INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)

DIAGNÓSTICO TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E DO USO DE CIMENTO ENSACADO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO IN SITU

GABRIEL WERNER SIMONETO

Foz do Iguaçu
2024

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)

DIAGNÓSTICO TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E DO USO DE CIMENTO ENSACADO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO IN SITU

GABRIEL WERNER SIMONETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Edna Possan
Coorientadora: Profa. Dra. Katia Punhagui

Foz do Iguaçu
2024

GABRIEL WERNER SIMONETO

DIAGNÓSTICO TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E DO USO DE CIMENTO ENSACADO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO IN SITU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

_____
Orientadora Prof. Dra. Edna Possan
(Unila)

_____
Corientadora: Prof. Drª. Katia Regina Garcia Punhagui
(Unila)

_____
Prof. Dr. Vanderley Moacyr John
(USP)

_____
Prof. Dr.José Marques Filho
(UFPR)

Foz do Iguaçu, 17 de setembro de 2024

RESUMO

A indústria cimenteira tem planejado e implementado diversas soluções para redução dos níveis de emissão de gases do efeito estufa, principalmente dióxido de carbono (CO_2), em seus processos produtivos. Uma das ações implementadas foi a redução das proporções de clínquer contido no cimento, por meio do maior uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), especialmente de materiais carbonáticos (fíler), pozolanas (cinza volante) e escória de alto forno. Porém para que o cimento Portland ofereça a resistência mecânica mínima aos 28 dias de idade preconizada na norma vigente NBR 16659 (ABNT, 2018), uma das soluções industriais possíveis é a elevação da finura e/ou do teor de C3S do cimento. Contudo, cimentos com elevado teor de C_3S e/ou elevada finura, podem resultar em maior probabilidade de manifestações patológicas em materiais a base de cimento, como retração e microfissurações, tornando as estruturas e elementos cimentícios mais vulneráveis a agentes agressivos externos, e, portanto, menos duráveis. Neste contexto, este estudo objetiva analisar a evolução da finura e composição química dos diferentes tipos de cimento Portland produzidos no Brasil nos últimos 50 anos (1970-2024). Também avalia o emprego em campo de cimentos ensacados com base no proporcionamento de água em função da percepção de trabalhabilidade do concreto pelo operário. Na primeira etapa empregou-se o levantamento de dados em documentos técnico-científicos brasileiros publicados no período, analisando o tipo de cimento, a finura Blaine, a composição química e o ano de publicação. Os resultados indicam que a finura dos cimentos apresenta tendência de aumento no tempo, exceto o cimento CP II E o qual apresenta estabilidade. Os resultados de composição química com base na equação de Bogue mostram que o teor de C_3S e C_3A tem 90% dos resultados acima da recomendação da literatura para questões associadas à durabilidade. Na segunda etapa, foram produzidos concretos com os cimentos do tipo CP II Z 32 e CP V ARI RS com finura variada, a fim determinar a resistência mecânica, índice de ligante, e índice de carbono. Também fez-se uma análise de durabilidade por meio do emprego de modelos de simulação da profundidade de carbonatação e ataque por cloretos. Constatou-seque os concretos produzidos em obra apresentaram elevada relação água/cimento(de 0,70 a 0,90). Concretos com CP V (cimento com maior teor médio de clínquer) apresentaram maior resistência à compressão em todas as idades, o que conferiu índices de ligante e de carbono inferiores, o que é desejável do posto de vista de desempenho ambiental. Para a durabilidade, este cimento também apresentou melhor performance para a carbonatação. Para o ataque por íons cloreto, os resultados foram satisfatórios para os dois cimentos avaliados, considerando uma espessura de cobrimento de 40 mm e vida útil de projeto de 50 anos. Na análise financeira, o cimento CP II Z 32 apresentou menor custo em R$ por m³ de concreto produzido. De forma geral, pode-se afirmar que os cimentos brasileiros apresentam tendência de aumento de finura e mudanças na composição química ao longo do tempo, que acompanha a tendência de redução de emissões de CO_2. Em aplicações sem controle de produção (como canteiro de obra), cimentos com menores teores de clínquer (CP II Z) podem apresentar desempenho inferior quanto à resistência mecânica, índice de carbono e penetração de agentes agressivos. Os resultados apontam que somente reduzir o teor de clínquer não necessariamente é a solução que reduzirá as emissões de CO_2 do concreto, sendo necessária uma abordagem holística da cadeia de suprimentos considerando resistência à compressão, índices de ligantes, carbono, durabilidade e disponibilidade do material na região.

Palavras-chave: Aglomerante hidráulico; Área específica; Durabilidade; Blaine; Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

The cement industry has planned and implemented several solutions to reduce greenhouse gas emissions, mainly carbon dioxide (CO_2), in its production processes. One of the actions implemented was to reduce the proportions of clinker contained in cement, through greater use of supplementary cementitious materials (SCM), especially carbonate materials (filler), pozzolans (fly ash) and blast furnace slag. However, for Portland cement to offer the minimum mechanical strength at 28 days of age recommended by the current standard NBR 16659 (ABNT, 2018), one of the possible industrial solutions is to increase the fineness and/or C_3S content of the cement. However, cements with high C_3S content and/or high fineness may result in a greater likelihood of pathological manifestations in cement-based materials, such as shrinkage and microcracks, making cementitious structures and elements more vulnerable to external aggressive agents and, therefore, less durable. In this context, this study aims to analyze the evolution of the fineness and chemical composition of the different types of Portland cement produced in Brazil over the last 50 years (1970-2024). It also evaluates the field use of bagged cements based on the proportion of water in relation to the perception of concrete workability by the worker. In the first stage, data were collected from Brazilian technical-scientific documents published in the period, analyzing the type of cement, Blaine fineness, chemical composition and year of publication. The results indicate that the fineness of the cements shows a tendency to increase over time, except for CP II E cement, which presents stability. The chemical composition results based on the Bogue equation show that the C_3S and C_3A content has 90% of the results above the literature recommendation for issues associated with durability. In the second stage, concretes were produced with CP II Z 32 and CP V ARI RS cements with varying fineness in order to determine the mechanical strength, binder index, and carbon index. Durability was also analyzed using simulation models for carbonation depth and chloride attack. It was found that the concretes produced on site had a high water/cement ratio (from 0.70 to 0.90). Concretes with CP V (cement with a higher average clinker content) showed higher compressive strength at all ages, which resulted in lower binder and carbon indexes, which is desirable from an environmental performance standpoint. For durability, this cement also showed better performance for carbonation. For chloride ion attack, the results were satisfactory for both cements evaluated, considering a cover thickness of 40 mm and a design service life of 50 years. In the financial analysis, CP II Z 32 cement had the lowest cost in R$ per m³ of concrete produced. In general, it can be stated that Brazilian cements show a tendency to increase in fineness and changes in chemical composition over time, which follows the trend of reducing CO_2 emissions. In applications without production control (such as construction sites), cements with lower clinker contents (CP II Z) may present inferior performance in terms of mechanical strength, carbon index and penetration of aggressive agents. The results indicate that reducing the clinker content alone is not necessarily the solution that will reduce CO_2 emissions from concrete, requiring a holistic approach to the supply chain considering compressive strength, binder indexes, carbon, durability and availability of the material in the region.

Keywords: Hydraulic Binder, Specific Area, Durability, Blaine, Climate Change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Contexto da Pesquisa (Hipóteses e premissas iniciais) 16

Figura 2: Diagrama de fase do processo de formação dos compostos do clínquer 23

Figura 3: Meta de redução no fator clínquer/cimento brasileiro até 2050 26

Figura 4: Calor de hidratação em função do tempo.....27

Figura 5: Transformação dos compostos de cimentos em hidratos em função do tempo 28

Figura 6: Resistência à compressão em função do tempo para cada composto.....29

Figura 7: Calor de hidratação no tempo para os compostos de C_3S e C_3A.....29

Figura 8: Efeito da pozolana para desenvolvimento de resistências 30

Figura 9: Efeito de adição de calcário e área superficial (Efeito fíler) 31

Figura 10: a) Finura Blaine por tempo de moagem e b) Consumo de energia para processo de moagem em função da finura Blaine considerando o uso de aditivos de moagem.....32

Figura 11: Desenvolvimento de resistência em função do tempo.....33

Figura 12: Calor de hidratação em função da finura.....33

Figura 13: Variação temporal da finura do cimento Portland nos EUA.....34

Figura 14: Variação temporal da finura do cimento Portland no Brasil e Mundo 35

Figura 15: Relação de finura, teor de C_3S do cimento Portland e manifestações patológicas 36

Figura 16: Cabeçalho do Instrumento de coleta de dados 40

Figura 17: Finura Blaine para diferentes cimentosbrasileiros em função do tempo.....51

Figura 18: Frequência absoluta para tipo de cimento em função da finura Blaine em cm^2/g 52

Figura 19: Identificação de outliers em dados de finura por tempo dos cimentos brasileiros 54

Figura 20: Intervalo de distribuição de finura em cm²/gdos cimentos normatizados brasileiros em comparação com China 54

Figura 21: Tendência de Finura Blaine x Tempo considerando diversos autores no Brasil, EUA e Europa.....56

Figura 22: Representação da finura do cimento Portland e os seus efeitos no processo de hidratação.....57

Figura 23: Relação entre teor clínquer/cimento, emissões de CO_2 e Finura Blaine 59

Figura 24: Teor de C_3S, C_2S e C_3A de Cimentos brasileiros em função do período 60

Figura 25: Teor de SO_3 de Cimentos brasileiros em função do período.....62

Figura 26: Resistência à compressão para 14,28 e 63 dias para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS 65

Figura 27: Consumo de cimento por Resistência à compressão para os Cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 66

Figura 28: Consumo de cimento de dados coletados em concreto produzido em obra em comparação com pesquisa. 66

Figura 29: Índice de Ligantes para diferentes idades de resistência do concreto para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS. 68

Figura 30: Índice de Ligantes x resistência à compressão para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS. 68

Figura 31: Índice de Carbono mínimo, médio e máximo para 14, 28 e 63 dias para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS. 69

Figura 32: Vida Útil e Profundidade deteriorada por Carbonatação para o Cimento CP II Z 32 e CP V ARI RS com tipo de exposição interna e externo protegido 71

Figura 33: Vida Útil e Profundidade deteriorada por Cloreto para o Cimento CP II Z 32 e CP V ARI RS 73

Figura 34: Custo por m³ de concreto produzido com os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS 74

Figura 35: Custo por MPa de concreto produzido com os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.....75

Figura 36: Gráfico em formato radar com as principais variáveis obtidas pela etapa 2 do estudo comparando os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.....77

Figura 37: Consumo de cimento x resistência à compressão dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers.....88

Figura 38: Resistência à compressão por índice de ligantes dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers.....88

Figura 39: Índice de carbono dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers.....89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atualizações das normas de cimento Portland antes da NBR 16697:2018.....18

Tabela 2: Composição dos cimentos Portland brasileiros a partir de 2018. 19

Tabela 3: Composição dos cimentos Portland brasileiros no período de 1991 a 2018. 19

Tabela 4: Itens considerados pelas principais normas internacionais e pela norma brasileira de cimento Portland 21

Tabela 5: Variação do teor de C_3S e finura com o tempo 34

Tabela 6: Caracterização física do cimento Portland CP II Z 21 e CP V ARI RS 42

Tabela 7: Caracterização de Agregado miúdo e graúdo 42

Tabela 8: Tabela de dosagem dos concretos produzidos em campo 43

Tabela 9: Etapas da coleta e análise de dados obtidos em campo.....44

Tabela 10: Emissões específicas dos componentes do concreto 46

Tabela 11: Coeficientes do modelo de Possan et al (2021) para a equação 21 47

Tabela 12: Valores de K_1e K_2 em função do tipo de cimento e tipo de adição.....47

Tabela 13: Estatísticas dos dados coletados de finura Blaine dos cimentos brasileiros ...50

Tabela 14: Resumo de Estatísticas para Teor de fases do cimento CP II F e CP V ARI ..61

Tabela 15: Itens considerados pelas principais normas internacionais e norma brasileira63

Tabela 16: Dados de resistência à compressão com 14, 28 e 63 dias, Índice de Ligantes e Índice de Carbono. 64

Tabela 17: Resultados de Simulação de Tempo de Carbonatação e Profundidade Carbonatada para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS, considerando uma espessura de cobrimento de 30 mm. 70

Tabela 18: Resultados de Simulação de Tempo de Exposição ao Cloreto e Profundidade de Região Degradada para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RSpara espessura de cobrimento de 40 mm. 72

Tabela 19: Fornecimento de Cimento Portland da Indústria Brasileira 76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA 15
1.2 PERGUNTA DA PESQUISA 16
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA 17
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 17

2 CIMENTO PORTLAND 18

2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE CIMENTO PORTLAND 18
2.2 NORMAS INTERNACIONAIS DE CIMENTO PORTLAND 20
2.3 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND 22
2.4 EMISSÕES DE CO_2 24
2.5 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND 26

2.5.1 Efeito Pozolânico na Hidratação do Cimento 29

2.5.2 Efeito Fíler na Hidratação do Cimento (Nucleação) 30

2.6 FINURA DO CIMENTO PORTLAND 31
2.7 VARIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NO CIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO 33

3. ARTIGO 38

3.1 INTRODUÇÃO 39
3.2 MÉTODO 39

3.2.1 Etapa analítica: Levantamento de dados de trabalhos publicados na literatura 39

3.2.1.1 Instrumento de Coleta e Tabulação de Dados da Literatura 40

3.2.1.2 Análise de dados da finura e composição do cimento 40

3.2.2 Etapa experimental: Coleta de dados primários de produção de concreto em campo 41

3.2.2.1 Caracterização dos Materiais 42

3.2.2.2 Planejamento Experimental e produção dos concretos 43

3.2.2.3 Avaliação da resistência à compressão 44

3.2.2.4 Indicadores de ecoeficiência, durabilidade e custos 44

3.3 RESULTADOSE DISCUSSÕES 49

3.3.1 Etapa analítica 49

3.3.1.1 Finura do Cimento Portland 49

3.3.1.2 Avaliação da composição química 60

3.3.2 Etapa experimental 64

3.3.2.1 Resistência à Compressão e Consumo de Cimento 64

3.3.2.2 Índice de Ligantes (IL) E Índice de Carbono (IC) 67

3.3.2.3 Durabilidade *69*
3.3.2.3.1 Carbonatação *69*
3.3.2.3.2 Ataque por cloretos *72*
3.3.2.4 Financeiro *73*
3.3.2.5 Comparativo Global de Indicadores *76*
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 78
3.4.1 Conclusões 78
3.4.2 Sugestões para trabalhos futuros 79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80
APÊNDICE A 88

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento é responsável por cerca de 7 a 8% de emissões de CO_2 antropogênicas globais (IEA; CSI, 2018; Miller *et al.*, 2018; Olsson; Miller; Alexander, 2023), as quais estão associadas ao processo de descarbonatação da rocha calcária e queima de combustíveis fósseis (Aïtcin, 2016). A china é o maior produtor de cimento global, correspondendo à 60% da produção, com produção de 2,48 Gt toneladas em 2014(Shen *et al.*, 2017). No Brasil, a produção de cimento no ano de 2023 atingiu cerca de 62Mt (SNIC, 2023), com fator clínquer/cimento para o ano de 2019 de 67% e taxa de emissão de CO_2 de560 kg por tonelada de cimento (SNIC, 2019), sendo uma das menores do mundo. Para o ano de 2020, a média mundial é de 600 kgCO_2/t de cimento com fator clínquer/cimento de 71% (IEA, 2021).

Para a redução de emissões de carbono, a estratégia principal é a redução da quantidade de clínquer contido no cimento, empregando para tal maior quantidade de MCS (Materiais Cimentícios Suplementares) e filleres (Aïtcin; Wilson; Mindess, 2018; Juenger; Snellings; Bernal, 2019; Scrivener; John; Gartner, 2018). No Brasil, a meta para 2030 é de um fator clínquer/cimento de0,59 e para 2050 é de 0,52, possibilitando uma emissão de 430 kg.CO_2/t (SNIC, 2019)

Considerando as metas globais de redução de emissões de CO_2, o último relatório do IPCC de 2023 (IPCC, 2023) reafirma a urgência de medidas mais eficazes para limitar o aquecimento global a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, como estabelecido pelo Acordo de Paris (ONU, 2015). Este acordo, aprovado por 195 países, busca cortar as emissões globais em até 43% até 2030 para manter as metas viáveis, mas os compromissos atuais têm se mostrado insuficientes, com uma projeção de aquecimento de até 2,9°C caso não sejam feitas reduções significativas (IPCC, 2023). Atualmente, as concentrações de CO_2 na atmosfera atingiram um patamar recorde de 420 ppm, muito acima do nível pré-industrial de aproximadamente 280 ppm (NOAA, 2024). Os últimos anos foram considerados como os mais quentes da história (ONU, 2024), e esse aumento nas emissões representa uma ameaça direta à meta de manter a elevação da temperatura abaixo de 2°C.

Neste contexto, o mercado de carbono é citado como um instrumento importante para mitigar as emissões de CO2. Com atraso em relação a outras nações globais, no Brasil, a Lei 15.042/2024 (BRASIL, 2024) institui o SBCE (Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa) estabelecendo as bases para um mercado

regulado de carbono no Brasil. A geração de crédito é realizada por empresas ou projetos que reduzem ou removem emissões de gases de efeito estufa (GEE) podem gerar créditos de carbono, correspondentes a uma tonelada de CO_2 equivalente evitada ou removida. Os créditos podem ser negociados no mercado, permitindo que empresas que excedem seus limites de emissões compensem suas emissões adquirindo créditos de quem conseguiu reduzi-las. Com a criação do SBCE, setores específicos da economia terão limites de emissões estabelecidos, necessitando adquirir créditos caso excedam esses limites. A comercialização de créditos de carbono pode movimentar bilhões de reais, recursos que podem ser reinvestidos em projetos ambientais, como reflorestamento, conservação de biomas e desenvolvimento de tecnologias limpas. Esse mercado pode ser um incentivo importante para a indústria do cimento que pelo maior emprego de MCS e redução do fator clínquer cimento tem potencial de redução de 9% das suas emissões (GCCA, 2022).

Atualmente, os principais MCS empregados como substituto do clínquer são a escória de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e fíler calcário. Os três primeiros apresentam atividade pozolânica, o que é favorável para a formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), enquanto o fíler é um material inerte com potencial para preenchimento de vazios e efeito de nucleação na formação do C-S-H (Berodier; Scrivener, 2014; Oey *et al.*, 2013). Contudo, a escória de alto forno e as cinzas volantes, são resíduos de outras indústrias, com produção limitada que não atende a demanda da indústria do cimento. Por outro lado, o fíler calcário e argilas calcinadas apresentam jazidas abundantes no globo, com isso soluções que as utilizem são mais viáveis para atender a escala de produção global (Scrivener; John; Gartner, 2018). Todavia o emprego de teores mais elevados de fíler com substituo ao clínquer apresenta desafios relacionados, sobretudo à resistência nas primeiras idades.

A literatura sugere que para ganhos mais rápidos de resistência duas estratégicas podem ser adotadas: aumento da finura e/ou aumento no teor de C_3S e C_3A do cimento (Aïtcin; Wilson; Mindess, 2018,Bentz; Sant; Weiss, 2008; Kipkemboi et al., 2020). A finura é a medida física que afeta a reatividade no processo de hidratação, onde a maior área superficial disponível para reação, aumenta a velocidade da reação e proporciona maiores resistências em menores idades (Bentz; Sant; Weiss, 2008; Neville, 2016). O C_3S e C_3A são os principais compostos que conferem resistência ao cimento Portland aos 28 dias (Aïtcin, 2016; KOSMATKA; WILSON, 2011; Mehta; Monteiro, 2006).

Foram realizados trabalhos fora do Brasil (BENTZ; SANT; WEISS, 2008; MEHTA;

BURROWS, 2001; TENNIS; BHATTY, 2005) que indicaram o cimento com maior finura e/ou maior teor C_3S no passar dos anos. (AÏTCIN, 2008; YANG et al., 2017) sugerem limitar finura do cimento em 350 kg/m³e para reduzir retração plástica e reduzir emissões por menor moagem e o teor de C_3S com margem de 55 a 60% e C_3A com teor máximo de 5% (Aïtcin, 2008). Importante ressaltar que as referências supracitadas datam de décadas passadas. Como a competitividade, a situação global para redução de emissões de CO_2 se tornaram mais relevantes na atual década, os limites e tolerâncias podem ser revistos conforme novas tecnologias e necessidades emergem, a fim de atender o mercado em constante mudança.

O clínquer é o principal componente responsável pelo desenvolvimento da resistência nos primeiros 28 dias pela reação de hidratação das fases do clínquer C_3S, C_2S, C_3A e C_4AF com água, dando origem ao C-S-H e CH (hidróxido de cálcio) (Bullard *et al.*, 2011; JOSEPH *et al.*, 2017; Mehta; Monteiro, 2006; Neville, 2016). Com a menor quantidade de clínquer e maior quantidade de MCS nos cimentos é importante compreender como a resistência à compressão aos 28 dias será atendida, assim como quais são os efeitos técnicos e ambientais da redução de clínquer na composição do cimento Portland.

Alterações no processo de clinquerização, especialmente na temperatura, podem conduzir a cimentos com maior teor de C_3S (Aïtcin, 2016). Outros fatores como coprocessamento no processo de queima podem influenciar no teor das fases e qualidade final do produto (BATTAGIN; CARDOSO, 2018). Porém, com incremento no teor de C_3S e C_3A pode haver maior tendência de manifestações patológicas em concretos e argamassas associadas a maior retração por secagem e retração térmica (maior calor de hidratação) (Kipkemboi *et al.*, 2020; Miyazawa *et al.*, 2014), se não forem adotadas medidas de controle no proporcionamento, lançamento, cura, uso de aditivos, empacotamento de partículas, refrigeração, entre outros. Esses efeitos podem causar redução no desempenho das edificações e durabilidade ao longo do ciclo de vida.

No trabalho realizado por Wu et al. (2018), avaliou-se cimento com alta finura (D50 2088 um) com teor de MCS em até 70% com resultados de resistência, calor de hidratação, pegada carbono e custo melhores do que a referência. Esse fato é explicado pelo processo de aceleração do efeito pozolânico e densificação na estrutura pelo empacotamento das partículas mais finas fazendo com que haja maior resistência à compressão. O estudo indica uma solução prática e eficiente para o uso de finuras maiores, considerando as alterações dos cimentos atuais, desde que analisadas todas as variáveis de uso, custo, emissões e durabilidade.

Visando permitir a redução no teor de clínquer, em 2018 as normas brasileiras de cimentos foram atualizadas e unificadas na NBR 16697 (ABNT, 2018), que passou a permitir maior quantidade de MCS e fíler que as versões anteriores, possibilitando a fabricação de cimentos com menor quantidade de clínquer. No país, o cimento é comercializado a granel e ensacado. O primeiro com perfil mais técnico visa o atendimento a concreteiras, centrais dosadoras e grandes obras. Já o cimento ensacado é comercializado no varejo geralmente para pequenos consumidores. No Brasil, o cimento ensacado representa 66% a 70% da principal matéria-prima para produção de concretos e argamassas para obras autogeridas, conhecido como consumo “formiga” (SNIC, 2019; SOUZA; RESENDE, 2019). Esses consumidores tendem a empregar 23% mais cimento para produzir um concreto similar ao produzido em central dosadora (SNIC, 2019). Questões relacionadas ao emprego eficiente do cimento Portland, especialmente o comercializado em pequenas obras (ensacado), não são amplamente estudadas, com lacunas técnico-cientificas, econômicas e culturais importantes para o processo de descarbonização da construção. Neste sentido, é importante avaliar como esse cimento é empregado e se a redução o teor de clínquer tem impactos na resistência à compressão, emissões de CO_2, custos e na durabilidade ao longo do tempo.

Sendo assim, o objetivo do trabalho é avaliar a alteração da finura e composição do cimento Portland nacional ao longo dos anos, a partir de levantamento de banco de dados de trabalhos científicos, a fim de avaliar a tendência no tempo. Objetiva-se também avaliar em campo a percepção do usuário do cimento ensacado para a demanda d’água para produção de concretos com cimentos de finura variada.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este estudo tem como objetivo principal avaliar a variação da finura Blaine e a composição química (teor de C_3S) do cimento Portland brasileiro produzido nas últimas cinco décadas, bem como analisar concretos preparados com cimento ensacado de finura variada em canteiros de obras, considerando indicadores de aspectos ambientais, técnicos e financeiros.

Como objetivos específicos tem-se:

a) Analisar a variação temporal da finura e da composição química dos diversos tipos de cimentos Portland normalizados brasileiros;

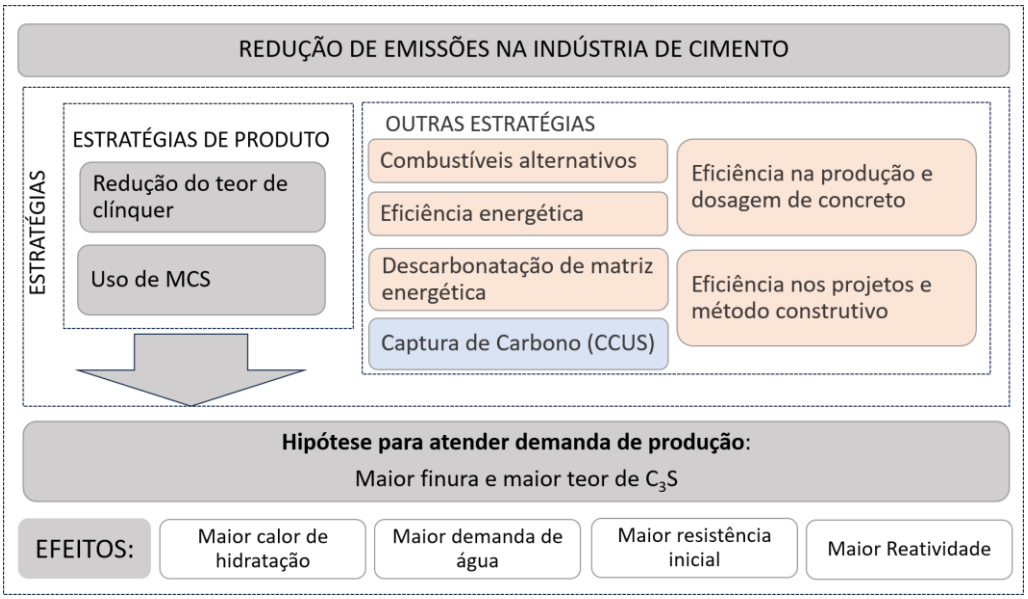
b) Discutir os potenciais efeitos positivos e negativos relacionados aos cimentos brasileiros em função da variação da sua finura e composição química;
c) Avaliar a percepção do usuário de cimentos com finura variada na demanda d'água para produção de concretos e realizar a análise dos indicadores de ecoeficiência e durabilidade do concreto produzido.

1.2 PERGUNTA DA PESQUISA

Com base na hipótese e premissas indicadas na Figura 1, o presente estudo pretende responder as seguintes questões de pesquisa:

a) A redução do fator clínquer/cimento tem afetado a finura Blaine do cimento Portland nacional ao longo das últimas décadas?
b) A redução do fator clínquer/cimento tem afetado a composição química (teor de C_3S e C_3A) do cimento Portland nacional ao longo das últimas décadas?
c) Quais efeitos técnicos associados à redução de clínquer na composição do cimento Portland?
d) Como fazer uso de cimentos com menores teores de clínquer (cimentos menos emissivos) sem perdas ambientais e técnicas? No contexto brasileiro reduzir o teor de clínquer é a melhor solução para redução de emissões de CO_2 e manutenção de desempenho e durabilidade das edificações.

Figura 1 – Contexto da Pesquisa (Hipóteses e premissas iniciais)



1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa faz uso de dados secundários, advindos de estudos já publicados na literatura de 1950 até 2022, não sendo possível na maior parte dos estudos identificar o ano de fabricação do cimento Portland empregado. Considera-se o ano de publicação do trabalho como o ano de fabricação do cimento.

Os dados de Blaine não indicam a origem finura do clínquer ou das adições.

Os ensaios de composição química do cimento não fornecem a proporção de clínquer e adições do cimento.

Fórmula de Bogue não se aplica para cimentos com adições resultando em valores inconsistentes, possibilitando somente a identificação dos teores de fases para os cimentos CP II F e CP V ARI.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho contém 5 Capítulos, onde no capítulo 1 tem-se a contextualização da pesquisa e apresentação de introdução, objetivo principal e específicos, perguntas da pesquisa e limitações.

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica e conceitos sobre produção de cimento, emissões, normatização, hidratação do cimento, finura e variações do cimento no mundo para finura e composição apresentada pela literatura nos últimos anos a fim de comparar com os resultados obtidos no presente estudo.

O capítulo 3 é dedicado ao trabalho em formato de artigo científico. Serão apresentados o método, resultados e considerações finais. O método está separado em duas etapas, sendo primeira etapa de coleta de dados de finura e composição de cimentos normatizados nas últimas décadas, a fim de analisar a tendência no tempo e segunda etapa de ensaio de campo realizado para produção de concreto utilizando cimentos com finura variada visando analisar a percepção do usuário para demanda d’água e analisar indicadores de resistência, ambientais, durabilidade e financeiros. Os resultados apresentam as tendências e estatísticas da finura e composição do cimento no tempo, assim como os indicadores dos concretos produzidos em campo. Por fim, as conclusões do trabalho.

2 CIMENTO PORTLAND

2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é um composto formado por basicamente por rochas calcárias e argila que fornecem os óxidos de cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), que após mistura e queima da origem ao clínquer (Aïtcin, 2016; Domone; Illston, 2010). Por definição, o cimento Portland é um aglomerante hidráulico, formado por material inorgânico moído, que quando misturado com água endurece por processos de hidratação. Depois de endurecido mantém sua resistência e estabilidade mesmo debaixo d'água (BSI, 2011).

O cimento Portland brasileiro, independentemente do tipo, é composto por clínquer, sulfato de cálcio (gesso) com média de 4% a 5% em massa (Domone; Illston, 2010; SNIC, 2019) eo material carbonático (fíler calcário) (SNIC, 2013). A escória de alto forno é empregada para os cimentos CP II E e CP III, e cinzas volantes ou argila calcinada para os cimentos CP II Z e CP IV (SNIC, 2013). A classificação do Cimento Portland é feita a partir da quantidade de clínquer e do tipo e teor de adições minerais empregadas, sendo os principais CP I, CP I S, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV e CP V.

Conforme Tabela 1, o cimento Portland brasileiro apresentou diversas atualizações no tempo. Nota-se que de 1937 até 1966 eram normatizados cimentos sem adições. A partir de 1966 iniciou o emprego de cimento com escória de alto forno e pozolanas. Em 2018 as diferentes normas aplicadas para cada tipo de cimento foram unificadas para a NBR 16697 (2018).

Tabela 1: Atualizações das normas de cimento Portland antes da NBR 16697:2018

Tipo	Norma	Atualizações	Norma vigente
CP I	NBR 5732	1937, 1969, 1973, 1977, 1980, 1988, 1991	NBR 16697 (2018)
CP II E, F, Z	NBR 11578	1991, 1997, 2018	
CP III	NBR 5735	1966, 1974, 1980, 1987, 1991	
CP IV	NBR 5736	1974, 1980, 1986, 1991, 1999	
CP V	NBR 5733	1937, 1974, 1980, 1991	

Fonte: Autor, com dados da ABNT Catálogo

Os cimentos podem ter classe de resistência de 25, 32 ou 40 MPa[1] podendo ser classificados como RS (Resistente a Sulfatos), BC (Baixo Calor de Hidratação) ou ARI

[1]Para classe resistência do cimento (25, 32, 40 e ARI) emprega-se NBR 7215

(Alta resistência inicial)[2]. Atualmente, a NBR 16697 (ABNT, 2018) regulamenta os teores de adições para cada tipo de cimento indicados na Tabela 2. Antes de 2018, os cimentos brasileiros respeitavam os teores de adição indicados em normativas específicas para tipo de cimento, conforme Tabela 3.

Tabela 2: Composição dos cimentos Portland brasileiros a partir de 2018.

Cimento	Norma	Clínquer*	Escória	Pozolana	Fíler
CP I**	NBR 16697 (ABNT, 2018)	85-90	0-5	0-5	0-5
CP I-S		85-89	0	0	6-10
CP II E		46-89	6-34	0	0-15
CP II Z		66-89	0	6-14	0-15
CP II F		70-84	0	0	11-25
CP III		20-60	35-75	0	0-10
CP IV		40-80	0	15-50	0-10
CPV ARI		85-95	0	0	0-10

*Sulfato de cálcio ($CaSO_4$)corresponde em média 5% do cimento (Domone; Illston, 2010).
**Somente uma das adições é permitida.

Tabela 3: Composição dos cimentos Portland brasileiros no período de 1991 a 2018.

Cimento	Norma	Clínquer*	Escória	Pozolana	Fíler
CP I	NBR 5732:1991	95	0	0	0
CP I-S**	NBR 5732:1991	90-94	1-5	1-5	1-5
CP II E	NBR 11578:1991	60-89	6-34	0	0-10
CP II Z	NBR 11578:1991	71-89	0	6-14	0-10
CP II F	NBR 11578:1991	89-85	0	0	6-10
CP III	NBR 5735:1991	20-60	35-70	0	0-5
CP IV	NBR 5736:1991	40-80	0	15-50	0-5
CPV ARI	NBR 5733:1991	90-95	0	0	0-5

*Sulfato de cálcio ($CaSO_4$)corresponde em média 5% do cimento (Domone; Illston, 2010).
** Somente uma das adições era permitida.

O tipo de cimento está condicionado ao teor de materiais cimentícios suplementares e tipo por limites mínimos e máximos. Observa-se que estes limites tiveram mudanças na norma vigente (Tabela 2), principalmente para o teor de fíler calcário, cujo limite máximo passou de 10% para 25% para o cimento CP II F. A tendência do mercado será a redução no teor de clínquer visando a diminuição na pegada de carbono dos cimentos.

[2] Para sufixo RS e BC empregam-se NBR 13583 respectivamente.

2.2 NORMAS INTERNACIONAIS DE CIMENTO PORTLAND

As principais normas de cimento internacionais são a norma norte americana ASTM C150-18 e a europeia BSI EN 197-1:2011. Na ASTM C150/C150M-18 “Standart Specification for Portland Cement” são detalhados dez tipos de cimento Portland, sendo: Type 1; Type 1A; Type II; Type IIA; Type II (MH); Type II (MH) A; Type III; Type IIIA; Type IV; Type V, classificados pelo uso, sendo estes os principais critérios de classificação:

i) Teores mínimos e máximos de óxidos e fases[3];
ii) Perda ao fogo e resíduo insolúvel máxima;
iii) Resistência à compressão com 1, 3, 7, 28 dias, finura Blaine e tempos de pega mínimos e máximos.

Na ASTM C595/C595M-16 são especificados os cimentos com MCS (Escória, pozolana, fíler calcário e ternário, sendo Type IS, Type IP, Type IL e Type IT, respectivamente). A norma apresenta método de cálculo a partir da equação de Bogue para as fases do cimento na condição da relação entre Al_2O_3 e Fe_2O_3 maior ou igual a 0,64 e menor que 0,64.

Com o uso das equações de Bogue, é possível determinar as quantidades dos principais compostos do cimento Portland a partir da proporção dos seus componentes químicos, apresentado pelas equações 1 a 4:

$$\%C_3S = 4{,}071\ CaO - 7{,}6SiO_2 - 6{,}718Al_2O_3 - 2{,}85SO_3 \quad (Equação\ 1)$$
$$\%C_2S = 2{,}867SiO_2 - 0{,}7544C_3S \quad (Equação\ 2)$$
$$\%C_3A = 2{,}65Al_2O_3 - 1{,}692Fe_2O_3 \quad (Equação\ 3)$$
$$\%C_4AF = 3{,}043\ Fe_2O_3 \quad (Equação\ 4)$$

Quando a relação entre Al_2O_3 e Fe_2O_3 é menor que 0,64, as equações são 5 e 6 e C_2S permanece de acordo com equação 2.

$$\%ss(C_4AF + C_2F) = 2{,}1Al_2O_3 + 1{,}702\ Fe_2O_3 \quad (Equação\ 5)$$
$$\%C_3S = 4{,}071\ CaO - 7{,}6SiO_2 - 4{,}479Al_2O_3 - 2{,}859\ Fe_2O_3 - 2{,}852\ SO_3 \quad (Equação\ 6)$$

[3]*óxidos são, por exemplo, $CaCO_3$ e fases são C_3S

Cabe destacar que para cimentos com adições pozolânicas estas equações não são aplicáveis.

Na norma BS EN 197-1:2011 “Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements” são detalhados 27 tipos de cimento, sendo CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V e CEM VI. Os cimentos na BS EN são classificados pelo teor de clínquer e MCS em sua composição, em que os principais critérios de classificação são:

i) Teor de compostos (clínquer e MCS);
ii) Teor máximo de C_3A para cimentos com resistência a sulfatos, perda ao fogo, resíduo insolúvel e teor de SO_3 máxima e pozolanicidade;
iii) Resistência à compressão para 2, 7 e 28 dias e tempo de pega inicial.

Na Tabela 4 são apresentados os principais critérios de controle e classificação do cimento Portland presentes nas internacionais ASTM e BSI, assim como na brasileira.

Tabela 4: Itens considerados pelas principais normas internacionais e pela norma brasileira de cimento Portland

Item da norma	NBR 16697 (2018)	BSI EN 197-1-2011	ASTM C150-18
Tipo de cimento	X	X	X
Uso de Cimento por Tipo	-	-	X
Teor de Componentes (Clínquer e MCS)	X	X	-
Cálculo e Teor de Fases (Bogue)	-	-	X
Teor de C_3S	-	-	X
Teor de C_3A	-	X	X
Teor de SO_3	X	X	X
Teor de MgO	X	X	-
Teor de Cloretos	-	X	-
Calor de Hidratação (J/g)	X*	X*	X
Finura Blaine	X	-	X
Finura máxima	-	-	X
Perda ao Fogo	X	X	X
Resíduo Insolúvel	X	X	X
Tempo de Pega Inicial	X	X	X
Tempo de Pega Final	X	-	X
Tempo de Pega Falsa	-	-	X
Resistência à Compressão	X	X	X
Pozolanicidade	-***	X	**

*Para cimentos BC/LH. ** A norma ASTM C595 apresenta cimentos com MCS.*** Contém norma complementar.

Observa-se que a norma Brasileira apresenta menos critérios que as demais.

Estudos da literatura (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2013; Scrivener; John; Gartner, 2018) indicam que é possível elevar ainda mais o teor de fíler contido no cimento, contudo a aplicação deste material requer atenção com a demanda de água, uso de aditivos dispersantes e controle de granulometria para que a resistência alvo seja atingida sem elevar o consumo de cimento.

No Brasil, o cimento é comercializado a granel e ensacado, que se destinam a mercados distintos. O primeiro geralmente é destinado às centrais de concretos, usinagens, grandes obras. Já o cimento ensacado comercializado em embalagens de papel de 25, 40 e 50 Kg, é destinado ao mercado fracionado, para atendimento em lojas de varejo, pequenas obras, reformas e construção informal. O primeiro apresenta controle tecnológico mais rigoroso de processo, já o segundo caso com o uso informal com baixo ou nenhum controle no processo de produção.

2.3 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

No Brasil, segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2017), a produção do cimento é feita a partir do processo de via seca por comprovadamente permitir maior eficiência energética, economia de combustíveis e emitir menores quantidades de CO_2. O cimento é fundamentalmente um produto da descarbonatação de rochas calcárias, sua matéria-prima principal, sob a forma de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) a partir do aquecimento em forno de clínquer (IEA; CSI, 2018; SNIC, 2019). O processo de obtenção do cimento se inicia na extração da matéria-prima principal ($CaCO_3$), e adição de materiais corretivos complementares como minério de ferro (Fe_2O_3), alumínio (Al_2O_3), sílica (SiO_2) entre outros, necessários para que haja a formação dos compostos de hidratação (maiormente silicatos e aluminatos de cálcio). A partir destes insumos faz-se a moagem e pré-homogeinização para obtenção da “farinha crua” (SNIC, 2019).

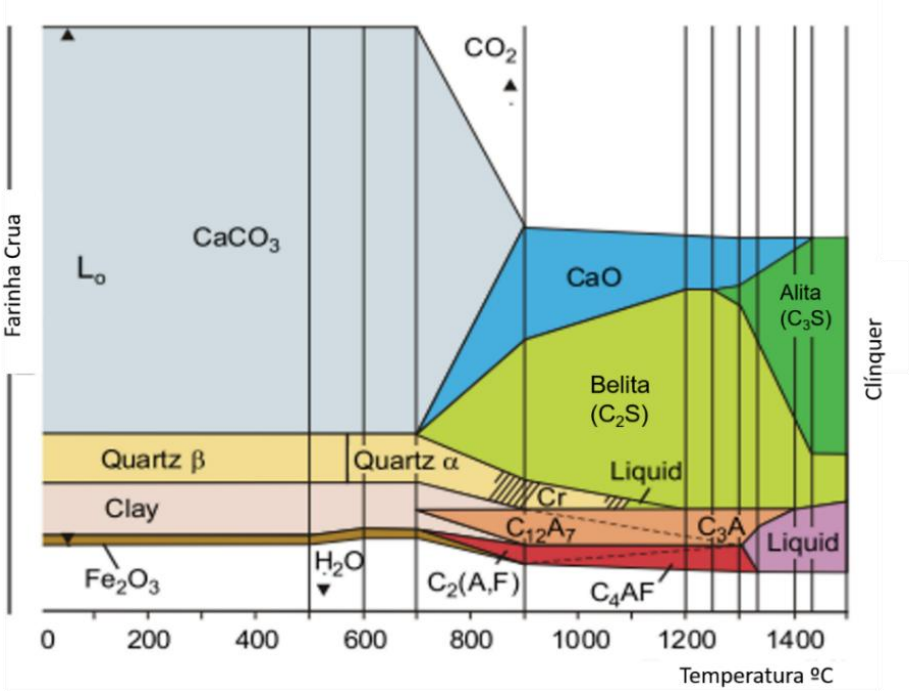
A farinha crua é levada para o forno de clínquer, e no pré-aquecimento são utilizados os gases quentes do forno para aquecer a mistura até atingir a temperatura de 800°C, onde tem-se o processo de descarbonatação da rocha carbonática (Aïtcin, 2016; CNI, 2012; Shen *et al.*, 2017). O carbonato de cálcio ($CaCO_3$) se transforma em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbônico (CO_2) pela quebra molecular gerada nestas temperaturas, conforme equação (7).

$$CaCO_3 + calor(\sim 800\ ºC) \rightarrow CaO + CO_2 \quad (Equação\ 7)$$

Com base na estequiometria dos compostos químicos CaO corresponde a 56% e o CO_2 a 44% do produto do aquecimento do $CaCO_3$. Sendo assim, para se produzir uma tonelada de clínquer Portland são necessários em média de 1300 kg a 1400kg de rochas carbonáticas (Rodrigues; Fonseca, 2009).

Na continuidade do processo de clinquerização, eleva-se a temperatura da mistura no interior do forno rotativo à cerca de 1450 °C, onde o material é sinterizado e parcialmente fundido dando origem ao clínquer. O clínquer é um composto sólido, constituído por pequenas esferas, altamente reativo à água (Aïtcin, 2016; Mehta; Monteiro, 2006; Shen *et al.*, 2017). Na Figura 2 tem-se uma representação esquemática deste processo com a indicação dos compostos formados em função da temperatura.

Figura 2: Diagrama de fase do processo de formação dos compostos do clínquer



Fonte: Aïtcin (2016)

Com o processo de clinquerização são formados compostos químicos complexos que após cominuição e emprego de adições dão origem ao cimento Portland. O silicato tricálcico (C_3S) corresponde de 50% a 70% do clínquer, quando hidrata apresenta rápido endurecimento e é responsável pela pega inicial e pela resistência nas primeiras idades. O silicato dicálcico (C_2S) corresponde de 10% a 25% do clínquer, quando hidrata apresenta lento endurecimento e contribui para o ganho de resistência para idades mais avançadas (acima de 7 dias). O aluminato tricálcico (C_3A) libera grande quantidade de

calor nas primeiras idades e contribui no processo de pega e endurecimento. Cimentos com baixo teor de C_3A são mais resistentes a ataques de sulfatos. O ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) é resultado do ferro e alumínio presentes na farinha crua e dá a cor cinza característica do cimento, contribui pouco para a resistência (KOSMATKA; WILSON, 2011). Os aluminatos (C_3A e C_4AF) correspondem de 15 a 16% em massa do clínquer (AÏTCIN, 2016).

Após a produção, o clínquer é resfriado e armazenado em silos para posterior cominuição. No processo de moagem adiciona-se sulfato de cálcio (gesso) em teores de até 5% para controle da pega e a depender do tipo do cimento requerido; também são feitas as adições como escória siderúrgica, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário (CNI, 2012), conforme Tabela 2, para a produção dos diferentes tipos de cimento.

2.4 EMISSÕES DE CO_2

A produção de cimento global cresceu mais de quatro vezes desde 1990 e mais 30 vezes desde 1950 (Andrew, 2019). Em 2016, a produção de cimento representou 5,6% das emissões globais de CO_2 (Le Quéré *et al.*, 2016). Os dados variam e podem representar 5 a 8% das emissões (Andrew, 2019; IEA; CSI, 2018; Miller *et al.*, 2015, 2018).

A China é a principal produtora de cimento global com cerca 60% da produção com mais de 2,3 Gt produzidos em 2019 com fator clínquer/cimento igual ou abaixo a 0,60 e taxa de emissão da ordem de 0,830 tCO_2/t de clínquer (GCCA, 2022) . No mundo 4,1 Gt produzidos no mesmo ano com fator clínquer cimento entre 0,65 a 0,70 (Andrew, 2018, 2019; IEA; CSI, 2018; USGS, 2021). Na China, o baixo teor de clínquer se dá pelo uso de forno do tipo NSP que melhora qualidade do clínquer possibilitando maior teor de adições (Xu *et al.*, 2012). A Índia é o segundo maior produtor de cimento no mundo com 7% da produção mundial, apresentou redução no fator clínquer cimento de 0,86 em 1990 para 0,70 em 2014 com fator de emissão de 834kgCO_2/t de clínquer (Andrew, 2019). Dados mais atuais mostram que para 2019 a Índia tem fator clínquer cimento igual ao fator médio mundial (SNIC, 2020).

No Brasil, o parque industrial da cadeia de produção do cimento conta com 93 fábricas instaladas pelo país e apresentou, no ano de 2020, produção de 63,5 Mt (SNIC, 2020), correspondendo a cerca de 1,50% da produção de cimento mundial. O fator

clínquer/cimento nacional em 2019 apresenta resultado de 0,67 com redução de 16% em relação a 1990 (0,78 a 0,8) (Andrew, 2019; SNIC, 2019, 2020) e as taxas médias de emissões são de 609 kg.CO_2/tcimento (GCCA, 2019a) e 832 kgCO_2/tclínquer (GCCA, 2019c) (SNIC, 2019). A taxa de crescimento na produção entre 1950 até 2020 foi de 40 vezes e consumo per capita de 8 vezes; entre 1990 até 2020 foi de 2,4 vezes e consumo per capita com crescimento de 1,6 vezes (SNIC, 2020).

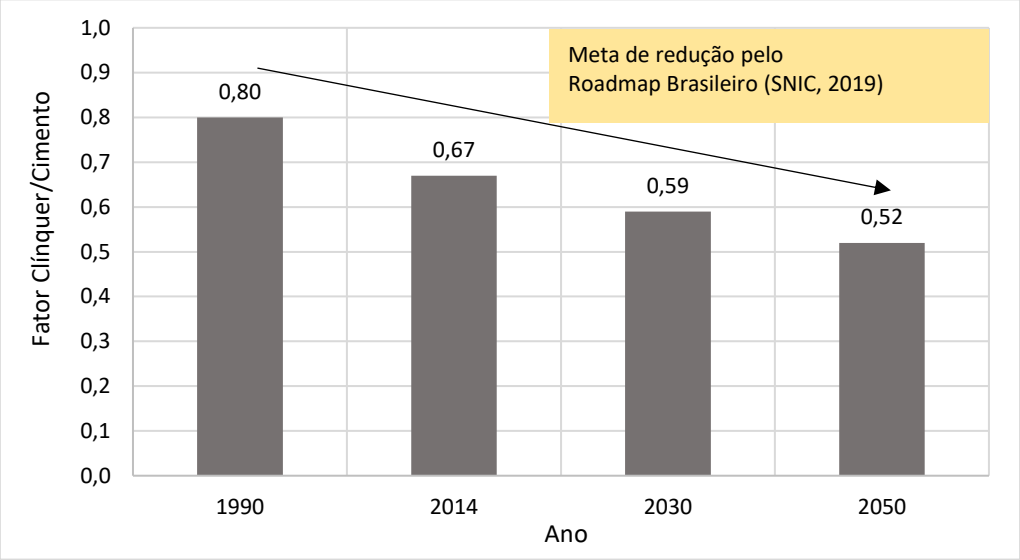
As emissões de CO_2 na atmosfera provocadas pela produção de cimento são responsáveis por intensificar o processo de efeito estufa e aquecimento global, gerando mudanças climáticas. Com isso, aumenta probabilidades de danos causados por secas, chuvas torrenciais e enchentes, nevascas severas, ciclones, acidificação e aumento no nível dos oceanos (IPCC, 2021).

O aquecimento global é o aumento estimado na temperatura média global da superfície de oceanos e/ou continentes ao longo de um período de 30 anos, ou o período de 30 anos período centrado em um determinado ano ou década, expresso em relação a níveis pré-industriais (IPCC, 2019).

Para reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e seus impactos, em 2015 foi assinado o acordo de Paris por mais de 190 países com o objetivo de manter a temperatura global no máximo 1,5 ºC a 2 ºC maior do que os níveis pré-industriais até 2030 e 2050, respectivamente (ONU, 2015). Para isso, foi solicitado ao IPCC relatório técnico sobre os impactos causados por aumento na temperatura de 1,5ºC e as principais fontes de emissão.

A fim de atender a meta estabelecido pelo Acordo de Paris, a solução proposta na literatura para reduçãodas emissões de gases do efeito estufa no âmbito da produção de cimento é a redução da quantidade de clínquer no cimento, responsável por maior parte das emissões, considerando o indicador clínquer/cimento (CNI, 2012; Damtoft *et al.*, 2008; HABERT, 2013; IPCC, 2019; Mehta; Monteiro, 2006; Scrivener, 2014; Scrivener; John; Gartner, 2016; SNIC, 2019). Com isso, é necessário elevar a quantidade de materiais cimentícios suplementares (MCS) no clínquer para a produção do cimento Portland. No Brasil, a tendência é redução no teor de clínquer conforme meta estabelecida pelo Roadmap apresentada na Figura 3 (SNIC, 2019).

Figura 3: Meta de redução no fator clínquer/cimento brasileiro até 2050



Fonte: SNIC (2019)

Para a redução das emissões do cimento tendo em vista a redução da quantidade de clínquer, é necessário que haja disponibilidade de materiais cimentícios suplementares (MCS) para atender as demandas mundiais de uso do cimento. A escória de alto de forno e a cinza volantes são resíduos de indústria de aço e termelétricas, com produção limitada, gerando dependência de disponibilidade proporcionada pelo subproduto de outras indústrias para aplicação na produção de cimento. Portanto, soluções com o uso de argilas calcinadas e fíler são mais plausíveis comparadas as outras opções de adição por sua disponibilidade na crosta terrestre para extração conforme demanda (Scrivener; John; Gartner, 2016).

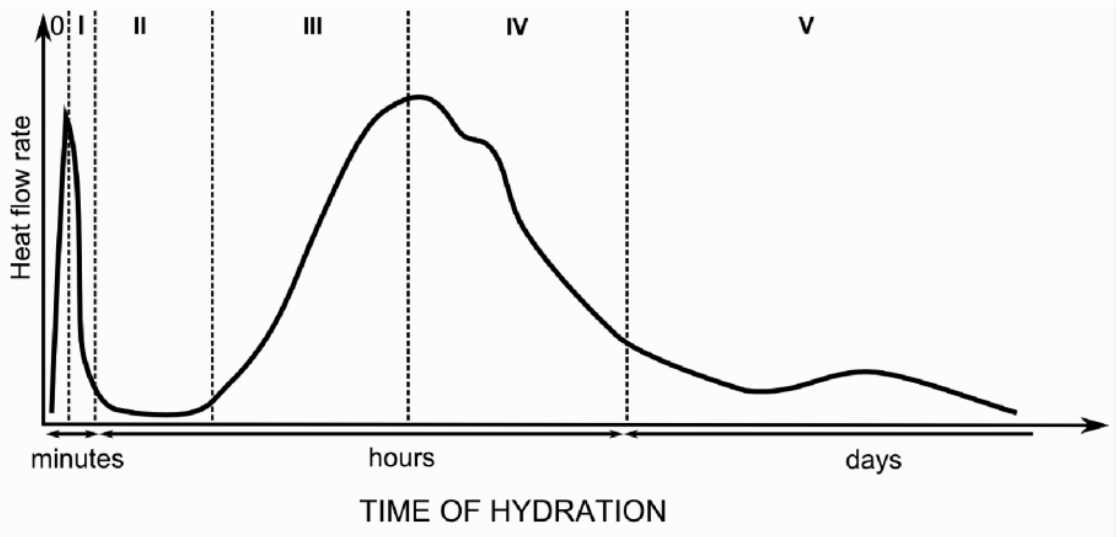
Além da disponibilidade de MCS, o cimento produzido deve atender a resistência à compressão mínima aos 28 dias prescrita em normas técnicas, no Brasil na NBR 16697 (ABNT, 2018). Para isso, a literatura indica 3 (três) medidas possíveis para compensar o menor uso de clínquer: i) aumento no teor de C_3S e C_3A do clínquer (maior reatividade nas idades iniciais); ii) maior finura das partículas do cimento (maior reatividade devido à maior superfície específica); e, iii) melhorar o empacotamento de partículas e implementar o uso de aditivos superplastificantes para redução da demanda por água das misturas (AÏTCIN, Pierre Claude; WILSON; MINDESS, 2018).

2.5 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O processo de hidratação do cimento Portland é dado a partir do contato do cimento

anidro (C_3S, C_2S, C_3A e C_4AF) com a água e dissolução dos seus compostos silicatos e aluminatos. O processo é exotérmico e depois de algumas horas, a depender das condições do ambiente, de dosagem e tipo de cimento são precipitados hidratos de cimento, passando do estado fresco para o estado endurecido (Neville, 2016). É possível avaliar pela Figura 4 como é desenvolvido o calor no processo de hidratação na maioria dos cimentos.

Figura 4: Calor de hidratação em função do tempo



Fonte: Bazzoni (2014)

Segundo Bazzoni (2014), o processo de hidratação é divido em 6 fases:

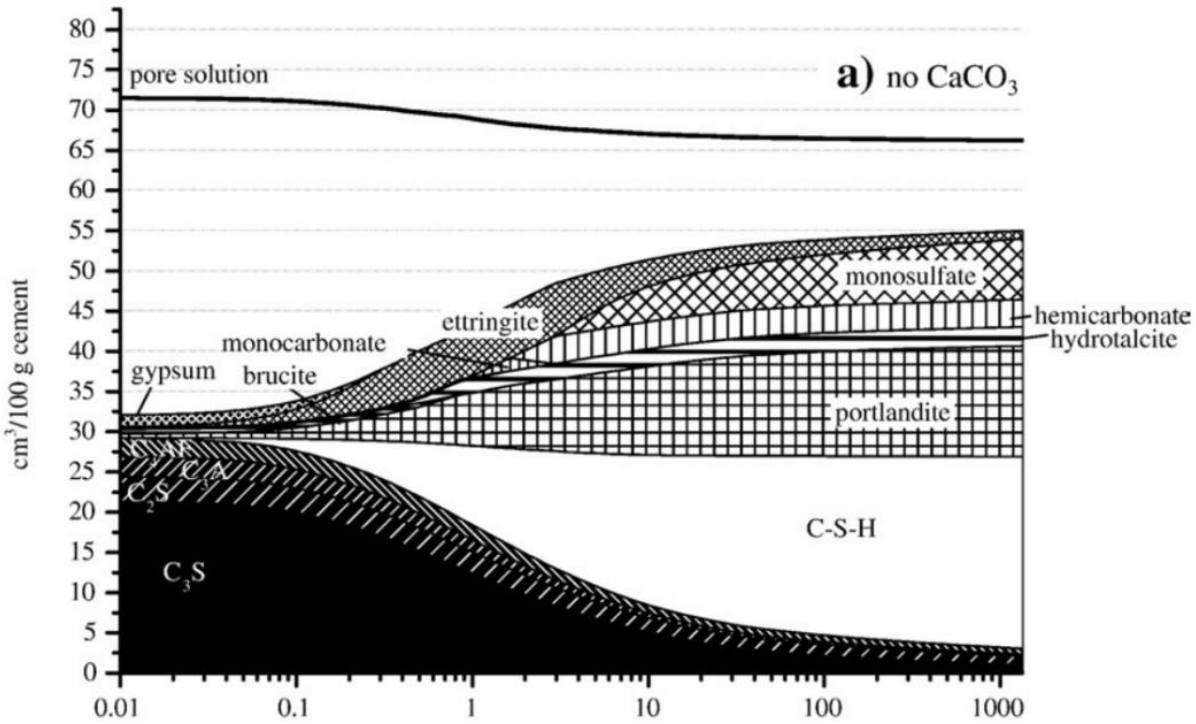
I. Rápida dissolução dos anidros do cimento e a presença de gesso controla a reação do C_3A;
II. Imediatamente há desaceleração da reação;
III. Período de dormência, onde há redução na atividade química;
IV. Pico no desenvolvimento do calor de hidratação e atividade química resulta na precipitação de C-S-H e CH pela hidratação de C_3S
V. Outra desaceleração com segundo pico que indica formação de etringita, onde todos os íons de sulfato são consumidos;
VI. Baixa atividade química, onde a maior parte de C_2S e C_4AF se hidratam. Há reação de etringita com C_3A e todo o gesso é consumido.

A Figura 5 expressa como ocorre a transformação dos compostos do cimento em hidratos em função do tempo. Lothenbach et al. (2008) descrevem que inicialmente são formados essencialmente C-S-H (silicato de cálcio hidratado), CH (hidróxido de cálcio) e Etringita, assim que o tempo avança, há a formação de outras substâncias. É possível

analisar também a perda de volume assim que se desenvolvem as reações de hidratação, denominada retração autógena (Alaskar; Hooton, 2020).

O C-S-H representa 50% a 60% do volume da pasta, sendo o principal componente para garantir as propriedades mecânicas e o CH (hidróxido de cálcio) representa 20% a 25% do volume da pasta (Anjos *et al.*, 2012). As velocidades de hidratação ocorrem de maneira diferente para cada composto do clínquer do cimento, pelas suas características de reatividade e respeitam a sequência de maior para menor reatividade, sendo C_3A, C_3S, C_2S e por fim C_4AF (Castro; Pandolfelli, 2009).

Figura 5: Transformação dos compostos de cimentos em hidratos em função do tempo

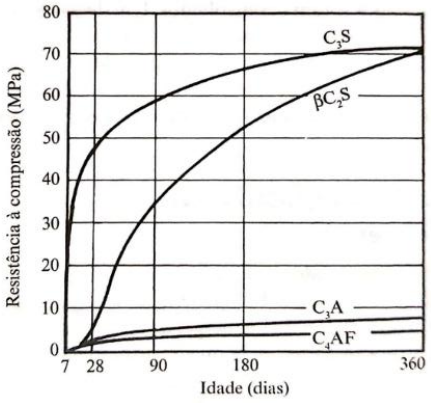


Fonte: Lothenbach et al. (2008)

O sulfato de cálcio tem um papel importante para diminuir a reação rápida desenvolvida pelo C_3A, pois este composto quando misturado com água na sua forma pura, reage imediatamente causando a “pega instantânea”. Assim, este reage com o C_3A e forma a etringita com característica insolúvel, formando uma proteção e impedindo que o aluminato tricálcico apresente reação rápida (Domone; Illston, 2010).

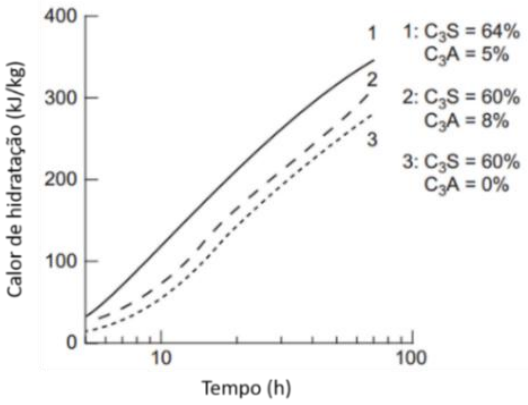
A partir das Figura 6 e Figura 7, constata-se de que maneira os componentes do cimento interferem no desenvolvimento de resistência e liberação de calor de hidratação.

Figura 6: Resistência à compressão em função do tempo para cada composto



Fonte: Neville (2016)

Figura 7: Calor de hidratação no tempo para os compostos de C_3S e C_3A



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

A reação de hidratação dos compostos C_3S e C_2S acontecem a partir das equações 8 e 9, onde H é água (H_2O) (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2006):

$$2\,C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 100 + 24 \rightarrow 75 + 49 \quad \textit{Equação 8}$$

$$2\,C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow 100 + 21 \rightarrow 99 + 22 \quad \textit{Equação 9}$$

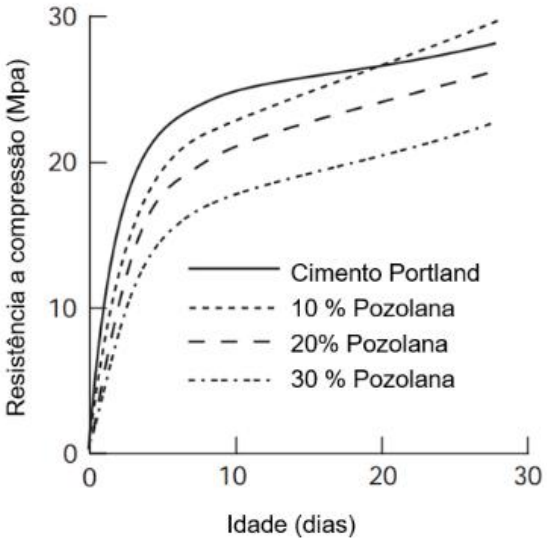
Como a hidratação é um processo exotérmico há a liberação de calor. Os valores típicos de liberação de calor dos principais compostos do cimento isolados expresso pela unidade J/g, em ordem decrescente são: C_3A (867), C_3S (502), C_4AF (419) e C_2S (260).

De acordo com Riding et al. (2012), o desenvolvimento da temperatura no processo de hidratação tem papel relevante na resistência à compressão, porosidade, permeabilidade e durabilidade no material cimentício. Finura e composição química do cimento, tipo e quantidade de aditivo, teor a/c, tipo de material cimentício suplementar (calcário, argila calcinada, escória, cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa) são parâmetros que afetam diretamente o desenvolvimento de calor e da resistência.

2.5.1 Efeito Pozolânico na Hidratação do Cimento

As adições pozolânicas propiciam ganho de resistências tardios (Figura 8), consumindo o hidróxido de cálcio (CH), conforme equação 10, o transformando em C-S-H numa reação lenta. Essa reação implica em maior compacidade da estrutura a base de cimento (preenchimento de vazios), aumentando sua durabilidade (Lapeyre; Kumar, 2018).

Figura 8: Efeito da pozolana para desenvolvimento de resistências



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

$$Pozolana + CH + H \rightarrow C - S - H \text{Equação 10}$$

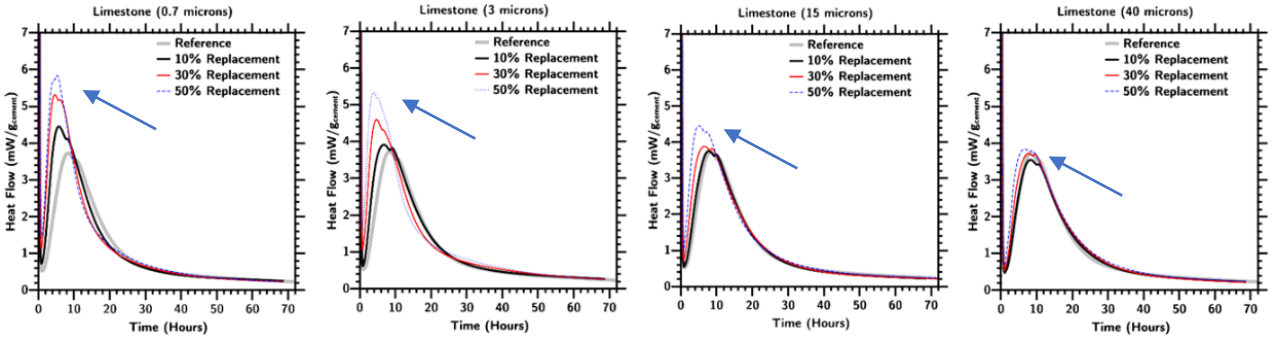
Como medida para aumentar reatividade do cimento e atender as demandas de velocidade na construção com ganhos rápidos de resistência, também é possível aumentar finura das adições pozolânicas (Zajac *et al.*, 2021).

2.5.2 Efeito Fíler na Hidratação do Cimento (Nucleação)

Na presença de fíler calcário é intensificada a taxa de reação de hidratação do Cimento Portland pela área superficial extra fornecida pelas suas partículas finas, denominado efeito fíler. Com o aumento da área superficial, pontos de nucleação são fornecidos aos compostos do cimento, favorecendo a precipitação de hidratos. Esse efeito proporciona maiores resistências iniciais e formação de maiores picos de calor de hidratação dados em mW/g de cimento (Briki *et al.*, 2021; Moon *et al.*, 2017; Oey *et al.*, 2013).

A partir da Figura 9, é possível avaliar a hidratação com cimento de referência, diferentes teores de calcário e diferentes finuras. Nota-se que com maior teor de calcário e maior área superficial propicia alta reatividade com maior pico de calor de hidratação, indicado pelas setas em azul.

Figura 9: Efeito de adição de calcário e área superficial (Efeito fíler)



Fonte: Oey et al. (2013)

Atualmente, o efeito fíler é discutido na literatura,Berodier; Scrivener (2014) realizaram estudo com diversos tipos de adição e afirmam que o efeito fíler não se resume a simplesmente a área superficial extra do calcário. A superfície do calcário em comparação a outros tipos de adição tem estrutura favorável para precipitação do C-S-H.

2.6 FINURA DO CIMENTO PORTLAND

A finura do cimento é uma característica física definida no processo de moagem do clínquer. Corresponde à área superficial externa disponível para a hidratação de todas as partículas contidas em uma unidade de massa do material (AÏTCIN; FLATT, 2015; NEVILLE, 2016). No Brasil existem ensaios normatizados para determinação da finura do cimento a destacar o método Blaine NBR 16372 (ABNT, 2015), o método da peneira n° 200 NBR 11579 (ABNT, 2012) e do peneirador aerodinâmico NBR 12826 (ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). Pelo método de ensaio Blaine determina-se a finura do cimento pela unidade (m^2/kg) a partir da lei de Stokes (Neville, 2016), sendo um ensaio bastante difundido no país e base para o controle tecnológico na indústria. Além deste ensaio, tem-se o método baseado na teoria BET (Brunauer, Emmett, Teller) para determinação da superfície específica do cimento. No entanto, no Brasil este ensaio é pouco difundido devido à demanda de equipamento de alto custo e complexidade, além de demandar tempos elevados para a obtenção dos resultados quando comparado ao Blaine (a relação é de minutos para horas).

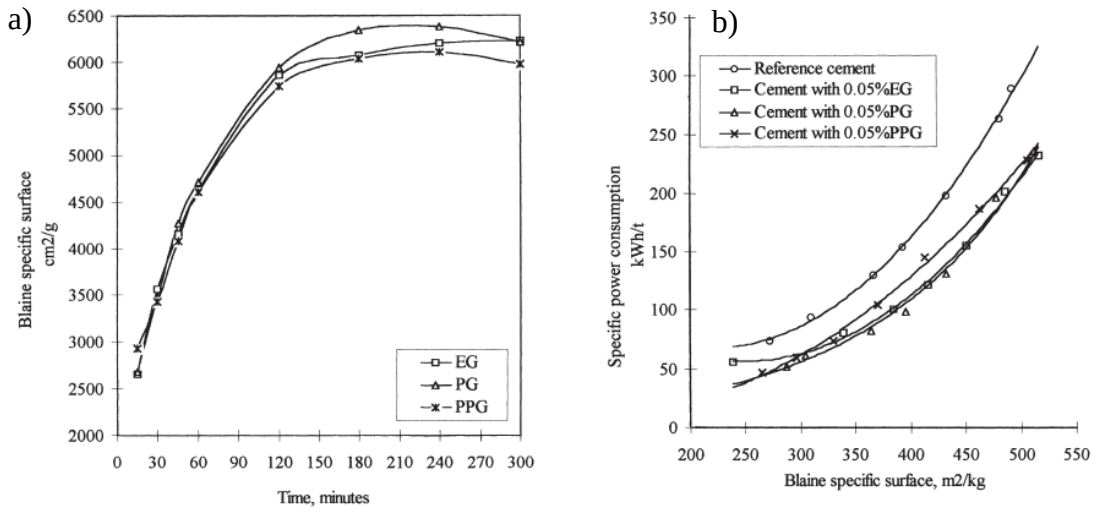
O processo de moagem consome aproxidamente 70% da energia na produção do cimento, sendo 40% para o clínquer e 30% para a produção da farinha crua (Toprak et al., 2020) (JANKOVIC; VALERY; DAVIS, 2004). Para a obtenção da finura desejada, a indústria emprega sistemas como: moinho de bolas, moinho de rolos verticais, roller milling, airflow milling, jet mil grinding (SUN *et al.*, 2013).

De acordo com Akunov (1995), o jet mill apresenta maior eficiência em 50 a 55% em termos de KW.h/ton de material processado em comparação ao moinho de bolas. A moagem do clínquer depende de fatores como: dureza do material cru, teor de umidade, finura desejada e tipo de aditivo com consumo de energia específica (Ec) em torno de 25 a 100 kW.h/ton (Assaad; Asseily; Harb, 2009). Com relação ao consumo de energia para cada material moído, tem-se os seguintes fatores de resistência a moagem, que são proporcionais a dificuldade na moagem, a ver: Clínquer Portland (5,7), Escória (5,1), Cinza Volante (4,3), Fíler calcário (3) (AKUNOV, 1995).

Para proporcionar maior eficiência na moagem, aditivos são empregados no processo de moagem visando redução no consumo energético e redução nas emissões de CO_2, os aditivos são a base de etalonaminas como: trietalonaminas (TEA), monoetalonaminas (MEA) e triisopropoanoetalanaminas (TIPA) e glicóis como: etilenoglicol (EG) e propilenoglicol (PG) e polipropilenoglicol (PPG) (Assaad; Asseily; Harb, 2009).

No estudo publicado por (JANKOVIC; VALERY; DAVIS, 2004), são realizados ensaios de moagem com aditivos EG, PG e PPG, determinou-se que para finuras menores que 3500 cm²/g tiveram aumento de 29% com PPG e somente 20% com EG ou PG. Para finuras maiores, o aumento da área específica tende a ser igual para os aditivos comparados e crescem praticamente de forma linear até 4500 cm²/g. Por fim, nota-se que para finuras maiores que 4500cm²/g, o processo consome menor energia no cimento sem o uso de aditivos. A partir da Figura 10a é possível avaliar que a partir de 5500 a 6000 cm²/g, torna-se ineficiente o processo com pouco ou nenhum ganho de finura com o tempo.

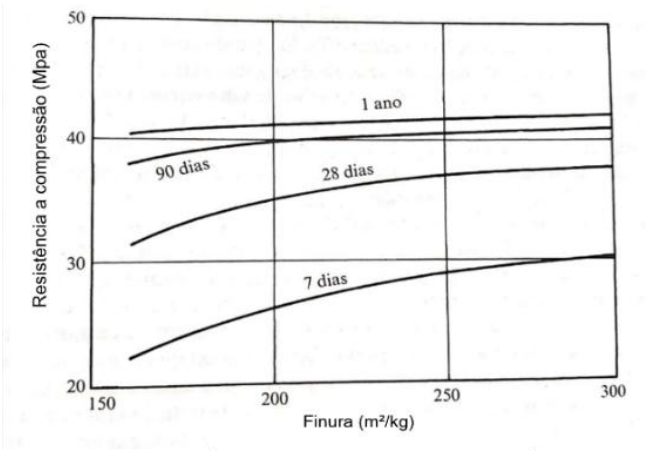
Figura 10: a) Finura Blaine por tempo de moagem e b) Consumo de energia para processo de moagem em função da finura Blaine considerando o uso de aditivos de moagem



Fonte: Jankovic, Valery e Davis (2004)

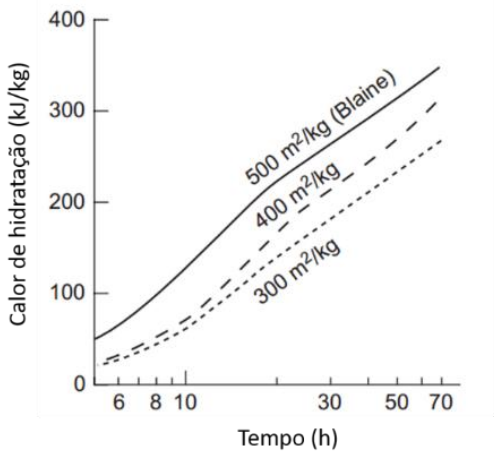
A finura do cimento afeta diretamente a sua reatividade com a água; grãos mais finos tendem a reagir mais rapidamente desenvolvendo resistência em menor tempo. Porém, com custo de gerar maior liberação de calor e maior demanda de água para mesma trabalhabilidade (HANSEN *et al.*, 2020; Tennis; Thomas; Weiss, 2011). Neville (2016) destaca que o aumento da finura faz com que haja aumento na disponibilidade de C_3A para a hidratação inicial, o composto com maior potencial de liberação de calor no processo de hidratação. Na Figura 11, tem-se que a finura é relevante nas idades iniciais, sendo que a maior finura confere maior geração de calor pelo processo de hidratação (Figura 12).

Figura 11: Desenvolvimento de resistência em função do tempo



Fonte: Neville (2016)

Figura 12: Calor de hidratação em função da finura



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

O fato da finura do cimento ter correlação direta com mais velocidade no desenvolvimento de resistência em idades iniciais, possibilita a indústria do cimento adaptar os seus produtos com maior finura no caso de redução do teor de clínquer para compensar a perda de reatividade em idades iniciais. Outros fatores como maior calor de hidratação devem ser considerados para definir a melhor solução.

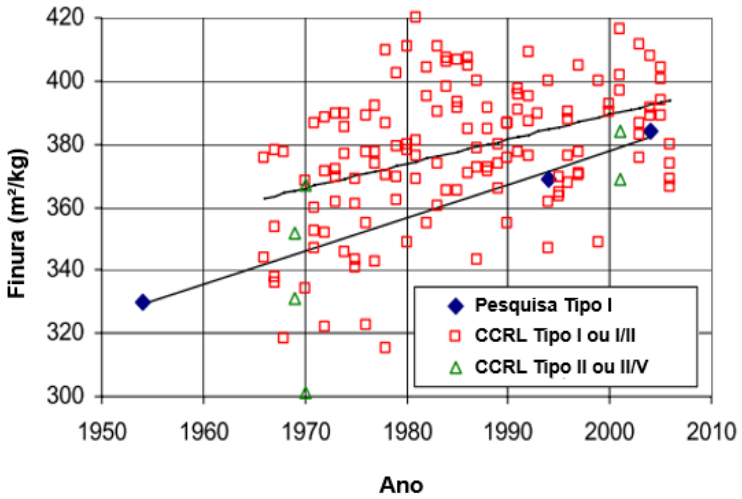
2.7 VARIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NO CIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO

De acordo com a literatura o cimento está apresentando alterações principalmente na sua finura e no teor de C_3S ao longo dos anos. Bentz, Sant e Weiss (2008) levantaram a variação temporal da finura Blaine no período de 1950 a 2010 de três tipos de cimentos utilizados nos Estados Unidos, constatou-se tendência crescente na finura com o tempo conforme mostra a Figura 13. Na legenda, para o quadrado vermelho e triângulo verde há

a sigla CCRL que é a instituição chamada "*Cement and Concrete Reference Laboratory*" onde é feito o controle nos EUA no que diz respeito a concreto e cimento, ou seja, são dados provenientes desta instituição.

Tennis and Bhatty (2005), realizaram uma pesquisa junto a 123 cimenteiras nos EUA e no Canadá de 1950 a 2004 e constataram que o teor de C_3S, a finura, a perda ao fogo e o teor de sulfato tiveram aumento no decorrer dos anos.Aïtcin (2000) afirma que os cimentos utilizados tanto nos EUA, quanto na Inglaterra, apresentaram aumento na finura e no teor de C_3S, o quais têm maior capacidade de ganho na resistência nas idades iniciais (até 28 dias).

Figura 13: Variação temporal da finura do cimento Portland nos EUA



Fonte: Bentz; Sant; Weiss (2008)

Na revisão publicada por Mehta, Burrows, 2001, foi realizada uma comparação dos cimentos de 1930 aos dias atuais, avaliando C_3S e finura, os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Variação do teor de C_3S e finura com o tempo

Período	C_3S	Finura Blaine (m²/kg)
Antes de 1930	Baixo (30%)	Baixa (185)
1930 - 1950	Não informado	Média (300)
1950 - 1980	Médio teor (50%)	Média (300)
2001	Teor maior que 60%	Alta finura (Maior que 400)

Fonte: Mehta e Burrows (2001)

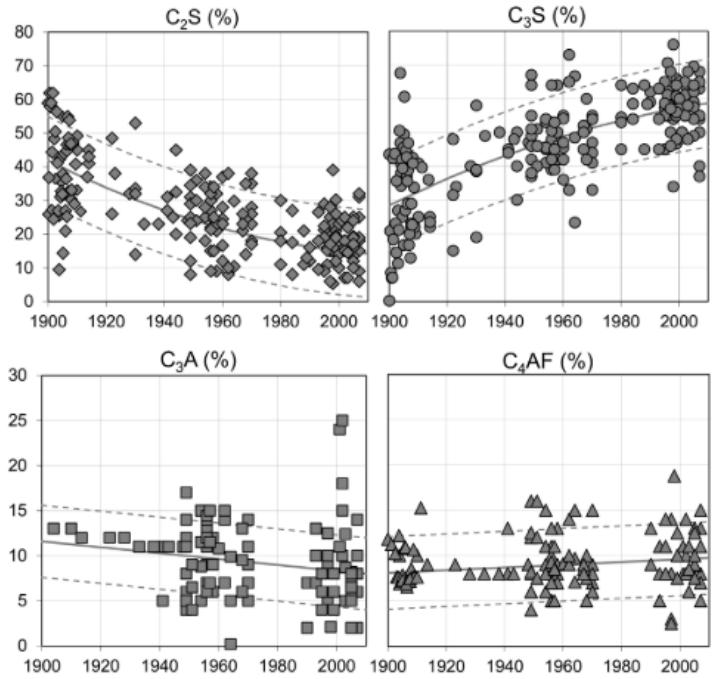
Antes de 1930 os concretos praticamente não apresentavam fissuração. No período de 1930 a 1950, comparou-se a situação da estrutura das pontes indicando que as estruturas construídas após 1930 apresentavam estado de conservação inferior às

construídas antes de 1930. Nas pontes construídas antes de 1930, 67% foram consideradas em bom estado enquanto nas estruturas pós 1930, apenas 27% foram consideradas em bom estado. No período, empregou-se a mesma metodologia construtiva e a provável causa na mais acelerada deterioração foi a alteração no cimento (aumento de finura e teor de C_3S) (Mehta; Burrows, 2001).

Os autores citam que mais tarde, de 1950 a 1980, as mudanças tecnológicas e construtivas do setor da construção como bombeamento do concreto, vibradores de concreto, desenvolvimento de aditivos redutores de água, necessidade de maiores resistências em menor tempo de aplicação do concreto, demandou mudanças no cimento. Assim o teor de C_3S passou a 50% e a finura chegou a 300m²/kg. Nos anos 2000, o teor de C_3S passa de 60% e a finura pode ser maior que 400m²/kg (MEHTA, B. Y. P. K.; BURROWS, 2001).

Na revisão realizada por Natalli et al. (2021) são discutidos dados de composição do cimento apresentado na Figura 14, coletados a partir de dados majoritariamente fora do Brasil. Nota-se tendência de aumento no teor de C_3S e redução no teor do C_2S com o objetivo de incrementar a reatividade e ganho de resistência mais rápido até os 28 dias. Ao passo que o teor de C_3A apresenta queda como medida para controlar a liberação de calor no processo de hidratação, composto com maior potencial gerador de calor. Os autores reportam aumento na finura do cimento como medida da indústria para atender demandas de velocidade e intensidade no ganho de resistência.

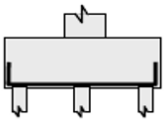
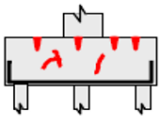
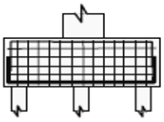
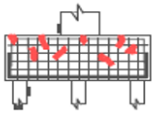
Figura 14: Variação temporal da finura do cimento Portland no Brasil e Mundo



Fonte: Natalli et al. (2021)

Thomaz (2010) afirma que no Brasil, os valores de finura para os cimentos CP- I, CP-I S e CP II E vêm aumentando desde a década de 50 e as manifestações patológicas de fissuração começaram a surgira partir da década de 70 e se tornaram mais frequentes nos anos 90. A Figura 15 exemplifica o aumento da finura e teor de C_3S/C_2S determinados por observação por Thomaz (2010) e o aparecimento de fissurações em blocos sobre estacas de concreto e as medidas corretivas de uso de armaduras nas faces do bloco. As linhas em vermelho na representação dos blocos na Figura 15 retratam o surgimento de microfissurações.

Figura 15: Relação de finura, teor de C_3S do cimento Portland e manifestações patológicas

Fissuração (representação esquemática)				
Período	1958-1975	1975-1982	1982-1992	1992-2010
Cimento da	CP I	CP I	CP I	CP II
C_3S/C_2S	2	2,4 → 2,6	2,6 → 3,0	3,0 → 3,6
Blaine (m²/kg)	320	325 → 370	370	360-400
Comentário	Sem fissuração	Surgem fissurações	Uso de armaduras nas faces dos blocos para reduzir fissuração	Aparecimento de fissurações mesmo com uso de armaduras nas faces.

Fonte: adaptado de Thomaz (2010)

Entretanto, no Brasil acerca da alteração da finura os autores Battagin, Munhoz e Battagin (2014 p. 50) salientam que “As mudanças verificadas nas últimas décadas na produção de cimento não repercutiram em alterações significativas na finura e na resistência mecânica quando se comparam o mesmo tipo de cimento”.

Em resumo, com base na revisão de literatura conduzida, para se evitar problemas de fissuração tem-se que a finura ideal do cimento Portland não deve ser superior ao limite de 350 m²/kg proposto porAïtcin, (2008) e Yang et al. (2017). A composição ideal de C_3S e C_3A somados deve girar em torno de 60 a 65%, sendo que C_3A deve ser respeitar um limite de 5% (AÏTCIN, 2008).

Contudo, as questões atuais, sobretudo relacionadas ao meio ambiente, lançam novos desafios à cadeia produtiva da construção, no que se refere ao uso de cimentos com menores teores de clínquer, uma vez que são os disponíveis no mercado com preços mais competitivos e com maior consumo a exemplo dos cimentos ensacados da classe CP II.

Para atender demandas de redução de emissões de CO_2 na cadeia de produção do cimento orientadas pelos Roadmaps nacional (SNIC, 2019) e internacional (GCCA, 2022; IEA, 2021), faz-se necessário reduzir o teor clínquer cimento. Porém para cumprir com a demanda indústria da construção por maior velocidade no ganho de resistência e redução de prazos (Bentz; Sant; Weiss, 2008), as cimenteiras tendem a produzir cimentos com maior teor de C_3S e maior finura, gerando maiores resistências em menor tempo ao custo de possível redução na durabilidade na estrutura de concreto (Aïtcin, 2000; Mehta; Burrows, 2001).

Estes cimentos podem ser mais reativos nas primeiras idades (devido à maior finura e/ou composição química), exigindo procedimentos de proporcionamento e aplicação diferenciados com vistas a evitar a elevação do consumo, emissões de CO_2 e maior frequência em manifestações patológicas associadas às mudanças do cimento, sendo este o objeto deste estudo.

3. ARTIGO

ALTERAÇÃO DA FINURA E COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS

Gabriel Werner Simoneto[1] Katia R. G. Punhagui[2] Edna Possan[3]

[1] Master student, Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Latin American Integration, UNILA, Foz do Iguaçu, Brazil | ORCID:| e-mail: gabriel.simoneto@gmail.com

2 Professor,Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Latin American Integration, UNILA, Foz do Iguaçu, Brazil | ORCID | epossan@gmail.com

3 Professor, Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Latin American Integration, UNILA, Foz do Iguaçu, Brazil | ORCID | katia.punhagui@unila.edu.br

* Corresponding author: Gabriel Werner Simoneto | gabriel.simoneto@gmail.com

HIGHLIGHTS

1. A finura Blaine dos cimentos Portland brasileiro apresentou tendência de elevação nos últimos 40 anos, sendo majoritariamente acima de 3500 cm²/g.
2. 90% dos cimentos apresentam teores de C_3S e C_3A acima do limite recomendado para questões de durabilidade.
3. Concretos produzidos in situ com cimentos de diferentes teores de clínquere finura foram estudados.
4. Cimentos com menor teor de clínquer não necessariamente indicam redução de carbono na fase de uso para concretos de resistência reduzida.
5. A redução do teor de clínquer do cimento pode reduzir a vida útil de estruturas de concreto produzidos in situ (sem controle).

RESUMO

Com base em levantamento de dados de trabalhos publicados na literatura esse estudo avalia os efeitos da redução do teor de clínquer do cimento Portland Brasileiro, quanto à finura e composição química ao longo do tempo. Pela coleta de dados primários de produção de concreto in situ, avaliou-se demanda de água e durabilidade quanto à difusão de CO_2 e cloretos para concretos produzidos com cimentos de diferentes finuras e composições. Para estudos publicados nas últimas décadas (1970 até 2023), foram levantados dados da finura Blaine e características físico-químicas (teor de fases) dos principais tipos de cimento Portland comercializados no país para análise de sua tendência no tempo. Constatou-se que com exceção do cimento CP II E, todos os cimentos brasileiros apresentam tendência de aumento da finura no tempo e estão majoritariamente acima de 3500 cm²/g. O teor de C_3S e C_3A não apresentam tendência de aumento, porém mais de 90% dos dados estão em sua maioria acima do limite de 60% e 5% para questões de durabilidade, respectivamente. Para os concretos produzidos in situ, com resistência à compressão da ordem de 20 a 25 MPa, a finura do cimento não alterou o julgamento do operador para demanda de água. Contatou-se que o cimento com menor teor de clínquer (CP II E) apresentou menor resistência média à compressão, conduzindo a resultados inferiores em termos de durabilidade à difusão de CO_2 e cloretos em comparação ao cimento com maior teor de clínquer, não atendendo a vida útil mínima de projeto de 50 anos para o estado limite de durabilidade. Os Índices de carbono e de ligante, por serem relacionados à resistência à compressão do concreto, foram maiores para o cimento com menor teor de clínquer, o que não é desejável. Constatou-se que para atender a demanda ambiental, tem-se a alternativa redução do teor de clínquer do cimento, sendo necessária a compensação da perda de resistência inicial com o aumento de finura e dos teores de C_3S e C_3A do produto. Contudo em aplicações de campo com baixo controle tecnológico na produção de concreto, como ainda ocorre no Brasil, constatou-se a redução de emissões do cimento não resulta necessariamente em um concreto menos emissivo.

Palavras-chave: Aglomerante hidráulico; Área específica; Durabilidade; Blaine; Mudanças Climáticas.

3.1 INTRODUÇÃO

A introdução do artigo será adaptada da introdução da dissertação.

3.2 MÉTODO

Este estudo é dividido em duas etapas, uma analítica de levantamento de dados de trabalhos publicados na literatura e outra experimental de coleta de dados primários de produção de concreto em campo. Na primeira, com base em estudos técnicos e científicos produzidos com cimento Portland Brasileiro publicados nas últimas décadas (1970 até 2023), foram levantados dados da finura Blaine e características físico-químicas (teor de fases) dos principais tipos de cimento Portland comercializados no país para análise de sua tendência no tempo. Com base na bibliografia, realizou-se a sistematização dos possíveis efeitos da variação da finura do cimento nas propriedades de materiais a base de cimento, especialmente aquelas atreladas à durabilidade.

Na segunda etapa, objetivou-se avaliar a percepção na demanda de água do usuário de cimento ensacado para concretos produzidos em obra com betoneira. Com isso, foram produzidos concretos com dois tipos cimento Portland ensacados para análise de indicadores de desempenho, ambientais, de durabilidade e financeiros. Foram produzidas 10 bateladas de concreto de forma intercalada, sendo 5 para cada tipo de cimento Portland (CP II Z 32 e CP V ARI RS). O concreto foi produzido no canteiro de obras com uso de betoneira com capacidade de 400L, moldado em corpos de prova e realizado ensaio de resistência à compressão aos 14, 28 e 63 dias conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.2.1 Etapa analítica: Levantamento de dados de trabalhos publicados na literatura

Nesta etapa foram coletados dados de estudos de origem brasileira, obtidos a partir da revisão bibliográfica de artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, trabalhos de conclusão de curso, bem como relatórios técnicos de cimenteiras, institutos de tecnologia ou laboratórios de controle tecnológico. Foram consideradas publicações em português e inglês, disponíveis no buscador Google acadêmico com data de publicação posterior a 1970. Os dados são oriundos de 263 pesquisas e laudos de cimenteiras do Brasil, resultando em 935 linhas de dados com finura Blaine e composição química.

3.2.1.1 Instrumento de Coleta e Tabulação de Dados da Literatura

Para a coleta de dados, foi desenvolvido um instrumento em formato de tabela estruturada (Figura 16), dividida em quatro grupos de coleta de informações: a) identificação do trabalho; b) características físicas; c) características químicas; e, d) rastreabilidade do estudo.

Figura 16: Cabeçalho do Instrumento de coleta de dados

Parte a - Identificação do trabalho

Nº	Ano	Autor	Estado	Título do(a) Paper/Dissertação/Tese/Artigo/Tcc

Parte b – Características físicas

Tipo de cimento	Resistência	Observação (ARI/RS)	Finura Blaine (cm^2/g)	Massa Específica (g/cm^3)

Parte c – Características químicas

Composição química (%, óxidos)												
CaO	CaO Livre	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	CO_2	P_2O_5	TiO_2	MnO

Parte c – Características químicas (continuação)

Compostos químicos (fases)						Ensaio Químico	
C_3S	C_2S	C_3S/C_2S	C_3A	C_3S+C_3A	C_4AF	PF	RI

Parte d – Rastreabilidade

Link do Trabalho	Responsável pela coleta de dados	Responsável pela Conferência

O instrumento de coleta de dados, desenvolvido no software Excel foi previamente testado[4], estando configurado para evitar falhas (com caixa de seleção etc.). Ao final da coleta foi conduzida a tabulação e agrupamento de dados no software Excel. O banco de dados foi separado conforme o tipo de cimento indicado na ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018).

3.2.1.2 Análise de dados da finura e composição do cimento

A partir dos dados tabulados foram plotados os respectivos gráficos de dispersão para as variáveis finura Blaine x tempo, avaliando-se a tendência linear. Na variável contínua tempo foi considerado o ano da publicação da pesquisa, sendo assim há uma defasagem temporal em relação ao ano de produção do cimento. O ano de aquisição do cimento não é informado pelo autor da publicação, o que impossibilitou com o método de

[4] O teste foi conduzido junto aos alunos matriculados na disciplina de ciência dos materiais aplicada aos materiais de construção do PPGECI da Unila em abril de 2019.

coleta de dados adotado no estudo, a rastreabilidade desta informação.

Para o cálculo dos compostos foi empregada a equação de Bogue (equação 11 a 14) que permite por meio de relações matemáticas determinar as quantidades de C_3S, C_2S, C_3A e C_4AF. Esta etapa foi aplicada para os cimentos sem adições pozolânicas (CP II F e CP V), devido às limitações da equação de Bogue.

$$\%C_3S = 4{,}071\ CaO - 7{,}6SiO_2 - 6{,}718Al_2O_3 - 2{,}85SO_3 \qquad \textit{Equação 11}$$

$$\%C_2S = 2{,}867SiO_2 - 0{,}7544C_3S \qquad \textit{Equação 12}$$

$$\%C_3A = 2{,}65Al_2O_3 - 1{,}692Fe_2O_3 \qquad \textit{Equação 13}$$

$$\%C_4AF = 3{,}043\ Fe_2O_3 \qquad \textit{Equação 14}$$

Os dados tabulados foram analisados considerando tendências de crescimento, estagnação ou decréscimo da finura em relação ao tempo assim como da composição química. Foram calculadas e analisadas as estatísticas dos dados coletados, a ver: mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão, variância e coeficiente de variação.

No banco de dados de finura foi verificado quanto aos “outliers”, sendo adotado o método do boxplot ou amplitude interquartil (IQR), onde valores que estão acima ou abaixo dos limites superior ou inferior são considerados outliers ou valores atípicos e são eliminados para avaliação do seu impacto na análise (Valladares Neto *et al.*, 2017). As equações utilizadas são as seguintes (15,16 e 17):

$$IQR = Q3 - Q1 \qquad \textit{Equação 15}$$

$$Lsup = Q3 + 1{,}5 * IQR \qquad \textit{Equação 16}$$

$$Linf = Q1 - 1{,}5 * IQR \qquad \textit{Equação 17}$$

Onde:

IQR = Intervalo interquartílico

Q3 = Quartil superior onde se localizam 75% dos maiores valores

Q1 = Primeiro quartil ou quartil inferior onde se localizam 25% dos menores valores

Lsup = Limite superior ou valor máximo do conjunto de dados

Linf = Limite inferior ou valor mínimo do conjunto de dados

3.2.2 Etapa experimental: Coleta de dados primários de produção de concreto em campo

Nesta etapa fez-se a coleta de dados primários de produção de concreto produzidos com dois tipos de cimento Portland ensacados de finura variada, a fim de

avaliar a percepção do usuário quanto à demanda de água, assim como a coleta e análise de indicadores de desempenho, ambientais, de durabilidade e financeiros.

O concreto estudado foi produzido em betoneira no canteiro de obras, proporcionado em volume, sem emprego de aditivos. O cimento ensacado geralmente é empregado em concretagens de pilares e pisos de obras residenciais unifamiliares ou para a produção de elementos como vergas e contravergas.

3.2.2.1 Caracterização dos Materiais

As matérias-primas utilizadas nesta etapa foram os cimentos CP II Z 32, CP V ARI RS (de um mesmo fabricante), areia quartzosa de rio e agregado graúdo basáltico. O cimento CP II Z 32 resultou em finura Blaine de 3590 cm²/g, massa específica de 2,99 g/cm³ e massa unitária de 0,91g/cm³. O cimento CP V ARI RS resultou em Blaine de 4880 cm²/g, massa específica de 3,02 g/cm³ e massa unitária de 0,81 g/cm³. A caracterização dos agregados miúdo e graúdo estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 6: Caracterização física do cimento Portland CP II Z 21 e CP V ARI RS

Descrição	Cimento CP II Z 32	Cimento CP V ARI RS
Finura Blaine (cm^2/g)	3590	4880
Massa específica (g/cm^3)	2,99	3,02
Massa unitária (g/cm^3)	0,91	0,81

Tabela 7: Caracterização de Agregado miúdo e graúdo

	Abertura da Peneira	Areia Rio Iguaçu	Brita
% Retida acumulada	38,00	-	-
	19,00	-	4,92
	9,50	-	85,09
	4,75	-	97,87
	2,36	0,15	-
	1,18	0,84	-
	0,60	5,48	-
	0,30	50,65	-
	0,15	95,06	-
Módulo de Finura		1,52	-
Massa Específica ($g.cm^{-3}$)		2,59	2,92
Massa Unitária ($g.cm^{-3}$)		1,54	1,57
Inchamento		1,49	-
Umidade Crítica (%)		2,55	
Dmáx característico (mm)			19,00

3.2.2.2 Planejamento Experimental e produção dos concretos

O estudo foi realizado em dois dias consecutivos, empregando-se 5 (cinco) sacos de cimento por dia, totalizando 10 bateladas (Tabela 8). Foram empregados dois tipos de cimento e usados de forma intercalada até totalizar 10 bateladas. Utilizou-se a mesma proporção de materiais para produção de concreto com variação no teor de água. Para a mistura do concreto empregou-se uma betoneira 400L, rotação do tambor 30rpm. Para a medição do consumo de água na mistura do concreto, empregou-se um recipiente de 18 litros como referência. A correção da água utilizada em cada mistura foi realizada com o uso de recipiente com capacidade de 1 litro até o julgamento do operador com relação a percepção visual da trabalhabilidade do concreto. Para o julgamento do operador não ser influenciado pela embalagem do cimento, o responsável pela colocação do cimento na betoneira era distinto do responsável pela verificação da trabalhabilidade e controle da correção de água na mistura. Fez-se a correção do volume de água pela umidade da areia, no primeiro dia a areia apresentou umidade de 3% e no segundo 6%. Realizou-se a correção de volume de material pelo inchamento da areia obtido no valor de 1,49.

Tabela 8: Tabela de dosagem dos concretos produzidos em campo

Tipo de cimento	**CP V ARI RS**					**CP II Z 32**				
Batelada	**1**	**3***	**5**	**7**	**9**	**2**	**4**	**6***	**8**	**10**
Cimento (kg)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Areia (kg)	115	92	115	112	112	115	115	112	112	112
Brita (kg)	187	187	187	197	197	187	187	197	197	197
Água (kg)	45	35	42	38	39	42	42	43	38	39
Slump (mm)	217	223	163	193	190	210	175	178	198	197
Fator a/c	0,9	0,7	0,84	0,76	0,78	0,84	0,84	0,86	0,77	0,79
Cc (kg/m³)	293,6	330,9	298,9	302,4	300,1	298,4	298,7	292,9	301,2	299,2

Obs: A proporção em volume foi de 1:5:6 (1 saco de cimento: 5 volumes de areia e 6 volumes de brita). O recipiente de referência tem capacidade de 18L. Cc é o consumo de cimento.
* As bateladas 3 e 6 apresentaram valores atípicos de consumo de cimento e resistência à compressão, porém foram mantidas, uma vez que essa variabilidade é inerente ao processo de produção em obra utilizando dosagem por volume. Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015), essa forma de preparo tem desvio padrão de 7,0.

Foram moldados 90 corpos de prova para avaliação de resistência à compressão com 14, 28 e 63 dias. Em cada batelada foram produzidos 9 corpos de prova. Com isso foram determinados indicadores de desempenho, ambientais, de durabilidade e financeiros. O experimento foi realizado a partir de 10 etapas, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Etapas da coleta e análise de dados obtidos em campo

Etapa	Descrição	Local
1	Ensaio de Finura Blaine para cimento CP II Z 32 e CP V ARI RS para constatar diferença de finura. Caracterização do cimento e agregados.	Laboratório
2	Determinação de traço usual de obra com operários (experiência empírica). Traço por volume: 1 saco de cimento de 50 kg: 5 volumes* de areia: 6 volumes de brita 1 e 1,5 volumes de água.	Campo
3	Uso de dois tipos de cimentos (CP II Z 32 e CP V ARI RS) de forma intercalada entre as bateladas.	Campo
4	Correção de volume de água de litro em litro com béquer até aceitação visual do operário para determinar a percepção sobre o consumo de água para cada tipo de cimento	Campo
5	Execução de ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test) conforme NBR 16889 (ABNT, 2020) do concreto após validação visual do operário da consistência em betoneira.	Campo
6	Moldagem de 9 corpos de prova para cada batelada e ensaio de resistência à compressão 14, 28, 63 dias, sendo 3 exemplares para cada idade em cada batelada.	Campo
7	Identificação e armazenamento conforme NBR 5738 (ABNT, 2016)	Campo
8	Determinação de resistência à compressão para 14, 28 e 63 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018)	Laboratório
9	Análise de resultados e indicadores comparando os cimentos utilizados, com ênfase em desempenho mecânico, ambiental e durabilidade.	Escritório

*A unidade volumétrica empregada foi um recipiente cilindro de 18 L.

3.2.2.3 Avaliação da resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) para as idades 14, 28 e 63 dias, em máquina Universal de ensaios modelo Torsee 200tf Classe I, em triplicada.

3.2.2.4 Indicadores de ecoeficiência, durabilidade e custos

Para a análise dos indicadores, realizou-se o cálculo do consumo de cimento em kg/m³ com base no proporcionamento de cada batelada apresentado na Tabela 8. O cálculo de emissões mínimas e máximas realizou-se com base na faixa de clínquer da Tabela 2. Para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS e considerou-se a emissão específica de clínquer de 0,830 t.CO_2/t.clínquer (BELIZARIO-SILVA; F. OLIVEIRA; JOHN, 2022; GCCA, 2022). Com os resultados, determinou-se o índice de ligantes (IL) pela equação 18 e o índice de carbono (IC) pela equação 19.

$$IL = \frac{Cc}{Fcj} \quad \textit{Equação 18}$$

Onde:

IL= índice de ligantes em $kg.m^{-3}.MPA^{-1}$

Cc= consumo total de ligantes (cimento) no concreto em kg/m³

Fcj= Resistência à compressão do concreto em MPa com idade de j dias.

$$IC = \frac{Ec}{Fcj} \quad \textit{Equação 19}$$

Onde:

IC= índice de carbono em $kgCO_2.m^{-3}.MPA^{-1}$

Ec=Total de emissões de CO_2 em kg/m³

Fcj= Resistência à compressão do concreto em MPa com idade de j dias.

Para o cálculo de Ec (Eq. 20) foram utilizados fatores de emissão dos materiais utilizados para a produção do concreto que consiste no cimento, onde considerou-se o processo de produção do clínquer e o gasto energético associado a produção e os agregados areia e brita. Os dados são provenientes do banco de dados do SIDAC e Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação e são apresentados na Tabela 10.

$$E_c = E_{clínquer} \cdot \%_{clínquer} + Energia_{cimento} \cdot E_{energia} + m_{areia} \cdot E_{areia} + m_{brita} \cdot E_{brita} \quad \textit{Equação 20}$$

Onde:

Ec = emissão específica para produção de concreto em $kgCO_2.m^{-3}$

Eclínquer= emissão associada a produção de clínquer em $kgCO_2.kgclínquer^{-1}$

% clínquer = percentual mínimo ou máximo conforme Tabela 2.

Eareia = emissão associada a produção da areia em $kgCO_2.kg^{-1}$

Ebrita = emissão associada a produção da brita em $kgCO_2.kg^{-1}$

Eenergia = emissão associada a produção da energia no Brasil em $kgCO_2.kWh^{-1}$

Energiacimento = emissão associada a produção do cimento em $kWh/kg.cimento^{-1}$

Mareia = massa de areia em kg

Mbrita = massa de brita em kg

Tabela 10: Emissões específicas dos componentes do concreto

Material	Emissão específica	Fonte
Eclínquer	0,830 $kgCO_2$/kg.clínquer	(BELIZARIO-SILVA; F. OLIVEIRA; JOHN, 2022)
%clínquer	Mínimo e máximo do CPadotado	NBR 16697 (ABNT, 2018)
Eareia	12,5 $kgCO_2$/ton	(SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022)
Ebrita	4,67 $kgCO_2$/ton	(SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022)
Eenergia	0,35 $kgCO_2$/kWh	(MCTI, 2024)
Energiacimento	0,051 kWh/kg.cimento	(BELIZARIO-SILVA; F. OLIVEIRA; JOHN, 2022)

A avaliação da durabilidade foi conduzida por meio de modelos de estimativa da difusão de CO_2 e de íons cloretos no concreto, propostos por Possan et al (2021) e de Andrade; Possan; Dal Molin (2017), respectivamente, destinados à modelagem do período de iniciação da corrosão, equivalente à vida útil de projeto da construção ou estado limite de durabilidade (ELD), conforme ISO 13823 (2008).

Para avaliação da durabilidade, empregou-se o modelo de determinação da profundidade de carbonatação da equação 21 proposto por Possan et al (2021), onde são variáveis para determinação da carbonatação: resistência à compressão, tipo de cimento, tipo de MCS, teor de CO_2 no ambiente, condição de exposição, tempo e umidade relativa. Os parâmetros para aplicação da equação 21 estão apresentados na Tabela 11.

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot exp\left[\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40+f_c} + \frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60+f_c} - \frac{k_{RH} \cdot (RH-0{,}68)^2}{100+f_c}\right] \cdot k_{ce} \quad \textit{Equação 21}$$

Onde:

y= profundidade de carbonatação média do concreto, em mm.
fc= resistência à compressão, em MPa.
kc= fator em função do tipo de cimento.
kfc= fator da resistência à compressão de concretos pelo tipo de cimento.
t= tempo, em anos.
ad= adição pozolânica em % da massa de cimento.
kad= fator em função do tipo de adição pozolânica.
RH= umidade relativa, em %.
krh= fator da umidade relativa em função do tipo de cimento.
CO_2= teor de CO_2 atmosférico, em %.
kCO_2= fator do CO_2 atmosférico em função do tipo de cimento.
kce= fator da condição de exposição da estrutura.

Tabela 11: Coeficientes do modelo de Possan et al (2021) para a equação 21

Tipo de cimento	Característica do concreto			Condição ambiental	
	Cimento	Fc	SCM	CO_2	RH
	Kc	Kfc	Kad	Kco_2	krh
CP I e CP V ARI	33,27	1,70	0,32	15,5	1000
CP II E	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II F	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,0	0,32	15,50	1300
CP IV	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
Condição de Exposição da Estrutura				Coeficiente (Kce)	
Interno protegido				1,30	
Externo protegido da chuva				1,00	
Externo desprotegido da chuva				0,65	

Para a avaliação da difusão de cloretos, empregou-se o modelo de Andrade; Possan; Dal Molin (2017), cujas variáveis de entrada são: resistência à compressão, tipo de cimento, tipo de MCS, teor de cloretos no ambiente, condição de exposição, tempo e umidade relativa. O modelo emprega a equação 22 e os fatores apresentados na Tabela 12.

$$y_{cl} = \frac{7{,}35\ .UR^{0,7}.T^{0,1}.Cl^{0,7}}{K_1.f_{ck}\ .K_2\ .(1+Ad\ )^{0,2}}\ x\ \sqrt{t} \quad \textit{Equação 22}$$

Onde:
ycl= profundidade de penetração da frente de cloretos em mm.
UR= umidade relativa da atmosfera, em %.
T= temperatura ambiente, em ºC.
K1= fator em função do tipo de cimento.
K2= fator em função do tipo de MCS.
Fck= resistência à compressão (MPa).
Ad= teor de MCS em %.
t= tempo, em anos.
Cl = Clcimento na equação 23

Tabela 12: Valores de K_1e K_2 em função do tipo de cimento e tipo de adição

Tipo de cimento	K_1	Tipo de adição	K_2
CP II E	0,98	Sílica ativa	1,00
CP II F	1,00	Metacaulim	0,97
CP II Z	1,05	Cinza de Casca de Arroz	0,76
CP III	1,21		
CP IV	1,17		
CP V ARI	0,95		

$$Cl_{cimento} = \frac{Cl_{ambiente} \cdot Ab_h \cdot \gamma_c}{C} \cdot 0{,}01 \qquad \textit{Equação 23}$$

Onde:
Clcimento = concentração superficial de cloretos em relação à massa de cimento em %
Clambiente = concentração de cloretos do ambiente.
Abh = absorção máxima de água do concreto em %.
γc = massa específica do concreto (kg/m^3).
C = consumo de cimento no concreto (kg/m^3)

Os modelos fornecem resultados de durabilidade em termos de anos de vida útil e de espessura de penetração do agente agressivo (CO_2 ou íon cloreto), empregando dados de entrada de fácil obtenção como tipo de cimento e resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Para as simulações, foram considerados os seguintes cenários: para a carbonatação foram consideradas as resistências médias à compressão com 28 e 63 dias para o cimento CP II Z e CP V ARI RS, sem adição, idade de estrutura de 50 anos, cobrimento de 30mm, teor ambiental de CO_2 de 0,04%, umidade de 72% e condição de externo protegido e interno. Para simulação da penetração de cloretos no concreto foram consideradas as mesmas condições, exceto o cobrimento de 40mm, temperatura considerada de 25ºC, teor de cloretos ambiental de 1,5%, absorção máxima de água no concreto de 5,5%, consumo médio para cada tipo de cimento e massa específica do concreto de 2500 kg/m³. Conforme NBR 6118 (ABNT, 2023) o cobrimento de 30mm é considerado para ambiente com classe de agressividade II (urbano) e 40mm para ambiente com classe de agressividade III (marinho).

Para análise de custos tomou como base o preço unitário do saco de 50kg do cimento CP II Z 32 no valor de R$ 36,50 e R$ 44,90 para o CP V ARI RS, para a areia e brita na região de Foz do Iguaçu o custo de R$ 200,20/ton e R$ 139,70/ton, respectivamente. O custo do crédito de carbono pode variar em dólares entre U$1,00 a U$ 100,00 por tonelada de CO2 emitido a depender do tipo de atividade, a média considerada é de U$ 10,00 por tonelada de CO_2 com base no mercado voluntário (MCKINSEY, 2024). O câmbio do dólar americano considerado em R$ 6,00 por dólar americano. A areia e brita normalmente são comercializadas em m³ e converteu-se em massa a partir da massa unitária para os cálculos de custo de concreto. Com isso, calculou-se o custo por m³ de concreto pela equação 23 e o custo por MPa pela equação 24.

$$C_v = \frac{C_c . PU_c}{50} + PU_a . m_{areia} + PU_b . m_{brita} + E_{cm} . C_{CO2} . Co \qquad Equação\ 24$$

Onde:

Cv= custo por m^3 de concreto produzido em R$/m³.

Cc= consumo total de ligantes (cimento) no concreto em kg/m³.

PUc= preço unitário do saco de cimento 50kg em R$.

PUa = preço unitário da areia em kg.

mareia = massa da areia em kg.

PUb = preço unitário da brita em kg.

Mbrita = massa da brita em kg.

Ecm = emissão específica média em ton.CO_2/m³.

C_{CO2} = custo do crédito de carbono em R$/ton.$CO_2$.

Co= cotação de U$ para R$.

$$C_{Rj} = \frac{C_v}{Fcj} \qquad Equação\ 25$$

Onde:

Crj = custo por MPa de concreto produzido em R$/MPa com idade de j dias.

Cv= custo por m^3 de concreto produzido em R$/m³.

Fcj= Resistência à compressão do concreto em MPa com idade de j dias.

3.3 RESULTADOSE DISCUSSÕES

3.3.1 Etapa analítica

3.3.1.1 Finura do Cimento Portland

O resultado do banco de dados para a finura Blaine em função do tempo e as estatísticas dos dados para os cimentos Portland brasileiro (CP I, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV e CP V ARI) oriundo de dados de estudos publicados na literatura nacional e internacional é apresentado na Figura 17 e Tabela 13. Na Figura 17 apresentam-se todos os dados coletados da pesquisa em gráficos separados por tipo de cimento brasileiro normatizado e a tendência no tempo. Observa-se no gráfico geral, representando todos os cimentos, que há uma dispersão dos dados, com coeficiente de variação na ordem de 10%.

Observa-se que existem dois grupos distintos de dados, antes de 1985 com dados

somente do cimento CP I e depois de 1990 com os todos os cimentos utilizados atualmente. Isso é explicado em partes pela menor disponibilidade de estudos publicados no período e pela introdução dos cimentos CP II E, F e Z apenas no ano de 1991, dada a publicação de normas técnicas específicas que vigentes até 2018. Com relação à tendência da finura em relação ao tempo, é notado aumento para todos os cimentos, exceto o CP II E que apresenta estabilidade. Esse fato pode ser explicado pela maior moagem do clínquer ou pelo maior emprego de materiais cimentícios suplementares (MCS) a fim de reduzir o clínquer contido no cimento para atendimento das metas de redução de missões dos gases do efeito estufa. Esse fator além de reduzir as emissões de CO_2, reduz o custo de produção do cimento tornando o material mais competitivo. Em contraponto, Battagin, Munhoz, Battagin (2014) afirmam que a finura do cimento brasileiro não está aumentando, e que a elevação do consumo de cimento de alta resistência inicial (CP V ARI) e de cimentos com maiores teores de MCS gera a percepção da maior finura do material. Contudo, ao observar os dados da finura Blaine ao longo do tempo, é notável a elevação desta propriedade para todos tipo de cimento, com destaque para o cimento CP II F 40. Na Figura 18 são apresentados os histogramas com as frequências absolutas de cada tipo de cimento e de todos os cimentos combinados, nota-se que a maior parte dos dados (48%) estão concentrados na faixa de 3.882 a 4.738 cm2/g.

Tabela 13: Estatísticas dos dados coletados de finura Blaine dos cimentos brasileiros

Tipo/Estatística	CP I	CP II E	CP II F	CP II Z	CP III	CP IV	CP V
Mín	2170	3280	3189	3350	3390	3280	3950
Max	4300	4560	4930	5920	4770	6450	6003
Média	3.199,23	3.894,00	3.904,82	4.217,94	4.152,63	4.473,90	4.780,81
Mediana	3.130,00	3.900,00	3.853,00	4.250,00	4.120,00	4.450,00	4.798,00
Desvio Padrão	407,19	296,02	543,51	572,15	322,43	433,38	399,03
Variância	165.804,27	87.629,31	295.403,42	327.353,80	103.961,36	187.816,17	159.226,75
CV (%)	12,73%	7,60%	13,92%	13,56%	7,76%	9,69%	8,35%
Amostras (<3500)	144 (74,6%)	5 (15,2%)	14 (31,1%)	4 (5,6%)	1 (2,9%)	3 (0,8%)	0
Amostras 3500 a 4000	41 (21,2%)	15 (45,5%)	10 (22,2%)	24 (33,3%)	7 (20%)	33 (9,1%)	4 (2%)
Amostras (4000 a 4500)	8 (4,1%)	11 (33,3%)	12 (26,7%)	23 (31,9%)	20 (57,1%)	172 (47,6%)	51 (26%)
Amostras (4500 a 5000)	0	2 (6,1%)	9 (20%)	15 (20,8%)	7 (20%)	114 (31,6%)	79 (40,3%)
Amostras (> 5000)	0	0	0	6 (8,3%)	0	39 (10,8%)	62 (31,6%)
Tendência no Tempo*	**C**	**E**	**C**	**C**	**C**	**C**	**C**

C – Crescente, D – Decrescente, E – Estável

* Tendência no tempo: é definida pela inclinação da reta nos gráficos pelo método dos mínimos quadrados contidos na **Figura 17**

Figura 17: Finura Blaine para diferentes cimentosbrasileiros em função do tempo

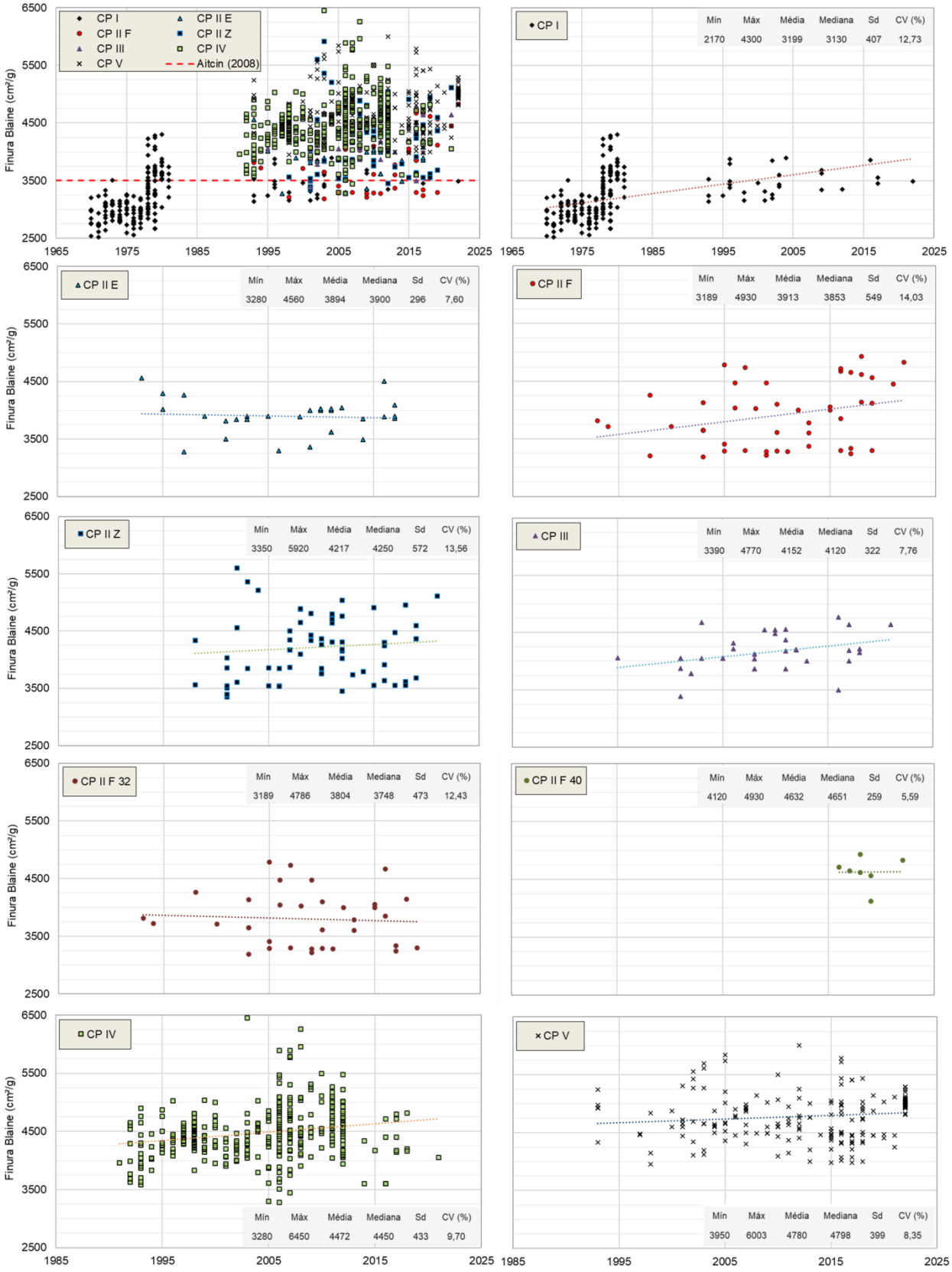
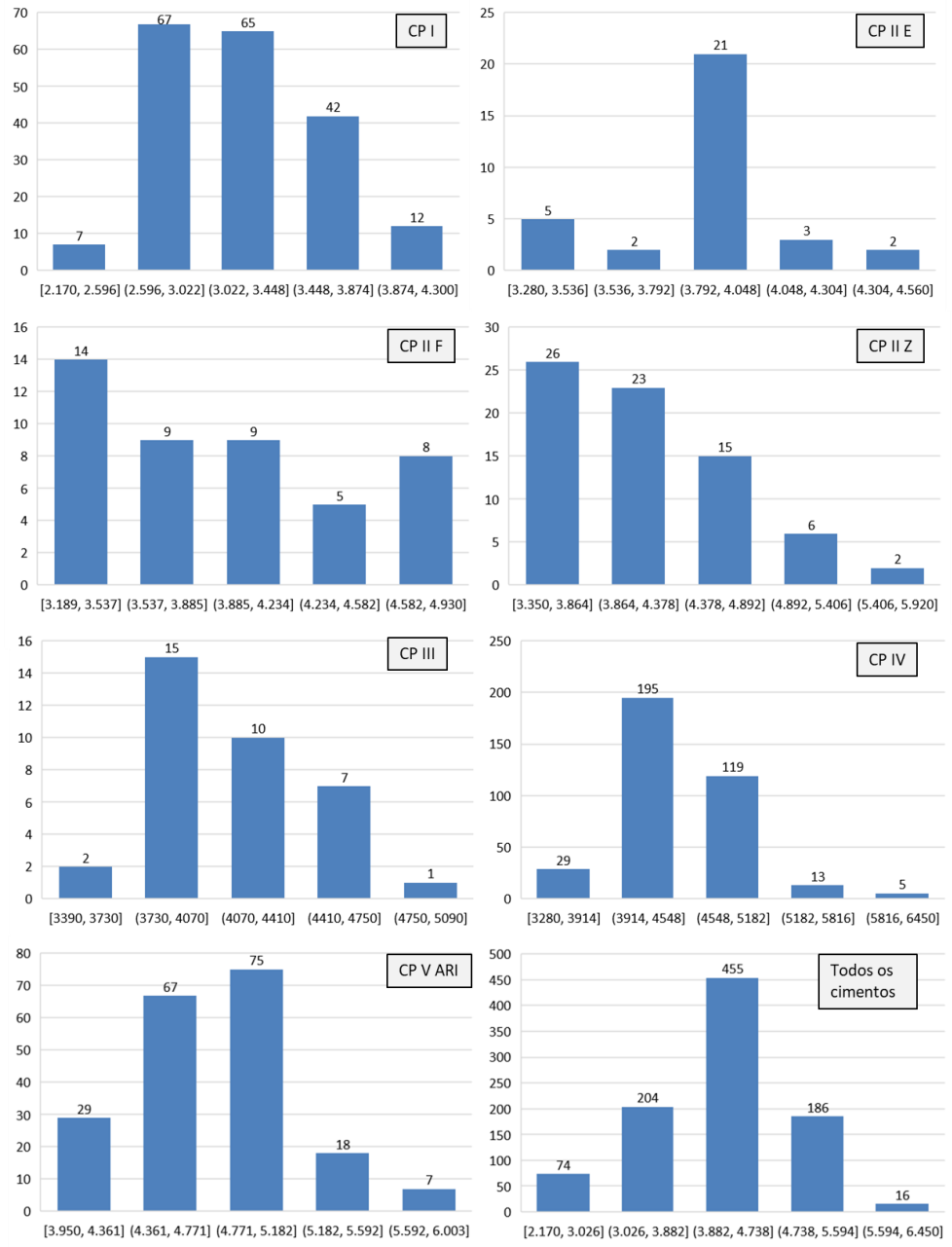


Figura 18: Frequência absoluta para tipo de cimento em função da finura Blaine em cm^2/g



O cimento CP II F é dividido em dois tipos, conforme resistência média aos 28 dias. O CP II F 32 é comercializado na forma ensacada enquanto o CP II F 40 geralmente é comercializado à granel, voltado para o mercado de concreteiras e pré-fabricação. O CP II F 40 foi inserido no mercado mais recentemente, não existindo dados de aplicações até 2016 registrada no banco de dados desta pesquisa. Com a mudança da normativa em 2018, permitiu-se a adição de até 25% de fíler calcário. Contudo, para balancear a perda de material reativo (clínquer) e garantir o mesmo nível de ganho de resistência aos 28 dias, é necessário que o cimento seja mais reativo, o que pode ser conseguido através da

alteração física e/ou química com aumento de finura e/ou teor de C_3S no cimento. Nota-se através da Figura 17 que a média de finura do CP II F 40 é mais elevado que do CP II F 32 e apresentou valores acima de 4500 cm²/g depois de 2015.

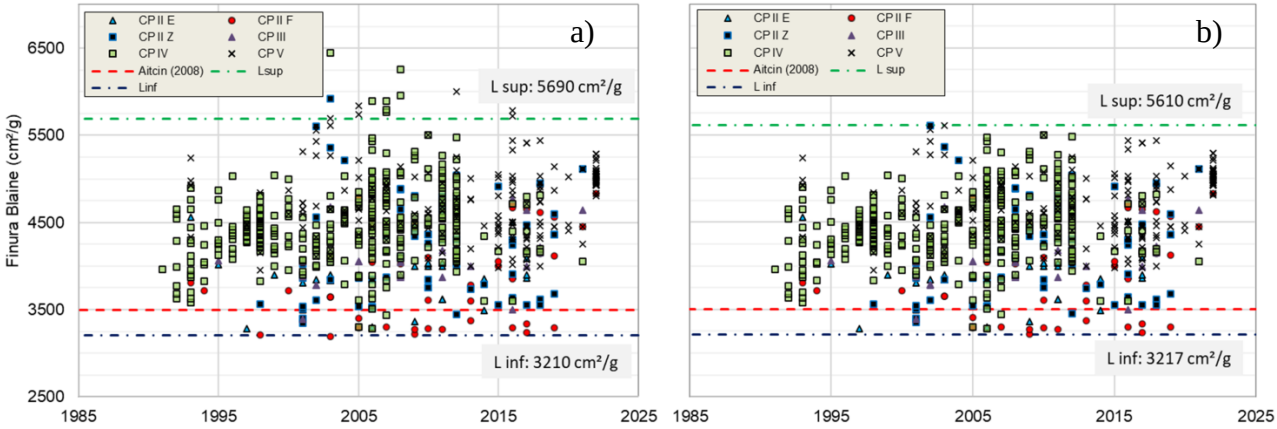
Em relação ao aumento da finura do cimento advir dos MCS empregados, com a avaliação pela finura Blaine do cimento não é possível aferir se variação da área superficial advém da maior moagem do clínquer ou das adições empregadas na composição dos diferentes cimentos. Como o cimento é misturado na indústria, não há como aferir a superfície das partículas em função do tipo de material que o compõe.

Considerando os fatores de resistência a moagem, que são proporcionais a dificuldade na moagem e ao consumo energético associado no processo, a ver: Clínquer Portland (5,7), Escória (5,1), Cinza Volante (4,3), Fíler calcário (3) (AKUNOV, 1995). Pode-se inferir que a indústria tende a aumentar a finura dos MCS com menor custo energético no lugar do clínquer. Essa estratégia pode fazer o concreto se beneficiar em ganhos mais rápidos de resistência com efeito da nucleação dos fíler (Berodier; Scrivener, 2014) e reação mais acelerada de materiais pozolânicos mais finos (Kadri *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2018) .

O cimento Portland deve apresentar limite na finura de 3500 cm²/g para apresentar menor probabilidade de manifestações patológicas relacionadas à intensidade de retração plástica e pico no calor de hidratação (AÏTCIN, 2008; YANG et al., 2017b). De acordo com as estatísticas da Tabela 13, calculadas a partir do banco de dados de estudos publicados na literatura, tem-se que 81,7% dos dados estão acima do limite de 3500 cm²/g. Somente 18,3% está abaixo do indicador de3500 cm²/g. Os cimentos CP IV e CP V são os cimentos com maior média de finura no valor de 4473 e 4780cm²/g, respectivamente.

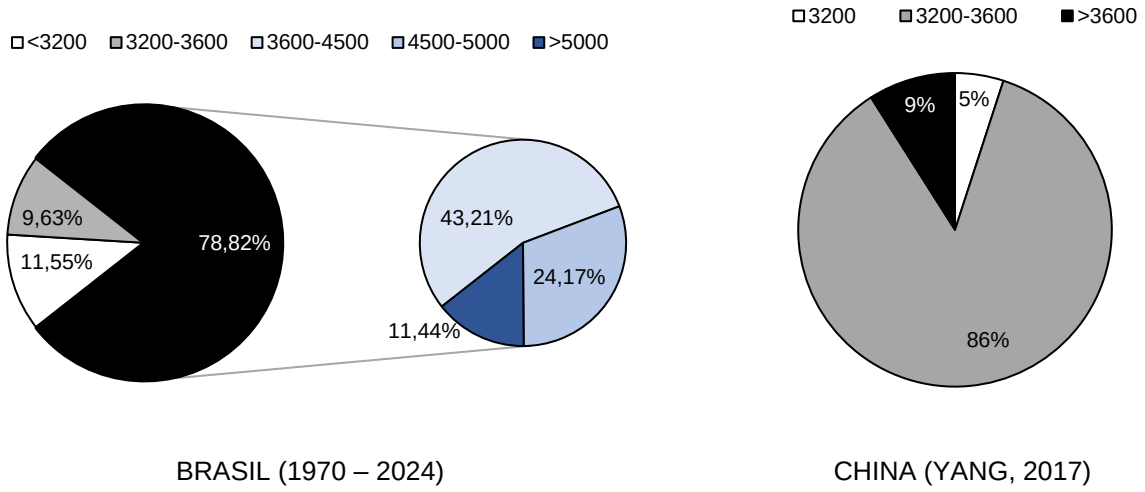
Pela baixa representatividade no consumo do mercado brasileiro e sua predominância de dados no período entre 1960 e 1980 de proveniente de um mesmo autor DAFICO (1997), após o tratamento dos dados e foi desconsiderado o cimento CP I da análise global. Com o método do boxplot foram definidos s limites de finura mínimos e máximos, sendo 3210 e 5690 cm²/g, respectivamente. Os valores fora deste intervalo, conforme Figura 19a foram considerados outlier e removidos conforme Figura 19b. Com o tratamento e remoção dos outliers, os limites mínimo e máximo de finura ficaram 3217 e 5610 cm²/g, respectivamente. Após a remoção dos outliers as tendências apresentadas na Figura 17 permanecem inalteradas, sendo a média de finura ficou na ordem de 4430 cm²/g.

Figura 19: Identificação de outliers em dados de finura por tempo dos cimentos brasileiros



Comparando-se os resultados de finura dos cimentos brasileiros compilados neste estudo com o cimento utilizado no Sudoeste Chinês (Yang *et al.*, 2017a), pode-se inferir na Figura 20 que o cimento brasileiro apresenta maior finura que o chines. Tem-se que 78,82% do cimento brasileiro e apenas 9% das amostras avaliadas no mercado chinês têm resultado de finura Blaine maior que 3600 cm²/g. Nota-se que 43% das amostras de cimento do banco de dados do Brasil possuem finura da ordem de 3500 a 4500 cm²/g.

Figura 20: Intervalo de distribuição de finura em cm²/gdos cimentos normatizados brasileiros em comparação com China



Em outros países, também se nota a tendência a aumento de finura do cimento no tempo. Na Bélgica e Dinamarca, De Schutter (2001) observou aumento nos valores de finura do cimento em função do tempo. Na Bélgica a finura passou de 3000 cm²/g em 1959 para 3500cm²/g em 1966. Na Dinamarca a finura Blaine do cimento mudou de

2000 cm²/g em 1930 para 2800cm²/g em 1950 e 3800 cm²/g em 1982. Bentz; Sant; Weiss, (2008) levantaram a variação temporal da finura Blaine no período de 1950 a 2010 de três tipos de cimentos utilizados nos Estados Unidos, e constataram tendência crescente da finura com o tempo. Os dados compilados pelos autores são provenientes da instituição norte americana "*Cement and Concrete Reference Laboratory*".

Em comparação com os dados compilados dos cimentos brasileiros na Figura 17, nota-se a dispersão de dados e tendência em direção ao aumento da finura, corroborando com os autores citados anteriormente. Os cimentos norte-americanos do estudo se assemelham aos brasileiros CP I e CP II F.

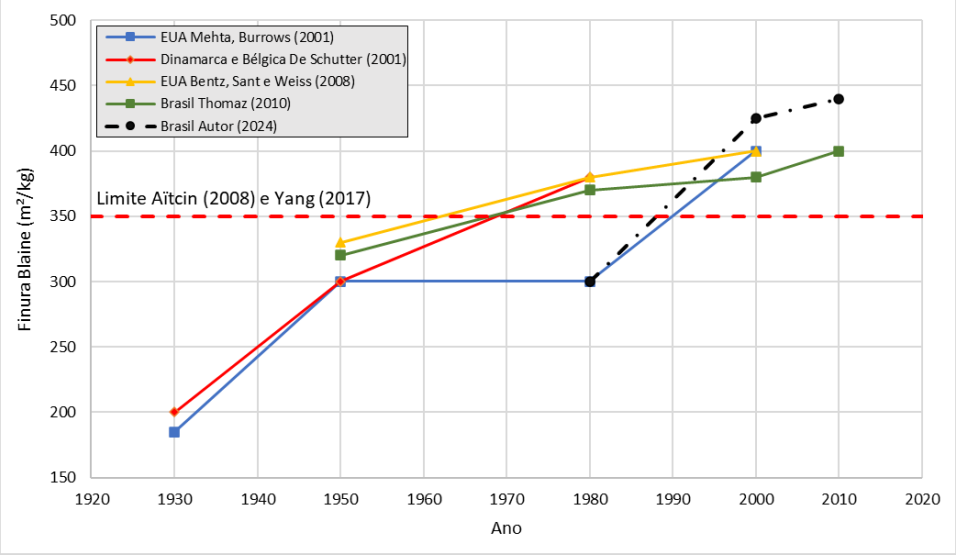
No estudo realizado nos EUA para avaliar a situação da estrutura de pontes por Mehta e Burrows (2001), antes de 1930 os concretos praticamente não apresentavam fissuração. No período de 1930 a 1950, a avaliação de estrutura de pontes indicou que após 1930 já apresentavam estado de conservação inferior às construídas antes de 1930. Nas pontes construídas antes de 1930, 67% foram consideradas em bom estado enquanto para estruturas construídas após 1930, apenas 27% foram consideradas em bom estado. No período a mesma metodologia construtiva foi adotada para a construção as estruturas e a provável causa da deterioração acelerada foi a alteração físico-química do cimento. Neste período houve alterações na finura e teor de C_3S dos cimentos produzidos. A finura do cimento passou de 1850cm²/g para 3000cm²/g e o teor de C_3S de 30% para 50% (Mehta; Burrows, 2001).Tennis and Bhatty (2005) realizaram uma pesquisa junto a 123 cimenteiras nos EUA e no Canadá de 1950 a 2004 e constataram que o teor de C_3S, a finura, a perda ao fogo e o teor de sulfato tiveram aumento no decorrer dos anos.

Aïtcin (2000) afirma que os cimentos utilizados tanto nos EUA quanto na Inglaterra, apresentaram aumento na finura e no teor de C_3S, os quais têm maior capacidade de ganho na resistência nas idades iniciais (até 28 dias). O autor cita que se enfatizava a resistência aos 28 dias em relação à durabilidade do material associada ao seu ambiente de exposição. Possan, Dal Molin e Andrade (2018) afirmam que para atingir a sustentabilidade das estruturas em concreto é necessário considerar o ciclo de vida esperado do material e não simplesmente a resistência aos 28 dias.

Na Figura 21 são representados resultados médios de diversos e que avaliaram a finura Blaine no tempo em comparação com os dados deste estudo (Linha traço ponto). Nota-se a tendência ascendente em todos os estudos, indicando uma tendência global no aumento da finura Blaine nos cimentos Portland com foco em atingir a resistência aos 28

dias para compensar a redução de clínquer e aceleração nos processos construtivos da indústria da construção.

Figura 21: Tendência de Finura Blaine x Tempo considerando diversos autores no Brasil, EUA e Europa



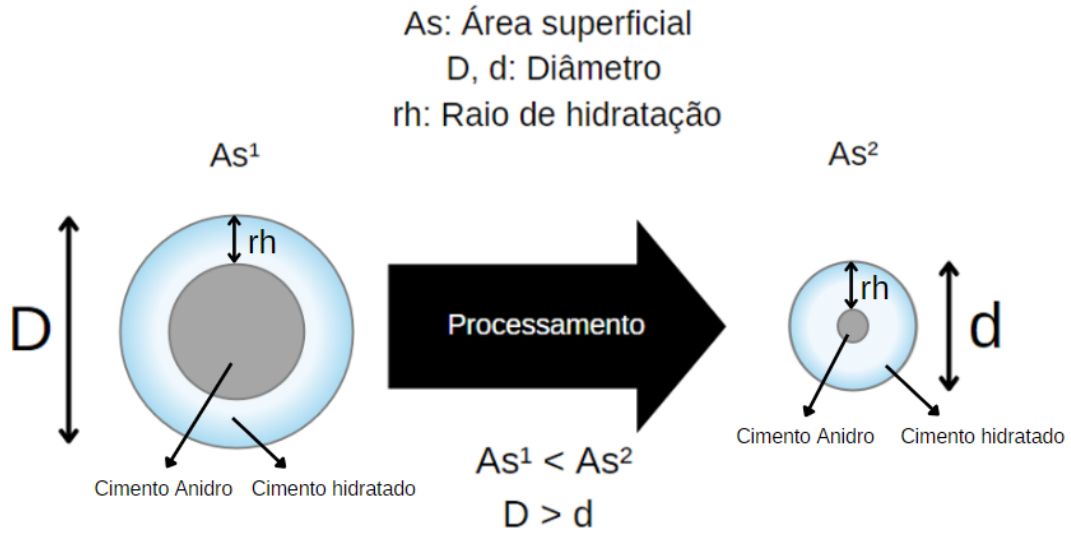
Os efeitos causados pelo maior efeito da finura do cimento são a maior reatividade, que confre elevada resistência inicial, porém também gera maior liberação de calor de hidratação e retração química (Bentz; Haecker, 1999; Bentz; Peltz, 2008; Bentz; Sant; Weiss, 2008; Zajac *et al.*, 2021). A retração química está associada à perda de volume e criação de vazios nas idades iniciais dos reagentes para os hidratos de cimento que podem resultar em fissuração e perda de performance (Bentz *et al.*, 1999). O maior calor de hidratação resulta na formação de tensões térmicas no processo de hidratação que pode favorecer a formação de fissurações, assim como a formação de etringita tardia (DEF) com efeitos de expansão e perda de resistência em idades mais avançadas principalmente em estruturas de concreto (Hime, 1996).

A finura do cimento é uma característica física definida no processo de moagem do clínquer, assim como pelo tipo e quantidade de adições incorporadas. Corresponde à área superficial externa disponível para a hidratação de todas as partículas contidas em uma unidade de massa do material (AÏTCIN; FLATT, 2015; NEVILLE, 2016). A finura do cimento afeta diretamente a sua reatividade com a água; grãos mais finos tendem a reagir mais rapidamente desenvolvendo resistência em menor tempo. Como resultado tem-se maior demanda de água para mesma trabalhabilidade, além de maior liberação de calor de hidratação devido à elevada reatividade química das partículas (HANSEN *et al.*, 2020; Tennis; Thomas; Weiss, 2011). Neville (2016) destaca que o aumento da finura faz com

que haja aumento na disponibilidade de C_3A para a hidratação inicial, o composto com maior potencial de liberação de calor no processo de hidratação.

A Figura 22 representa os efeitos da hidratação do Portland em função da finura do cimento. À esquerda um grão com maior diâmetro (As^1) e à direita com menor diâmetro (As^2) representando que por meio de moagem é possível reduzir a dimensão da partícula. O rh (raio hidráulico) indicado para as duas partículas é o mesmo. Observa-se que no grão de maior finura (As^2) a região hidratada correspondente ao rh ocupa quase a totalidade da partícula. Considerando massa constante, é possível obter um número maior de partículas de diâmetro reduzido (d) em relação a D, que com maior área superficial apresentarão maior reatividade nas primeiras idades de hidratação do cimento. Considerando um cenário de 28 dias, nota-se que o cimento com menor finura não reagiu totalmente e terá resistência a desenvolver em tempos maiores, diferente do cimento com menor finura (à direita) que terá praticamente toda a sua massa hidratada e transformada em CSH e CH, por consequência maior calor de hidratação liberado nesse período e com menos material a ser hidratado em idades avançadas.

Figura 22: Representação da finura do cimento Portland e os seus efeitos no processo de hidratação



Pela probabilidade de redução na durabilidade de materiais cimentícios, alguns autores (Aïtcin, 2000, 2008; Aïtcin; Wilson; Mindess, 2018; Bentz; Haecker, 1999; Mehta; Burrows, 2001) alertam dos riscos associados ao processo de aumento na finura para atendimento de demanda de mercado de velocidade no ganho de resistência inicial em C_3S detrimento da durabilidade.

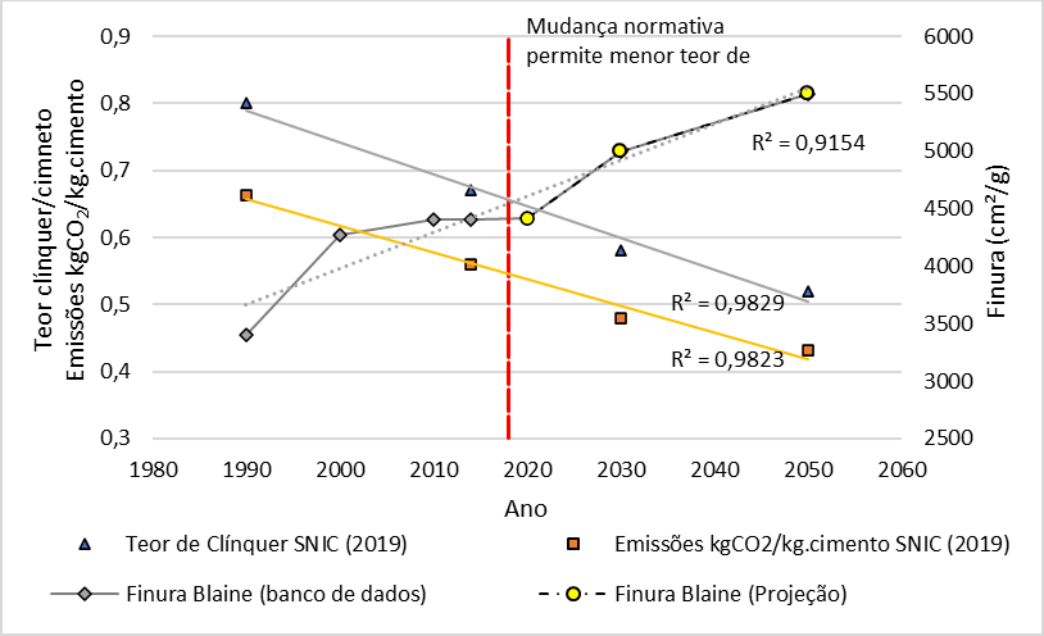
Por outro lado, uma maior quantidade de clínquer hidratado em 28 dias resulta em um melhor aproveitamento do material e, consequentemente, em um potencial desenvolvimento de maiores resistências mecânicas. Em contrapartida, cimentos com menor finura apresentam uma menor quantidade de material hidratado, de modo que a fração de clínquer anidro remanescente no concreto não contribui para a resistência final. Assim, essa porção anidra, que já emitiu CO_2 durante sua produção, não adiciona valor à performance do concreto aos 28 dias, comprometendo a eficiência em termos de resistência e tempo de construção.

Wu et al., (2018) e Zajac et al. (2021), avaliaram cimentos com finura e teor de adição variadas, constatando que é possível obter resistências iniciais elevadas com controle de geração de calor de hidratação empregando um clínquer mais fino e elevados teores de MCS (a partir de 50%) atendendo às demandas de mercado.

Na elaboração da Figura 23 foram empregados dados de redução no teor clínquer/cimento e da redução de emissões de CO_2 associadas de acordo com SNIC (2019) em função da finura obtida pelo banco de dados do estudo. Para a análise da finura, foram utilizados valores médios de todos os cimentos produzidos por década até 2020. Para o período de 2030 e 2050 considerou-se uma projeção de crescimento potencial da finura considerando os valores máximos do banco de dados com coeficiente de determinação R^2 de 0,91, a fim de acompanharas metas de redução no teor clínquer/cimento. Pode-se observar que a redução das emissões de CO_2 tem relação direta com a reduções do teor de clínquer e com o aumento da finura do cimento nos períodos anteriores a 2020, seja ela pela maior moagem do clínquer ou pelo maior teor de adições empregados na produção dos cimentos menos emissivos.

Para satisfazer o plano proposto pelos roadmaps tecnológico do cimento IEA; CSI, (2018) e SNIC (2019) para a redução das emissões tendo em vista a redução da quantidade de clínquer, é necessário que haja disponibilidade de materiais cimentícios suplementares (MCS). Com base na avaliação de uso e disponibilidade de materiais realizado por Scrivener; John; Gartner (2018), as argilas calcinadas e fíler calcário são adições compatíveis com a escala de produção do cimento. Logo, soluções que envolvam esses MCS são mais adequadas comparadas as outras opções, e, portanto, cimentos do tipo CP II Z, CP II F, CP V ARI tendem a apresentar maior participação no mercado nas próximas décadas.

Figura 23: Relação entre teor clínquer/cimento, emissões de CO_2 e Finura Blaine



Considerando a disponibilidade de fíler e argila calcinada com a demanda de consumo por cimento Portland torna-se mais viável em comparação às cinzas volantes e escórias que dependem de outras indústrias como termelétricas e do aço para cimentos principalmente do tipo CP II Z, CP II E, CP III e CP IV.

Uma alternativa citada como promissora para atender a demanda de SNIC (2019) para reduzir o teor clínquer/cimento para 0,52 é o cimento LC^3-50 que faz uso de fíler e argila calcinada (Avet; Scrivener, 2018). É um novo material com potencial de atender critérios técnicos de resistência aos 7 e 28 dias, menor pico no calor de hidratação em idades iniciais, capacidade de maior durabilidade pelo seu componente pozolânico e ambientais pela redução no teor de clínquer/cimento (KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019). No estudo de Sun; Zunino; Scrivener (2024) são propostos LC^3 com teores de substituição maiores que 50% de clínquer e resultados de resistência a compressão e índice de carbono analisados no estudo comparativo com a referência são satisfatórios, sendo uma das soluções viáveis que atendem a disponibilidade de materiais e redução de fator clínquer dos cimentos.

Observa-se que o alcance das metas de redução das emissões de carbono da indústria do cimento tem exigido além de inovação e tecnologia, mudanças na produção fabril, que causam alteração nas propriedades físico-químicas do material, podendo afetar a durabilidade na fase de uso quando consideradas premissas de projeto, escala do projeto, processo de produção de concreto, aplicação e manutenção. Diferentes escalas

de projeto como residências unifamiliares, edifícios verticais multifamiliares e obras de infraestruturas como barragens e pontes exigem tecnologias e soluções compatíveis para o seu uso resolvendo problemas inerentes de cada tipo construtivo.

3.3.1.2 Avaliação da composição química

Na Figura 24 apresentam-se os teores de C_3S, C_2S e C_3A calculados em função do tempo. Esta análise, limitou-se apenas aos cimentos CP II F e CP V devido às limitações de aplicação da equação de Bogue para cimentos com adição pozolânica, o cimento CP I foi excluído da análise pela baixa representatividade no consumo do mercado brasileiro.

Figura 24: Teor de C_3S, C_2S e C_3A de Cimentos brasileiros em função do período

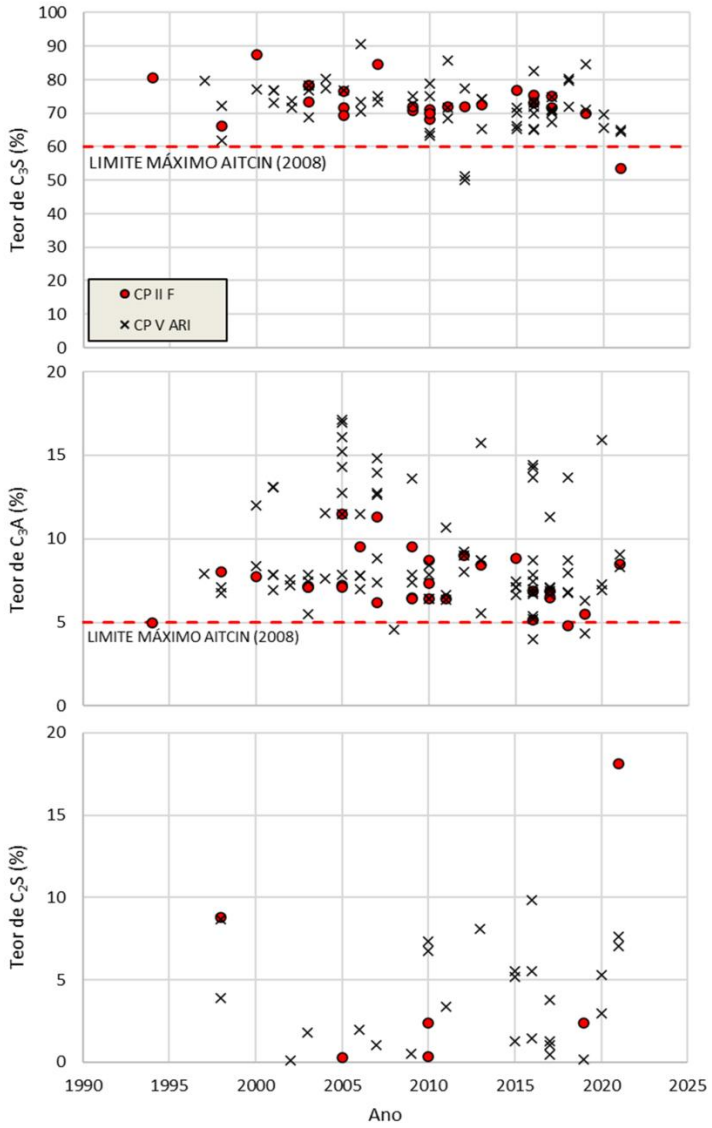


Tabela 14: Resumo de Estatísticas para Teor de fases do cimento CP II F e CP V ARI

Descrição	C_3S		C_3A	
	CP II F	CP V ARI	CP II F	CP V ARI
Amostras fora de margem proposta*	24	56	27	84
Percentual fora de margem proposta*	96,0%	96,5%	93,1%	96,5%
Mínimo	53,5	50,0	4,8	4,0
Máximo	87,5	85,7	11,5	17,1
Média	73,2	71,8	7,5	9,2
Mediana	72,1	72,1	7,1	7,8
Desvio Padrão	6,4	6,7	1,7	3,3
Variância	41,1	45	2,8	10,6
CV (%)	8,8	9,3	22,4	35,5
Total de Amostras	25	58	29	87

*Margem idealAïtcin (2008): C_3S<60% e C_3A<5%

Ressalta-se que a referência considerada para discussão dos resultados obtidos pelo banco de dados é de 2008 e podem ser revistas pelas mudanças tecnológicas do setor e demandas globais de redução de CO_2 pela indústria.

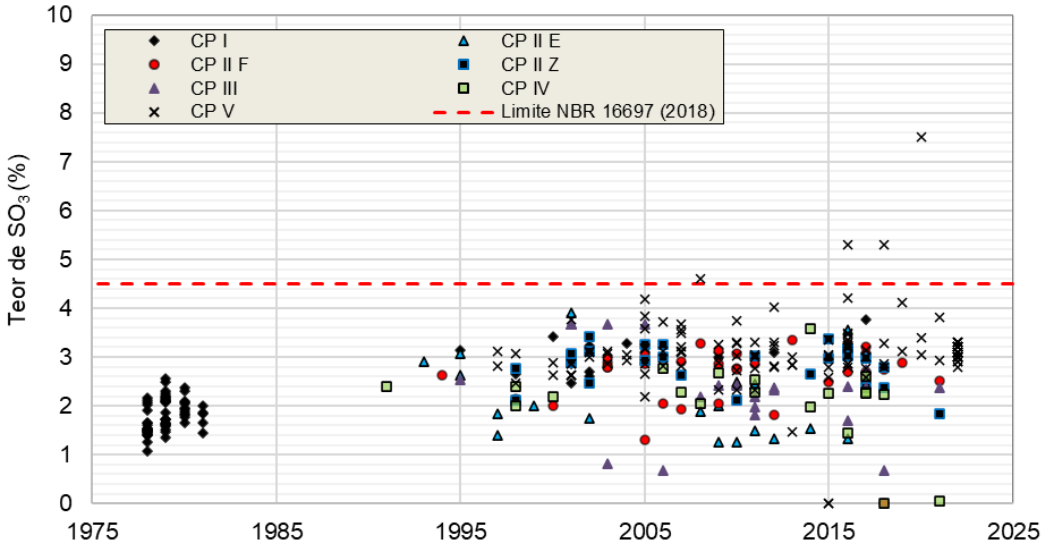
Observa-se que o teor de C_3S dos cimentos é superior a 60% (média de 73,2), enquanto o C_3A é maior que 5%, com média de 9,2%. De acordo com AÏTCIN (2008), o cimento ideal para critérios de durabilidade deve ter um teor de C_3S + C_3A de 60 a 65%, sendo o C_3A limitado a 5%. Nota-se que pouco ou nenhuma amostra do cimento brasileiro (Figura 24) está dentro dos limites sugeridos pelo autor. Com relação aos motivos para a limitação no das principais fases do cimento, tem-se que o teor de C_3S e C_3A influenciam diretamente no calor de hidratação e no desenvolvimento de resistência nas primeiras idades. No processo exotérmico de hidratação o C_3A e o C_3S são as fases que produzem maior calor, sendo 867 J/g e 502 J/g, respectivamente (Mehta; Monteiro, 2006). Com isso, maior calor é gerado e a probabilidade de efeitos relacionados ao calor de hidratação tendem a ser mais frequentes como fissurações por tensões térmicas e formação de etringita tardia (HORKOSS *et al.*, 2016).

No mundo também constata-se uma tendência de aumento no teor de C_3S e redução no teor de C_2S do cimento Portland para atendimento de questões da cadeia de produção da construção civil pelo ganho mais rápido de resistência (AÏTCIN, 2000; AÏTCIN; WILSON; MINDESS, 2018; NATALLI et al., 2021). Porém os resultados do banco de dados do estudo não mostram tendência de aumento para o C_3S e C_3A, é possível notar através das estatísticas dos dados na Tabela 14 que mais de 90% dos dados estão acima dos valores máximos indicados na literatura, com elevada variabilidade de resultados para o teor C_3A (na ordem de 30%).

No Brasil, o cimento Portland apresentou alterações normativas no tempo. Em 2018 todas as normas foram unificadas para a NBR 16697 (2018). Em 1937 até 1966 apenas eram empregados cimentos normatizados sem uso de adições. A partir de 1966 iniciou o emprego de cimento com escória de alto forno e pozolanas. No ano de 2018 foi permitido o maior teor de adições e a tendência é permitir o aumento para redução nos teores de clínquer/cimento em concordância com demanda do Roadmap (SNIC, 2019). Com a mudança da normativa não foi possível notar alteração no comportamento dos resultados para teores de C_3S e C_3A.

Avaliou-se a distribuição dos teores de SO_3 (trióxido de enxofre) para todos os tipos de cimento e apenas 4 dados, pertencentes ao cimento CP V ARI, apresentaram resultados acima do limite de 4,5% de SO_3da NBR 16697 (ABNT, 2018). O SO_3 em excesso tem a capacidade de reduzir a durabilidade e resistência do concreto através de efeitos de expansão no concreto em idades avançadas. Teores acima de 3,5% já aumentam a probabilidade da manifestação patológica (HORKOSS *et al.*, 2016).

Figura 25: Teor de SO_3 de Cimentos brasileiros em função do período



No comparativo entre as normas brasileira NBR 16697 (2018), europeia norma BS EN 197-1:2011 “Cement Part 1” onde são detalhados 27 tipos de cimento, sendo CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V e CEM VI e americana ASTM C150-18 que são especificados cimentos sem materiais cimentícios suplementares e ASTM C595/C595M-16 para cimentos com MCS (Escória, pozolana, fíler calcário e ternário, sendo Type IS, Type IP, Type IL e Type IT, respectivamente), existem diferenças de classificação (Tabela 15). Verifica-se que o teor de C_3S é considerado na norma americana. Já o teor máximo

de C_3A é considerado nas normas europeia e americana, mas na norma atual brasileira não é especificado faixas mínimas e máximas de teor de C_3S, C_3A, calor de hidratação, finura e teor de material pozolânico. Exceto em caso de solicitação pelo usuário. Com relação ao teor de SO_3, a norma americana permite no máximo 4,5% para o cimento tipo III, análogo ao cimento CP V ARI brasileiro, quando o teor de C_3A é maior que 8%, em outros casos o teor de SO_3 máxima é 3 a 3,5% a depender do teor de C_3A e para os tipos IV (baixo calor de hidratação) e V (resistência a sulfatos) permitem no máximo 2,3% corroborando com o valor máximo de 2,3% proposto por Aïtcin (2008).

As normas NBR 16697:2018 e BSI EN 197-1 2011 são prescritivas com relação ao teor de materiais (clínquer e MCS) a ser utilizado em cada tipo de cimento, deve seguir as margens mínimas e máximas exigidas. Na ASTM não há a definição de mínimos e máximos no teor dos materiais, são exigidos parâmetros químicos e físicos.

Tabela 15: Itens considerados pelas principais normas internacionais e norma brasileira

Item da norma	NBR 16697:2018	BSI EN 197-1-2011	ASTM C150-18
Tipo de Cimento	X	X	X
Uso de Cimento por Tipo	-	-	X
Teor de Componentes (Clínquer e MCS)	X	X	-
Cálculo e Teor de Fases (Bogue)	-	-	X
Teor de C_3S	-	-	X
Teor de C_3A	-	X	X
Teor de SO_3	X	X	X
Teor de MgO	X	X	-
Teor de Cloretos	-	X	-
Calor de Hidratação (J/g)	X*	X*	X
Finura	X	-	X
Finura máxima	-	-	X
Perda ao Fogo	X	X	X
Resíduo Insolúvel	X	X	X
Tempo de Pega Inicial	X	X	X
Tempo de Pega Final	X	-	X
Tempo de Pega Falsa	-	-	X
Resistência a Compressão	X	X	X
Pozolanicidade	-***	X	**

*Para cimentos BC/LH. ** A norma ASTM C595 apresenta cimentos com MCS.
*** Contém norma complementar

A liberdade proporcionada pela atual norma brasileira pode significar um material com alta variabilidade de C_3S e C_3A, já visto nos resultados de C_3A com coeficiente de variação na ordem de 30%. Uma possível solução para reduzir a variabilidade do material e garantir segurança para o usuário é fixar um limite do teor de C_3A à exemplo das normas estrangeiras e reduzir o teor máximo de SO_3 para 3,5% para redução de possíveis manifestações de etringita tardia.

3.3.2 Etapa experimental

Neste tópico serão analisados os resultados obtidos de resistência à compressão, índice de ligantes, índice de carbono, indicadores de durabilidade e financeiros dos concretos produzidos com cimento Portland em canteiro de obras visando observar a percepção do usuário com relação à demanda d'água frente a variação na finura do tipo do cimento ensacado utilizado. Nesse contexto, no canteiro de obras a produção de concreto é maiormente realizada com cimento ensacado, é comum o controle da dosagem por volume. Por conta disso, a umidade da areia, umidade do ar, temperatura, podem influenciar no julgamento do operador da betoneira e fazê-lo corrigir a quantidade de água com base na sua percepção de trabalhabilidade do concreto, visto que a determinação de Slump não é usual.

3.3.2.1 Resistência à Compressão e Consumo de Cimento

A Tabela 16 apresenta o consumo de cimento, resistência a compressão, índice de ligantes e índice de carbono para cada batelada de concreto (10 bateladas).

Tabela 16: Dados de resistência à compressão com 14, 28 e 63 dias, Índice de Ligantes e Índice de Carbono.

Tipo de cimento	**CP V ARI RS**					**CP II Z 32**				
Batelada	1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
Cc (kg/m³)	293,6	330,9	298,9	302,4	300,1	298,4	298,7	292,9	301,2	299,2
Emissão (kg.CO_2/m³) min	214,7	241,4	218,6	221,1	219,4	171,1	171,3	168,0	172,7	171,6
Emissão (kg.CO_2/m³) max	239,0	268,8	243,4	246,2	244,3	228,1	228,3	223,9	230,2	228,7
FC 14 dias (MPa)	20,3	27,3	19,3	19,0	21,6	16,5	19,4	12,3	16,8	16,2
FC 28 dias (MPa)	25,2	30,7	21,2	23,3	24,5	20,1	23,1	14,7	20,2	18,7
FC 63 dias (MPa)	27,0	32,4	25,4	26,7	29,1	23,2	26,3	17,6	24,0	21,7
IL 14 (kg.m^{-3}/MPa)	14,5	12,1	15,5	15,9	13,9	18,1	15,4	23,9	17,9	18,4
IL 28 (kg.m^{-3}/MPa)	11,6	10,7	14,1	12,9	12,2	14,9	12,9	19,9	14,9	16,0
IL 63(kg.m^{-3}/MPa)	10,9	10,2	11,8	11,3	10,3	12,9	11,3	16,7	12,5	13,8
ICmin 14 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	10,57	8,84	11,35	11,64	10,14	10,39	8,84	13,70	10,28	10,57
ICmáx 14 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	11,78	9,85	12,63	12,96	11,29	13,85	11,79	18,25	13,70	14,09
ICmin 28 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	8,51	7,85	10,33	9,49	8,97	8,53	7,42	11,43	8,56	9,19
ICmáx 28 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	9,47	8,75	11,50	10,57	9,99	11,37	9,90	15,23	11,42	12,25
ICmin 63 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	7,94	7,45	8,59	8,29	7,55	7,37	6,52	9,56	7,19	7,92
ICmáx 63 (kgCO_2.m^{-3}/MPa)	8,84	8,30	9,57	9,23	8,41	9,82	8,69	12,75	9,58	10,56

Legenda: Cc= consumo de cimento; FC= resistência à compressão para idade indicada; IL = índice de ligantes para a idade indicada; IC= índice de carbono para idade indicada.

Com a Figura 26 e a Figura 27, nota-se que a resistência à compressão é maior para concretos produzidos com cimento CP V ARIRS para todas as idades de estudo. Tal fato deve-se ao maior teor de clínquer e maior finura do material, apresenta maior reatividade e reações de hidratação mais aceleradas. No caso do cimento CP II Z 32 por sua composição com MCS tem o desenvolvimento de resistência mais lento pelo efeito pozolânico. Nota-se também para o CP V ARI RS desenvolvimento de resistências em idades avançadas como 28 e 63 dias pelo teor de escória de alto forno ou pozolanas em sua composição por ser do tipo RS (resistente a sulfatos). Destaca-se a correlação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão que influencia em indicadores de eficiência de desempenho, ambientais e financeiros.

Com relação ao teor de água empregado e a correção para controle de trabalhabilidade visual, o operador não notou diferença nas bateladas, porém por um erro de dosagem na batelada 3 foi empregado 1 (um) volume de areia a menos que influenciou nos cálculos de dosagem o que explica o maior consumo de cimento. Observa-se na Tabela 8 que o teor de água utilizado foi elevado. O ensaio de abatimento (slump test) indicou valores de 160 mm com uma relação a/c de 0,60, fator que contribuiu significativamente para as baixas resistências observadas e o comportamento altamente fluido da mistura. Uma redução no teor de água poderia diminuir a fluidez do concreto, dificultando o manuseio e incentivando um uso excessivo de água pelos operários. No entanto, essa redução permitiria obter resistências maiores devido à menor porosidade da matriz cimentícia.

Figura 26: Resistência à compressão para 14,28 e 63 dias para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS

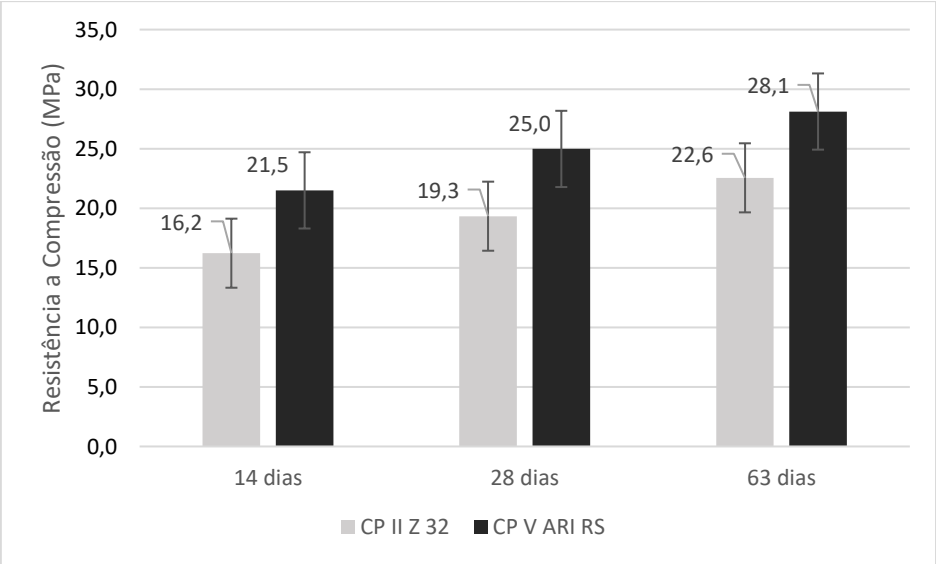
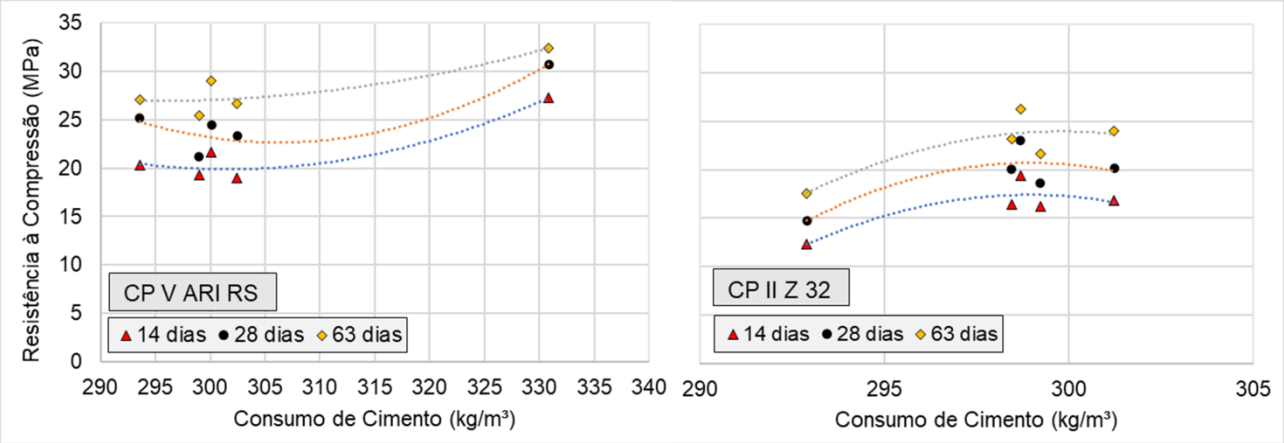
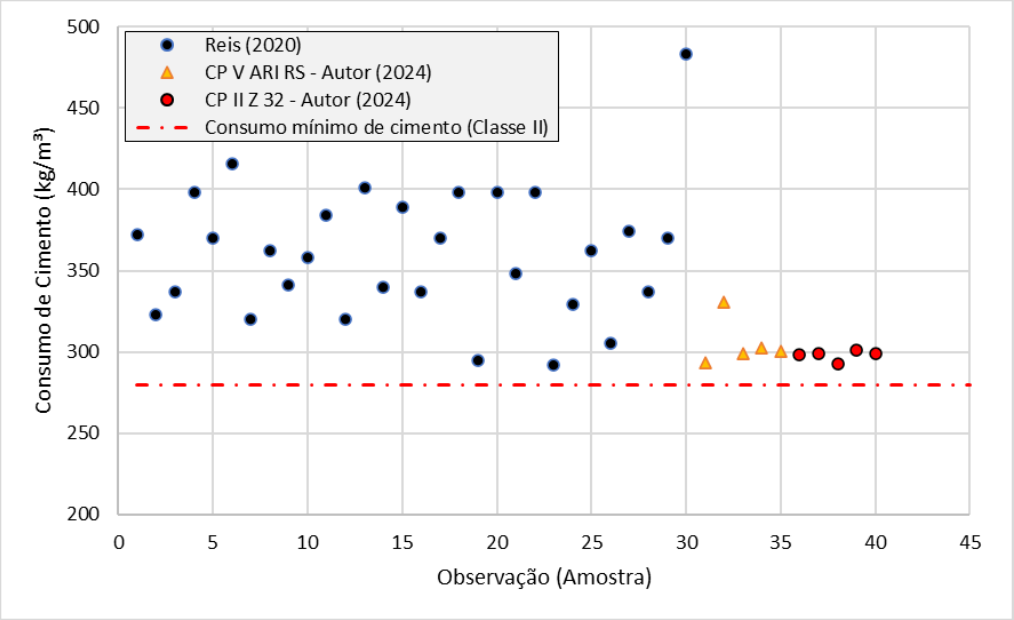


Figura 27: Consumo de cimento por Resistência à compressão para os Cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32



Na Figura 28 são plotados dados coletados por Reis (2020) de consumo de cimento concreto produzidos em obra comparando com os resultados obtidos pelo concreto produzido no estudo. É traçada uma linha de referência do consumo mínimo de concreto proposto pela NBR 12655 (ABNT, 2015) de 280 kg/m³ para classe de agressividade II (ambiente urbano), nota-se que todos os resultados obtidos estão dentro da referência para essa classe de agressividade e os valores obtidos no estudo mostram baixos teores de consumo de cimento em comparação aos dados de referências em outras obras com concreto produzido em obra.

Figura 28: Consumo de cimento de dados coletados em concreto produzido em obra em comparação com pesquisa.



De acordo com o SNIC (2019), o concreto produzido em obra tem até 23% maior consumo de cimento para a mesma performance de resistência à compressão comparado a uma central de concreto. Tendo como base que a mais de 66% do cimento no país é comercializado na forma ensacada e será processada em obra para produção de concreto ou argamassa, significa uma relevante ineficiência no uso do produto implicando em perdas econômicas e ambientais pelas emissões associadas ao uso indevido. Uma solução promissora para reduzir o teor de água nas misturas e otimizar o uso de cimento em obras autogeridas é o desenvolvimento de cimentos com aditivos já incorporados no material ensacado, com instruções de limites de água a ser adicionada à mistura. Essa abordagem é especialmente relevante, pois o concreto produzido em canteiros de obras frequentemente não utiliza aditivos e a água é adicionada sem controle. Ao permitir a adição de menores quantidades de água e cimento, essa estratégia pode resultar em maior eficiência ambiental e financeira, pois afeta diretamente o IL (índice de ligantes) e IC (índice de carbono), especialmente em obras de pequeno porte, desde que seja viável do ponto de vista econômico para as construtoras.

3.3.2.2 Índice de Ligantes (IL) E Índice de Carbono (IC)

Nota-se que os concretos produzidos com o cimento com menor teor de clínquer (CP II Z 32) apresentam índices de ligante superiores na ordem de 21% aos 28 dias (Figura 29), sendo a variação mais elevada para idades inferiores de controle tecnológico (23,4% aos 14 dias e 18,7% aos 63 dias). O índice de ligante ($IL = \frac{Cc}{Fcj}$ Equação 18) é uma relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão do concreto. Neste estudo, os concretos possuem consumos de cimento similares (Tabela 16), porém apresentam grandes discrepâncias nos valores de resistência à compressão em todas as idades de controle (Figura 26) o que afetou o IL (Figura 30).

Figura 29: Índice de Ligantes para diferentes idades de resistência do concreto para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.

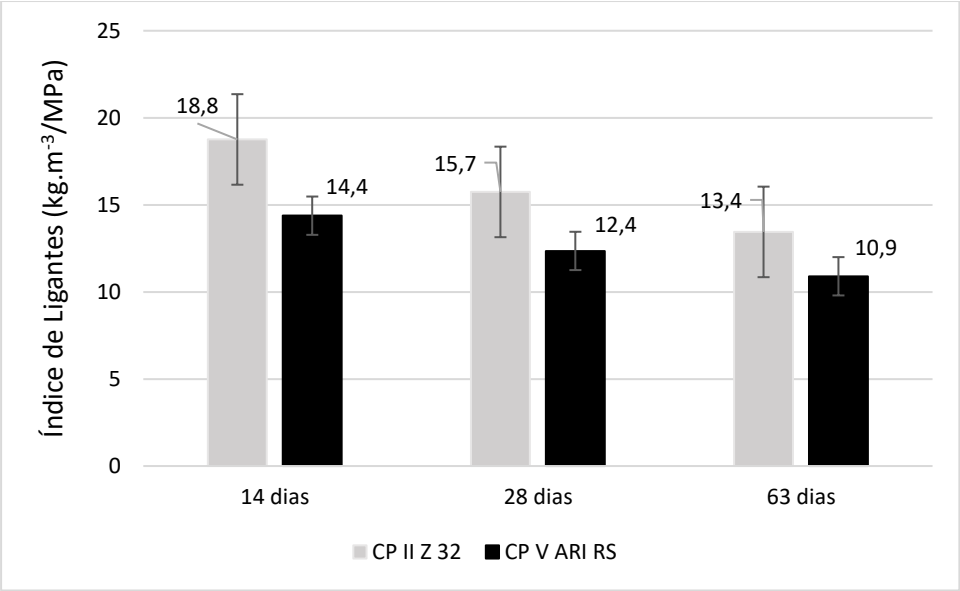
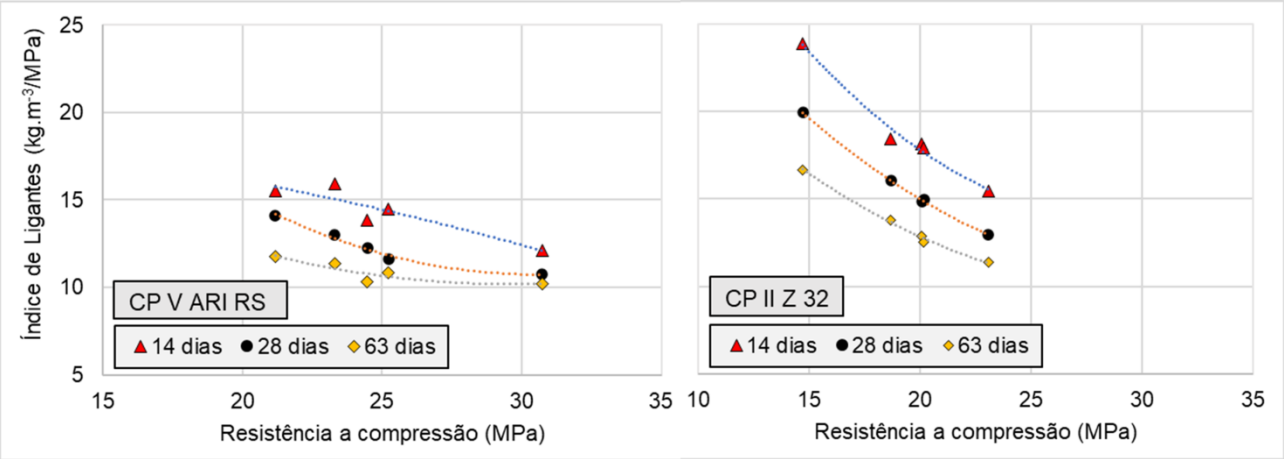
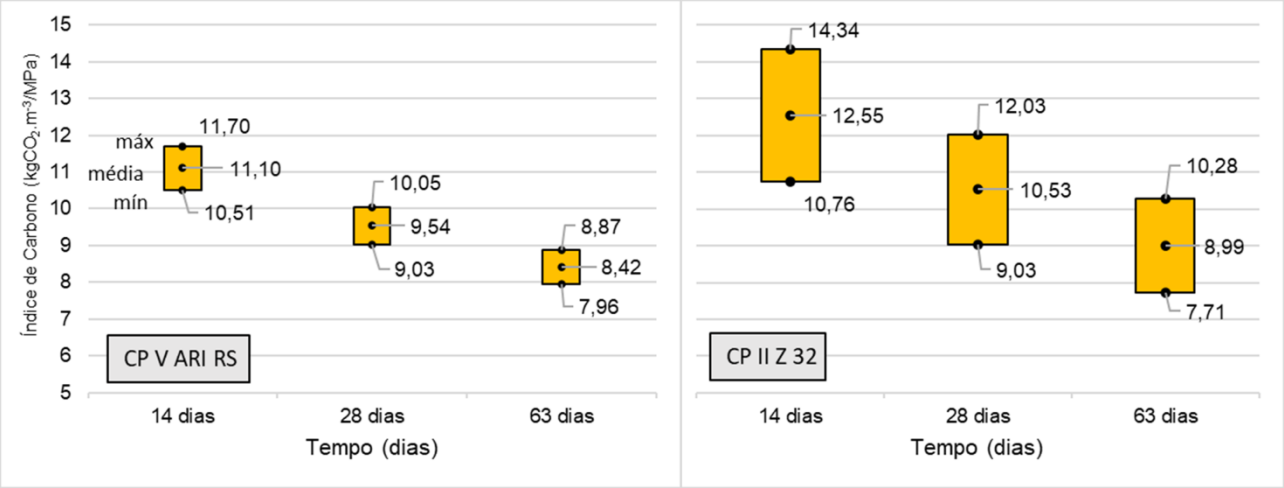


Figura 30: Índice de Ligantes x resistência à compressão para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.



Para a Figura 31, foram plotados os índices de carbono considerando as médias de emissões máximas, mínimas e médias (Tabela 16) com base na margem de teor de clínquer proposto pela NBR 16697 (ABNT, 2018), detalhada na Tabela 2. Nota-se margem mais acentuada para o cimento CP II Z 32 por conta da margem admissível do teor de MCS. Destaca-se que a solução do cimento com maior teor de MCS é viável quando analisado no ponto de vista de eficiência ambiental. Apesar do cimento CP V ARI RS ter maior teores máximos e mínimos de clínquer, 7 (sete) de 9 (nove) resultados obteve maior eficiência.

Figura 31: Índice de Carbono mínimo, médio e máximo para 14, 28 e 63 dias para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.



3.3.2.3 Durabilidade

Nessa seção é abordada a durabilidade dos concretos produzidos em obra para a carbonatação e para o ataque de cloretos. Ambos são analisados conforme os modelos propostos.

3.3.2.3.1 Carbonatação

A carbonatação é o processo de redução do pHdo concreto pela presença de CO_2 e umidade, favorecendo a despassivação da armadura e comprometendo a durabilidade do material. Fatores como tipo de exposição, umidade relativa são relevantes para a aceleração na carbonatação da estrutura (Aïtcin; Flatt, 2015). Devido a isso, neste estudo avaliou-se o comportamento dos concretos produzido em campo quanto à ação do CO_2 ao longo do tempo.

Foram avaliados os concretos no tipo de exposição interno e externo protegido que são os piores cenários propostos pelo modelo com a resistência à compressão dos concretos de cimentos diferentes para 28 e 63 dias. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos pelo modelo de Possan et al (2021) considerando classe de agressividade II (urbano) com cobrimento de 30mm, relação água cimento máxima de 0,60 e resistência à compressão mínima aos 28 dias de 25 MPa conforme NBR 6118 (ABNT, 2023) e tempo de vida útil de 50 anos conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2024). Salienta-se que o modelo

considera oconcreto aparente, sem proteção superficial ou revestimento. Pedry (2020) constatou que proteção do tipo pintura imobiliária pode representar redução na absorção de CO_2 na ordem de 20 a 40% a depender do tipo do material empregado (PVA ou acrílico).

Tabela 17: Resultados de Simulação de Tempo de Carbonatação e Profundidade Carbonatada para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS, considerando uma espessura de cobrimento de 30 mm.

Tipo de cimento	**CP II Z**				**CP V ARI RS**			
Exposição	INT		EXT PRO		INT		EXT PRO	
Tempo (dias)	28	63	28	63	28	63	28	63
Fc médio (MPa)	19,3	22,5	19,3	22,5	25,0	28,1	25,0	28,1
Tempo para atingir 30 mm (anos)*	24,0	38,0	41,0	64,5	63,0	94,5	106,5	160,5
Profundidade de carbonatação(mm)**	43,0	34,3	33,1	26,4	26,7	21,8	20,5	16,7

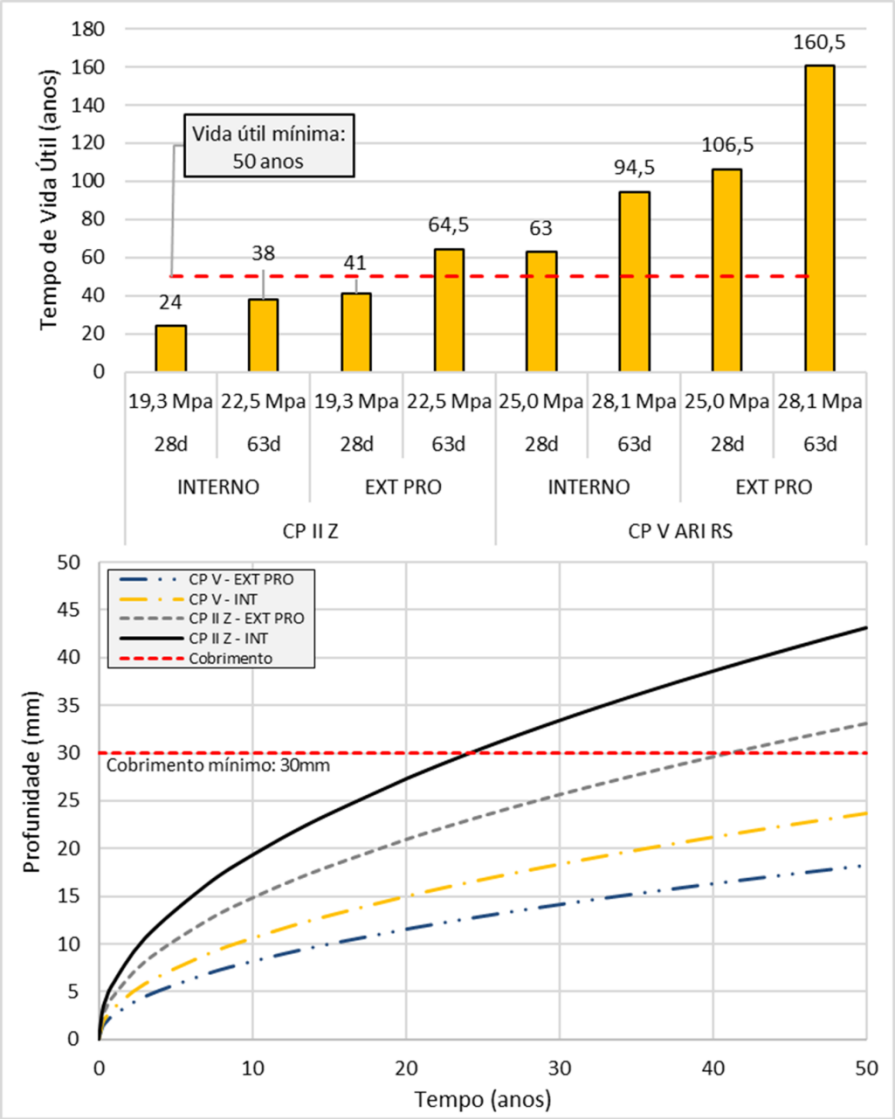
* Equivalente à vida útil de projeto ou ELD, que corresponde ao tempo necessário para que o agente agressivo seja equivalente à espessura de cobrimento.
** Correspondente ao período de 50 anos de exposição do concreto a ação do agente agressivo.

Na Figura 32 são plotados os tempos de vida útil e profundidade carbonatada, em mm. Para a vida útil, os resultados abaixo de 50 anos não atendem o tempo de vida útil mínima. Todos os resultados do cimento CP V ARI RS atendem os requisitos normativos para vida útil mínima de projeto (50 anos), considerando a profundidade de cobrimento de 30 mm, independente do ambiente de exposição da estrutura. Já para o CP II Z 32, somente estruturas na condição externa protegida, atendem os requisitos normativos, se consideradono modelo de Possan et al. (2021) a entrada de resistência à compressãode 63 dias.O modelo considera como entrada a resistência à compressão aos 28 dias, uma vez que é a idade de exigência normativa para controle da resistência do concreto para a maior parte das estruturas produzidas no Brasil. Cabe avaliar a pertinência do emprego da resistência aos 63 dias, pois o concreto tende a ganhar resistência depois de 28 dias e isso afeta diretamente nos resultados da profundidade de carbonatação do concreto, uma vez que o modelo emprega essa propriedade na Equação 21 como principal fator de influência na difusão de CO_2 através do concreto. Os resultados não cumprem dois critérios para condição de agressividade II para resistência à compressão mínima aos 28 dias e a relação água cimento máxima. A trabalhabilidade é um fator evidenciado pelos operários pela maior facilidade no manuseio o que impactou em resultados superiores (Tabela 8) aos preconizados em norma, o que prejudica a resistência à compressão e a porosidade do concreto.

Na Figura 32 são apresentadas curvas utilizando o modelo de durabilidade para o

efeito de carbonatação de Possan et al. (2021) considerando a resistência à compressão obtida aos 28 dias.

Figura 32: Vida Útil e Profundidade deteriorada por Carbonatação para o Cimento CP II Z 32 e CP V ARI RS com tipo de exposição interna e externo protegido



Nota-se o pior cenário para o cimento CP II Z 32 com exposição interna, onde aos 25 anos, metade do tempo de vida útil sugerido pela NBR 15575 (ABNT, 2021), o CO_2 teria atingido a armadura da estrutura de concreto, deixando-a vulnerável à corrosão. Em contrapartida para o cimento CP V ARI RS em qualquer situação para resistência à compressão de 28 dias atende a expectativa de 50 anos da estrutura, podendo inclusive reduzir o cobrimento mínimo para 25mm sem prejuízos ao atendimento de vida útil de 50 anos.

3.3.2.3.2 Ataque por cloretos

Para o ataque por cloretos, são avaliados os concretos com a resistência à compressão dos concretos de cimentos diferentes para 28 e 63 dias. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos pelo modelo de Andrade; Possan; Dal Molin (2017) considerando classe de agressividade III (marinha) com cobrimento de 40mm, relação água cimento máxima de 0,55 e resistência à compressão mínima de 30MPa conforme NBR 6118 (ABNT, 2023) e tempo de vida útil de 50 anos conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2024).

Tabela 18: Resultados de Simulação de Tempo de Exposição ao Cloreto e Profundidade de Região Degradada para os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RSpara espessura de cobrimento de 40 mm.

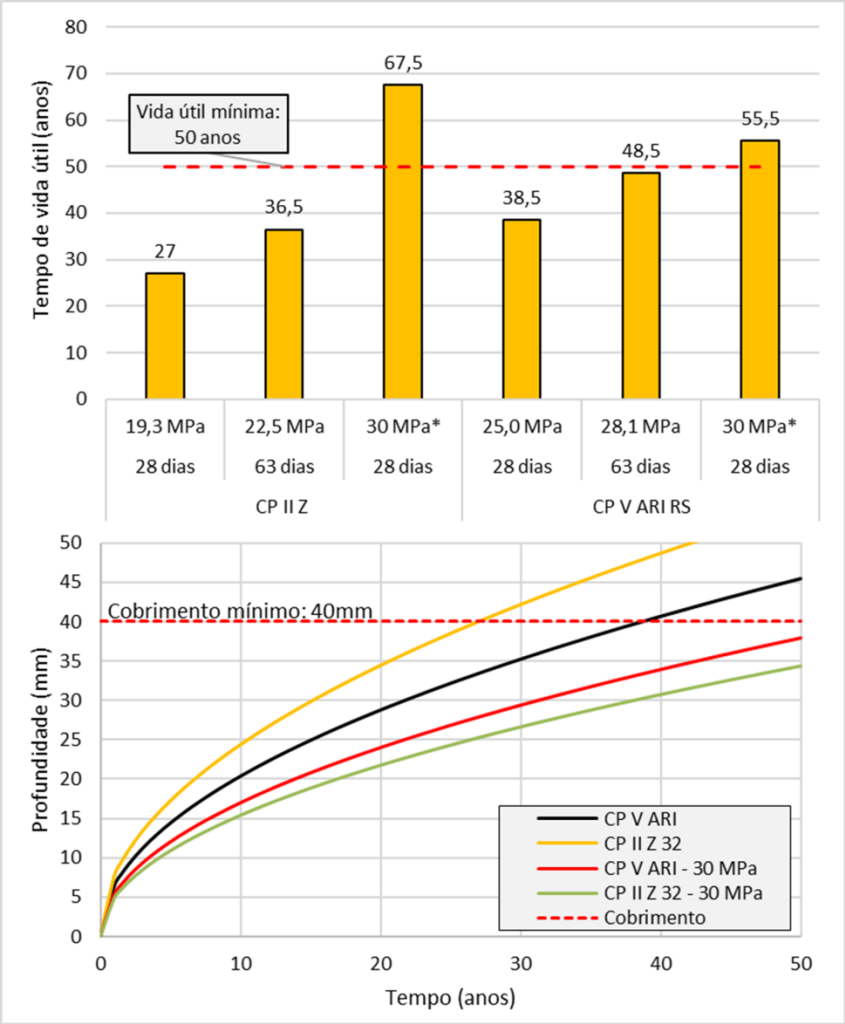
Tipo de cimento	**CP II Z**		**CP V ARI RS**	
Temperatura (ºC)	25		25	
Tempo (dias)	28	63	28	63
Fc médio (MPa)	19,3	22,5	25,0	28,1
Ccimento (kg/m³)	298	298	305	305
Tempo para atingir 40mm (anos)*	27,0	36,5	38,5	48,5
Profundidade em 50 anos (mm)**	54,3	46,7	45,5	40,5

* Equivalente à vida útil de projeto ou ELD, que corresponde ao tempo necessário para que o agente agressivo seja igual à espessura de cobrimento.
** Correspondente ao período de 50 anos de exposição do concreto a ação do agente agressivo.

Na Figura 33 são apresentadas curvas utilizando o modelo de durabilidade para o efeito de ataque de cloretos considerando a resistência à compressão obtida aos 28 dias. Nota-se que ambos os casos não cumprem com a exigência de durabilidade mesmo respeitando a recomendação de 40mm de cobrimento no caso de exposição de ambiente marinho. As soluções práticas para cumprir com a recomendação é fazer a elevação da resistência à compressão. Considerando concretos com 30 MPa, o modelo atende a vida útil de projeto para os tipos de cimento, com isso uma dosagem mais eficiente com menor teor de água cimento e/ou emprego de aditivos podem ser necessários.

Tendo em vista os resultados obtidos e a exigência da NBR 6118 (ABNT, 2023), os concretos produzidos in situ não foram satisfatórios, pois não cumpriram com nenhum critério. O principal contribuinte foi o excesso no consumo de água que foi determinada pelo operário, o que resultou em menores resistências e, portanto, menor durabilidade e resistência ao ataque de cloretos.

Figura 33: Vida Útil e Profundidade deteriorada por Cloreto para o Cimento CP II Z 32 e CP V ARI RS



*Empregado no modelo concretos simulados de cimento CP V ARI e CP II Z 32 com resistência à compressão de 30 MPa para determinação de cumprimento com critério de durabilidade

3.3.2.4 Financeiro

Nessa seção será avaliada a variável financeira para comparativo dos cimentos ensacados utilizados. O indicador utilizado é custo por metro cúbico de concreto (R$/m³).

Assumindo custo do saco de cimento de 50kg no valor de R$ 36,50 para o CP II Z 32 e R$ 44,90 para o CP V ARI RS somados aos custos de agregados miúdo e graúdo. Nota-se que o concreto produzido com cimento CP V ARI RS, que possui maior teor de clínquer tem custo 20,70% mais elevado (Figura 34). Porém, quando analisado o custo por MPa (Figura 35) nota-se que o cimento CP V ARI apresenta melhor eficiência (menor custo por MPa). Em relação à emissão carbono por m³, com base nos valores médios da

Tabela 15 tem-se 256 e 220 Kg.CO_2 para o cimento CP V ARI e CP II Z, respectivamente, sendo o cimento CP II Z 14% menos emissivo pelo menor teor de clínquer, o que faz reduzir os custos do material. Mesmo considerando nas Figuras 34b e 35b o custo de créditos de carbono precificado em US$ 10,00/ton, o cimento CP V ARI RS ainda demonstra maior custo-benefício em relação à resistência à compressão. No entanto, com potenciais aumentos nos preços dos créditos de carbono, há uma tendência de que, ao incluir esse custo, sua vantagem econômica diminua.

Figura 34: Custo por m³ de concreto produzido com os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS

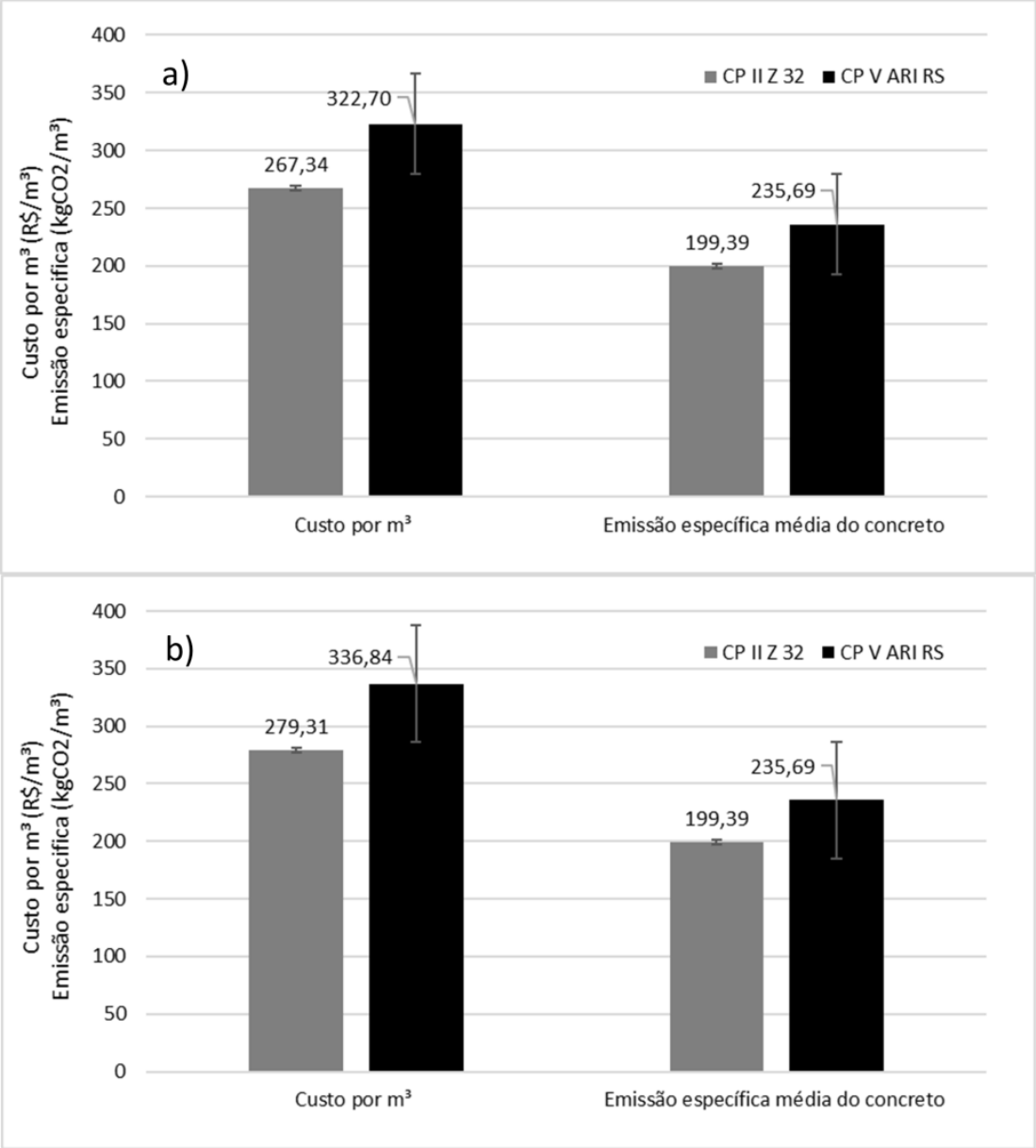


Figura 34a não considera custo de crédito de carbono e a figura 34b considera custo de crédito de carbono

Figura 35: Custo por MPa de concreto produzido com os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.

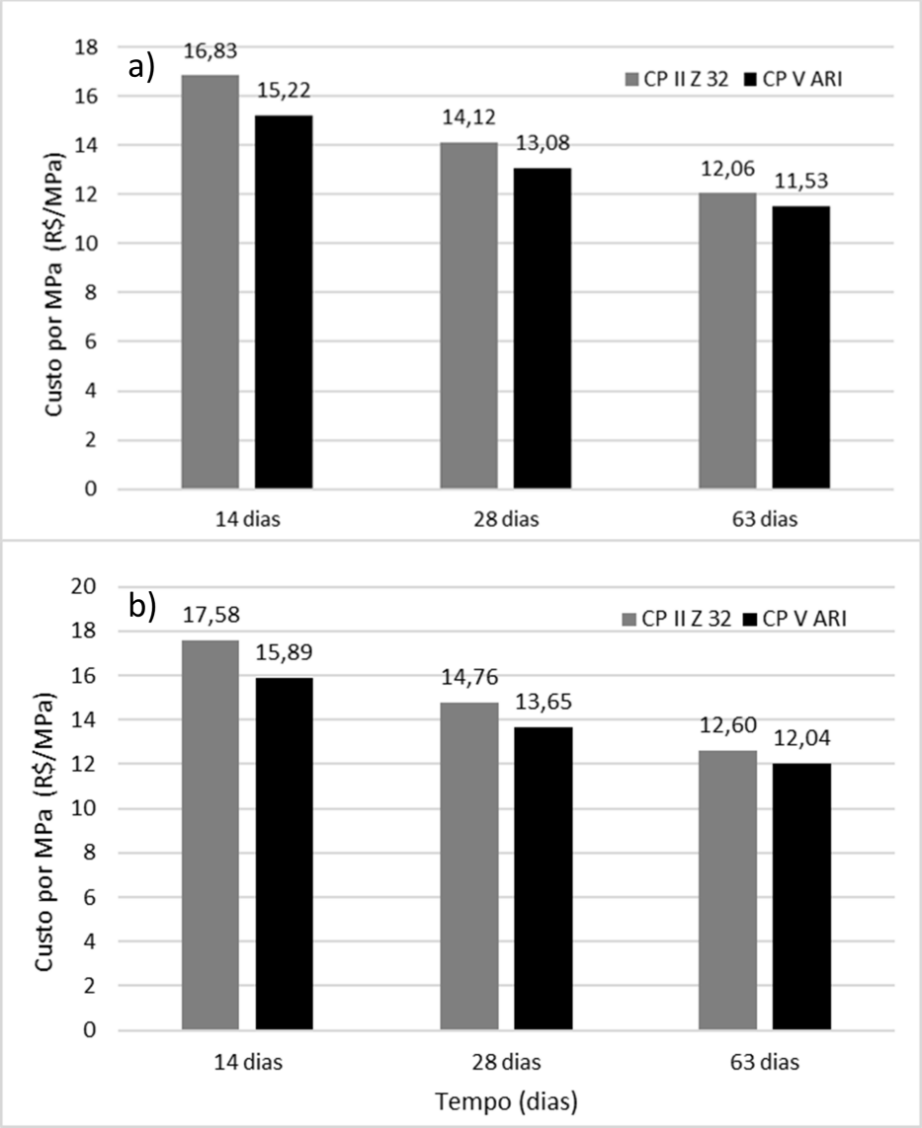


Figura 35a não considera custo de crédito de carbono. Figura 35b considera custo de crédito de carbono

A indústria do cimento nacional fornece o cimento ensacado ou o cimento a granel/big bags. Na Tabela 19 são apresentados os tipos de cimento ofertados ao mercado.

Entender as mudanças da norma, tendência de maior uso de MCS, finura e composição do cimento nos próximos anos é fundamental para o uso adequado principalmente do cimento ensacado que representa 66% a 70% do cimento vendido no país visando desempenho e redução no consumo e emissões (SNIC, 2019; SOUZA; RESENDE, 2019).

Os cimentos a granel e ensacados destinam-se a mercados distintos. O primeiro geralmente é destinado a centrais de concretos, usinagens, grandes obras, etc. Já o cimento ensacado comercializado em embalagens de papel de 25, 40 e 50 Kg, é destinado ao mercado fracionado, para atendimento em lojas de varejo, pequenas obras,

construção informal, entre outros. Em geral, o consumidor do cimento ensacado possui poucas informações técnicas do material que está comprando, pois, a NBR 16697 não exige informações técnicas do produto como composição química e finura, simplesmente a sigla normalizada do cimento, condições de manuseio e armazenagem do produto.

Tabela 19: Fornecimento de Cimento Portland da Indústria Brasileira

Fabricante	Cimento Ensacado	Cimento a Granel ou Big Bags
A	CP II-E-32-RS; CP II-F-32-RS; CP V ARI	CP III-40 RS; CP II-E-40*; CP II-F-40*; CP V ARI RS*
B	CP III 32 RS; CP II E 32	**
C	Todas as Obras (CP II E 32; CP II E 32 RS; CP II F 32; CP II Z 32; CP II Z 32 RS; CP III 40 RS; CP IV 32); Obras Estruturais (CP II F 40 e CP III 40 RS (R)); Obras Especiais (CP I 40; CP V ARI; CP V ARI ULTRA; CP V ARI RS)	**
D	CP II-F-32; CP II-Z-32; CP IV-32-RS; CP-II-F-40; CP V ARI	**
E	CP II-E-32; CP II-F-32 e CP III-32 RS	CP II-E-40 e CP III-40 RS
F	CP II E-32; CP IV-32 RS; CP V ARI Premium; CP V ARI RS	**
G	CP II E 32; CP II F 32 RS; CP II F 32; CP II Z 32; CP III 40 RS; CP IV 32 RS; CP II E 40 RS; C´P V ARI RS; CP V ARI	**
H	CP II F 32; CP IV 32 RS; CP V ARI (40kg); CP II F 40	CP II F 32; CP IV 32 RS; CP V ARI; CP II F 40;

* Big Bag

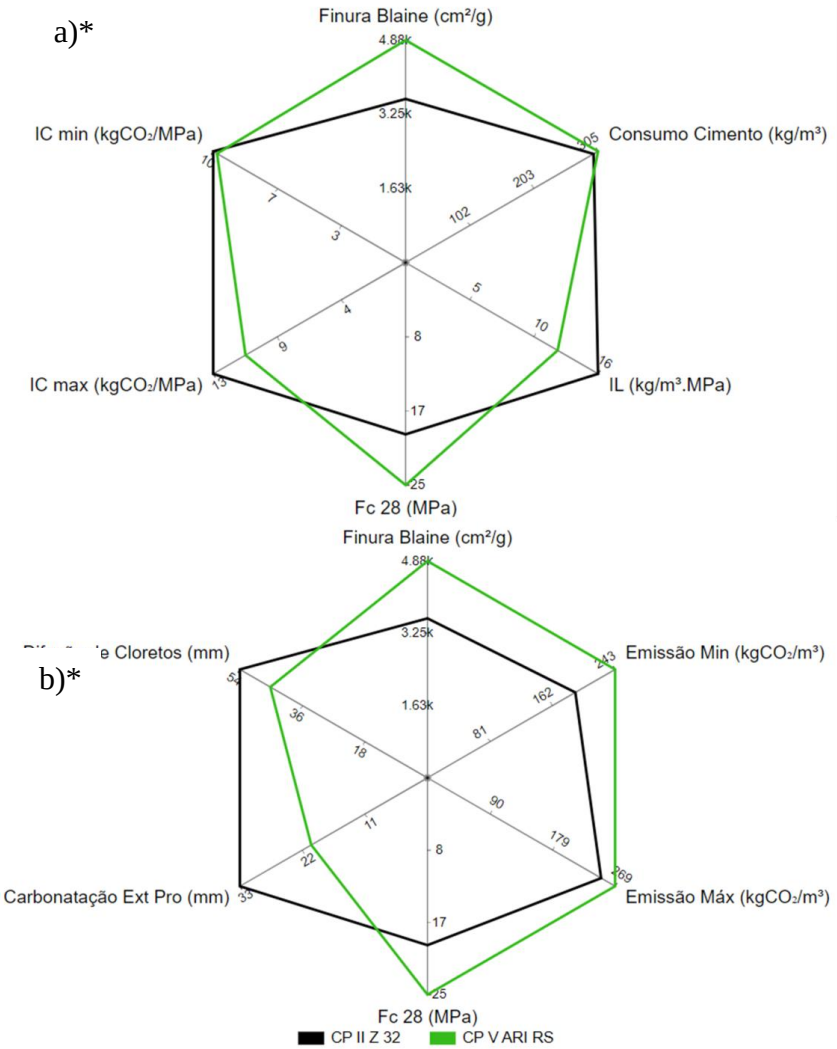
** Informações não encontradas

3.3.2.5 Comparativo Global de Indicadores

Para comparativo geral de todas as variáveis analisadas para os dois cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS realizaram-se os gráficos de radar (Figura 36). Na Figura 36a são apresentados os dados de consumo de cimento, finura Blaine, resistência aos 28 dias, Índice de Ligantes e Índice de carbono mínimo e máximo, destaca-se o melhor desempenho para o CP V ARI RS para maior resistência à compressão e menores IL e IC máx. Para a Figura 36b, são apresentados dados de emissões específicas mínimas e máximas, carbonatação externa protegida e interna (mm) e difusão de cloretos (mm).

Nota-se que pelo menor teor de clínquer, o cimento CP II Z 32 resulta em menores emissões específicas, porém quando analisadas as resistências no caso do índice de carbono (IC) a performance é melhor, por isso que deve ser considerada a desmaterialização para o uso dos indicadores IC e IL. Para os indicadores de durabilidade, quanto menor a profundidade deteriorada é melhor, portanto em ambas as situações o cimento CP V ARI RS performa melhor, porém no caso da difusão de cloretos apesar de melhor performance pela sua maior resistência à compressão, não cumpriu com a exigência mínima de 40mm em 50 anos.

Figura 36: Gráfico em formato radar com as principais variáveis obtidas pela etapa 2 do estudo comparando os cimentos CP II Z 32 e CP V ARI RS.



* Parte a) Consumo de cimento, resistência à compressão aos 28 dias, IL, IC min e IC máx para 28 dias. Parte b) resistência à compressão aos 28 dias, Emissão mínima e máxima do concreto, difusão de cloretos e carbonatação na situação externo protegido.

Finalmente, depois de analisados todos os indicadores calculados, é importante realizar uma análise holística e multivariável como foi executada no estudo para determinar se a solução de reduzir o clínquer no cimento é de fato o melhor caminho para seguir e obter melhor ecoeficiência na indústria do cimento e da construção, visto que o cimento é um insumo da cadeia da construção. Sugere-se ampliar a análise realizada nesse estudo principalmente no que diz respeito à aplicação do cimento ensacado em obras autogeridas, pois representa a maior parte do mercado (66 a 70%) e, portanto, a maior parte das emissões provenientes da produção de cimento no país.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.4.1 Conclusões

Com base nos objetivos de avaliar a variação da finura e composição do cimento Portland nacional e comparar os efeitos da finura e composição do cimento Portland ensacado em indicadores de desempenho, eficiência ambiental, durabilidade e financeira, conclui-se que:

1. O cimento Portland nacional apresenta para vários tipos de cimento tendência de aumento e mais de 80% dos resultados estão acima do limite proposto na literatura de 3500 g/cm³, indicando que o material está sendo alterado e deve-se adequar o seu uso frente às alterações e demandas industriais e ambientais.
2. O teor de C_3S e C_3A apresenta mais de 90% dos resultados acima da recomendação por questões de durabilidade.
3. A alta variabilidade tanto de dados obtidos quanto normativa geram incertezas quanto a sua finura e composição, sobretudo do cimento ensacado. O cimento fornecido não informa a finura, o teor de clínquer e a composição (fases), com isso dificulta a tomada de decisão por parte do consumidor sem o devido controle tecnológico.
4. Para a etapa experimental do trabalho, nota-se que o cimento CP V ARI RS teve melhor desempenho em todos os aspectos analisados: resistência à compressão, IL, IC, durabilidade e financeira. Indica que não necessariamente cimentos com menor teor de clínquer e que o fator clínquer/cimento são mais eficientes na questão ambiental. Para análise foram verificados de forma holística, integrando vários aspectos da produção e vida útil do concreto.

O estudo realizado tem como premissa principal analisar de forma global como a

alteração do cimento nas últimas décadas e as novas demandas de mercado afetam as construções e principalmente as emissões de CO_2. Com base nos resultados obtidos, pode-se questionar se a redução no teor de clínquer é de fato uma solução viável considerando a forma de uso do cimento ensacado.Sendo uma possível solução a implementação de aditivos para o cimento ensacado a fim de proporcionar redução no consumo de água, permitindo melhor performance na resistência à compressão com menor consumo de cimento e portando menos emissões por m^3 de concreto empregado.

3.4.2 Sugestões para trabalhos futuros

1. Seguir com a coleta de dados para finura e composição de cimento Portland para maior amostragem e refinar a análise de tendência.
2. Fazer estudo com outros tipos de cimento com o método empregado na etapa 2 para comprovação dos resultados obtidos e a verificação da forma empregada para produção de concreto em obras de pequeno porte.
3. Realizar estudo da etapa experimental em diferentes regiões do país para analisar a situação da produção de concreto em canteiros de obras, especialmente em projetos residenciais de pequeno porte. O objetivo é identificar soluções que melhorem a eficiência do uso do cimento na produção de concreto em âmbito nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 12006**: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. **NBR 13583**: Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT**. NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ABNT **NBR 12826**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014

ABNT **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018

ABNT **NBR 12655**: Concreto de cimento portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016

ABNT **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2024

ABNT **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2024.

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1349–1359, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1063/1.1473683

AÏTCIN, P. C. **Portland cement**. Elsevier Ltd, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5

AÏTCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. New York: Taylor and Francis, 2008.

AÏTCIN, P. C; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/C2015-0-00150-2

AÏTCIN, P. C; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. 1th. ed. New York: Spon Press, 2011.

AÏTCIN, P. C; WILSON, W.; MINDESS, S. Concrete in Canada: 50 years of progress — Present concerns. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 45, n. 2, p. 117–124, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0343

AKUNOV, F. I. Generalized Grinding Law. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 31, p. 208–211, 1995.

ALASKAR, A.; HOOTON, R. D. Effect of binder fineness and composition on length change of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 237, p. 117537, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117537

ANDRADE, J. J.O.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C.C. Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 2, n. 1, 2017.

ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production, 1928-2018. **Earth System Science Data**, [*s. l.*], v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019

ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, [*s. l.*], p. 1–52, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.5194/essd-2017-77

ANJOS, M. A. S. *et al.* Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. **Engenharia Civil**, [*s. l.*], v. 44, p. 41–58, 2012.

ASSAAD, Joseph J.; ASSEILY, Salim E.; HARB, Jacques. Effect of specific energy consumption on fineness of portland cement incorporating amine or glycol-based grinding aids. **Materials and Structures**, v. 42, n. 8, p. 1077–1087, 2009.

AVET, François; SCRIVENER, Karen. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 107, p. 124–135, 2018.

ASTM. **ASTM C150-18**: Standart Specification for Portland Cement. ASTM, p. 1–9, 2018.
BATTAGIN, A. F.; CARDOSO, F. D. Panorama do Coprocessamento de resíduos em fornos de cimento no Brasil. *In*: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu - PR. **Anais...**., 2018. p. 1-13.

BATTAGIN, A. F.; MUNHOZ, F. A; BATTAGIN, I. L. S. C. Evolução da normalização, finura e a resistência à compressão dos cimentos Portland brasileiros. **Concreto e Construções**. IBRACON. 73 ed., p. 39-51, 2014

BAZZONI, A. Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy, (Laboratory of construction material, PhD Thesis). **Laboratory of construction material, PhD Thesis**, EPFL, Lausanne, 2014.

BELIZARIO-SILVA; F. OLIVEIRA, L. A.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento**. São Paulo: SIDAC, 2022.

BENTZ, D. P.; SANT, G.; WEISS, J.. Early-Age Properties of Cement-Based Materials: I. Influence of Cement Fineness. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 1561, n. 2, p. 17, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008).

BENTZ, Dale P. *et al.*Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 29, n. 10, p. 1663–1671, 1999.

BENTZ, Dale P.; HAECKER, Claus J. Argument for using coarse cements in high-performance concretes. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 29, n. 4, p. 615–618, 1999.

BENTZ, Dale P.; PELTZ, Max A. Reducing thermal and autogenous shrinkage contributions to early-age cracking. **ACI Materials Journal**, [*s. l.*], v. 105, n. 4, p. 414–420, 2008.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 97, n. 12, p. 3764–3773, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jace.13177

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dá outras providências. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html. Acesso em: 5 jan. 2025.

BRIKI, Y. *et al.*Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 147, n. April, p. 106515, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106515

BSI. Methods of testing, Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. **Bs En 197-1**, [*s. l.*], n. November, p. 50, 2011.

BULLARD, J. W. *et al.* Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [*s. l.*], v. 55, n. 1, p. 18–32, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.5414/VDX00749

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). A indústria brasileira de cimento base para a construção do desenvolvimento. **Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira de Cimento Portland.**, [*s. l.*], p. 66, 2017.

CNI. **Indústria brasileira de cimento**. [*s. l.*], p. 58 p., 2012.

DAFICO, D. A. Contribuição ao estudo de dosagem do concreto de cimento Portland. 1997. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1997.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Lower binder intensity eco-efficient concretes. **Eco-Efficient Concrete**, [*s. l.*], p. 26–44, 2013.

DAMTOFT, J. S. *et al.* Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 38, n. 2, p. 115–127, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008

DE SCHUTTER, G. Evolution of cement properties in Belgium since 1950. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 53, n. 5, p. 291–299, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1680/macr.2001.53.5.291

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. Fourth edied. [*S. l.*]: Spon Press, 2010.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **GNR KGCO$_2$/t cimento WORLD**. [*S. l.*], 2019a. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/world/GNR-Indicator_59cDGWct-world-2019.html.

GCCA. **KGCO$_2$/t cimento 2019BRAZIL** [*S. l.*], 2019b. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/Brazil/GNR-Indicator_59cDGWct-Brazil-2019.html.

GCCA. **Concrete Future**: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete: Roadmap Full Document, 2022.

HABERT, G. Environmental impact of Portland cement production. **Eco-Efficient Concrete**, [*s. l.*], p. 3–25, 2013. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857094247500013.
HANSEN, B. S. *et al.*Portland-limestone cement fineness effects on concrete properties. **ACI Materials Journal**, [*s. l.*], v. 117, n. 2, p. 157–168, 2020.

HIME, W. G. Delayed ettringite formation - A concern for precast concrete? **PCI Journal**, [*s. l.*], v. 41, n. 4, p. 26–30, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.15554/pcij.07011996.26.30

HORKOSS, S. *et al.* The effect of the source of cement SO3 on the expansion of mortars. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], v. 4, p. 62–72, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector**. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: www.iea.org/t&c/.

IEA; CSI. **Technology Roadmap**. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/springerreference_7300

IPCC. **Climate Change 2021** The Physical Science Basis Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [*S. l.: s. n.*], 2021.

IPCC. **Climate Change 2023:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/.

INTERATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13823**: General Principles on the design of structures for durability. 2008

JANKOVIC, A.; VALERY, W.; DAVIS, E. Cement grinding optimisation. **Minerals Engineering**, [*s. l.*], v. 17, n. 11–12, p. 1075–1081, 2004.

JOHN, V. M. *et al.* Rethinking cement standards: Opportunities for a better future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. March, p. 105832, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105832

JOSEPH, S. *et al.* Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 100, n. 3, p. 1178–1194, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jace.14676

JUENGER, M.C.G.; SNELLINGS, Ruben; BERNAL, Susan A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 122, n. February, p. 257–273, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008

KADRI, E. H. *et al.*Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [*s. l.*], v. 43, n. 5, p. 665–673, 2010.

KIPKEMBOI, B. *et al.*Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 240, p. 117840, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117840

KOSMATKA, S. H.; WILSON, Michelle L. **Design and Control of Concrete Mixtures** – The Guide to Applications, Methods and Materials**.** 2011.

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A.; BISHNOI, S. Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 222, p. 64–72, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.123.

LAPEYRE, J.; KUMAR, A.. Influence of pozzolanic additives on hydration mechanisms of tricalcium silicate. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 101, n. 8, p. 3557–3574, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jace.15518

LE QUÉRÉ, C. *et al.*Global Carbon Budget 2016. **Earth System Science Data**, [*s. l.*], v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016

LOTHENBACH, B. *et al.*Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 38, n. 6, p. 848–860, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002

MCKINSEY & COMPANY. *Posicionando o Brasil como líder global no mercado de créditos de carbono por meio de reflorestamento e proteção de florestas*. Disponível em: https://www.mckinsey.com/br/our-insights/posicionando-o-brasil-como-lider-global-no-mercado-de-creditos-de-carbono-por-meio-de-reflorestamento-e-protecao-de-florestas. Acesso em: 3 de nov. de 2024.

MEHTA, P K.; BURROWS, R. W. Building Durable Structures in the 21st Century. **Concrete International**, [*s. l.*], n. March, p. 57–63, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concrete: Microestructure, properties and materials**. [*S. l.*]: McGraw-Hill, 2006.

MILLER, S. A. *et al.*Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 114, n. August, p. 115–124, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026

MILLER, S. A. *et al.*Greenhouse gas emissions from concrete can be reduced by using mix proportions, geometric aspects, and age as design factors. **Environmental Research Letters**, [*s. l.*], v. 10, n. 11, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114017

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao. Acesso em 04 de setembro de 2024.

MIYAZAWA, S. *et al.* Properties of concrete using high C_3S cement with ground granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 61, p. 90–96, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.008

MOON, G. D. *et al.* Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 135, p. 129–136, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189

NATALLI, J. F. *et al.*A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 14, n. 6, p. 1–18, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000600003

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Carbon dioxide trends at Mauna Loa. 2024. Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html.

OEY, T. *et al.*The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 96, n. 6, p. 1978–1990, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jace.12264

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). ONU alerta que 2024 pode terminar como o ano mais quente da história. 2024. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2024/12/1842841.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU).. Adoção do acordo paris. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima, v. 4, p. 1–42, 2015. Disponível em:https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf

PEDRY, G. R. **Avaliação do Efeito da Proteção Superficial (Pintura) na Captura de Co2 devido à Carbonatação de Argamassas de Revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu-PR, 2024. Disponível em: https://dspace.unila.edu.br/items/331ced7a-9745-499f-bc58-48608f6f5c57. Acesso em: 3 nov. 2024.

POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C.C.; ANDRADE, J. J.O. A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 3, n. 1, 2018.

POSSAN, E *et al.* Model to Estimate Concrete Carbonation Depth and Service Life Prediction. **Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 14, p. 67–98, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50998-9_4. Acesso em: 27 abr. 2024.

RIDING, K. A. *et al.* Modeling hydration of cementitious systems. **ACI Materials Journal**, [*s. l.*], v. 109, n. 2, p. 225–234, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.14359/51683709

RODRIGUES, A. F. da S.; FONSECA, David Siqueira. Economia Mineral Brasileira - Cimento. **Capitulo 8**, [*s. l.*], p. 636–654, 2009.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [*s. l.*], v. 88, n. 7, p. 11–21, 2014.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potencial, economically viable solutions for a low-CO2, cemet-based materals industry. **World Business Council for Sustainable Development**, [*s. l.*], p. 42, 2016. Disponível em: https://doi.org/978-3-940388-48-3

SHEN, W. *et al.*Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 75, n. September 2016, p. 618–628, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.033

SCHMALFUSS, L. M., TIMM, J., PASSUELLO, A. C. B. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais**. São Paulo: SIDAC, 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Números da Indústria do Cimento**. [*S. l.*], 2013. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf.

SNIC. **Numeros do Setor:** Fábricas. [*s. l.*], 2024. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-do-setor.php

SNIC. **Roadmap Tecnológico do Cimento**: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro 2019.

SNIC: Relatório Anual. [*s. l.*], p. 40, 2020. Disponível em: http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf

SOUZA, J. A.; RESENDE, G. **Cadernos do Cade- Mercado de cimento no Brasil - 2019**. Brasília: [*s. n.*], 2019. Disponível em: https://cdn.cade.gov.br/Portal/centrais-de-conteudo/publicacoes/estudos-economicos/cadernos-do-cade/mercado-de-cimento-no-brasil-2019.pdf.

SUN, H. *et al.* Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 44, p. 41–49, 2013.

SUN, J.; ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC3) with clinker content below 50 %. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 177, 2024.

TENNIS, P D; BHATTY, J I. Portland cement characteristics-2004. **Concrete Technology Today**, [*s. l.*], v. 26, n. 3, p. 1–3, 2005.

TENNIS, P D; THOMAS, M D A; WEISS, W J. State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15 %. **Portland Cement Association**, [*s. l.*], n. September, p. 1–78, 2011.

THOMAZ, E. C S. Hidratação do Cimento. [*s. l.*], p. 1–24, 2010. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/hidratacao_csh.pdf

TOPRAK, N. A. *et al.* Effects of grinding aid dosage on circuit performance and cement fineness. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 265, p. 120707, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120707.

USGS. Minerals information – cement from United States Geological Survey. **Angewandte Chemie International Edition, 6(11), 951–952.**, [*s. l.*], n. 703, p. 15–39, 2021.

VALLADARES NETO, J. *et al.* Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. [*s. l.*], 2017. Disponível em: https://estatistics.eu/what-is-statistics-charts-boxplot/.

WU, M. *et al.* Reducing environmental impacts and carbon emissions: Study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 196, p. 358–369, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.079.

XU, J. H. *et al.* Energy consumption and CO 2 emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis. **Energy Policy**, [*s. l.*], v. 50, p. 821–832, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.038

YANG, K. *et al.* Investigation of effects of Portland cement fineness and alkali content on concrete plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 144, n. July, p. 279–290, 2017b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.130

ZAJAC, M. *et al.*Modelling the effect of the cement components fineness on performance and environmental impact of composite cements. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 276, p. 122108, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122108

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentados os resultados da etapa 2 do estudo sem os outliers obtidos nas bateladas 3 e 6. O objetivo é mostrar qual o impacto na interpretação dos resultados os desconsiderando. As Figuras 37 a 39 mostram os resultados de resistência à compressão, índice de ligantes e índice de carbono.

A batelada 3, referente ao cimento CP V ARI RS apresentou consumo de cimento mais elevado e, portanto, maior resistência à compressão na ordem de 30 MPa, enquanto os outros resultados na ordem de 25 MPA. Por outro lado, a batelada 6 referente ao cimento CP II Z 32 apresentou consumo de cimento menor e os resultados de resistência a compressão foram menores.

Assumindo que o desvio padrão para o caso do estudo é o mais elevado, espera-se resultados que podem variar por erros de medida inerentes ao processo. Analisando os resultados em comparação do item 3.3.2 nota-se que a interpretação não altera mesmo retirando os outliers para os 3 indicadores.

Figura 37: Consumo de cimento x resistência à compressão dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers

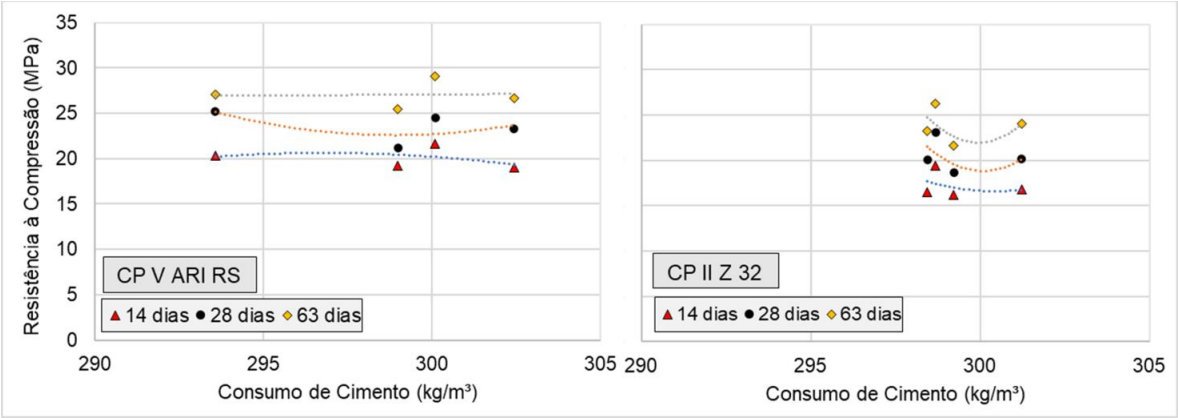


Figura 38: Resistência à compressão por índice de ligantes dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers

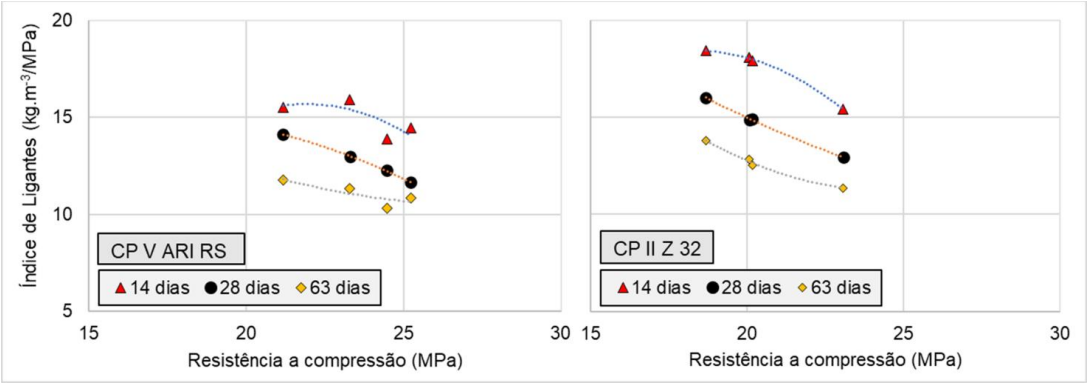
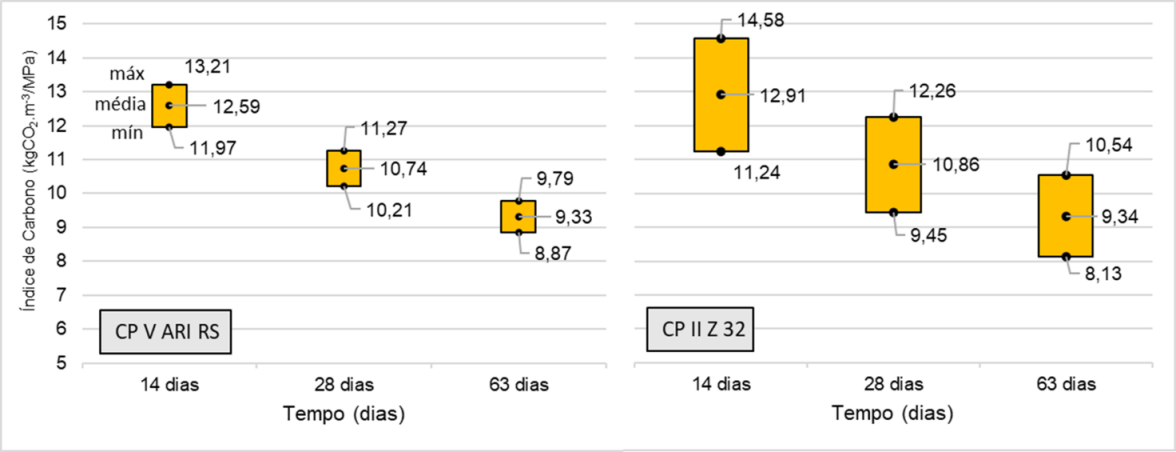



Figura 39: Índice de carbono dos cimentos CP V ARI RS e CP II Z 32 desconsiderando os outliers