cs).



FONTE: ADAPTADO (PILLAI 2018).

Figura 15 - Limiar de cloretos para o início da corrosão do vergalhão em argamassas CPC, CV e LC3.

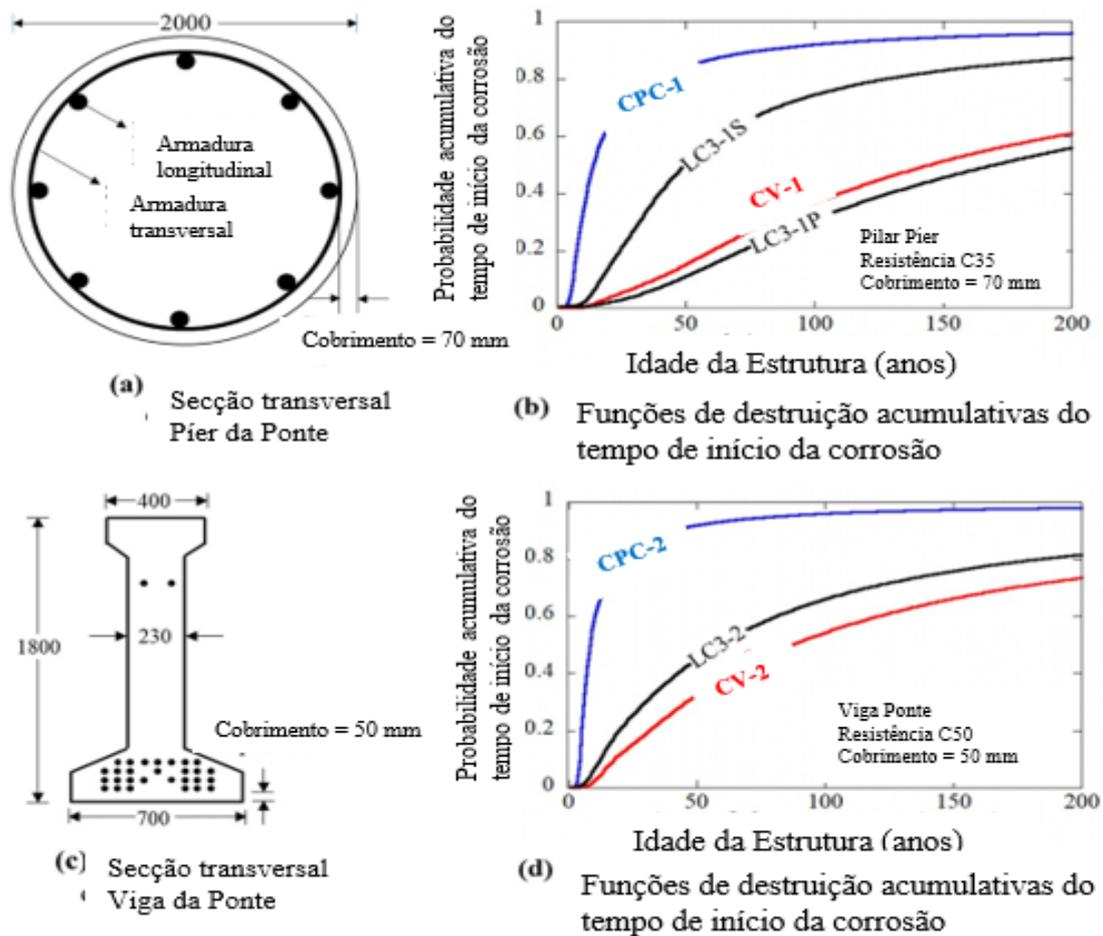


FONTE: ADAPTADO (PILLAI 2018).

Com relação ao impacto dos materiais cimentícios na vida útil e no consumo de energia foram realizados dois estudos de casos relacionados à construção de projetos corriqueiros de pontes para avaliar o efeito do tipo de ligante e a dosagem do concreto na vida útil, definida a partir do parâmetro tempo de início da corrosão e das emissões de CO₂ por ano de vida útil. A concentração de cloreto na superfície (C_s) está relacionada com a taxa de acúmulo de cloretos na superfície do concreto e às condições de exposição (GERGELY, 2006; COSTA, 1999). Neste caso, os valores inicial e máximo de C_s foram considerados como 0 e 0,6% e a taxa de acumulação de cloro foi assumida como sendo de 0,04% C_s por ano (considerando a localização da ponte a 800 m de distância do oceano, na costa indiana).

No primeiro estudo de caso, sobre o pilar de píer (Figura 16 a), é possível estimar a vida útil do elemento estrutural através de funções de distribuição acumulativa das quatro categorias de concreto, levando-se em consideração o tempo de início de corrosão (Figura 16 b). Considerando-se uma probabilidade de falha de 0,50 ou 50%, observa-se que o píer da ponte com o concreto com CV (CV-1) pode ter uma vida útil de aproximadamente 150 anos, o que é 10 vezes mais longa que a do concreto com CPC (CPC-1) (15 anos). Os concretos LC³-1P e LC³-1S apresentaram desempenho semelhante ao do concreto CV-1, sendo que o teor de cloretos C_s foi ainda menor que o encontrado tanto para os concretos CPC-1 e CV-1 (Figuras 16 e 17).

Figura 16 - Funções de distribuição cumulativa de tempo de início da corrosão.

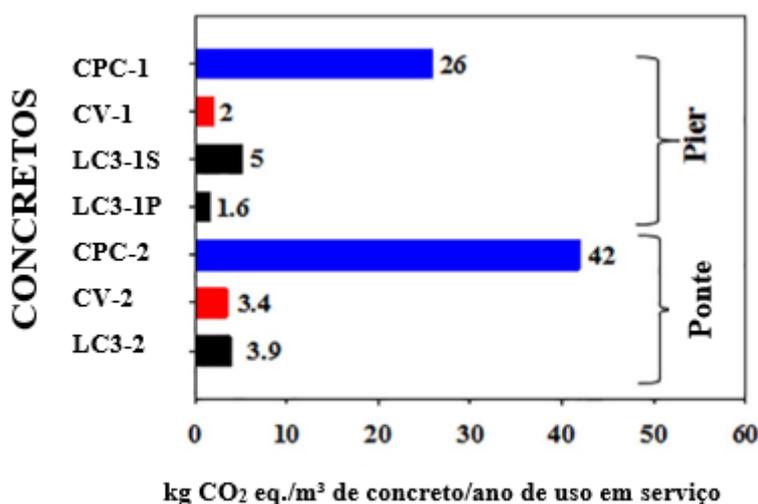


FONTE: (PILLAI 2018).

A Figura 16 (c) mostra a seção transversal da viga da ponte, com um cobrimento de 50 mm. As misturas de concreto C50 consideradas neste estudo de caso são CV-2, LC3-2 e CPC-2. A Figura 16 (d) mostra as funções de destruição acumulativas do tempo de início da corrosão. Constata-se que a viga teria uma vida útil de aproximadamente 10, 60 e 90 anos para os concretos CPC-2, LC3-2 e CV-2, respectivamente, levando-se em consideração uma probabilidade de falha de 50% ($P_f = 0,5$). O potencial do concreto produzido com o LC³ em alcançar uma vida útil mais longa do que o concreto com o CPC é constatado pelos resultados apresentados na Figura 16 (d). Além disso, o total de emissões de CO₂ por unidade de volume da mistura LC³-2 é inferior ao das misturas CPC-2 e CV-2. Consequentemente, o efeito combinado do menor teor de clínquer e vida útil mais longa das misturas LC³-2 e CV-2 ajudam a reduzir substancialmente a emissão anual de CO₂ por ano de vida útil (Figura 16).

As emissões de CO₂ por ano de vida útil do concreto LC3-1S são ligeiramente maiores do que as do concreto CV-1, embora as emissões por unidade de volume do primeiro concreto sejam menores devido às diferenças na vida útil estimada. No entanto, os valores para ambos concretos são muito inferiores aos do concreto CPC-1. Porém, as emissões anuais de LC³-1P (com mais conteúdo de ligante) são menores devido à maior vida útil. Em resumo, as misturas de concreto LC³ podem ser projetadas para alcançar emissões anuais variando de 1,6 a 5 kg CO₂ eq./m³ de concreto por ano de vida útil, que é semelhante ao dos sistemas PFA e significativamente menor do que o dos sistemas CPC (Figura 17).

Figura 17 – Emissões por ano de vida útil do Concreto.



FONTE: ADAPTADO (PILLAI 2018)

No caso do estudo de caso 2 (vigas da ponte), constatou-se que a vida útil das estruturas de concreto com CV e LC³ podem ser significativamente mais longas do que aquelas com apenas CPC como aglomerante. Por causa da alta resistividade iônica é possível projetar concreto durável com LC³ e CV. Além disso, as emissões de CO₂ por ano de vida útil dos concretos CV e LC³ foram muito menores que a do concreto com CPC. Os resultados indicam que é possível a dosagem de concreto LC³ com maior resistência à entrada de cloreto e redução na emissão de CO₂ na ordem de 16% a 30% em relação ao concreto CPC de resistência similar e resistência à penetração de íons cloretos semelhante e com menor emissão de CO₂ (3% a 12%) em relação ao concreto com CV de resistência similar.

A diferença nas estimativas de vida útil enfatiza claramente o papel significativo das pozolanas e de aglomerantes de baixo impacto como a CV e o LC³ no incremento da durabilidade e na redução das emissões de CO₂ para estruturas de concreto.

2.3.3 O CIMENTO LC³ NOS DIAS ATUAIS

Na Índia, estudo de Maity, Bishnoi e Kumar (2015) avaliaram o ganho de sustentabilidade da utilização do cimento LC³ a partir da construção de um edifício residencial, onde apontou uma redução de 0,5 kg de CO₂ por m² de área construída, e uma economia deste novo cimento em relação ao cimento Portland comum, podendo chegar a 40%, dependendo do custo de transporte da argila.

Em Cuba foi aprovada em 2016 pela Organização Nacional de Normalização a nova norma para a produção de cimento LC³. Esta normalização abrange a fabricação para o mercado de um cimento no qual 50% do clínquer pode ser substituído por calcário e argila calcinada, desde que este atenda alguns critérios de desempenho especificados. Com isto a fabricação desse cimento poderá reduzir de 20% a 30% a emissão de CO₂ em relação às emissões geradas pelo cimento Portland anterior.

Berriel et al. (2016), no estudo intitulado “A eficiência do cimento LC³”, avaliaram a sustentabilidade do novo produto a partir da comparação do ciclo de vida de três cimentos produzidos em Cuba. Um cimento Portland comum, um cimento pozolânico e o LC³, fabricado a partir de 45% de substituição do clínquer por argila calcinada e fíler calcário. Os resultados mostraram uma redução de cerca de 30% das emissões de CO₂ do cimento LC³ em relação ao cimento Portland comum. Já com relação ao cimento pozolânico utilizado na região, o desempenho do LC³ no que diz respeito à sustentabilidade, apresentou uma redução de 13% de emissões de CO₂.

Estudo realizado considerando a produção deste novo cimento em escala industrial aponta que a produção em massa do LC³ pode reduzir em até 25% as emissões de CO₂ resultantes das etapas produtivas do material (VISCAÍNO et al, 2015).

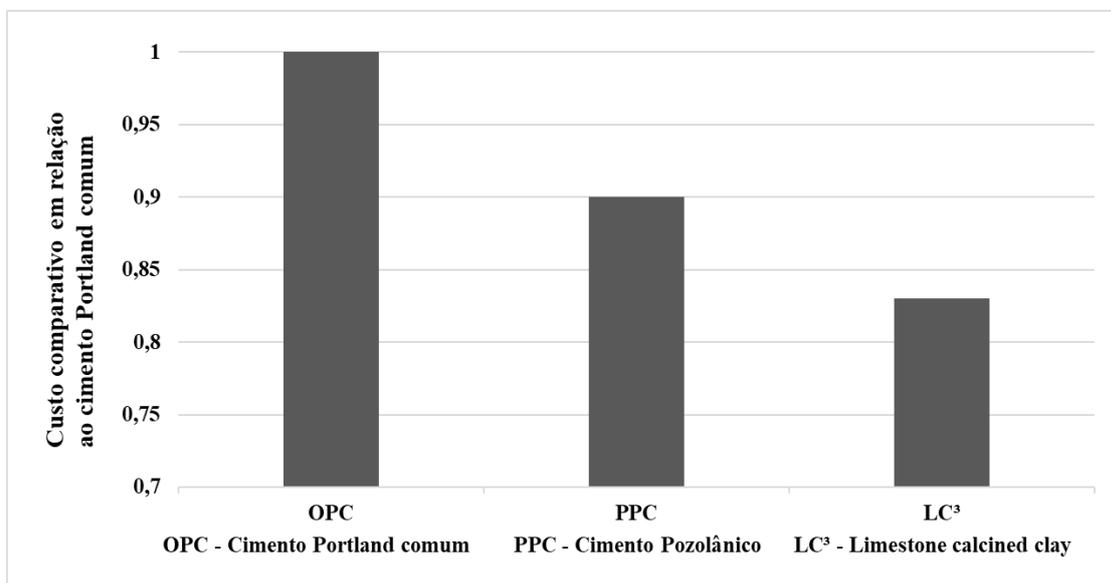
Na Índia, a produção experimental do LC³ foi concluída em janeiro de 2015. Hoje, dois edifícios construídos são prova da tecnologia: a embaixada da suíça em Nova Delhi e o Taragam Orchha, próximo a Jhanis, na Índia central, que abriga um escritório da Development Alternatives (DA), uma das mais antigas organizações sociais da Índia com

foco em desenvolvimento sustentável. O DA colaborou em um projeto de desenvolvimento da tecnologia LC³ com a École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), que conduziu a pesquisa.

O cimento LC³ está liderando os caminhos contemporâneos para enfrentar desafios ambientais e escassez de recursos e também apresenta pontos positivos relacionado à sua fabricação. Uma das vantagens é a semelhança entre as plantas industriais já utilizadas para a produção de cimento usuais e as para produção do LC³. Este fato leva a uma grande agilidade, bem como, um baixo custo na implantação do novo produto.

No estudo de Joseph, Joseph e Bishnoi (2015) intitulado “Viabilidade econômica da produção do LC³ na Índia”, foi realizado uma comparação do custo de produção de um cimento Portland comum (OPC), de um cimento pozolânico (PPC) composto por 60% de clínquer, 35 % de cinza volante e 5% de gipsita e o cimento LC³ com teores de 30% de argila calcinada e 15% de filer, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Comparação de custos de fabricação.



Fonte: ADAPTADO (JOSEPH, JOSEPH E BISHNOI, 2015)

Observa-se uma vantagem econômica do cimento LC³ em relação aos demais, isso ocorre principalmente devido a dois fatores, baixo teor de clínquer e menor necessidade de combustível e eletricidade para calcinação de argila em comparação com a produção

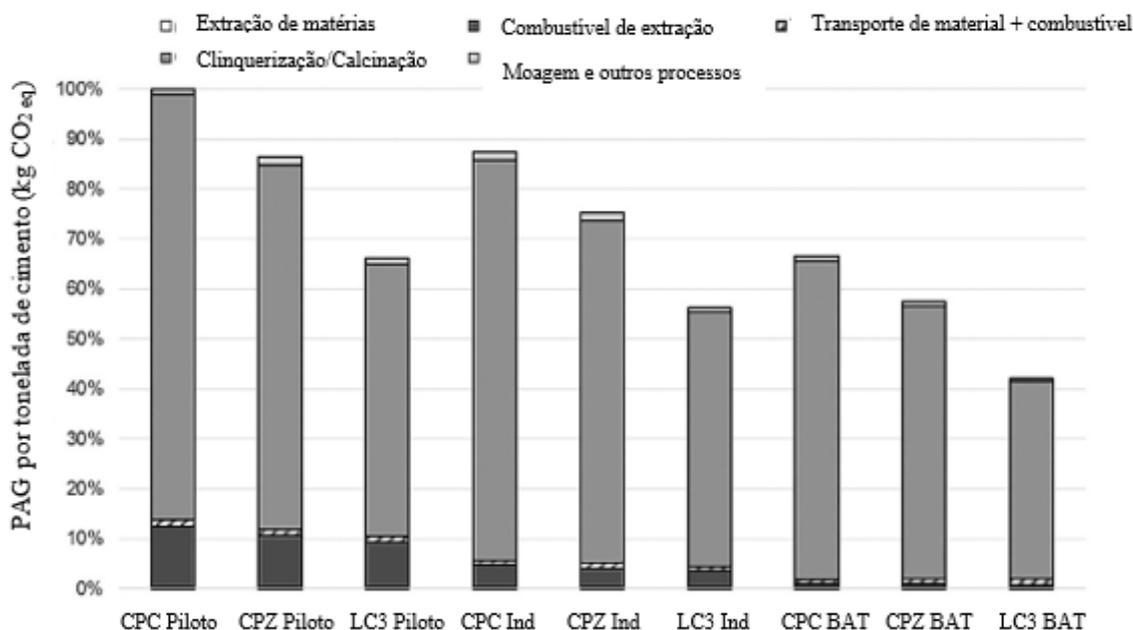
de clínquer (JOSEPH, JOSEPH e BISHNOI, 2015). No entanto, vale ressaltar que a economia e a viabilidade da produção do LC³ são afetadas diretamente pela disponibilidade das adições minerais presentes em cada região fabril.

Em suma, a partir da utilização dessa mistura ternária (cimento + argila calcinada + fíler calcário), resultados positivos de resistência mecânica e durabilidade têm sido obtidos em diversos trabalhos internacionais e são associados principalmente à reação sinérgica que ocorre entre as adições minerais Damidot *et al.* (2011), Antoni (2013), Bishnoi *et al.* (2014), Scrivener (2014), Vizcaíno Andrés *et al.* (2015).

Um estudo detalhado de Avaliação de Ciclo de Vida foi realizado para a indústria cimenteira cubana. De acordo com Berriel *et al.* (2016). A partir de uma mistura de concreto de LC³-50 (50% de clínquer moído, 30% de argila calcinada, 15% de calcário, 5% de gesso) foi comparada com dois concretos, sendo o primeiro produzido com cimento Portland comum, com 5% de calcário, e o segundo com cimento Portland Pozolânico com 15% de pozolana natural como substituto do clínquer.

A avaliação foi feita para 3 cenários: produção piloto, esquema de produção previsível em Cuba (Industrial) e Melhor Tecnologia Disponível (BAT). Na Figura 19 são mostrados os dados comparativos das emissões de CO₂ para os três tipos de cimento avaliados, para os três níveis técnicos diferentes: Piloto, Industrial e BAT. É interessante notar que, independentemente do nível tecnológico, o cimento LC³ produz sempre 30% de economia nas emissões de CO₂. Além disso, percebe-se que o pior resultado do cimento LC³ fabricado no teste piloto industrial é melhor (em termos de CO₂ emissões) que o melhor cimento Portland comum que pode ser produzido com o BAT. As principais reduções de emissões foram relacionadas à economia de energia e à substituição de clínquer, embora haja relatos de uma diminuição significativa no consumo de eletricidade durante o processo de moagem devido à maciez da LC³ em comparação com o cimento Portland comum.

Figura 19 - Potencial de aquecimento global (PAG) relativo ao impacto da produção de cimento em Cuba.

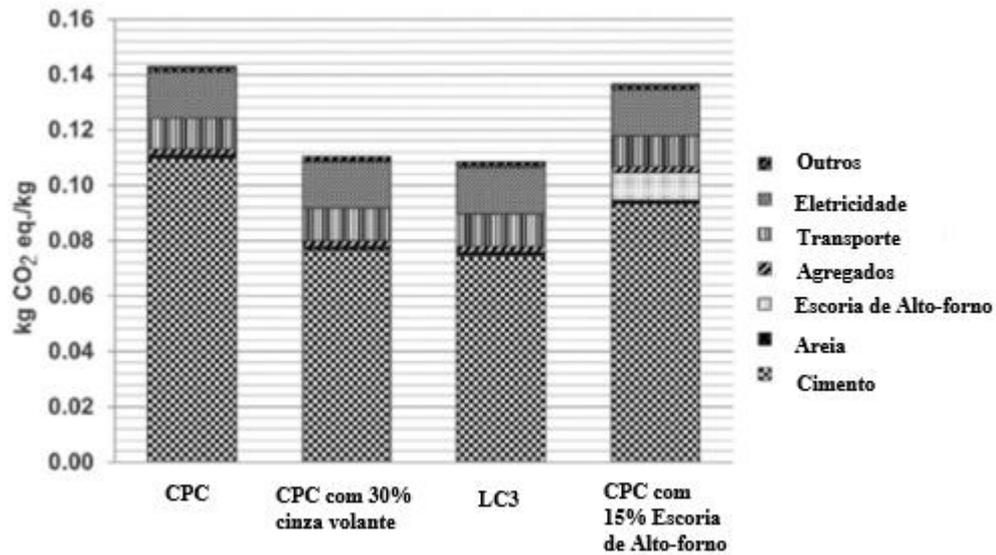


Fonte: ADAPTADO (BERRIEL *et al.* 2016).

Uma análise detalhada também foi feita por pesquisadores do Instituto Indiano de Tecnologia (IIT) de Madras, com base em dados reais de várias fábricas de cimento (GETTU, 2019). Na análise também mostra uma economia de 30% das emissões de CO₂ para o LC³-50 em comparação com o cimento Portland comum e cerca de 10% em comparação com uma mistura de cimento Portland pozolânico (cinzas volantes). Resultados semelhantes aos números obtidos em Cuba.

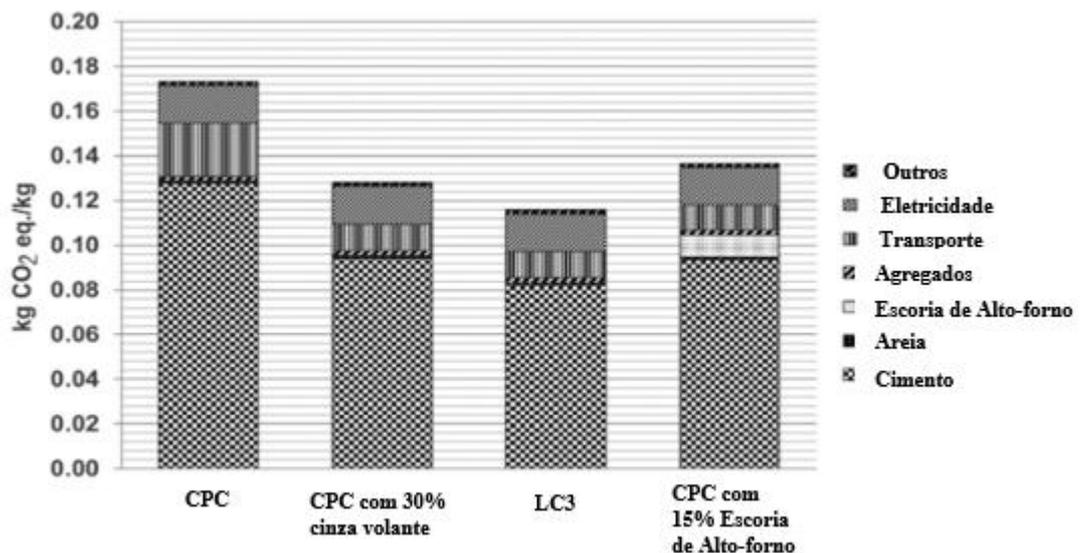
O IIT de Madras também calculou valores de redução das emissões de CO₂ em concretos de 30MPa e 50MPa, conforme mostrado nas Figuras 20 e 21. Em ambos os casos, o concreto com LC³-50 apresenta as menores emissões. No caso do concreto de fck 30MPa, as emissões são praticamente as mesmas que para um cimento com cinzas volantes, mas para o fck de 50 MPa houve diferenças significativas de redução das emissões de CO₂ em prol do LC³, mesmo em comparação com o cimento de cinzas volantes.

Figura 20 - Emissões de CO₂ para concretos de 30 MPa.



Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2017).

Figura 21 - Emissões de CO₂ para concretos de 50 MPa.



Fonte: ADAPTADO (SCRIVENER, 2017).

Além das vantagens técnicas relacionadas à durabilidade e às propriedades mecânicas, o LC³ pode atender aos critérios da viabilidade econômica, baixo custo de investimento e disponibilidade fácil de matérias primas, pois emprega os mesmos insumos da produção do cimento: argila e calcário. Por esta razão não requer altos investimentos em equipamentos e o processo de fabricação pode ser mais facilmente

adaptado ao sistema de produção existente. Outro aspecto favorável ao novo cimento de mistura ternária é que pode ser produzido a partir a matérias-primas de baixa qualidade, normalmente descartadas nos processos industriais pelo baixo teor do mineral de interesse como por exemplo o caulim com reduzidos percentuais de caulinita e os calcários dolomíticos (CANCIO DIAZ *et al*, 2017).

Nos trabalhos desenvolvidos pelo *LC³ Project*² as argilas calcinadas empregadas na composição dos cimentos LC³ não possuem teor de caulinita calcinada superior a 65% por questões econômicas, visto que o metacaulim, com elevada concentração de caulinita desordenada, custa três vezes o preço do cimento Portland (AVET, SCRIVENER, 2018). Entretanto, em que pese a Amazônia possuir os mais variados tipos de depósitos de caulim, de baixa a elevada concentração de caulinita, nesta pesquisa, a investigação foi direcionada para o caulim com alto teor caulinita tendo em vista as particularidades deste material gerado em larga escala e que hoje é descartado.

Qualquer cimento alternativo levará algum tempo para se estabelecer no mercado. No entanto, a similaridade dos materiais do LC³ com outros cimentos contendo adições minerais significa que não deve haver uma barreira maior à aceitação.

Existe um o grande potencial desse produto para o mercado do estado do Pará, devido as características técnicas dos materiais de partida e a logística de transporte e emprego, que podem proporcionar a redução dos custos de produção. Este aspecto, associado a expectativa de grandes investimentos de infraestrutura no estado do Pará nos próximos 10 anos induzirá o uso intensivo de cimento Portland, o que diminuirá o impacto ambiental causado pelas emissões de CO₂ na produção do cimento Portland composto com 21% de fíler calcário. Ainda do ponto de vista ambiental, há a possibilidade de se dar destino tanto aos resíduos do processamento (CF) quanto do beneficiamento do caulim (RBC). Este último vem recentemente causando problemas de vazamentos, seja no mineroduto, seja por transbordamento das barragens na época das chuvas intensas na

² Com financiamento da Agência Suíça para o Desenvolvimento e a Cooperação, por meio de seu Programa Global de Mudanças Climáticas o objetivo do projeto LC³ é, por meio de pesquisa e testes, fazer da LC³ um cimento de uso geral padronizado e convencional no mercado global de cimento. As principais atividades de pesquisa concentram-se não apenas em áreas temáticas específicas de pesquisa de cimento, como estrutura de poros, reologia, reatividade, durabilidade e propriedades mecânicas, mas também na produção, sustentabilidade ambiental e custo-efetivo deste novo cimento.

região de Barcarena (DIÁRIO ONLINE, 2016). Os resultados dos trabalhos desenvolvidos por Lima (2004) e Lima, Barata e Carneiro (2005) motivaram a realização desta pesquisa científica a buscar aprofundar os estudos sobre LC³ a partir dos resíduos caulíníticos da Amazônia. As diferenças foram essencialmente duas, ao invés de empregar o RBC, como nos trabalhos anteriores, investigou-se o CF pelas quantidades geradas serem substancialmente superior ao do RBC e pelas características físicas mais adequadas do ponto de vista logístico e econômico. A outra, é comparar o cimento LC³ com os cimentos atualmente produzidos no Brasil.

Como foram trabalhos realizados a 15 anos, houve uma mudança no cenário de produção do cimento. Em 2018, a norma sobre cimento Portland brasileira permitiu um percentual de incorporação de fíler calcário maior, de 10% para 25%, fato que acarretou numa substancial redução nas emissões de CO₂ e na energia consumida na produção de cimento, alterando inclusive a forma de produzir cimento no Brasil. Hoje, muitas fábricas deixaram de produzir os cimentos pozolânicos (CP IV) e compostos com pozolanas (CP II Z) em prol do cimento com adição de fíler calcário (CP II F) pelas vantagens expostas.

E ainda, conforme dito anteriormente, o emprego do LC³ pode ser viabilizado no âmbito normativo uma vez que a nova norma que estabelece os requisitos para o cimento Portland, a ABNT NBR 16697, lançada em 2018, permite o emprego de até 10% de fíler calcário em conjunto com 50% de pozolana. E a norma ABNT NBR 5752 (ABNT, 2014) prescreve que para ser considerado pozolânico, o material deve apresentar índice de desempenho (ID) superior a 90% aos 28 dias. O percentual excedente de 10% de calcário no LC³ poderia ser contabilizado na argila calcinada, visto que não há restrições químicas sobre o teor de CaO para pozolanas na norma ABNT NBR 12653 (2014). Não há uma regulamentação específica para o cimento LC³ no Brasil ainda, mas o que se tem são combinação prescritivas de três normas interacionadas que permitem o emprego do LC³, desde que a pozolana com percentuais de até 35% de calcário alcance o ID de 90%.

2.3.4 OUTRAS APLICAÇÕES

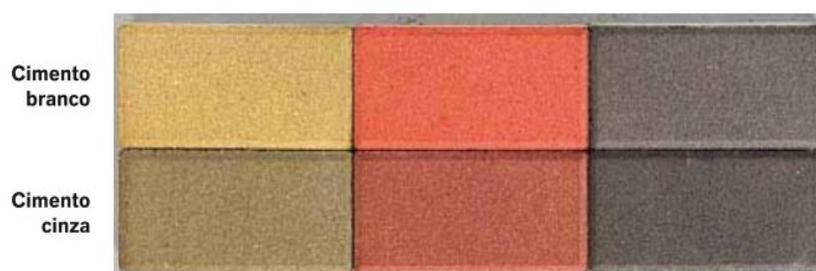
Com a evolução das técnicas construtivas e dos materiais é possível criar e projetar estruturas nas diversas cores e formas. O concreto como material na arquitetura se destaca pela beleza; criatividade em *design*; consistência em cores brilhantes ou tons pastéis. Podem combinar com o uso de pedras, vidro e cerâmica e uma construção rápida com o

uso de pré-moldados. O uso do cimento convencional cinza na produção de concretos cromáticos produz cores com tonalidades mais escuras, ao passo que o cimento branco pode ter diversas opções de cores. Muitos acabamentos são adequados para pisos, pavimentos e calçadas, painéis arquitetônicos de fachadas e edifícios. Estes acabamentos do concreto incluem o uso de cor e/ou cimento branco; concretos com agregado exposto em texturas; concreto fotogravado e concreto aparente em superfícies lisas.

O concreto branco pode ser aplicado em sua cor original ou ser harmonizado com cores que mantêm a fidelidade do pigmento por conta da coloração branca da base. A escolha deste material poderia gerar economia no orçamento, porque elimina o sistema de pintura que necessita de etapas como a aplicação de massa fina, massa corrida e pintura. Porém, o custo de produção do concreto colorido que pode ser até três vezes maior do que o metro cúbico do concreto convencional devido ao fato da produção de cimento branco estrutural no Brasil ter sido interrompida em escala comercial em 2008 (SNIC, 2013). O concreto colorido é obtido através da adição de pigmentos inorgânicos diretamente à mistura, o que, geralmente, é feito quando o material está no caminhão-betoneira, logo após a dosagem de outros materiais. Além de ser aplicado para dar melhor efeito arquitetônico, é usado também em grandes obras para associar uma cor a uma peça em processo de concretagem, minimizando o risco de uma estrutura ser executada de forma errada (HELENE, 2004).

A cor natural do cimento Portland cinza afeta diretamente a cor do produto final, o concreto colorido. Como a cor cinza absorve todas as cores, o concreto não pode ser pigmentado de forma nítida, com tons intensos, ao passo que quanto se emprega o cimento branco, as tonalidades ficam mais intensas, principalmente quando se quer tons de cores pastéis. Pode-se observar a influência da cor do cimento na tonalidade final na Figura 22.

Figura 22 - Influencia do cimento na cor final.



Fonte: HARTMANN, 2011.

Neste sentido, o cimento LC³ produzido com as matérias primas provenientes da atividade de mineração do Estado do Pará podem apresentar bons resultados devido a substituição bem sucedida de até 50% do clínquer por adições minerais (argila caulinitica e calcário) (LIMA, 2004). Ambos os materiais de partida, o RBC e o calcário possuem intensidade de cor muito próxima ao branco, o que irá reduzir a cor cinza inerente do cimento Portland (FERREIRA, 2019). Seguindo a linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo de Universidade do Pará, referente a aplicação de pigmentos em concretos coloridos com o uso de cimentos de baixa emissão de CO₂. O cimento LC³ apresentará uma cor de cinza com uma tonalidade menos intensa, com maior alvura, o que permitirá a melhor utilização de pigmentos assim como o uso do concreto aparente.

Outra aplicação segundo LIMA *et al*, (2005), o uso do caulim calcinado com o calcário abre uma nova perspectiva para a produção de fibrocimentos a partir de fibras naturais ou a produção de misturas de concreto de alta resistência (CAD), na qual a baixa permeabilidade compensa a abaixa alcalinidade destas pastas – como é o caso do cimento LC³. A hipótese levantada pelos pesquisadores é de que o cimento LC³ apresentará problemas para produção de concretos de baixas a médias resistências, como por exemplo para resistências iguais ou inferiores a 25MPa, pois devido ao alto índice de desempenho do LC³, demandará consumos inferiores a 300 kg por metro cúbico de concreto e elevadas relações água/cimento para estes patamares de resistência. Este aspecto poderá prejudicar a durabilidade do concreto, afetando o amplo emprego do LC³. A solução seria o estabelecimento de patamares mínimos para o consumo de cimento e limites máximos para relação água/cimento diferentes do que hoje são aplicados aos cimentos Portland, sejam compostos, pozolânicos ou com EGAF, conforme prescreve a norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.4 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

A crescente conscientização sobre a questão ambiental tem influenciado no desenvolvimento de ferramentas para melhor compreender e diminuir os impactos ambientais gerados por determinado produto ou processo. Uma das ferramentas em desenvolvimento acerca dessa temática é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste na compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ou processo ao longo do ciclo de vida do objeto de

estudo, permitindo a avaliação do seu desempenho ambiental (IBICT, 2014; COLTRO, 2007).

A metodologia ACV realiza um balanço de todas as fases do ciclo de vida do produto em estudo – seja este um insumo ou a edificação como um todo – e suas interações, que podem ocorrer no tempo e no espaço, e seus impactos relacionados. Ciclo de vida é a expressão usada para referir-se a todas as etapas e processos de um sistema de produtos ou serviços, englobando toda a cadeia de produção e consumo, considerando aquisição de energia, matérias-primas e produtos auxiliares; aspectos dos sistemas de transportes e logística; características da utilização, manuseio, embalagem e consumo; sobras e resíduos; e sua respectiva reciclagem ou destino final (PASSUELLO *et al.*, 2014).

2.4.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E SUA APLICAÇÃO A MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A ACV é uma ferramenta usada para avaliar os impactos ambientais de produtos, processos ou serviços. É uma ferramenta “do berço ao túmulo” que pode ser usada para avaliar sistemas complexos como edificações. Essa metodologia está indicada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) como base para a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seu ciclo de vida, capaz de incrementar o nível de informação dos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais e não governamentais (BRASIL, 2011).

Por ser uma metodologia internacionalmente reconhecida na melhoria da sustentabilidade de processos e produtos, a aplicação da ACV na indústria brasileira promoverá o acesso aos mercados interno e externo, satisfazendo a expectativa de consumidores cada vez mais exigentes em relação ao perfil ambiental dos produtos adquiridos. A aplicação da ACV permite o cálculo do impacto da cadeia produtiva ao meio ambiente e o expressa através de distintas métricas (categorias de impacto) como, por exemplo, os impactos a recursos energéticos não renováveis (em MJ) e mudanças climáticas (*carbonfootprint* ou pegada de carbono, em kg CO₂eq).

De acordo com a norma BRE 15804 (BUILDING..., 2013), que avalia o desempenho ambiental de produtos relacionados à indústria da construção civil através

da rotulagem ambiental EPD (do inglês *Environmental Product Declaration*, ou declarações ambientais de produtos), no ciclo de vida das edificações podem-se identificar cinco fases:

- a) seleção de produtos;
- b) construção;
- c) uso;
- d) fim de vida; e
- e) benefícios e cargas ambientais.

De acordo com essa norma, a etapa de seleção de produtos relativa à ACV dos materiais de construção aplicados na edificação é mandatória para todos os tipos de EPD, salientando-se a importância do projeto de edificações e da seleção dos materiais de construção ambientalmente comprometidos no impacto ambiental da edificação como um todo. Essa etapa compreende o suprimento de matérias-primas, transporte e manufatura desses produtos. Já a etapa de construção aborda o transporte de materiais ao canteiro de obras e a construção propriamente dita. A fase de uso compreende a operação da edificação (uso de água e energia) e todas as fases de manutenção e reparo. A fase de fim de vida considera a demolição da edificação, o transporte de resíduos, seu processamento e disposição. Finalmente, a etapa de benefícios e cargas ambientais além das fronteiras do sistema de estudo considera o potencial de reuso, recuperação e reciclagem de resíduos produzidos ao longo do ciclo de vida (CV).

É consenso nas publicações relacionadas à ACV de edificações que a fase de uso seja a que possui maior consumo energético (ORTIZ; CASTELL; SONNEMANN, 2009), a qual contribui significativamente para sua pegada de carbono. Porém, como existe uma tendência de redução do consumo energético pela melhor eficiência da edificação, além da disponibilidade de eletrodomésticos e lâmpadas de baixo consumo, estima-se que esta fase tenha sua importância reduzida com o passar dos anos, e que outras fases, tais como a seleção de materiais de construção tornem-se ainda mais importantes (PASSER; KREINER; MAYDL, 2012).

2.4.2 ACV E A INDÚSTRIA DO CIMENTO

Na indústria da construção existem duas aplicações para a ACV. Segundo Ortiz *et al.* (2009), uma possui foco nos materiais de construção e suas combinações,

denominada *Building Material and Component Combinations* (BMCC). A outra é focada em todo o processo da construção, por sua vez denominada *Whole Process of the Construction* (WPC). Entretanto, há predominância em estudos de consumo energético e de emissões de CO₂ aplicados a sistemas construtivos e edificações.

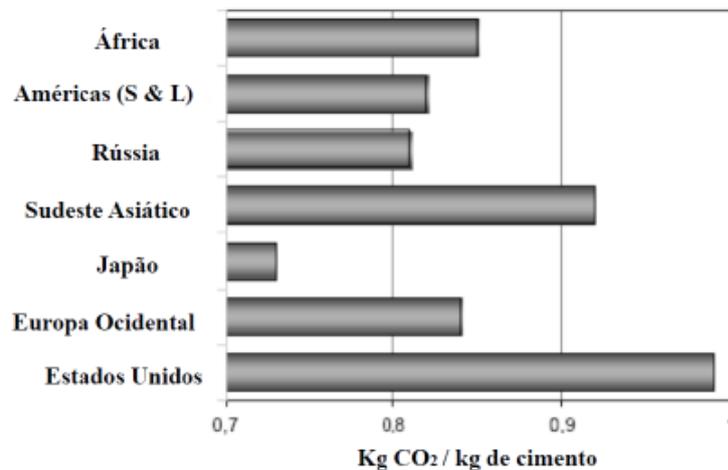
Em estudos comparativos, a ACV deve ser aplicada a produtos que exercem a mesma função. Diante disso, Carvalho (2002) estudou a aplicação da ACV na produção do cimento Portland com adição de resíduos, avaliando os impactos ambientais em nível global, regional e local, bem como as emissões nacionais e internacionais.

Saade (2013) aplicou a ACV para avaliação dos impactos ambientais de diferentes tipos de cimento Portland, com vários percentuais de adição de escória de alto-forno, analisando os resultados decorrentes do uso de vários critérios de alocação de impactos e expansão das 39 fronteiras do sistema. Para Gursel *et al.* (2014), faltam dados que reflitam variações tecnológicas e geográficas da produção de cimento, sendo que os impactos ambientais do ciclo de vida de outros materiais além do cimento Portland como adições e o consumo de água são raramente incluídos nas publicações sobre ACV.

Silva e Silva (2015) iniciaram a construção de inventários de ciclo de vida para materiais de construção nacionais e a validação de inventários internacionais. Para tanto, os pesquisadores lançaram mão da modelagem dos ciclos de produção de materiais e componentes de construção coletados a partir da literatura e da adaptação da base de dados do *Ecoinvent*, considerando a análise do berço ao portão. Na pesquisa foram apresentados estes materiais e componentes com dados de energia e emissões de CO₂ para o contexto brasileiro.

Na Figura 23 estão exemplificadas as diferenças significativas nas emissões de CO₂ para a produção de cimento Portland em diferentes regiões do mundo, que podem ocorrer principalmente pelas diferentes fontes de energia que podem ser utilizadas durante o processo.

Figura 23 - Emissões médias de CO₂ na produção de 1 kg de cimento Portland em diferentes regiões.



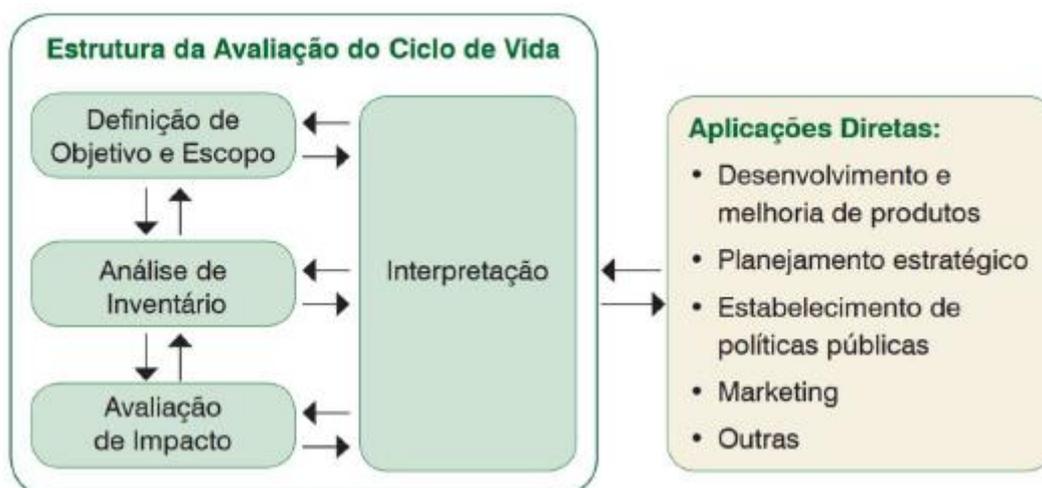
Fonte: (JOHN *et al.*, 2008).

2.4.3 ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Em cada uma das etapas do ciclo de vida de um produto pode ocorrer consumo de energia e de recursos naturais, ocasionando a liberação de emissões, efluentes e geração de resíduos, que pode atingir níveis de danos ambientais. Dessa forma, para que a ACV produza resultados confiáveis e comparáveis, é necessário que os impactos ambientais associados sejam avaliados por metodologias e procedimentos sistemáticos padronizados (STANO, 2008).

A Avaliação do Ciclo de Vida é regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040:2014 e ISO 14044:2014, que no Brasil são conhecidas como ABNT NBR ISO 14040:2014 e ABNT NBR ISO 14044:2014, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2014, a ACV considera os impactos ambientais ao longo da vida do produto, desde a extração de matérias primas até a produção, uso e disposição final, denominada a ACV “do berço ao túmulo”. De modo geral, o estudo de um produto consiste na estrutura apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Fases da ACV.



Fonte: (ABNT NBR ISO 14040,2014).

Segundo Ribeiro *et al.* (2007), a ACV pode auxiliar na identificação de oportunidades para melhorar aspectos ambientais dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida, na tomada de decisões na indústria, de organizações governamentais e não-governamentais, na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de determinação e no marketing. As quatro fases do estudo da ACV, de acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2014, encontram-se parcialmente transcritas nos itens a seguir.

2.4.3.1 DEFINIÇÃO DE ESCOPO E OBJETIVO

Consiste na fase inicial do planejamento para aplicação da ACV e na definição clara do objetivo do estudo. Posteriormente, segue-se para a definição do escopo, na qual as seguintes definições são necessárias:

- a) Sistema de produto: O sistema de produto consiste numa explicação detalhada das etapas que compõem o ciclo de vida de um determinado produto, desde a extração da matéria prima, etapas de processamento, uso do produto e transporte necessários entre etapas.
- b) Fronteiras do sistema: As fronteiras determinam quais unidades de processo devem ser incluídas na ACV, determinadas pela aplicação pretendida do estudo, pelas suposições feitas, critérios de corte e restrição de dados e custo. Os critérios

usados no estabelecimento das fronteiras do sistema devem ser identificados e justificados no escopo do estudo.

- c) Funções do sistema: A definição da função do produto em análise é de grande importância para que se busque comparações justas e se identifique funções secundárias e terciárias.
- d) Unidade funcional e fluxos de referência: A unidade funcional é a quantificação das funções identificadas no produto que define uma medida de desempenho do produto em análise. Sua importância está em assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV. O fluxo de referência consiste na massa de matérias-primas necessárias para a produção da unidade funcional da ACV.
- e) Limitações e suposições: A limitação na fronteira da ACV é bastante comum no estabelecimento das fronteiras do sistema, seleção das fontes de dados, categorias de impacto, nos modelos usados para análise de inventário e na aplicabilidade geográfica dos resultados de estudos de ACV. Por exemplo, é comum a limitação das fronteiras do sistema da ACV que analisa a fase de extração das matérias-primas até a produção do produto, ignorando sua vida útil e potencial de reciclagem, conhecida internacionalmente por *cradleto-gate* (do berço ao portão).

O objetivo do estudo deve conter a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, o público-alvo e referência à intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente (ABNT NBR ISO 14040, 2014). Já o escopo define uma série de itens necessários para a realização do estudo, tais como o sistema de produto e suas funções, a fronteira do sistema, a unidade funcional, procedimentos de alocação, metodologia de AICV e impactos a serem avaliados, requisitos de qualidade dos dados, entre outros (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

A unidade funcional é uma quantidade definida do produto em estudo, usada como referência para calcular seu desempenho. Essa unidade permite que diferentes sistemas de produto com a mesma função possam ser comparados. No caso da ACV relacionada à construção civil, para o cálculo de declarações ambientais de produto, a unidade funcional deve ser baseada nos seguintes aspectos (BUILDING..., 2013):

- a) no uso relevante quantificado ou no desempenho característico do produto quando aplicado à construção; e

- b) na vida útil de serviço do produto, ou na vida útil da edificação, por relacionar o desempenho funcional do produto ao longo de um período relevante (dimensão temporal do estudo).

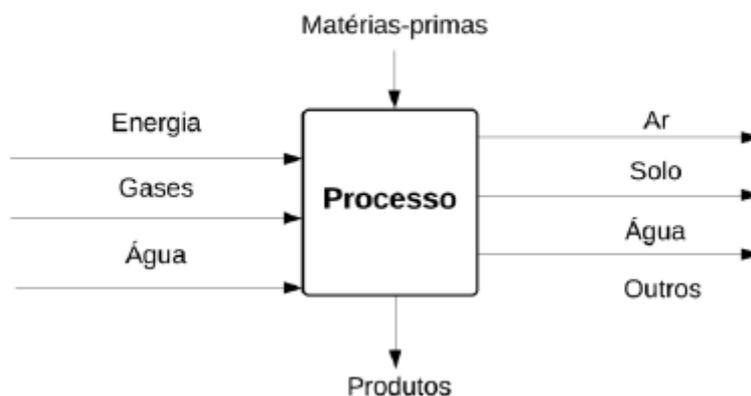
2.4.3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

A segunda fase da ACV corresponde ao período de coleta de dados e procedimentos para análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do estudo (ABNT NBR ISO 14040:2014). Os dados de um ICV são informações que descrevem os fluxos de entrada e saída de um determinado modelo de um sistema técnico, que sejam ambientalmente relevantes, sendo assim é a fase onde se quantificam as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida do produto, em massa ou volume. Dessa forma, o ICV configura-se como base de uma ACV, que consiste numa aferição quantitativa de todas as cargas ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto (JOHN *et al.*, 2008).

Uma etapa importante a ser realizada nos processos unitários de um ICV é a alocação, que pode ser definida como a separação dos fluxos de entrada e saída de um processo ou de um sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais sistemas de produtos (ABNT NBR ISO 14040:2014). Existem diversos métodos de alocação: por massa, energética, econômica e expansão do sistema seguido de substituição.

Na fase de ICV são realizadas a coleta e a quantificação de todas as variáveis – matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, entre outros – que se relacionem ao ciclo de vida de um produto, processo ou atividade, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Categorias de fluxo de materiais de um inventário.



Fonte: (adaptado de JOHN, 2007).

Oliveira (2007) afirma que algumas vezes a ACV acaba tendo limitações devido à falta de dados ou a inacessibilidade dos dados sobre os impactos que efetivamente ocorrem em cada uma das fases de ciclo de vida de um produto, dificultando sua aplicação. Deve-se ressaltar também a grande desvantagem do Brasil em relação à ausência de um banco de dados nacional, que reflita a situação brasileira e otimize a aplicação da ACV, o que torna prática comum a utilização de bases de dados estrangeiras para adquirir informações, podendo-se citar o *Ecoinvent Database*, dentre outros. O mesmo autor ainda recomenda, entretanto, que os dados devam ser coletados e validados para cada contexto geopolítico, tecnológico ou social onde serão aplicados.

Na etapa de ICV são computadas todas as entradas e saídas associadas a cada produto, incluindo matérias-primas, embalagem e itens de consumo. Em muitos casos, esse processo pode ser bastante exaustivo, dependendo do número de fluxos considerados nele. Nesse caso, costuma-se considerar um critério de corte para produtos com pouca participação no processo e/ou que geram baixo impacto ambiental. Porém, é importante garantir que efeitos ambientais significativos não sejam omitidos ao ignorar substâncias de baixo fluxo mássico. Para isso, certas convenções são normalmente aplicadas (BUILDING..., 2013).

No caso de dados insuficientes ou falta de dados para determinada unidade de processo, o critério de corte comumente aplicado é 1% do fluxo mássico total de entradas do processo. O total de entradas desconsideradas por módulo deve ser inferior a 5% da energia usada e da massa de entrada. São exceções os casos em que esses processos

tenham efeitos significativos ou elevado uso de energia em sua extração, uso ou disposição; ou quando sejam classificados como resíduos perigosos. Nestes casos, mesmo com baixa participação no processo, esses fluxos devem ser considerados.

Balanços de massa podem assegurar que as entradas consideradas são suficientes para produzir todas as saídas, incluindo a geração de resíduos. No geral, uma combinação de dados de literatura com outros obtidos diretamente com a indústria é preferível para o cálculo de declarações ambientais de produto, como segue:

- a) dados medidos derivados de processos específicos devem ser usados na elaboração de um ACV. Esses dados também podem ser aplicados para processos relacionados a entradas da indústria do produto em estudo, quando disponíveis; e
- b) dados calculados e estimados podem ser usados para os demais processos que estão além do controle da indústria em estudo (i.e., produção de matéria-prima, instalação, uso e disposição do produto).

Uma vez coletados todos os dados necessários, precede-se à parte de cálculo do ICV, em que os dados coletados são ajustados às unidades de processo e à unidade funcional. O resultado dessa etapa é uma quantificação de todos os recursos utilizados e de todas as emissões associadas à produção de determinada quantidade (unidade funcional) do produto em estudo. Por ser de difícil entendimento para a população em geral, sugere-se a aplicação da AICV para melhor compreensão dos impactos relacionados ao sistema de produto em estudo.

2.4.3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Na avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), os dados coletados na etapa anterior (ICV) são aplicados considerando os conhecimentos gerados nos pontos anteriores. Estão disponíveis na literatura vários trabalhos relacionados a métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (BOVEA; GALLARDO, 2006). Diversas metodologias de AICV foram desenvolvidas em todo o mundo nas últimas décadas, entre as quais se destacam: CML (GUINÉE *et al.*, 2000), EDIP 2003 (WENZEL; HAUSCHILD, 1997), Eco-Indicator (GOEDKOOP; SPRIENSMA, 2000) e IMPACT 2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003). Cada uma destas metodologias possui uma lista de categorias de impacto a ser avaliadas.

Existem muitos estudos sobre quais as categorias de impacto mais importantes para aplicação à construção civil. A norma inglesa EN 15804 (BUILDING..., 2013) aconselha o uso dos fatores de classificação do CML versão IA, que são: mudança climática, depleção do ozônio estratosférico, acidificação do solo e da água, eutrofização, ozônio fotoquímico e depleção de recursos abióticos (fóssil e não fóssil).

Glass *et al.* (2013) afirmam que é importante considerar, além do consumo energético e geração de resíduos, também os indicadores recomendados pela norma inglesa. Bösch *et al.* (2007) indicam o uso de uma nova métrica chamada CExD (do inglês *CumulativeExergyDemand*). Dita métrica considera a “exergia” (BÖSCH *et al.*, 2007) dos recursos utilizados no ciclo de vida em estudo. Essa ferramenta pode ser especialmente interessante para o caso da construção civil, por avaliar conjuntamente a demanda energética e de recursos de uma perspectiva da qualidade energética, integrando recursos energéticos e não energéticos, tão amplamente aplicados na indústria da construção civil. Finalmente, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) indica cinco impactos prioritários para uma metodologia de ACV simplificado que seja viável à construção brasileira: mudanças climáticas, uso de recursos naturais, consumo de energia, geração de resíduos e consumo de água (AGOPYAN; JOHN, 2011).

2.4.3.4 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Esta etapa inclui diversos elementos, tais como a identificação de questões significativas da análise, verificações de completeza, sensibilidade e consistência, conclusões, limitações e recomendações (ABNT NBR ISO 14040, 2014), servindo de base para a tomada de decisão em relação à concepção e/ou uso do produto avaliado. No caso de ACV comparativa, essa fase confrontará os resultados dos distintos produtos avaliados, indicando possíveis diferenças em relação a seus impactos ambientais potenciais.

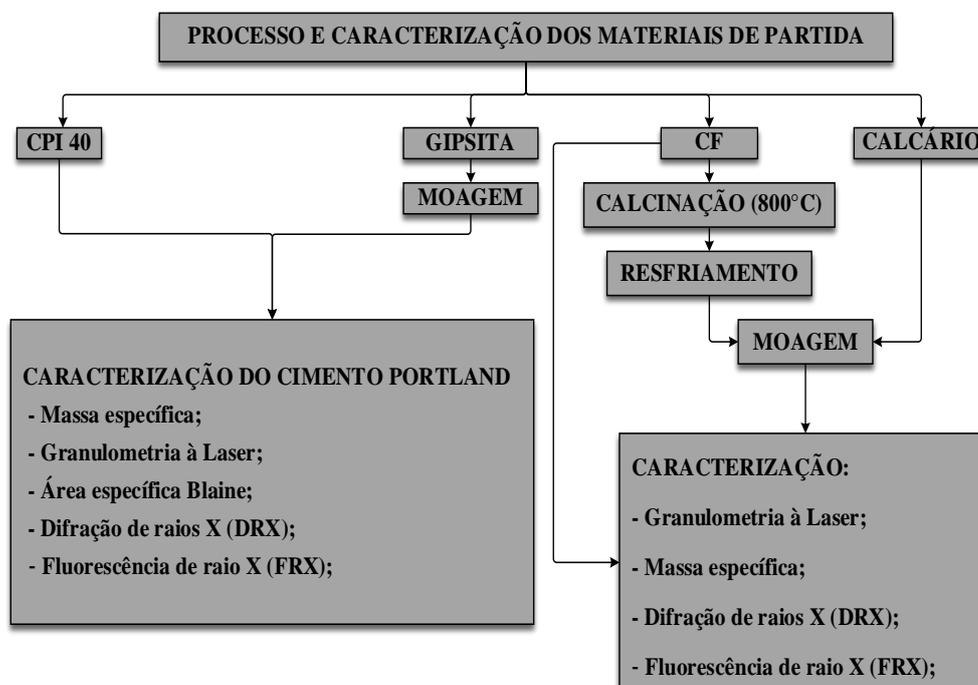
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em três etapas, sendo a primeira, referente ao processo de caracterização dos materiais de partida empregados para a produção do cimento LC³. A segunda etapa consistiu na produção e caracterização dos diferentes tipos de cimentos LC³ produzidos. Esta caracterização incluiu a avaliação das propriedades mecânicas (resistência à compressão) em argamassas produzidas com cimentos LC³, assim como os tempos de pega inicial e final e a intensidade de cor. Nesta etapa também foi avaliada a mineralogia das pastas hidratadas com vistas a correlacioná-las com as propriedades mecânicas. Já a terceira e última etapa consistiu na Análise de Ciclo de Vida para quantificar o impacto ambiental da fase de processamento industrial do cimento LC³, comparando-o com os dos cimentos Portland Comum (CP I 40) e composto (CPII – F 40) através da emissão de CO₂ e da demanda de energia para clínquerização.

3.1. ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

Na primeira etapa foram quatro os materiais de partida empregados na produção dos cimentos LC³ (CPI 40, CF, calcário e gipsita) e caracterizados do ponto de vista físico, químico e mineralógico, conforme mostrado no fluxograma da Figura 26.

Figura 26 - Fluxograma com as atividades desenvolvidas na 1ª etapa.



Fonte: Autoria própria.

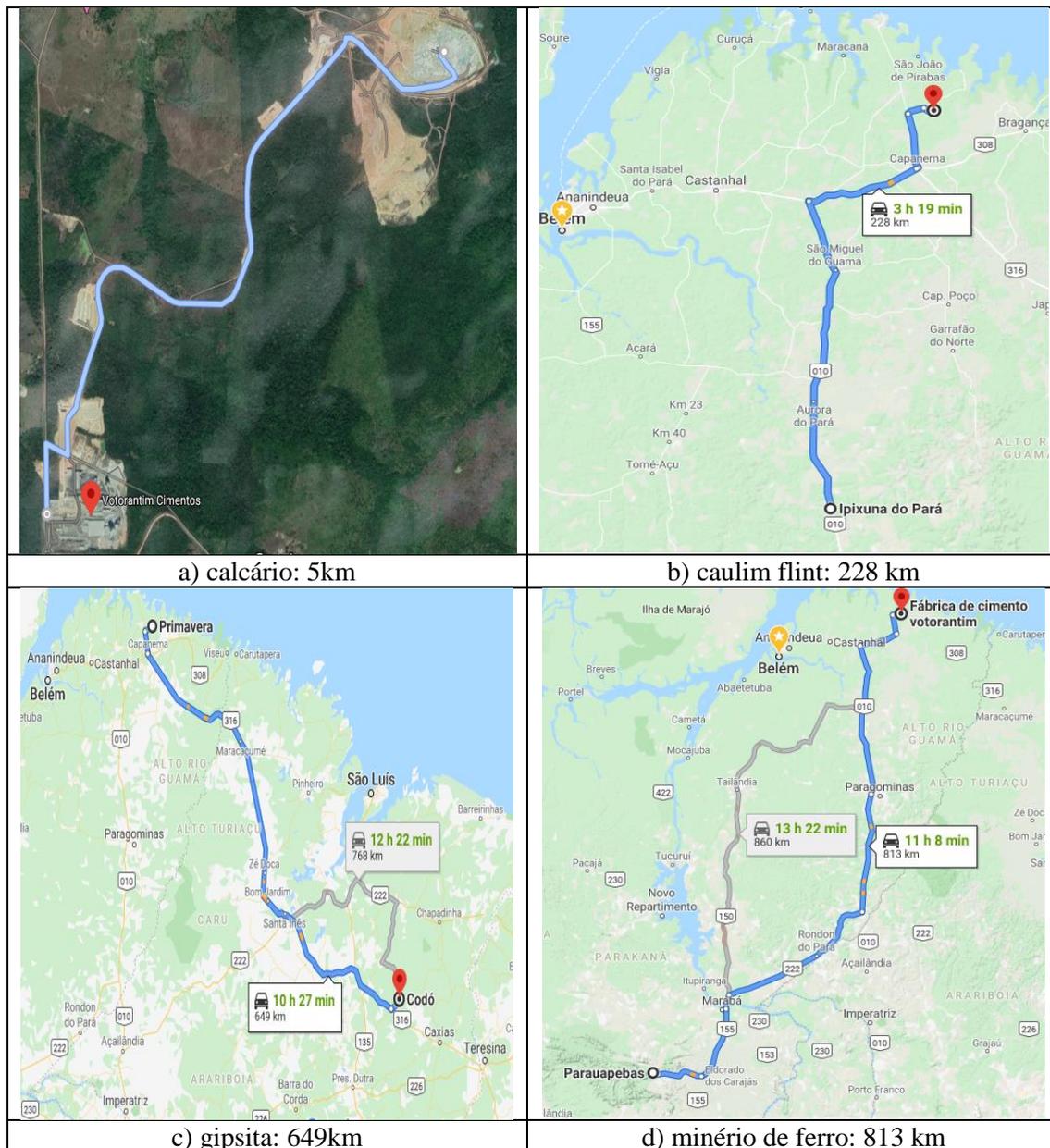
O cimento empregado na pesquisa como material de partida de referência e para composição dos cimentos LC³ foi o CPI 40, da fábrica da VOTORANTIM CIMENTOS, localizada em Xambioá, no estado do Tocantins. Entretanto, nesta pesquisa considerou-se como base de cálculo de transporte para as etapas de ICV e AICV as distâncias em relação à unidade fabril de Primavera, no Pará, pertencente ao mesmo fabricante, distante de Belém cerca de 205 km. Isto se deve ao fato deste tipo de cimento não ser produzido pela fábrica no Estado do Pará.

O CF foi proveniente da etapa de lavra do caulim *soft* nos depósitos do vale médio do Rio Capim, no município de Ipixuna do Pará, região nordeste do estado do Pará, explorados pela IMERYS. A distância do depósito da IMERYS até a fábrica de cimento, em Primavera, é de 228 km. O CF foi entregue na forma de torrões, com cerca de 18% de umidade. Foram submetidos a uma secagem e moagem prévia para destorroamento em fragmentos menores antes de serem submetidos à caracterização.

O calcário estudado foi o mesmo empregado pelas indústrias de cimento da região nordeste do Pará, procedente das ocorrências calcíferas denominadas Formação Pirabas, oriundas de sedimentos terciários marinhos fossilíferos. O depósito específico empregado fica a uma distância de 5 km da planta de cimento da VOTORANTIM CIMENTOS, em Primavera. A gipsita foi proveniente do município de Codó, no Maranhão, a 649 km de distância da mesma planta de cimento. Tanto o calcário quanto a gipsita, empregados foram disponibilizados pela VOTORANTIM CIMENTOS. Assim como o CF, o calcário e a gipsita estavam com cerca de 20% umidade, na forma de torrões, sendo submetidos a uma secagem e destorroamento prévio.

O minério de ferro utilizado para a produção da farinha de clínquer é oriundo do sudoeste do Pará, mais especificamente do município de Parauabebas, cuja distância até a fábrica de cimento da VOTORANTIM em Primavera é de 813 km. A Figura 27 mostra os locais de procedências dos materiais de partida, assim como suas respectivas distâncias até a planta de processamento localizada no município de Primavera – PA.

Figura 27 – Localização e distância das matérias primas até a fábrica de cimento: a) calcário, distante 5km; b) CF, distante 230 km; c) gipsita, distante 645 km; d) minério de ferro, distante 813 km.



Fonte: elaborado a partir da base de imagens do “software” Google Earth, acessado em 2019.

As matérias primas, no caso o CF, o calcário e a gipsita, foram secas na estufa da marca *Quimis*, modelo Q-317B, aquecimento elétrico, temperatura máxima de 250°C. O equipamento pertence ao Laboratório de Tecnologias das Construções (LABTEC) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFPA.

A moagem do calcário, do CF e da gipsita ocorreram durante uma hora, no moinho de bolas da marca *SERVITECH*, modelo CT 242, disponível no Laboratório de

Engenharia Civil (LEC) da UFPA. Para o calcário e caulim *flint*, a moagem teve um efeito predominantemente de destorroamento, pois estes materiais já se encontravam finamente dividido nos depósitos. A gipsita, sim, sofreu uma cominuição. O jarro do moinho de 10 litros teve 2/3 do volume preenchido, sendo 1/3 por carga de alumina e os outros 1/3 pela amostra a ser moída. O restante foi destinado ao espaço necessário para a mobilidade dos materiais durante a moagem. A carga de material correspondente a 1/3 foi de aproximadamente 1,5 kg. Foram utilizadas bolas de alumina de 10mm e 30mm, com a massa de quatro quilogramas e dois quilogramas respectivamente.

As características físicas avaliadas do CP I 40, do CF e do calcário foram a massa específica e a distribuição granulométrica das partículas. A massa específica foi determinada de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 16.605 (ABNT, 2017), que se baseia na picnometria. A exceção do CPI 40, no qual foi empregado xilol, para os demais materiais de partida o ensaio de massa específica foi realizado com água desmineralizada ao invés de xilol.

As determinações da curva de distribuição granulométrica e do diâmetro médio das partículas do CPI 40, CF e do calcário foram realizadas no Laboratório de Mineralogia Aplicada do IG da UFPA. O equipamento empregado foi o granulômetro laser, da marca CILAS, modelo 715 E 701. O procedimento consiste em misturar e deflocular a amostra em uma solução de hexametáfosfato de sódio. Em seguida, a amostra dispersa foi disposta em um recipiente esférico no equipamento, que por sua vez incidia raios laser. Atrás do recipiente houve um anteparo com detector de raio laser, que capta os raios difratados pela amostra dispersa no solvente. As difrações são então correlacionadas com padrões de tamanhos de partículas previamente aferidos, gerando desse modo a curva granulométrica do material.

A mineralogia das amostras, foram determinadas por difração de raios-X (DRX), no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) do Instituto de Geociência (IG), Universidade Federal do Pará (UFPA). As amostras de cimento Portland CPI 40, CF e do calcário foram submetidas às análises de DRX pelo método do pó para identificação dos minerais existentes. O equipamento empregado foi o difratômetro de raios-X de feixes divergentes, modelo *Empyreal* da PANalytical, com goniômetro $\theta - \theta$, tubo de raios-X cerâmico selado de cobre (Cu), foco fino longo de 2.200W e filtro $k\beta$ de Ni, detector liner (PSD) modelo X'Cellerator, com abertura (active length) de $2,122^\circ 2\theta$ e 128 canais. As

condições instrumentais utilizadas serão: voltagem de 40kV e corrente de 35mA; fendas soller de 0,04 °rad (nos feixes incidentes e difratado); faixa de varredura de 9 a 92° θ ; tamanho do passo de 0,01° 2 θ com 20 s de tempo/passos no modo de varredura contínuo; fenda divergente de 1/4° rad e anti-espalhamento de 1/2° rad; tamanho irradiado da amostra de 15mm; fenda de anti-espalhamento do feixe difratado de 5,0 mm e amostra em movimentação circular com frequência de 1 rotação/s. O tempo total de coleta será de 10 min. Os difratogramas gerados foram interpretados com auxílio do *software X'Pert High Score* da PHILIPS.

As análises químicas do cimento Portland CPI 40, CF e do calcário foram determinadas por fluorescência de raios-X (FRX), no equipamento Bruker Ranger S2 (fonte Pd – Paládio) para os seguintes óxidos: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO, K₂O, Na₂O, TiO₂ e Pb₂O₅, além da perda ao fogo (PF). As análises foram realizadas no Instituto Federal do Pará (IFPA), em Belém, no Laboratório de Caracterização de Materiais.

Para o processo de produção da metacaulinita, o CF foi seco na estufa de secagem, já descrita anteriormente. A partir do material de partida seco, que já se encontrava em forma de pó extremamente fino (D₅₀ 0,22 μ m), foram pesadas 800g do caulim para cada batelada de calcinação. O procedimento de calcinação consistiu em dispor as amostras em cadinhos de aço inox para calciná-las numa mufla quando a mesma estava a temperatura de 800° C. O equipamento é da marca Quimis, modelo Q-318D, aquecimento elétrico, temperatura máxima de 1200° C com controlador de indicação digital.

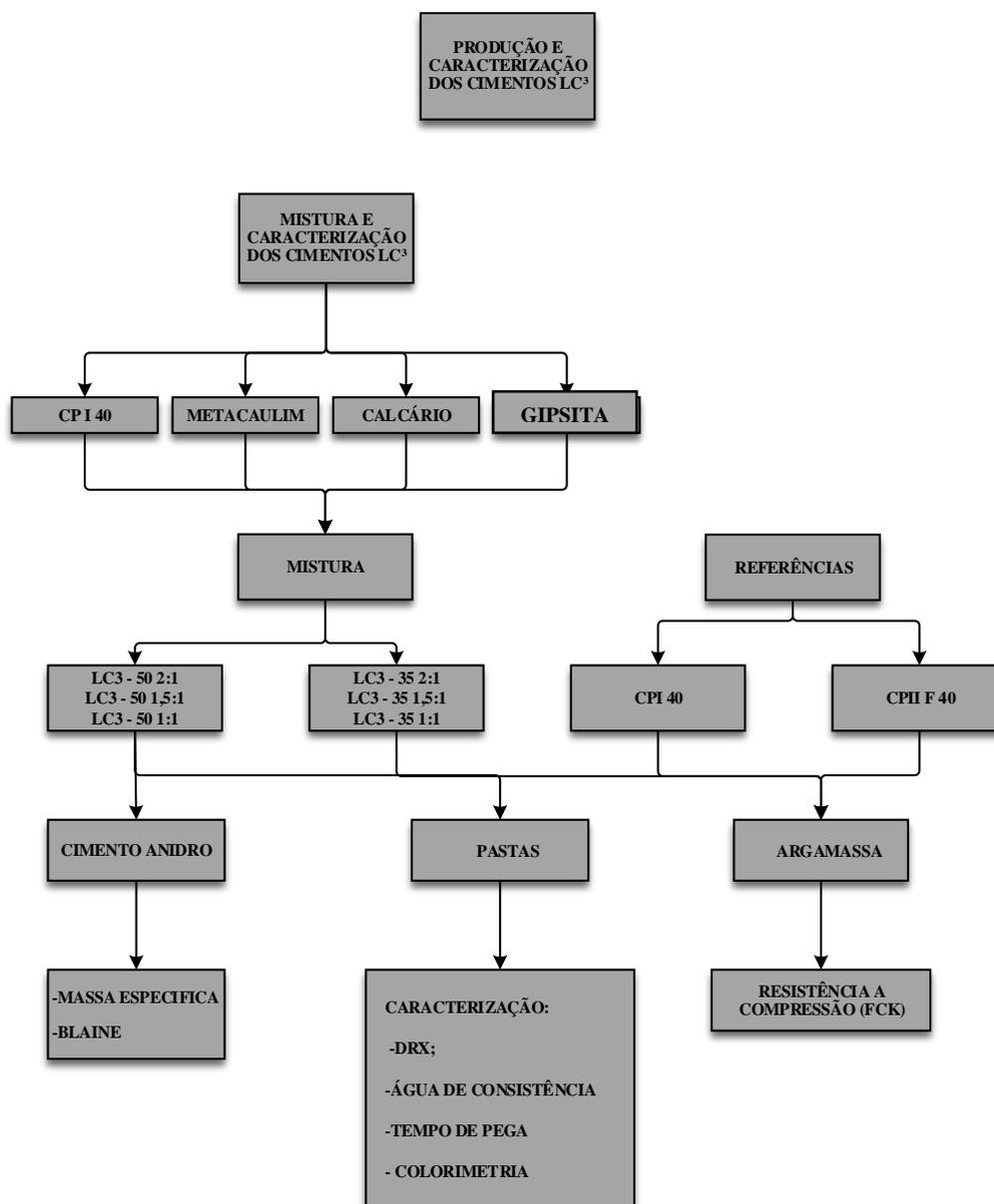
O tempo de permanência de cada amostra na mufla foi de 90 minutos. Decorrido este período, as amostras foram retiradas da mufla e resfriadas naturalmente ao ar, sofrendo um choque térmico. Após o resfriamento, o CF calcinado foi pesado para averiguação do peso final (perda de massa ou perda ao fogo), parâmetro de controle para averiguação da eficiência da calcinação. Como o CF é constituído por 95% de caulinita, sua perda ao fogo é próxima do valor teórico da água estrutural da caulinita, de 13,86% (SOUZA SANTOS, 1992). Após a calcinação, o metacaulim foi moído durante três horas, com o mesmo equipamento e procedimento de moagem descrito anteriormente. Após o processamento, a pozolana foi também caracterizada química, física e mineralogicamente.

3.2. ETAPA II - PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS LC³

A segunda etapa consistiu na produção e caracterização dos cimentos LC³, conforme mostrado no fluxograma da Figura 28. Foram produzidos 06 tipos de cimentos experimentais provenientes da combinação de três adições minerais e dois percentuais de substituição de cimento CP I, no caso, 45% e 60%. As adições minerais empregadas nas substituições foram oriundas das combinações de CF calcinado (metacaulim) e calcário nas proporções 2:1, 1,5:1 e 1:1. As composições dos cimentos são mostradas na Tabela 4. Os teores de gipsita foram corrigidos para que todos os cimentos LC³ contivessem o percentual de 5% em relação ao cimento. Além dos cimentos LC³, nesta etapa foram caracterizados os cimentos de referência, no caso o CPI e o CPII F, ambos categoria de resistência de 40 MPa. O CP II F 40 é de uso comercial na região.

Vale salientar que a adição mineral na proporção 2:1 se deve aos estudos anteriores que indicam que a mistura com 30% de argila calcinada e 15% de fíler calcário é a proporção ideal do ponto de vista estequiométrico para a formação dos monocarboaluminatos (ANTONI *et al*, 2012). As outras adições minerais, de proporções CF calcinado : calcário 1,5:1 e 1:1 foram investigadas em razão dos benefícios na redução dos impactos ambientais observados no trabalho de Lima (2004). O pesquisador constatou que estas misturas apresentaram resistências à compressão superiores ao CPI devido à alta reatividade do CF calcinado.

Figura 28 - Fluxograma das atividades desenvolvidas na 2ª etapa.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Composição dos cimentos LC³.

Tipo	Composição (%)			
	Clínquer	Gipsita	CF calcinado	Calcário
LC3 – 50 2:1	50	5	30	15
LC3 – 50 1,5:1	50	5	27	18
LC3 – 50 1:1	50	5	22,5	22,5
LC3 – 35 2:1	35	5	40	20
LC3 – 35 1,5:1	35	5	36	24
LC3 – 35 1:1	35	5	30	30

Fonte: Autoria própria.

3.2.1 ENSAIOS NO CIMENTO ANIDRO

Na condição anidra foram determinadas a área superficial específica *Blaine* e a massa específica, conforme as prescrições das normas ABNT NBR 16.372 (ABNT, 2015) e da ABNT NBR 16.605 (ABNT, 2017), respectivamente.

3.2.2 ENSAIOS E MINERALOGIA DAS PASTAS

Nas pastas foram determinadas os seguintes ensaios: água de consistência, conforme a norma ABNT NBR 16606 (ABNT, 2018a); os tempos de pega inicial e final, realizado de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 16.607 (ABNT, 2018b). A determinação da água de consistência normal é um teste de preparação para a determinação dos tempos de pega inicial e final e não prevê a correção da plasticidade da pasta com aditivos redutores de água, mas sim apenas com água.

A correlação das propriedades das argamassas à mineralogia dos produtos das reações pozolânicas e de hidratação dos cimentos em análise foram realizadas através da moldagem de pastas com relação água/aglomerante de 0,40, tanto para as misturas de referência como para as com os cimentos LC³. A diferença entre as relações água/aglomerante da pasta e da argamassa, que no caso é 0,48, conforme será apresentado no item 3.2.3, deve-se à maior porosidade da zona de transição ao redor das partículas de agregado na argamassa. Neste caso, a relação água/aglomerante de 0,4 na pasta é equivalente à da pasta presente na matriz da argamassa com relação água/aglomerante de 0,48 a 0,50.

Foram moldadas três pastas, uma com o cimento CP I, as outras duas com as composições LC³ 50 (2:1) e LC³ 35 (1,5:1), todas com relação água/cimento de 0,40. De modo a evitar a carbonatação imediatamente após a moldagem, as pastas foram seladas com filme de polietileno e dispostas em dessecador sob condições de vácuo. Na idade de interesse de 28 dias, as pastas foram removidas do dessecador, fragmentadas e a hidratação interrompida por meio da imersão destes fragmentos em álcool isopropanol. Para as análises de DRX, os fragmentos foram então pulverizados. As condições de ensaios e os equipamentos empregados para a análise de DRX foram idênticos ao descrito no item 3.1.

3.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As resistências à compressão dos cimentos, tanto para os LC³ quanto para os de referência, foram determinadas de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7215 (ABNT, 2019). A avaliação foi realizada em argamassas de cimento e areia padrão brasileira, na proporção 1:3 (em massa) e relação água/cimento de 0,48, para as idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias. De modo a proporcionar condições semelhantes de moldagem, foram empregadas dosagens de aditivo superplastificante a base de policarboxilato nas argamassas com adições minerais. Para cada tipo de cimento foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 x 100 mm, sendo três para cada idade totalizando 120 corpos de prova nesta análise.

Os corpos de prova foram curados ao ar inicialmente nas primeiras 24 horas e em seguida mantidos em cura úmida até a data específica de ensaio. A moldagem das argamassas baseou-se na norma ABNT NBR 5752 (2014), na qual especifica os procedimentos de mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova, condições de cura e determinação da carga de ruptura, inferidos na ABNT NBR 7215 (2019). As argamassas foram inicialmente preparadas em um misturador mecânico, respeitando os tempos de mistura estabelecidos pela norma ABNT NBR 7215 (2019). O rompimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia das Construções (LABTEC) em uma prensa hidráulica elétrica marca MATEST Cyber-Plus Evolution modelo YIME181-E183.

3.2.4 COLORIMETRIA

A capacidade de pigmentação proporcionada pelos cimentos LC³ às pastas e as suas variações cromáticas entre o período de 24 h e 28 dias, em ambiente de laboratório, foram avaliadas por colorimetria. Foram empregados como parâmetro de referência os cimentos CPI 40 e CPII F 40.

A cor e suas variações foram determinadas através do espaço de cor CIELAB, a partir de medições sucessivas dos parâmetros L*, a* e b* (Figura 29). O equipamento empregado foi o espectrofotômetro da marca KONICA MINOLTA, modelo CR-400, iluminação padrão D65, observador colorimétrico padrão de 2°, diâmetro da área de medição de 8mm. As diferenças de cor em um mesmo ponto para tempos distintos de medição foram calculadas pela fórmula CIE 2000, que foi desenvolvida para resolver o

problema das diferenças entre as avaliações instrumentais e o olho humano que ocorrem no sistema de cor CIELAB (espaço de cor L^* , a^* , b^*), mostrada na Equação 03.

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

Sendo:

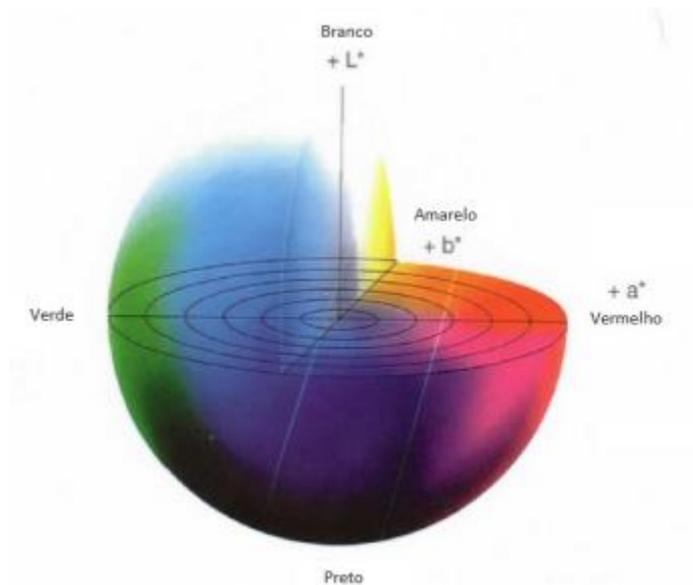
ΔE^* = Diferença total da cor, em unidade Judd;

ΔL^* = variação da luminosidade;

Δa^* = variação cromática no eixo verde/vermelho;

Δb^* = variação cromática no eixo amarelo/azul.

Figura 29– Medição colorimétrica com gabarito.



Fonte: GOLDINDROPS, 2013.

Foram realizadas medições cromáticas para as idades de 1 e 28 dias. Nestes ensaios, para cada tipo de pasta foram moldados três corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 10 mm. No laboratório, os corpos de prova ficaram sob condições controladas de temperatura e umidade, no caso $65 \pm 5\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente. Para cada corpo de prova foram realizadas duas medidas de cor sobre a superfície de 40 x 40

mm. O valor da variação cromática ΔE_{00}^* por corpo de prova foi obtido a partir da média destas duas medições e o valor representativo de cada cimento foi a média das seis medições obtidas para nos três de corpo-de-prova. As medições sob condições controladas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia das Construções (LABTEC).

3.3. ETAPA III - AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL ATRAVÉS DA DEMANDA DE ENERGIA E DA EMISSÃO DE CO₂

A terceira etapa teve por objetivo aplicar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no processo produtivo do cimento a fim de determinar o impacto ambiental dos cimentos LC³ por meio das emissões de CO₂ e da demanda de energia para clinquerização (ou calcinação), todos produzido em laboratório. Estes resultados foram então comparados aos dos cimentos Portland comum (CP I 40) e composto (CP II F 40), ambos produzidos em escala industrial.

Estabeleceu-se, primeiramente, o objetivo e o escopo do estudo. O objetivo consistiu em declarar a aplicação pretendida e as razões para a realização do estudo, já no escopo foram expostos o seguinte:

- o sistema de produto estudado;
- os tipos e fontes de dados selecionados de acordo com o objetivo e escopo do estudo;
- a unidade funcional que forneceu uma referência para a normalização dos dados de entrada e saída;
- a fronteira do sistema que determinou quais processos elementares foram incluídos na ACV e limitações.

A segunda etapa consistiu no levantamento e coleta de dados quantitativos para cada processo elementar da fronteira do sistema, mais os procedimentos de cálculos e alocações (ICV). A análise dos resultados permitiu identificar as etapas do processamento industrial que são responsáveis pelo maior impacto ambiental para cada tipo de cimento (AICV), permitindo uma análise comparativa das emissões de CO₂ e de energia de calcinação produzidas ou demandadas na fabricação dos cimentos LC³, CPI e CPII F 40. Foi proposta uma metodologia simplificada de aplicação da ACV relativa à produção dos cimentos LC³ em escala laboratorial, tal como descrito a seguir.

3.3.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO

O **objetivo** do presente estudo foi avaliar a pegada de carbono e a demanda energética no forno rotativo dos cimentos LC³ produzidos em laboratório, caso fosse fabricado em escala industrial no Brasil. Dados ambientais foram obtidos da base de dados *ecoinvent v.3* (ECOINVENT..., 2014) e da bibliografia disponível no Brasil. O método de AICV empregado é o IPCC 2007 para um período de 100 anos, conforme indicado pela norma ISO 14067 (INTERNATIONAL..., 2013).

Devido ao caráter introdutório desta pesquisa, constituem-se principalmente como **público-alvo** desta análise a comunidade acadêmica e a indústria nacional, visto que o desenvolvimento desta metodologia pode contribuir para a realização de outras análises ambientais científicas e, até mesmo tecnológicas, na produção do cimento LC³.

Foram considerados no **escopo** do estudo a produção de combustíveis, extração e produção de matérias-primas e materiais auxiliares, calcinação do clínquer em forno rotativo, consumo de eletricidade para produção do clínquer e de combustíveis, moagem, matérias-primas e materiais auxiliares, bem como o transporte de todos os materiais utilizados. Estão fora do escopo do estudo a mistura do clínquer, embalagem do cimento e seu transporte ao consumidor final, uma vez que o escopo da análise é do berço à porta da indústria.

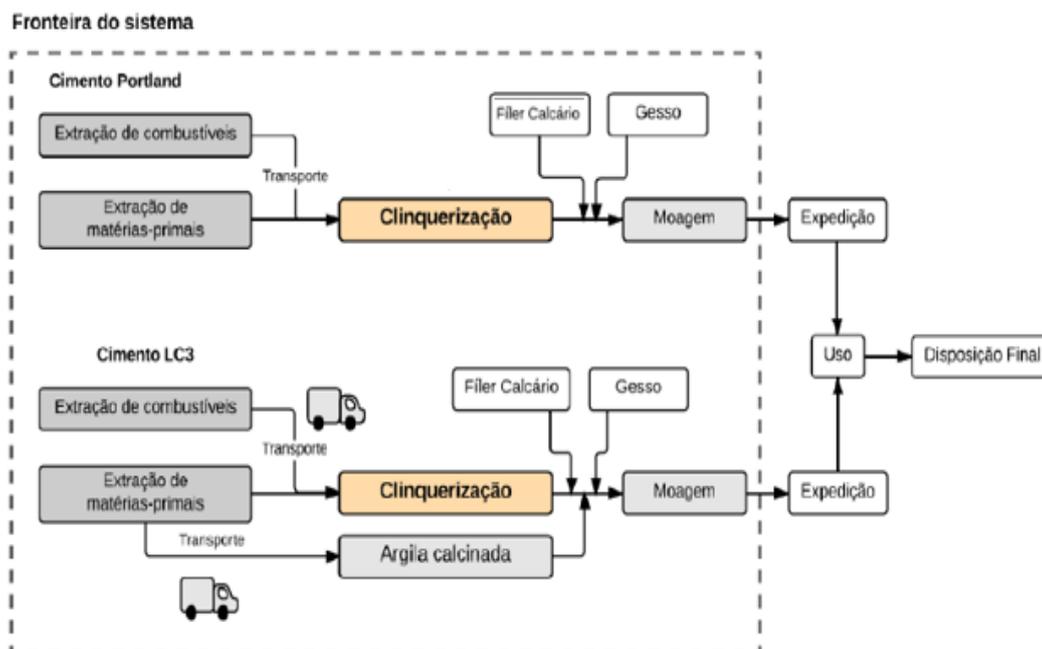
3.3.1.1 O SISTEMA DO PRODUTO

Diversos estudos de ACV identificam os processos unitários específicos por meio da elaboração de diagramas que demonstram a cadeia produtiva do produto analisado. O sistema de produto considerado neste estudo se baseia nos principais processos existentes em uma planta industrial, conforme ilustrado no fluxograma do sistema do produto. A Figura 30 mostra o sistema de produto em estudo e suas fronteiras.

Essa ACV ignora as etapas de aplicação e uso do cimento, vida útil, disposição final de resíduos e potencial de reciclagem, restringindo-se à fábrica, ou seja, do “berço ao portão”. Sendo assim, os limites considerados para comparação dos dois processos produtivos (cimento LC³, cimento Portland comum e composto) para a análise do ciclo *cradle-to-gate* (berço ao portão) são os seguintes: extração de matérias-primas e combustíveis, o transporte para a fábrica, o processo de produção de clínquer e moagem

do cimento. Na Figura 30 é possível observar a diferença entre de processo entre o cimento Portland e o LC³ e a delimitação das fronteiras do sistema em estudo. No caso do LC³, há uma etapa adicional que é a calcinação e moagem em separado da argila caulínica.

Figura 30 - Delimitação das fronteiras do estudo de ACV comparativo.



Fonte: Autoria própria.

3.3.1.2 UNIDADE FUNCIONAL

Tendo em vista a equivalência funcional dos cimentos em questão, considerou-se que 1 tonelada de cimento produzido como unidade funcional mais adequada para servir de referência aos processos avaliados na ACV.

3.3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO

As principais matérias-primas utilizadas são o caulim e calcário, sendo que o caulim poderia ser extraído por meio de pás carregadeiras das áreas de lavra, localizadas no município de Ipixuna, no nordeste do Pará, a 228 km da planta da VOTORANTIM CIMENTOS. Ao passo que a jazida de calcário se localiza a apenas 5 km da planta, no município de Primavera – PA.

Neste estudo foram considerados para o cimento CPI 40 e CP II F 40 a composição média da farinha precursora de clínquer para produção de 1 tonelada, utilizada por Queiroz (2018). A composição empregada é próxima das encontradas no banco de dados de países que consideram o processo de produção do clínquer por via seca. Adotou-se dados da literatura devido à limitação de obtenção de dados da indústria local.

Na análise de inventário (ICV) foram coletados dados medidos, estimados e calculados. Pelo fato de se tratar de um material de construção inovador, que não foi ainda produzido em escala industrial, não foi possível a medição de dados diretamente na indústria. Por isso, primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica de estudos de caso relacionados à pegada de carbono do clínquer Portland, dada a similaridade dos processos produtivos.

Constatou-se que a maior parte das emissões de gases efeito estufa no CV do clínquer Portland são associadas aos processos de calcinação e ao consumo energético do forno rotativo. Como muitos desses estudos foram desenvolvidos no exterior, considerou-se que também seria importante avaliar o consumo energético típico da indústria cimenteira brasileira e a produção de eletricidade e combustíveis, considerando as peculiaridades da matriz energética do país (BAJAY, 2009). Além dos dados obtidos estimados na literatura, foram selecionadas as medições que deveriam ser executadas em laboratório, como a composição de CaO no clínquer e a perda de massa do caulim, com vistas à determinação da emissão de CO₂ no processo de calcinação e do consumo energético do forno rotativo.

3.3.2.1 TRANSPORTE

No caso de fornecimento das matérias-primas, determinou-se as distâncias da planta da Votorantim Cimentos e dos respectivos depósitos das matérias primas. A planta de cimento fica estabelecida no Município de Primavera (PA), que se localiza próxima às jazidas de calcário, cerca de 5 km. Para o minério de ferro foi considerada a distância de 813 km entre Parauapebas, no sul do Pará, e Primavera. Quanto ao CF, a distância do local da lavra em Ipixuna até a planta de processamento são 228 km. No caso da gipsita, a distância considerada foi de 649km até Codó, no Maranhão. Para efeitos de cálculo das emissões de CO₂ relativas ao transporte, dobrou-se as distancias totais percorridas para cada matéria-prima, pois considerou a situação dos caminhões retornarem vazios.

Para a extração de calcário e CF foram utilizados dados de extração por meio de pás carregadeiras, mantidos constantes para parâmetros de cálculo. Para o transporte do CF, foram utilizados caminhões extrapesados de 72 toneladas com seus consumos retirados de ECOINVENT..., 2014) e Costa (2012), ao passo que para o calcário, estipulou-se caminhões de até 45 toneladas (COSTA, 2012).

3.3.2.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂ NO PROCESSO DE CALCINAÇÃO

As estimativas das emissões da farinha precursora para o clínquer Portland foram determinadas a partir das Equações 4 e 5, modificadas da metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC (2006). As mesmas equações foram utilizadas para o cálculo das emissões do processo de clinquerização nos LC³. No caso do LC³, nas equações foram consideradas o percentual de CaO determinado pela FRX para o cimento CP I 40, sendo utilizada a quantidade proporcional de CaO% aos teores de substituição incorporados, que serviram de base para os cálculos realizados.

$$CO_{2Portland} \left(\frac{kg}{ton} \right) = Ct_{Portland} * \%CaO * (100 - \% Adição) \quad (4)$$

$$Ct_{Portland} = \left[\frac{44}{56} * \frac{10}{100 + \%CaSO_4} \right] \quad (5)$$

Onde:

CO_{2Portland} = Emissão de CO₂ em quilos por tonelada de cimento.

Ct_{Portland} = Constante proveniente da reação química da Equação 5.

%CaO = Porcentagem de óxido de cálcio na farinha.

%CaSO₄ = Porcentagem de sulfato de cálcio na amostra.

% Adição = Porcentagem de incorporação das adições minerais.

As estimativas foram realizadas para a produção de tonelada de cimento, sendo considerada a adição de gipsita assim como das adições minerais de fíler calcário no CP II F como também deste e da argila calcinada nos cimentos LC³.

3.3.2.3 ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNO ROTATIVO

A estimativa da demanda energética (DE, em GJ Ton⁻¹ de cimento) referente à produção do LC³ em comparação ao cimento Portland foi baseada na energia necessária para atingir às temperaturas de queima, sendo estas: 1450°C para clínquer Portland e 800°C para a metacaulinita. Os valores do consumo energético para calcinação do clínquer e da argila caulínica foram obtidos com a indústria local por tonelada de material calcinado.

É possível estimar a demanda energética (DE_{LC³}, em GJ Ton⁻¹) da produção dos cimentos LC³ e dos cimentos CP I e CP II F pela Equação 6.

$$DE = [\% \text{Clínquer } Port. * DE \text{ Port.}] + [\%MC * DE_{mc}] \quad (6)$$

Onde:

DE = Demanda energética do cimento específico (LC³, CPI ou CII F) em GJ Ton⁻¹ de cimento.

% Clínquer *Port* = Porcentagem de clínquer no cimento.

$DE_{Portland}$ = Demanda energética em GJ Ton⁻¹ de clínquer.

% *Mc* = Porcentagem de incorporação de metacaulim no cimento.

DE_{mc} = Demanda energética em GJ Ton⁻¹ de metacaulim.

3.3.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO AMBIENTAL

A avaliação foi realizada comparativamente, relacionando a pegada de carbono (emissão de CO₂) e a demanda energética do processo de calcinação dentre os cimentos LC³ produzidos em laboratório e os cimentos utilizados como referências CPI 40 e CII F 40.

Para avaliar de forma mais objetiva a eficiência dos ligantes LC³, utilizou-se o Fator Clínquer ajustado (relação clínquer/cimento) (Equação 7), o qual aplicou-se um fator de correção de 0,28 ao percentual de argila calcinada de cada cimento (Tabela 4). Onde este fator deriva da premissa de que a combustão dos combustíveis no clínquer representa apenas 40% do total das emissões, visto que não há a parcela da

descarbonatação e a queima das argilas calcinadas consome apenas 70% desta energia (70% versus 40%). E também, adotou-se dois indicadores relacionados à eficiência do ligante e ao aquecimento global, desenvolvidos por Daminelli (2013). São eles: o Indicador de CO₂ (IC_{rc}) (Equação 8) e o Intensidade de Ligante (IL_{rc}) (Equação 9), ambos associados à resistência à compressão aos 28 dias. No caso deste trabalho, a metodologia foi adaptada para argamassas moldadas no item 3.2.3, uma vez que os indicadores são aplicados para misturas de concreto. O objetivo foi avaliar comparativamente a eficiência dos LC³ e dos cimentos de referência através da análise em conjunto destes dois indicadores, de modo a fornecer mais um subsídio na escolha dos cimentos mais adequados do ponto de vista da ecoeficiência.

$$\text{Fator Clínquer} = \frac{\% \text{Relação clínquer} + (\% \text{Argila calcinada} * 28\%)}{\text{Cimento}} \quad (7)$$

Onde:

%Relação clínquer = % de clínquer no ligante ajustada

Cimento = quantidade normalizada de cimento (100%)

$$\text{ICrc} = c/rc \quad (8)$$

Onde:

c = total de emissões de CO₂ (kg.m⁻³).

rc = resistência à compressão (MPa).

$$\text{ILrc} = l/rc \quad (9)$$

Onde:

l = consumo total de ligantes (kg.m⁻³).

rc = resistência à compressão (MPa).

O IL_{rc} e o IC_{rc} permitem comparações rápidas e objetivas de diferentes misturas. Quanto maior o IC_{rc} menor sua eficiência ambiental frente ao aquecimento global. Assim como, quanto maior o IL_{rc} maior o teor de ligantes necessário para realização de uma mesma função, tendo menor ecoeficiência e servindo de indicador econômico.

Combinados, os dois indicadores permitem uma abordagem compreensiva sobre a eficiência e uso do cimento.

3.3.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A interpretação dos resultados confrontou os resultados dos distintos produtos avaliados, indicando as diferenças em relação a seus impactos ambientais. Buscou-se também propor possíveis trabalhos para avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental dos resultados obtidos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do programa experimental. Na primeira etapa foi realizada a análise dos materiais de partida. Em seguida, a partir dos ensaios de caracterização tecnológica e da mineralogia dos cimentos investigados, foi avaliada a associação do desempenho mecânico com suas características físicas e mineralógicas. E por último, foi quantificada a pegada de carbono e a energia de calcinação de cada um dos cimentos avaliados com vistas a averiguar se houve diferença significativa entre as respectivas pegadas de carbono e demanda energética, tendo como foco principal a avaliação comparativa entre os cimentos LC³ e os cimentos de referência, CPI 40 e CPII F 40.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

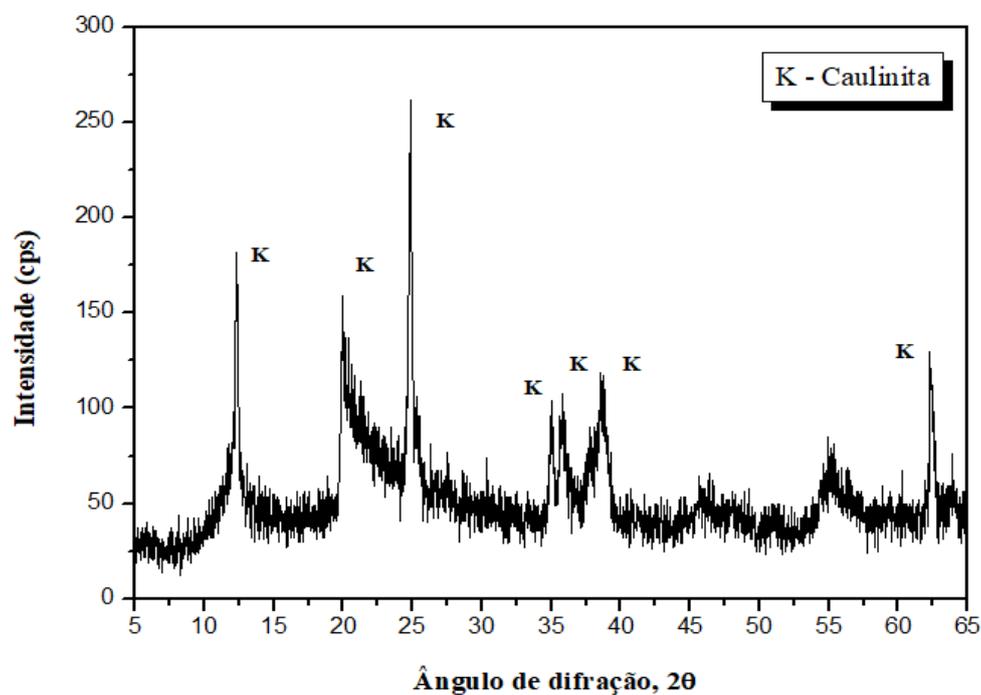
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Os difratogramas de raios-X do CF, do calcário, do MC e do CP I 40 são mostrados nas Figuras 31 a 34. Na Tabela 05 são apresentadas as análises químicas por FRX. O espectro de raios-X do CF mostra que o resíduo é constituído essencialmente pelo mineral caulinita.

A caulinita é possui um elevado grau de desordem, evidenciado pelo pico principal da caulinita (001), que se mostra alargado na base. Além disto, o primeiro triplete, situação entre $19,9^\circ$ e $23,8^\circ 2\theta$ ($4,7$ a $3,73 \text{ \AA}$), é constituído por apenas um pico a $4,45 \text{ \AA}$ e os outros dois tripletres localizados entre 35° e $40^\circ 2\theta$ ($2,55$ a $2,24 \text{ \AA}$), são formados somente por duas reflexões mal definidas. (Figura 31). Na FRX é possível quantificar o percentual de 97% de caulinita a partir dos valores teóricos de perda de

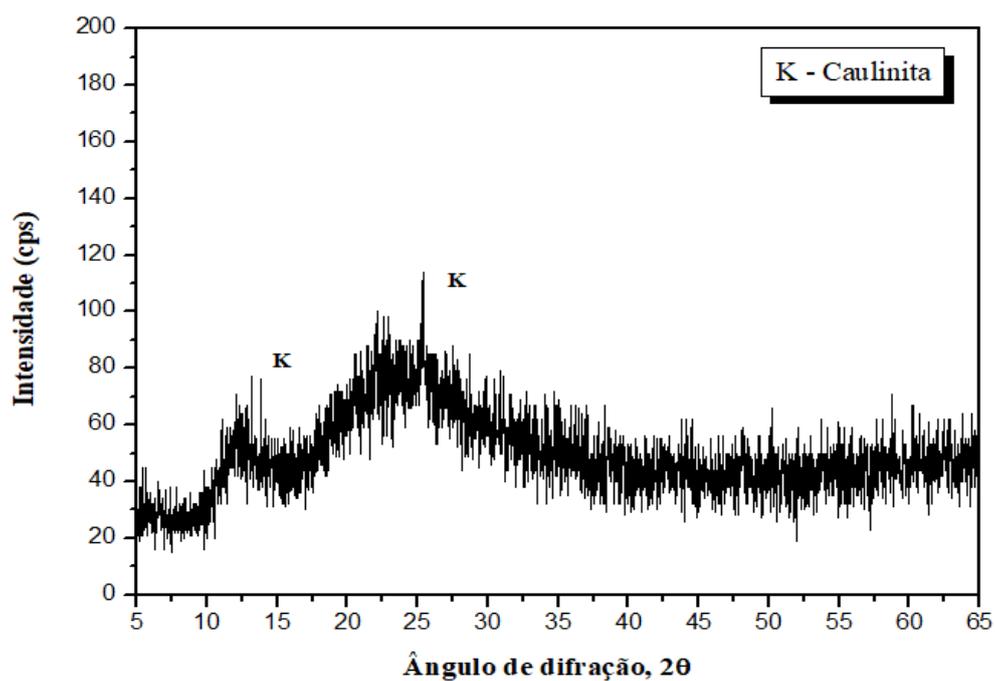
massa e da razão Si/Al. No caso da caulinita são de 13,96 e 1,178. No CF, a perda ao fogo foi de 13,84% e a razão Si/Al foi de 1,23, muito próximos dos valores teóricos da caulinita pura.

Figura 31 – Difratoograma de raios-X do CF *in natura*.



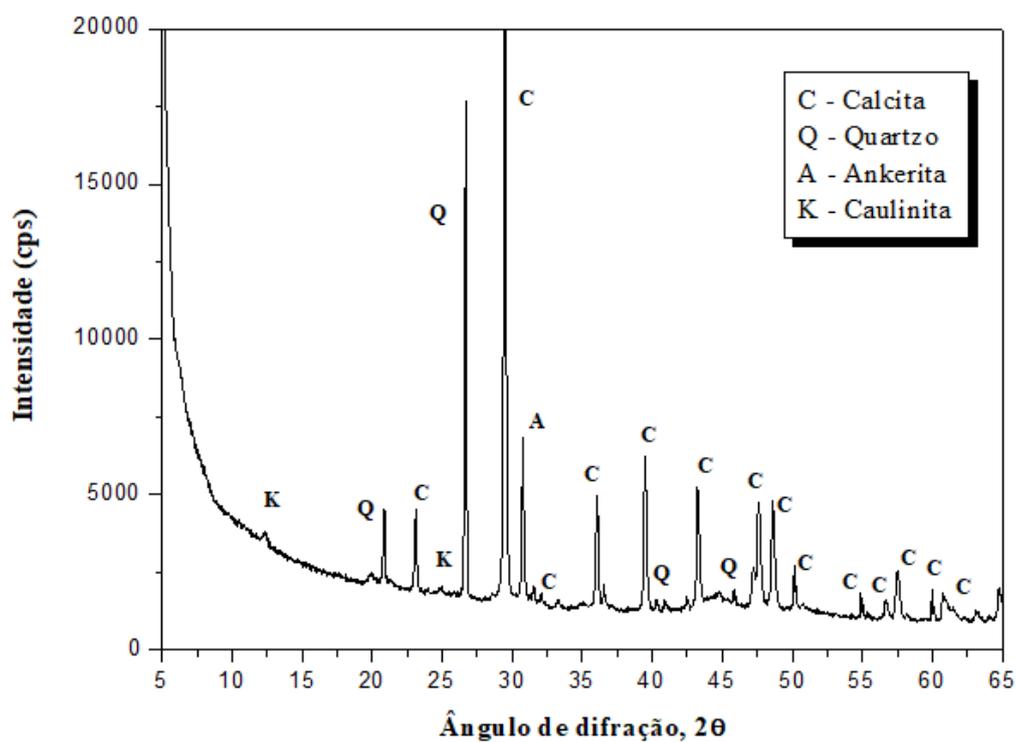
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Difratoograma de raios-X do MC (CF calcinado e moído).



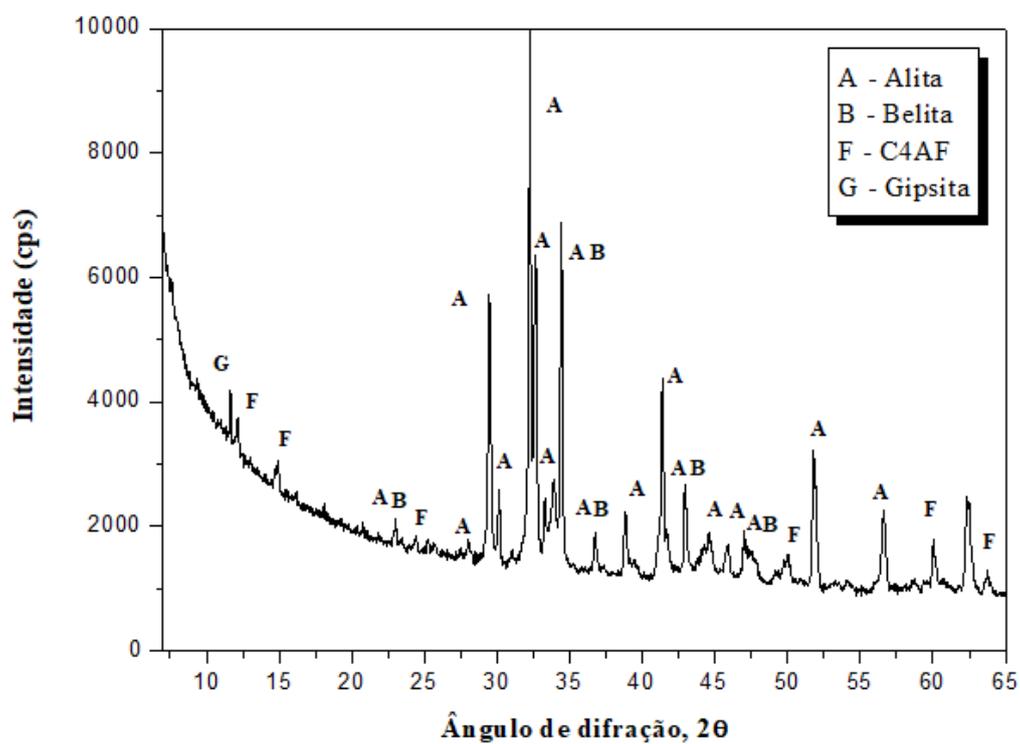
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Difratoograma de raios-X do calcário.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Difratoograma de raios-X do CPI 40.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Análises químicas dos materiais de partida.

Óxidos	CPI 40	Caulim (CF)	Metacaulim	Calcário
MgO (%)	3,76	0,52	0,73	2,00
Al₂O₃ (%)	4,41	37,60	44,77	0,73
SiO₂ (%)	18,15	46,49	52,74	3,19
P₂O₅ (%)	0,47	-	-	0,58
SO₃ (%)	4,35	0,35	-	0,44
K₂O (%)	0,58	-	-	0,33
CaO (%)	63,70	-	-	50,37
TiO₂ (%)	0,21	0,54	0,21	0,31
Fe₂O₃ (%)	3,80	0,66	3,79	0,62
Perda ao Fogo (%)	1,07	13,85	0,37	42,26

Fonte: Autoria própria.

O fato do CF ser constituídos basicamente por caulinita demonstra a excelente qualidade como matéria-prima para a produção da MC de alta reatividade a um custo baixo. A alta pureza dos caulins de origem secundária da Amazônia faz com que até mesmos os resíduos, produtos do descarte do processo de beneficiamento, sejam caulins também de alta pureza para os critérios de fabricação das pozolanas, sem que haja a necessidade da aplicação de rígidos parâmetros de controle para remoção de impurezas, aspecto esse que pode reduzir os custos de produção da pozolana a partir desses caulins e viabilizar o LC³ do ponto de vista econômico. Situação diferente do que ocorre nos caulins empregados na Índia e em Cuba. Nos trabalhos desenvolvidos pelo *LC³ Project* nestes países, as argilas calcinadas empregadas na composição dos cimentos LC³ não possuem teor de caulinita calcinada superior a 65% por questões econômicas, visto que o metacaulim com elevada concentração de caulinita desordenada custa três vezes o preço do cimento Portland (AVET, SCRIVENER, 2018).

Para as condições acima relatadas de calcinação do caulim, houve uma perda ao fogo residual de 0,37%, que equivale a praticamente uma desidroxilação completa da caulinita, cerca de 13%. O espectro do CF calcinado (Figura 32) mostra duas expressivas bandas de amorfização entre os ângulos 2θ de 10° e 30°, intervalo caracterizado pelas reflexões fortes e agudas da caulinita (Figura 31). As duas bandas de amorfização evidenciam a presença da metacaulinita nos resíduos calcinados. A calcinação foi

eficiente pois praticamente toda a caulinita sofreu desordenamento estrutural, pois não há picos referentes às maiores intensidades do argilomineral.

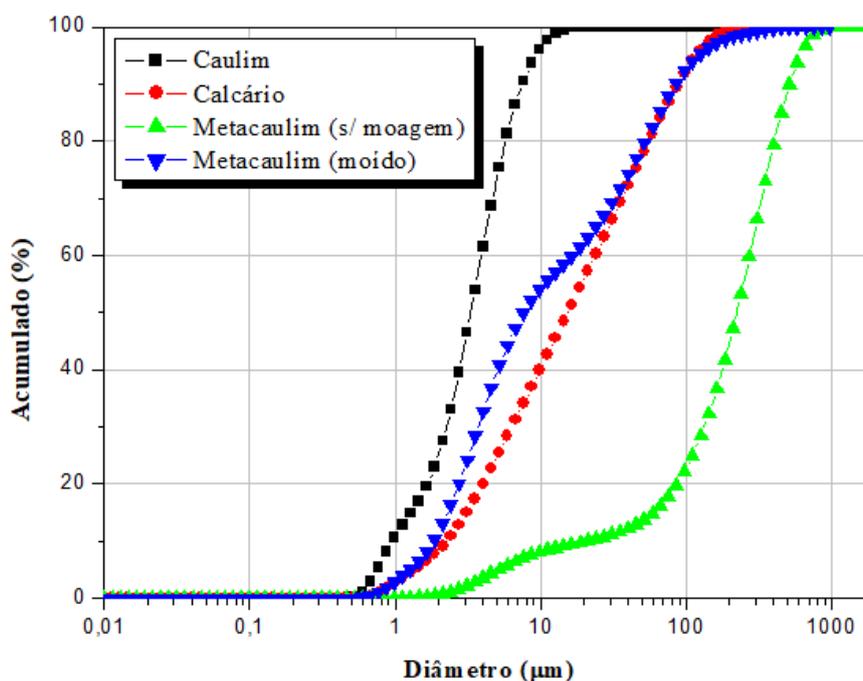
No caso do calcário, o valor da perda ao fogo de 42,26% é muito próximo do valor teórico da CaCO_3 (44%), o que indica o alto teor de calcita na matéria-prima. A DRX mostra além da calcita, quartzo, ankerita e caulinita em percentual reduzido (Figura 33).

O cimento CP I 40 é constituído por picos referentes aos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), além da gipsita e da fase C_4AF (ferroaluminado de cálcio), sendo o clínquer constituído por 64,39% de CaO , descontando a gipsita do somatório (Tabela 5). Verifica-se também que o CP I 40 está de acordo com os limites de óxido de magnésio ($\leq 6,5$) e trióxido de enxofre ($\leq 4,5$), estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018).

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Figura 35 mostra os resultados da distribuição granulométrica das partículas do CF, do calcário, do metacaulim (MC) produzido a partir da queima do CF, moído e não moído e do cimento Portland CP I. Na Tabela 06 são apresentados os valores de massa específica e do diâmetro das partículas passantes a 10%, 50% e 90%, ou, D10%, D50% e D90%, respectivamente.

Figura 35 – Curvas granulométricas.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Massa específica e Diâmetros referentes a 10%, 50%, 90% do material passante.

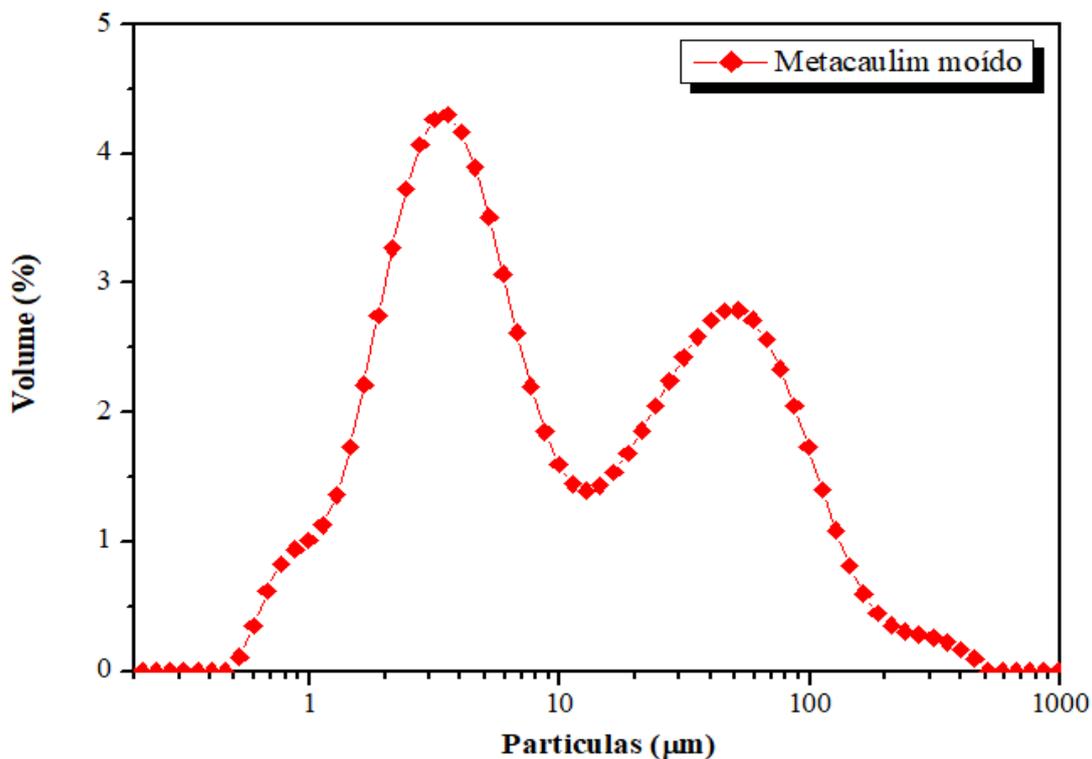
Análise Granulométrica	Calcário	Caulim	Metacaulim s/ moagem	Metacaulim moído	CP I 40
Diâmetro a 10% (μm)	2,26 μm	0,958 μm	26,3 μm	1,84 μm	1,06
Diâmetro a 50% (μm)	15,5 μm	3,31 μm	287 μm	7,66 μm	14,82
Diâmetro a 90% (μm)	88,7 μm	7,52 μm	670 μm	85,5 μm	33,44
Massa específica (g/cm^3)	2,75	2,55	2,58	2,58	3,08

Fonte: Autoria própria.

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

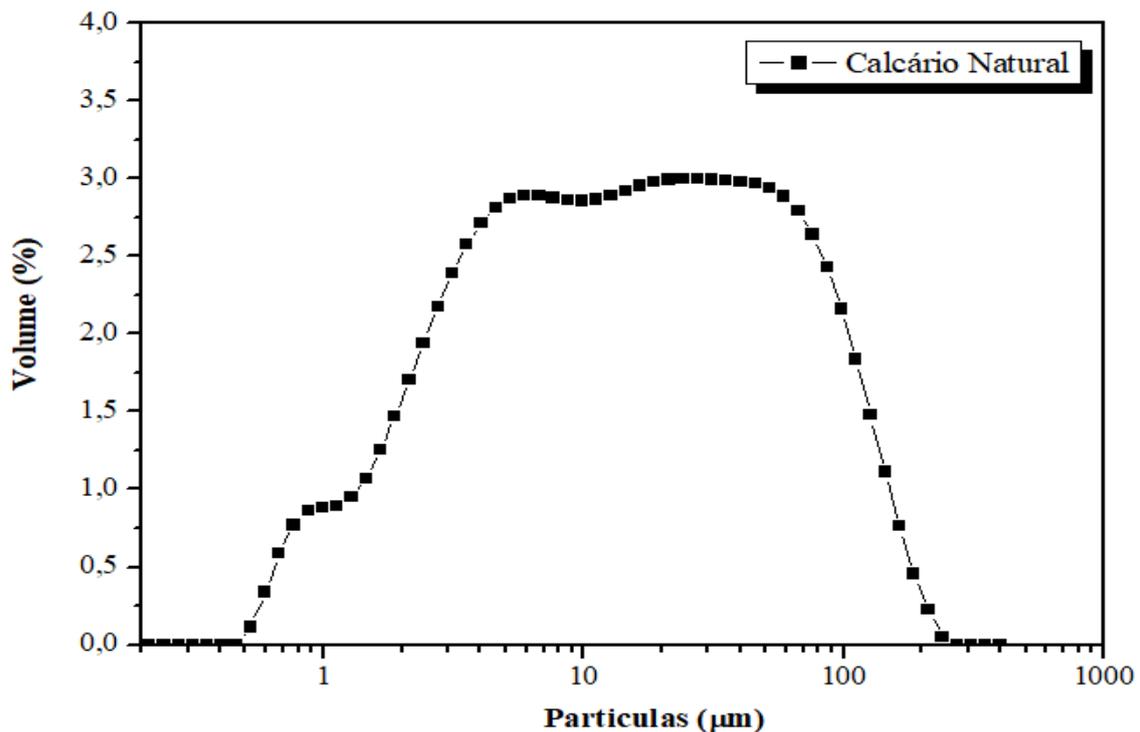
O tratamento térmico provocou na caulinita uma substancial aglomeração das partículas, ocasionando uma alteração na sua granulometria e também um aumento na massa específica. A sinterização foi responsável por este fenômeno. No MC não moído, o D_{50%} passou de 3,31 para 287 μm , cerca de 87 vezes em comparação com o CF “in natura”.

A moagem do CF calcinado (MC) é imprescindível para o aproveitamento do material como adição mineral, restabelecendo a uma finura adequada para emprego no cimento. O D_{50%} passou de 287 μm para 7,66 μm , entretanto, ainda se percebeu uma parcela de partículas de granulometria mais grossa quando se avalia o D_{90%}. No CF *in natura*, 90% do passante é constituído por partículas inferiores a 7,52 μm , ao passo que no CF calcinado e moído (MC) o passante a 90% é constituído de partículas inferiores a 85 μm . Há famílias de grãos com partículas bem distintas (bi-modal), umas mais finas outras mais grossas, como pode ser observado na curva do MC moído (Figura 36).

Figura 36 - Frequência das partículas do metacaulim moído.

Fonte: Autoria própria.

O calcário apresentou uma granulometria mais grossa que o MC moído e que o cimento CPI 40, com D50% de 15,5 μm . Outra particularidade do calcário foi a presença de uma granulometria uniforme, com um distribuição granulométrica restrita (Figura 37), não contínua, o que tende a demandar maior quantidade de água para uma mesma consistência. O cimento Portland CPI 40 apresentou uma distribuição granulométrica uniforme, com D10%, D50% e D90% mais próximos entre si, no caso, 1 μm , 10 μm e 33 μm , respectivamente.

Figura 37- Frequência das partículas do calcário moído.

Fonte: Autoria própria.

O MC moído nas condições experimentais descritas neste trabalho é um material extremamente fino, que alterará substancialmente a área superficial do cimento LC³ em relação ao cimento CP I e, conseqüentemente, a demanda de água e de aditivo superplastificante. Além das características no estado fresco, de acordo com Lawrence, Cyr e Ringot (2003), Dal Molin (2011), Vizcaíno Andrés *et al.* (2015), dentre outros pesquisadores, a finura das adições pode influenciar também no desempenho mecânico do produto final, principalmente em idades iniciais, em função dos efeitos de nucleação que podem ser favorecidos por adições minerais de finuras mais elevadas. Neste caso, adições minerais finas aceleram o desenvolvimento de resistência nas primeiras idades do C₃S no cimento.

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

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS LC³

4.2.1 CIMENTOS ANIDROS

A Tabela 7 mostra os resultados de massa específica e de área superficial específica *Blaine* para todos os cimentos LC³, além dos cimentos de referência, CPI 40 e CII F 40. A área superficial específica das adições minerais influenciam diretamente nas propriedades dos cimentos, refletindo no desempenho de concretos e argamassas produzidas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Tabela 7 – Massa específica e área superficial *Blaine*.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Área superficial específica <i>Blaine</i> (cm ² /g)
CPI 40	3,08	3490
CII F 40	3,02	4830
LC3 50 2:1	2,86	6210
LC3 50 1,5:1	2,87	5850
LC3 50 1:1	2,88	5670
LC3 35 2:1	2,79	7370
LC3 35 1,5:1	2,80	6910
LC3 35 1:1	2,81	6410

Fonte: Autoria própria.

Os teores de incorporação de 45% e 60% da mistura de MC-calcário propiciaram aos cimentos um aumento demasiado da área superficial específica *Blaine*. Quanto maior o teor de incorporação da mistura, maiores as áreas superficiais. Os cimentos LC³ 35 apresentaram áreas superficiais entre 6400 e 7300 e os LC³ 50, entre 5600 a 6200 cm²/g, todas muito elevadas em relação aos 4800 do CII F 40 e de 3500 cm²/g do CP I 40.

Dentre os cimentos LC³ com o mesmo percentual de incorporação, quanto maior a incorporação de calcário menor a área superficial, comportamento atribuído a maior finura do MC em comparação ao calcário. Os valores foram elevados em razão da presença da MC, cuja finura é maior dentre os demais constituintes dos cimentos LC³. Por esta razão, a medida que se reduz o teor de MC na composição ternária do LC³, em prol do aumento do calcário, ocorre uma redução da área superficial específica. Para reduzir a ASE dos cimentos uma solução seria aplicar uma energia de moagem menor ao MC e ao calcário, de modo que alcançassem ASE próximas a 5000 cm²/g, valor praticado

pelas cimenteiras. Contudo, poderiam ocorrer reduções nas resistências iniciais dos concretos e argamassas, mas haveriam ganhos nas propriedades reológicas, maior tempo de retenção de fluxo das misturas frescas cimentícias, maior estabilidade dimensional. Entretanto, estudos específicos para estes temas são importantes, mas que fogem do escopo deste trabalho.

Em relação à massa específica dos cimentos LC³, a mesma se comportou de maneira inversa à área superficial específica dos cimentos. Para valores crescentes de adição, a massa específica dos cimentos diminuiu proporcionalmente, tendo LC³ 50 maiores valores do que LC³ 35, o que era esperado pelo fato das adições terem uma massa específica menor. Já dentro dos grupos LC³-50 e LC³-35, quanto maior a adição de fíler calcário maior a massa específica (1:1>1,5:1>2:1) e menor a área específica superficial (1:1<1,5:1<2:1). Isso também se deve pelo maior peso específico e maior tamanho médio das partículas do calcário em relação ao metacaulim, respectivamente.

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS EM PASTA

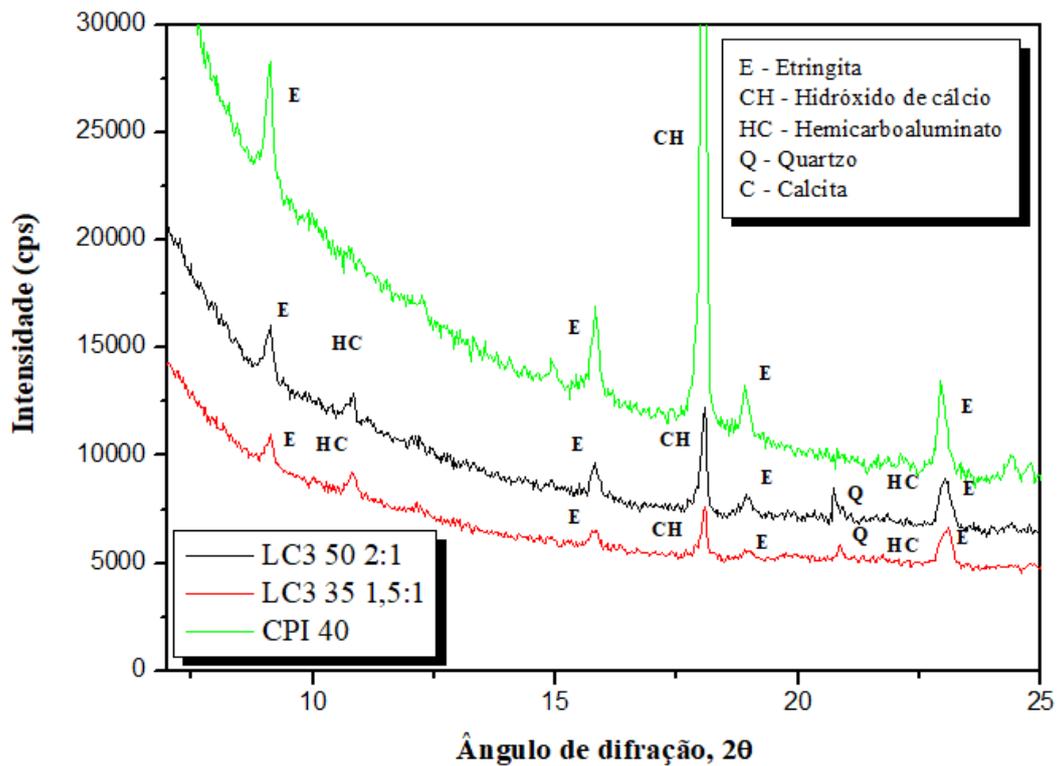
a) Difractometria de raios-X

As Figuras 38 à 41 mostram os difratogramas de raios-X das pastas hidratadas aos 1, 3, 7 e 28 dias respectivamente dos cimentos LC³ -50 (2:1) e LC³ 35 (1,5:1), além do cimento CP I 40. No sistema de referência constata-se a formação de etringita e portlandita em grande quantidade (pico pronunciado). No sistema do LC³ 50, com 30% de MC e 15% de calcário, constata-se a formação de etringita, portlandita, monocarboaluminato e hemicarboaluminato, estes dois últimos oriundos da reação da metacaulina com a calcita. A presença da portlandita é muito menor do que em relação a pasta de CP I 40, devido a reação da MC, principalmente entre o primeiro e o sétimo dia (Figuras 38 à 40). A etringita e o hemicarboaluminato já são formados no primeiro dia de hidratação, ao passo que o monocarboaluminato somente é observado aos 28 dias. No sistema LC³ 35 (1,5:1), com maiores percentuais de substituição do clínquer pela mistura com 36% de MC e 24% de calcário, novamente se observa a presença de etringita e dos carboaluminatos, sendo o Mc formado a partir dos 28 dias. Entretanto, não foi detectada a presença do pico da portlandita, totalmente exaurida pelas reações pozolânicas com o MC já no sétimo dia. Isto se traduz em uma baixa alcalinidade que pode vir a prejudicar a passivação das armaduras. Em ambas as misturas, as reações do MC com a calcita e a portlandita ocorreram de forma mais intensa entre o primeiro e o sétimo dia, o que explica

o rápido desenvolvimento de resistências iniciais, já aos 7 dias, conforme será discutido mais adiante no item que aborda a resistência à compressão dos cimentos.

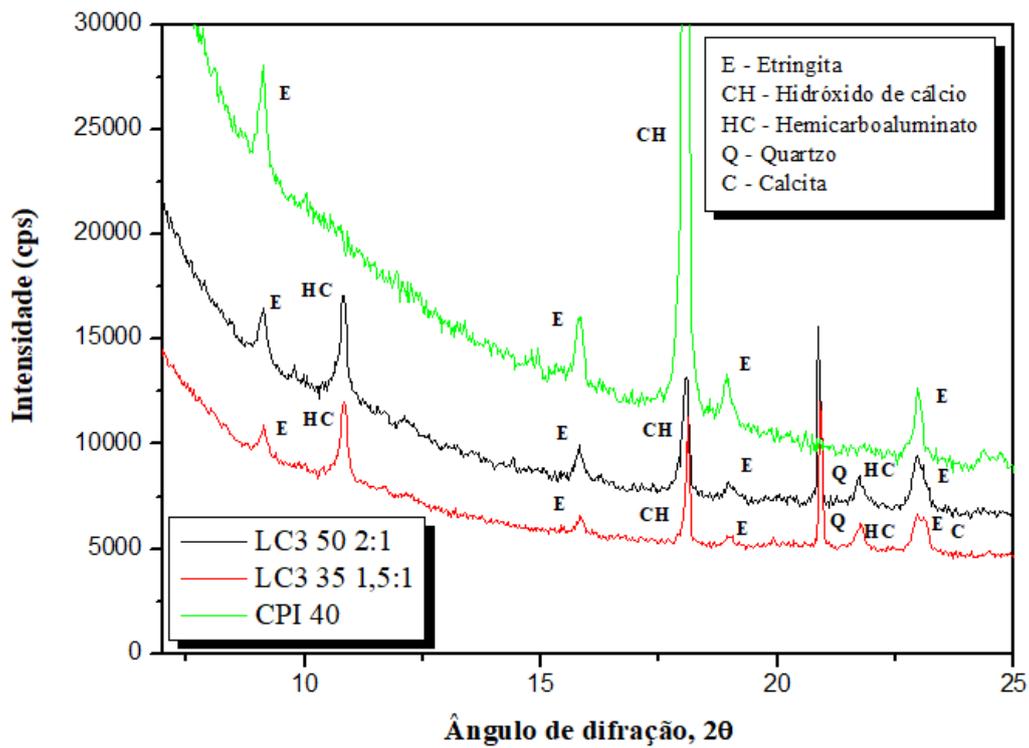
Nas misturas LC³, independentemente do percentual de substituição, observou-se a rápida formação de Hc já nas primeiras idades, ao passo que o Mc só veio a formar-se aos 28 dias. Como a disponibilidade de aluminato é elevada em razão da alta pureza da argila caulinitica, a cinética de reação do Hc é mais rápida na combinação da calcita com a metacaulinita. Como o Mc é mais estável, sua formação é mais progressiva e lenta. Foram também detectadas a presença de quartzo e calcita inerte, que não reagiu com o MC. Ambas as fases são oriundas da elevada incorporação de calcário na mistura, cerca de 15% (LC³ 50) e 24% (LC³ 35).

Figura 38 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas ao 1 dia.



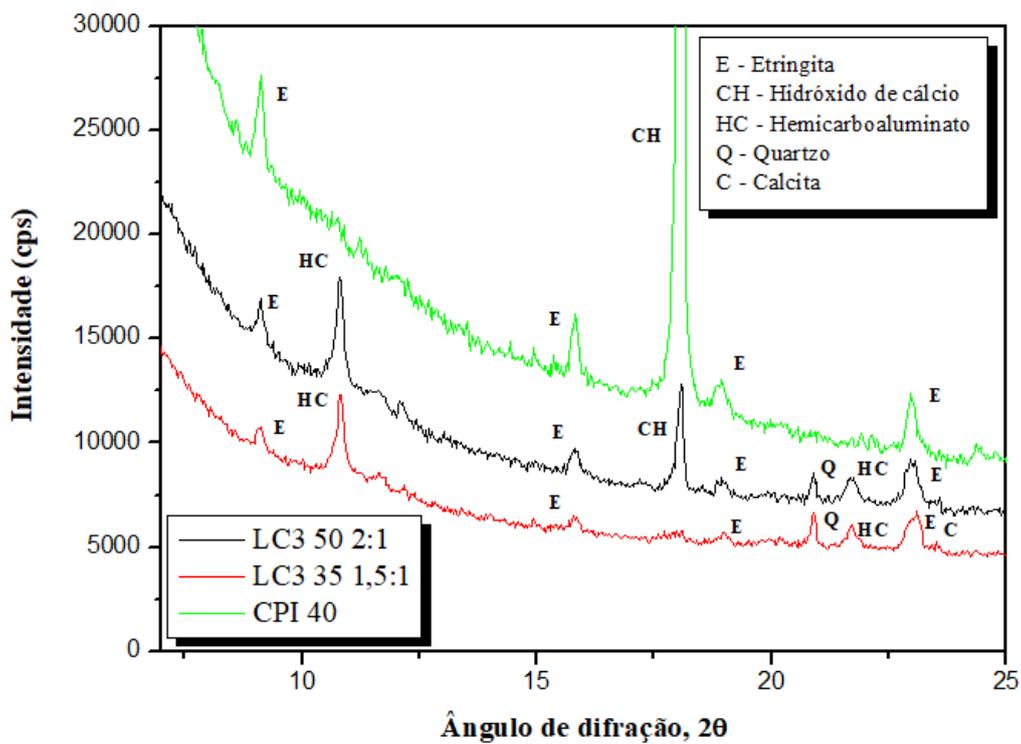
Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 3 dias.



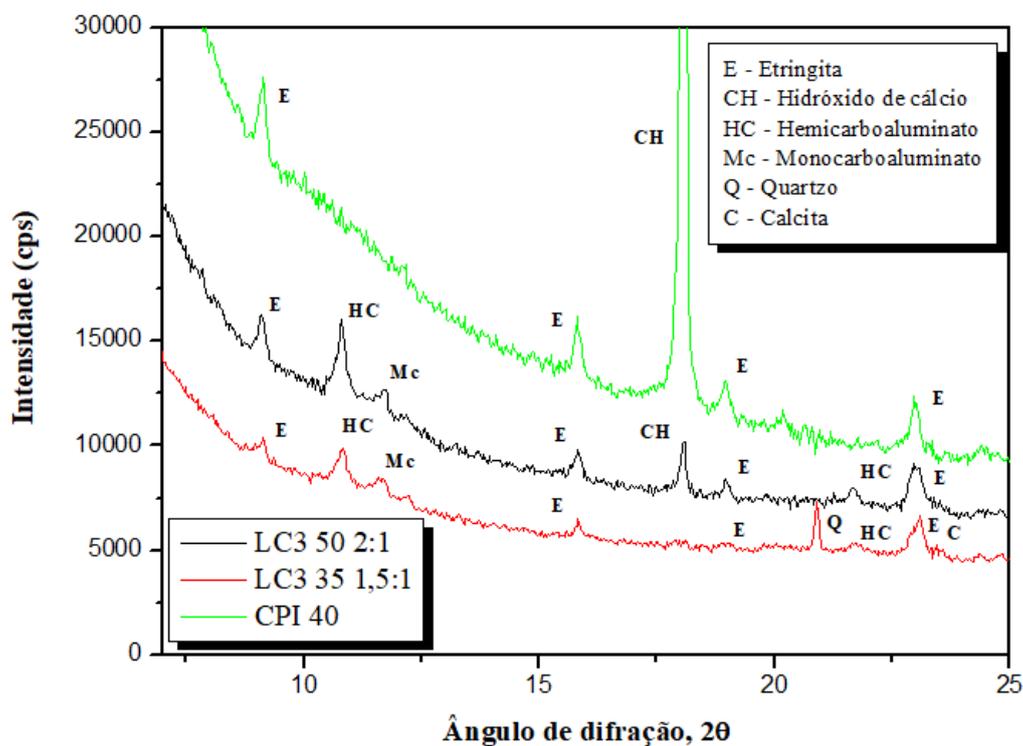
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 7 dias.



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 – Difratoograma de raios-X pastas hidratadas aos 28 dias.



Fonte: Autoria própria.

b) Tempo de Pega e água de consistência

A Tabela 8 mostra os resultados do tempo de início e fim de pega. Percebe-se uma clara tendência de crescimento na demanda de água quando o teor de adições aumenta nos cimentos. O grupo dos cimentos LC³ 35 com incorporação de 60% da mistura de MC-calcário apresenta maior demanda em relação ao grupo LC³ 50, cujo percentual de substituição de clínquer foi de 40%. Dentro de cada grupo de cimento LC³ houve um ligeiro acréscimo à medida que se aumentava a proporção de calcário em relação a MC, apesar do primeiro ter uma finura menor que o segundo (Tabela 7). Em tese deveria ocorrer o oposto, uma redução na água de consistência a medida que se aumentava o percentual de calcário. Atribui-se este comportamento à distribuição das partículas do calcário, que estão uniformes (Figura 37), que prejudica a reologia da pasta, apesar de partículas mais grossas que a MC.

Tabela 8 – Água de consistência e tempo de pega inicial e final.

Amostra	Água de consistência normal (%)	Tempo de início de pega (min.)	Tempo de fim de pega (min.)
NBR 11578	-	≥ 60	≤ 600
CPI 40	27,8	180	240
CPII F 40	32,0	200	255
LC3 50 2:1	39,0	110	185
LC3 50 1,5:1	39,2	155	210
LC3 50 1:1	39,4	195	250
LC3 35 2:1	47,8	90	170
LC3 35 1,5:1	48,0	125	200
LC3 35 1:1	48,2	180	230

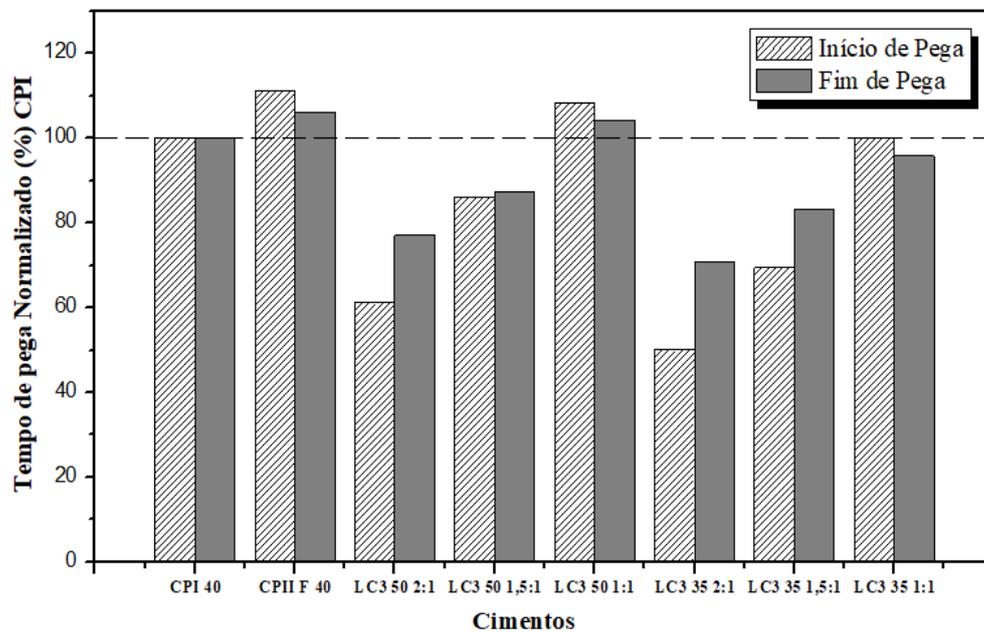
Fonte: Autoria própria.

Em relação ao tempo de pega, o principal responsável pela aceleração da hidratação do cimento LC³ foi o MC. Neste caso, a aceleração não se deve a presença de aluminatos na composição, mas sim à finura das partículas do MC. O MC através do efeito fíler promove a aceleração da hidratação do C₃S porque suas partículas atuam como ponto de nucleação para formação de hidratos (WILD; KHATIB; JONES, 1996; FRIAS; SÁNCHEZ DE ROJAS; CABRERA, 2000; AMBROISE; MARTIN-CALLE; PÉRA, 1992, ZUNINO, SCRIVENER, 2018). À medida que o C₃S hidrata, gera C-S-H que absorve sulfatos, antecipando a dissolução do C₃A e a formação de etringita. Como o calcário é ligeiramente mais grosso que o cimento CP I 40, sua incorporação tende a estender o tempo de pega porque não exerce o efeito fíler de forma tão pronunciada quanto o MC. Por esta razão que as misturas de LC³ com maior teor de calcário, no caso aquela com proporção 1:1 (MC : calcário), independentemente do teor de substituição do LC3, 45% (LC³50) ou 60% (LC³35), apresentaram maior tempo de pega e compatíveis com os cimentos CP I e CP II F, o que é um aspecto positivo (Figura 42). Uma alternativa para os demais LC³, com maior incorporação de MC (2:1 e 1,5:1), seria aumentar reduzir a finura das partículas e aumentar o teor de gipsita, contudo é necessário avaliar os efeitos nas propriedades mecânicas do LC³.

A respeito do percentual de gipsita acrescentado aos LC³, de modo que contivessem cerca de 5% de gipsita de modo a evitar a sub-sulfatação, surtiu efeito nas pastas com maiores incorporações de calcário, independentemente do percentual de substituição do clínquer, no caso os LC³50 (1:1) e LC³35 (1:1). Os tempos de pega inicial e final destes cimentos foram próximos dos obtidos com os cimentos comum e composto.

No caso dos demais cimentos LC³, com maiores percentuais de incorporação de argila calcinada, são necessários estudos mais aprofundados para prolongar os tempos de pega e desse modo viabiliza o emprego de concretos e argamassas com estes cimentos.

Figura 42 – Tempos de início e fim de pega.



Fonte: Autoria própria.

c) Colorimetria

As adições minerais por apresentarem tons muito próximos ao branco, como é o exemplo do metacaulim (Figura 43), modificaram a alvura dos produtos finais (cimentos LC³), medida em termos de luminosidade. A luminosidade (L^*) é mostrada no Tabela 9 e nas Figura 44.

Figura 43 – Metacaulim Pós-moagem.

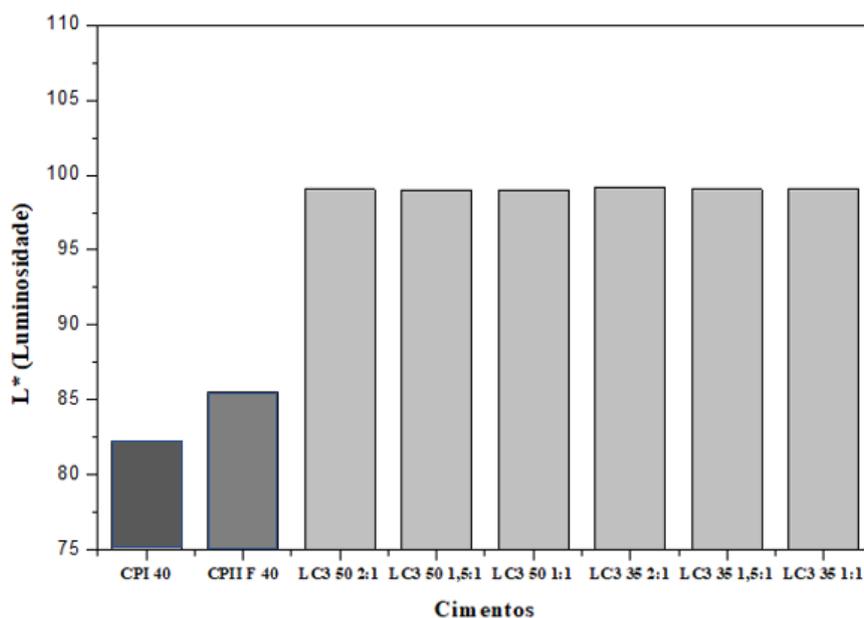


Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Parâmetros L*a*b* para cimentos analisados.

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

Fonte: Autoria própria.

Figura 44 – Luminosidade dos cimentos analisados.

Fonte: Autoria própria.

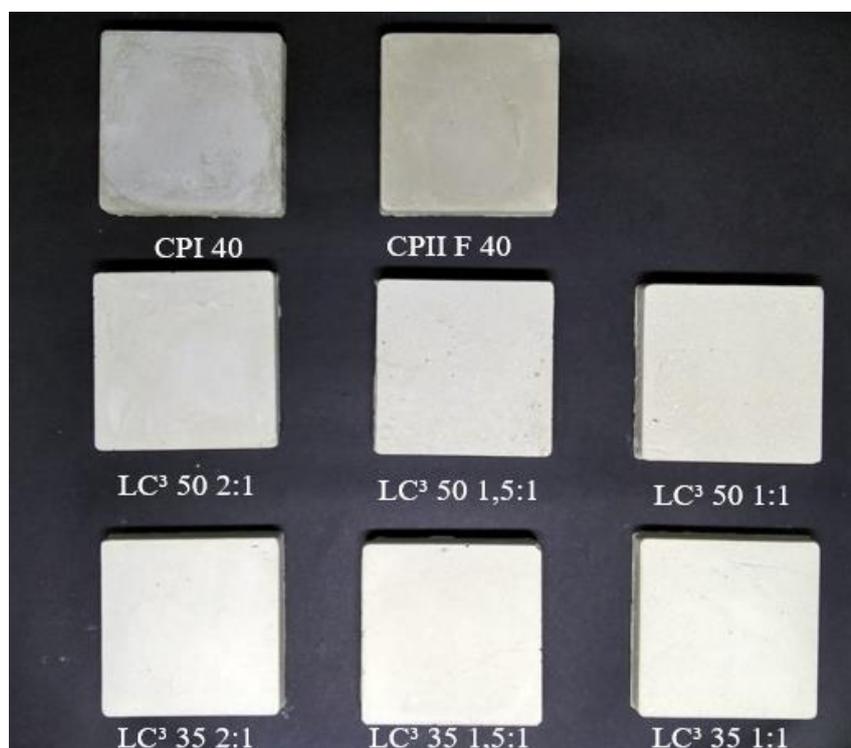
O cimento CPI 40 tende a ser mais escuro que os demais cimentos porque possui um percentual de 95% de clínquer, componente responsável pela cor cinza do produto final. O CP II F é ligeiramente mais alvo que o CP I porque possui 21% de incorporação de calcário em sua composição. Já os cimentos LC³, que possuem além do calcário, o metacaulim em teores de substituição muito mais elevados, apresentaram resultados de luminosidade bastante superiores, na ordem de 99% em comparação aos 82 e 85% dos cimentos Portland comum e composto. Dentre os cimentos LC³, quanto maior o teor de incorporação das adições minerais nas misturas, maior o aumento da luminosidade. O mesmo ocorre com a maior incorporação de metacaulim em relação ao calcário, apesar deste caso, as diferenças serem mínimas e imperceptíveis a olho nu (Tabela 10).

Tabela 10 - Diferenças de luminosidade, cromáticas e total (ΔL^* , Δa^* , Δb^* ΔE^*).

Amostra	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
CPII F 40	3,26	0,24	2,95	8,07
LC3 50 2:1	16,78	0,34	-2,84	12,37
LC3 50 1,5:1	16,76	0,22	-3,14	12,43
LC3 50 1:1	16,75	0,2	-3,29	12,28
LC3 35 2:1	16,92	-0,18	3,26	12,78
LC3 35 1,5:1	16,8	0,09	0,12	11,98
LC3 35 1:1	16,84	-0,3	5,03	13,55

Fonte: Autoria própria.

Os elevados valores de luminosidade proporcionados pela incorporação de grandes quantidades de argilas caulínicas de alta qualidade tornam estes cimentos LC³ extremamente alvos, como pode ser visto na Figura 45 e nos resultados ΔE e ΔL na Tabela 10, aproximando-se da alvura do cimento Portland Branco. Esta característica favorece a incorporação de pigmentos a este tipo cimento para produção de concretos e argamassas coloridos com tonalidades mais intensas, principalmente de cores claras em estruturas aparentes.

Figura 45 – Cor nas pastas dos cimentos analisados.

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS EM ARGAMASSA

Castro e Pandolfelli (2009) alertam para o aumento considerável da demanda de água em misturas contendo adições minerais e conseqüente redução de resistência mecânica dos sistemas. Esta afirmação corrobora com os ensaios realizados nesta pesquisa, nos quais, foi identificada uma perda de trabalhabilidade em função da implementação das adições minerais. No entanto, para que não houvesse redução da resistência mecânica das argamassas em função do aumento da relação água/aglomerante, foi necessária a utilização do aditivo superplastificante nas misturas produzidas, para que dessa forma, fosse obtido um espalhamento semelhante aquele atingido pela mistura de referência, conforme estabelece a ABNT NBR 5752 (2014), mantendo-se constante a relação água/aglomerante. Na Tabela 11 estão mostrados os quantitativos de superplastificante utilizados em cada argamassa produzida e os respectivos espalhamentos.

Tabela 11 - Dosagem de aditivo superplastificante e espalhamentos obtidos.

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

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Vizcaíno Andrés *et al.* (2015), entende-se que a necessidade de aditivo à base de policarboxilato ocorre em função da alta finura e da área superficial específica das adições minerais utilizadas, e também do teor de substituição aplicado em cada mistura. Segundo Senff (2009), quanto menor o diâmetro da partícula, maior será a dosagem de superplastificante para obter uma determinada trabalhabilidade.

Corroborando com as afirmações de Vizcaíno Andrés *et al.* (2015) e Senff (2009), para as argamassas produzidas neste trabalho, a quantidade de aditivo policarboxilato

utilizado teve sua dosagem aumentada à medida que o teor de substituição se tornou maior. Em função da elevada finura e área superficial específica destas adições, a dosagem do aditivo policarboxilato foi excessiva, ultrapassando a incorporação máxima de 1,2% em relação à massa de cimento, recomendada pelo fabricante do produto. Vale ressaltar que a dosagem elevada do aditivo pode reduzir a resistência inicial das argamassas e de concretos em função do retardo na hidratação do cimento.

Outro aspecto observado foi que à medida que se aumenta a quantidade de fíler calcário na mistura de LC³, independentemente do percentual de substituição de clínquer (45% ou 60%), ocorre uma maior demanda de aditivo, apesar deste ter uma finura menor que o MC. Assim como foi observado para a água de consistência, a distribuição granulométrica mais uniforme das partículas do calcário não proporcionaram bom empacotamento das partículas da mistura, ocasionando vazios e prejudicando o entrosamento dos grãos, o que resultou em uma maior quantidade de aditivo superplastificante necessário maior dispersão das partículas. Comportamento semelhante foi observado para cimentos Portland com fíler calcário (HAWKINGS *et al*, 2003).

4.2.3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

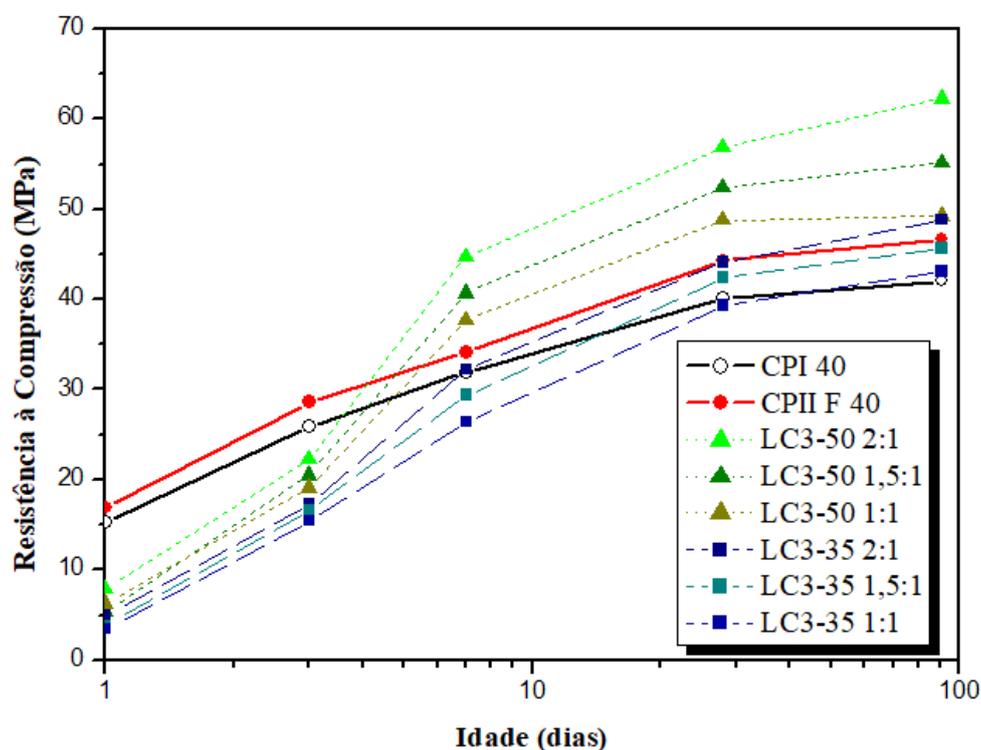
Os resultados de resistência à compressão das oito argamassas para as idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias são mostradas na Tabela 12 e na Figura 46. As Figuras 47 e 48 mostram as resistências normalizadas em relação às argamassas com CP I e CP II F, respectivamente.

Tabela 12 – Resistência a compressão (MPa) absolutos e normalizados em relação ao CP I (%).

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

Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Desenvolvimento de resistência à compressão para diversas idades.



Fonte: Autoria própria.

Os cimentos LC³50, independentemente da proporção entre MC e calcário, apresentaram resistências superiores aos cimentos comum e compostos a partir dos 7 dias de idade. Esta característica é importante para aceitação pelo mercado da Construção Civil, que demanda resistências iniciais elevadas com intuito de aumento na produtividade. Dependendo da proporção entre MC e calcário, a superioridade variou de 18 a 40% em relação ao CP I e de 10 a 31% em comparação ao CP II F. Essas diferenças tiveram um sutil aumento em até 8% (CPI 40) e 5% (CPII F 40) para 91 dias de idade (Figura 46). O cimento LC³50 (2:1), como era esperado, foi o que apresentou as maiores resistências à compressão devido a proporção de MC:calcário ser a ideal do ponto de vista estequiométrico para formar monocarboaluminatos e C-A-S-H em maiores quantidades.

Vale ressaltar o desempenho do LC³50 (1:1), com maior quantidade de calcário na mistura (22,5%), que também apresentou resistências superiores aos cimentos de referência já aos 7 dias de idade (Figuras 42 e 43). A alta concentração de caulinita (97%) no caulim *flint* propiciou a produção de uma MC de alta reatividade, fase responsável pela atividade pozolânica das argilas calcinadas, permitindo que incorporações de calcário acima do cálculo estequiométrico ideal não prejudicassem as resistências iniciais e finais, que foram de 38 MPa aos 7 dias e de 49 MPa aos 28 dias, bastante satisfatórias

para o emprego no segmento da cadeia da construção que industrializa a produção do concreto e das argamassas. Além disto, este ligante apresentou reduções significativas nas emissões de CO₂ em relação ao cimento CP II F, como será discutido no próximo item 4.2.3. Como este segmento representa em termos percentuais cerca de 25 a 35% do mercado da Construção Civil, a substituição do cimento composto com fíler calcário pelo LC³50 (1:1) poderá contribuir de maneira substancial para redução da pegada de carbono da indústria de cimento.

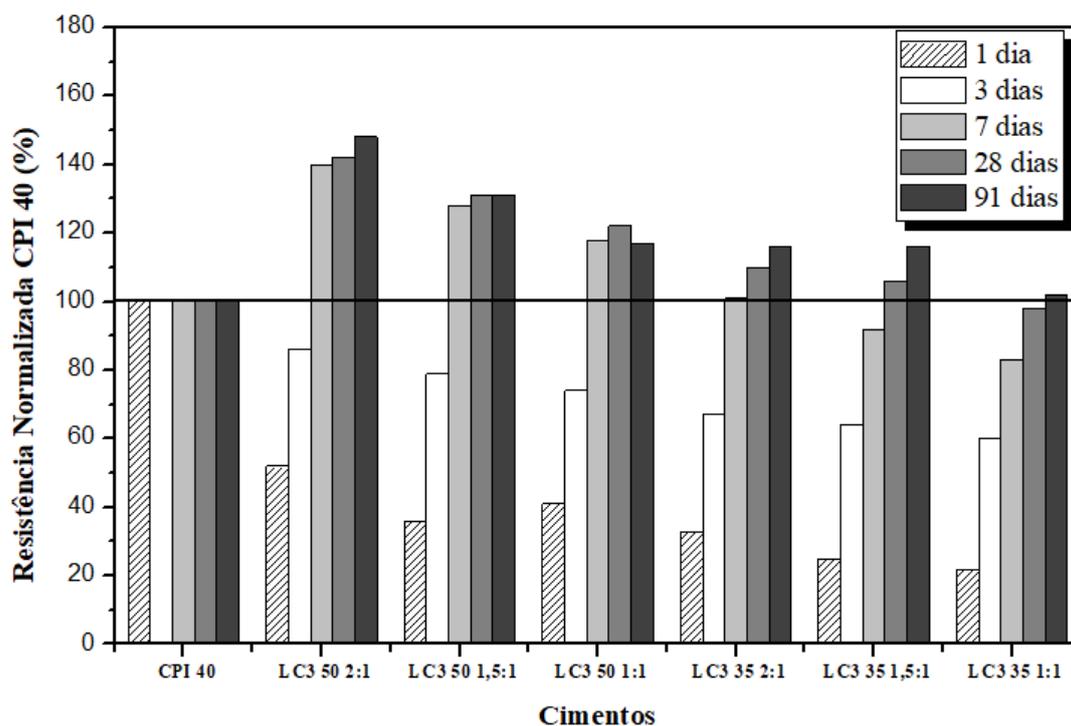
Os cimentos LC³35, por apresentarem percentuais elevados de substituição de clínquer (60%), não apresentaram resistências mecânicas iniciais que ultrapassassem às obtidas com os cimentos comum e compostos, mas não foram desprezíveis, ficaram entre 75 e 100% aos 7 dias. Cabe citar o LC³35 (2:1), que com a proporção estequiométrica ideal entre MC e calcário e 60% de substituição de clínquer, superou já aos 7 dias a do cimento Portland comum (Figura 47) e aos 28 dias igualou o patamar de resistência do CP II F, superando-o aos 91 dias (Figura 48).

Os demais LC³ 35, com proporções MC:calcário inferiores ao ideal estequiométrico (1,5:1 e 1:1), apresentaram aos 28 dias resistências inferiores à do cimento composto CP II F, mas superiores aos 91 dias (Figura 48). Os ganhos de resistências foram mais expressivos para as idades mais avançadas, alcançando entre 39 e 42 MPa aos 28 dias e 43 e 49 MPa aos 91 dias. Ambos os cimentos LC³35 poderiam ser perfeitamente empregados no segmento de cimento ensacado, que representa cerca de 66% do mercado nacional, destinado à produção de concretos e argamassas em obras e canteiros de pequeno porte, onde geralmente não há conhecimento e equipamentos especializados (autoconstrução), nem controle de variabilidade e otimização de dosagem. Outra característica bastante relevante deste segmento é o emprego de cimento em consumos maiores do que se produzidos em instalações industriais. Enquanto no segmento industrial são empregadas dosagens entre 260 e 320 kg/m³, nas pequenas obras, que representam os maiores volumes, o consumo médio é de 350 kg/m³ (SNIC, 2019). O emprego do LC³35 (1:1) poderia mitigar significativamente as emissões CO₂, visto o seu elevado teor de substituição de clínquer e o maior percentual de calcário incorporado (30%). Estima-se, com base nos dados fornecidos pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento no Relatório “*RoadMap* tecnológico do cimento” que esta substituição poderia representar uma mitigação de 43 Mt (SNIC, 2019).

De modo geral, os cimentos LC³ apresentaram um desenvolvimento rápido de resistência até o sétimo dia. Após isto, houve um crescimento mais lento e progressivo de resistência até os 91 dias (Figura 46). Já nos cimentos Portland comum (CP I) e composto com fíler calcário (CP II F), a maior evolução de resistência ocorreu até os 3 dias, sendo mais lento até os 28 dias, e praticamente sem acréscimos significativos aos 91 dias. Nos espectros de raios-X das pastas hidratadas constata-se a reação rápida da MC com a calcita e a portlandita até os 7 dias de idade, com o aumento de intensidade do pico do Hc e a redução e/ou eliminação da portlandita no LC³ 35 (1,5:1) (Figuras 38 à 41). Nos LC³ com 45% de substituição de clínquer, este intenso efeito pozolânico da MC e sua aceleração da hidratação do C₃S se sobreporam ao efeito de diluição de cimento. A alta reatividade da metacaulinita, decorrente da elevada concentração de caulintia no caulim *flint*, foi responsável por este efeito de sobreposição já aos 7 dias de idade. Nos cimentos LC³ 35, com substituição de 60% de clínquer, a alta reatividade da MC não foi suficiente para superar o efeito de diluição do cimento, a ponto de proporcionar resistências iniciais aos 7 dias superiores aos dos cimentos comerciais.

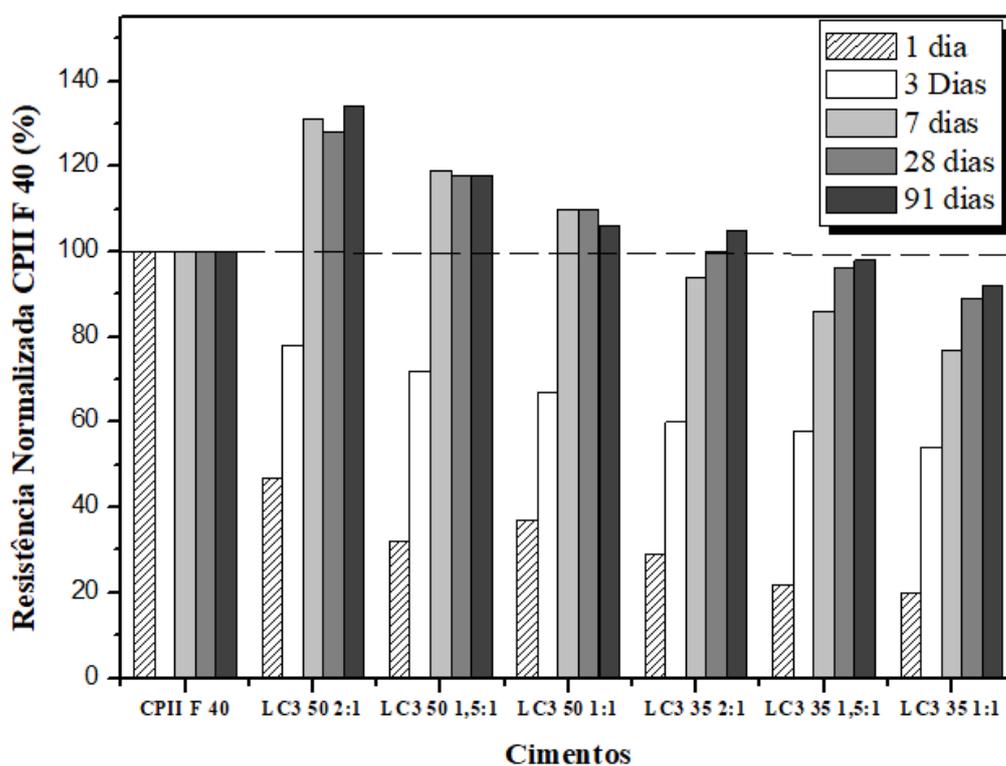
A crescente e continua evolução das resistências nos LC³ até os 91 dias se deve a formação contínua de C-A-S-H. De acordo com Avet e Scrivner (2018), a reação contínua da metacaulinita (MC) libera mais alumínio ao sistema, que é integralmente consumido para formação do C-A-S-H, tendo em vista que outras fases factíveis de ocorrerem neste sistema como o monossulfato e carbonaluminatos adicionais não foram detectadas por causa da ausência de poros de maior dimensão. As pastas com LC³ tem como característica o refinamento dos poros nas pastas, o que contribui para a alta eficiência mecânica destes cimentos, conforme será visto no item 4.3.3.

Figura 47 – Resistências normalizadas em relação ao CPI 40.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Resistência normalizada em relação ao CPII F 40.



Fonte: Autoria própria.

4.3 IMPACTO AMBIENTAL ATRAVÉS DA EMISSÃO DE CO₂

4.3.1 TRANSPORTE

A quantidade de farinha para fabricação de uma tonelada de clínquer considerada é de 1560 quilogramas (Votorantim Cimentos), que destes são 95% calcário, 4% CF e 1% minério de ferro, de acordo informações da própria fabricante. Para o cálculo dos transportes da matéria prima foi considerado o transporte rodoviário, com caminhões de pesados e extra-pesados. Na Tabela 13 são mostradas as distâncias de transporte, a capacidade do caminhão, o consumo de combustível, o fato de emissão de CO₂ do combustível e a emissão total de CO₂ por tonelada de matéria-prima transportada.

Tabela 13 – Consumo de combustível e emissão de CO₂ por tonelada transportada.

Material	Calcário	Caulim	Minério de Ferro	Gipsita
Distância (km)	4	228	813	649
Capacidade do Caminhão Ton.	45	72	72	72
Consumo (L/Ton/km)	0,01216 ¹	0,0114 ¹	0,0114 ¹	0,0114 ¹
Consumo de combustível (L)	4,38	374,28	1334,62	1065,40
Consumo de CO₂ (kg/L) – Diesel	3,2 ²	3,2 ²	3,2 ²	3,2 ²
Emissão de CO₂/Ton	0,31	16,63	59,32	47,35

Nota: ^{1/2} (COSTA, 2012)

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados de emissão de CO₂ por tonelada, mostrado na Tabela 13, foi possível calcular a emissão de CO₂ referente ao transporte das matérias-primas empregadas para produzir uma tonelada de cimento (Tabela 14). No cálculo das quantidades foram considerados o empolamento do material e o teor de umidade médio anual, em torno de 20% (18% no verão e 23% no inverno).

Para a situação específica deste trabalho, ao empregar um resíduo caulínico muito distante da planta de cimento, houve uma contribuição expressiva das emissões de CO₂ referente ao transporte por parte dos cimentos LC³, principalmente para aqueles com 60% de substituição de clínquer (LC³35), cujo percentuais de incorporação de argila calcinada variaram entre 30 e 40%. As emissões de CO₂ do LC³35 (2:1) foram três vezes superiores a do CP II F 40. A menor diferença de emissões entre o LC³ e o CP II F foi para o teor de 50% de substituição de clínquer, com a proporção metacaulim:calcário (1:1). Isto porque é o menor percentual de CF empregado nos cimentos LC³ estudados, com cerca de 22,5%.

Os números mostram a importância da proximidade da matéria prima à planta industrial de cimento. E isto fica evidente para o caso do LC³, que necessita não somente da proximidade da jazida de calcário como também dos depósitos de argila caulínica.

Tabela 14 – Emissão de CO₂ (kg/Ton de cimento) referente transporte das matérias primas.

-	Quantidade de matéria prima transportada				Emissão de CO ₂ (kg/ Ton)
	Cimentos	Calcário	Caulim	Minério de Ferro	
CP I 40	1778,40	74,88	15,60	55,2	5,34
CPII F 40	1580,70	55,71	11,61	55,2	4,72
LC3 - 50 - 2:1	1072,94	444,24	7,80	60	11,03
LC3 - 50 - 1,5:1	1108,94	403,56	7,80	60	10,36
LC3 - 50 - 1:1	1162,94	342,54	7,80	60	9,36
LC3 - 35 - 2:1	865,06	568,61	5,46	60	12,89
LC3 - 35 - 1,5:1	913,06	514,37	5,46	60	12,01
LC3 - 35 - 1:1	985,06	433,01	5,46	60	10,67

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNO ROTATIVO

O consumo energético em forno rotativo foi obtido a partir dos dados de demanda energética dos matérias precursores das misturas. A Tabela 15 apresenta os dados do consumo energético do clínquer Portland e metacaulinita MC (materiais de partida) foram fornecidos pela indústria local.

Quanto aos cimentos LC³, adotou-se dados obtidos em laboratório. A perda de massa medida foi de 12,82% no processo de calcinação da argila caulínica. Neste caso, 1,282 toneladas de caulim cru produziram 1 tonelada de metacaulinita.

O cálculo da perda de massa foi ponderado de acordo com os teores de substituição, levando-se em conta a perda de massa de 35,89% do clínquer Portland à temperatura de 1450°C e de 12,82% da calcinação do caulim a 800° C para a obtenção da metacaulinita.

Tabela 15 - Dados para a estimativa do consumo energético durante a clínquerização.

-	PM (%)	kcal/kg	Consumo energético (GJ/Ton clínquer)
Clínquer Portland	35,89	740	3,10
Metacaulim	12,82	450	1,88

Fonte: Autoria própria.

A partir destes dados foi possível estimar a demanda energética (DE_{LC^3} , em GJ Ton^{-1} cimento) da produção dos LC^3 em comparação ao Portland comum e composto, aplicando a Equação 6. Os valores das demandas energéticas dos cimentos de referência e produzidos em laboratório são apresentados comparativamente na Tabela 16.

Tabela 16 – Demanda Energética para calcinação.

Cimentos	Consumo Energético		
	Consumo energético (GJ/t cimento)	Redução CP II F ou LC^3/CPI (%)	Redução $LC^3/CPII F 40$ (%)
Portland	2,96	-	-
CPII F 40	2,31	22,0%	-
LC3 - 50 - 2:1	2,11	28,5%	8,3%
LC3 - 50 - 1,5:1	2,06	30,4%	10,8%
LC3 - 50 - 1:1	1,97	33,3%	14,5%
LC3 - 35 - 2:1	1,84	37,9%	20,4%
LC3 - 35 - 1,5:1	1,76	40,4%	23,6%
LC3 - 35 - 1:1	1,65	44,2%	28,5%

Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma considerável redução na demanda energética dos LC^3 em relação aos cimentos CPI 40 e ao CPII F 40. No caso do cimento Portland comum, isento de adições, os percentuais de redução na demanda de energia dos LC^3 50 e 35 foram de 30% e 40%, respectivamente. Ao passo que em relação ao CP II F, a redução foi menor, cerca de 10% e 25%. Cabe destacar que estas reduções no consumo energético são bastante significativas, uma vez que o aquecimento direto (clínquerização) corresponde a cerca de 79% do consumo energético da indústria cimenteira no Brasil (BAJAY, 2009).

As reduções não guardam uma linearidade com o percentual de substituição, ou melhor, com o fator clínquer. Nos LC^3 50, cujo percentual de substituição de clínquer foi de 45%, foram alcançadas apenas mitigações entre 28 e 33%; enquanto que no LC^3 35,

com 60% de substituição, as reduções na demanda de energia ficaram entre 37% e 44%. Isto ocorre porque os LC³ são cimentos que empregam argila calcinada como uma das adições minerais, que ao contrário da escória de alto forno (EAF), da cinza volante (CV), do fíler calcário, pozolanas naturais entre outras, necessitam de ativação térmica para sua fabricação, o que demanda energia e combustíveis. Apesar de não ocorrer a descarbonatação na queima das argilas, demandam a queima de combustíveis que representa cerca de 50 a 70% da energia requerida para a calcinação do clínquer. Por esta razão, seu efeito atenuador na demanda de energia é menor em relação às outras pozolanas e não é proporcional ao seu potencial de substituição de clínquer, além de exigir investimentos em máquinas e equipamentos.

Diante dos dados, composições de LC³ que empreguem maiores percentuais de argila calcinada em prol do calcário, apesar de apresentarem o melhor desempenho mecânico entre outras melhorias nas propriedades dos concreto, deveriam ser preteridas ou melhor avaliadas por outras misturas com maior quantidade de calcário incorporado, desde que estas mantenham desempenho satisfatório. O que foi o caso dos LC³50 (1:1) e LC³35 (1:1), que além de apresentarem as menores demandas de energia para os dois níveis de substituições analisados, também alcançaram resistências mecânica iniciais e finais satisfatórias e dentro das exigências de cada segmento da Construção Civil.

Os resultados aqui então apresentados vão de encontro ao que literatura recomenda, que são LC³50 com proporção argila calcinada:calcário de 2:1, sem a necessidade de emprego de argilas caulinitas com teor de caulinita acima de 65%, com vistas a reduzir os custos de aquisição com as argilas e, conseqüentemente, o de produção do cimento (SCRIVENER, 2014). No caso da Amazônia, que possuem ampla disponibilidade de argilas ricas em caulinita, de origem secundária, a diferença se deve justamente ao emprego destas, que produziram um metacaulinita de alta reatividade, permitindo desta forma maiores incorporações de calcário sem que haja perdas significativas ou importantes nas resistências iniciais e finais.

4.3.3 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂

Para as estimativas das emissões da farinha precursora para o clínquer Portland, foram usadas as Equações 4 e 5. A quantidade de CaO utilizada na Equação 4 foi de 64,4%, valor corrigido em função da perda de massa obtida na FRX (Tabela 5) que

apresenta a composição completa de óxidos do clínquer Portland produzido a partir da farinha Portland.

As mesmas equações foram utilizadas para o cálculo das emissões do processo de clínquerização nos LC³ produzidos, sendo utilizada a quantidade proporcional de CaO% aos teores de substituição incorporados, que serviram de base para os cálculos realizados. As quantidades de CO₂ decorrentes da reação química de decomposição CaCO₃ provenientes das Equações 4 e 5 são apresentadas na Tabela 17.

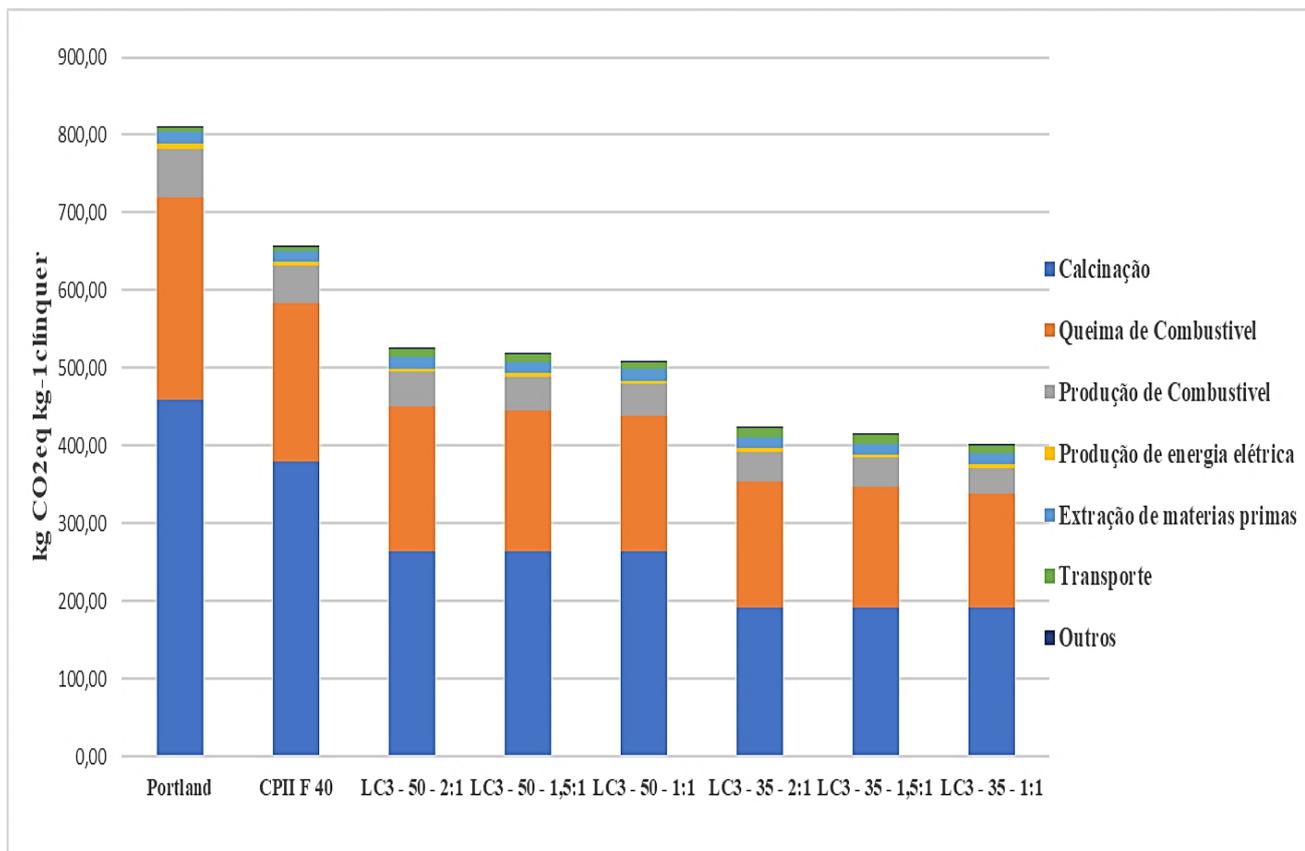
Tabela 17 – Emissão de CO₂ (Kg/Ton cimento) oriundas da reação química de descarbonatação da calcita.

Reação Química – Calcinação (CaCO₃ ⇌ CaO + CO₂)				
Cimentos	Ct	CaO %	Adições %	Emissões CO₂ (Kg/Ton) Clínquer
Portland	0,07483	64,4	-	459,59
CPII F 40	-	-	21	380,59
LC3 - 50 - 2:1	-	-	50	264,97
LC3 - 50 - 1,5:1	-	-	50	264,97
LC3 - 50 - 1:1	-	-	50	264,97
LC3 - 35 - 2:1	-	-	65	192,70
LC3 - 35 - 1,5:1	-	-	65	192,70
LC3 - 35 - 1:1	-	-	65	192,70

Fonte: Autoria própria.

Em paralelo aos estudos realizados em laboratório, foi desenvolvida a ACV do clínquer Portland brasileiro a partir de estimativas da indústria nacional (BAJAY, 2009) e de bases de dados consagradas internacionalmente (ECOINVENT..., 2014). A partir dessa análise, foi possível estimar a pegada de carbono do cimento Portland (CPI) produzido no Brasil. De posse dos dados comparativos para os cimentos LC³ obtidos em laboratório, do cimento Portland comum (CP I 40) e do composto (CPII F 40), mostrados nas Tabelas 14, 16 e 17, foram determinados os dados referentes à pegada de carbono dos cimentos LC³, extrapolando os dados obtidos para o cimento Portland comum e composto (Tabela 18). A Figura 49 mostra as emissões de CO₂ de cada um dos cimentos avaliados, discriminando a parcela que cada etapa do processo contribui, outros consumos energéticos da indústria, tais como para iluminação e calor de processo, foram mantidos constantes na análise.

Figura 49 - As emissões de CO₂ de cada etapa do processo de produção dos cimentos avaliados.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Resultados da pegada de carbono dos cimentos avaliados.

Resultados da pegada de carbono dos clínqueres avaliados (kg CO ₂ eq Tn-1cimento)								
Cimentos	Calcinação	Queima de Combustível	Produção de Combustível	Transporte	Resto CV	Total	Redução LC ³ /CPI (%)	Redução LC ³ /CII F 40 (%)
Portland	459,59	260,53	61,12	23,41	5,34	809,99	-	-
CII F 40	380,59	203,18	47,66	20,78	4,72	656,93	18,9%	-
LC3 - 50 - 2:1	264,97	186,37	43,69	19,70	11,03	525,75	35,1%	20,0%
LC3 - 50 - 1,5:1	264,97	181,39	42,52	19,63	10,36	518,86	35,9%	21,0%
LC3 - 50 - 1:1	264,97	173,91	40,77	19,63	9,36	508,64	37,2%	22,6%
LC3 - 35 - 2:1	192,70	162,01	37,96	19,05	12,89	424,61	47,6%	35,4%
LC3 - 35 - 1,5:1	192,70	155,37	36,41	19,01	12,00	415,50	48,7%	36,8%
LC3 - 35 - 1:1	192,70	145,40	34,08	18,96	10,67	401,82	50,4%	38,8%

Fonte: Autoria própria.

Os cimentos LC³ apresentaram expressivas reduções nas emissões de CO₂. Em comparação com o cimento Portland composto, atual estágio tecnológico do cimento produzido na região amazônica, as reduções para os cimentos LC³50, com 45% de substituição de clínquer, variaram entre 20 e 22%, conforme a proporção entre MC e calcário; e de 35 a 38% para níveis de substituição de clínquer de 60% (LC³35).

As reduções são significativas, mas em menor escala do que se fossem empregadas outras adições minerais como a EAF e a CV. Embora a maior parcela das emissões de CO₂ se deve à descarbonatação da calcita, a parcela da combustão também é expressiva, e para o caso das argilas correspondem entre 50 e 70% do combustível empregado na produção do clínquer segundo dados da indústria local.

Para ilustrar o impacto da queima das argilas calcinadas nos LC³, compara-se o percentual das duas parcelas mais significativas: a descarbonatação e a queima de combustível para cada um dos cimentos (Figura 49). Para os cimentos Portland comum e composto, a descarbonatação da calcita e a queima de combustíveis correspondem respectivamente a 58 e 38% do total das emissões de CO₂. Ao passo que nos LC³, a medida que se aumenta a substituição de clínquer e o percentual de calcário, estas proporções chegam a praticamente se igualarem. No LC³35, a descarbonatação corresponde a 47% e a queima de combustíveis à 45%.

Em termos absolutos, as emissões dos LC³50 e LC³35 foram em média 520 e 415 kgCO₂/ton cimento, respectivamente. Segundo o *RoadMap* Tecnológico do Cimento, publicado em 2019 pela ABCP e pelo SNIC (SNIC, 2019), as metas para redução das emissões de CO₂ por parte da indústria nacional de cimentos com vistas a alcançar patamares que limitem o aumento da temperatura global em até 2 °C a longo prazo deverão ser reduzidas a 480, 410 e 380 kgCO₂/ton cimento nos anos de 2030, 2040 e 2050, respectivamente (Tabela 19).

Tabela 19 - Indicadores-chave para a indústria brasileira de cimento até 2050.

	2°C					6°C			
	2014	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Produção de Cimento [Mt]	71	62	87	126	117	62	87	126	117
Fator Clínquer [relação clínquer/cimento]	0,67	0,66	0,59	0,54	0,52	0,67	0,67	0,67	0,67
Intensidade Térmica [GJ/t clínquer]	3,5	3,49	3,47	3,38	3,22	3,5	3,49	3,46	3,44
Intensidade Térmica [kWh/t cimento]	113	110	106	95	91	111	108	101	99
Combustíveis Alternativos [% de substituição térmica]	15%	22%	35%	45%	55%	15%	15%	15%	15%
CCUS [Mt CO ₂ /ano]	-	-	-	1,7	3,3	-	-	-	-
Emissão Bruta [Mt CO ₂ /ano]	40	34	42	52	44	35	49	71	66
Emissão Específica [t CO ₂ /t cimento]	0,56	0,53	0,48	0,41	0,38	0,56	0,56	0,56	0,56

Fonte: ADAPTADO (SNIC, 2019).

Admitindo-se, com base nos resultados de resistências mecânicas, de demanda energética e das emissões de CO₂ obtidas neste trabalho, um cenário hipotético em que se empregaria o LC³50 (1:1) para o segmento industrializado, no caso 34% do volume de produção, e o LC³35 (1:1) para o segmento de obras de autoconstrução, que corresponde a 66% do mercado. A média ponderada das emissões de CO₂ deste cenário seria de 433 kgCO₂/t cimento, o que atenderia a meta até o ano de 2040. É possível alcançar aos parâmetros estabelecidos para 2050 já a curto prazo, através do uso simultâneo do LC³ e combustíveis alternativos, visto que as biomassas, cuja emissão de CO₂ seriam consideradas nulas, tendo em vista o balanço entre o carbono emitido pela biomassa removida e o carbono absorvido durante o crescimento de novas plantas (ICPP, 1996). A combinação da biomassa e dos LC³ poderia proporcionar o atendimento à meta da indústria de cimento na região amazônica (região Norte), tendo em vista que o estado do Pará é responsável por mais de 50% da produção de cimento na Amazônia (SNIC, 2019) e possui grande potencial de emprego de biomassa e da ampla disponibilidade de argilas cauliniticas de elevada pureza (caulinita > 85%).

Uma outra possibilidade seria o emprego de pozolanas naturais disponíveis na região, que são mais raras e de ocorrência localizada. Um outra possibilidade bastante promissora seria através da mecanoativação das caulinitas (JUHASZ, ZOLTAN, 1979;

JUSTNES *et al*, 2004; SOURI *et al*, 2015, SUZUKI, 2017), tendo vista o alto grau de defeitos na estrutura cristalina de algumas argilas da região e o baixo fator de emissão de CO₂ da matriz energética brasileira, baseada majoritariamente em hidrelétricas. Esta alternativa tecnológica é promissora principalmente quando as indústrias implantarem o sistema de co-geração de energia através da recuperação o calor dos resfriadores, moinhos verticais e de equipamentos de *Waste Heat Recovery* (WHR), com potencial de economia elétrica entre 20 e 30% (SNIC, 2019).

Outro parâmetro estabelecido como meta no *RoadMap* é a redução do fator clínquer de 0,67 para 0,52 em 2050. Este indicador é muito utilizado em ligantes com o emprego de EAF, CV, pozolanas naturais, entre outras, que por serem resíduos industriais ou não necessitarem de queima, são consideradas adições minerais de emissão “zero”, o que reduz substancialmente o fator clínquer, pois não são contabilizadas como ligantes. Contudo, para o caso do LC³, o fator clínquer não reflete as particularidades do uso de argilas calcinadas combinadas com calcário, tendo em vista que esta pozolana emite CO₂ de forma significativa mas não nas mesmas proporções que o clínquer. Além disto, as argilas calcinadas em conjunto com o calcário interagem quimicamente, aumentando a eficiência do ligante sem que o fíler calcário seja contabilizado no fato clínquer.

Para avaliar de forma mais objetiva a eficiência dos ligantes LC³, além do fator clínquer, adotou-se dois indicadores relacionados à eficiência do ligante e ao aquecimento global, desenvolvidos por Daminelli (2013). O Indicador de CO₂ (IC_{rc}) e o Intensidade de Ligante (IL_{rc}), ambos associados à resistência à compressão aos 28 dias. O objetivo foi avaliar comparativamente a eficiência dos LC³ e dos cimentos de referência através da análise em conjunto destes dois indicadores, de modo a fornecer mais um subsidio na escolha dos cimentos mais adequados do ponto de vista da ecoeficiência.

A Tabela 20 mostra os indicadores obtidos com os cimentos LC³ e com os cimentos Portland comum e composto, além dos fatores clínquer. Neste trabalho, para o cálculo do ligante no fator clínquer e nos indicadores dos LC³ aplicou-se um fator de correção de 0,28 ao percentual de argila calcinada de cada cimento (Tabela 4). Este fator deriva da premissa de que a combustão dos combustíveis no clínquer representa 40% do total das emissões (Figura 49), visto que não há parcela de descarbonatação e a queima das argilas calcinadas consome apenas 70% desta energia (70% versus 40%). A análise em conjunto do IL_{rc} e do IC_{rc} permite uma abordagem mais ampla da eficiência do uso

do cimento do que o fator clínquer. A Intensidade de ligantes avalia a eficiência do ligante e a Intensidade de CO₂ avalia o potencial de aquecimento global da mistura.

Tabela 20 - Indicadores de eficiência dos LC³ e o fator clínquer.

Ligantes	ILrc (kg.m ⁻³ /MPa)	ICrc (kg.m ⁻³ /MPa)	Fator clínquer
Portland	12,33	10,16	0,95
CPII F 40	8,66	7,80	0,74
LC3 - 50 - 2:1	5,23	4,90	0,58
LC3 - 50 - 1,5:1	5,59	5,25	0,57
LC3 - 50 - 1:1	5,88	5,54	0,56
LC3 - 35 - 2:1	5,30	5,15	0,46
LC3 - 35 - 1,5:1	5,39	5,26	0,45
LC3 - 35 - 1:1	5,60	5,55	0,43

Fonte: Autoria própria.

Ao se observar os números do fator clínquer dos cimentos LC³ e compara-los com a meta estabelecida no relatório *RoadMap* (SNIC, 2019), conclui-se que para alcançar os parâmetros estabelecidos entre 2030 e 2040 bastaria empregar os LC³50, variando ao longo dos anos mudanças gradativas entre as proporções de MC e calcário. A partir de 2040 seria necessário o emprego dos LC³ 35.

Quando esta análise é realizada a partir dos ICrc e ILrc, constata-se que não há praticamente diferenças entre os LC³, seja com 45% ou 60% de substituições de clínquer LC³ 50 e LC³ 35, respectivamente, diferentemente do que aponta o fator clínquer. Os números expressam a alta eficiência destes ligantes e do seu grande potencial de redução no aquecimento global em relação ao cimento composto com fíler calcário, que é o *benchmark* atual. O ILrc do CP II F foi de 8,7 kg.m⁻³/MPa, enquadrando-se no intervalo de 7 a 14 kg.m⁻³/MPa, com valor médio de 10 kg.m⁻³/MPa para os concretos produzidos comercialmente no Brasil. Ao passo que os LC³, os ILrc ficaram entre 5,23 e 5,88 kg.m⁻³/MPa, considerado por Daminelli (2013) como uma meta realista para concretos de resistências ordinárias (até 50MPa) em um futuro não distante. Quanto ao ICrc, os valores também foram reduzidos, variando entre 4,90 kg.m⁻³/MPa para o LC³50 (2:1) e 5,55 kg.m⁻³/MPa para o LC³35 (1:1).

Daminelli *et al.* (2010) afirmam que baixos ICrc, na ordem de 1,5 kg.m⁻³/MPa, somente são obtidos para resistências acima de 50MPa, combinadas com altos ILrc, ou

seja, com altas substituições de EAF ou CV, fato este que é limitado pela disponibilidade regional destas adições e não se configura como uma solução global, principalmente na Amazônia, região norte do Brasil, em que não há siderúrgicas nem termoelétricas. A condição ideal seria um baixo ICrc associado a um baixo ILrc, que, segundo os autores da metodologia, somente poderia ser alcançado com altas substituições de clínquer e pela otimização da mistura, o que dificilmente é praticado pelo segmento da autoconstrução, que representa 70% do mercado nacional.

No caso deste trabalho, os baixos valores obtidos tanto de ILrc e ICrc foi uma condição excelente na redução da pegada de carbono. Este desempenho foi alcançado devido à alta eficiência proporcionada pela mistura entre a argila calcinada e o calcário. A combinação das duas adições, uma ativa e outra inerte, ocasiona um efeito sinérgico mais intenso do que se ambas fossem empregadas isoladamente no sistema binário com cimento Portland, o que atenua o efeito da queima de combustíveis da argila calcinada e não contabiliza o calcário como ligante, permitindo a redução do fator clínquer. E essa condição foi ainda mais favorecida na pesquisa por causa da alta qualidade das matérias-primas, possibilitando que os LC³ com a proporção maiores de calcário, no caso 1:1 de MC e calcário, apresentassem resultados excelentes em termos ambientais e de resistência mecânica.

Os resultados dos indicadores mostram que é praticamente indiferente empregar 45% ou 60% de substituição de clínquer ou proporções MC: calcário de 2:1 ou 1:1. Todavia, a análise não se resume apenas aos números apontados pelos indicadores. É necessária uma avaliação mais ampla, envolvendo os critérios de resistência mecânica, da pegada de carbono e uma análise econômica da produção. Neste último caso, a análise deve ser desmembrada em dois segmentos: o industrial e de autoconstrução.

Do ponto de vista econômico, levando-se em consideração tanto o custo de implantação quanto o de operação, é muito mais interessante reduzir o percentual de argila calcinada na linha produção, com vistas a redução do consumo de combustível, da diminuição das operações de processamento e queima e do volume de produção diária de pozolana, todos intimamente relacionados ao dimensionamento e aquisição dos equipamentos necessários para queima e moagem das argilas. A operação de processamento do filer calcário é muito menos complexa e dispendiosa do que da pozolana, que envolve calcinação. Como não há diferenças de eficiência entre os ligantes,

a escolha dever recair sobre os LC³ com menor proporção entre MC e calcário, ou seja, 1:1.

Quanto a maior ou menor substituição de clínquer, no que tange aos aspectos econômicos e relativos à cadeia da construção, em que pese não haver diferenças entre os ligantes quanto aos indicadores, um parâmetro importante para contribuir na escolha são as resistências iniciais. No segmento industrializado, o LC³ 50 (1:1) apresenta a melhor relação custo/benefício porque além de apresentar resistências iniciais compatíveis com o que já é disponível no mercado hoje, o CP II F; possui baixas emissões de CO₂, com bons números para os indicadores ICrc e ILrc. O outro segmento, o da autoconstrução, as exigências quanto às resistências iniciais não são tão rigorosas. Além disto, não há um aproveitamento integral da eficiência do ligante, pois inexistente um controle de produção, e conseqüentemente, não há uma otimização no consumo de cimento por metro cúbico de argamassa ou concreto. Por esta razão é imprescindível que a escolha não recaia sobre o ligante de maior eficiência (LC³ 50 2:1), mas sim sobre o cimento com menor emissão de CO₂ em termos absolutos, que no caso é o LC³ 35 (1:1). Não haverá uma otimização do consumo neste segmento para tirar proveito da maior eficiência do ligante. O LC³ 35 (1:1) apresenta-se como uma escolha excelente, pois, além do baixo impacto ambiental, apresenta excelentes indicadores de ecoeficiência e resistências iniciais e finais compatíveis com as exigências deste mercado.

Em suma, levando-se em consideração aspectos como o tempo de pega, finura, resistência à compressão, demanda energética na calcinação, emissões de CO₂, indicadores de ecoeficiência e análise diferenciada por tipo de segmento da Construção, pode-se afirmar que os cimentos LC³ com 45% de substituição de clínquer, com as mesmas proporções de MC e calcário (LC³ 50 1:1), são os mais adequados para atender ao segmento industrializado da Construção; ao passo que o LC³ com 60% de substituição de clínquer, também com as mesmas proporções de MC e calcário (LC³ 35 1:1), ao segmento da autoconstrução. Obviamente que uma análise econômica mais detalhada deve ser realizada, contemplado aspectos relacionados ao investimento a ser aplicado, o retorno de capital, os custos operacionais, a logística, a disponibilidade, distância e qualidade das jazidas, a viabilidade econômica do emprego dos resíduos caulíníficos entre outros aspectos não contemplados neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

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

Os cimentos LC³ apresentaram reduções significativas nas emissões de CO₂ e na demanda de energia, sem que houvesse perda de desempenho ou eficiência do ligante. A alta qualidade dos materiais empregados para a produção da mistura de argila calcinada e calcário foram responsáveis pela produção de cimentos LC³ com características iguais ou superiores ao cimento empregado em escala comercial.

Os diferentes tipos de cimentos LC³ produzidos na pesquisa se mostraram adequados aos distintos segmentos da Construção Civil. Os cimentos LC³-50 apresentaram características mecânicas, principalmente no que tange às resistências iniciais, satisfatórias para atender ao segmento industrializado da Construção, ao passo que o LC³-35, mostrou-se mais adequado para o mercado da autoconstrução pois, apesar do desenvolvimento de resistência mais lento e menor que o do industrial, ainda assim atingiu patamares de resistência suficientes para este segmento.

Os cimentos LC³50 apresentaram resistências iniciais e finais superiores ao cimento Portland composto com adição de fíler, entre 10 a 31% superiores. O cimento LC³50 (2:1), como era esperado, foi o que apresentou as maiores resistências à compressão devido a proporção de MC:calcário ser a ideal do ponto de vista estequiométrico para formar monocarboaluminatos e C-A-S-H em maiores quantidades.

Os cimentos LC³35, por apresentarem percentuais elevados de substituição de clínquer (60%), não apresentaram resistências mecânicas iniciais que ultrapassassem às obtidas com os cimentos comum e compostos, mas não foram desprezíveis, ficaram entre 75 e 100%. Os ganhos de resistências foram mais expressivos para as idades mais avançadas, alcançando entre 39 e 42 MPa aos 28 dias e 43 e 48 MPa aos 91 dias.

A luminosidade ou alvura dos cimentos LC³ se mostra representativa, estando o ΔL médio dos cimentos produzidos em 17 pontos positivos na escala CIALAB 2000

relação ao CPI 40 e 13,4 pontos para o CII F 40. O que em outras palavras, quer dizer que o cimento está mais claro (classificação do programa). Demonstrando como esperado, um grande potencial para a aplicação destes cimentos com a adição de pigmentos.

Em termos de mitigação das emissões de CO₂, os LC³ reduziram em cerca de 20 a 38% em relação ao cimento com 21% de incorporação de fíler calcário, *benchmark* do mercado. Em termos de demanda de energia, por conta da necessidade de calcinação da argila, as reduções foram menores, entre 8 e 28%. As maiores mitigações foram alcançadas com os ligantes com a proporção em que iguala as quantidades de argila calcinada e calcário, LC³50 (1:1) e LC³35(1:1).

Em termos de ecoeficiência, aplicando a metodologia de Daminelli (2013), constatou-se que apesar das diferenças nas resistências e nas emissões de CO₂, os diferentes ligantes LC³ apresentaram os mesmos indicadores, independentemente do percentual de substituição de clínquer ou da proporção MC:calcário. Ou seja, possuem a mesma ecoeficiência para alcançar uma determinada resistência à compressão.

Estes resultados diferem do que é recomendado e pesquisado exaustivamente internacionalmente. O que é extremamente positivo, pois vislumbra a possibilidade de emprego de maior quantidade de calcário no cimento, trazendo benefícios relacionados não somente aos aspectos ambientais, como também de investimento em equipamentos, logística, redução na quantidade de combustível e de argila calcinada e, por fim, atenuação dos custos de produção.

As misturas de LC³ com proporções maiores de calcário, no caso 1:1, tanto com 45% como 65% de substituição do clínquer, apresentaram em termos absolutos os melhores resultados de redução de emissão de CO₂ e de demanda de energia de clinquerização sem apresentar perdas de resistências inicial e final expressivas, além de superarem o desempenho alcançado pelo cimento com fíler calcário. Em números relativos, os indicadores de Intensidade de Ligante e de Intensidade de CO₂ dos compósitos cimentícios produzidos com LC³, independentemente do percentual de substituição e da proporção MC:calcário, ficaram próximos de 5kg.m⁻³ (ligante ou CO₂)/MPa, número considerado eficiente em comparação à média dos concretos produzidos no Brasil.

O LC³ 50 (1:1), por seu desempenho mecânico nas idades iniciais e finais, por sua redução nas emissões de CO₂ e por sua eficiência, mostrou-se mais adequado ao segmento da construção industrializada. O LC³ 35 (1:1) mostrou-se mais oportuno para o segmento da autoconstrução, principalmente por causa das baixas emissões de CO₂, cerca de 300 kg/ton cimento.

São necessários estudos mais aprofundados sobre a reologia e a finura destes cimentos, pois neste trabalho foram observadas maiores demandas de água e de aditivo superplastificante, além de reduções significativas no tempo de pega. Também são imprescindíveis estudos de sua viabilidade econômica tendo em vista a necessidade de se calcinar a argila e da distância dos depósitos à fábrica de cimento. Devem ser levados em consideração diversos aspectos como a distância e qualidade das matérias primas e, principalmente, a sinergia do emprego destes tipos de cimentos com as diferentes ações relacionadas à eficiência energética e ao emprego de combustíveis fósseis, que podem até inviabilizar, ou colocar restrições de matérias primas, ou até mesmo torna-los menos atrativos.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A indústria do cimento é uma das principais responsáveis pelo lançamento de dióxido de carbono para a atmosfera, seja pela descarbonatação da sua principal matéria-prima, seja pelo uso de combustíveis fósseis. Agentes financiadores já avaliam o papel dessas indústrias sob uma nova ótica, o que as induzirão cada vez mais pela busca por soluções alternativas ou que minimizem o impacto causado. A tendência das pesquisas na indústria do cimento e, conseqüentemente do concreto, será pelo emprego cada vez maior de adições minerais associadas ao uso de combustíveis alternativos, maior eficiência energética e ambiental e concretos e argamassas com maior durabilidade frente aos agentes agressivos. Portanto, é dentro desse contexto que se propõe a realizações de alguns estudos com os LC³:

- Investigar as propriedades dos LC³ com argilas em um raio de 150 km das fábricas de cimento, juntamente com a análise do ciclo de vida com vistas ao potencial de mitigação do aquecimento global;
- Avaliar a viabilidade econômica dos LC³ com o emprego dos resíduos caulínicos e de argilas mais próximas das fábricas de cimento;

- Avalia o efeito sinérgico do emprego da gipsita e da finura dos LC³ sobre as características reológicas das argamassas e concretos;
- Investigar a influência de diferentes finuras dos LC³ sobre as propriedades no estado fresco (tempo de retenção de fluxo, exsudação) e endurecido do concreto (mecânicas, de durabilidade e estabilidade dimensional);
- Avaliar o efeito da cura sobre as propriedades dos concretos e argamassas produzidos com LC³;
- Realizar estudos de reologia com LC³, de modo a otimizar a proporção argila calcinada e filler calcário, em prol do emprego em maior percentual deste último;
- Realizar estudos com o emprego de pozolanas naturais (argilas sem queima) ou mecanoquimicamente ativadas ou a junção destas com vistas a redução do impacto ambiental proveniente da queima das argilas;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16.372:Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16.605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

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

AGOPYAN, V.; JOHN, V. O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. São Paulo: Blucher, 2011.

ALUJAS, A. R. FERNÁNDEZ, R. QUINTANA, K.L. SCRIVENER, F. Martirena Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. Applied Clay Science Volume 108, May 2015, Pages 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>

AMBROISE, J. MARTIN-CALLE, S. PÉRA, J. Pozzolanic behavior of thermally activated kaolin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA

FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE. 4. 1992. Istanbul. Turkey. V. 2. P. 731-748.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone.** Tese de Doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2013. 223 p.

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

AVENT, F. SNELLINGS, R. ALUJAS, A. MOHSEN, B. SCRIVENER, K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R^3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* Volume 85, July 2016, Pages 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>.

AVET, F.; SCRIVENER, K.L. (2018) Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC^3). *Cement and Concrete Research*. Vol. 107, pp. 124-135.

AZEREDO, A.F.N., STRUBLE, L.J., CARNEIRO, A.M.P., 2015. Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. *Mater. Struct.* 48, 2123e2132. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0297-4>.

BAJAY, S. V. Relatório Setorial: setor cimenteiro. In: DORILEO, I. L. D. (Coord.). *Oportunidades de Eficiência Energética Para Indústria*. Brasília: CNI, 2009.

BARATA, M.S. Aproveitamento dos resíduos caulínicos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas). Programa de pós-graduação em geologia e geoquímica – Tese de Doutorado. 47-172, 2007.

BARATA, M.S., ANGÉLICA, R.S., 2011. Pozzolanic activity of kaolin wastes from kaolin mining industry from the Amazon region. *Matéria* 16, 795e810.

BARATA, M.S., ANGÉLICA, R.S., 2012. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. *Cerâmica* 58, 36e42.

BATTAGIN, A. As adições como substitutos do clínquer no contexto do Projeto Cement Technology Roadmap 2050. 7º Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo. 2016.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. Disponível em: <www.abcp.com.br>. 2009. Acessado em: 17 out. 2019.

BENHELAL, E. et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of cleaner production*, v. 51, p. 142-161, 2013.

BERRIEL SANCHEZ, S.; FAVIER, A.; ROSA DOMINGUEZ, E.; SANCHEZ MACHADO, I.R.; HEIERLI, U.; SCRIVENER, K.L.; MARTINERA HERNÁNDEZ, F.;

HABERT, G. (2016) Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, Vol.124, pp. 361-369.

BISHNOI, S. MAITY, S. MALLIK, A. JOSEPH, S. KRISNNAN, S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience. *The Indian Concrete Journal* July 2014. *Indian Concr. J.*, 88 (7) (2014), pp. 22-28

BISWAS, W. K. Carbon Footprint and Embodied Energy Assessment of a Civil Works Program in a Residential Estate of Western Australia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 4, p. 732-744, apr.2013.

BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F.; IRASSAR, E. F. **Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements.** *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 6, p. 853-859, 2001.

BÖSCH, M. E. *et al.* Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 3, p. 181-190, 2007.

BOVEA, M. D.; GALLARDO, A. The Influence of Impact Assessment Methods on Materials Selection For eco-Design. *Materials & Design*, v. 27, n. 3, p. 209-215, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2006.** Brasília, DF, 2006. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2006> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2007.** Brasília, DF, 2007. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2007> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2008.** Brasília, DF, 2008. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2008> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2009.** Brasília, DF, 2009. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2009> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2010.** Brasília, DF, 2010. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/arquivos/anuario-mineral-brasileiro-2010> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Estadual - Pará 2015.** Brasília, DF, 2015. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral-estadual/pa2015/view> > Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Estadual - Pará 2016**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/para/anuario-mineral-estadual-para-2016-ano-base-2015/view>> Acesso em: 10 ago. 2019;

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

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2011**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2011>> Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2012**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2012>> Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2013>> Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2014**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>> Acesso em: 10 ago. 2019;

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Programa Brasileiro da qualidade e produtividade do habitat. Diretriz SiNAT nº 006 - revisão 01 - Argamassa inorgânica decorativa para revestimentos monocamada. Brasília, novembro de 2016. Disponível em <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php>. Acesso: 02 de fevereiro de 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, N. Resolução nº 01, de 6 de abril de 2011, que dispõe sobre a Aprovação do Regimento Interno e da composição do Comitê Gestor do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Brasília: 2011.

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

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012. Watford: BRE, 2013.

Bureau of Indian Standards (2013), pp. 1-17

CANCIO DIAZ, Y.; SÁNCHEZ BERRIEL, S.; HEIERLI, U.; FAVIER, A.R.; SÁNCHEZ MACHADO, R.; SCRIVENER, K.L.; HERNÁNDEZ, J.F.M.; HABERT, G.

(2017) Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Development Engineering*. Vol. 2, pp. 82-91.

CARVALHO, J. Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 104 p. 2002.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** *Cerâmica*, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT. Activity Report 2015. (2015) Disponível em: < http://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport_cembureau.pdf>. Acessado em: maio. 2018.

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT. The role of cement in the 2050 low carbono economy. (2013) Disponível em: < <http://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/uploads/Modules/MCMedias/1380546575335/cembureau---full-report.pdf>>. Acessado em: maio. 2018

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT. The role of cement in the 2050 low carbono economy. (2013) Disponível em: < <http://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/uploads/Modules/MCMedias/1380546575335/ce mbureau---full-report.pdf>>. Acessado em: 30 abr. 2017

CEMBUREAU (2014). Activity Report, pp. 44.

CEMBUREAU 2015, Relatório de Atividades Bruxelas <http://www.cembureau.be/sites/default/files/AR2015.pdf> (2016)

CEMBUREAU World Statistical Review 1996–2008 Produção de Cimento, Comércio, Dados de Consumo Associação Europeia do Cimento, Bruxelas (010)

COLTRO, L. Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

COSTA, A, APPLETON, J., "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration", *Materials and Structures*, v. 32, pp. 252-259. May. 1999.

COSTA, A, APPLETON, J., "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part II: Prediction of long term chloride penetration", *Materials and Structures*, v. 32, pp. 354-359 June. 1999.

COSTA, B. L. C. Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil. Dissertação de Mestrado – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, E. B. *et al.* Clínquer Portland Com Reduzido Impacto Ambiental. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86, abr./jun. 2013.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars: quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration.** Cement and concrete research, v. 35, n. 4, p. 719-730, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais.** In: G. C. Isaia, Ed., Concreto: ciência e tecnologia, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

DAMIDOT, D. et al. **Thermodynamic sand cement science.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 679-695, 2011.

DAMINELLI, B. L. Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. Tese de Doutorado – Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2013. 237 p.

DAMINELLI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites, n. 32, p. 555-562, 2010.

DAMTOFT, J. S. et al. Sustainable development and climate change initiatives. Cement and concrete research, v. 38, n. 2, p. 115-127, 2008.

DE LIMA, A. B. O processo produtivo do cimento Portland. Minas Gerais: Monografia de Projeto Final de Curso, Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade de Federal de Minas Gerais, 2011.

DE PAULA, L. G. Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de mistura de resíduos. Minas Gerais: Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2009. 153 p.

DEJA, J. ULIASZ-BOCHENCZYK, A. MOKRZYCKI, E. **CO₂ emissions from Polish cement industry** Int. J. Greenh. Gas Control, 4 (2010), pp. 583-588

DHANDAPANI, Y. SANTHANAM, M. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. Cement and Concrete Composites. Volume 84, November 2017, Pages 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012>

DHANDAPANI, Y. VIGNESH, K. RAJA, T. SANTHANAM M. Development of the Microstructure in LC3 Systems and Its Effect on Concrete Properties. Calcined Clays Sustainable Concrete Processes. 2nd International Conference Calcined Clays Sustainable Concrete (2018), p. 131 – 140 DOI: 10.1007/978-94-024-1207-9_21

DIÁRIOONLINE. Barcarena: Vazamento de caulim atinge rios. Belém, PA, 2016. Disponível em < [Barcarena: Vazamento de caulim atinge rios](#)> Acesso em: 09 set 2019;

DIAS, S.L., GUIMARÃES, I.O., FIGUEIREDO, S.S., BEZERRA, I.M.T., FERREIRA, H.C., NEVES, G.A., 2012. Influence of firing temperature on the pozzolanic activity of kaolin wastes. Mater. Sci. Forum 727e728, 675e680.

DIVISÃO DE POPULAÇÃO DA ONU Perspectivas da População Mundial: A Revisão de 2015 Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas, Nova York (2015).

ECOINVENT CENTRE. **EcoinventDatabase**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Disponível em: <www.ecoinvent.ch>. Acesso em: 10 jan. 2014.

EMMANUEL, A.C. HALDAR, P. S. BISHNOI, S. Maity Second pilot production of Limestone Calcined Clay Cement (LC³) in: The India experience. *Indian Concr. J.*, 90 (2016), pp. 57-64.

FARIAS FILHO, J. de; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. **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, 2000.

FEIZ, R. AMMENBERG, J. BAAS, L. EKLUND, M. HELGSTRAND, A. MARSH ALL R. **Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry** *J. Clean. Prod.* (2014)

FERNÁNDEZ, R. MARTIRENA, F. SCRIVENER, KL. The origin of pozzolanic activity of calcined argilite: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite *Cem. Concr. Res.*, 41 (1) (2011), p. 113-122

FERREIRA, C. J. Concreto colorido produzido a partir de cimento LC³. Qualificação de Mestrado. POS-GRADUACAO EM ARQUITETURA E URBANISMO - UFPA

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

FRÍAS, M., la Villa, R.V., Rojas, M.S., Medina, C., Juan Valdés, A., 2012. Scientific aspects of kaolinite based coal mining wastes in pozzolan/Ca(OH)₂ system. *J. Am. Ceram. Soc.* 95, 386e391. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04985.x>.

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*, 15 de jun. de 2015. 126–142.

GERGELY, J. BLEDSOE, J.E. TEMPEST, B.Q. SZABO, I.F. **Concrete Diffusion Coefficients and Existing Chloride Exposure in North Carolina** 136, North Carolina Dep. Transp. (2006).

GETTU, R., PATEL, A., RATHI, V. *et al.* Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. *Mater Struct* **52**, 10 (2019). <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1321-5>

GLASS, J. *et al.* Future use of Life-Cycle Assessment in Civil Engineering. **Proceedings ICE Construction Materials**, v. 166, n. 4, p. 204-212, 2013.

GOBBI, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2014. p. 134.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, L. Eco-Indicator 99: manual for designers, a damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report, 2000.

GOFFREDO, G. B. Smart surfaces for Architectural Heritage: self-cleaning titanium dioxide nano-coatings on travertine. Extended summary - Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria, Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Itália, 2013.

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

GOMES, A.; PINTO, J.B; PINTO, A.P. Cimento Portland e adições. 2013. Disponível em:<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312271184/Cimento%20Portland%20e%20Adicoes.pdf>>. Acessado em: 15 abril. 2018.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G., Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. Environmental Science & Technology, v. 45, n. 1, 2011, p. 90-96.

GURSEL, A. P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A., Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review: Cement and Concrete Composites, v. 51, 2014, p. 38-48.

HABERT, G.; DE LACAILLERIE, J.D.E.; ROUSSEL, N. (2011) An environmental evaluation of geopolymer based concrete production. Journal of Cleaner Production, Vol.19, N. 11, pp. 1229-1238.

HARTMANN, C.; BENINI, H. Concreto Arquitetônico e Decorativo. In: ISAIA, G.C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v. p.1645-1681.

HASANBEIGI, A.; MENKE, C.; PRICE, L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 15, p. 1509-1518, 2010.

HAWKINGS, P. Tennis, P. Detwiler, R. **The Use of Limestone in Portland cement: a State-of-the-Art Review** Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA (2003).

HELENE, P.R.L., MEDEIROS, M.H.F. Estudo da influência do Metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland (Relatório Técnico). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004, 65 p. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/tecnica/tecnica.htm>> Acesso em 04 jul. 2019.

HENDRIKS, C. A. Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry. Green house gas control Technologies conference paper. California: IEA Green house gas and R&D programme. 2004.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. p. 281.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T.D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, Vol.17, N. 7, pp. 668-675.

I.S. 12269 Ordinary Portland Cement, 53 Grade— Specification

IBICT, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Desenvolvimento sustentável e avaliação do ciclo de vida. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/documentos/publicacoes/>>. Acesso em: maio de 2019.

IEA Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilizando Inovação para Acelerar a Ação Climática, Energy Technol. Perspectiva <http://www.iea.org/etp/etp2015/> (2015), Acessado em julho de 2019 IEA, WBCSD. Cement Technology Roadmap 2009–Carbon emissions reductions up to 2050. 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 14067**: carbon footprint of products: requirements and guidelines for quantification and communication. Geneva, 2013.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. London, 1996. (Reporting Instructions, v.1)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary combustion. Pg. 2.22. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa, Japão. [Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>].

ISAKSSON, R. Process based system models for detecting opportunities and threats—the case of World Cement Production. *International Journal of Quality and Service Sciences*, v. 8, n. 3, p. 246-262, 2016.

ISHANK, S.A. HASHIM, H. 2015. Low carbon measures for cement plant – a review. *J. clean prod.* 103, 260-274.

JOHN, V.M.; OLIVEIRA, D.P.; AGOPYAN, V., Critérios de sustentabilidade para a seleção de materiais e componentes – uma perspectiva de países em desenvolvimento. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, USP, 2008. Disponível em <<http://pcc2540.pcc.usp.br/>>. Acesso em: junho de 2019.

JOLLIET, O. *et al.* IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 8, n. 6, p. 324-330, 2003.

JOSEPH, S.; JOSEPH, A. M.; BISHNOI, S. Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC³) in India. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 501-507.

JOSEPH, Shiju; JOSEPH, Aneeta Mary; BISHNOI, Shashank. Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC³) in India. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 501-507.

JUHÁSZ, A. Zoltán, 24., 1979, Budapest. MECHANO-CHEMICAL ACTIVATION OF KAOLIN MINERALS. Budapest: *Acta Mineralogica-petrographica*, 1979. 25 p.

Disponível em: <http://acta.bibl.u-szeged.hu/24680/1/mineralogica_024_suppl_121-145.pdf>. Acesso em: 4 set. 2019.

JUSTNES, Herald; ELFGREN, Lennart; RONIN, Vladimir. Mechanism for performance of energetically modified cement versus corresponding blended cement. *Cement and Concrete Research*.[s.l.]. v. 35, n. 2. P. 315-323, jun. 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604002145>.

K HUNTER, R.S. Photoelectric color difference meter. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 48, no. 12, pp. 985–993, 1958. In: GOFFREDO, G. B. *Smart surfaces for Architectural Heritage: self-cleaning titanium dioxide nano-coatings on travertine*. 2013. 111 f. Tese (Pós-Doutorado, Curriculum in Architettura, Costruzioni e Strutture) - Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria, Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Itália, 2013.

KAJASTE, R. HURME, M. 2016. Cement industry greenhouse gas emissions e management options and abatement cost. *Journal of Cleaner production* 112, 4041-4052.

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

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

LINS, D. N. Análise de Resistência à Compressão do Cimento LC3 e a influência das adições minerais em seu desempenho, Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2017.

LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.L. (2008) Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, N. 6, pp. 848-860.

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

MADLOOL, N. A. et al. An overview of energy savings measures for cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 18-29, 2013.

MAIA, J. L. BARATA, M. S. CARNEIRO, A. M. P. Produção de Pozolanas de elavada reatividade provenientes da calcinação do resíduo do beneficiamento do caulim em conjunto com o calcário. 47º Congresso Brasileiro do Congresso – CBC2005, 2 a 7 setembro 2005, Olinda. Pp. V. 1060 – V.1075. ISBN 85-98576-07-7

MAITY, Soumen; BISHNOI, Shashank; KUMAR, Arun. Field Application of Limestone-Calcined Clay Cement in India. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 435-441.

MARTINS, A. et al., **Apostila de cimento**. Universidade Federal da Fronteira Sul, 2007. Disponível em: <https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1276.pdf>> Acessado em: out. 2019.

MATSCHEI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F.P. (2007) The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, N. 4, pp. 551-558.

MCLELLAN, B.C.; WILLIAMS, R.P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G.D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, Vol.19, N. 9, pp. 1080-1090.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete. *Special Publication*, v. 121, p. 265-286, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 1ª Edição. São Paulo, IBRACON 2014.

MEISSNER, H. "Pozzolans Used in Mass Concrete," in *Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes*, ed. T. Stanton and R. Blanks (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1950), 16-30. <https://doi.org/10.1520/STP39402S>

MÜLLER, C. PALM, CA GRAUBNER, S. PROSKE, T. HAINER, S. REZVANI, M. NEUFERT, W. I. High limescale, durability and practicality refinements, VDZ https://www.vdz-online.de/fileadmin/grup-pen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/2004_2006/Dauerhaftigkeit_von_Beton_mit_Portlandkalkstein.pdf (2016)

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. Bookman Editora, 2013.

OLIVEIRA, D.P; JOHN, V.M.; AGOPYAN, V., Critérios de sustentabilidade para a seleção de materiais e componentes – uma perspectiva de países em desenvolvimento.

OLIVEIRA, V. C. H. C., et al. Strategies for the minimization of CO₂ emissions from concrete. *Ambiente Construído* 14.4. p. 167-181. 2014.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the Construction Industry: a review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 28-39, 2009.

PASSER, A.; KREINER, H.; MAYDL, P. Assessment of the Environmental Performance of Buildings: a critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 9, p. 1116-1130, 2012.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

PETRUCCI, E. G. R. *Materiais de Construção*. 3ª ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1978.

PILLAI, G. R. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019>. 2018.

QUEIROZ, V. S. Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO₂ na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC3 e o cimento Portland composto [Distrito Federal] 2017. xi, 84 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017) Monografia de Projeto Final-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

RAMOS, M. D. Estudo da Formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento. Tese de Doutorado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2015. p. 124.

RENOULT SOREIRO, E., 2013. Caolim. Departamento Nacional de Produção Mineral (National Department of Mineral Production), Brazil. URL. https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo8973.

RIBEIRO, C. M.; GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta importante da ecologia industrial. Disponível em: <www.hottopos.com/regep12/art4.htm>. Acesso em: junho de 2017.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. de F. C.; SANTO, B. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2011.

ROJAS, M.F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p.133-138, 2002.

SAAD, M.; ANDRADE, W.P.; PAULON, V.A. (1992) Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay. *Concrete International*. Vol. 4, N. 7, pp. 59-65.

SAADE, M. R. M., Influência da alocação de impactos na indústria siderúrgica sobre a avaliação de ciclo de vida de cimentos. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

SAYGIN, D. Assessing industrial energy use and CO₂ emissions: Opportunities for energy efficiency, biomass and CCS. 2012. Tese de Doutorado, Utrecht University. p. 401.

SCHMIDT, T.; LOTHENBACH, B.; ROMER, M.; SCRIVENER, K.L.; RENTSCH, D.; FIGI, R. (2008) A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, N. 3, pp. 337-349.

SCRIVENER K. MARTIRENA F. BISHNOI S. MAITY S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*. Elsevier: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>, 2017.

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

SCRIVENER, K.L (2017) Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.

SCRIVENER, K.L. UN ENVIRONMENT. VANDERLEY M. JOHN. ELLIS M. GARTNER. (2018) Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry Cement and Concrete Research, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

SECCO, P. SOARES, E. BARATA, M. The Use of Red Mud and Kaolin Waste in the Production of a New Building Material: Pozzolanitic Pigment for Colored Concrete and Mortar. ICSOBA Vol. 43, 2018, No.47

SEFF, L. **Efeito da adição de micro e nanossilica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. 2009. p. 183.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO. Produção Nacional. Disponível on-line: <http://www.snic.org.br/f_numeros.html>. Acesso em: 17 jan. 2019.

SNELLINGS, R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials, RILEM Technical Letters, [S.1.], Vol. 1, Aug. 2016, pp. 50-55 ISSN 2518-0231.

SNELLINGS, R. Avaliando, entendendo e desbloqueando materiais cimentícios suplementares. Letras Técnicas RILEM, [SI] vol. 1 (ago. 2016 , p. 50 – 55 ISSN 2518-0231. Disponível em: <<https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/12>>. Data da vi: 20 de outubro de 2016 10.21809 / rilemtechech.2016.12

SNIC - SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO. SNIC - ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. Disponível: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=29>>. Acesso em: abr. 2020.

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

SNIC Relatório Anual 2013–2013 Relatório Anual Sindicato Nacional da Indústria do Cimento / Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Rio de Janeiro (2013) http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf

SOUSA, D. J. L. **Caracterização geológica, mineralógica, química e física do caulim da mina da RCC – Rio Capim Caulim (PA).** 2000. 116 p. Tese (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

SOUZA SANTOS, Pêrsio de. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2ª ed. v.2. São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 461p.

STACHERA, T. J.; CASAGRANDE, E. Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. IX ENGEMA— Encontro Nacional sobre Gestão e Meio Ambiente, Curitiba, 2007.

STANO, L. C. Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta que merece ser mais conhecida. 2008. Disponível em: <<http://www.brasilpnuma.org.br/pordentro/artigos>>. Acesso: maio de 2019.

SUZUKI, S. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Estudo de cimento Portland pozolânico obtido em laboratório com argila caulínica ativada por processos térmico e mecanoquímico. São Paulo, 2017. 186p.

TAYLOR, M.; TAM, C.; GIELEN, D. (2006). Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. Disponível em: http://www.iea.org/work/2006/cement/taylor_background.pdf

TIRONI, A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. **Ternary blended cement with limestone filler and kaolinitic calcined clay**. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 195-201.

TSIVILIS, S.; TSANTILAS, J.; KAKALI, G.; CHANIOTAKIS, E.; SAKELLARIOU, A. (2003) The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol.33, N. 9, pp. 1465-1471.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. *Concreto auto-adensável*. São Paulo: PINI, 2008.

VALDERRAMA, C. *et al.* Implementation of Best Available Techniques in Cement Manufacturing: a life-cycle assessment study. **Journal of Cleaner Production**, v. 25, n. 3, p. 60-67, 2011.

VAN RUIJVEN, B. J. *et al.* Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 112, p. 15-36, 2016.

VISCAÍNO-ANDRÉS, I.; SÁNCHEZ-BERRIEL, S.; DAMAS-CARRERA, S.; PÉREZ-HERNÁNDEZ A.; SCRIVENER, K.L.; FERNANDO, M.H. (2015) Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. *Materials and Construction*. Vol. 65, N. 317.

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

VIZCAÍNO-ANDRÉS, L. SÁNCHEZ-BERRIEL, S. DAMAS-CARRERA, PÉREZ-HERNÁNDEZ, S. SCRIVENER, A. K. M.-H. Fernando. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. *Mater.Constr.*, 65 (317) (2015), 10.3989/mc.2015.00614.

WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. (2009) Minimum cement content requirements: a must or a myth? *Materials and Structures*, Vol.42, N. 7, pp. 973-982.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. A. L. *Methodology, Tools and Case Studies in Product Development: environmental assessment of products*. London: Chapman, 1997.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.10, p.1537-1544, 1996.

WILS, S. KHATIB, J. JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) / International Energy Agency (IEA). *Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon Emissions Reductions up to 2050* (2009). 36p. (CSI Report). Disponível em: <http://wbcsd.org>.

WORLD STEEL ASSOCIATION *World Steel em números de 2015*, em Bruxelas (2015)

WORRELL, E.; KERMELE, K.; GALITSKY, C. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*. 2013.

ZAJAC, M. BREMSETH, SK. WHITEHEAD, M. M. Ben Efeito de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ em assembleias de hidrato e propriedades mecânicas de pastas de cimento hidratadas a 40 °C e 60 °C *Cem. Concr. Res.* 65 (2014), pp. 21

ZAMPIERI, V. A. *Cimento portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1993. 206 p.

ZAMPIERI, V. A. *Cimento Portland Aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: Fabricação, hidratação e desempenho mecânico*. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia. São Paulo, 1993.

ZHANG, S.; WORRELL, E.; CRIJNS-GRAUS, W. Mapping and modeling multiple benefits of energy efficiency and emission mitigation in China's cement industry at the provincial level. *Applied Energy*, v. 155, p. 35-58, 2015.

ZHENGUO SHI. Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements *Cement and Concrete Research*, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.003> 2019.

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

ANEXO I – MEMBROS DO GRUPO REVISORIO E REDADORES DO RELATÓRIO (UNEP-SBCI 2018)

Mark Alexander - University Cape Town, Cape Town, South Africa

Yunus Ballim - University Cape Town, Cape Town, South Africa

Bruce Blair - formerly at Lafarge, USA

Curt Carrigan - UN Environment, Paris, France

Cristiana Ciaraldi - CSI, World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland

Anjan K. Chatterjee - Indian Cement & Concrete Industry, Kolkata, India

Josephine Cheung -GCP Applied Technologies, Cambridge, USA

Philippe Fonta - CSI, World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland

Ravindra Gettu - Indian Institute of Technology, Madras, India

Jacob Halcomb - UN Environment, Paris, France

Arpad Horvath - University of California Berkeley, USA

Edgardo Fabián Irassar - Universidad Nacional del Centro de Buenos Aires, Olavarría, Argentina

Fernando Martirena - Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba

Sabbie Miller - University of California Davis, USA

Sergio Almeida Pacca - University of São Paulo, São Paulo, Brazil

John Provis - University of Sheffield, UK

Wolfram Schmidt - BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Germany

Martin Schneider - VDZ - Research Centre of German Cement Industry, Düsseldorf, Germany

Surendra Shah - Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

Michael Thomas - University of New Brunswick, Canada

Sui Tongbo - Sinoma Research Institute, Beijing, China

Tian Qian - Jiangsu Sobute New Materials Co, Nanjong, China

Henri VanDamme - MIT (formerly IFSTTAR, France), Cambridge, USA

Yu Cheng - Jiangsu Sobute New Materials Co, Nanjong, China