



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

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DA FINURA E COMPOSIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND BRASILEIRO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS**  
ESTUDO EXPLORATÓRIO

**GABRIEL WERNER SIMONETO**

Foz do Iguaçu  
2020



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

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DA FINURA E COMPOSIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND BRASILEIRO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS**  
ESTUDO EXPLORATÓRIO

**GABRIEL WERNER SIMONETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura

Orientador: Prof. Dr. Edna Possan  
Co-orientadora: Prof. Dr. Katia Punhagi

Foz do Iguaçu

2020

GABRIEL WERNER SIMONETO

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DA FINURA E COMPOSIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND BRASILEIRO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS**  
ESTUDO EXPLORATÓRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof. Dr. Edna Possan  
UNILA

---

Prof. Dr. Ana Carolina Parapinski dos Santos  
UNILA

---

Prof. Dr. Giovanna Patrícia Gava Oyamada  
UNIOESTE - CASCAVEL

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Curso: \_\_\_\_\_

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nome do orientador(a): \_\_\_\_\_

Data da Defesa: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho aos meus pais, meu  
irmão e meu sobrinho

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Elio e Dirce, pelo incentivo e apoio pelos anos dedicados ao estudo durante a graduação

Ao meu irmão Felipe, que sempre me motivou a seguir em frente e ser um exemplo pra mim

À minha orientadora Edna, pelas oportunidades durante a graduação, atenção e comprometimento nas orientações, sempre disponível e valorizando o meu esforço e dedicação para conclusão desse trabalho

Aos meus colegas de faculdades Gabriel Rossetto, João Pedro Bonfim e Rafaela Goulart pelo convívio e apoio durante a graduação

Aos colegas do mestrado Andressa, Dalila, Isadora, Lucca, Thais e William que iniciaram a coleta de dados e com base nisso foi dado continuidade e realizado este trabalho

Aos especialistas que dedicaram seu tempo para contribuir neste trabalho com o seu conhecimento e experiência

*Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de  
muita fadiga e persistência*  
**Henry Ford**

SIMONETO, G.W. **AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DA FINURA E COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS: ESTUDO EXPLORATÓRIO**. 2020. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## RESUMO

A indústria cimenteira tem planejado e realizado diversas ações para redução dos níveis de emissão de gases do efeito estufa, especialmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em seus processos produtivos. Uma das ações já 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) e 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 ou do teor de  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento. Contudo, cimentos com elevado teor de  $\text{C}_3\text{S}$  e/ou elevada finura, se não empregados de forma correta, 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. 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 (1970-2019). Assim como, avaliar a contribuição da mudança de norma para redução das emissões. Para tal, empregou-se estratégias de pesquisa múltiplas (levantamento de dados, revisão de literatura e survey). Primeiramente fez-se a revisão de literatura, seguida do levantamento e análise de dados com base em documentos técnico-científicos publicados no período, analisando o tipo de cimento, a finura Blaine, a composição química e o ano de publicação. A partir das informações destas pesquisas, fez-se uma survey com especialistas nacionais, a fim de propor soluções técnicas possíveis para o emprego dos cimentos com as variações de finura e composição na indústria da construção, sem prejuízos à durabilidade das construções à base de cimento. Os resultados indicam que a finura dos cimentos CP I, CP II F, CP IV e CP III apresentaram tendência de crescimento no tempo e para os cimentos CP V, CP II Z e CP II E notou-se tendência estável ou decrescente no tempo. Os resultados de composição do cimento mostram que o teor de  $\text{C}_3\text{A}$  tende a diminuir no tempo e a relação  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$  apresenta tendência de crescimento, sendo ambas para os cimentos CP I e CPV. A atualização da norma proporcionou redução de cerca de 6% nas emissões relacionadas a produção de cimento. Os resultados de perda ao fogo sugerem variação positiva para os cimentos CP I, CP V e CP IV e para teor de resíduo insolúvel os cimentos CP I, CP II F, CP V, CP II E e CP III. O survey com especialistas e revisão da literatura propõem a otimização de dosagem (empacotamento de partículas), redução de relação água/cimento e redução no consumo de cimento como soluções técnicas para estas mudanças de finura e composição.

**Palavras-chave:** Aglomerante hidráulico; Superfície específica; Durabilidade; Blaine; Efeito Estufa.



SIMONETO, G. W. **EVALUATION OF THE VARIATION OF FINENESS AND COMPOSITION OF BRAZILIAN PORTLAND CEMENT IN THE LAST DECADES: EXPLORATORY STUDY.** 2020. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## ABSTRACT

The cement industry has planned and carried out several actions to reduce the levels of greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in its production processes. One of the actions already implemented was the reduction of the proportion of clinker contained in cement, through the greater use of supplementary cementitious materials (SCM), especially carbonate materials (filler) and pozzolans (fly ash and blast furnace slag). However, for Portland cement to offer the minimum mechanical strength at 28 days of age recommended in the current standard (NBR 16659, ABNT 2018), one of the possible industrial solutions is to increase the fineness or C<sub>3</sub>S content of the cement. However, cements with a high C<sub>3</sub>S content and/or high fineness, if not used correctly, can result in a greater probability of pathological manifestations in cement-based materials, such as shrinkage and micro-cracks, making cement structures and elements more vulnerable to aggressive external agents. 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 in the last 50 years (1970-2019). As well as, to evaluate the contribution of the change of norm for the reduction of emissions. To this end, multiple research strategies were used (data collection, literature review and survey). First, the literature review was carried out, followed by the survey and analysis of data based on technical-scientific documents published in the period, analyzing the type of cement, the Blaine fineness, the chemical composition and the year of publication. Based on the information from these surveys, a survey was carried out with national experts in order to propose possible technical solutions for the use of cements with variations in fineness and composition in the construction industry, without prejudice to the durability of cement-based constructions. The results indicate that the fineness of CP I, CP II F, CP IV and CP III cements showed a growth trend over time and for CP V, CP II Z and CP II E cements there was a steady or decreasing trend over time. The results of cement composition show that the C<sub>3</sub>A content tends to decrease over time and the C<sub>3</sub>S/C<sub>2</sub>S ratio shows an upward trend, both for CP I and CPV cements. The update of the standard resulted in a reduction of about 6% in emissions related to cement production. The results of loss to fire suggest positive variation for CP I, CP V and CP IV cements and for insoluble residue content CP I, CP II F, CP V, CP II E and CP III cements. The survey with experts and literature review propose dosage optimization (packing of particles), reduction of water/cement ratio and reduction in cement consumption as technical solutions for these changes in fineness and composition.

**Key words:** Hydraulic binder; Specific surface; Durability; Blaine; Greenhouse effect.

SIMONETO, G. W. **EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA FINURA Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND BRASILEÑO EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS: ESTUDIO EXPLORATORIO**. 2020. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## RESUMEN

La industria cementera ha planificado y realizado diversas acciones para reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en sus procesos productivos. Una de las acciones ya implementadas fue la reducción de la proporción de clinker contenido en el cemento, mediante el mayor uso de materiales cementantes suplementarios, especialmente carbonatos (filler) y puzolanas (cenizas volantes y escoria de alto horno). Sin embargo, para que el cemento Portland ofrezca la resistencia mecánica mínima a los 28 días de edad recomendada en la norma actual una de las posibles soluciones industriales es incrementar la finura o contenido de  $\text{C}_3\text{S}$  del cemento. Sin embargo, los cementos con alto contenido de  $\text{C}_3\text{S}$  y/o gran finura, si no se utilizan correctamente, pueden resultar en una mayor probabilidad de manifestaciones patológicas en los materiales cementosos, como retracciones y microgrietas, haciendo que las estructuras y elementos cementosos sean más vulnerables a agentes externos agresivos. En este contexto, este estudio tiene como objetivo analizar la evolución de la fineza y composición química de los diferentes tipos de cemento Portland producidos en Brasil en los últimos 50 años (1970-2019). Así como, evaluar la contribución del cambio de norma para la reducción de emisiones. Para ello, se utilizaron múltiples estrategias de investigación (recolección de datos, revisión de la literatura y encuesta). Primero, se realizó la revisión de la literatura, seguida del relevamiento y análisis de datos basados en documentos técnico-científicos publicados en el período, analizando el tipo de cemento, la finura Blaine, la composición química y el año de publicación. Con base en la información de estas encuestas, se realizó una encuesta con expertos nacionales con el fin de proponer posibles soluciones técnicas para el uso de cementos con variaciones de finura y composición en la industria de la construcción, sin perjuicio de la durabilidad de las edificaciones cementosas. Los resultados indican que la finura de los cementos CP I, CP II F, CP IV y CP III mostró una tendencia de crecimiento en el tiempo y para los cementos CP V, CP II Z y CP II E hubo una tendencia constante o decreciente en el tiempo. Los resultados de la composición del cemento muestran que el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  tiende a disminuir con el tiempo y la relación  $\text{C}_3\text{S} / \text{C}_2\text{S}$  muestra una tendencia ascendente, tanto para los cementos CP I como CPV. La actualización de la norma resultó en una reducción de alrededor del 6% en las emisiones relacionadas con la producción de cemento. Los resultados de las pérdidas por incendio sugieren una variación positiva para los cementos CP I, CP V y CP IV y para el contenido de residuos insolubles CP I, CP II F, CP V, CP II E y CP III. La encuesta de expertos y la revisión de la literatura proponen la optimización de la dosificación (empaquete de partículas), la reducción de la relación agua/cemento y la reducción del consumo de cemento como soluciones técnicas para estos cambios en la finura y composición.

**Palabras clave:** Aglutinante hidráulico; Superficie específica; Durabilidad; Blaine; Efecto invernadero

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Teor clínquer/cimento e emissões de CO <sub>2</sub> associadas à produção do cimento brasileiro ao longo do tempo .....	23
<b>Figura 2:</b> Oferta e uso de MCS com possibilidade de emprego para substituir o clínquer Portland.....	24
<b>Figura 3 –</b> Diagrama de fase do processo de formação dos compostos do clínquer .....	28
<b>Figura 4:</b> Calor de hidratação em função do tempo .....	30
<b>Figura 5:</b> Transformação dos compostos de cimentos em hidratos em função do tempo	31
<b>Figura 6:</b> Processo de hidratação do cimento Portland.....	31
<b>Figura 7:</b> Resistência em função do tempo para cada composto .....	32
<b>Figura 8:</b> Calor de hidratação no tempo para os compostos de C <sub>3</sub> S e C <sub>3</sub> A.....	32
<b>Figura 9 –</b> Efeito da pozolana para desenvolvimento de resistências .....	33
<b>Figura 10 –</b> Efeito do fíler na liberação de calor no processo de hidratação. ....	34
<b>Figura 11:</b> Desenvolvimento de resistência em função do tempo .....	35
<b>Figura 12:</b> Calor de hidratação em função da finura .....	35
<b>Figura 13:</b> Variação temporal da finura do cimento Portland nos EUA.....	36
<b>Figura 14:</b> Relação de finura, teor de C <sub>3</sub> S do cimento Portland e manifestações patológicas .....	38
<b>Figura 15:</b> Instrumento de coleta de dados.....	40
<b>Figura 16:</b> Produção por tipo de cimento em toneladas (x10 <sup>3</sup> ).....	43
<b>Figura 17 –</b> Finura para vários tipos de cimento pelo tempo.....	47
<b>Figura 18:</b> Finura dos cimentos com fíler calcário. a) Cimento CP I. b) Cimento CP V e c) Cimento CP II F.....	49
<b>Figura 19:</b> Finura dos cimentos pozolânicos. a) Cimento CP IV. b) Cimento CP II Z .....	50
<b>Figura 20:</b> Finura dos cimentos com escória. a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III .....	51
<b>Figura 21:</b> Teor da combinação de C <sub>3</sub> S e C <sub>3</sub> A dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V.....	52

<b>Figura 22:</b> Teor de $C_3A$ dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V.....	53
<b>Figura 23:</b> Relação $C_3S/C_2S$ dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V.....	54
<b>Figura 24:</b> Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP II F c) Cimento CP V.....	56
<b>Figura 25:</b> Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III.....	57
<b>Figura 26:</b> Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP II Z. b) Cimento CP IV.....	58
<b>Figura 27:</b> Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP II F c) Cimento CP V.....	59
<b>Figura 28:</b> Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III.....	60
<b>Figura 29:</b> Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP II Z. b) Cimento CP IV.....	61
<b>Figura 30:</b> Emissões específicas comparando normas antigas e norma atualizada (NBR 16659:2018) para composição do cimento.....	63
<b>Figura 31:</b> 1) Superfície original; 2) Aumento da superfície reativa do grão para uma mesma massa.....	64
<b>Figura 32:</b> Esquema da retração química e autógena do concreto.....	65
<b>Figura 33:</b> Relação calor de hidratação e retração química.....	65
<b>Figura 34:</b> Relação entre resistência à compressão e calor de hidratação.....	66
<b>Figura 35:</b> Relação entre resistência à compressão, teor de $C_3S$ e finura.....	67
<b>Figura 36:</b> Relação entre calor de hidratação, teor de $C_3S$ e finura.....	67
<b>Figura 37:</b> Perfil dos respondentes: Estado de atuação.....	68
<b>Figura 38:</b> Perfil dos respondentes: Tempo de experiência.....	69
<b>Figura 39:</b> Perfil dos respondentes: Ocupação profissional.....	69
<b>Figura 40:</b> Perfil dos respondentes: Campo de experiência.....	69
<b>Figura 41:</b> Perfil dos respondentes: Nível de graduação.....	69
<b>Figura 42:</b> Respostas obtidas para a Questão 1: Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na FINURA (ÁREA SUPERFICIAL) do cimento Portland brasileiro nos últimos anos?.....	70
<b>Figura 43:</b> Respostas obtidas para a Questão 2: Para quais cimentos brasileiros?.....	70

<b>Figura 44:</b> Respostas obtidas para a Questão 3 – Como você notou/constatou essa variação na FINURA do cimento Portland? .....	71
<b>Figura 45:</b> Respostas obtidas para a Questão 4 - Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na FINURA do cimento Portland? .....	71
<b>Figura 46:</b> Resposta obtidas para a Questão 5 - Quais as implicações desta MAIOR/MENOR FINURA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental).....	72
<b>Figura 47:</b> Respostas obtidas para a Questão 6 - Como utilizar/aplicar cimentos MAIS/MENOS FINOS para produção de estruturas duráveis e menos emissivas? .....	73
<b>Figura 48:</b> Respostas obtidas para a Questão 7 - Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA (teor de C3S, C2S, C3A e C4AF, Perda ao Fogo e Resíduo Insolúvel) dos cimentos Portland brasileiro nos últimos anos? .....	73
<b>Figura 49:</b> Respostas obtidas para a Questão 8 - Para quais cimentos brasileiros? .....	74
<b>Figura 50:</b> Respostas obtidas para a Questão 9 - Quais as principais mudanças de COMPOSIÇÃO QUÍMICA observadas? .....	75
<b>Figura 51:</b> Respostas obtidas para a Questão 10 - Como você notou/constatou essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland? .....	75
<b>Figura 52:</b> Respostas obtidas para a Questão 11 - Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland? .....	76
<b>Figura 53:</b> Resposta obtidas para a questão 12 - Quais as implicações desta variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental).....	77
<b>Figura 54:</b> Respostas obtidas para a Questão 13 - Questão 13: Como utilizar/aplicar cimentos com variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA para produção de estruturas duráveis e menos emissivas? .....	78
<b>Figura 55:</b> Respostas obtidas para a Questão 14 - Em 2018, teve-se a unificação e atualização das normas técnicas associadas ao cimento Portland, sendo atualmente vigente a NBR 16697 (ABNT, 2018). No que diz respeito à RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO do concreto convencional produzido com Cimento Portland .....	79

<b>Figura 56:</b> Respostas obtidas dos comentários para a Questão 14 .....	79
<b>Figura 57:</b> Respostas obtidas para a Questão 15: no que diz respeito a DURABILIDADE de estruturas de concreto. INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa.....	80
<b>Figura 58:</b> Respostas obtidas dos comentários para a Questão 15 .....	80
<b>Figura 59:</b> Respostas obtidas para a Questão 16: no que diz respeito a REDUÇÃO DE EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) na produção do Cimento Portland. INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa.....	81
<b>Figura 60:</b> Respostas obtidas dos comentários para a Questão 15 .....	81
<b>Figura 61:</b> Desenvolvimento do calor nas misturas vide OPC e C-K-L .....	82
<b>Figura 62:</b> Resistência para idades iniciais do cimento LC <sub>3</sub> e cimento Portland convencional .....	83
<b>Figura 63:</b> Comparação entre cimento Portland comum com cimento LC <sub>3</sub> com variado teor de caulinita .....	84
<b>Figura 64:</b> Emissões específicas para os quatro tipos de cimento .....	84
<b>Figura 65:</b> Representação do empacotamento de partículas .....	85
<b>Figura 66:</b> Resistência em função do teor de adição .....	86
<b>Figura 67:</b> Calor gerado por tipo de cimento.....	86
<b>Figura 68:</b> Calor gerado por tipo de cimento.....	86
<b>Figura 69:</b> Resultados de índice de ligantes da média nacional (verdes) e internacional (vermelhos) x pesquisa (cinza e preto) .....	87

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição dos cimentos Portland brasileiros a partir de 2018.....	25
<b>Tabela 2:</b> Composição dos cimentos Portland brasileiros no período de 1991 a 2018. ....	26
<b>Tabela 3:</b> Fontes mais comuns de minerais para produção de cimento. ....	27
<b>Tabela 4:</b> Compostos químicos principais do cimento Portland.....	28
<b>Tabela 5 –</b> Calor de hidratação para cada composto. ....	32
<b>Tabela 6:</b> Variação do teor de $C_3S$ e finura com o tempo.....	37
<b>Tabela 7:</b> Produção por tipo de cimento em toneladas( $\times 10^3$ ) .....	42
<b>Tabela 8:</b> Porcentagem de produção de cada tipo de cimento .....	43
<b>Tabela 9:</b> Média de conteúdo de clínquer nos cimentos nacionais.....	44
<b>Tabela 10:</b> Estatísticas de quantidade de cimentos por faixa de finura ( $cm^2/g$ ) .....	48
<b>Tabela 11:</b> Estatísticas dos dados de finura Blaine dos cimentos nacionais ( $cm^2/g$ ) .....	48
<b>Tabela 12:</b> Estatísticas de quantidade de cimentos na faixa de $C_3S+C_3A$ .....	53
<b>Tabela 13:</b> Valores máximos em porcentagem para resíduo insolúvel e perda ao fogo ...	55
<b>Tabela 14:</b> Emissões de $CO_2$ proveniente da descarbonatação das rochas calcárias em 1000x toneladas por tipo de cimento .....	62
<b>Tabela 15:</b> Emissões de $CO_2$ totais da produção de cimento em 1000x toneladas.....	62
<b>Tabela 16:</b> Emissões específicas para normas NBR de 1991 e norma NBR 16659:2018	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2 CIMENTO PORTLAND</b> .....	<b>22</b>
2.1 EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	22
2.2 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND .....	25
2.3 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND .....	26
2.4 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND .....	29
2.4.1 Hidratação do Cimento Portland com adições (Filer e Pozolanas) .....	33
2.5 FINURA DO CIMENTO PORTLAND .....	34
2.6 VARIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NO CIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	36
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
3.1 ETAPA 1 - COLETA DE DADOS .....	39
3.1.1 Instrumento de Coleta e Tabulação de Dados da Literatura .....	40
3.1.2 Avaliação da finura e composição do cimento .....	41
3.1.3 Avaliação do Teor de Clínquer e Compostos Contidos no Cimento .....	41
3.1.4 Avaliação das Emissões Associadas à Produção do Cimento .....	42
3.2 ETAPA 2 - SISTEMATIZAÇÃO E LEVANTAMENTO DOS EFEITOS DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND.....	44
3.3 ETAPA 3 – SURVEY COM ESPECIALISTAS .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>
4.1 AVALIAÇÃO DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND AO LONGO DO TEMPO .	47
4.2 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO AO LONGO DO TEMPO .....	52
4.2.1 Teor de C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S e C <sub>3</sub> A.....	52
4.2.2 Perda de fogo e Resíduo insolúvel .....	54
4.2.3 Estimar as emissões de CO <sub>2</sub> máximas e mínimas associadas à produção de diferentes cimentos Portland nacionais .....	61
4.3 SISTEMATIZAÇÃO E LEVANTAMENTO DOS EFEITOS DA FINURA E VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND .....	63
4.3.1 Efeito da Finura .....	63



4.3.2 Efeito do C <sub>3</sub> S (da composição química do cimento) .....	66
4.4 ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DE ESPECIALISTAS .....	68
4.4.1 Descrição da amostra do estudo .....	68
4.4.2 Percepção sobre variação de finura .....	69
4.4.3 Percepção sobre composição química .....	73
4.5 SOLUÇÕES TÉCNICAS PARA A UTILIZAÇÃO DE CIMENTOS COM MAIOR FINURA E VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO.....	81
4.5.1 Aumento do teor de adições .....	82
4.5.2 Empacotamento de partículas .....	84
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>88</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	88
5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO (SURVEY) DESTINADO A ESPECIALISTAS DE CIMENTO E CONCRETO NACIONAIS .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE B - TABULAÇÃO DAS REPOSTAS E PROCESSO DE ANÁLISE DE CONTEÚDO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE .....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland tem um papel importante na economia brasileira, representando um motor da indústria da construção civil, com geração de emprego e renda. Segundo SNIC (2019) são 100 fábricas instaladas no Brasil, com produção de aproximadamente 53,5 milhões de toneladas de cimento em 2018, sendo a região sudeste responsável por 47,45% da produção nacional (SNIC, 2019). Em 2014 a produção mundial de cimento foi de 4,2 bilhões de toneladas com um fator clínquer/cimento médio de 0,65 e, com emissão total de 2,2 Gt de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). A previsão é que a produção de cimento global aumente uma faixa de 12 a 23 % até 2050 (IEA; CSI, 2018).

A produção do cimento gera preocupações de ordem ambiental, uma vez que representa cerca de 5% a 7% das emissões globais antropogênicas de CO<sub>2</sub> (IEA; CSI, 2018; LE QUÉRÉ et al., 2016). O processo de produção do cimento envolve a calcinação da rocha calcária para conversão em clínquer em temperaturas próximas a 1450°C e queima de combustíveis fósseis sendo que correspondem à 63% e 36%, respectivamente das emissões (AÏTCIN, 2016; CNI, 2017; IEA; CSI, 2018; SNIC, 2019).

Segundo o IPCC (2007), as emissões de gases do efeito estufa vêm crescendo com a industrialização, com crescimento de 70% no período de 1970 a 2004. Juntamente com vapor de água (H<sub>2</sub>O), e o Metano (CH<sub>4</sub>), o CO<sub>2</sub> é um gás associado ao efeito estufa, ou seja, o aprisionamento de calor do sol nas camadas inferiores da atmosfera (NOBRE; REID; VEIGA, 2010), sendo de importância reduzir as quantidades emitidas pelas atividades humanas.

Visando redução nas emissões decorrentes da produção do cimento, o SNIC (2019) sugere que o teor de clínquer contido no cimento seja diminuído. Para isso recomenda o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como escórias de alto forno, cinzas volantes e argilas calcinadas, assim como fíler calcário como adição ao clínquer, atendendo as normativas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para a produção do cimento Portland.

Até 2018 havia uma norma técnica para cada tipo de cimento Portland

produzido do Brasil<sup>1</sup>, as quais foram unificadas pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Além da unificação das normativas, houve alteração nos limites mínimos de adições de MCS possíveis de incorporação aos diferentes cimentos Portland (escória de alto forno e cinza volante), elevando-se especialmente o teor de materiais carbonáticos (filler)<sup>2</sup> que podem estar contidos no cimento.

Segundo o SNIC (2019) o fator clínquer/cimento que em 1990 era de 0,80 está atualmente em torno de 0,67 no Brasil. Com isso, considerando a emissão indicada no GNR Project para o ano de 2016 de 866 kg·CO<sub>2</sub>/t de clínquer, a redução do fator clínquer/cimento gerou uma redução de 112,6 kg·CO<sub>2</sub>/t de cimento produzido no país, o que é muito bom do ponto de vista ambiental. Também é de interesse do ponto de vista econômico, uma vez que os MCS geralmente são resíduos ou subprodutos de outras indústrias com custo reduzido, o que explica a pequena variação do preço do cimento Portland no mercado nacional ao longo dos últimos anos.

Do ponto de vista técnico ou tecnológico, os cimentos com menores teores de clínquer precisam manter seu desempenho satisfatório, devendo atender o preconizado na NBR 16697 (ABNT, 2018). Um dos principais requisitos é o atendimento da resistência à compressão mínima aos 28 dias. No Brasil, o cimento Portland pode ter três classes de resistência, C25, C32 e C40, ou seja, aos 28 dias de hidratação o cimento deve apresentar resistência à compressão mínima de 25 MPa, 32 MPa, e 40 MPa, respectivamente, conforme ensaio preconizado na NBR 7215 (ABNT, 2019).

Apesar de alguns MCS possuírem atividade pozolânica, como a escória e a cinza volante, em geral é o clínquer o maior responsável pelo desenvolvimento de resistência mecânica no processo de hidratação nas primeiras idades. Sendo assim, com a redução do teor de clínquer contido no cimento tem-se os seguintes questionamentos: como garantir a resistência à compressão mínima do cimento Portland quando se reduz o teor total de clínquer? Quais os efeitos positivos e negativos da redução do clínquer contido no cimento? Como produzir estruturas resilientes e sustentáveis com cimentos menos emissivos, porém com menores teores de clínquer Portland em sua composição?

---

<sup>1</sup> As normas utilizadas previamente são: NBR 5732:1991 (CP I), NBR 11578:1991 (CP II E; CP II Z; CP II F), NBR 5735:1991 (CP III), NBR 5736:1991 (CP IV), NBR 5733:1991 (CP V).

<sup>2</sup> “São materiais finamente divididos, constituídos em sua maior parte de carbonato de cálcio” (ABNT, 2018, p. 3), os quais são inertes.

A literatura descreve que para manutenção das especificações de resistência mínima do cimento Portland, ou seja, maior ganho de resistências em idades inferiores a 28 dias, maiores finuras e/ou elevação do teor de  $C_3S$  no clínquer, podem ser necessárias (ABRAMS, 1922; AİTCIN; WILSON; MINDESS, 2018; ALEXANDER, 1972; BENTZ et al., 1999, 2001; BENTZ; HAECKER, 1999; BENTZ; PELTZ, 2008; BENTZ; SANT; WEISS, 2008; KELHAM, 1996; MARDANI-AGHABAGLOU et al., 2017; MEHTA; BURROWS, 2001; MOON et al., 2017; NEVILLE, 2016; PÉRA; HUSSON; GUILHOT, 1999; SARKAR, 1990; VUK et al., 2001).

A finura do cimento pode ser definida como uma medida física que afeta sua reatividade com a água no processo de hidratação quanto mais fino, maior a área superficial e mais elevada sua reatividade com a água (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Em geral, está associada ao tempo, tipo e energia de moagem do clínquer ou ao tipo e a proporção de adições de MCS. Sua determinação pode ser conduzida pelo método Blaine, BET ou peneiramento.

O  $C_3S$  é o composto principal que confere resistência mecânica nas primeiras idades em matrizes de cimento Portland (AİTCIN, 2016; KOSMATKA; WILSON, 2011; NEVILLE, 2016). Com a elevação do teor de  $C_3S$  tem-se ganho de resistência aos 28 dias (AİTCIN, 2000; BURROWS et al., 2004; FTIKOS; PHILIPPOU, 1990; SARKAR, 1990)

Contudo, algumas manifestações patológicas podem estar associadas ao aumento na finura e/ou do teor de  $C_3S$  do cimento Portland. Cimentos mais finos e/ou com maiores quantidades de  $C_3S$  propiciam maior liberação de calor de hidratação, que por sua vez elevam os riscos de retração e microfissurações na estrutura do concreto (ALASKAR; HOOTON, 2020; BENTZ et al., 1999, 2001; BENTZ; HAECKER, 1999; BENTZ; SANT; WEISS, 2008; BURROWS et al., 2004; HU; GE; WANG, 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2006). No concreto fissurado tem-se maior facilidade de entrada de agentes agressivos, reduzindo a durabilidade e, conseqüentemente a vida útil das estruturas de concreto, o que não é desejável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Neste contexto, o presente estudo visa avaliar a variação da finura e da relação  $C_3S/C_2S$  do cimentos nacionais visto que autores como Bentz, Sant e Weiss (2008); Tennis e Bhatti (2005); Thomaz (201-) estudaram variações nas propriedades físicas do cimento no decorrer do tempo. Assim como, avaliar seus efeitos positivos e negativos e por fim propor soluções práticas para mitigar os problemas gerados

associados à variação da finura e composição química do cimento Portland.

Para responder as perguntas deste estudo, fez-se a análise da variação temporal da finura Blaine e da composição química em termos de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$  de vários tipos de cimento Portland brasileiros, a partir de dados históricos disponíveis na literatura, a partir dos anos 1970 até os dias atuais. Com base na revisão de literatura e conhecimento de especialistas foram respondidas às demais perguntas do estudo, buscando alternativas tecnológicas para uso de cimentos menos emissivos. Os resultados foram confrontados com os dados da literatura.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a finura e a composição química do cimento Portland brasileiro produzido nas últimas cinco décadas, propondo soluções técnicas para uso de cimentos menos emissivos sem prejuízos à durabilidade das construções.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a variação temporal da finura dos diversos tipos de cimentos Portland normalizados brasileiros;
- b) Analisar a variação na composição química dos principais cimentos Portland brasileiros;
- c) Estimar as emissões de  $CO_2$  máximas e mínimas associadas à produção de diferentes cimentos Portland nacionais;
- d) Sistematizar os efeitos positivos e negativos da alteração da finura dos cimentos e do uso de adições do ponto de vista técnico e ambiental;
- e) Propor soluções técnicas para a utilização de cimentos com maior finura, tendo em vista as questões de durabilidade.

### 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

**Limitação 1:** A pesquisa foi feita baseada somente na revisão da literatura dos trabalhos disponíveis online (TCC, dissertação de mestrado, tese de doutorado, artigos) para a obtenção dos dados de composição química do cimento ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,

C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) e de ensaios físicos (Finura e Massa específica). Pela dificuldade criada pela COVID-19, não foi possível fazer as visitas planejadas inicialmente para coletar dados in loco nas universidades com pesquisas de pós-graduação antes dos anos 90 com trabalhos apenas em mídia física (papel).

**Limitação 2:** Como os dados do estudo são oriundos de publicações técnico científicas, o ano de produção do cimento empregado no estudo pode não corresponder ao ano de publicação da pesquisa.

**Limitação 3:** A survey conduzida no trabalho coletou dados de percepção de especialistas nacionais, ou seja, informações baseadas em experiências (profissionais e/ou acadêmicas) no tema do estudo.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso está dividido em 5 capítulos

**Capítulo 1: Introdução** – Nesse capítulo são apresentadas as considerações gerais a respeito da produção de cimento no Brasil e no mundo, emissões de CO<sub>2</sub> causada pela produção de cimento, impacto da nova norma para cimento Portland no Brasil, breve revisão sobre efeitos da finura e teor de C<sub>3</sub>S no cimento e metodologia empregada.

**Capítulo 2: Cimento Portland** – Primeiramente é abordado revisão das emissões de CO<sub>2</sub> causado pela produção do cimento Portland e possíveis soluções industriais para diminuir as emissões, os tipos de cimento utilizados no Brasil e a mudança na norma no ano de 2018, o processo produtivo do cimento Portland, processo de hidratação do cimento Portland de maneira geral e o efeito das adições, a finura do cimento Portland e revisão bibliográfica de autores que abordaram as mudanças de finura e composição química do cimento

**Capítulo 3: Metodologia** – Esse capítulo apresenta o processo metodológico para a coleta de dados de finura, composição de cimento e emissões provenientes da produção de cimento, o instrumento de coleta, tabulação, filtragem e avaliação dos dados. Assim como a metodologia para proposição de soluções técnicas para uso de cimentos menos emissivos (survey com especialistas nacionais no tema da pesquisa).

**Capítulo 4: Resultados** – Para os resultados foram analisados os dados coletados de finura e composição, gerados gráficos de finura x tempo e composição

(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, PF e RI) x tempo e estatísticas para avaliar a sua variação e tendência no tempo. Foi realizada estimativa de emissões específicas comparando a norma antiga (1991) com a norma nova (2018). A sistematização dos efeitos da finura e do C<sub>3</sub>S e possíveis soluções para obter cimentos menos emissivos (mais eficientes). Por fim foi realizada a survey com especialistas para levantamento de informações para proposição de soluções no que diz respeito a variação na finura e composição do cimento

**Capítulo 5: Conclusões** – No capítulo final são apresentadas as conclusões sobre o estudo contido neste trabalho de conclusão de curso. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros a fim de dar continuidade neste estudo exploratório.

## 2 CIMENTO PORTLAND

### 2.1 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Segundo o IPCC (2007), a produção global de cimento cresceu de 594 Mt em 1970 para 2200Mt em 2005, sendo a China o maior produtor global no ano de 2005 com 1000 Mt de cimento correspondendo a 47% da produção global e taxa anual de crescimento de 2,5% ao ano. No ano de 2016, a China correspondeu a 57% da produção mundial com 2410 Mt de cimento, com um fator clínquer/cimento de 0,60 (ANDREW, 2018).

O Brasil detém um parque industrial para a produção de cimento com 100 fábricas instaladas pelo país e apresentou no ano de 2016, a produção de 57 Mt (SNIC, 2016), correspondendo a cerca de 1,35% da produção de cimento mundial. A indústria do cimento apresentou crescimento na produção de 122% no período de 1990 a 2016 (CNI, 2017), a com média de emissões de 673 kg.CO<sub>2</sub>/t.cimento e 866 kgCO<sub>2</sub>/t clínquer (WBCSD, 2016), sendo que 30% a 40% das emissões têm origem da queima de combustíveis e 60 a 70% no processo de descarbonatação das rochas calcárias (SNIC, 2019).

Arelado a produção mundial de cimento está o efeito estufa, que é o processo natural causado pela retenção de calor proveniente do sol para as camadas inferiores da atmosfera pelos gases de vapor d'água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), óxido nitroso (NO<sub>x</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), respectivamente por ordem de relevância. De 1992 a 2010 as emissões de CO<sub>2</sub> de origem fóssil aumentaram 43%. O carbono antes armazenado nas rochas, na forma de petróleo, gás e carvão está sendo dissociado e dando origem ao CO<sub>2</sub>. Cada vez mais o carbono provenientes da interferência humana está crescendo em comparação ao carbono de origem vulcânica (NOBRE; REID; VEIGA, 2010).

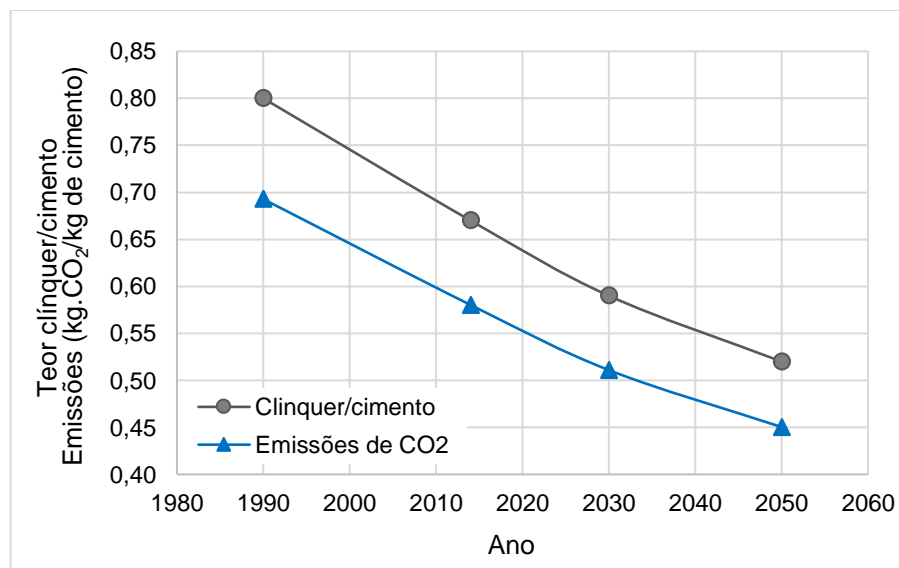
De acordo com Damtoft et al. (2008), a produção do cimento mundial é responsável por 5% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o gás mais importante para o efeito estufa. Porém contabilizando os gases de efeito estufa e, considerando que a indústria de cimento apenas emite CO<sub>2</sub>, a produção de cimento representa 3% das emissões antropogênicas no total destes gases. Os números divergem, e podem representar até 7% das emissões de CO<sub>2</sub> globais (IEA; CSI, 2018).



Visando reduzir as emissões de gases do efeito estufa, um grupo formado por mais de 190 países assinou o acordo de Paris em 2015 que tem como objetivo frear o aquecimento global, mantendo o aumento da temperatura de 1,5 °C à 2 °C (BRASIL, 2018). Para tal, é necessário que os participantes reduzam as emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, com base em metas estabelecidas no acordo.

A principal solução proposta na literatura para reduzir as emissões de gases do efeito estufa no âmbito da produção de cimento é a redução da quantidade de clínquer contida no cimento, tomando em conta o indicador clínquer/cimento (CNI, 2012; DAMTOFT et al., 2008; HABERT, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2006; SCRIVENER, 2014; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016; SNIC, 2019). Para isso, sugere-se elevar a quantidade de materiais cimentícios suplementares (MCS) adicionados ao clínquer para a produção do cimento Portland. Segundo o SNIC (2019), no Brasil em 1990 o fator clínquer/cimento era de 0,80, em 2014 passou para 0,67 e a expectativa é de 0,59 para 2030 e 0,52 para 2050, sendo necessário o incremento de adições na composição do cimento como escória de alto forno, cinzas volantes ou pó de calcário para promover esta redução. Nota-se na Figura 1 o impacto positivo da redução do fator clínquer/cimento na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao cimento Portland.

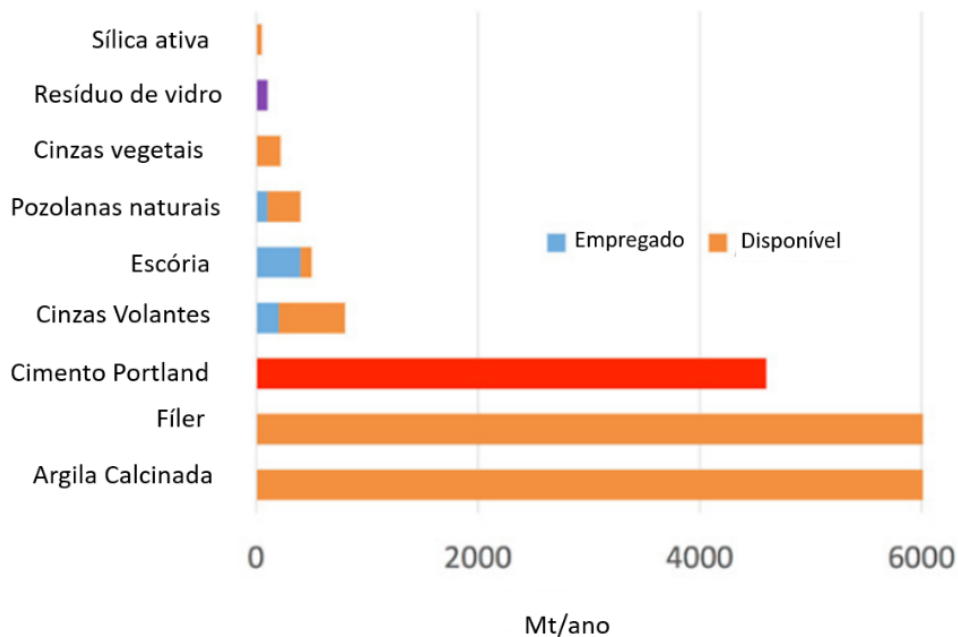
**Figura 1:** Teor clínquer/cimento e emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção do cimento brasileiro ao longo do tempo



**Fonte:** Gráfico construído com dados do fator de clínquer/cimento do SNIC (2019) e dados de emissões do clínquer do WBCSD (2016).

Para satisfazer o plano proposto pelos roadmaps tecnológico do cimento (IEA; CSI, 2018; 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). A partir da Figura 2, é possível analisar que apenas argilas calcinadas e fíler, são adições compatíveis com a escala de produção do cimento. Logo, soluções que envolvam o uso de argilas calcinadas e fíler são mais adequadas comparadas as outras opções de adições.

**Figura 2:** Oferta e uso de MCS com possibilidade de emprego para substituir o clínquer Portland



**Fonte:** (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016)

Em paralelo com a redução do teor de clínquer do cimento, alternativas tecnológicas para utilização destes cimentos devem ser implementadas pelos produtores de materiais a base de cimento, a fim de garantir o desempenho necessário as edificações. Por exemplo, de acordo com Aitcin, Wison e Mindess (2018) para que estruturas de concreto com cimentos a base de materiais cimentícios suplementares atinjam a resistência à compressão de 28 dias, como a prescrita pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), faz-se necessário adotar 3 (três) medidas possíveis:

1. Aumento no teor de  $C_3S$  e  $C_3A$  do clínquer (maior reatividade nas idades iniciais);

2. Maior finura das partículas do cimento (maior reatividade devido à maior superfície específica); e,
3. Melhorar o empacotamento de partículas a partir do uso de aditivos superplastificantes.

A primeira opção (maior teor de  $C_3S$ ) demandaria maior teor de calcário na farinha crua para a produção do clínquer, resultando em maiores emissões de  $CO_2$ . Maiores teores de  $C_3A$  prejudicam a durabilidade do concreto com maior produção de etringita e menor resistência a sulfatos. A segunda opção (maior finura) exige maior tempo no processo de moagem do clínquer, com isso maior uso de combustíveis e emissões de  $CO_2$  (AÏTCIN; WILSON; MINDESS, 2018).

A terceira opção refere-se ao uso do cimento Portland para a produção de materiais a base de cimento. Aïtcin; Wilson; Mindess (2018), citam que para atingir a meta de ganhos de resistência em idades iniciais, o empacotamento de partículas com uso de aditivos superplastificante são fundamentais. Essa alternativa demanda o emprego de materiais cimentícios suplementares (MCS) com maior finura que o cimento que fornecem maior reatividade à matriz, assim como o uso de aditivos que reduzem a relação água/cimento da mistura. Essa é uma alternativa interessante do ponto de vista de durabilidade e sustentabilidade (AÏTCIN; WILSON; MINDESS, 2018).

## 2.2 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Define-se o cimento Portland como um “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nessa Norma” (ABNT, 2018, p. 2). A depender da proporção de adições minerais empregadas, o cimento Portland brasileiro recebe uma classificação. Atualmente está em vigor a NBR 16697 (ABNT, 2018), que regulamenta a composição dos cimentos sendo os principais: CP I, CP I S, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV e CP V (Tabela 1). Antes de 2018, os cimentos brasileiros respeitavam as indicações de outras normativas, conforme Tabela 2.

**Tabela 1:** Composição dos cimentos Portland brasileiros a partir de 2018.

Cimento	Norma	Clínquer*	Escória	Pozolana	Fíler
CP I**		85-90	0-5	0-5	0-5
CP I-S		85-89	0	0	6-10
CP II E	NBR 16697 (ABNT, 2018)	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 ( $\text{CaSO}_4$ ) corresponde em média 5% do cimento (DOMONE; ILLSTON, 2010).

\*\*Somente uma das adições é permitida.

**Tabela 2:** 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 ( $\text{CaSO}_4$ ) corresponde em média 5% do cimento (DOMONE; ILLSTON, 2010).

\*\* Somente uma das adições era permitida.

Os principais componentes do cimento Portland brasileiros são o clínquer, o sulfato de cálcio (gesso), a escória de alto forno, as cinzas volantes e o material carbonático (fíler calcário), os quais têm limites mínimos e máximos fixados conforme o tipo de cimento a ser produzido. Observa-se que estes limites tiveram mudanças na norma vigente (Tabela 1), principalmente para o teor de fíler calcário, cujo limite máximo passou de 10% para 25%.

### 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  $\text{CO}_2$ . O cimento é fundamentalmente um produto da descarbonatação de rochas calcárias, sua matéria-prima principal, sob a forma de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) a partir do aquecimento em forno de clínquer (POSSAN, 2019). O processo

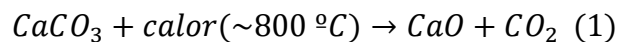
de obtenção do cimento se inicia na extração da matéria-prima principal ( $\text{CaCO}_3$ ), e adição de materiais corretivos complementares como minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) entre outros, necessários para que haja a formação dos compostos de hidratação (maiormente silicatos e aluminatos de cálcio). A partir destes insumos faz-se a moagem e pré-homogeneização para obtenção da “farinha crua” (SNIC, 2019). Os materiais mais comuns para a produção e correção dos minerais presentes no cimento, a depender da região onde está instalada a fábrica, são os apresentados pela tabela 3.

**Tabela 3:** Fontes mais comuns de minerais para produção de cimento.

<b>Mineral</b>	<b>Fontes</b>
<b>Cálcio</b>	Calcário, Calcita, Aragonita, Marga
<b>Ferro</b>	Argila, Minério de ferro
<b>Sílica</b>	Argila, Areia, Marga, Xisto
<b>Alumínio</b>	Argila, Cinza Volante, Xisto
<b>Sulfato</b>	Gipsita e Fosfogesso

Fonte: (KOSMATKA; WILSON, 2011)

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  $800^\circ\text{C}$ , onde tem-se o processo de descarbonatação da rocha carbonática (CNI, 2012). O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se transforma em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbônico ( $\text{CO}_2$ ) pela quebra molecular gerada nestas temperaturas, conforme equação (1).

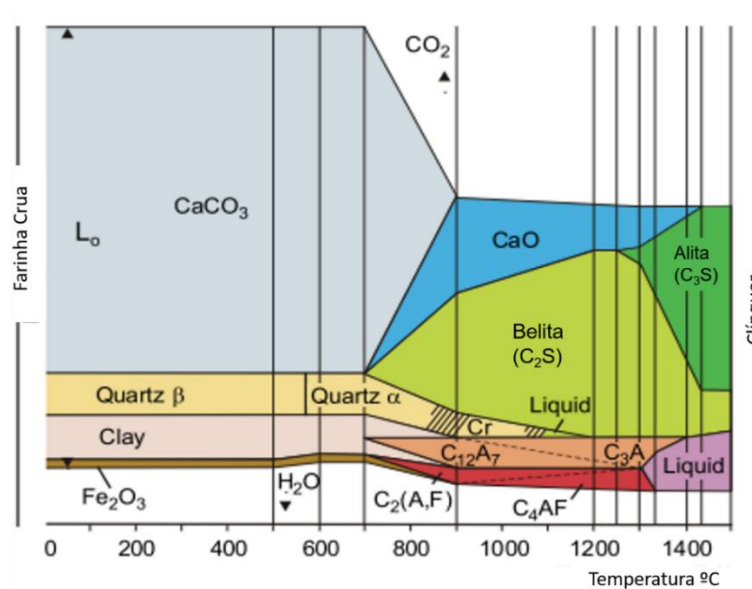


Com base na estequiometria dos compostos químicos  $\text{CaO}$  corresponde a 56% e o  $\text{CO}_2$  a 44% do produto do aquecimento do  $\text{CaCO}_3$ . Sendo assim, para se produzir uma tonelada de clínquer Portland são necessários em média de 1300 kg a 1400kg de rochas carbonáticas (RODRIGUES; FONSECA, 2013).

Na continuidade do processo de clínquerização, eleva-se a temperatura da mistura no interior do forno rotativo à cerca de  $1450^\circ\text{C}$ , 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. Na Figura 3 tem-se uma representação esquemática deste processo com a indicação dos compostos formados em função da temperatura.

**Figura 3** – Diagrama de fase do processo de formação dos compostos do clínquer



Fonte: (AÏTCIN, 2016)

Com o processo de clínquerização são formados compostos complexos, sendo os 4 principais descritos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Compostos químicos principais do cimento Portland

Nome do composto	Composto	Abreviatura	Teores típicos (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50 a 70
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10 a 25
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	15 a 16
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	

Fonte: NEVILLE (2016), AITCIN (2016), MEHTA E MONTEIRO (2006)

O silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 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 ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 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<sub>3</sub>A) libera grande quantidade de calor nas primeiras idades e contribui no processo de pega e endurecimento. Cimentos com baixo teor de C<sub>3</sub>A são mais resistentes a ataques de sulfatos. O ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) 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<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) correspondem de 15 a 16% em massa do clínquer (AÏTCIN, 2016). Além dos compostos principais, existem compostos secundários que estão em menores quantidades são os seguintes: MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, assim como, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O que são conhecidos como álcalis e podem gerar reações de expansão com alguns tipos de agregados que deterioram o concreto (TAYLOR, 1990).

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 filer calcário (CNI, 2012), conforme tabela 1, para a produção dos diferentes tipos de cimento.

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 abaixo: (2), (3), (4) e (5) (ASTM, 2001)

$$\%C_3S = 4,071 CaO - 7,6SiO_2 - 6,718Al_2O_3 - 2,85SO_3 \quad (2)$$

$$\%C_2S = 2,867SiO_2 - 0,7544C_3S \quad (3)$$

$$\%C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3 \quad (4)$$

$$\%C_4AF = 3,043 Fe_2O_3 \quad (5)$$

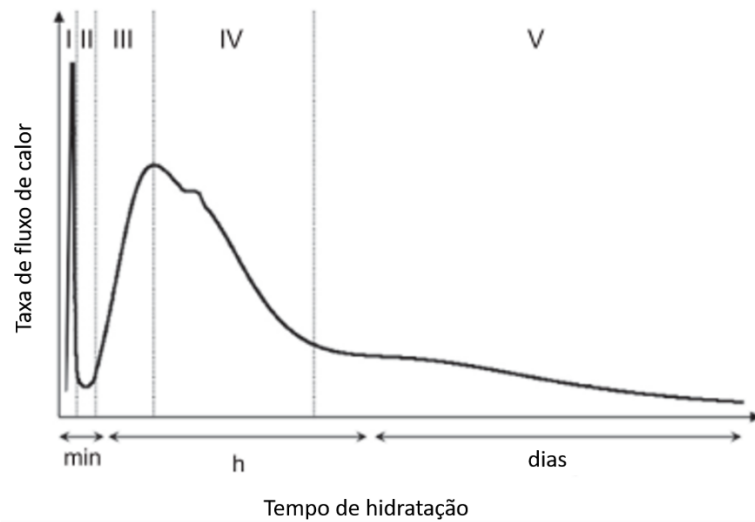
Cabe destacar que para cimentos com adições pozolânicas estas equações não são aplicáveis.

## 2.4 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O processo de hidratação do cimento Portland se inicia assim que os compostos do cimento anidro (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) entram em contato com a água e são dissolvidos. A hidratação do cimento ocorre de forma exotérmica, isto é, libera

calor, quando ocorre o contato dos compostos do cimento com a água (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: (AİTCIN, 2016)

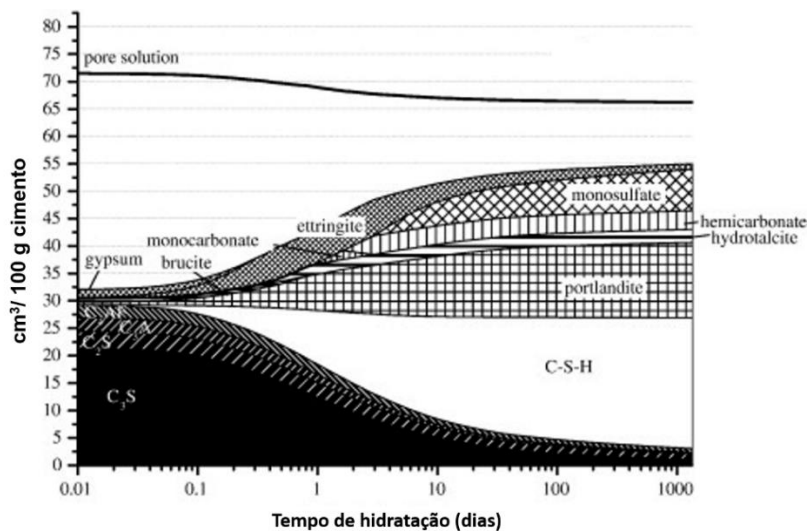
Segundo AİTCIN (2016), o processo de hidratação é dividido em 4 fases:

- I. Dissolução dos íons da água e início da hidratação de  $C_3S$  e  $C_3A$ .
- II. Período de dormência onde há redução na atividade química.
- III. e IV.  $C_3S$  e  $C_3A$  continuam o processo de hidratação.
- V. A maior parte de  $C_2S$  e  $C_4AF$  se hidratam.

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. Pela Figura 5 é possível analisar também a perda de volume assim que se desenvolvem as reações de hidratação. O processo de dissolução e precipitação dos componentes está exposto na Figura 6.

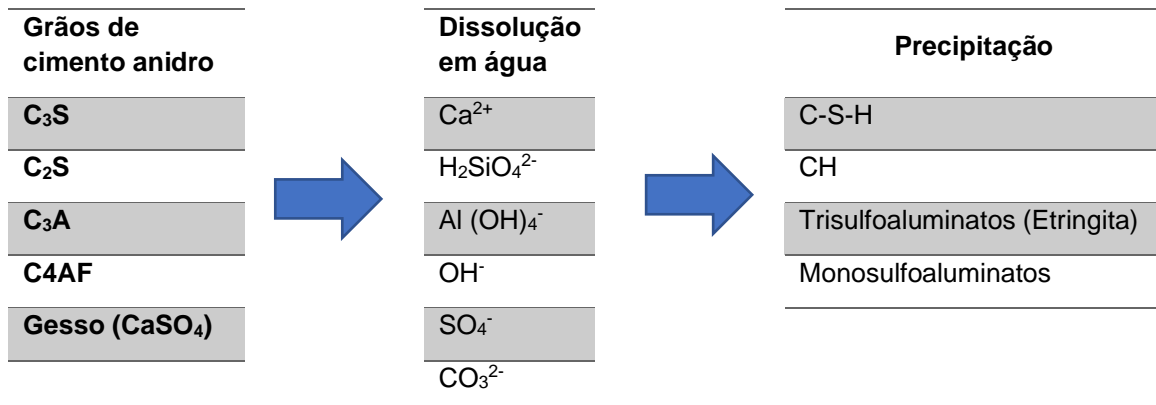


**Figura 5:** Transformação dos compostos de cimentos em hidratos em função do tempo



Fonte: (LOTHENBACH et al., 2008)

**Figura 6:** Processo de hidratação do cimento Portland



Fonte: John (2017, cópia de tela: 29 minutos e 40 segundos).

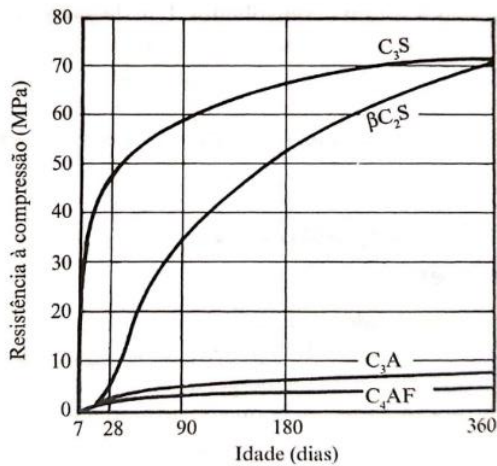
De acordo com Anjos et al. (2012), o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) compreende 50% a 60% do volume da pasta, sendo o principal componente para garantir as propriedades mecânicas e CH (hidróxido de cálcio) que representa 20% a 25% do volume da pasta. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), as velocidades 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  $C_4AF$ .

O sulfato de cálcio tem um papel importante para diminuir a reação rápida desenvolvida pelo  $C_3A$ , pois 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).

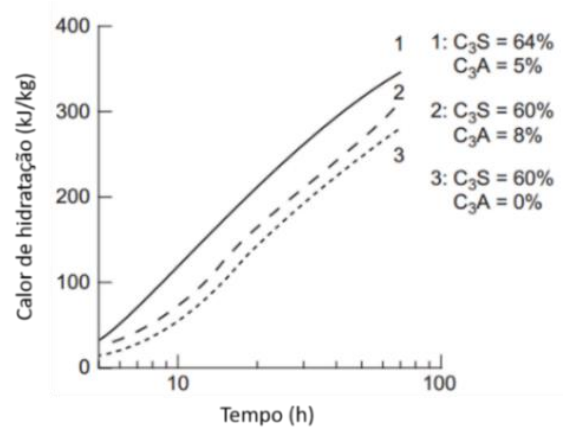
A partir das Figuras 7 e 8, constata-se de que maneira os componentes do cimento interferem no desenvolvimento de resistência (Figura 7) e liberação de calor (Figura 8).

**Figura 7:** Resistência em função do tempo para cada composto



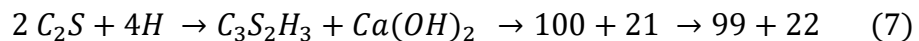
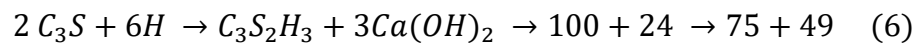
Fonte: NEVILLE (2016)

**Figura 8:** Calor de hidratação no tempo para os compostos de  $C_3S$  e  $C_3A$



Fonte: MEHTA E MONTEIRO (2006)

Conforme Mehta e Monteiro (2006), a reação de hidratação dos compostos  $C_3S$  e  $C_2S$  acontecem a partir das equações (6) e (7), onde H é água ( $H_2O$ ):



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 são apresentados na tabela 5.

**Tabela 5** – Calor de hidratação para cada composto.

Composto	Calor de hidratação (J/g)
$C_3S$	502
$C_2S$	260
$C_3A$	867
$C_4AF$	419

Fonte: NEVILLE (2016)

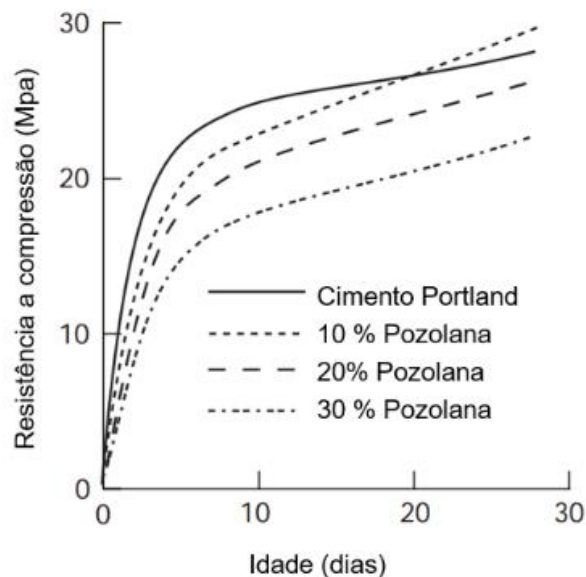
De acordo com RIDING et al.(2012), o desenvolvimento da temperatura no

processo de hidratação irá determinar: a resistência a longo prazo, permeabilidade, durabilidade e a probabilidade de ocorrer fissurações. Fatores como finura e composição química do cimento, tipo de aditivo e quantidade, teor a/c, tipo de adições minerais (calcário, escória, cinza volante, argila calcinada, cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim) e suas características físicas e químicas afetam no desenvolvimento do calor no processo de hidratação.

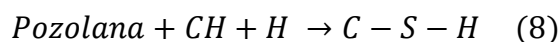
#### 2.4.1 Hidratação do Cimento Portland com adições (Fíler e Pozolanas)

Segundo Mehta e Monteiro (2006) algumas adições do cimento, como pozolanas, causam ganho de resistência tardios como demonstra a Figura 9, consumindo o hidróxido de cálcio (CH) que causa vulnerabilidade para ataques de sulfatos e ácidos como mostra na equação (8) e transforma em C-S-H numa reação lenta, aumentando sua durabilidade (REBMANN, 2011). Assim, torna-se necessário aumentar níveis de C<sub>3</sub>S e finura para atender as demandas de velocidade na construção, permitindo diminuir os prazos.

**Figura 9** – Efeito da pozolana para desenvolvimento de resistências



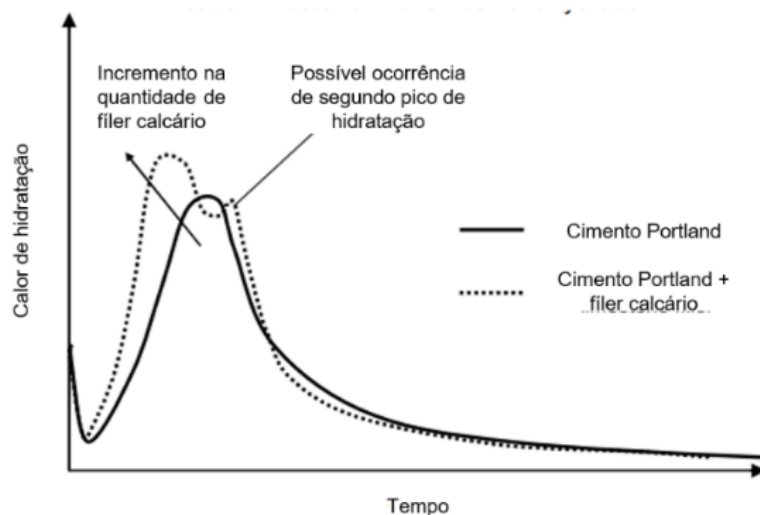
Fonte: MEHTA E MONTEIRO (2006)



No caso de fíler calcário, de acordo com Bouasker et al. (2008), é intensificado

o efeito de nucleação pelo aumento no número de partículas finas, ou seja, menor área superficial pertencentes no cimento. Esse efeito favorece a hidratação nas primeiras horas, como apresentado pela Figura 10, causando o primeiro pico de calor de hidratação e um possível segundo pico de calor de hidratação pela maior disponibilidade de  $C_3A$  (maior finura) e calcário.

**Figura 10** – Efeito do filler na liberação de calor no processo de hidratação.



Fonte: (OLIVERA et al., 2017)

As partículas finas do material inerte, calcário ( $CaCO_3$ ), torna o ambiente propício para gerar pontos extras de nucleação, precipitando hidratos além do cimento, sobre a superfície dos grãos de filler, com isso resulta na aceleração das reações químicas do cimento e permite maiores resistências nas idades iniciais (HOPPE FILHO, 2008). Portanto, as estruturas de concreto tendem a gerar microfissurações e estão mais suscetíveis à entrada de agentes agressivos causada pelos vazios, resultando em deterioração precoce das armaduras de aço, o que não é desejável do ponto de vista de durabilidade.

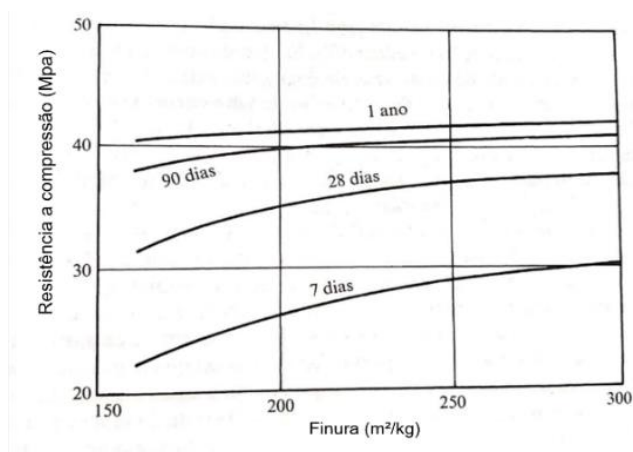
## 2.5 FINURA DO CIMENTO PORTLAND

A finura do cimento é uma característica física que é definida no processo de moagem do clínquer misturado ao sulfato de cálcio, corresponde a área superficial disponível para a hidratação (NEVILLE, 2016) assim como após o processo de adição de MCS, uma vez que estes, em geral são produtos com elevada área superficial. No

Brasil existem ensaios normatizados para determinação da finura do cimento sendo o Método Blaine NBR 16372 (ABNT, 2015), o método da peneira n° 200 NBR 11579 (ABNT, 2012) e peneirador aerodinâmico NBR 12826 (ABNT, 2014). O ensaio Blaine determina a finura do cimento pela unidade ( $m^2/kg$ ) a partir da lei de Stokes<sup>3</sup> (NEVILLE, 2016), sendo um ensaio bastante difundido no país e base para o controle tecnológico na indústria. Além destes ensaios, tem-se o método baseado na teoria BET (Brunauer, Emmett, Teller) para determinação da superfície específica do cimento.

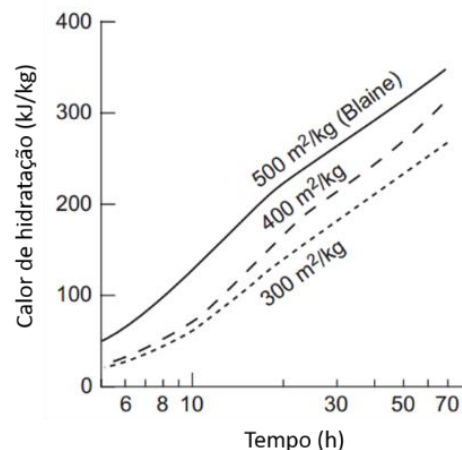
Segundo Mehta e Monteiro (2006), a finura do cimento afeta diretamente a sua reatividade com a água; grãos mais finos tendem a reagir mais rapidamente desenvolvendo resistência em menor tempo. Porém, com custo de gerar maior liberação de calor causada pela hidratação mais veloz do grão. Neville (2016) destaca que o aumento da finura faz com que haja aumento na disponibilidade de  $C_3A$  para a hidratação inicial e, segundo a Tabela 5, é 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



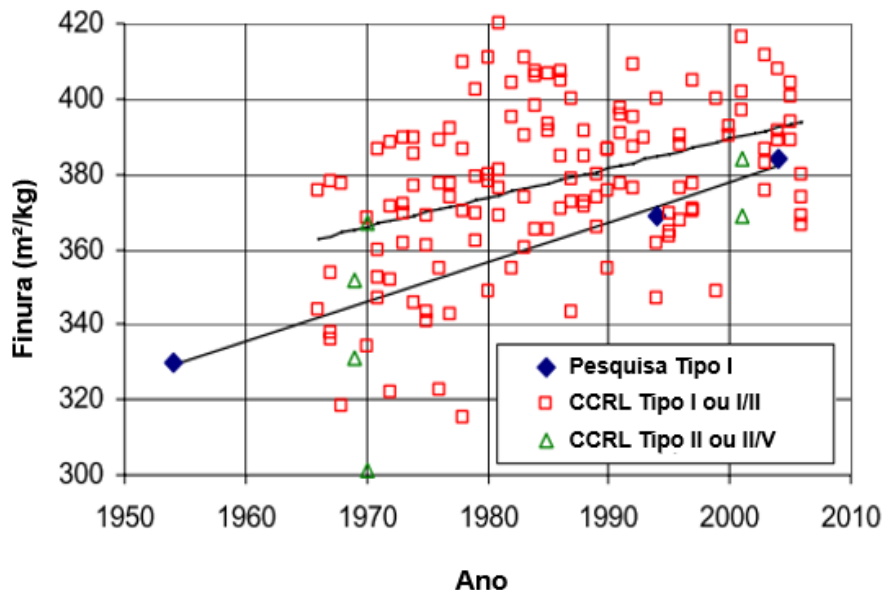
Fonte: MEHTA E MONTEIRO (2006)

<sup>3</sup> Lei de Stokes é baseado no princípio de que um corpo esférico imerso em um fluido sofre a ação de resistência do fluido, assim como da ação da força gravitacional e quando ocorre equilíbrio dinâmico entre as forças durante a queda, é possível determinar o diâmetro da partícula, a partir de correlações matemáticas (Lima, 2001).

## 2.6 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) analisaram a variação temporal da finura Blaine desde 1950 a 2010 de três tipos de cimentos utilizados nos EUA, constatado 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.

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



Fonte: (BENTZ; SANT; WEISS, 2008)

Tennis e Bhatti (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). Assim, para suprir a demanda dos construtores, o autor cita que as cimenteiras passaram a fabricar cimentos com maior teor de  $C_3S$  e menor finura, porém sem considerar o uso específico deste material e as questões que podem comprometer a durabilidade do concreto, comparando com

cimentos menos finos e menor teor de  $C_3S$  há ganho de resistência após 28 dias.

Na revisão publicada por Mehta e Burrows (2001), foi feita a comparação dos cimentos de 1930 aos dias atuais, avaliando  $C_3S$  e finura, cujos resultados estão resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6:** Variação do teor de  $C_3S$  e finura com o tempo

Período	$C_3S$	Finura
<b>Antes de 1930</b>	Baixo (30%)	Baixa (185 m <sup>2</sup> /kg)
<b>1930 - 1950</b>	Não informado	Média (300 m <sup>2</sup> /kg)
<b>1950 - 1980</b>	Médio teor (50%)	Média (300m <sup>2</sup> /kg)
<b>2001</b>	Teor maior que 60%	Alta finura (Maior que 400m <sup>2</sup> /kg)

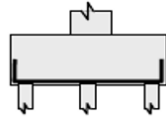
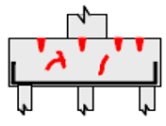
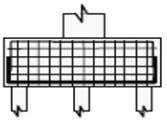
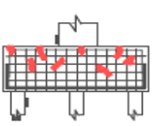
Fonte: (MEHTA; BURROWS, 2001)

Antes de 1930 os concretos praticamente não apresentavam fissuração. No período de 1930 a 1950, um estudo comparando a situação das pontes indicou que as estruturas construídas após 1930 apresentavam estado de conservação inferior às construídas antes de 1930 (MEHTA; BURROWS, 2001)

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 300m<sup>2</sup>/kg. Nos dias atuais o teor de  $C_3S$  passa de 60% e a finura pode ser maior que 400m<sup>2</sup>/kg (MEHTA; BURROWS, 2001). Com as questões ambientais vigentes novas alterações foram conduzidas e no futuro possivelmente outras surgirão.

Thomaz (201-) 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 surgir a partir da década de 70 e se tornaram mais frequentes nos anos 90. A Figura 14 exemplifica o aumento da finura e teor de  $C_3S/C_2S$  determinados por Thomaz (201-) 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 14 retratam o surgimento de microfissurações.

**Figura 14:** Relação de finura, teor de  $C_3S$  do cimento Portland e manifestações patológicas

Fissuração				
Ano	1958-1975	1975-1982	1982-1992	1992-2010
Cimento	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 ( $m^2/kg$ )	320	325 → 370	370	360-400
Comentário	Sem fissuração	Surgem fissurações	Uso de armaduras nas faces dos blocos	Uso de armaduras e aparecimento de fissurações

Fonte: adaptado de Thomaz (201-)

Entretanto, no Brasil existem divergências quando se trata da finura do cimento. Battagin, Munhoz e Battagin (2014, p. 50) são contrários à essa tendência e 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. O que mudou efetivamente foi a participação porcentual de cimentos caracteristicamente mais finos no mercado, como o CP V ARI e os cimentos com expressivos teores de adições (CP III e CP IV) em relação aos cimentos compostos (CP II-F, CP II-E e CP II-Z), os mais consumidos no Brasil, gerando a percepção errônea de que os cimentos estão mais finos e, portanto, podendo gerar concretos ou argamassas susceptíveis a maior fissuração.

Contudo, os dados fornecidos pelo SNIC (2013) não corroboram com a afirmação de que os cimentos CP V ARI, CP III e CP IV tomaram uma participação maior no mercado, pode-se avaliar a partir da Tabela 8 (pág. 43).

Em suma, 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  $350 m^2/kg$  proposto por Aitcin e Mindess (2011). 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, onde cimentos com menores teores de clínquer estão vigorando no mercado, desta forma este estudo objetiva avaliar essa variação, constatar os efeitos e propor soluções para a indústria do cimento.



### 3 METODOLOGIA

O presente estudo é uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, que associa os procedimentos metodológicos de revisão bibliográfica, levantamento de dados da literatura e Survey baseada em conhecimento de especialistas.

Com base em estudos técnicos e científicos produzidos com cimento Portland Brasileiro, publicados nas últimas décadas (1970 até 2019), foram levantados dados da finura Blaine e características físico-químicas dos principais tipos de cimento Portland comercializados no país (Etapa 1 – coleta de dados). Também, com base na bibliografia fez-se uma sistematização dos possíveis efeitos da variação da finura do cimento nas propriedades de materiais a base de cimento, especialmente aquelas atreladas à durabilidade (etapa 2 – sistematização e levantamento dos efeitos da finura do Cimento Portland). Por fim, na última etapa (etapa 3 – Survey com especialistas) realizou-se um survey destinado a especialista para responder as principais questões levantadas pela pesquisa: a) Percebe-se variação na finura e composição do cimento Portland nos últimos anos? b) Quais as implicações dessas variações para as estruturas a base de cimento? c) Como utilizar cimentos com variação na finura e composição?

#### 3.1 ETAPA 1 - COLETA DE DADOS

Nesta etapa foram coletados dados de estudos de origem brasileira, obtidos a partir da revisão bibliográfica de artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado publicados, 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. Inicialmente foi considerada a possibilidade de realizar consulta *in loco* ao banco de teses e dissertações de Universidades brasileiras com programas de mestrado em engenharia civil na área de construção, implementados há mais de 40 anos para a complementação de dados para o período de 1970 a 1990. Porém, o plano foi desconsiderado por conta da COVID-19, que inviabilizou visitas técnicas.

### 3.1.1 Instrumento de Coleta e Tabulação de Dados da Literatura

Para a coleta de dados, foi desenvolvido um instrumento em formato de tabela estruturada (Figura 15), dividida em quatro grupos de coleta de informações: a) identificação do trabalho; b) características físicas; c) características químicas; e, d) rastreabilidade do estudo.

**Figura 15:** 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		Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
			Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	BET	

**Parte c – Características químicas**

Composição química (% óxidos)												
CaO	CaO Livre	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO

**Parte c – Características químicas (continuação)**

Compostos químicos (fases)						Ensaio Químico	
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	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<sup>4</sup>, estando configurado para evitar falhas (com caixa de seleções e 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) e está disponível para consulta no seguinte link: <https://drive.google.com/file/d/140USAoX42HdV4oVL6So4re24LdDGFhuv/view?usp=sharing>.

<sup>4</sup> 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.

### 3.1.2 Avaliação 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, com adição de linha de tendência.

Os gráficos foram analisados em três categorias, a saber:

- I. Cimento com fíler calcário (CP I, CP II F CP V);
- II. Cimento com pozolanas (CP II Z e CP IV); e,
- III. Cimento com escória de alto forno (CP II E e CP III).

Na variável contínua tempo foi considerado o ano da publicação da pesquisa, sendo assim há uma defasagem temporal em relação a ano de produção do cimento. O ano de aquisição do cimento não é informado pelo autor da publicação, não havendo rastreabilidade desta informação no método de coleta de dados adotado neste estudo.

Para avaliação da finura, também foram consideradas as respostas dos especialistas (etapa 3) e confrontados com os dados obtidos pelo levantamento de dados feito a partir da literatura a fim de verificar se há convergência entre os dados obtidos e a percepção dos especialistas na área de cimento e concreto.

### 3.1.3 Avaliação do Teor de Clínquer e Compostos Contidos no Cimento

Para avaliar o teor de clínquer contido nos cimentos nacionais foram utilizados os valores de referência das normas técnicas anteriores e vigente (conforme tabelas 1 e 2 do item 2.2). Também foram coletados dados da produção nacional de cimento a partir do Roadmap tecnológico do cimento, do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) para os períodos de vigência das normas.

Para o cálculo dos compostos foi empregada a equação de Bogue (equação 2 a 5, item 2.3) que permite por meio de relações matemáticas determinar as quantidades de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$  para os cimentos sem adições pozolânicas (CP I e CP V).

### 3.1.4 Avaliação das Emissões Associadas à Produção do Cimento

Para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao cimento Portland foram considerados os limites máximos e mínimos de clínquer para cada tipo de cimento da NBR 16697 (ABNT, 2018) conforme tabela 1. Os dados de emissões utilizados foram os disponíveis no site do SNIC (2013) para a produção de clínquer no Brasil, conforme Tabela 15 (pág. 62) .

Tendo em vista que as principais alterações normativas associadas ao cimento Portland têm como base as questões ambientais, neste estudo avaliou-se as emissões associadas a cada tipo de cimento.

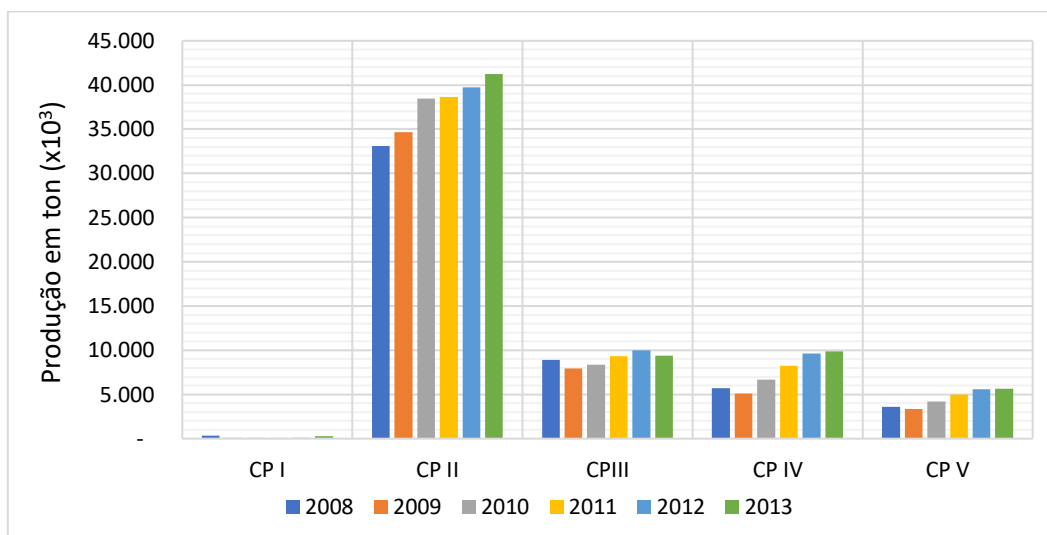
A partir dos dados disponibilizados pelo SNIC (2013) de produção do cimento no Brasil para o período de 2008 a 2013 apresentado na Tabela 10, foi possível estimar as emissões específicas dada em kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida no país.

**Tabela 7:** Produção por tipo de cimento em toneladas(x10<sup>3</sup>)

Ano	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Total
<b>2008</b>	346	33.080	8.879	5.714	3.577	51.596
<b>2009</b>	84	34.662	7.967	5.097	3.377	51.187
<b>2010</b>	88	38.474	8.345	6.686	4.211	57.804
<b>2011</b>	103	38.659	9.347	8.247	4.973	61.329
<b>2012</b>	98	39.743	10.000	9.612	5.580	65.033
<b>2013</b>	263	41.249	9.405	9.863	5.660	66.440

Fonte: SNIC (2013) [https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2013.pdf](https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf)

Os dados da Tabela 7 podem ser vistos mais facilmente pela Figura 16 que mostra a relação de produção em toneladas pelo gráfico de barras onde constata-se facilmente que o CP II é o tipo de cimento mais amplamente utilizado.

**Figura 16:** Produção por tipo de cimento em toneladas ( $\times 10^3$ )

A Tabela 8 tem o objetivo de mostrar como a produção de cimento nacional se concentra por volta de 60% nos cimentos compostos do tipo CP II.

**Tabela 8:** Porcentagem de produção de cada tipo de cimento

Ano	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V
<b>2008</b>	0,67%	64,11%	17,21%	11,07%	6,93%
<b>2009</b>	0,16%	67,72%	15,56%	9,96%	6,60%
<b>2010</b>	0,15%	66,56%	14,44%	11,57%	7,28%
<b>2011</b>	0,17%	63,04%	15,24%	13,45%	8,11%
<b>2012</b>	0,15%	61,11%	15,38%	14,78%	8,58%
<b>2013</b>	0,40%	62,08%	14,16%	14,84%	8,52%
<b>Média</b>	0,28%	64,10%	15,33%	12,61%	7,67%
<b>Mediana</b>	0,17%	63,57%	15,31%	12,51%	7,70%
<b>Desvio Padrão</b>	0,21%	2,58%	1,07%	2,04%	0,85%

Importante salientar que existem algumas limitações para os dados fornecidos, com isso foram necessárias algumas considerações baseadas na literatura para a obtenção dos resultados. Os dados fornecidos pelo SNIC (2013) apresentam apenas a produção nacional para os cimentos CP I e CP II, porém existem as variantes CP I-S e para os cimentos compostos CP II-E, CP II-Z e CP II-F, portanto foi adotado a média dos valores máximos e mínimos de clínquer apresentado na Tabela 9,

desconsiderando a presença de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) correspondendo a 5% da massa do cimento.

**Tabela 9:** Média de conteúdo de clínquer nos cimentos nacionais

Ano	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Média ponderada para % de clínquer
2008						72,18
2009						72,97
2010						73,18
2011	93%	80,5%	40%	60%	92,5%	72,56
2012						72,29
2013						72,80

Agora, considerando o emprego de 1350 kg de calcário para a produção de 1 tonelada de clínquer (RODRIGUES; FONSECA, 2013) e a média de clínquer para os cimentos CP I, II, III, IV E V de acordo com a Tabela 9.

Utilizando a estequiometria para a reação de descarbonatação da rocha calcária ( $\text{CaCO}_3$ ) descrita na equação (8) é possível obter o resultado:

$$1350\text{kg} (\text{CaCO}_3) \times 44\% = 594 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tonelada de clínquer}} \quad (8)$$

### 3.2 ETAPA 2 - SISTEMATIZAÇÃO E LEVANTAMENTO DOS EFEITOS DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND

A sistematização dos efeitos da finura no cimento Portland foi feita a partir de revisão crítica de literatura dos estudos práticos de artigos disponibilizados em revistas nacionais e internacionais. A busca foi realizada com o emprego do buscador na internet Google acadêmico e Research Gate.

Nesta etapa também se fez uso das informações dos especialistas com base nas respostas obtidas pelo questionário da pesquisa (etapa 3).

### 3.3 ETAPA 3 – SURVEY COM ESPECIALISTAS

Para propor soluções técnicas mais adequadas para emprego de cimentos menos emissivos será realizada questionário para especialistas<sup>5</sup> em materiais cimentícios e concreto, visando uma opinião da prática da construção e que sejam viáveis no contexto da construção civil, assim como o levantamento de soluções técnicas a partir da revisão bibliográfica.

Nesta etapa se aplicou um questionário estruturado com o objetivo de coletar dados sobre a percepção de especialistas a respeito da finura e composição do cimento Portland brasileiro, o qual encontra-se no Apêndice (A)<sup>6</sup>.

O questionário da pesquisa apresenta 3 seções: 1) Perfil do Respondente, 2) Finura do cimento Portland e 3) Composição do cimento Portland. É composto por questões de múltipla escolha (fechadas) e questões abertas, elaborado com a ferramenta disponibilizada online pelo Google Formulários.

A estratégia empregada para envio do instrumento de coleta de dados aos respondentes foi o envio do link do questionário pelas orientadoras Edna Possan e Katia Punhagui via WhatsApp e e-mail aos especialistas nacionais no tema da pesquisa. Como não é conhecido o número exato de especialistas na temática, fez-se o envio do link a 27 experts, com solicitação de encaminhamento a outros especialistas. No total foram recebidas 17 respostas válidas, que constituem o banco de dados desta etapa da pesquisa.

Para análise dos dados foram utilizadas estratégias diferentes para as respostas abertas e fechadas. Para as respostas fechadas, fez-se a tabulação das respostas e produção de gráficos com o percentual das respostas obtidas. Para as respostas abertas, realizou-se processo chamado análise de conteúdo com identificação de palavras-chave das respostas recebidas (ver Apêndice B). A partir

---

<sup>5</sup> Os especialistas que responderam o questionário são: Giovanna Gava (UNIOESTE), Denise Dal Molin (NORIE/UFGRS), Jairo José de Oliveira Andrade (PUC-RS), Étore Funchal de Faria (ITAIPU BINACIONAL), Daniel Veras Ribeiro (LADMA/UFBA) Ricardo Girardi (PUC-RS/CIENTEC), Marina Martins Mennucci (Universidade de Aveiro), Deividi Silva (NORIE/UFGRS), Antonio Domingues de Figueiredo (USP), Fábio Luiz Willrich (ITAIPU BINACIONAL), Flavio Roberto Bartz (CONPASUL), Emerson Félix (USP), Ana Paula Kirchheim (NORIE/UFGRS), Heloisa Fuganti Campos (UFPR), Esequiel Mesquita (UFC), Marcelo Medeiros (UFPR), Paulo Helene (PH engenharia), Maykel Rohde (Concresuper).

<sup>6</sup> Para elaboração do questionário fez-se o pré-teste para avaliar o cumprimento do seu objetivo e validação da sua relevância para a pesquisa.

disso, realizou-se quantificação das palavras-chave e elaboração de gráficos com o seu percentual para cada resposta.



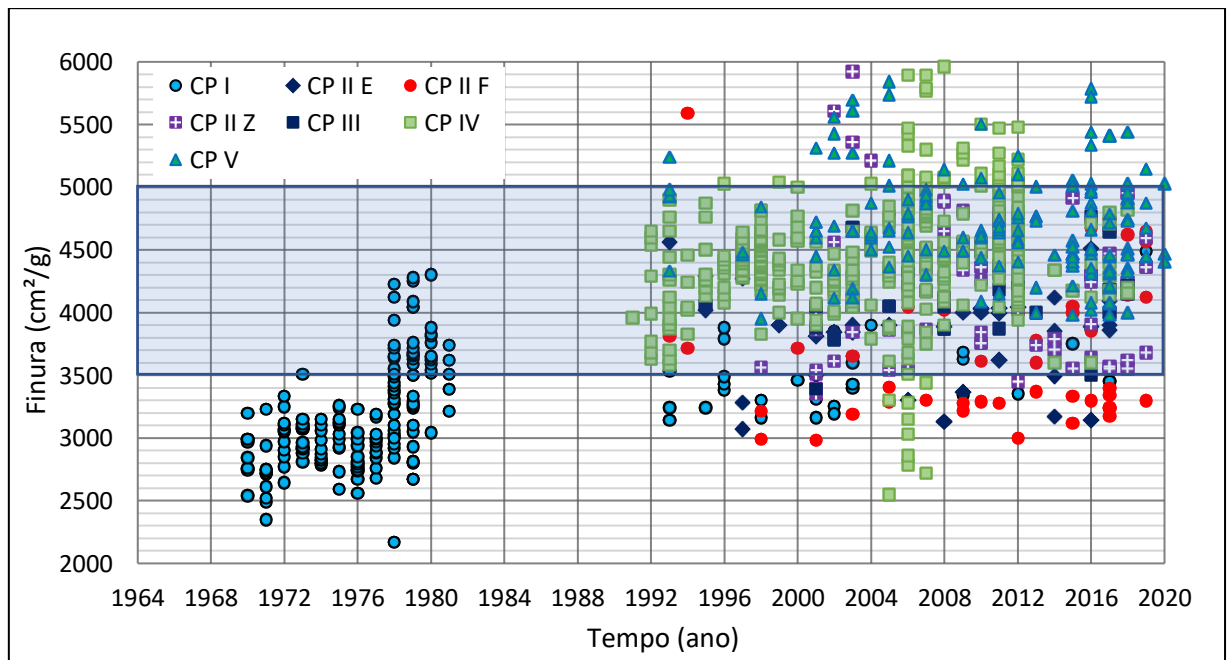
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 AVALIAÇÃO DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND AO LONGO DO TEMPO

Neste tópico é avaliado a variação da finura no tempo para os principais cimentos Portland utilizados na indústria nacional.

Na Figura 17 é apresentado o resultado do banco de dados<sup>7</sup> para a finura Blaine em função do tempo para os cimentos Portland (CP I, CP I S, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV e CP V ARI) preconizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Os dados são oriundos de **279** pesquisas, resultando em **941** resultados de finura Blaine. Cabe destacar que, geralmente os resultados das pesquisas são publicados meses ou anos após a produção do cimento empregado no estudo. Sendo assim, os resultados de finura apresentados podem não ter a correspondência exata com o ano da produção do cimento.

**Figura 17** – Finura para vários tipos de cimento pelo tempo



Analisando o resultado da Figura 17, nota-se que a finura Blaine varia de 2000 a 6000 cm²/g de cimento, sendo que a maior concentração de dados está entre 3500

<sup>7</sup> O banco de dados utilizado para a produção dos gráficos está disponível no link do google drive: <https://drive.google.com/file/d/140USAoX42HdV4oVL6So4re24LdDGFhuu/view?usp=sharing>

cm<sup>2</sup>/g, limite proposto por Aitcin (2008), e 5000 cm<sup>2</sup>/g representada pela caixa azul com transparência.

Nota-se na Tabela 10 que a maior parte dos dados para todos os cimentos utilizados no mercado brasileiro estão acima do valor de finura ideal de 3500 cm<sup>2</sup>/g proposto por Aitcin (2008). Os intervalos analisados são “menor que 3500”, “entre 3500 e 5000” e “maior do que 5000”.

**Tabela 10:** Estatísticas de quantidade de cimentos por faixa de finura (cm<sup>2</sup>/g)

Finura	CP I	CP II E	CP II F	CP II Z	CP III	CP IV	CP V
<3500	143	10	22	4	1	9	1
3500-5000	152	29	33	65	33	326	130
>5000	0	0	1	6	0	41	34
<b>Total de amostras</b>	195	39	56	75	34	376	165

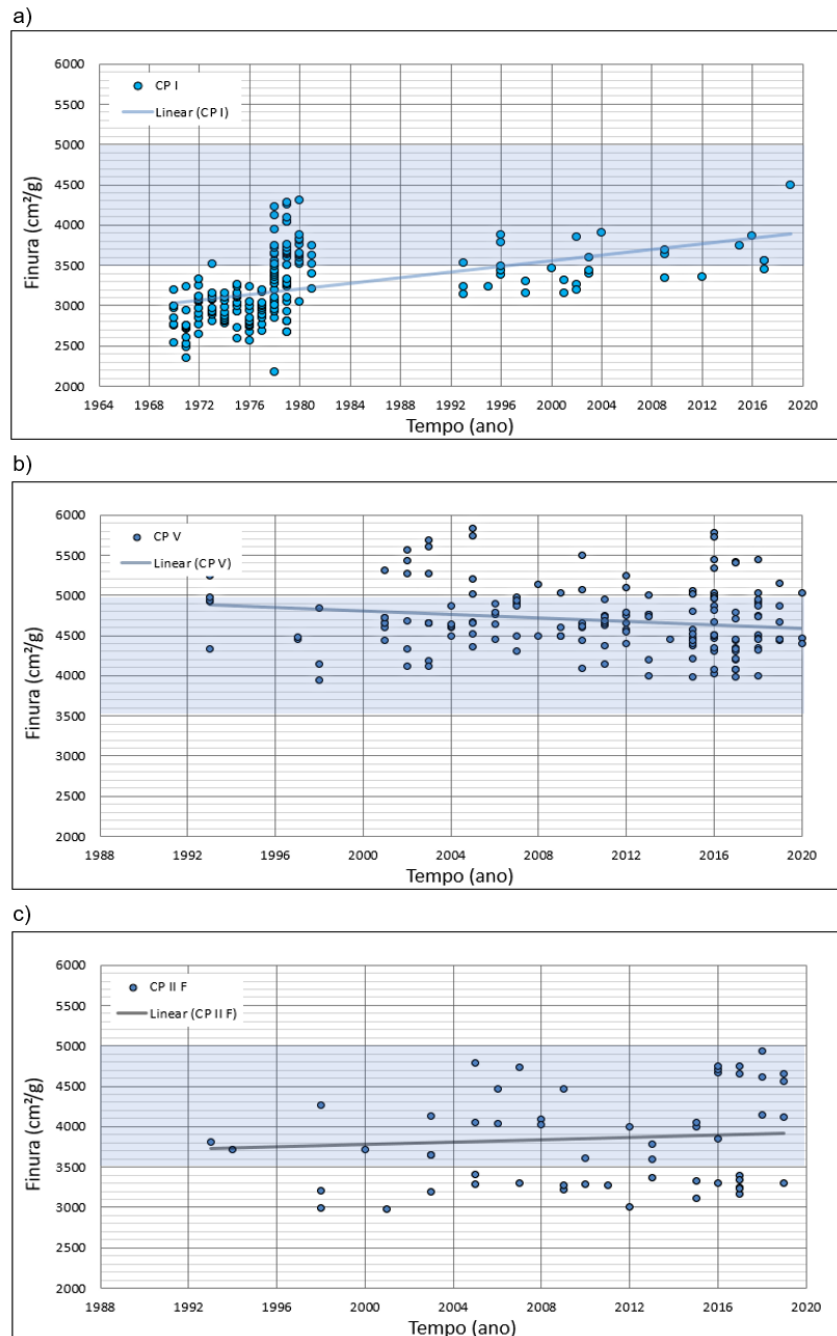
Na Tabela 11 observa-se os resultados estatísticos com base no banco de dados feito na pesquisa, sendo eles: Média, Mediana, Variância e Desvio Padrão. Nota-se que o cimento CP V e CP IV apresentaram maiores médias de finura Blaine com valores próximos ou maiores a 4500 cm<sup>2</sup>/g. Os cimentos que apresentaram maior variabilidade nos resultados são: CP II F, CP II Z e CP IV. Avalia-se a variabilidade a partir do resultado de desvio padrão, sendo que maior o CV (Coeficiente de Variância), maior a variabilidade dos resultados obtidos.

**Tabela 11:** Estatísticas dos dados de finura Blaine dos cimentos nacionais (cm<sup>2</sup>/g)

Estatística	CP I	CP II E	CP II F	CP II Z	CP III	CP IV	CP V
<b>Média</b>	3208,99	3801,69	3854,48	4201,41	4138,24	4486,12	4718,71
<b>Mediana</b>	3140,00	3890,00	3748,50	4210,00	4090,00	4450,00	4650,00
<b>Variância</b>	174350	143471	390969	419315	99641	362890	201076
<b>Desvio Padrão</b>	417,55	378,78	625,28	647,55	315,66	602,40	448,42
<b>CV (%)</b>	13,01%	9,96%	16,22%	15,41%	7,63%	13,43%	9,50%

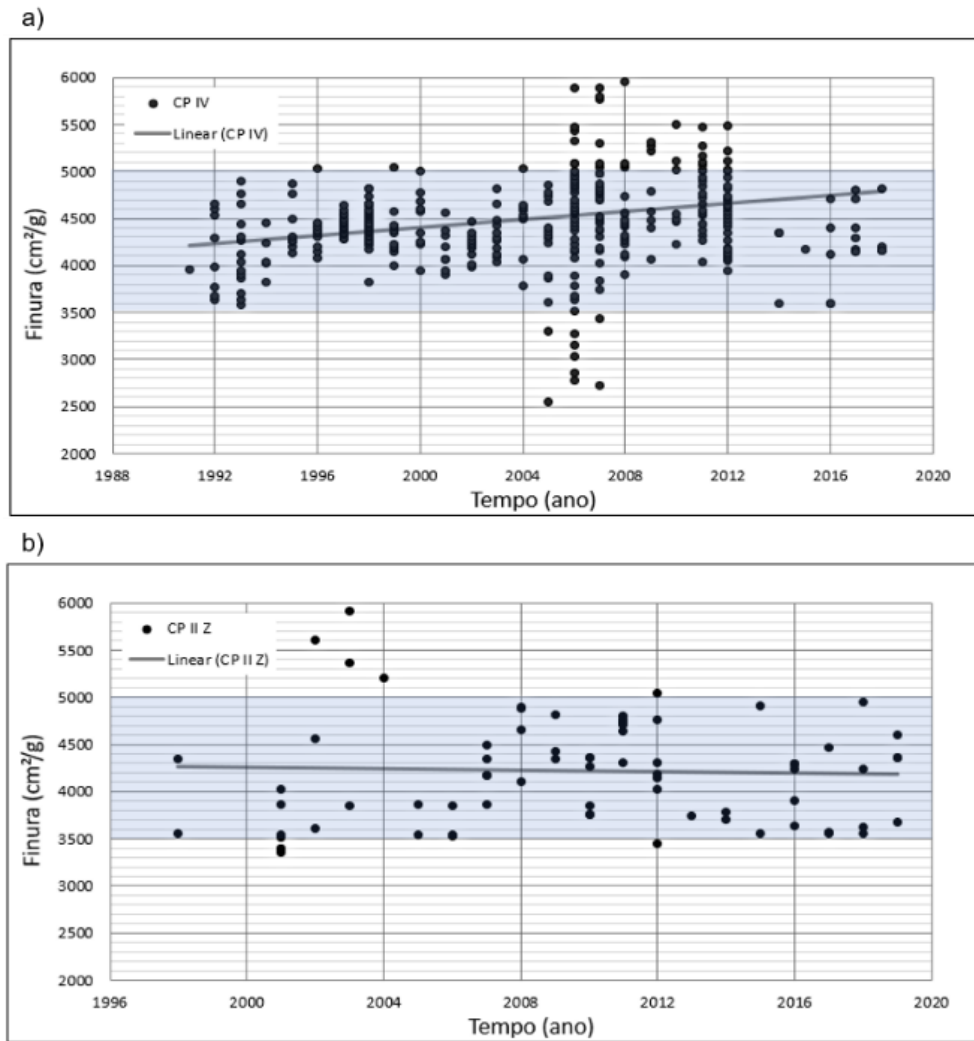
Nas figuras 18 a 20 são apresentados os dados de finura Blaine em função do tempo para os cimentos CP I, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV e CP V

**Figura 18:** Finura dos cimentos com fíler calcário. a) Cimento CP I. b) Cimento CP V e c) Cimento CP II F



A Figura 18 mostra a variação temporal dos cimentos apenas formados por clínquer e fíler em diferentes proporções (CP I, CP V e CP II-F). O resultado mostra que para o cimento CP I houve um grande aumento na finura, seguido do CP II F com uma leve tendência de aumento e o CP V que apresentou uma leve diminuição.

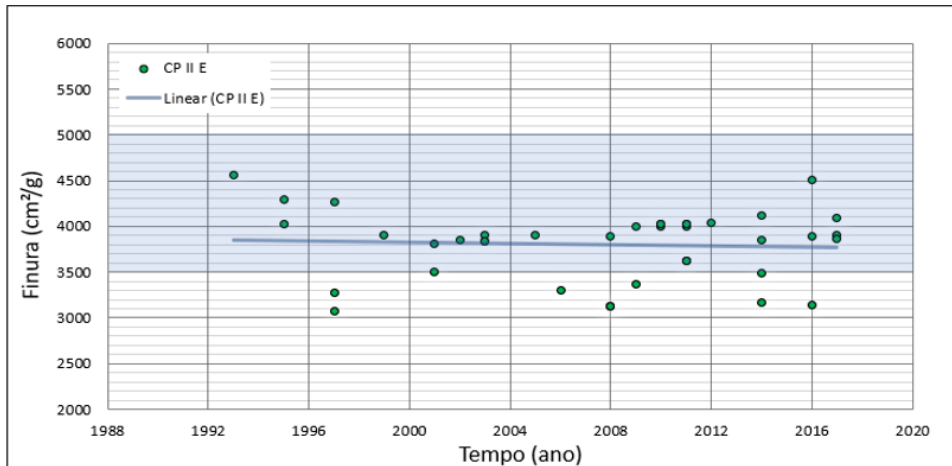
**Figura 19:** Finura dos cimentos pozolânicos. a) Cimento CP IV. b) Cimento CP II Z



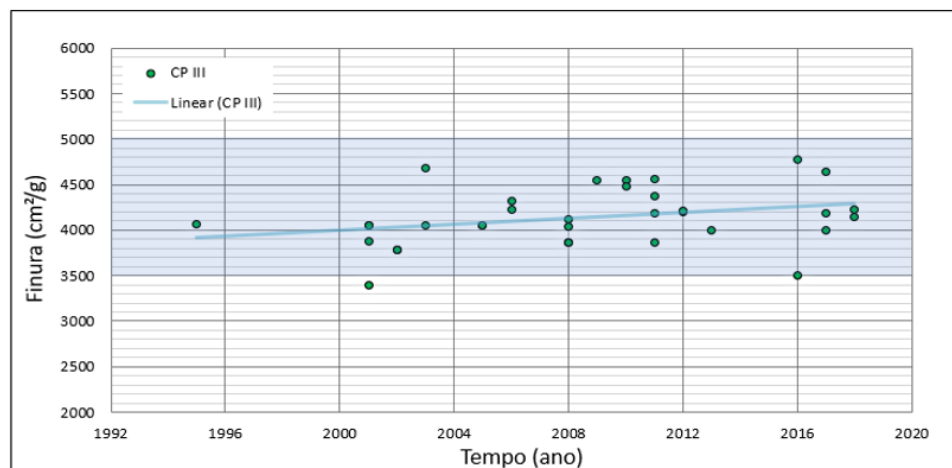
A Figura 19 mostra a variação temporal dos cimentos formados por clínquer, pozolana e fíler em diferentes proporções (CP IV e CP II Z). O resultado mostra que o CP IV apresenta tendência de aumento na sua finura no decorrer do tempo e o CP II Z apresenta uma leve queda, podendo ser considerado quase constante.

**Figura 20:** Finura dos cimentos com escória. a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III

a)



b)



A Figura 20 mostra a variação temporal dos cimentos formados por clínquer, escória e fíler em diferentes proporções (CP III e CP II E). O resultado mostra que o CP III apresenta tendência de aumento na sua finura no decorrer do tempo e o CP II E, assim como o CP II Z, apresenta uma queda pequena e pode-se considerar constante baseado nos dados coletados da literatura.

Destaca-se que a finura determinada pelo método Blaine informa a superfície específica do cimento sem diferenciar o teor de clínquer e adições empregado, sabe-se somente que o determinado tipo de cimento respeita os limites na norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Portanto, com a coleta de dados deste estudo não se consegue aferir se variação de finura é causada pela maior moagem dos grãos de clínquer ou das adições ou da proporção de clínquer e adições.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO AO LONGO DO TEMPO

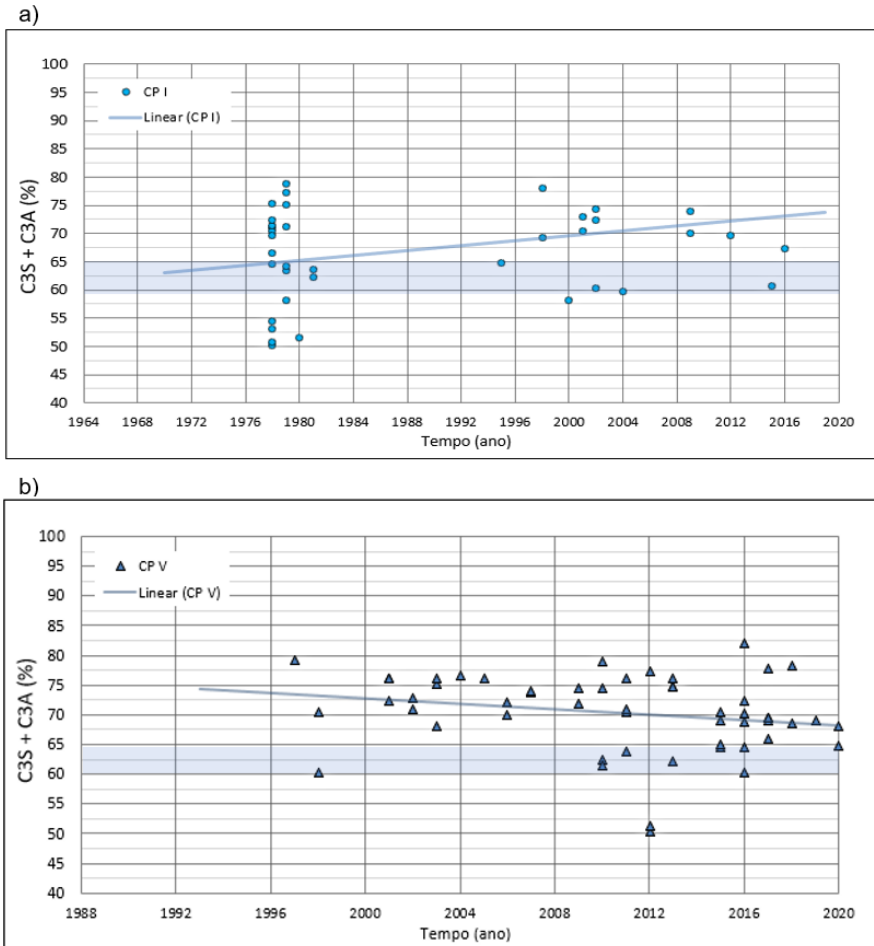
### 4.2.1 Teor de $C_3S$ , $C_2S$ e $C_3A$

Neste tópico será analisado como a composição do cimento para o  $C_3S$  (o principal composto do cimento),  $C_2S$  e  $C_3A$  estão se alterando no tempo.

Na análise dos compostos do cimento, limitou-se apenas ao cimento CP I e CP V por conta da fórmula de Bogue que não se aplica a cimentos com adição.

Na Figura 21 é apresentado o somatório do teor de  $C_3S$  e  $C_3A$  dos cimentos CP I (Figura 21a) e CP V (Figura 20b). De acordo com Aitcin (2008), o cimento ideal deve ter um teor de 60 a 65% de  $C_3S+C_3A$  e está indicado na faixa azul. Importante ressaltar que a maior parte dos resultados se encontram acima da faixa ideal considerada pelo autor. Cimentos em faixas superiores tem maior suscetibilidade a ocorrência de microfissurações

**Figura 21:** Teor da combinação de  $C_3S$  e  $C_3A$  dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V



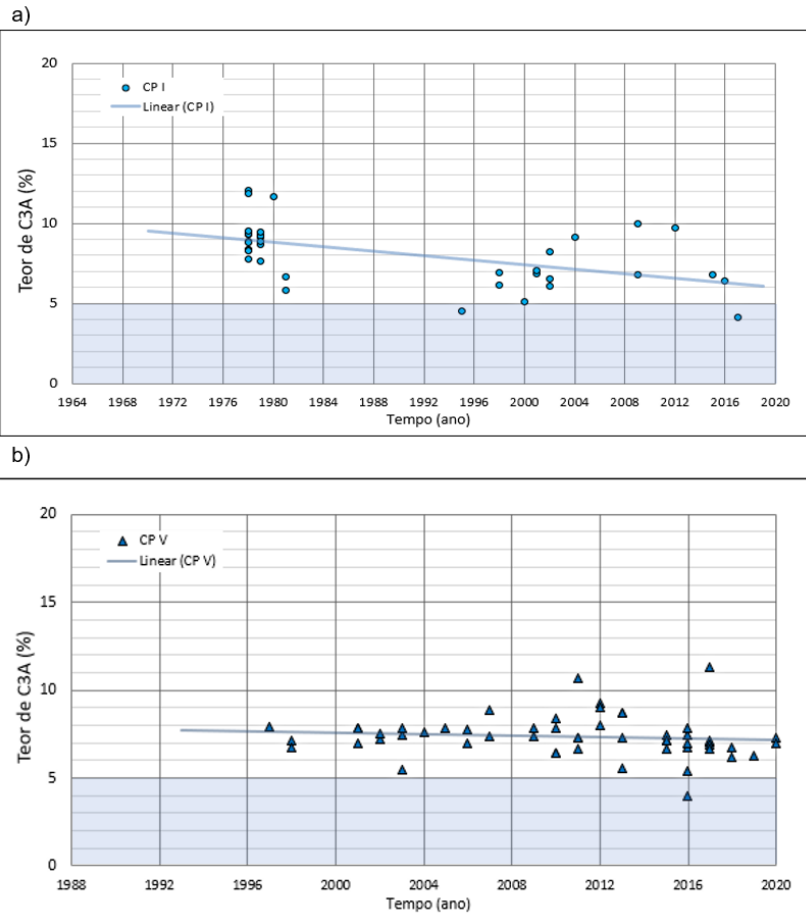
Na Tabela 12 observa-se que os dados de  $C_3S+C_3A$  dos cimentos CP I e CP V em sua maioria estão fora da margem de 60 a 65% considerado ideal por Aitcin (2008).

**Tabela 12:** Estatísticas de quantidade de cimentos na faixa de  $C_3S+C_3A$

$C_3S+C_3A$	CP I	CP V
<60%	52	18
60-65%	8	13
>65%	23	49
<b>Total de amostras</b>	<b>83</b>	<b>80</b>

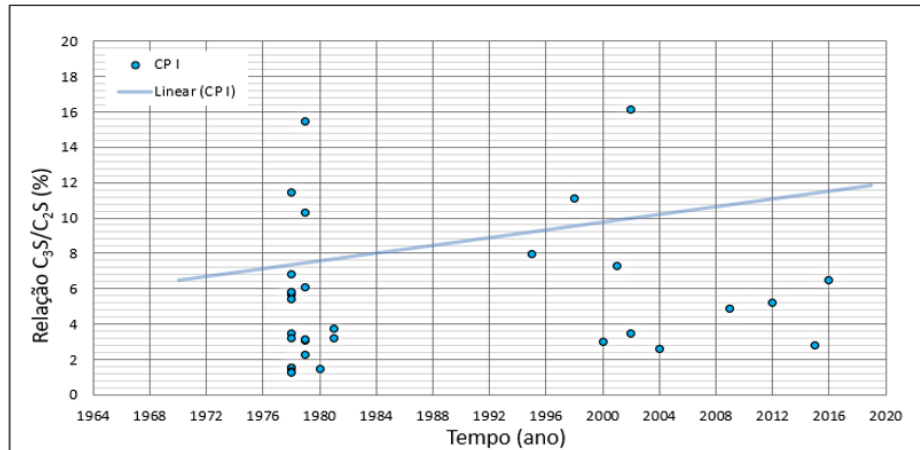
Aitcin (2008) afirma que para o teor de  $C_3A$  é indicado um teor de no máximo 5%. Na figura 22 está apresentado o teor de  $C_3A$  dos cimentos CP I e CP V. Na faixa azul está delimitado o teor de 0 a 5% de  $C_3A$  no cimento. Os resultados na Figura 22 mostram que a maior parte dos pontos estão acima da margem considerada admissível pelo autor.

**Figura 22:** Teor de  $C_3A$  dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V

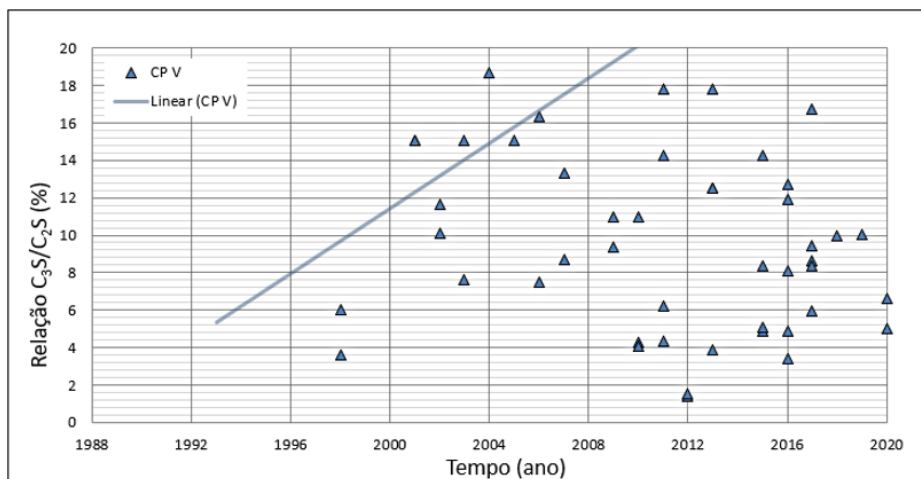


**Figura 23:** Relação  $C_3S/C_2S$  dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP V

a)



b)



Para a razão entre  $C_3S$  e  $C_2S$  como apresentado na Figura 23, nota-se que para o cimento CP I há um acréscimo mais leve e para o cimento CP V teve um crescimento com uma alta taxa no decorrer dos anos.

#### 4.2.2 Perda de fogo e Resíduo insolúvel

Neste tópico será avaliado de que maneira o teor de perda ao fogo e resíduo insolúvel estão variando no tempo.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), os limites de perda ao fogo e resíduo insolúvel para os tipos de cimento são apresentados pela Tabela 13:



**Tabela 13:** Valores máximos em porcentagem para resíduo insolúvel e perda ao fogo

<b>Cimento (sigla)</b>	<b>Resíduo Insolúvel (RI)</b>	<b>Perda ao fogo (PF)</b>
<b>CP I</b>	≤ 5,0	≤ 4,5
<b>CP II E</b>	≤ 5,0	≤ 8,5
<b>CP II F</b>	≤ 7,5	≤ 12,5
<b>CP II Z</b>	≤ 18,5	≤ 8,5
<b>CP III</b>	≤ 5,0	≤ 6,5
<b>CP IV</b>	*	≤ 6,5
<b>CP V</b>	≤ 3,5	≤ 6,5

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

\* Não apresenta valor máximo

Os retângulos azuis nas Figuras 24 a 29 indicam os valores admissíveis correspondentes aos da Tabela 13, ou seja, os valores que se encontram dentro do retângulo azul respeitam a exigência normativa.

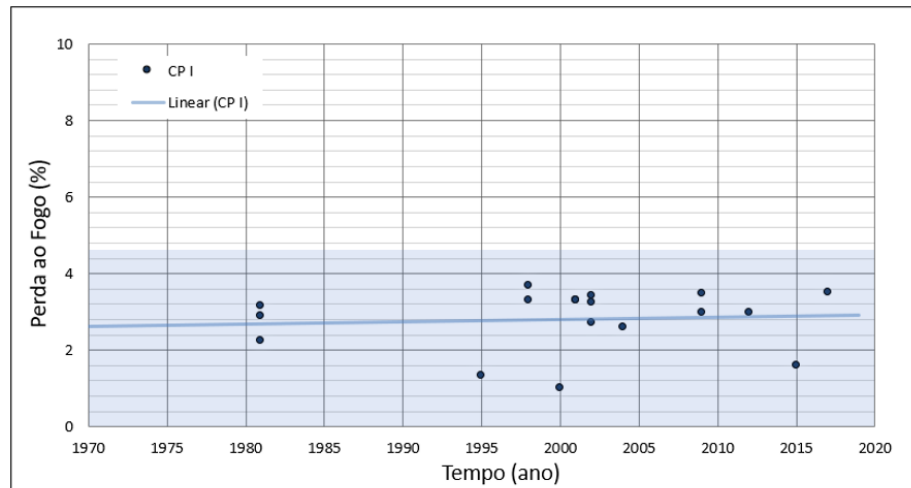
A Figura 24 apresenta os valores de Perda ao Fogo para os cimentos constituídos por cimento e fíler (CP I, CP II F e CP V). O cimento CP I (Figura 24a) apresentou leve aumento de perda ao fogo no tempo. O cimento CP II F (Figura 24b<sup>8</sup>) teve pequeno decréscimo no tempo. O cimento CP V (Figura 24c) apresenta crescimento moderado

---

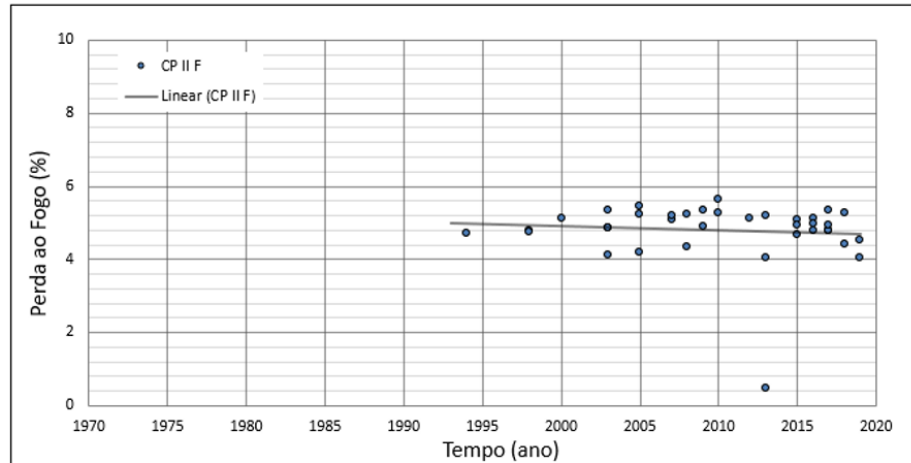
<sup>8</sup> A Figura 23b não apresenta retângulo azul, pois toda a área do gráfico corresponde ao limite admissível da normativa

**Figura 24:** Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP II F c) Cimento CP V

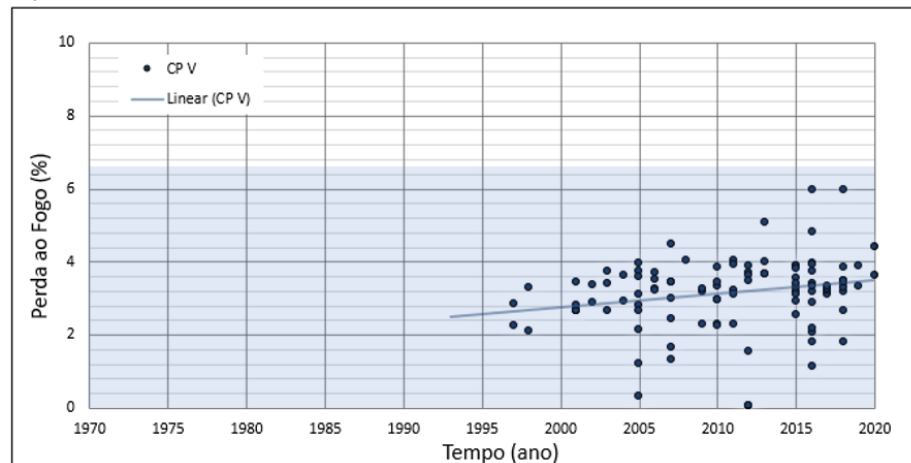
a)



b)



c)

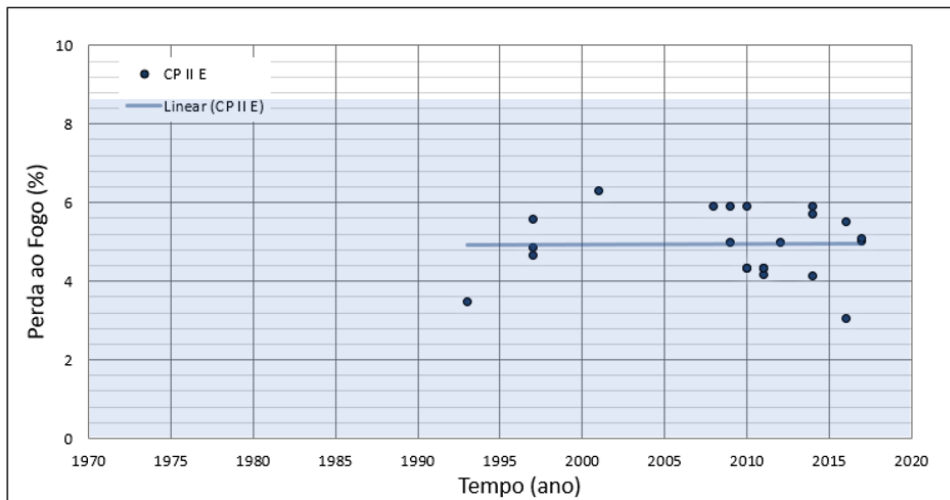


A Figura 25 apresenta os valores de Perda ao Fogo para os cimentos constituídos por cimento e escória (CP II E e CP III). Os cimentos CP II E (Figura 25a) e CP III (Figura 25b) apresentaram comportamento praticamente constante de perda

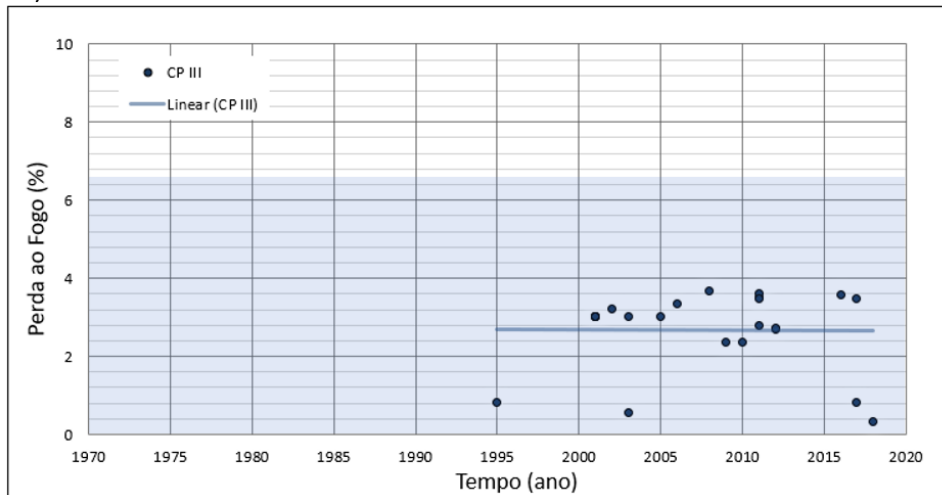
ao fogo no tempo.

**Figura 25:** Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III

a)



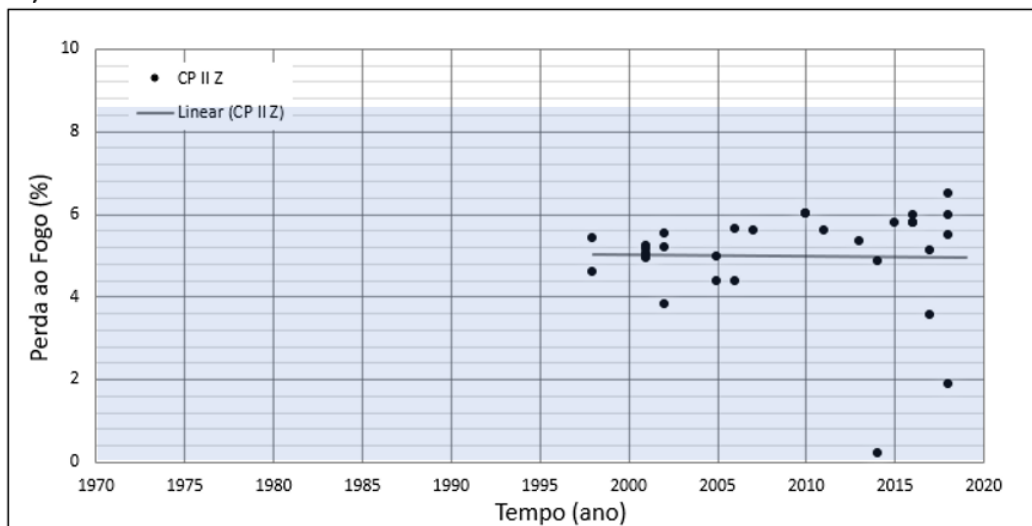
b)



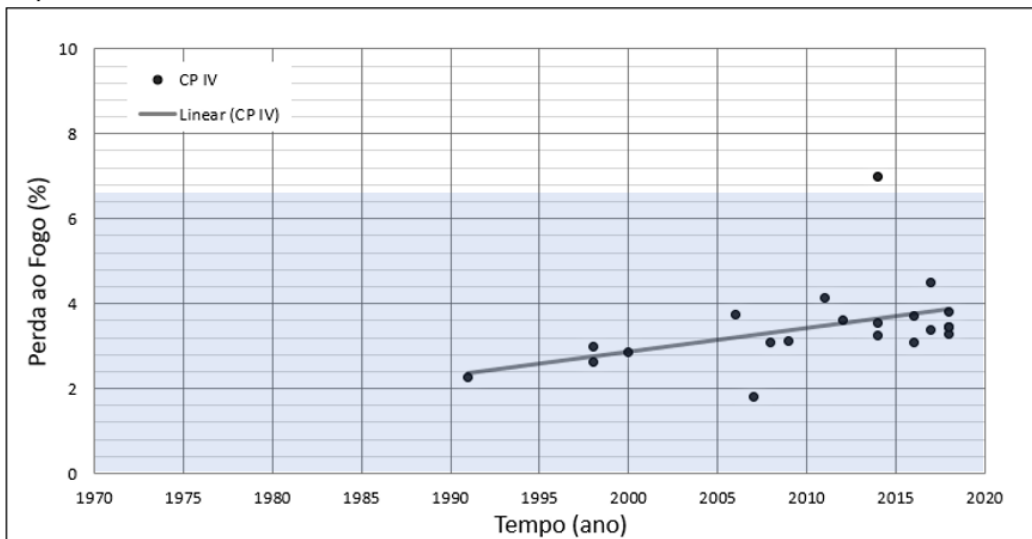
A Figura 26 apresenta os valores de Perda ao Fogo para os cimentos constituídos por cimento e pozolanas (CP II Z e CP IV). O cimento CP II Z (Figura 26a) apresentou comportamento praticamente constante, com leve queda de perda ao fogo no tempo e o cimento CP IV (Figura 26b) apresentou aumento expressivo. Destaque para um resultado que se encontrou fora do limite admissível determinado pela norma

**Figura 26:** Perda ao fogo dos cimentos a) Cimento CP II Z. b) Cimento CP IV

a)



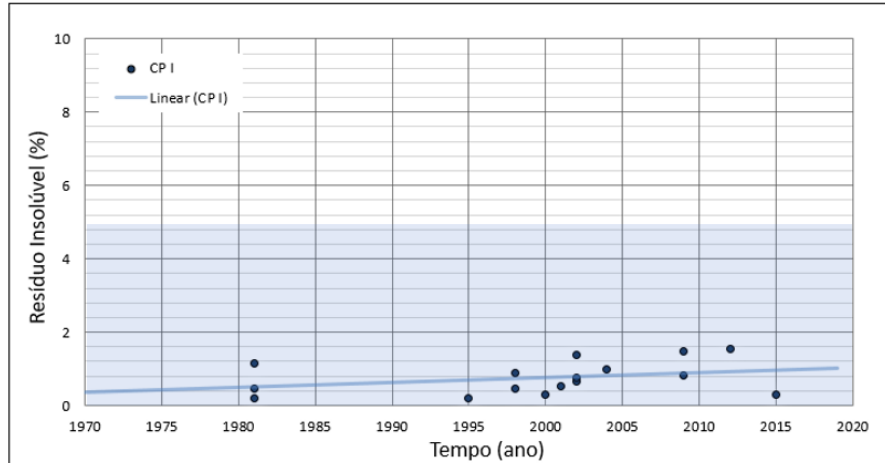
b)



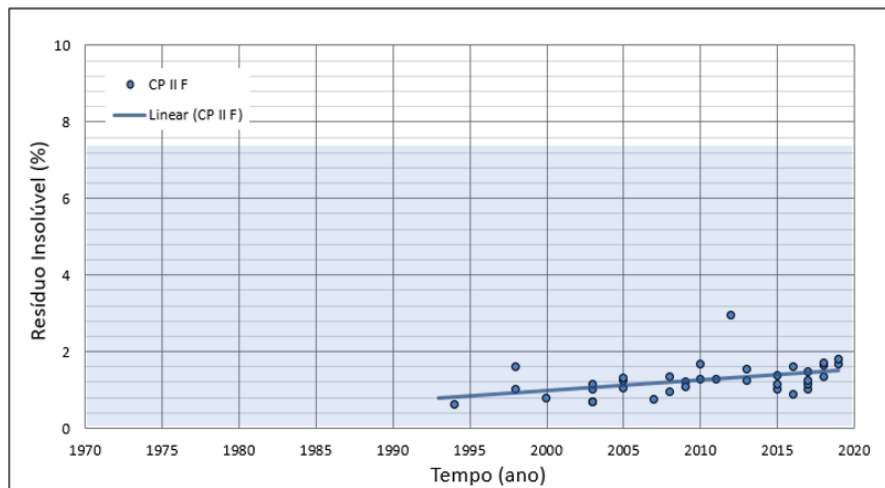
A Figura 27 apresenta os valores de Resíduo insolúvel para os cimentos constituídos por cimento e fíler (CP I, CP II F e CP V). Os três tipos de cimento apresentaram tendência de crescimento do resíduo insolúvel no tempo. Destaque para o cimento CP V que apresentou alguns valores entre 2005 e 2020 superiores ao que pede a normativa como descrito na Tabela 13, é devido ao tipo do cimento ser RS ou PLUS.

**Figura 27:** Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP I. b) Cimento CP II F c) Cimento CP V

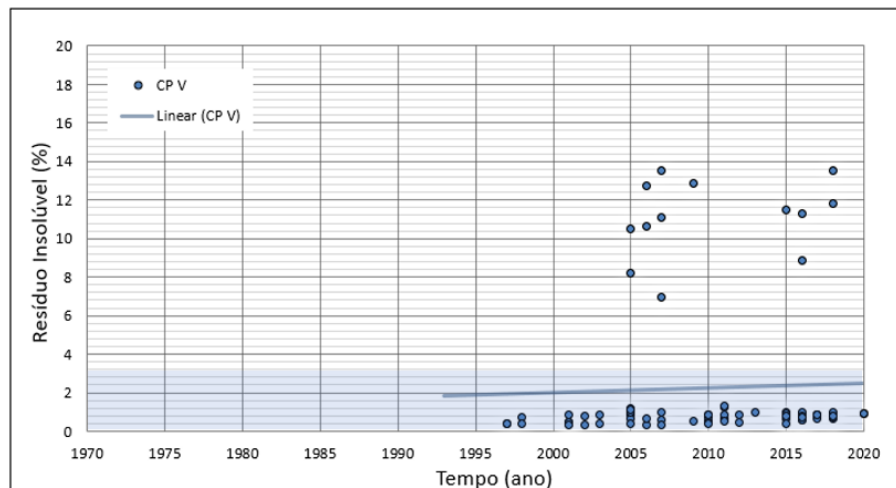
a)



b)



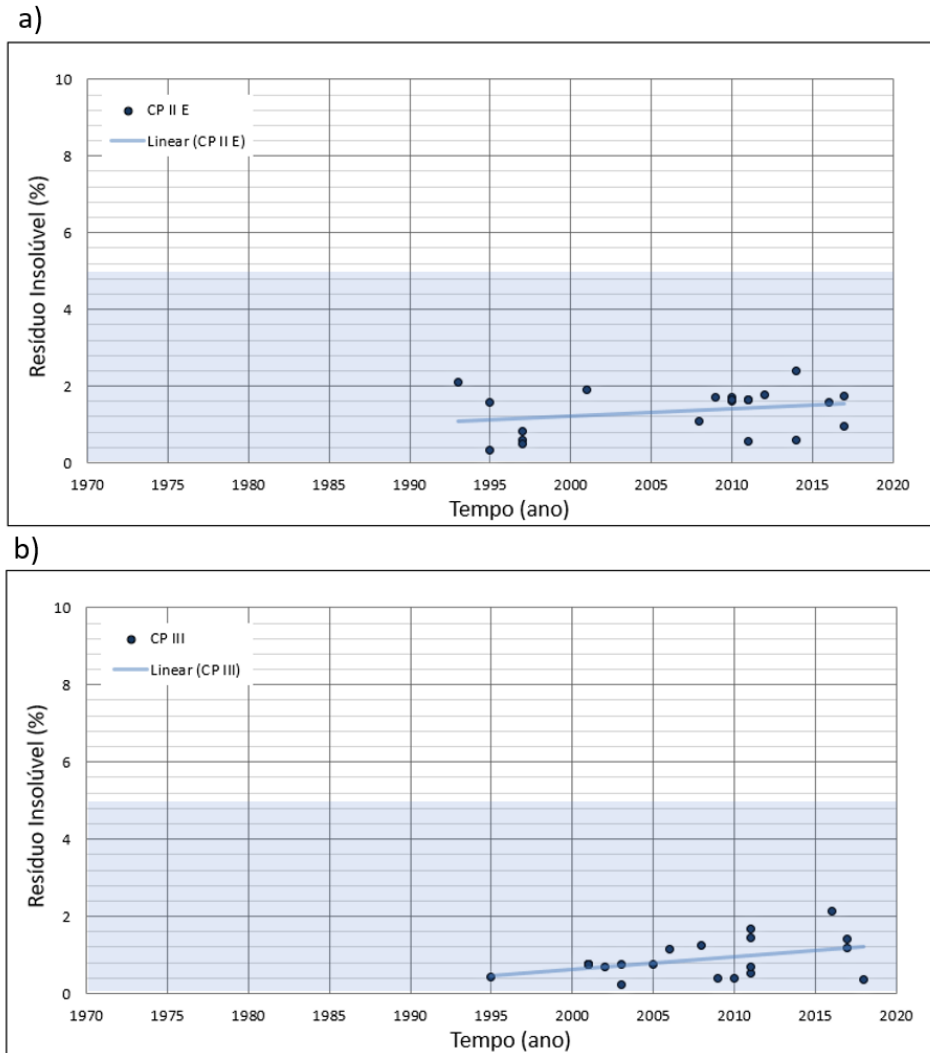
c)



A Figura 28 apresenta os valores de Resíduo Insolúvel para os cimentos

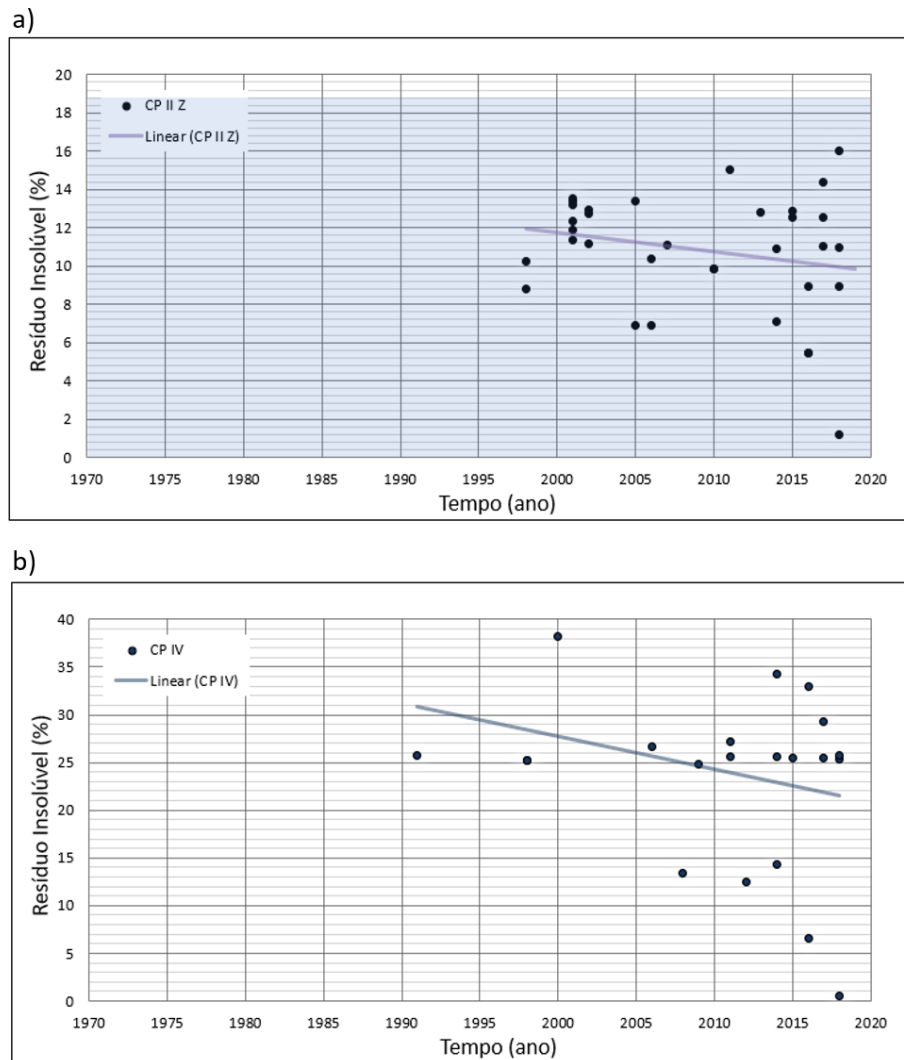
constituídos por cimento e escória (CP II E e CP III). Os cimentos CP II E (Figura 28a) e CP III (Figura 28b) apresentaram comportamento com acréscimo no tempo.

**Figura 28:** Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP II E. b) Cimento CP III



A Figura 29 apresenta os valores de Resíduo Insolúvel para os cimentos constituídos por cimento e pozolanas (CP II Z e CP IV). Os cimentos CP II Z (Figura 29a) e cimento CP IV (Figura 29b) apresentaram tendência de decréscimo expressivo no tempo. Nota-se alta variabilidade dos resultados por conta de variados teores de adições no cimento.

**Figura 29:** Resíduo insolúvel dos cimentos a) Cimento CP II Z. b) Cimento CP IV



Resumidamente, houve crescimento para Perda ao Fogo para os cimentos CP I, CP IV e CP V, decréscimo para o tipo CP II F e notou-se constância para os cimentos CP II E, CP III e CP II Z.

Para o resíduo insolúvel, nota-se crescimento para os cimentos com fíler (CP I, CP II F e CP V) e escória (CP II E e CP III). Decréscimo para os cimentos CP II Z e CP IV (pozolânicos)

#### 4.2.3 Estimar as emissões de CO<sub>2</sub> máximas e mínimas associadas à produção de diferentes cimentos Portland nacionais

Neste tópico serão realizados os cálculos aproximados de emissões de CO<sub>2</sub> da cadeia produtiva do cimento Portland nacionais com base na produção anual e nos

teores médios de clínquer para cada tipo cimento.

É possível calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> do processo de descarbonatação da rocha que representa 65% das emissões de acordo com (SNIC, 2019). Os resultados para cada tipo de cimento por ano são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14:** Emissões de CO<sub>2</sub> proveniente da descarbonatação das rochas calcárias em 1000x toneladas por tipo de cimento

Ano	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Total
2008	191.137	15.817.864	2.109.650	2.036.470	1.965.383	22.120.504
2009	46.403	16.574.329	1.892.959	1.816.571	1.855.493	22.185.754
2010	48.613	18.397.113	1.982.772	2.382.890	2.313.734	25.125.122
2011	56.899	18.485.574	2.220.847	2.939.231	2.732.415	26.434.966
2012	54.137	19.003.910	2.376.000	3.425.717	3.065.931	27.925.695
2013	145.286	19.724.034	2.234.628	3.515.173	3.109.887	28.729.009

Por consequência, é possível encontrar as emissões totais a partir da Tabela 15 onde estão inseridos os valores de emissões causados pelos combustíveis para gerar a calcinação e sinterização do material

**Tabela 15:** Emissões de CO<sub>2</sub> totais da produção de cimento em 1000x toneladas

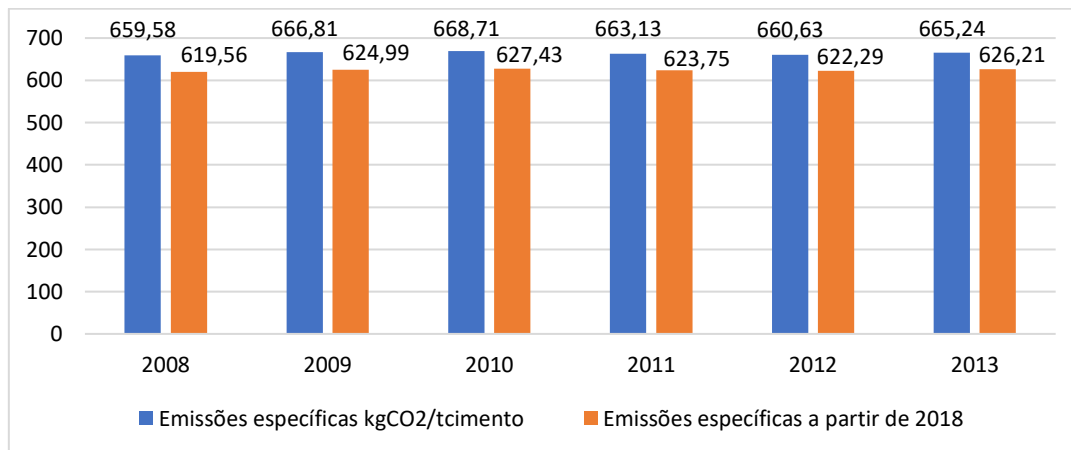
Ano	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Total
2008	294.057	24.335.175	3.245.616	3.133.030	3.023.666	34.031.544
2009	71.390	25.498.967	2.912.245	2.794.724	2.854.604	34.131.930
2010	74.789	28.303.250	3.050.418	3.665.985	3.559.591	38.654.034
2011	87.537	28.439.345	3.416.688	4.521.894	4.203.715	40.669.179
2012	83.288	29.236.785	3.655.385	5.270.334	4.716.817	42.962.608
2013	223.518	30.344.668	3.437.889	5.407.959	4.784.442	44.198.475

Por fim, para calcular as emissões específicas dadas em kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento é necessária apenas a relação das emissões totais obtidas na Tabela 15 pela produção de cimento apresentados na Tabela 7. Para avaliar como as mudanças causadas pela norma NBR 16659 (ABNT, 2018) impactaram nas emissões de CO<sub>2</sub>. Foram consideradas as mesmas proporções de produção de cimento e foram utilizados os valores máximos e mínimos de clínquer da norma vigente.



**Tabela 16:** Emissões específicas para normas NBR de 1991 e norma NBR 16659:2018

Ano	Emissões (kgCO <sub>2</sub> /t cimento) NBR's 1991	Emissões (kgCO <sub>2</sub> /t cimento) NBR 2018	Redução
2008	659,58	619,52	6,1%
2009	666,81	624,99	6,3%
2010	668,71	627,43	6,2%
2011	663,13	623,75	5,9%
2012	660,63	622,29	5,8%
2013	665,24	626,21	5,9%

**Figura 30:** Emissões específicas comparando normas antigas e norma atualizada (NBR 16659:2018) para composição do cimento

Na Figura 30 e Tabela 16 é possível analisar que com a atualização da normativa que preconiza os valores máximos e mínimos de clínquer no cimento, conclui-se que poderá ocorrer uma redução de cerca de 6% nas emissões específicas de CO<sub>2</sub>. Condição favorável no que diz respeito a cumprir as metas de redução nas emissões de CO<sub>2</sub> do acordo de Paris.

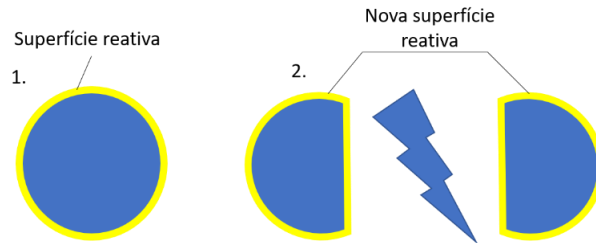
#### 4.3 SISTEMATIZAÇÃO E LEVANTAMENTO DOS EFEITOS DA FINURA E VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

##### 4.3.1 Efeito da Finura

A finura apresenta relação direta com a reatividade do cimento com a água,

pois quanto menor o grão, mais rápida é a reação e maior é a demanda do cimento por água, desta forma há maior liberação de calor e ganho de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A Figura 31 demonstra graficamente como ocorre o aumento da finura e seu incremento de superfície reativa.

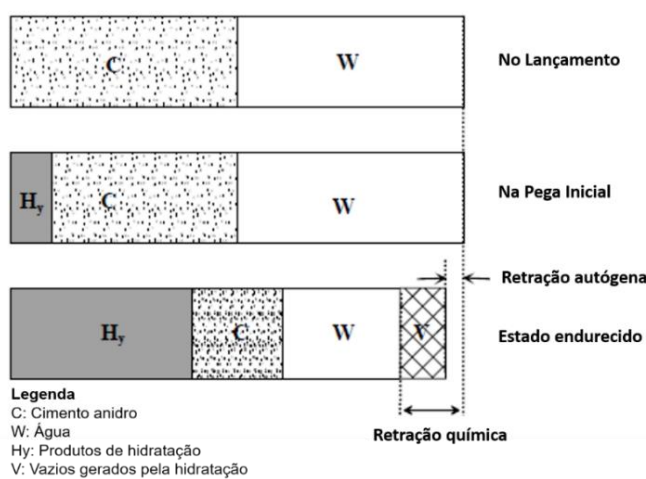
**Figura 31:** 1) Superfície original; 2) Aumento da superfície reativa do grão para uma mesma massa



No estudo de BENTZ et al (1999), foram comparados dois cimentos com finuras diferentes ( $210 \text{ m}^2/\text{kg}$  e  $640 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e mesma composição química. Os resultados mostram que para o cimento mais fino o grau de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  chega a 90% em cerca de 15 dias. Isto implica numa liberação de calor maior em um intervalo de tempo menor pelo cimento com maior área específica. Foi constatado que a retração autógena foi maior para o cimento mais fino e por consequência tende a ser mais suscetível às fissurações, principalmente em estruturas com grandes volumes.

A retração autógena é a diminuição de volume causada pelas reações de hidratação entre o cimento e a água. O resultado deste processo são produtos hidratados que têm menor volume do que a mistura como apresentado na Figura 32 (HOLT, 2001). O fenômeno da retração autógena também pode ser visto na Figura 5, onde o volume total após a hidratação é ligeiramente menor do que o volume da mistura.

**Figura 32:** Esquema da retração química e autógena do concreto

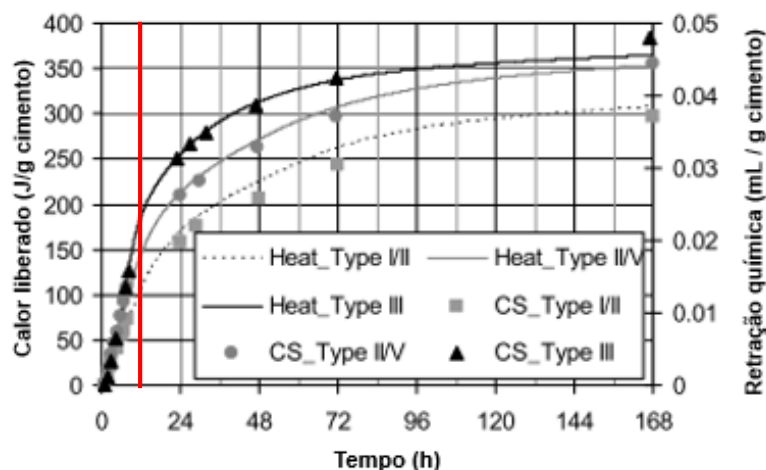


Fonte: (HOLT, 2001)

Para o estudo de BENTZ (2010), foram considerado três cimentos com finura de 302 m<sup>2</sup>/kg (Tipo I/II), 387 m<sup>2</sup>/kg (Tipo II/V) e 613 m<sup>2</sup>/kg (Tipo III) com composição química semelhantes e misturas com teor a/c de 0,40. Analisando os resultados de calorimetria, quanto mais fino o cimento, maior o pico de liberação de calor nas primeiras horas. A retração química para o cimento mais fino também é muito superior considerando desde as medições iniciais de 24h até 168h como mostra a Figura 33.

Existe uma relação equivalente para a liberação de calor no processo de hidratação e o fenômeno da retração química demonstrada pelo estudo, sendo dois indicadores da velocidade de hidratação de acordo com a Figura 27. Assim como uma proporção entre liberação de calor e ganho de resistência como mostra a Figura 28.

**Figura 33:** Relação calor de hidratação e retração química

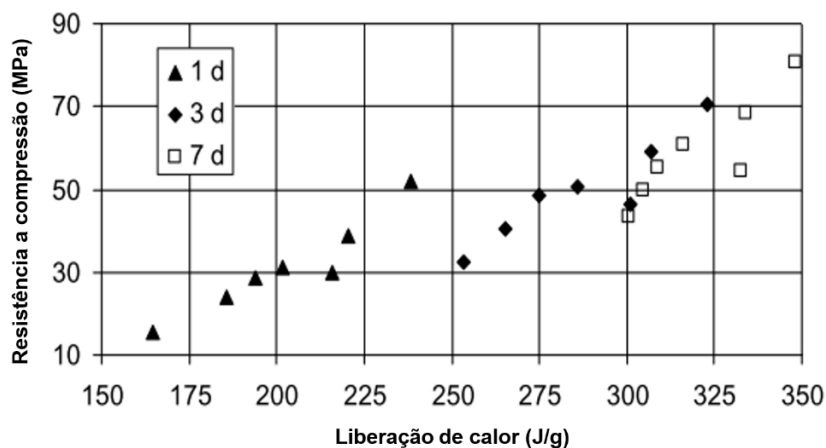


Fonte: (BENTZ, 2010)

Para que os cimentos sejam mais resistentes a fissuras é necessário que o

valor de retração química seja igual ou menor a 0,0105 mL/g de cimento no tempo de 12h (BENTZ; SANT; WEISS, 2008). Nota-se que pela Figura 27 (destaque para o traço vertical vermelho para 12h) que é o cimento (Tipo I/II) com menor finura que está mais próximo de cumprir com cerca de 0,012 mL/g de cimento e os outros cimentos (Tipo II/V) e (Tipo III) estão na ordem de 0,02 mL/g de cimento.

**Figura 34:** Relação entre resistência à compressão e calor de hidratação.



Fonte: (BENTZ, 2010)

As resistências para os cimentos mais finos foram superiores em todas as medições, no estudo foram considerados 1, 3, 7, 28 e 91 dias.

Em resumo, com base nos estudos, cimentos mais finos tendem a liberar mais calor no processo de hidratação, apresentar maior retração química, mas têm ganhos de resistência à compressão mais expressivos.

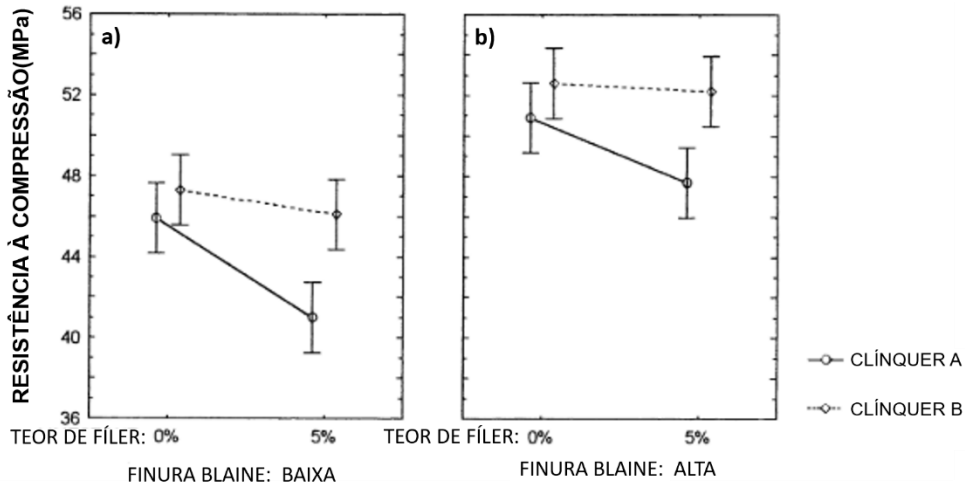
#### 4.3.2 Efeito do $C_3S$ (da composição química do cimento)

No estudo realizado por (VUK et al., 2001) foram utilizados dois tipos de clínquer com 35% de  $C_3S$  (clínquer A) e 46% de  $C_3S$  (clínquer B) com adição de fíler calcário a 5% e composições com finuras de 307 a 437  $m^2/kg$ . Os resultados mostram que maiores teores de  $C_3S$  e maiores finuras tendem a apresentar resistência à compressão aos 28 dias mais elevadas como apresentado na Figura 35. Sendo que a Figura 35a corresponde ao cimento mais grosso e a Figura 35b corresponde ao cimento mais fino.

Analisando o calor de hidratação na Figura 36, nota-se que há maior liberação

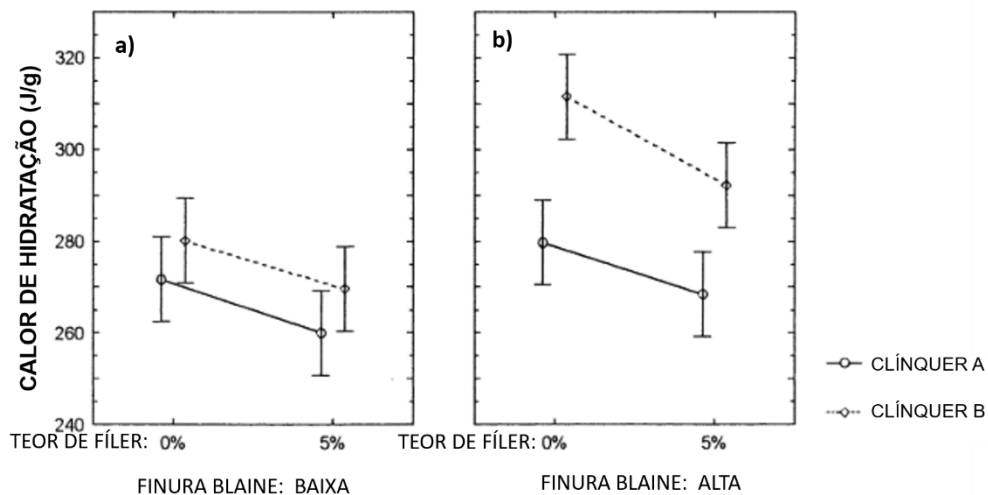
de calor para cimento com maior teor de  $C_3S$  para ambos os casos. Destaque para a Figura 36b, pois o cimento mais fino e com maior teor de  $C_3S$  apresentou maior variação no calor de hidratação.

**Figura 35:** Relação entre resistência à compressão, teor de  $C_3S$  e finura.



Fonte: (VUK et al., 2001)

**Figura 36:** Relação entre calor de hidratação, teor de  $C_3S$  e finura.



Fonte: (VUK et al., 2001)

Assim como a finura, a composição química do cimento afeta o processo de retração química e autógena nas idades iniciais de hidratação. Os cimentos com maior teor de  $C_3S$  (silicato tricálcico) e  $C_3A$  (aluminato tricálcico) apresentam resultados com maior retração química e segue o modelo exposto pela equação 9 determinado por Paulini (1992), onde é determinado o ( $V_{cs}$ ) volume de retração química ( $cm^3/g$ ), a

partir da porcentagem de cada composto do cimento

$$V_{cs} = 0,0532 * C_3S (\%) + 0,04 * C_2S (\%) + 0,1113 * C_4AF (\%) + 0,1785 * C_3A (\%) \quad (9)$$

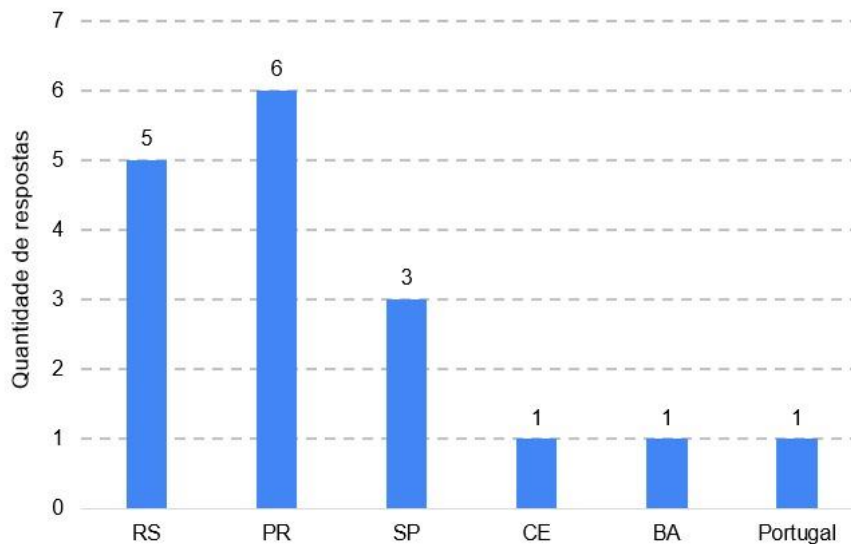
#### 4.4 ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DE ESPECIALISTAS

Neste tópico serão apresentadas as estatísticas referentes ao questionário (survey) aplicado aos especialistas, para os quais, perguntou-se sobre status e soluções para empregar os cimentos com variação na finura e/ou composição química.

##### 4.4.1 Descrição da amostra do estudo

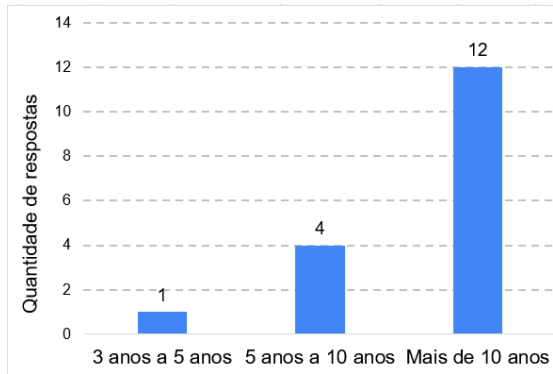
Em relação à origem dos respondentes, tem-se especialistas da Região Sul, Sudeste e Nordeste (Figura 37), residentes em capitais e interior. Há um respondente, especialista brasileiro, que temporariamente está fora do país (Portugal).

**Figura 37:** Perfil dos respondentes: Estado de atuação

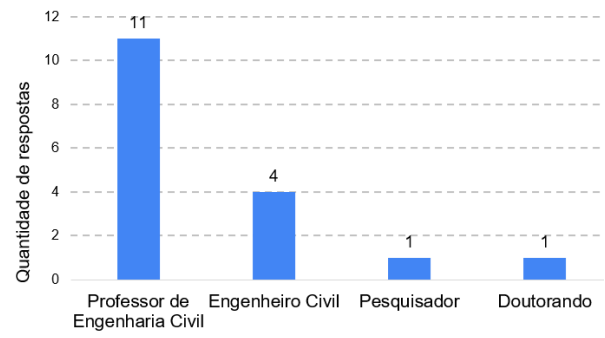


Observa-se na Figura 38 que a maioria dos respondentes (70,5 %) tem mais de 10 anos de atuação na temática da pesquisa, sendo 64,7% professor de engenharia (Figura 39).

**Figura 38:** Perfil dos respondentes: Tempo de experiência

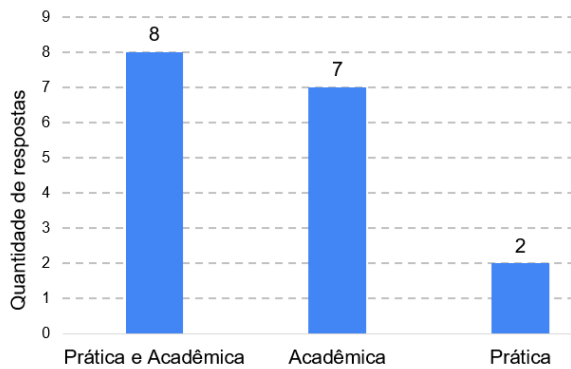


**Figura 39:** Perfil dos respondentes: Ocupação profissional

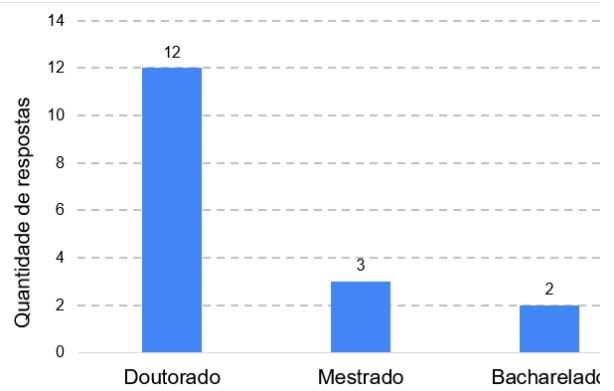


Conforme Figura 40, 47% tem formação mista (prática e acadêmica), 12 respondentes do total de 17 (70,5%) possuem doutorado.

**Figura 40:** Perfil dos respondentes: Campo de experiência



**Figura 41:** Perfil dos respondentes: Nível de graduação



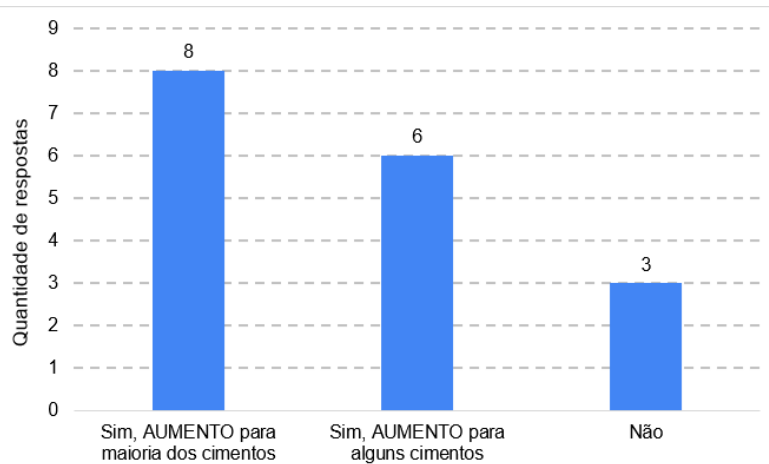
Com base no perfil dos respondentes tem-se que são em sua maioria especialistas com mais de 10 anos de atuação prática e acadêmica, formação em nível de doutorado no tema de estudo, com representação de três regiões do país (as regiões Norte e Centro-oeste não foram representadas na coleta de informações, infelizmente são regiões que possuem poucos especialistas na área de cimento e concreto).

4.4.2 Percepção sobre variação de finura

Para este tópico foram realizadas 4 perguntas, sendo duas fechadas e duas abertas.

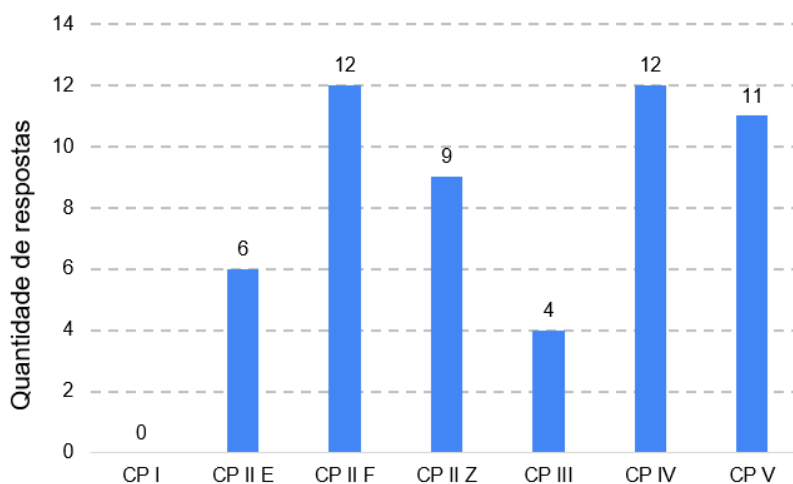
Observa-se na Figura 42 que 82,4% dos respondentes afirmam ter observado variações da finura dos cimentos, sendo que 47,1% constatou essa variação para a maioria dos cimentos e 35,3% para alguns cimentos.

**Figura 42:** Respostas obtidas para a Questão 1: Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na FINURA (ÁREA SUPERFICIAL) do cimento Portland brasileiro nos últimos anos?



Constatou-se que as variações de finura indicada pelos especialistas são maioritariamente para os cimentos CP II F, CP IV, CP V e CP II Z (Figura 43), com 12, 12, 11 e 9 respostas, respectivamente. Destaca-se que não foram recebidas respostas para o cimento CP I devido ao fato deste produto não ser comercializado no país há muitos anos. Logo, os especialistas não opinaram sobre ele.

**Figura 43:** Respostas obtidas para a Questão 2: Para quais cimentos brasileiros?

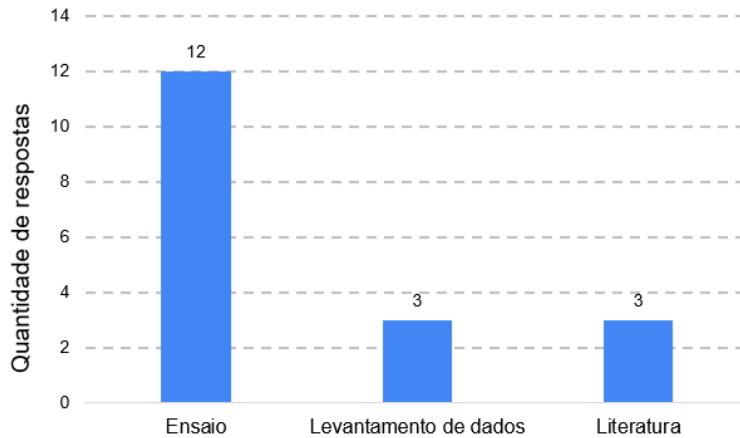


Constata-se convergência das respostas dos especialistas com as informações tabuladas no estudo, exceto para os cimentos CP I, CP II Z, CP II E e CP V ARI, ou seja, as respostas para os cimentos CP II F, CP IV e CP III se alinham com o estudo



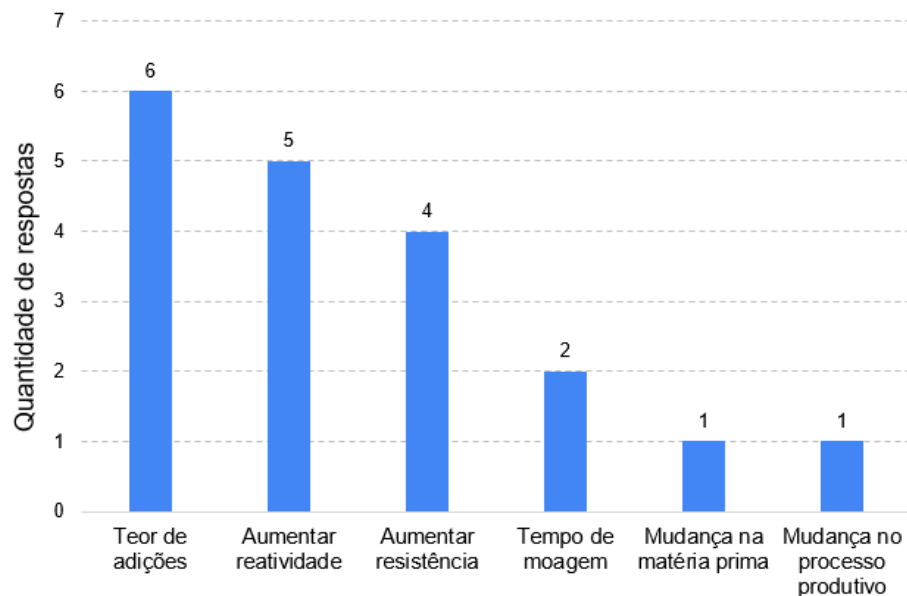
Ao serem questionados de como constatarem a variação da finura dos cimentos os especialistas indicam que a variação da finura é constatada a partir de ensaios (12 respostas), seguido de levantamento de dados (3 respostas) e busca na literatura (3 respostas) ilustrada pela Figura 44

**Figura 44:** Respostas obtidas para a Questão 3 – Como você notou/constatou essa variação na FINURA do cimento Portland?



Sobre o motivo da variação da finura (Figura 45), os especialistas indicaram que o teor de adições (31,6%), busca pelo aumento de reatividade (26,3%) e aumento na resistência (21,1%) são os principais motivos para o aumento na finura

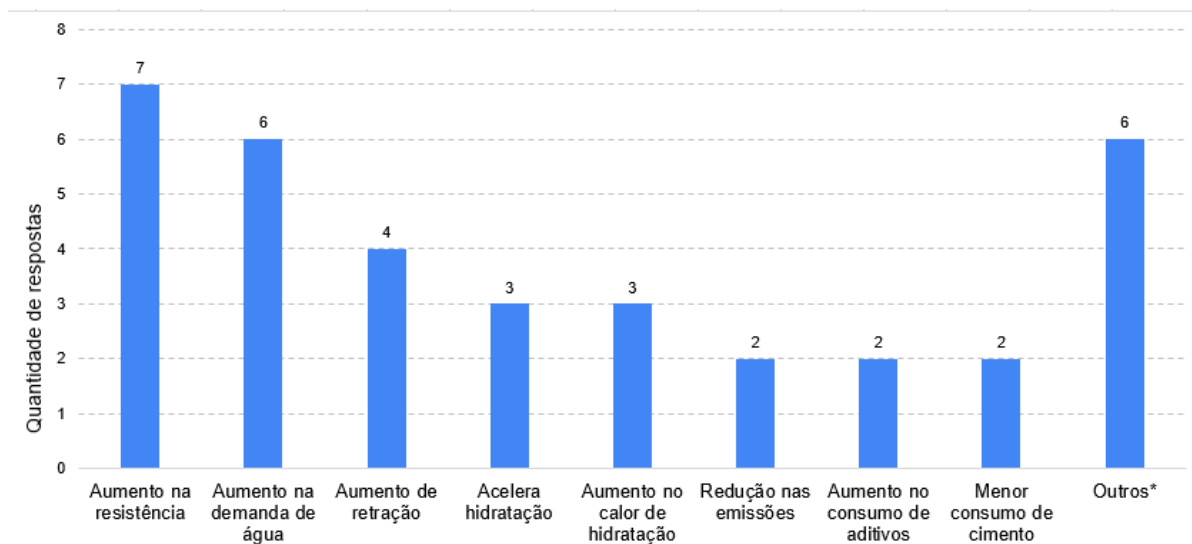
**Figura 45:** Respostas obtidas para a Questão 4 - Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na FINURA do cimento Portland?



De acordo com os especialistas, as implicações de uma maior finura (Figura 46) na utilização do cimento Portland é essencialmente o aumento na resistência (20%) e na demanda de água (17,2%). Acarretam aumento na retração (11,4%) e aumento no calor de hidratação (8,6%). Houve divergência a respeito das emissões de CO<sub>2</sub>, 2 respostas apontam que implica redução de emissões e 1 resposta aponta que haverá aumento nas emissões.

A revisão bibliográfica apontou que aumento na finura gera aumento na resistência, na demanda de água e calor de hidratação, convergindo com a opinião dos especialistas.

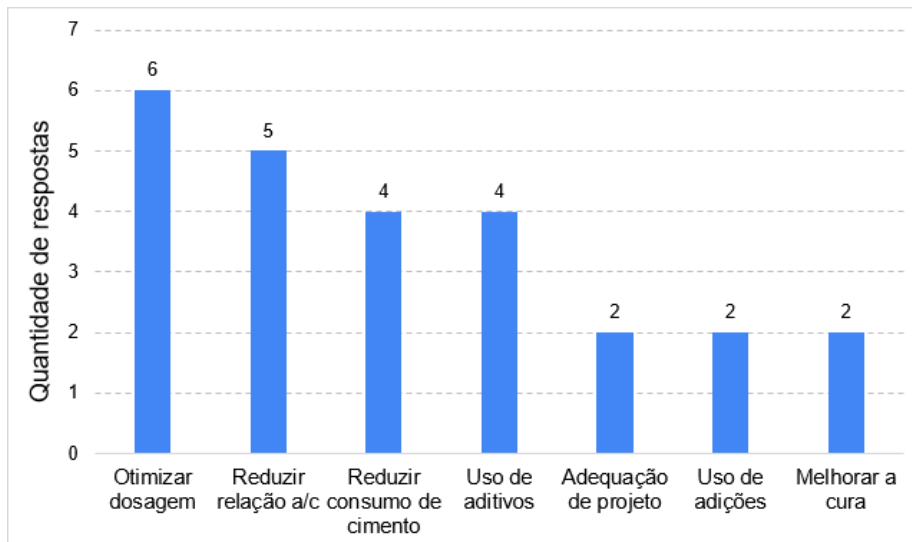
**Figura 46:** Resposta obtidas para a Questão 5 - Quais as implicações desta MAIOR/MENOR FINURA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental)



\*Outros é relativo a uma resposta para: Menor tempo de pega, Aumento nas emissões, Alteração na resistência, Alteração no calor de hidratação, Perda de consistência, Redução de custos.

A Figura 47 expressa as respostas para utilização levando em conta durabilidade e redução de emissões para cimentos com maior finura. Nota-se que a otimização de dosagem (24%) e redução da relação a/c (20%) são as principais respostas, seguido redução no consumo de cimento (16%) e uso de aditivos (16%). Na revisão bibliográfica realizada constatou-se medidas alinhadas as respostas obtidas como uso de empacotamento de partículas com uso de aditivos e emprego de cimento LC<sub>3</sub>.

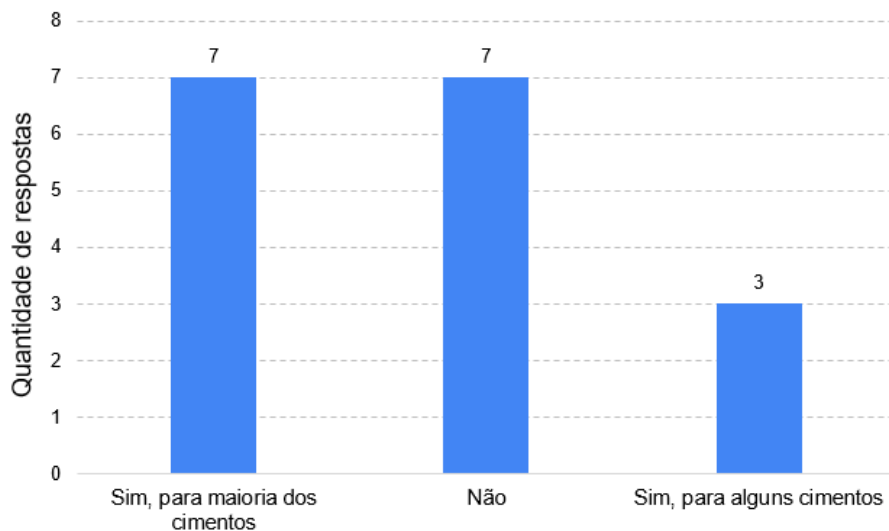
**Figura 47:** Respostas obtidas para a Questão 6 - Como utilizar/aplicar cimentos MAIS/MENOS FINOS para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?



#### 4.4.3 Percepção sobre composição química

Para esta etapa foram realizadas 5 perguntas, sendo duas fechadas e três abertas. Observa-se na análise das respostas para a variação na composição química do cimento pela Figura 48 que apenas 10 respostas foram afirmativas (58,8%) e 7 não notaram variação na composição do cimento para os itens mencionados na questão (41,2%).

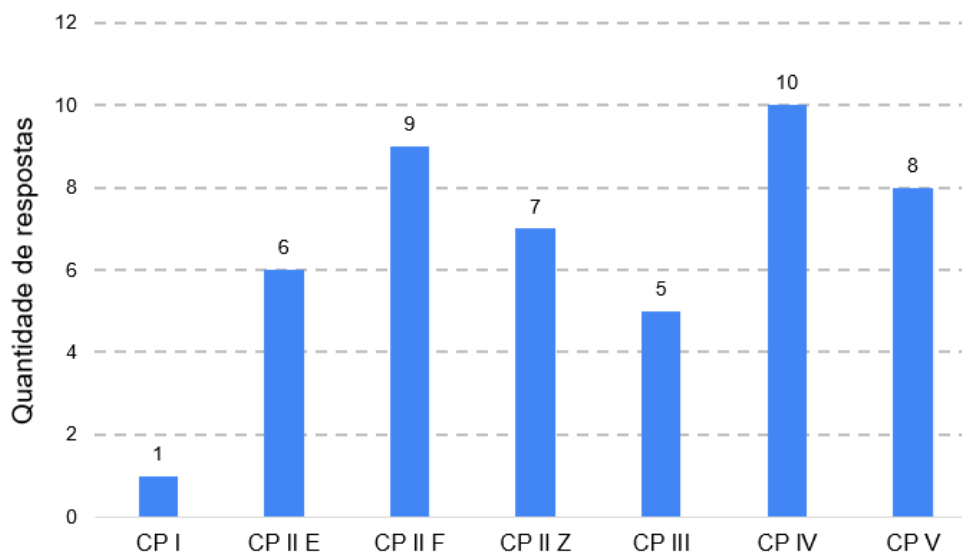
**Figura 48:** Respostas obtidas para a Questão 7 - Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA (teor de C3S, C2S, C3A e C4AF, Perda ao Fogo e Resíduo Insolúvel) dos cimentos Portland brasileiro nos últimos anos?



Nota-se na Figura 49 os cimentos que tiveram mudança na sua composição química. São os principais: CP IV, CP II F, CP V e CP II Z com 21,7%, 19,6%, 17,4% e 15,2% das respostas, respectivamente de acordo com os especialistas respondentes.

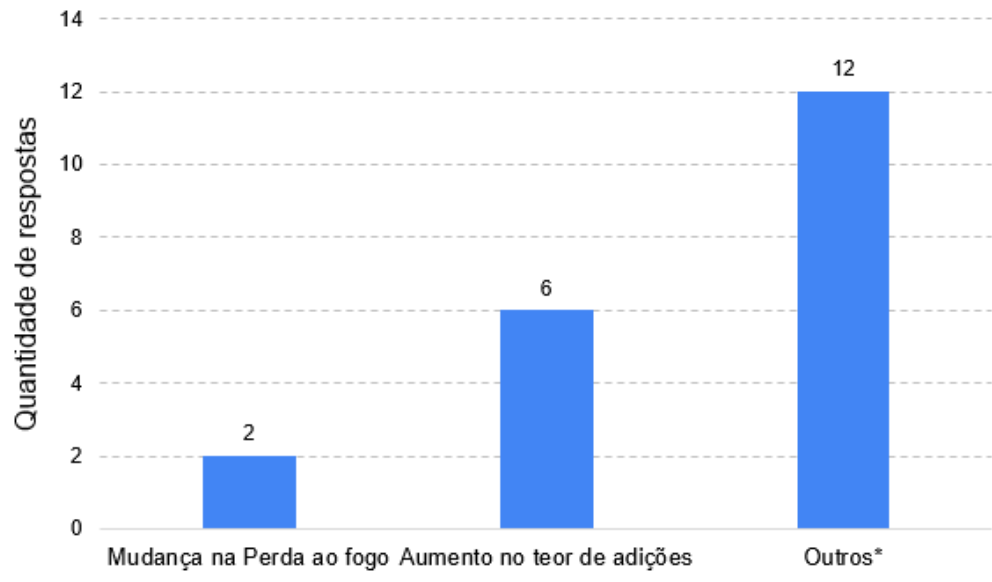
Há convergência com o estudo na mudança do cimento CP V, pois determinou-se crescente relação  $C_3S/C_2S$  para o cimento de alta resistência inicial.

**Figura 49:** Respostas obtidas para a Questão 8 - Para quais cimentos brasileiros?



As respostas obtidas para as principais mudanças foram bem heterogêneas como mostra a Figura 50. Mostrou maiores respostas no aumento no teor de adições por conta da mudança na normativa com 6 respostas. Mostrou convergência com o estudo na mudança de Perda ao fogo, pois os cimentos CP II F (descendente), CP IV (ascendente) e CPV (ascendente) mostraram variações. Destaque para a variedade de respostas, 14 no total.

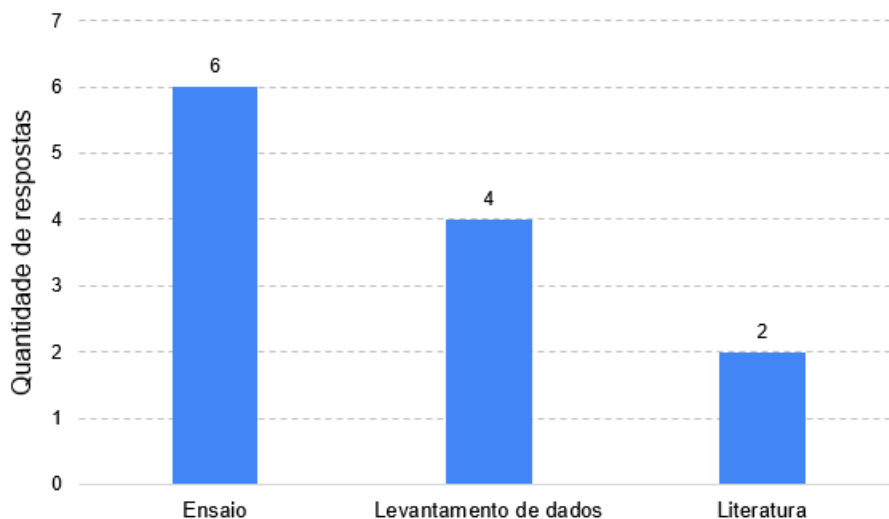
**Figura 50:** Respostas obtidas para a Questão 9 - Quais as principais mudanças de COMPOSIÇÃO QUÍMICA observadas?



\* Outros é relativo a uma resposta para: Redução no teor de  $C_3S$ , Redução no teor de  $C_2S$ , Redução no teor de Resíduo insolúvel, Aumento no teor de  $C_3S$ , Aumento no teor de  $C_2S$ , Mudança no Resíduo Insolúvel, Variações no geral, Aumento no teor de perda ao fogo, Aumento no teor de resíduo insolúvel, Mudança no CaO livre, Variação no teor de aluminatos, Alteração no teor de  $C_3S$

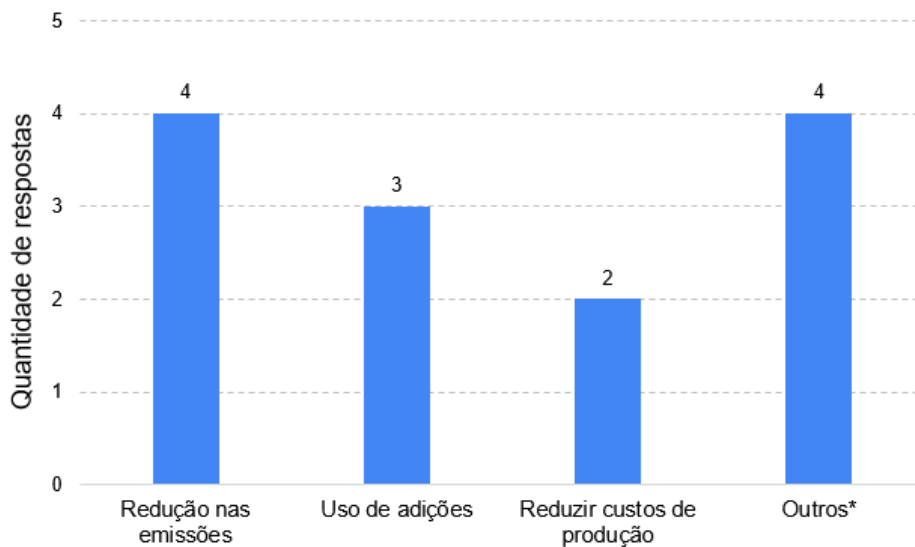
Ao serem questionados de como constataram a variação da composição química, os especialistas indicam que a mudança da composição é constatada a partir de ensaios (6 respostas), seguido de levantamento de dados (4 respostas) e busca na literatura (2 respostas) ilustrada pela Figura 51

**Figura 51:** Respostas obtidas para a Questão 10 - Como você notou/constatou essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?



O motivo pelo qual os especialistas indicam que está havendo variação na composição do cimento (Figura 52) converge com os princípios ambientais de redução de emissões (30,1%) e uso de adições (23,1%) que tem ligação com a nova normativa e por consequência redução de emissões associada. Por fim, redução de custos de produção (15,4%).

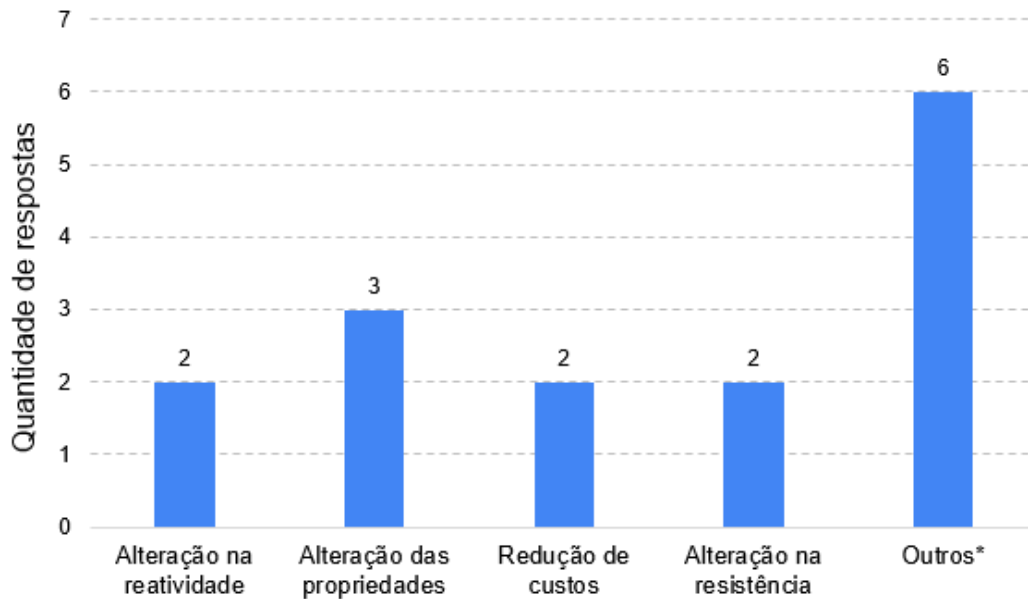
**Figura 52:** Respostas obtidas para a Questão 11 - Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?



\*Outros é relativo a uma resposta para: Conhecimento do cimento, Escassez de matéria prima, Alterações na matéria prima e Alteração na moagem.

A Figura 53 apresenta a opinião dos especialistas acerca das implicações relativas as mudanças na composição do cimento. Os especialistas sugerem que há alteração nas propriedades (3 respostas), na reatividade (2), na resistência (2) e redução dos custos de produção (2). Ressalta-se que as respostas recebidas foram variadas, no total foram 10 respostas diferentes para responder a questão.

**Figura 53:** Resposta obtidas para a questão 12 - Quais as implicações desta variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental)

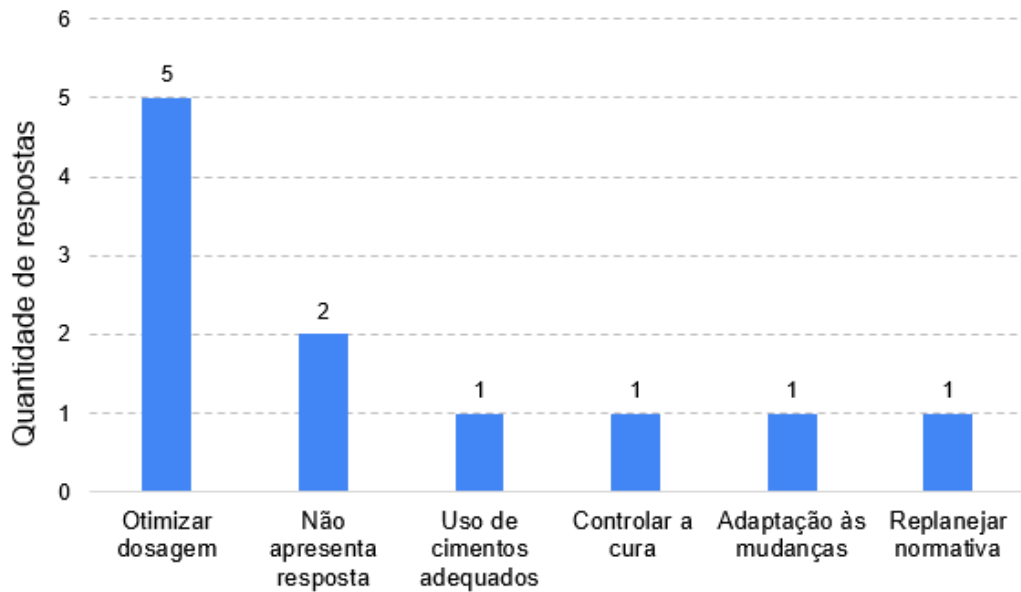


\*Outros é relativo a uma resposta para: Aumento na resistência, Alteração na durabilidade, Alteração no estado fresco, Aumento no consumo de cimento, Intensificação carbonatação, Redução de emissões

Quando questionados sobre como utilizar cimentos com variação na composição (Figura 54) com objetivo de obter estruturas mais duráveis e menos emissivas. Respondeu-se, em sua maioria, que é necessário otimizar a dosagem (45,5%). Dois (2) especialistas apontam que não se pode afirmar quais medidas objetivas devem ser empregadas.

Neste trabalho é sugerido o método de empacotamento de partículas como solução para utilizar cimentos principalmente com maior teor de adições. As respostas dos especialistas convergem com a sugestão deste estudo.

**Figura 54:** Respostas obtidas para a Questão 13 - Questão 13: Como utilizar/aplicar cimentos com variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?

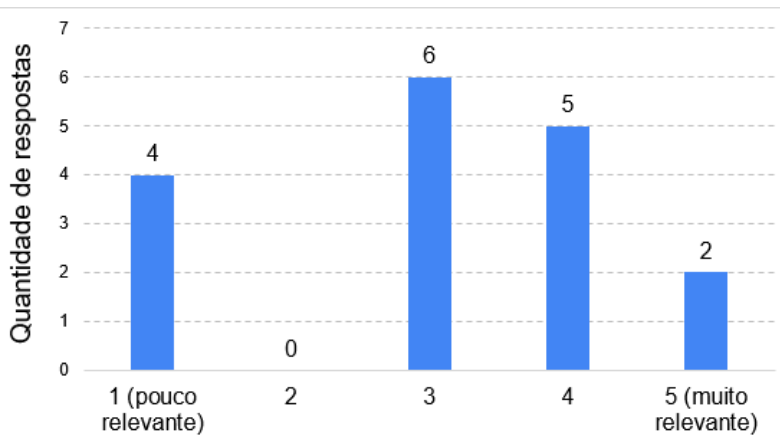


Nesta etapa, para avaliar os impactos da mudança de norma que permitiu a redução da quantidade de clínquer e o incremento de adições, principalmente fíler calcário, perguntou-se a relevância, onde foi atribuída nota 1 (pouco relevante) a 5 (muito relevante) da atualização da norma a respeito da resistência do concreto produzido com cimento Portland, da durabilidade e com relação a redução de emissões de CO<sub>2</sub> na produção do cimento Portland.

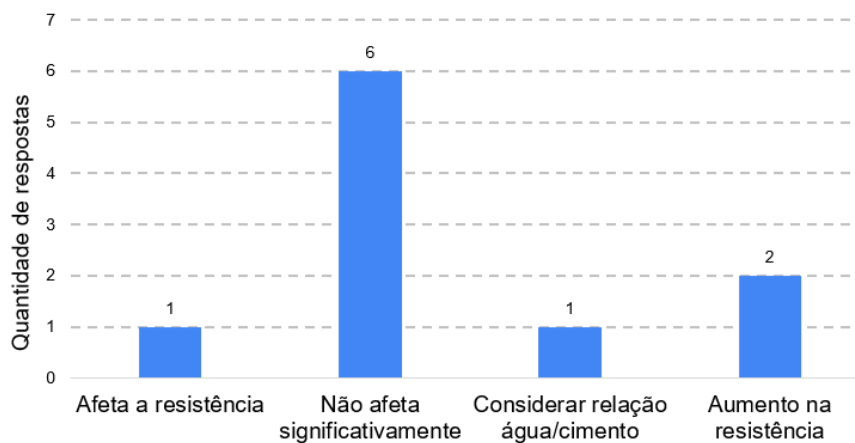
Referente a resistência do concreto, percebe-se pela Figura 55 que 64,7% dos especialistas atribuíram nota 3 e 4, no questionário considera-se nota mediana a alta. 23,5% dos especialistas atribuíram nota 1, ou seja, apresenta pouca relevância. E 11,8% dos especialistas apresentam nota 5 com muita relevância. Destaque para a dispersão das respostas. Os comentários (Figura 56) mostram que 6 respostas relatam que não afeta significativamente e 2 apontam que houve aumento na resistência.



**Figura 55:** Respostas obtidas para a Questão 14 - Em 2018, teve-se a unificação e atualização das normas técnicas associadas ao cimento Portland, sendo atualmente vigente a NBR 16697 (ABNT, 2018). No que diz respeito à RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO do concreto convencional produzido com Cimento Portland

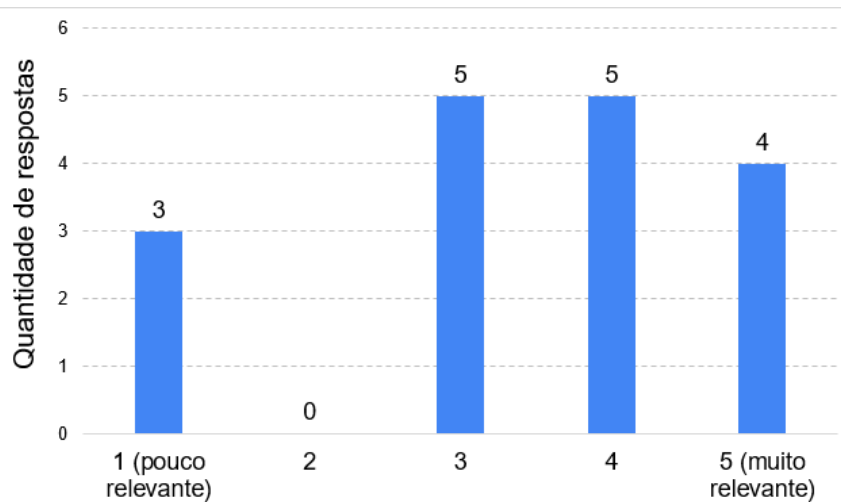


**Figura 56:** Respostas obtidas dos comentários para a Questão 14



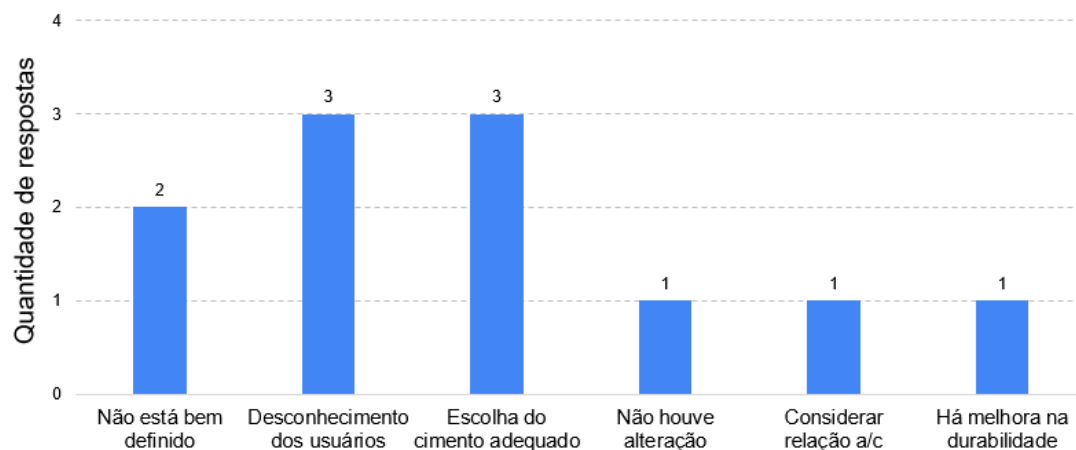
Com relação a durabilidade, nota-se pela Figura 57 que 10 especialistas apontam nota 3 e 4 de relevância para durabilidade com a alteração da normativa, 4 respostas atribuíram nota 5 (muito relevante) e 3 notas 1 (pouca relevância). Ressalta-se a dispersão entre as opiniões dos especialistas

**Figura 57:** Respostas obtidas para a Questão 15: no que diz respeito a DURABILIDADE de estruturas de concreto. INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa



Com a Figura 58, analisa-se que 3 respostas condicionam a escolha adequada do cimento para uma determinada condição de exposição como fator preponderante para a durabilidade da estrutura. 2 respostas mostram que não está definido na normativa e 3 respostas indicam que há desconhecimento por parte dos usuários nesse aspecto.

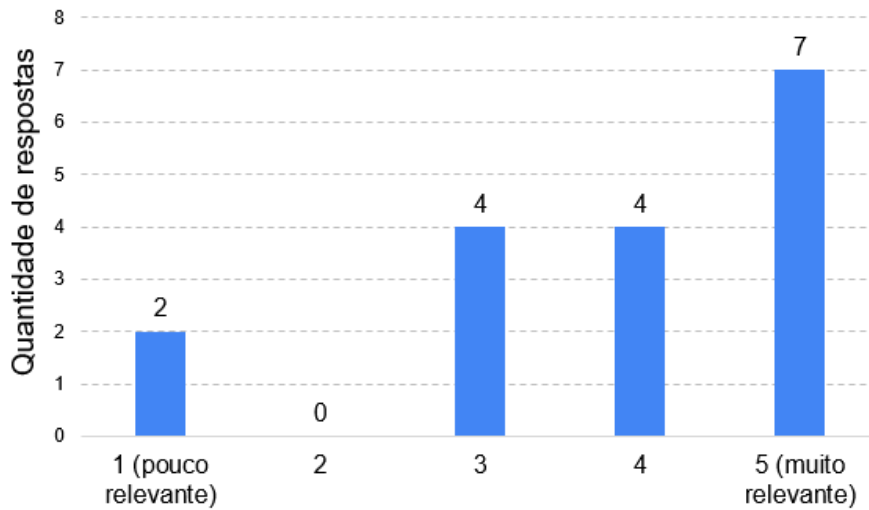
**Figura 58:** Respostas obtidas dos comentários para a Questão 15



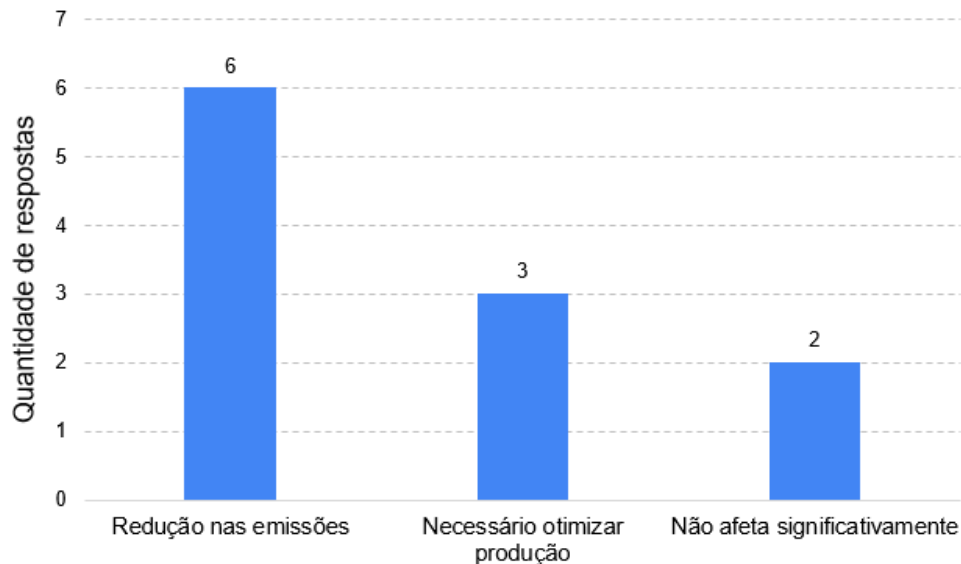
Com relação a redução das emissões, nota-se pela Figura 59 que 7 especialistas atribuem nota 5 de relevância para redução nas emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento Portland, muito por conta da redução no teor de clínquer. Pelos cálculos feitos pelo estudo comprovam que se reduz cerca de 6% nas emissões de CO<sub>2</sub> com esta alteração. Porém, duas respostas apontam que há pouca relevância nesse aspecto, provavelmente pelo fato do Brasil ser um pequeno produtor de cimento

mundial (cerca de 1,35% da produção mundial em 2016) (ANDREW, 2018).

**Figura 59:** Respostas obtidas para a Questão 16: no que diz respeito a REDUÇÃO DE EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) na produção do Cimento Portland. INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa



**Figura 60:** Respostas obtidas dos comentários para a Questão 15



#### 4.5 SOLUÇÕES TÉCNICAS PARA A UTILIZAÇÃO DE CIMENTOS COM MAIOR FINURA E VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO

Este tópico tem o objetivo de destacar os efeitos causados no concreto com foco na resistência e durabilidade para o aumento da finura e do C<sub>3</sub>S do cimento, assim como os efeitos causados pelas alternativas para tornar o cimento menos emissivo, ou seja, reduzir o teor de clínquer e manter as resistências necessárias aos 28 dias que são:

1. Aumento no teor de adições (fíler calcário e argila calcinada)

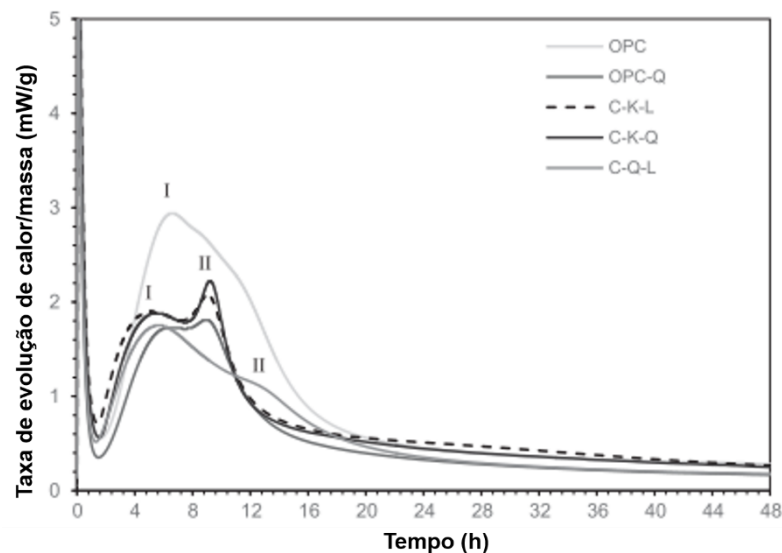
## 2. Aplicação da teoria do empacotamento de partículas

As soluções aqui apresentadas advêm da revisão de literatura e das informações coletados na survey com especialistas no tema da pesquisa.

### 4.5.1 Aumento do teor de adições

Com base no que foi apresentado pela Figura 2, os materiais com maior potencial para o uso em larga escala para os próximos anos é a mistura de argila calcinada com fíler calcário ( $LC_3$ ). No trabalho de KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI (2019) compara-se os efeitos do cimento Portland convencional com teor de 95% clínquer (OPC) com o cimento  $LC_3$  de nome “C-K-L” com proporções de 50% clínquer, 30% argila calcinada e 15% fíler calcário. Os resultados obtidos para calorimetria estão na Figura 61.

**Figura 61:** Desenvolvimento do calor nas misturas vide OPC e C-K-L



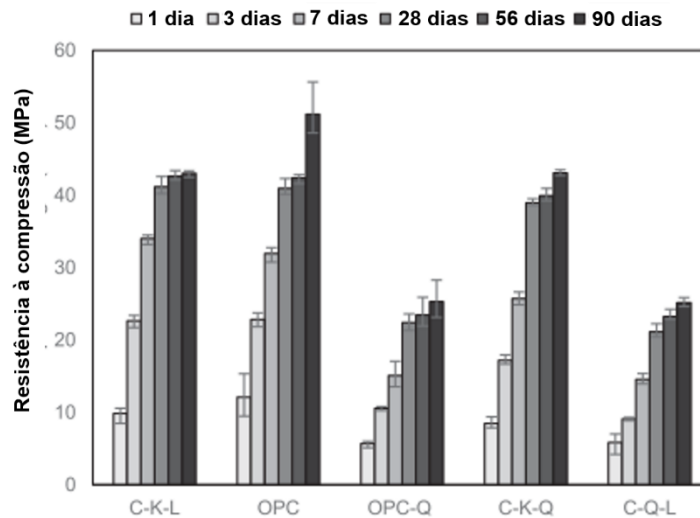
Fonte: (KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019)

O pico de calor mostrado na Figura 37 no ponto I é menor do cimento  $LC_3$  em comparação com o cimento Portland tradicional, contribuindo com as questões de durabilidade.

A resistência do cimento  $LC_3$  (C-K-L) em comparação com o cimento Portland (OPC) tem comportamento muito semelhante para as primeiras idades como mostra a Figura 62, ou seja, até 28 dias que supre a necessidade proposto pela norma, porém

para idade mais avançada de 90 dias não teve ganhos de resistência diferente do cimento Portland.

**Figura 62:** Resistência para idades iniciais do cimento LC<sub>3</sub> e cimento Portland convencional

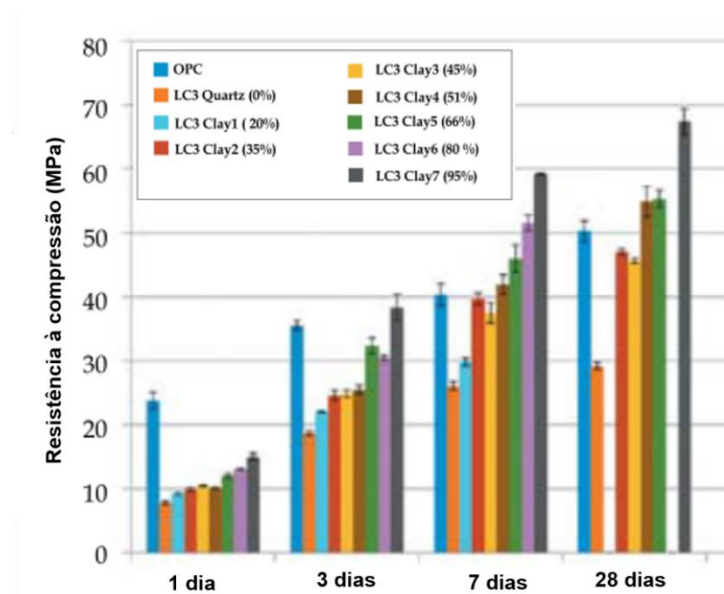


Fonte: (KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019)

Tendo em vista as questões ambientais e as políticas de redução nas emissões de CO<sub>2</sub> da indústria do cimento SCRIVENER (2014) afirma que a solução mais viável é a substituição do clínquer a partir da utilização do cimento LC<sup>3</sup> com o mesmo teor empregado por KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI (2019), ou seja, 50% clínquer, 30% argila calcinada e 15% fíler calcário. A Figura 63 demonstra os resultados de resistência à compressão em função da quantidade de caulinita presente na argila calcinada.

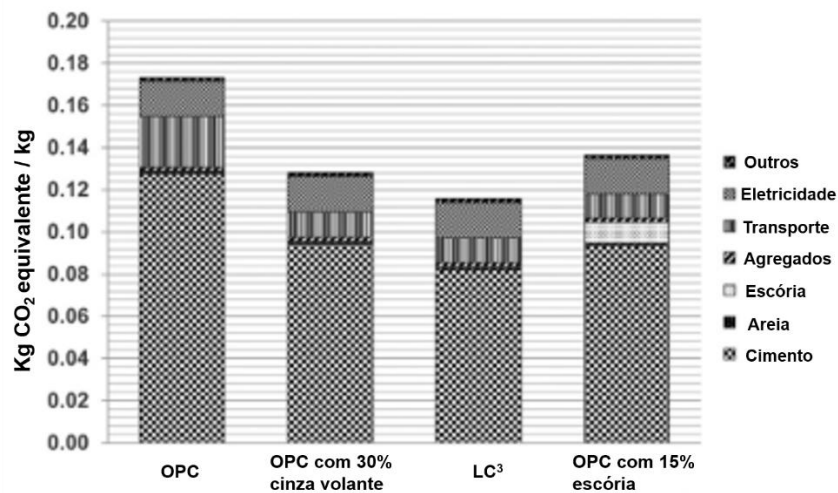
SCRIVENER et al. (2018) afirmam que o LC<sup>3</sup> é uma solução para aumentar a escala de produção de cimento mantendo os níveis de emissões constantes, pois apresenta viabilidade técnica por questões de durabilidade (resistência a cloretos, mitigação de reação álcali-agregado, resistência a sulfatos e baixa porosidade) e resistência à compressão, viabilidade econômica visto que o processo de produção é praticamente o mesmo e apresenta alta disponibilidade de material. A Figura 64 mostra a comparação de emissões para um concreto com resistência de 50 MPa do cimento convencional com o LC<sup>3</sup> e outras adições (escória a 15% e cinza volante a 30%), nota-se que o LC<sup>3</sup> apresenta níveis inferiores de emissões com cerca de 30% a menos em comparação ao cimento convencional.

**Figura 63:** Comparação entre cimento Portland comum com cimento LC<sub>3</sub> com variado teor de caulinita



Fonte: (SCRIVENER, 2014)

**Figura 64:** Emissões específicas para os quatro tipos de cimento



Fonte: (SCRIVENER et al., 2018)

O LC<sup>3</sup> ainda é considerado um material novo e demanda mais experimentos para que se constate a sua eficiência frente as opções disponíveis hoje no mercado.

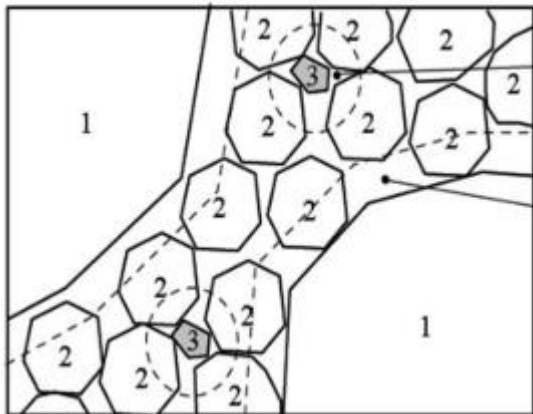
#### 4.5.2 Empacotamento de partículas

A teoria do empacotamento de partículas aplicado ao concreto se baseia no princípio de que a partir da obtenção da granulometria dos componentes, é possível

reduzir os espaços de vazios deixados entre os grãos. Isso ocorre de maneira que os grãos menores preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores. Por consequência menos água é necessário para atingir a fluidez/trabalhabilidade esperada, permitindo assim o uso de menos cimento para atingir a mesma resistência com o uso da técnica do empacotamento de partículas (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

A Figura 65 representa o fenômeno do empacotamento de partículas considerando três dimensões de grãos e a maneira com que se arranjam no sistema.

**Figura 65:** Representação do empacotamento de partículas



Fonte: (KNOP; PELED, 2016)

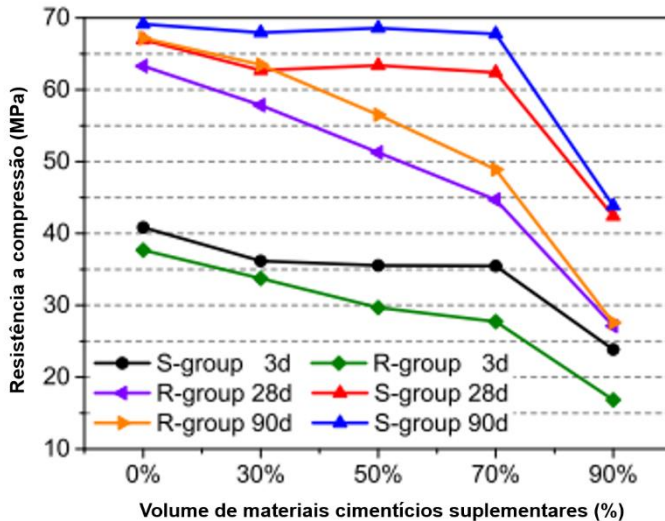
Com a aplicação desta teoria é possível reduzir o teor de cimento do concreto e obter uma eficiência ambiental pela redução na quantidade de cimento empregada enquanto as características mecânicas permanecem (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017) (WU et al., 2018).

No estudo realizado por WU et al. (2018) foi comparado o uso de cimento Portland comum e cimento Portland com alta finura (superfino) com adições minerais sendo cinzas volantes e escória na mesma proporção de 0% a 90%. As legendas são S (relativo ao cimento superfino) e R (relativo ao cimento de referência) e o número em seguida faz referência ao teor de adição utilizado. Exemplo: R-30 (70 % de cimento de referência e 30 % com adições minerais).

Os resultados da Figura 66 mostram que a resistência do cimento superfino com adição de até 70% aos 28 dias (linha vermelha) apresenta resistência com valor próximo dos resultados para o cimento de referência sem adição aos 28 dias

(linha amarela). Portanto, neste caso existe potencial de altos teores de adição em cimentos superfinos.

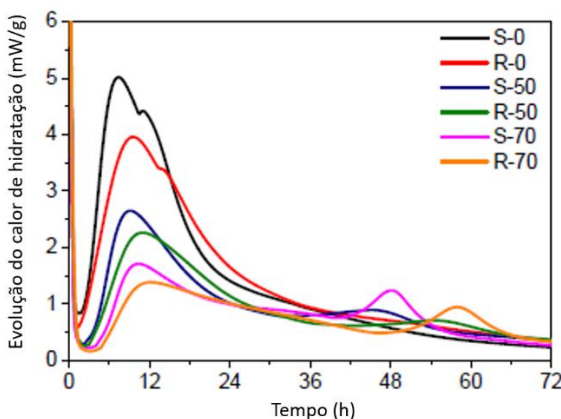
**Figura 66:** Resistência em função do teor de adição



Fonte: (WU et al., 2018)

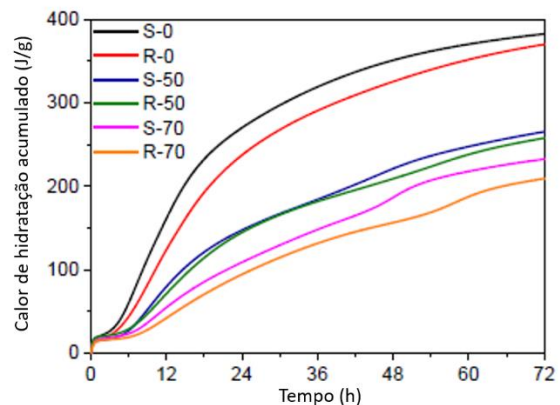
Apesar do cimento ser mais fino, o calor gerado para o cimento superfino com 70% de adição (Figuras 67 e 68) é relativamente baixo se comparado ao cimento superfino e o cimento convencional sem o emprego de adições.

**Figura 67:** Calor gerado por tipo de cimento



Fonte: (WU et al., 2018)

**Figura 68:** Calor gerado por tipo de cimento

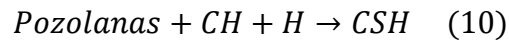


Fonte: (WU et al., 2018)

Na Figura 67 é mostrado pela linha de cor rosa o segundo pico com tempo de 48h, onde mostra que há hidratação nas adições minerais, pois o cimento superfino tende a gerar o C-S-H e o CH (hidróxido de cálcio) como descrito nas equações (6) e (7). Em seguida ocorre o processo chamado de reação pozolânica conforme a



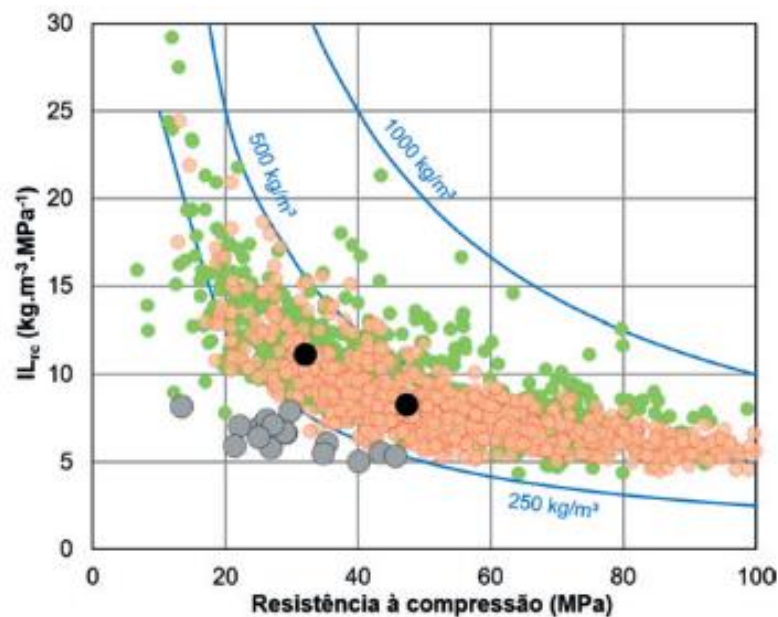
equação (10) em que as adições minerais reagem com o hidróxido de cálcio e formam mais C-S-H, responsável por fornecer resistência e preencher os vazios do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).



No trabalho realizado por Daminel; Pileggi; John (2017) foram avaliados traços com cimento CP V, três tipos de fileres calcário e utilizando aditivo à base de policarboxilato aplicando a teoria do empacotamento de partículas. Para avaliar os resultados obtidos foi utilizado o indicador denominado índice de ligantes que tem a unidade  $\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ , ou seja, a quantidade de cimento por metro cúbico de concreto para fornecer um (1) MPA de resistência a compressão.

Os resultados mostram que a correta aplicação do empacotamento de partículas na dosagem de concretos (pontos cinzas) permite a produção de concreto com índice de ligantes mais baixos do que a média nacional e internacional de acordo com a Figura 69. É o mesmo que afirmar que é necessário menos cimento para os mesmos ganhos de resistência à compressão.

**Figura 69:** Resultados de índice de ligantes da média nacional (verdes) e internacional (vermelhos) x pesquisa (cinza e preto)



Fonte: (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a variação temporal da finura e composição química dos principais cimentos nacionais no período de 1970 a 2020, a partir da coleta de dados de estudos acadêmicos realizados por todo o Brasil disponíveis online. A partir da revisão de literatura e survey com especialistas, foi possível sistematizar os efeitos positivos e negativos das variações do cimento Portland e propor soluções para produção de elementos/estruturas com materiais a base de cimento visando a durabilidade.

Assim, com base nos resultados dessa pesquisa, constatou-se variação temporal da finura dos diversos cimentos brasileiros. Essa variação de finura foi positiva (crescente) para os cimentos CP I, CP II F, CP III e CP IV, foi estável para os cimentos CP II Z e CP II E, foi negativa (decrecente) para os cimentos CP V. A percepção dos especialistas converge com os resultados, exceto para o cimento CP V.

A respeito da variação na composição do cimento Portland conclui-se que para perda ao fogo (PF) há variação positiva para os cimentos CP I, CP V e CP IV, negativa para o CP II F e apresenta estabilidade nos cimentos CP II E, CP II Z e CP III. O resíduo insolúvel apresentou variação positiva para os cimentos CP I, CP II F, CP V, CP II E e CP III e decréscimo para CP II Z e CP IV.

Analisando as fases do clínquer ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ ), pode-se considerar os cimentos CP I e CP V por conta da limitação da equação de Bogue. Conclui-se que para a relação  $C_3S/C_2S$  há variação positiva para ambos os cimentos. Para soma  $C_3S+C_3A$  há variação positiva para CP I e negativa para CP V. Por fim, para o  $C_3A$  há decréscimo para ambos os cimentos.

Ao estimar as emissões de  $CO_2$  constatou-se que com a mudança de normativa haverá uma redução de cerca de 6% com a mudança na normativa com as diretrizes para produção de cimento e emissões por volta de  $625 \text{ kg} \cdot CO_2/\text{t}$  cimento.

Na sistematização dos efeitos da finura, conclui-se que o cimento se torna mais reativo no processo de hidratação, há ganho de resistência inicial mais elevados e maior demanda por água para mesma consistência, maior liberação de calor e, por consequência, maior efeito da retração química, corroborado pelos especialistas nas respostas obtidas pela questão 5 da survey.

Por fim, ao propor soluções para o emprego de cimentos mais finos conclui-se que otimizar a dosagem, reduzir relação  $a/c$ , reduzir consumo de cimento por  $m^3$ , escolher adequadamente o cimento, fazer uso de aditivos e adições, além de controlar o processo de cura, são medidas a serem tomadas para se adaptar as variações dos cimentos avaliadas no estudo com base na opinião dos especialistas e da literatura.

## 5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras:

- Prosseguir com a coleta de dados de finura e composição dos cimentos nacionais visando expandir o banco de dados para análise de tendência. Para isso deve-se buscar outras fontes de pesquisa como: Cimenteiras, concreteiras, centros de pesquisa, dissertações e teses de doutorado em mídia física e intensificar as buscas online.
- Avaliar com mais profundidade os efeitos causados pela mudança da norma, com foco na durabilidade das estruturas de concreto.
- Expandir a proposição de soluções para a indústria da construção, tendo em vista questões de durabilidade e redução de emissões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (no 200). Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

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

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

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

ABRAMS, D. A. **Effect of fineness of cement**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1922 (Lewis Institute Bulletin, n. 4.)

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, Sherbrooke, v. 30, p. 1349–1359, 2000

AÏTCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. 1. ed. New York: Taylor and Francis, 2008.

AÏTCIN, P. C. Portland cement. In: AÏTCIN, P. C., **Science and Technology of Concrete Admixtures**. 1. ed. Sherbrooke: Woodhead Publishing, 2016. p. 27-51. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>>. Acesso em: 15 de abril de 2020

AÏTCIN, P. C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. 1. 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.

ALASKAR, A.; HOOTON, R. D. Effect of binder fineness and composition on length change of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117537, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117537>. Acesso em: 20 de abril de 2020

ALEXANDER, K. M. The relationship between strength and the composition and fineness of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 6, p. 663–680, 1972.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C150: Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, 2020

ANDREW, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, p. 1–52, 2018.

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

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.

BENTZ, D. P.; GARBOCZI, E.; HAECKER, C.; JENSEN, O. M.. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1663–1671, 1999

BENTZ, D. P. Blending different fineness cements to engineer the properties of cement-based materials. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 5, p. 327–338, 2010.

BENTZ, D. P; JENSEN, O. M.; HANSEN, K. K.; OLESEN, J. F.; STANG, H.; HAECKER, C. Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 84, n. 1, p. 129–135, 2001.

BENTZ, D. P.; HAECKER, C. J. Argument for using coarse cements in high-performance concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 4, p. 615–618, 1999.

BENTZ, D. P.; PELTZ, M. A. Reducing thermal and autogenous shrinkage contributions to early-age cracking. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 4, p. 414–420, 2008.

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**, v. 1561, n. 2, p. 17, 2008.

BOUASKER, M. et al. Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 1, p. 13–22, 2008.

BURROWS, R. W. et al. Three simple tests for selecting low-crack cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 509–519, 2004.

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**, v. 55, n. 1, p. 18–32, 2009.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Indústria brasileira de**

**cimento:** Base para a construção do desenvolvimento. Brasília, p. 58, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Indústria brasileira de cimento:** Base para a construção do desenvolvimento. Brasília, p. 60, 2017.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 5, p. 998–1024, 2017.

DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M.. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 115–127, 2008.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials:** Their nature and behaviour. 4. ed: Spon Press, 2010.

FTIKOS, C.; PHILIPPOU, T. Preparation and hydration study of rich C2S cements. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 6, p. 934–940, 1990.

HABERT, G. Environmental impact of Portland cement production. **Eco-Efficient Concrete**, p. 3–25, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857098993.1.3>. Acesso em: 14 de abril de 2020

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 2008, 247 p. Tese (Doutorado) - Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2008.

HU, J.; GE, Z.; WANG, K. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 657–663, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011>. Acesso em: 30 de junho de 2020

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE (CSI). **Technology Roadmap: Low carbon transition in the cement industry.** 2018. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4585/61678>. Acesso em: 20 de abril de 2020

IPCC, 2007. **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the IPCC, Cambridge University, United Kingdom, 2007.

KELHAM, S. The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, n. 3, p. 171–179, 1996.

KNOP, Y.; PELED, A. Packing density modeling of blended cement with limestone having different particle sizes. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 44–50, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.063>. Acesso em 10 de julho de 2020

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials**. 15. ed. Washington: Portland Cement Association, 2011.

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 64–72, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.123>>. Acesso em: 20 de agosto de 2020

LE QUÉRÉ, C. et al. Global Carbon Budget 2016. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016.

LOTENBACH, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848–860, 2008.

MARDANI-AGHABAGLOU, A. et al. Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. **Journal of Green Building**, v. 12, n. 1, p. 142–167, 2017.

MEHTA, B. Y. P. K.; BURROWS, R. W. Building Durable Structures in the 21st Century. **Concrete International**, p. 57–63, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

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**, v. 135, p. 129–136, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>>. Acesso em: 15 de abril de 2020

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

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. v. 1a edição Disponível em: <[http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos\\_cientificos\\_mc\\_web.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos_cientificos_mc_web.pdf)>

OLIVERA, A. et al. Verificação da resistência à compressão em concreto com adição de filer calcário. In: CONPAR 2017, Recife. **Anais...** Recife

PAULINI, P. A Weighing Method For Cement Hydration. In: 9TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT 1992, New Delhi. **Anais...** New Delhi Disponível em: <[https://www.uibk.ac.at/mti/personal/9iccc\\_weighing\\_method.pdf](https://www.uibk.ac.at/mti/personal/9iccc_weighing_method.pdf)>

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

POSSAN, E. Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios. **Concreto e construções**.

IBRACON, p. 72-78, 2019.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RIDING, K. A. et al. Modeling hydration of cementitious systems. **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 2, p. 225–234, 2012.

RODRIGUES, A. F.; FONSECA, D. S. **Cimento**: Insumo minerais para fabricação de cimento. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-2-2013-calcario-2013-gipsita-cimento>

SARKAR, S. L. Effect of blaine fineness reversal on strength and hydration of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 3, p. 398–406, 1990.

SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. November 2017, p. 49–56, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, 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-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry. **World Business Council for Sustainable Development**, p. 42, 2016. Disponível em: <[https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/51016%0Ahttp://www.wbcdcement.org/pdf/CSI\\_GNR\\_Report\\_final\\_updated\\_Nov11\\_LR.pdf](https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/51016%0Ahttp://www.wbcdcement.org/pdf/CSI_GNR_Report_final_updated_Nov11_LR.pdf)>

SNIC. **Números da Indústria do Cimento**. 2013. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2013.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf)>. Acesso em: 05 de maio de 2020

SNIC. **Números do Setor**. 2016. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 05 de maio de 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (SNIC). **ROADMAP Tecnológico do Cimento**: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990

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

THOMAZ, E. C. S. **Cimento nos U.S.A.** p. 1–18, 201-. Notas de Aula - IME (Instituto Militar de Engenharia). 201-. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/finura\\_usa.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/finura_usa.pdf)>. Acesso em: 20 de agosto de 2020



VUK, T. et al. The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 135–139, 2001.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD).  
**GNR PROJECT:** Reporting CO<sub>2</sub>. 2016. Disponível em:  
<<https://www.wbcdcement.org/GNR-2016/>>. Acesso em: 10 de maio de 2020

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**, v. 196, p. 358–369, 2018.

## **APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO (SURVEY) DESTINADO A ESPECIALISTAS DE CIMENTO E CONCRETO NACIONAIS**

Texto Introdutório apresentado aos respondentes no Google Formulários

Este questionário visa coletar informações para dar suporte ao trabalho de TCC do discente Gabriel Werner Simoneto, matriculado no curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da Universidade Federal da Integração Latino Americana (UNILA, Foz do Iguaçu, PR), sob orientação das professoras Dra. Edna Possan e Dra. Katia R. G. Punhagui.

O TCC será publicado no repositório de TCC UNILA ECI com link: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/4347>

O estudo tem como objetivo avaliar a variação da finura (superfície específica) e composição química do Cimento Portland Nacional nos últimos anos. Para tal, em uma primeira etapa foram coletados dados de trabalhos publicados na literatura de 1970 a 2020.

O questionário apresenta 3 seções: 1) Perfil do Respondente. 2) Finura do Cimento Portland. 3) Composição do Cimento Portland.

O levantamento de dados via formulário faz parte da terceira parte do estudo, onde se buscam informações de especialistas sobre aplicações dos diferentes cimentos.

Destaca-se que será mantido o anonimato dos respondentes.

Se necessário façam contato em [gabriel.simoneto@aluno.unila.edu.br](mailto:gabriel.simoneto@aluno.unila.edu.br) e coloquem no assunto do e-mail: "CIMENTO", assim os e-mails serão facilmente identificados e rapidamente respondidos.

Obs: Em todas as perguntas será deixada uma caixa para comentário, caso julgar necessário.

### **SEÇÃO 1: PERFIL DO RESPONDENTE**

1. Endereço de e-mail
2. Nome
3. Instituição/Empresa que trabalha

4. Estado
  - PR
  - SC
  - RS
  - SP
  - RJ
  - MG
  - Outros: \_\_\_\_\_
5. Cidade
6. Profissão
  - Professor de Engenharia Civil
  - Engenheiro Civil
  - Outros: \_\_\_\_\_
7. Nível de Graduação
  - Bacharelado
  - Mestrado
  - Doutorado
  - Outros: \_\_\_\_\_
8. Tempo de experiência na Área
  - 6 meses a 1 ano
  - 1 ano a 3 anos
  - 3 anos a 5 anos
  - 5 anos a 10 anos
  - Mais de 10 anos
9. A sua experiência é PRÁTICA ou ACADÊMICA? Comente

## SEÇÃO 2: FINURA DO CIMENTO PORTLAND

Questão 1: Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na FINURA(ÁREA SUPERFICIAL) do cimento Portland brasileiro nos últimos anos?

- Sim, AUMENTO para maioria dos cimentos
- Sim, AUMENTO para alguns cimentos
- Sim, DIMINUIÇÃO para maioria dos cimentos
- Sim, DIMINUIÇÃO para alguns cimentos
- Não

Caso AFIRMATIVO para a Questão 1. Responda questões 2 a 6. Caso contrário, vá para a próxima seção.

Questão 2: Para quais cimentos brasileiros ?

- CP I
- CP II E
- CP II Z
- CP II F
- CP III
- CP IV
- CP V ARI

Questão 3: Como você notou/constatou essa variação na FINURA do cimento Portland?

Questão 4: Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na FINURA do cimento Portland?

Questão 5: Quais as implicações desta MAIOR/MENOR FINURA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental)

Questão 6: Como utilizar/aplicar cimentos MAIS/MENOS FINOS para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?

**SEÇÃO 3: COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND: Teor de C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, Perda ao Fogo (PF) e Resíduo Insolúvel (RI), Teor de adições.**

Questão 7: Com base na sua experiência profissional/acadêmica, você tem notado variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA (teor de C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, Perda ao Fogo e Resíduo Insolúvel) dos cimentos Portland brasileiro nos últimos anos?

- Sim, para maioria dos cimentos
- Sim, para alguns cimentos
- Não

Caso afirmativo para a Questão 7. Responda questões 8 a 13. Caso contrário vá para a questão 14.

Questão 8: Para quais cimentos brasileiros ?

- CP I
- CP II E
- CP II Z
- CP II F
- CP III
- CP IV
- CP V ARI

Questão 9: Quais as principais mudanças de COMPOSIÇÃO QUÍMICA observadas?

Questão 10: Como você notou/constatou essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?

Questão 11: Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?

Questão 12: Quais as implicações desta variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental)

Questão 13: Como utilizar/aplicar cimentos com variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?

MUDANÇA NORMATIVA: Questões 14 a 16 são relativas a mudanças na norma de composição do Cimento Portland. Para estas questões utilize uma escala (1 a 5), onde 1 representa nenhuma relevância e 5 representa muita relevância:

Questão 14: Em 2018, teve-se a unificação e atualização das normas técnicas associadas ao cimento Portland, sendo atualmente vigente a NBR 16697 (ABNT, 2018). No que diz respeito à RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO do concreto convencional produzido com Cimento Portland. **INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa: INSIRA SEU COMENTÁRIO ABAIXO**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Questão 14.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 14

Questão 15: Com base na questão 14, no que diz respeito a DURABILIDADE de estruturas de concreto. **INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa: INSIRA SEU COMENTÁRIO ABAIXO**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Questão 15.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 15

Questão 16: Com base na questão 14, no que diz respeito a REDUÇÃO DE EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) na produção do Cimento Portland. **INDIQUE A RELEVÂNCIA da alteração normativa: INSIRA SEU COMENTÁRIO ABAIXO**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Questão 16.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 16

## APÊNDICE B - TABULAÇÃO DAS REPOSTAS<sup>9</sup> E PROCESSO DE ANÁLISE DE CONTEÚDO<sup>10</sup> PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE

Respon- dente	Questão 3: Como você notou/constatou essa variação na FINURA do cimento Portland?	Palavras-chave <sup>11</sup>
1	Por meio do <u>levantamento de dados</u> <sup>1</sup> , <u>ensaios</u> <sup>2</sup> e <u>estudo da literatura</u> <sup>3</sup> .	1. Levantamento de dados, 2. Ensaio, 3. Literatura
2	<u>Ensaio de laboratório</u> <sup>1</sup>	2. Ensaio
3	<u>PELA ANÁLISE NOS LAUDOS DE CIMENTO</u> <sup>1</sup>	2. Ensaio
4	Por <u>acompanhar pesquisa</u> <sup>3</sup> que estão sendo realizadas	3. Literatura
5	<u>Granulometria a laser</u> <sup>2</sup>	2. Ensaio
6	Através de <u>ensaios de caracterização</u> <sup>2</sup> dos materiais básicos utilizados em experimentos no laboratório. No entanto, não foi algo sistemático e, portanto, não há confiança estatística sobre isso	2. Ensaio
8	Processo de hidratação, crescimento da resistência, <u>ensaio finura blaine</u> <sup>2</sup>	2. Ensaio
9	Através dos <u>relatório de ensaios</u> <sup>2</sup> de cimento.	2. Ensaio
10	<u>Ensaio</u> <sup>2</sup>	2. Ensaio
11	Por <u>ensaios</u> <sup>2</sup>	2. Ensaio
12	A partir de <u>problemas com a reologia de pastas</u> <sup>2</sup> e também <u>avaliando a finura de vários cimentos em pesquisas</u> <sup>1,3</sup>	1. Levantamento de dados, 2. Ensaio, 3. Literatura
14	<u>Ganho da resistência nas idades de 7, 14 e 28 dias</u> <sup>2</sup> maiores que se comparados com concretos produzidos com os mesmos cimentos entre 2008 e 2012.	2. Ensaio
16	<u>Calor de hidratação</u> <sup>2</sup>	2. Ensaio
17	<u>Conversar com profissionais da própria cimenteira</u> <sup>1</sup>	1. Levantamento de dados
Respon- dente	Questão 4: Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na FINURA do cimento Portland?	Palavras-chave

<sup>9</sup> As respostas foram tabuladas por ordem de recebimento, logo respondente 1 foi o primeiro a enviar o formulário, e assim sucessivamente.

<sup>10</sup> A análise de conteúdo foi conduzida com base em palavras-chaves. Para isso, apenas fez-se o destaque (sublinhado) das palavras chaves no texto original do respondente com a inclusão de um número sobrescrito relacionado à palavra-chave correspondente. Não fez-se nenhuma alteração no texto enviado pelos respondentes.

<sup>11</sup> As palavras-chave listadas foram selecionadas pelos responsáveis da pesquisa, com base no referencial teórico desenvolvido sobre a temática.

1	<u>Aumento no teor de adições<sup>1</sup>, visando <u>aumentar a reatividade<sup>2</sup>.</u></u>	1. Teor de adições, 2. Aumentar reatividade
2	<u>Excesso de materiais pozolânicos<sup>1</sup> e <u>elevado tempo de moagem<sup>3</sup></u></u>	1. Teor de adições 3. Tempo de moagem
3	Desconheço real motivo, suponho que o aumento na finura seja para compensar o <u>aumento de adições<sup>1</sup></u> (material carbonático) o que diminui clínquer e manter as resistências.	1. Teor de adições
4	Exigência do mercado por <u>resistência altas<sup>4</sup></u> em menos tempo	4. Aumentar resistência
5	<u>Processo de moagem<sup>3</sup> ou <u>variação na fonte de matéria prima<sup>5</sup></u></u>	3. Tempo de moagem, 5. Mudança na matéria-prima
6	Evidentemente, isto facilita o <u>atingimento dos requisitos a 28 dias<sup>4</sup></u> para os cimentos compostos e aos 7 dias para os CP V	4. Aumentar resistência
8	Processo de hidratação, <u>maior resistência nas primeiras idades<sup>4</sup></u> , influência na trabalhabilidade, <u>inserção de adições em sua composição<sup>1</sup></u> , emissões	4. Aumentar resistência, 1. Teor de adições
9	Procura de <u>cimentos mais reativos<sup>2</sup>.</u>	2. Aumentar reatividade
10	<u>Menos clínquer<sup>1</sup></u>	1. Teor de adições
11	<u>Modificação na produção do material<sup>5</sup></u>	6. Mudança no processo produtivo
12	<u>Menor reatividade do clínquer<sup>2</sup>, <u>uso maior de materiais cimentícios suplementares<sup>1</sup>.</u></u>	1. Teor de adições, 2. Aumentar reatividade
14	<u>Garantir uma maior resistência nas idades iniciais<sup>4</sup>.</u>	4. Aumentar resistência
16	<u>Melhoria da resposta do concreto nas primeiras idades<sup>2</sup></u>	2. Aumentar reatividade
17	aumento da área superficial para <u>aumentar a reatividade<sup>2</sup></u>	2. Aumentar reatividade
	<b>Questão 5: Quais as implicações desta MAIOR/MENOR FINURA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de vista técnico, econômico e ambiental)</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	O aumento da finura/área superficial concorre para o <u>aumento da demanda de água<sup>1</sup></u> para uma mesma trabalhabilidade, fixando os demais materiais - agregados/proporções. Ademais, o <u>processo de hidratação é <u>acelerando<sup>2</sup></u></u> , ou seja, concorre para o <u>início de pega <u>antecipadamente<sup>3</sup></u></u> . Dessa forma é notório para algumas centrais fornecedoras de concreto na região de Porto Alegre/RS <u>que o uso de aditivos <u>plastificante/superplastificante já não conduz ao mesmo tempo de extensão de fluidez<sup>4</sup></u></u> , fixada a quantidade anterior. Isso acarreta no aumento do custo para com esse insumo. Ainda, a elevação no teor de adições minerais, provocou, mesmo que com a utilização de aditivos redutores de água a elevação do consumo de cimento, fixada a resistência e a trabalhabilidade. Isso deve-se em função da redução nas	1. Aumento na demanda de água, 2. Acelera hidratação 3. Menor tempo de pega 4. Aumento no consumo de aditivos

	quantidades presentes de C3S e C2S, em especial, o primeiro composto que é responsável pela maior parte do desenvolvimento até a idade base de projeto - 28 dias (maioria dos casos).	
2	<u>Elevadas resistências<sup>5</sup>, maior consumo de água<sup>1</sup></u>	5. Aumento na resistência 1. Aumento na demanda de água
3	Aumento finura: <u>umenta a demanda de água<sup>1</sup> e/ou aditivos para manter fluidez<sup>4</sup>; aumenta a retração<sup>6</sup> quando aumenta a demanda de água<sup>1</sup> do concreto; altera relação água/cimento quando a fluidez é corrigida com a adição de água.</u>	1. Aumento na demanda de água 4. Aumento no consumo de aditivos 6. Aumento de retração
4	Para chegar em uma maior finura vai gastar mais, e <u>vai ser mais "prejudicial" ao ambiente<sup>7</sup></u> , mas as cimenteiras preferem fazer apenas um tipo de cimento do que fazer vários, então se maior finura <u>atende a alta resistência<sup>5</sup></u> é este que será feito.	5. Aumento na resistência 7. Aumento nas emissões
5	<u>Alteração nos tempos de desenvolvimento das resistências<sup>8</sup> e no calor liberado na hidratacao<sup>9</sup></u>	8. Alteração na resistência 9. Alteração no calor de hidratação
6	A maior finura acaba gerando <u>um processo de hidratação antecipado<sup>2</sup> aumentando as resistências iniciais do concreto ou argamassa<sup>5</sup></u> que utilizam o material. Assim, há também um <u>maior calor de hidratação gerado nas primeiras idade<sup>10</sup></u> . Naturalmente, a maior finura também acaba gerando <u>maior demanda de água<sup>1</sup></u> na mistura pela maior área superficial	2. Acelera hidratação 5. Aumento na resistência 10. Aumento no calor de hidratação 1. Aumento na demanda de água
8	A maior finura permite <u>algumas vantagens em termos de hidratação<sup>2</sup> e ganho de resistência nas primeiras idades<sup>5</sup></u> , no entanto exige maior <u>controle na dosagem<sup>11</sup></u> , cuidados com reações, <u>calor de hidratação<sup>10</sup>, retração<sup>6</sup></u> , fissuração e deterioração por exposição às diferentes condições de exposição.	2. Acelera hidratação 5. Aumento na resistência 10. Aumento no calor de hidratação 6. Aumento de retração 11. Controle de dosagem
9	<u>Aumento da retração do concreto<sup>6</sup>, obtenção de resistências mais elevadas<sup>5</sup></u> com consumos menores de cimento.	6. Aumento de retração 5. Aumentar resistência
10	<u>maior retração<sup>6</sup>, demanda de agua<sup>1</sup>, perda de consistência<sup>12</sup>, calor de hidratação<sup>10</sup>, etc</u>	6. Aumento de retração 1. Aumento na demanda de água 12. Perda de consistência 10. Alteração no calor de hidratação



11	Uma maior finura, requer uma <u>atualização nos métodos de dosagem</u> <sup>11</sup>	11. Controle de dosagem
12	<u>Maior demanda a/c</u> <sup>1</sup> para mesma trabalhabilidade.	1. Aumento na demanda de água
14	Do ponto de vista técnico <u>permite o ganho de resistência em menos idades</u> <sup>5</sup> , e <u>econômico</u> <sup>13</sup> e <u>ambiental</u> <sup>14</sup> porque <u>reduz a quantidade de cimento</u> <sup>15</sup> numa mistura.	5. Aumento na resistência 13. Redução de custos 14. Redução nas emissões 15. Menor consumo de cimento
16	<u>Melhoria ambiental</u> <sup>14</sup> e <u>redução do consumo de cimento</u> <sup>15</sup> para mesmo desempenho	14. Redução nas emissões 15. Menor consumo de cimento
17	<u>resistências iniciais elevadas</u> <sup>5</sup> com perda de qualidade da matriz cimentícia.	5. Aumento na resistência
	<b>Questão 6: Como utilizar/aplicar cimentos MAIS/MENOS FINOS para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	Deve-se <u>otimizar</u> <sup>1</sup> a "gangorra": <u>redução da relação a/c</u> <sup>2</sup> ; <u>aditivo plastificante</u> <sup>6</sup> ; custo de produção e de manutenção da estrutura.	1. Otimizar dosagem 2. Reduzir relação a/c 6. Uso de aditivos
2	Deve-se ter <u>cuidado com as dosagens</u> <sup>1</sup> , <u>visando reduzir o consumo dos mesmos</u> <sup>3</sup>	1. Otimizar dosagem 3. Reduzir consumo de cimento
3	A durabilidade deve ser almejada por meio de procedimentos de <u>dosagens experimentais baseados em análise de desempenho do concreto</u> <sup>1</sup> , não somente na resistência à compressão. Dificuldade atual: tecnologistas estão preocupados ou dosam concretos para atingir resistência à compressão com menor custo, durabilidade e redução de emissão não são fatores comuns de serem considerados nos processos de dosagem convencionais.	1. Otimizar dosagem
4	Como terá uma maior área de contato terá mais resistência, ou a mesma resistência com menos cimento, então uma forma pode ser avaliar bem o ambiente que a estrutura será construída e <u>colocar menos cimento</u> <sup>3</sup> , ou menos cimento com inibidor de corrosão, ou menos cimento com inibidor de corrosão dentro de LDH,..., ou seja <u>fazer um projeto adequado</u> <sup>4</sup> .	3. Reduzir consumo de cimento 4. Adequação de projeto
5	<u>Combinando a sua aplicação a materiais cimentícios suplementares</u> <sup>5</sup>	5. Uso de adições

6	A durabilidade, de maneira geral, vai depender da porosidade do sistema e da maior ou menor facilidade que esta porosidade gera para a entrada dos agentes agressivos. Assim, é fundamental <u>reduzir a relação a/c<sup>2</sup></u> . Como estes materiais mais finos acabam gerando maior demanda de água para garantir a trabalhabilidade, é fundamental a <u>utilização de aditivos dispersantes<sup>6</sup></u> para garantir um menor volume de pasta e, conseqüentemente, menor deformação lenta, menor calor de hidratação, menor retração e, conseqüentemente, menor nível de fissuração. A redução de emissões só será atingida com o aumento da resistência e a <u>diminuição do volume de cimento<sup>8</sup></u> utilizado na estrutura (não se deve utilizar o metro cúbico de concreto como referência) e dessa forma, reduzimos as emissões globais originadas da fabricação (principalmente cimento), e do transporte das matérias primas.	2. Reduzir relação a/c 6. Uso de aditivos 3. Reduzir consumo de cimento
8	<u>Controle na relação água cimento<sup>2</sup>, com uso de aditivos na dosagem<sup>6</sup>, uso de adições minerais<sup>5</sup>, pozolanas, critérios de projeto<sup>4</sup></u> como cobrimentos adequados, ensaios de agregados, reações expansivos, controle do calor, entre outros.	2. Reduzir relação a/c 6. Uso de aditivos 5. Uso de adições 4. Adequação de projeto
9	<u>Controlar o consumo de água do traço de concreto<sup>2</sup></u> , assim como, <u>intensificar a cura<sup>7</sup></u> do concreto.	2. Reduzir relação a/c 7. Melhorar a cura
10	Os cimentos mais finos são mais reativos... <u>Se dosados de forma adequada<sup>1</sup></u> podem proporcionar aumento de resistência	1. Otimizar dosagem
11	<u>Ajustando o traço de concreto<sup>1</sup></u> , de modo a manter as emissões e garantir a mesma resistência	1. Otimizar dosagem
12	<u>Utilizando aditivos químicos<sup>6</sup></u> para adaptar a reologia, sem o aumento de água no sistema.	6. Uso de aditivos
16	Quanto mais fino, <u>menos cimento por m<sup>3</sup><sup>3</sup></u> para um mesmo fck	3. Redução no uso de cimento
17	Buscando <u>redução de fator a/c<sup>2</sup></u> e <u>cura muito eficiente<sup>7</sup></u> na obra	2. Reduzir relação a/c 7. Melhorar a cura
	<b>Questão 9: Quais as principais mudanças de COMPOSIÇÃO QUÍMICA observadas?</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	<u>Redução de C3S<sup>1</sup> e C2S<sup>2</sup>, bem como resíduo insolúvel<sup>3</sup></u>	1. Redução no teor de C <sub>3</sub> S 2. Redução no teor de C <sub>2</sub> S 3. Redução no teor de Resíduo insolúvel
2	<u>Aumento dos teores de C3S<sup>4</sup> e C2S<sup>5</sup></u>	4. Aumento no teor de C <sub>3</sub> S 5. Aumento no teor de C <sub>2</sub> S
3	<u>Resíduo insolúvel<sup>6</sup> e perda ao fogo<sup>7</sup></u>	6. Mudança no Resíduo Insolúvel 7. Mudança na Perda ao fogo

7	<u>Muitas variações nos teores nos lotes de fabricação</u> <sup>8</sup> .	8. Variações no geral
8	Com o aumento do teor de adições na composição dos cimentos observou -se <u>aumento no teor de perda ao fogo</u> <sup>9</sup> e <u>resíduo insolúvel</u> <sup>10</sup> ;	9. Aumento no teor de perda ao fogo 10. Aumento no teor de resíduo insolúvel
9	<u>Perda ao fogo</u> <sup>7</sup> , <u>CaO livre</u> <sup>11</sup> .	7. Mudança na Perda ao fogo 11. Mudança no CaO livre
10	<u>Menor teor de fases do clínquer</u> <sup>15</sup> e <u>aumento do teor de fases das adições</u> <sup>14</sup>	15. Menor teor de clínquer 14. Aumento no teor de adições
12	Cada indústria possuiu matérias primas específicas, com composições químicas diferenciadas, além disso, a maioria das indústria está fazendo cooprocessamento com diferentes materiais e muitas vezes há, devido ao custo, alteração no tipo de coque, isso gera alterações importantes na composição mineralógica dos clínqueres que irão compor os cimentos, por isso, todos os cimentos brasileiros tem uma flutuação (talvez pouco perceptível ao consumidor final), mas que pode ser verificada quando avaliado (o clínquer) por DRX. As variações principais estão em ter <u>maior ou menor teor de aluminatos</u> , ter ou não C3A cúbico ou ortorrômbico, ter <u>maior ou menor teor de alita</u> <sup>13</sup> , esta ser do tipo M1 ou M3, entre outras variações. Com relação ao teor de adições, sou totalmente positiva quanto ao aumento. E <u>percebo o aumento no teor de filer calcário em todos os cimentos</u> <sup>14</sup> .	12. Variação no teor de aluminatos (C <sub>3</sub> A e C <sub>4</sub> AF) 13. Alteração no teor de C <sub>3</sub> S 14. Aumento no teor de adições
13	A nova norma de cimentos - NBR 16697 - <u> aumentou o teor de filer calcário permito em todos os cimentos e o teor de escória de alto-forno no CP III</u> <sup>14</sup> , com isso, podendo resultar em <u>menor teor de clínquer</u> <sup>15</sup> , em comparação com as normas anteriores.	14. Aumento no teor de adições 15. Menor teor de clínquer
16	<u>Adições minerais tipo filler calcário</u> <sup>14</sup>	14. Aumento no teor de adições
	<b>Questão 10: Como você notou/constatou essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	<u>Ensaio</u> <sup>1</sup>	1. Ensaio
2	Através dos resultados da <u>FRX</u> <sup>1</sup>	1. Ensaio
3	analisando <u>os laudos dos cimentos</u> <sup>2</sup>	2. Levantamento de dados
7	Através de variações de <u>resultados obtidos pelas fábricas</u> <sup>2</sup> e por <u>ensaio em laboratórios</u> <sup>1</sup> .	2. Levantamento de dados 1. Ensaio

8	Novos limites estabelecidos pela norma NBR 16697 de 2018 e <u>realização de ensaios químicos cimento</u> <sup>1</sup> no laboratório da Itaipu	1. Ensaio
9	<u>Relatório de ensaios de cimento</u> <sup>1,2</sup> .	1. Ensaio 2. Levantamento de dados
10	<u>Ensaio</u> <sup>1</sup>	1. Ensaio
12	<u>Pelas pesquisas</u> <sup>2</sup> .	2. Levantamento de dados
13	<u>Nova norma brasileira de cimento</u> <sup>3</sup> .	3. Literatura
16	<u>Texto da nova norma de cimento</u> <sup>3</sup>	3. Literatura
	<b>Questão 11: Na sua opinião, por qual motivo está havendo essa variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA do cimento Portland?</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	A busca pelo desenvolvimento sustentável com <u>redução das emissões de CO<sub>2</sub></u> <sup>1</sup> , custo energético e utilização de <u>matérias primas alternativas</u> <sup>2</sup> .	1. Redução nas emissões 2. Uso de adições
2	<u>Alterações na matéria-prima</u> <sup>3</sup> e processo de <u>moagem</u> <sup>4</sup> (finura)	3. Alterações na matéria prima 4. Alteração na moagem
3	A fábrica tem variado as <u>adições ao cimento de material carbonático e pozolana</u> <sup>2</sup> conforme a sua disponibilidade e o volume de cimento que necessita produzir.	2. Uso de adições
7	Provavelmente em função de maior <u>conhecimento das propriedades dos componentes do cimento</u> através do incremento de resultados de estudos ao longo dos últimos anos. Pode ser, também, em função de <u>escassez de produtos oriundos de lavras (calcário, por exemplo)</u> , de questões ambientais, considerando que a fabricação de cimento por conter parte de resíduos sólidos recicláveis, entre outros.	6. Conhecimento do cimento 7. Escassez de matéria-prima
8	Alinhamento às normas internacionais e sustentabilidade visando <u>diminuir as emissões de CO<sub>2</sub></u> <sup>1</sup> .	1. Redução de emissões
9	<u>Aumento no uso de adições</u> <sup>2</sup> ao cimento.	2. Uso de adições
10	<u>redução de custos de produção</u> <sup>5</sup> e <u>menor emissão de CO<sub>2</sub></u> <sup>1</sup>	5. Reduzir custos de produção 1. Redução de emissões
13	Necessidade de <u>reduzir o teor de clínquer</u> <sup>1</sup> , devido à pressão ambiental.	1. Redução de emissões
16	Para <u>reduzir custos aos fabricantes</u> <sup>5</sup>	5. Reduzir custos de produção
	<b>Questão 12: Quais as implicações desta variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA na utilização do cimento Portland? (Caso julgar pertinente, fale sobre pontos de</b>	<b>Palavras-chave</b>

	<b>vista técnico, econômico e ambiental)</b>	
1	A longo prazo não vejo problema. A dificuldade, ao meu ver, está na <u>resposta dos compostos em idades pequenas - 28 dias</u> <sup>1</sup> .	1. Alteração na reatividade
2	<u>Aumento das resistências</u> <sup>2</sup>	2. Aumento na resistência
3	Variações na composição química afetam o <u>desenvolvimento de resistência mecânica ao longo do tempo</u> <sup>9</sup> , <u>a durabilidade</u> <sup>3</sup> , as características do concreto no <u>estado fresco</u> <sup>4</sup> , ou seja, todas as propriedades do concreto. Não é possível se prever o comportamento de um concreto com a variação na composição química do cimento, e conseqüentemente, estes efeitos trarão conseqüências econômicas e ambientais, pois poderão gerar <u>aumento no consumo de cimento</u> <sup>5</sup> e/ou constituintes do concreto, estruturas com menor vida útil, entre outros.	9. Alteração na resistência 3. Alteração na durabilidade 4. Alteração no estado fresco 5. Aumento no consumo de cimento
7	Esta variação pode (e vai) <u>alterar algumas propriedades</u> <sup>6</sup> importantes dos produtos produzidos com cimento. Desta forma, estudos serão necessários para a avaliação dessas implicações.	6. Alteração das propriedades
8	As alterações permitem de especificações com características adequadas às diferentes aplicações, com <u>redução de custos</u> <sup>7</sup> , <u>emissões</u> <sup>8</sup> e de acordo aos requisitos do Roadmap Brazil 2050.	7. Redução de custos 8. Redução de emissões
9	<u>Econômico</u> <sup>6</sup> .	7. Redução de custos
10	<u>Altera a maior parte das propriedades</u>	6. Alteração das propriedades
12	O <u>maior impacto é na reatividade do clínquer</u> , que irá compor os diversos cimentos do mercado. Isso irá afetar tudo, desde otimização de sulfatos, interação com aditivos químicos, <u>propriedades no estado fresco e endurecido em primeiras idades</u> <sup>6</sup> . Em termos econômicos e ambientais, se pouco reativo em primeiras idades, limitaria o uso de maior quantidade de substituições de clínquer.	1. Alteração na reatividade 6. Alteração das propriedades
16	<u>Maior variabilidade das propriedades mecânicas</u> <sup>9</sup> e <u>maior profundidade de carbonatação</u> <sup>10</sup>	9. Alteração na resistência 10. Intensifica carbonatação
	<b>Questão 13: Como utilizar/aplicar cimentos com variação na COMPOSIÇÃO QUÍMICA para produção de estruturas duráveis e menos emissivas?</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	Talvez, repensar a idade base para os projetos estruturais, ou <u>replanejar/delimitar os requisitos da NBR 16697</u> <sup>6</sup>	6. Replanejar a normativa
2	A <u>dosagem é um aspecto fundamental</u> <sup>1</sup> , otimizando o consumo de cimento para uma dada resistência desejada	1. Otimizar dosagem
3	<u>Não tem como</u> <sup>2</sup> .	2. Não apresenta resposta

7	<u>Deve-se realizar uma quantidade maior de ensaios de laboratório e verificar os impactos das variações<sup>2</sup>.</u> A partir daí determinar o material que se vai utilizar na produção de estruturas.	2. Não apresenta resposta
8	Por meio de especificação/ <u>uso de cimentos adequados<sup>3</sup></u> para as diversas condições condições de exposição das estruturas.	3. Uso de cimentos adequados
9	<u>Controle da água do traço<sup>1</sup></u> , e uma <u>melhor cura ao concreto<sup>4</sup></u> .	1. Otimizar dosagem 4. Controlar a cura
10	<u>Dosando de forma adequada<sup>1</sup></u>	1. Otimizar dosagem
12	<u>Conhecendo a composição e se adaptando a ela<sup>5</sup></u>	5. Adaptação às mudanças
13	<u>Dosagem adequada<sup>1</sup></u> , estudo da composição granulometria dos materiais finos, cuidados na execução (cobrimento adequado), etc.	1. Otimizar dosagem
16	<u>Quanto mais alto o fck, menor a/c e mais eficiente o concreto estrutural em MPa/kg<sup>1</sup></u>	1. Otimizar dosagem
	<b>Questão 14.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 14</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	O acesso às normas ficou facilitado, pois incluí todos os tipos de cimento em uma única. As poucas alterações eram necessárias, porém insuficientes.	-
2	Essa unificação foi interessante, desde que o projetista tenha critérios claros para a adequada utilização no projeto e o tecnologista de concreto admira conhecimento para a melhor escolha no que se refere à dosagem	-
3	Com a alteração da norma foi permitido a redução do teor de clínquer de alguns tipos de cimento o que <u>afeta o desenvolvimento de resistência.</u>	1. Afeta a resistência
4	O problema <u>não é a resistência à compressão<sup>2</sup></u> e sim a durabilidade, pelo menos na minha área de atuação.	2. Não afeta significativamente
6	<u>Não vejo nada de muito significativo<sup>2</sup></u> nesse sentido.	2. Não afeta significativamente
7	<u>Não houve alteração significativa<sup>2</sup>.</u>	2. Não afeta significativamente
8	Trouxe alterações voltadas as necessidades de uso do cimento, mas <u>em termos de características mecânicas não apresentaram alterações significativas<sup>2</sup></u> , como na resistência a compressão aos 28 dias.	2. Não afeta significativamente
9	Nos <u>cimentos que utilizamos não houve mudança significativa<sup>2</sup></u> com a alteração da norma quanto ao quesito resistência do concreto.	2. Não afeta significativamente
10	<u>Temos que pensar em relação água/aglomerante<sup>3</sup></u>	3. Considerar relação água/cimento

11	A <u>resistência do cimento tem significativamente aumentado</u> <sup>4</sup>	4. Aumento na resistência
12	Achei importante aumentarem os teores de adições, isso vai de encontro com a prática internacional defendida academicamente e adotada por muitas indústrias (quando as normas dos países permitem).	-
13	Na nova norma <u>não houve alterações nos requisitos de desempenho, representados pelos valores de resistência à compressão</u> <sup>2</sup> .	2. Não afeta significativamente
14	Ache que auxilia no entendimento das propriedades dos tipos de cimento e consolida as informações num só documento.	-
16	Os fabricantes estão induzindo o meio técnico de que todos os cimentos são iguais.	-
17	<u>é possível manter ou melhorar a resistência</u> <sup>4</sup> aplicando as técnicas adequadas	4. Aumento na resistência
	<b>Questão 15.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 15</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	A durabilidade das estruturas de concreto é fundamental, em todos os sentidos. Desde os atendimentos dos requisitos de projeto, até o desempenho final da mesma. Porém, a NBR 16697 <u>não contempla exclusivamente o requisito de durabilidade</u> <sup>1</sup>	1. Não está bem definido
2	Todos os aspectos devem ser integrados. Contudo, <u>uma parte da cadeia produtiva ainda não está familiarizada com esse aspecto</u> <sup>1</sup> .	2. Desconhecimento dos usuários
3	Semelhante ao comentário anterior. Redução de clínquer em cimento, dá a impressão que estaremos sendo favorável a durabilidade dos concreto, contudo se a dosagem nos levar a elevados consumos de cimento e/ou se a redução do clínquer for baseada na incorporação de materiais que poderão causar reações indesejáveis, pode-se prejudicar a durabilidade. O grande problema da alteração na nova norma é que os <u>usuários do cimento Portland desconhecem a consequência das alterações ocorridas</u> <sup>2</sup> . O conhecimento destas consequências está somente na academia.	2. Desconhecimento dos usuários
4	O engenheiro precisa ter conhecimento e responsabilidade, não necessariamente precisa ter uma alteração normativa.	-

6	Creio que o fato de os cimentos estarem especificados em um mesmo documento ajuda no estabelecimento de especificações de concretos mais adequadas no que diz respeito à <u>escolha do ligante mais adequado</u> <sup>3</sup> como, por exemplo, os RS. Isto pode contribuir para melhores condições futuras das estruturas. Além disso, há agora a possibilidade de especificação de um cimento BC (de baixo calor de hidratação), o que é particularmente importante para a garantia de integridade de elementos de maior volume.	3. Escolha do cimento adequado
7	<u>Não houve alteração significativa</u> <sup>4</sup> .	4. Não houve alteração
8	Os diferentes tipos e composições, com limites maiores de adições permitem obter <u>cimentos com desempenho adequado que, usados corretamente</u> <sup>3</sup> , resultam em maior durabilidade das estruturas.	3. Escolha do cimento adequado
9	Os concretos produzidos com cimentos mais finos exigem um cuidado maior por parte da obra quanto a execução da cura, atividade esta que nem sempre recebe grande atenção por parte dos construtores.	-
10	Temos <u>que pensar em relação água/aglomerante</u> <sup>5</sup>	5. Considerar relação a/c
11	Com as alterações nas normas, <u>aspectos relacionados a durabilidade vêm sendo inseridos</u> <sup>1</sup> de modo a dar subsídio na análise deste item	1. Não está bem definido
12	<u>Se bem feita a proporção entre adições e composição do clínquer, pode-se conseguir estruturas de concretos mais duráveis</u> <sup>3</sup> . O que é necessário difundir é qual tipo de cimento (com determinadas adições) são mais adequados para cada condição de exposição. Também, melhorar o entendimento do engenheiro/empresas concreteiras, sobre a importância da baixa relação a/c e da manutenção do espalhamento/abatimento com aditivos químicos.	3. Escolha do cimento adequado
13	Dependendo do tipo de cimento e teor de adição, a reserva alcalina poderá ser reduzida.	-
14	Acho que a revisão estabeleceu novos limites para a composição <u>com impactos direto pra maior durabilidade das estruturas</u> <sup>6</sup> .	6. Há melhora na durabilidade
16	Acaba tendo <u>problema quem não estuda e não domina a tecnologia de concreto, que infelizmente é a maioria</u> <sup>2</sup>	2. Desconhecimento dos usuários
17	como dito anteriormente, uma das consequência é piora da matriz cimentícia.	-
	<b>Questão 16.1: INSIRA COMENTÁRIO PARA A QUESTÃO 16</b>	<b>Palavras-chave</b>
1	Explicitamente a norma não faz qualquer menção. Porém, a incorporação e <u>as alterações de forma intrínseca concorrem para a redução da emissão</u> <sup>1</sup> .	1. Redução nas emissões



2	Os cimentos brasileiros são muito bons., comparados com a média mundial. <u>As fábricas vêm atualizando seus processos produtivos continuamente</u> <sup>2</sup> , visando minimizar a geração de CO2 na fabricação, mas que ainda é elevada.	2. Necessário otimizar produção
3	Justifica-se a alteração da norma, a redução do clínquer nos cimentos, como uma alternativa para redução das emissões de CO2. Porém, <u>devia-se buscar a redução de CO2 na produção do clínquer</u> <sup>2</sup> e não aumentar o teor de material inerte no cimento para atingir este objetivo. Ou seja, continuamos emitindo a mesma quantidade de CO2 para produzir o clínquer necessário aos nossos cimentos. Só estamos prejudicando a qualidade dos nossos cimentos, aumentando a variabilidade de produção do cimento pelo aumento no teor das adições. Considero qualquer alteração de norma que objetiva modificar a composição dos cimentos extremamente relevante para quaisquer critério analisado: resistência mecânica, durabilidade, emissões, isto porque há uma grande dificuldade desta informação sobre a alteração da norma e o que as fábricas de cimento estão adotando na produção dos seus produtos chegar até os tecnólogos/engenheiros que utilizam e especificam os cimentos. Infelizmente ainda comercializamos e especificamos cimento por marca e nomes genéricos.	2. Necessário otimizar produção
4	Precisa sim ter um plano e metas, mas não sei se existe a necessidade de alteração normativa. [Habert, G., Miller, S.A., John, V.M. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nat Rev Earth Environ (2020); Miller, S.A., Moore, F.C. Climate and health damages from global concrete production. Nat. Clim. Chang. 10, 439–443 (2020)].	-
6	<u>Não vejo nada de muito significativo nesse sentido</u> <sup>3</sup> .	3. Não afeta
7	<u>Buscou um alinhamento com padrões normativos internacionais</u> <sup>1</sup> .	1. Redução nas emissões
8	Os maiores limites para uso de adições está alinhada aos requisitos de sustentabilidade, como exemplo o <u>aumento dos limites do teor de filer calcário, relativo à diminuição de emissões de CO2</u> <sup>1</sup> .	1. Redução nas emissões
9	No Rio Grande do Sul é prática corrente utilizar a adição de cinza leve aos traços de concreto, principalmente em cimentos mais "puros" permitindo assim, uma redução no consumo de cimento, e em razão da alteração de alguns cimentos, esta prática foi reduzida e em alguns casos não ocorre mais, aumentando desta maneira o consumo de cimento, e por consequência <u>a redução de emissões de dióxido de carbono (CO2) tão pregada por parte das cimenteiras não ocorreu</u> <sup>3</sup> .	3. Não afeta
10	<u>certamente reduziu a emissão de CO2</u> <sup>1</sup>	1. Redução nas emissões
11	Com as <u>modificações na produção dos materiais cimentícios</u> <sup>2</sup> , espera-se que uma melhora na qualidade do cimento reduza o seu consumo, possibilitando a redução das emissões de CO2	2. Necessário otimizar produção

12	Fundamental a redução do fator clínquer em todos os cimentos, quanto menor, melhor, <u>uma boa dosagem dos materiais na produção dos cimentos é fundamental para conquistar o menor impacto ambiental das misturas com tais cimentos<sup>1</sup>.</u>	1. Redução nas emissões
13	<u>A redução do teor de clínquer resulta em reduções nas emissões de CO<sub>2</sub><sup>1</sup>,</u> contribuindo para a sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento Portland.	1. Redução nas emissões
16	Dependerá muito de quem usa o faz estudo de dosagem do concreto. Uma minoria.	-