



Marlos Romero Alves

**O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto forno na
hidratação do cimento Portland**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro

Abril de 2024



Marlos Romero Alves

**O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto forno na
hidratação do cimento Portland**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Flávio de Andrade Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

CEFET-MG

Prof. Renan Picolo Salvador

Universidade São Judas Tadeu-SP

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marlos Romero Alves

Graduado em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário UNA, em 2013. Principais áreas de interesse: Estruturas de Concreto, materiais não convencionais, materiais compósitos.

Ficha Catalográfica

Alves, Marlos Romero

O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto forno na hidratação do cimento Portland / Marlos Romero Alves; orientador: Flávio de Andrade Silva; – 2024.

73 f.: il. Color.; 30cm.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil e Ambiental – Teses. 2. Escória. 3. Cimento. 4. Hidratação. 5. Resistência à compressão. 6. Ativador alcalino I. Silva, Flávio de Andrade. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço à Jesus Cristo que me fortaleceu e me guiou até aqui, nos momentos mais difíceis dessa jornada, Ele esteve comigo, a minha esposa Vivian Patricio Paiva e meus filhos Matheus Paiva Alves e Ana Clara Paiva Alves que sempre acreditaram nesse projeto e nos momentos em que pensei em desistir eles estavam lá para me incentivar a ir a frente.

Aos meus pais Maria de Bethania Romero Alves e Misael Alves que me proporcionaram a base sólida tanto de caráter como de ensino para chegar até aqui.

A minha saudosa sogra Clides Ondina Patricio que foi um porto seguro e incentivadora em todos os momentos, que Jesus te guarde junto a Ele.

Ao meu orientador, Flávio de Andrade Silva, por ter aceitado minhas ideias e me orientado desde o início, por todo esclarecimento e direcionamento, pelo incentivo, que sempre me desafiaram a querer mais.

Aos meus grandes amigos, que desde o início, se tornaram companheiros, Diogo Faria, que me apresentou a porta de entrada ao mestrado, Luana Pereira Fonseca Martins que foi mais que uma secretária, foi uma grande amiga, companheira e fundamental para que eu não desistisse e Felipe Rodrigues de Souza, que me mostrou os caminhos da academia, minha imensurável gratidão pelos ensinamentos. Aos Professores da PUC-Rio pelo compartilhamento de conhecimento e experiências.

Aos meus amigos da Votorantim Cimentos que foram fundamentais nessa jornada, Eliezer Laister e Décio Tomé e todos outros que, de alguma maneira, participaram desta caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

ROMERO ALVES, Marlos; DE ANDRADE SILVA, Flávio (Orientador). **O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto forno na hidratação do cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2024. 73p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos químicos, físicos e mecânicos de altas dosagens de escória granulada de alto forno (85%) como adição em cimentos Portland. Foram feitas quatro amostras, sendo uma do cimento padrão referência conhecido como CP IND e com as dosagens de adição de escória, com 60% de adição de escória (usual do mercado), 85% de escória sem aditivo (branco) e 85% de escória com 7,5% de aditivo ativador (Metassilicato de Sódio Anidro). Os materiais foram caracterizados quanto sua composição química, área superficial e granulometria por ensaios de Fluorescência, Blaine e granulometria laser. Para investigar a formação das fases foram realizadas análises de difratometria de raios-x (DRX) e calorimetria. Finalmente, os cimentos hidratados foram ensaiados em compressão uniaxial para as idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias para medir a resistência à compressão na argamassa padrão de cimento pelo método de argamassa padrão, e em 1, 7 e 28 dias em concreto. O uso desse ativador garantiu a reserva alcalina, elevando a precipitação de produtos de hidratação. As misturas ativadas com 85% de escória apresentaram resultados de resistência à compressão satisfatórios para cimentos Portland Classe de resistência 25 MPa. O cimento com 85% de adição de escória ativado com metassilicato de sódio anidro apresentou um desempenho, na argamassa padrão de cimento, na idade de 1 dia, mais de 4 vezes superior quando comparado ao cimento com 85% de adição de escória sem ativador. Esse desempenho foi diminuindo à medida que hidratação evolui, quando se esperava ao contrário, demonstrando que o percentual utilizado e a granulometria do ativador podem não ter sido a mais adequada, havendo a necessidade de um estudo mais aprofundado tanto nessa relação quanto na verificação da porosidade das misturas.

Palavras-chave:

Escória, cimento, hidratação, resistência a compressão.

Abstract

ROMERO ALVES, Marlos; DE ANDRADE SILVA, Flávio (Advisor). **The effect of high dosage of slag in the Portland cement hydration.** Rio de Janeiro, 2024. 73p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work investigates the chemical, physical and mechanical effects of high dosages of granulated blast furnace slag (85%) as an addition to Portland cements. Four samples were made, one of the reference standard cement known as CP IND and with the slag addition dosages, with 60% slag addition (usual on the market), 85% slag without additive (white) and 85% slag with 7.5% activating additive (Anhydrous Sodium Metasilicate). The materials were characterized regarding their chemical composition, surface area and particle size by Fluorescence, Blaine and laser particle size tests. To investigate the formation of the phases, x-ray diffractometry (XRD) and calorimetry analyzes were carried out. Finally, the hydrated cements were tested in uniaxial compression at ages of 1, 3, 7, 28 and 91 days to measure the compressive strength in the cement paste, and at 1, 7 and 28 days in concrete. The use of this activator guaranteed the alkaline reserve, increasing the precipitation of hydration products. The mixtures activated with 85% slag presented satisfactory compressive strength results for Portland cements Strength Class 25 MPa. The cement with 85% addition of slag activated with anhydrous sodium metasilicate presented a performance, in the cement paste, at the age of 1 day, more than 4 times higher when compared to cement with 85% slag addition without activator. This performance decreased as hydration progressed, when the opposite was expected, demonstrating that the percentage used and the granulometry of the activator may not have been the most appropriate, with the need for a more in-depth study both in this relationship and in the verification of the porosity of the mixtures.

Keywords:

Slag, cement, hydration, compressive strength.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Estrutura da Dissertação	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Indústria Cimenteira	18
2.1.1	Processo produtivo e mineralogia do clínquer.....	19
2.1.2	Processo produtivo e tipos de cimentos.....	22
2.1.3	Hidratação do Cimento Portland	24
2.1.4	Adições minerais e classificação	25
2.1.5	Escória de alto forno.....	26
2.1.6	Características químicas e físicas da escória de alto forno.....	27
2.1.7	Ativadores.....	29
2.2	Hidratação e comportamento mecânico de materiais cimentícios com elevada adição de escória de alto forno	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Materiais Utilizados.....	33
3.1.1	Cimento.....	33
3.1.2	Escória granulada de alto forno	35
3.1.3	Aditivo ativador de escória.....	36
3.1.4	Areias padrão IPT	37
3.1.5	Agregados	38
3.1.6	Aditivo	40
3.1.7	Procedimento de Mistura e Composição do Traço de Concreto	40
3.2	Métodos de Ensaios	42

3.2.1	Fluorescência de raios-x	42
3.2.2	Difração de raios-x	43
3.2.3	Granulometria à Laser	44
3.2.4	Resistência à compressão uniaxial.....	45
3.2.5	Calorimetria	50
3.2.6	Ensaio de Caracterização de Concreto	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	Resistência à Compressão Uniaxial em Argamassa Padrão de Cimento.....	54
4.2	Resistência à Compressão Uniaxial em Concreto.....	57
4.3	Granulometria a Laser Comparativa	62
4.4	Calorimetria	63
5	CONCLUSÃO.....	65
6	RECOMENDAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	66
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Produção do clínquer (Votorantim Cimentos, 1999)

Figura 2.2 – Principais fases do clínquer (GIROTTTO, 2018)

Figura 2.3 – Cristais de alita (TENÓRIO, 2003)

Figura 2.4 – Cristais de belita (GOBBO, 2003)

Figura 2.5 – Grão de clínquer de cimento Portland (GIROTTTO, 2018)

Figura 2.6 – Processo de produção de cimento (IEA/WBCSD, 2018).

Figura 2.7 – Representação esquemática da liberação de calor (A) estágios da hidratação (B). (TAYLOR, 1997 e SANDBERG, 2008).

Figura 2.8 – Processo produtivo em alto forno (NEHRING et. al., 2021).

Figura 3.1 – DRX do cimento anidro método de refinamento Rietveld

Figura 3.2 – Pátio de escória.

Figura 3.3 – DRX da escória moída de alto forno

Figura 3.4 – Agregados para traços de concreto.

Figura 3.5 – Curva granulométrica Areia Natural Média.

Figura 3.6 – Curva granulométrica Areia Artificial Britada

Figura 3.7 – Curva granulométrica –Brita 1.

Figura 3.8 – Espectrômetro de Fluorescência de raio-x

Figura 3.9 – Pérola correta

Figura 3.10 – Pérolas incorretas

Figura 3.11 – Difrator de raio-X.

Figura 3.12 – Compactação do material com a chapa metálica (VOTORANTIM, 2024).

Figura 3.13 – Analisador de tamanho de partícula por difração a laser.

Figura 3.14 – Bancada de mistura de pasta de cimento

Figura 3.15 – Misturador planetário

Figura 3.16 – Capela de preparo dos corpos de prova.

Figura 3.17 – Corpos de prova

Figura 3.18 – Tanque de imersão

Figura 3.19 – Máquina de compressão uniaxial

Figura 3.20 – Mistura da amostra para ensaio de calorimetria

Figura 3.21 – Canais do calorímetro

Figura 3.22 – Molde metálico, haste de compactação e placa base

Figura 4.1 – Análise granulométrica a laser comparativa.

Figura 4.2 – Curvas de calorimetria isotérmicas

Figura 4.3 – Curva de calor acumulado em Joules

Figura 4.4 – Resistência à compressão uniaxial argamassa padrão de cimento

Figura 4.5 – Taxa de crescimento entre misturas argamassa padrão de cimento.

Figura 4.6 – Resistência à compressão uniaxial concreto.

Figura 4.7 – Taxa de crescimento entre misturas concreto

Figura 4.8 – Slump Test concreto com 60% de EMO.

Figura 4.9 – Slump Test concreto com 85% de EMO.

Figura 4.10 – Slump Test concreto com 85% de EMO com 7,5% de ativador

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Principais compostos do Cimento Portland (NEVILLE, 2015).

Tabela 2.2 – Requisitos de resistências à compressão (adaptado de NBR 16697, 2018).

Tabela 2.3 – Classificação Cimento Portland (NBR 16697, 2018).

Tabela 2.4 – Composição química das escórias brasileiras (KELLES, 2011)

Tabela 3.1 – Composição química do cimento CP IND (VOTORANTIM, 2023).

Tabela 3.21 – Ensaio químicos do cimento padrão (VOTORANTIM, 2023).

Tabela 3.32 – Dados de ensaios físicos do cimento padrão (VOTORANTIM, 2023).

Tabela 3.43 – Composição química da Escória

Tabela 3.5 – Ensaio químicos da Escória

Tabela 3.6 – Composição química do Metassilicato Anidro

Tabela 3.74 – Ensaio físico-químicos do Metassilicato Anidro

Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica da areia normal (IPT, 2023)

Tabela 3.9 – Composição dos traços utilizados para cada um dos cimentos
(valores em kg/m³)

Tabela 3.10 – Quantidade de material por batelada (IPT, 2023)

Tabela 3.11 – Tolerâncias de ruptura por idade (NBR 7215, 2019)

Tabela 4.1 – Resistência a compressão uniaxial por idades – argamassa padrão de cimento

Tabela 4.2 – Resistência a compressão uniaxial por idades – concreto

“E assim com confiança ousemos dizer: O Senhor é o meu ajudador, e não
temerei O que me possa fazer o homem.”

Hebreus 13:6

1 INTRODUÇÃO

Devido à contínua expansão das economias globais e o alto déficit habitacional, a demanda por cimento aumentará em torno de 80% até 2030, estimando-se um acréscimo de aproximadamente 100 milhões de toneladas até 2030 (SNIC, 2019). De encontro com essa demanda, há uma crescente pressão sobre a indústria para adoção de métodos mais sustentáveis sob uma perspectiva ambiental e de redução de emissões de CO₂. Essas práticas visam reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar o agravamento dos impactos ambientais paralelamente ao aumento na demanda por cimento. A implementação de concreto de baixo consumo de cimento (CBCC) se destaca como uma abordagem eficaz nesse contexto, fundamentalmente no que se aplica a utilização de materiais cimentícios suplementares (YOUSUFA, et al., 2019).

A tendência aponta para um incremento na incorporação de materiais cimentícios suplementares e uma diminuição no uso de cimento Portland nos concretos do futuro. Tal substituição apresenta vantagens econômicas e técnicas. No entanto, é importante considerar que a resistência à compressão nos estágios iniciais de cura pode ser comprometida. Isso se deve à redução notável das propriedades cimentantes, decorrente da considerável diminuição no consumo de clínquer na matriz cimentícia.

Esses materiais incluem cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa, argilas calcinadas e pozolanas naturais (PELISSER, et al., 2017).

A escória proveniente de altos-fornos é um subproduto resultante da fabricação do ferro-gusa, cujas propriedades cimentícias derivam dos fundentes incorporados à mistura. A qualidade química desse material está intrinsecamente ligada à qualidade do minério de ferro, ao tipo de combustível empregado, ao ativador utilizado e à sua viscosidade (KELES, 2011).

Segundo o Instituto Aço Brasil (IABr), em 2023, o Brasil gerou 10 milhões de toneladas de escória de alto-forno e 4 milhões de toneladas de escória de aciaria, contribuindo para a produção de 32 milhões de toneladas de aço bruto (BRASIL MINERAL, 2024).

As propriedades essenciais das escórias estão diretamente relacionadas à hidraulicidade, que é a capacidade de alguns de seus óxidos reagirem em meio

saturado, formando sais insolúveis e estáveis. Essa hidraulicidade depende da composição química das escórias e, principalmente, do método de resfriamento, seja no estado sólido vítreo resfriado rapidamente ou no estado sólido cristalino resfriado de forma mais lenta e de sua granulometria (ALHADAS, 2008).

As escórias vítreas mantêm as características hidráulicas desejadas na indústria cimenteira, uma vez que são termodinamicamente instáveis e hidraulicamente latentes, podendo ser ativadas de duas formas, quimicamente e fisicamente. Quimicamente com o uso de ativadores alcalinos que aumentam o pH da solução e fisicamente pela variação da sua granulometria. Em contrapartida, as escórias cristalinas, que são resfriadas de maneira mais lenta, carecem de propriedades hidráulicas e, em sua maioria, são termodinamicamente estáveis, agindo como agregados inertes. Elas são classificadas como classe 3 pela NBR10004, que trata de materiais inertes (ABNT, 2004).

Nas últimas décadas, o aumento da consciência ambiental e das políticas governamentais voltadas para a preservação do meio ambiente tem gerado novas abordagens em relação à reciclagem de resíduos e à redução da geração de detritos industriais (ALHADAS, 2008). A crescente industrialização tem acarretado uma degradação ambiental significativa, resultante da contaminação provocada pela disposição indiscriminada de rejeitos industriais na natureza. Um dos principais desafios é estabelecer métodos para a destinação e aproveitamento desses resíduos (KELES, 2011).

A indústria da construção civil consome uma parcela substancial dos recursos naturais, representando entre 15% e 50% de todo o consumo industrial. Isso a torna um potencial utilizador de subprodutos e resíduos provenientes de outras indústrias, como a siderurgia (AMORIM, 2000). A reciclagem e incorporação de subprodutos industriais como aditivos ao cimento Portland não apenas economizam energia e preserva recursos naturais, mas também oferece vantagens técnicas pela inclusão desses materiais. Segundo De Ornelas (2021), a aplicação da escória pode reduzir em aproximadamente 5% a emissão de CO₂ na produção de cimento e concreto.

Os cimentos fabricados com a adição de escória de alto-forno apresentam propriedades altamente benéficas para a produção de concreto, frequentemente resultando em melhorias em várias características dos materiais cimentícios. Atualmente, algumas empresas de produção de concreto no Brasil estão diretamente incorporando escória de alto-forno na produção de concreto. Os concretos fabricados

com a adição de escória de alto-forno trazem diversas vantagens, incluindo uma maior trabalhabilidade do concreto fresco, liberação de calor mais gradual e redução do risco de reação álcali-sílica (ALHADAS, 2008).

Este estudo avaliou o impacto da resistência a compressão e hidratação da incorporação de 85% escórias com alcalinidade sem ativador nas propriedades da pasta de cimento e do concreto.

1.1 Motivação

Essa pesquisa pretende abordar sistematicamente a redução do consumo de clínquer com o uso cada vez mais alto de materiais cimentícios alternativos. A incorporação de altas adições da escória de alto forno na produção de cimento Portland pode diminuir gradativamente a geração de CO₂, pois a produção de cimento é atualmente uma das grandes geradoras desse gás de efeito estufa. Outro ponto relevante é que, devido ao elevado consumo de cimento, existe a necessidade da diminuição dos custos de produção, e com o uso cada vez maior de materiais cimentícios alternativos como a escória moída de alto forno, esse objetivo pode ser alcançado, pois trata-se de um produto com custo por tonelada menor que o clínquer puro reduzindo significativamente o custo final por tonelada do cimento Portland atual.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar os efeitos químicos, físicos e mecânicos de altas dosagens de escória granulada de alto forno como adição em cimentos Portland e propor uma medida para aumentar a ativação da escória e por conseguinte manter as resistências iniciais as mais próximas das resistências quando comparado ao cimento com 60% de escória sem ativador.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os cimentos sem adição de escória e com 60 e 85% de adição de escória quanto à área superficial e granulometria;
- Analisar a formação dos hidratos através de técnicas como difratometria de raios-x (DRX) e calorimetria;
- Avaliar a resistência à compressão uniaxial dos cimentos hidratados com e sem a adição de escória e aditivos ativadores de escória nos intervalos de 1, 3, 7, 28 e 91 dias;
- Avaliar a resistência à compressão uniaxial dos concretos utilizando os cimentos com a adição de escória e com e sem ativadores de escória nos intervalos de 1, 7 e 28 dias;

1.3 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 1 apresenta a Introdução, Motivação e Objetivos da pesquisa;

O Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, onde serão abordados todos os tópicos que embasarão o desenvolvimento do estudo proposto;

O Capítulo 3 apresenta os Materiais utilizados na condução do estudo, bem como os procedimentos e aspectos metodológicos para tal;

O Capítulo 4 apresenta os Resultados e as Discussões sobre os ensaios realizados;

O Capítulo 5 apresenta as Conclusões obtidas através do estudo

O Capítulo 6 possíveis sugestões para aplicação e desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria Cimenteira

O Cimento Portland é um agente ligante hidráulico produzido através da moagem do clínquer e mistura com sulfato de cálcio (gipsita) e adições minerais, manifestando-se como um pó fino de tonalidade acinzentada, apresentando características ligantes e coesivas. A nível global, é reconhecido simplesmente como cimento e solidifica mediante a ação da água, processo conhecido como hidratação, resultando na formação de uma matriz sólida e resistente (BAUER, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O termo "Cimento Portland" deriva devido à similaridade entre a cor do cimento hidratado e um tipo de calcário denominado "pedra Portland", extraído da região de Dorset, na Inglaterra (BAUER, 2008). A palavra "cimento" tem suas raízes no latim "caementu", utilizado na antiga Roma para designar uma variedade de pedra natural proveniente de rochas não esquadrejadas. A história do cimento remonta há cerca de 4.500 anos (BATTAGIN, 2012).

A indústria de cimento é responsável por cerca de 10% das emissões de CO₂ e segundo projeções pode atingir 30% em 2050 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). O processo de clínquerização queima combustíveis fósseis, sendo o método mais utilizado para fornecer calor para a mistura. Essa queima representa aproximadamente de 40 a 50% das emissões geradas pela indústria cimenteira; além disso, o calcário se decompõe após o aquecimento ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), representando aproximadamente entre 50 e 60% das emissões restantes (VAN DEN HEEDÉ; DE BELIE, 2012). A produção de cimento sozinha representa de 5 a 7% das emissões globais de CO₂ (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2005).

2.1.1 Processo produtivo e mineralogia do clínquer

A produção do clínquer, apresentada na Figura 2.1, é resultado da mistura e clinquerização, a aproximadamente 1450°C em fornos rotativos, das matérias primas calcário (CaCO_3), argilas, minério de ferro e sílica (BELIZARIO-SILVA, 2022).



Figura 2.1 – Produção do clínquer (Votorantim Cimentos, 1999).

A mineralogia básica do clínquer é composto por quatro minérios principais, o silicato tricálcico (alita), o silicato dicálcico (belita), o aluminato tricálcico e o ferroaluminato tetracálcico. Na Tabela 2.1 estão descritas as composições e nomenclaturas desses minerais (COSTA, 2011) e figura 2.2 mostra as principais fases do clínquer.

Tabela 2.1 – Principais compostos do Cimento Portland (NEVILLE, 2015).

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

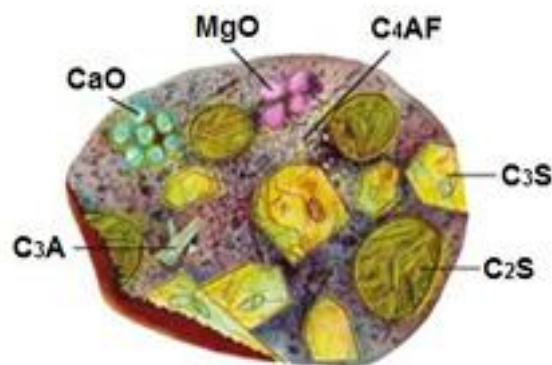


Figura 2.2 - Principais fases do clínquer (GIROTTTO, 2018)

2.1.1.1 Silicato tricálcico (C₃S), Alita

O silicato tricálcico (C₃S) é o principal composto do clínquer, e tem participação entre 40 e 70% na sua composição, com importante papel na resistência mecânica do cimento após hidratação e cura (CHOTOLI, 2006).

Segundo Tenório (2003) o C₃S começa a se formar na temperatura aproximada de 1400°C, subindo lentamente até atingir 1500°C. A presença de Al₂O₃ e Fe₂O₃ forma o aparecimento da fase líquida, com a fusão das fases C₃A e C₄AF, a aproximadamente 1300°C. A presença da fase líquida acelera a difusão de íons em direção ao C₂S, favorecendo a formação do C₃S. O resfriamento brusco do clínquer impede que o C₃S, fase metaestável, migre e se dissocie voltando a formar o C₂S, fase energeticamente mais estável. A figura 2.3 mostra os cristais azulados de alita.

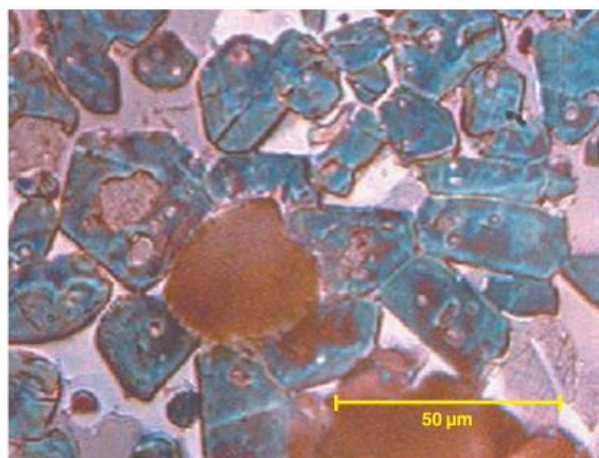


Figura 2.3 – Cristais de alita (TENÓRIO, 2003)

2.1.1.2 Silicato dicálcico (C_2S), Belita

Segundo Chotoli (2006) o silicato dicálcico (C_2S) ou belita constitui 15-30% do clínquer de cimento Portland, possui cinética de hidratação lenta, bem como, baixo calor de hidratação liberado, contribui de forma mais significativa para o desenvolvimento da resistência mecânica em longas idades, de 28 dias em diante. A figura 2.4 apresenta os cristais de belita na cor alaranjada.

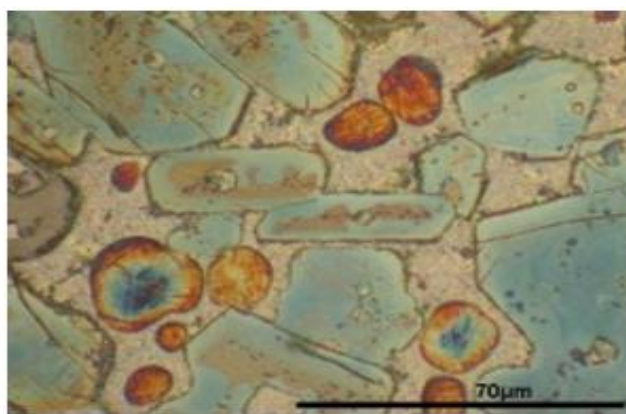


Figura 2.4 – Cristais de belita (GOBBO, 2003)

2.1.1.3 Aluminato tricálcico (C_3A)

Aluminato tricálcico, possui cinética de hidratação rápida, elevado calor de hidratação liberado quando em contato com a água, responsável por controlar a pega inicial e o endurecimento da pasta, e responsável pela baixa resistência ao ataque de sulfatos.

A Figura 2.5 mostra a área de uma cessão polida de um grão de clínquer de cimento Portland e as fases líquidas.

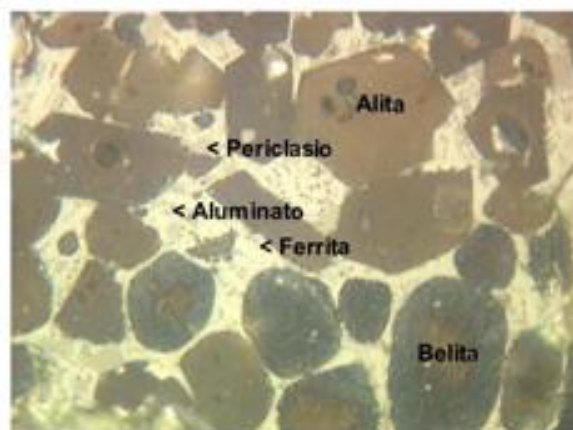


Figura 2.5 – Grão de clínquer de cimento Portland (GIROTTI, 2018)

2.1.1.4 Ferro aluminato tetracálcico (C_4AF)

Ferro aluminato tetracálcico ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), C_4AF , está entre os componentes mais comuns do clínquer, conhecido como brownmélite, usualmente chamado de ferrita, possui baixo calor de hidratação e reage rápido, tem como propriedade principal, imprimir resistência à corrosão química ao cimento, e confere ao mesmo uma cor acinzentada (SOUZA, 2009). Na Figura 2.5 estão as principais fases cristalinas do clínquer.

2.1.2 Processo produtivo e tipos de cimentos

O processo de produção do cimento se inicia com a secagem, mistura nas proporções adequadas e a moagem das matérias-primas. Após a moagem ele é misturado ao sulfato de cálcio, na forma de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemidrato ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) ou anidrita ($CaSO_4$), que tem como função regular início de pega do cimento. Dependendo do tipo de cimento e suas aplicações, também são adicionados os materiais cimentícios suplementares que podem ser carbonato de cálcio ($CaCO_3$) ou filer calcário, materiais pozolânicos (naturais ou cinzas) ou escória granulada de alto forno (BELIZARIO-SILVA, 2022).

A Figura 2.6 demonstra a produção simplificada do cimento tipo Portland.

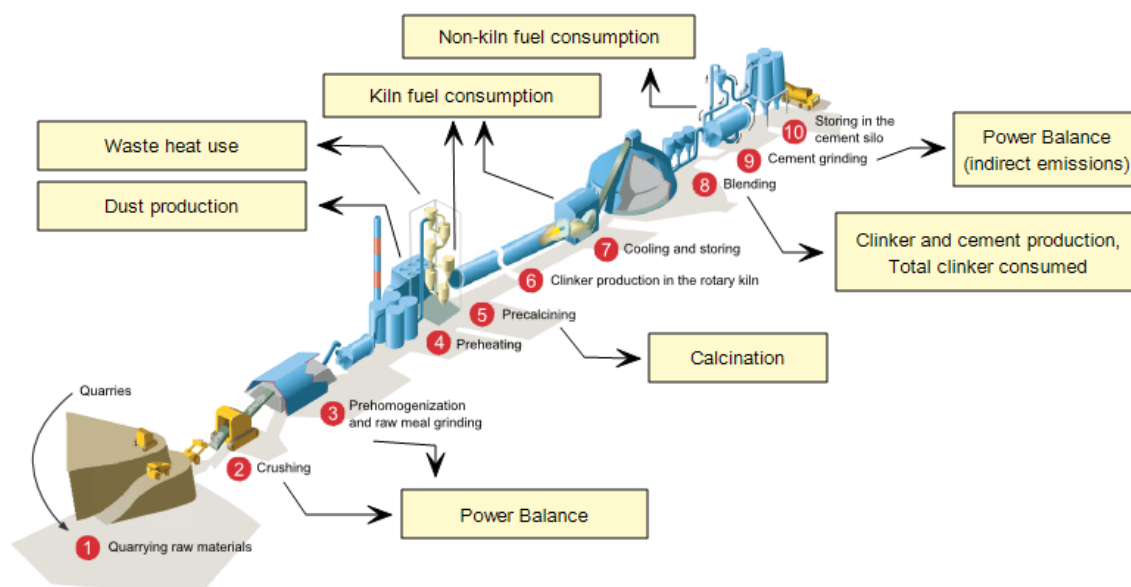


Figura 2.6 – Processo de produção de cimento (IEA/WBCSD, 2018).

No território brasileiro, o cimento Portland é disponibilizado de acordo com a categorização demonstrada nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2 – Requisitos de resistências à compressão (adaptado de NBR 16697, 2018).

Sigla	Classe	Resistência à compressão			
		1 dia	3 dias	7 dias	28 Dias
CP I	25	--	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
CP I-S					
CP II-E	32	--	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
CP II-F					
CP II-Z	40	--	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$
CP III	25	--	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
CP IV	32	--	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	--	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$
CP V	ARI	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	--

Tabela 2.3 – Classificação Cimento Portland (NBR 16697, 2018).

Designação normalizada	Sigla	Classe de Resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland Comum	CP I CP I-S			95 – 100 90 – 94		0 - 5 0	
Cimento Portland composto com escória granulada de AF	CP II-E	25,32 ou 40	RS ou	51 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto material pozolânico	CP II-Z		BC	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland Pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	ARI CP V ^a			90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Estrutural		25,32 ou 40		75 – 100			
Portland Não branco estrutural	CPB	–	–	50 – 74	–	–	26 – 50

^a No caso do CP de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto forno ou materiais pozolânicos.

Elementos que exercem impacto na produção dos cimentos listados na tabela incluem: a disponibilidade de matérias-primas e aditivos, assim como as instalações para moagem e estocagem (ABCP, 2002).

2.1.3 Hidratação do Cimento Portland

Segundo SENFF *et al* (2005) as fases cristalinas anidras, quando resfriadas abruptamente apresentam-se na fase metaestável, que reagindo com água, vão conferir o caráter hidráulico do cimento. As fases resultantes dessa hidratação são: silicato de cálcio hidratado (Tobormerita: C-S-H), hidróxido de cálcio (Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o sulfoaluminatos de cálcio hidratados.

A velocidade de hidratação das fases é distinta, o que proporciona diferentes características na matriz cimentícia. Segundo Taylor (1997) a hidratação da pasta de cimento se comporta conforme descrito na Figura 2.7 abaixo.

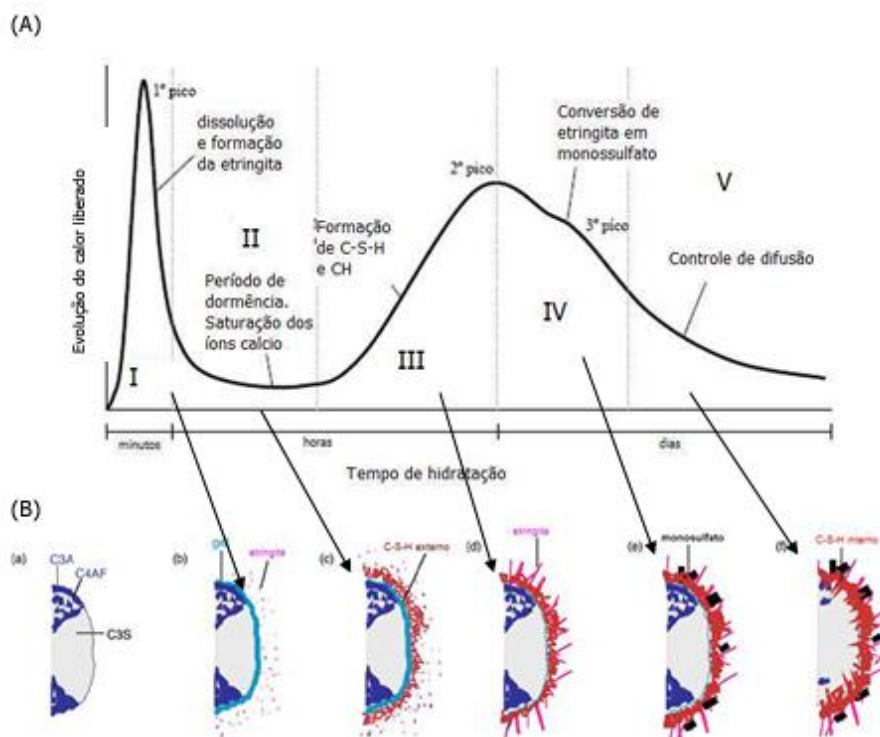


Figura 2.7 – Representação esquemática da liberação de calor (A) e estágios da hidratação (B).

(TAYLOR, 1997 e SANDBERG, 2008).

Na primeira etapa (I), pré-indução, o cimento entra imediatamente em contato com a água onde ocorre uma rápida dissolução dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} formando os primeiros hidratos, a etringita, que se precipita na superfície das partículas de cimento (HEWLETT, 2019).

Na segunda etapa (II), indução ou dormência, é neste período que o comportamento reológico e de pega dos materiais cimentícios é determinado. Nesta etapa quase não há liberação de calor o que corresponde à janela de trabalho do cimento (HEWLETT, 2019).

Segundo Sandberg (2008) a terceira etapa (III), aceleração, é o período mais significativo na construção das resistências, onde praticamente todos os hidratos são formados. A taxa de hidratação do C_3S aumenta e formação do C-S-H começa a aparecer. Após o ponto de coesão, ocorre a liberação máxima da temperatura, o que pode ser considerado com o fim de pega do cimento.

As etapas quatro e cinco (IV e V), pós aceleração, são as etapas onde a taxa de hidratação diminui com o consumo ao longo do tempo do C_3S , porém continuam se formando os hidratos oriundos do C_2S . Ocorre também a diminuição da formação do hidróxido de cálcio e a taxa de liberação de calor diminui gradativamente (QUARCIONI, 2008).

2.1.4 Adições minerais e classificação

As adições minerais são empregadas como substitutas do cimento. Nas pesquisas de Gonçalves (2005), é destacado que a incorporação de adições minerais em substituição parcial ao cimento pode resultar em vantagens para os materiais cimentícios, incluindo a resistência contra ação de sulfatos.

Conforme as informações de Pilar (2012), as adições minerais podem ser categorizadas em três amplos conjuntos, baseados nas suas características físico-químicas: material pozzolânico; material cimentante e material carbonático (filer).

As pozzolanas são materiais de origem natural ou artificial, constituídos principalmente por sílica ativa, conforme indicado por Moraes (2001). Em concordância com as descrições de Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2015), a pozzolana é um material contendo sílica e, em alguns casos, aluminossilicatos, que não possui uma capacidade cimentante intrínseca, mas quando finamente dividida e em contato com umidade, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com características cimentantes. Neville (2015) destaca a importância da sílica amorfa, já que a sílica cristalina tem baixa reatividade.

As pozzolanas naturais, como as cinzas vulcânicas, as terras diatomáceas calcinadas e a argila calcinada, têm origem predominantemente em rochas e minerais

vulcânicos, excluindo a terra de diatomáceas. Já as pozolanas artificiais, como a sílica ativa e subprodutos industriais, como as cinzas de carvão mineral de termoeletricas (cinza volante) e resíduos agrícolas, como palha e casca de arroz, são amplamente empregadas. Conforme Tashima (2006), as pozolanas naturais são submetidas a processos como britagem, moagem e classificação, além de tratamento térmico para ativar suas propriedades. A substituição parcial do cimento por adições minerais, como as pozolanas, na produção de cimento, preserva recursos naturais, diminui o consumo de energia e reduz as emissões de CO₂.

Atualmente, a cinza volante é um resíduo industrial significativo, com uma produção anual de cerca de 500 milhões de toneladas, sendo os principais produtores China, Índia, Estados Unidos, Rússia, Alemanha, África do Sul e Reino Unido (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já o material cimentante, como a escória granulada de alto-forno, pode formar produtos como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), mesmo sem reagir diretamente com o hidróxido de cálcio, como mencionado por Almeida (2008).

A escória de alto-forno, conforme definida pela ASTM C125-16, é um produto não metálico composto principalmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, desenvolvido durante o processo de redução no alto-forno, juntamente com o ferro gusa. Este subproduto é obtido pela reação a altas temperaturas do minério de ferro, fundentes e cinzas de carvão vegetal ou mineral (coque), resultando em uma composição de cal, sílica e alumina (FONSECA, 2010). A escória de alto-forno, ao contrário das pozolanas, pode reagir diretamente com a água, contanto que haja um meio alcalino para permitir a reação. Portanto, a escória de alto-forno é considerada um material com propriedades hidráulicas latentes (ZHANG, 2020).

2.1.5 Escória de alto forno

Informações da Associação Mundial do Aço revelam que no ano de 2019, os maiores fabricantes globais de ferro gusa foram a China, o Japão e a Índia. Durante esse mesmo período, o Brasil conquistou a sexta posição, superando na classificação países como os Estados Unidos e a Alemanha (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020).

O procedimento de produção nessa indústria tem seu início nos altos-fornos, que podem empregar predominantemente dois tipos de combustíveis. O carvão vegetal,

originário de florestas cultivadas, ou o coque derivado do aquecimento do carvão mineral. Quando a combinação de minério de ferro e combustível é introduzida nos altos-fornos, ocorre o aquecimento a temperaturas variando entre 900° e 1200°C. Essas temperaturas elevadas resultam na fusão do minério de ferro, provocando o gotejamento de gusa líquido, que flui para o cadinho na parte inferior do forno, gerando adicionalmente dois subprodutos: a escória e os gases (NEHRING et. al., 2021). A Figura 2.8 ilustra o processo de fabricação do ferro gusa

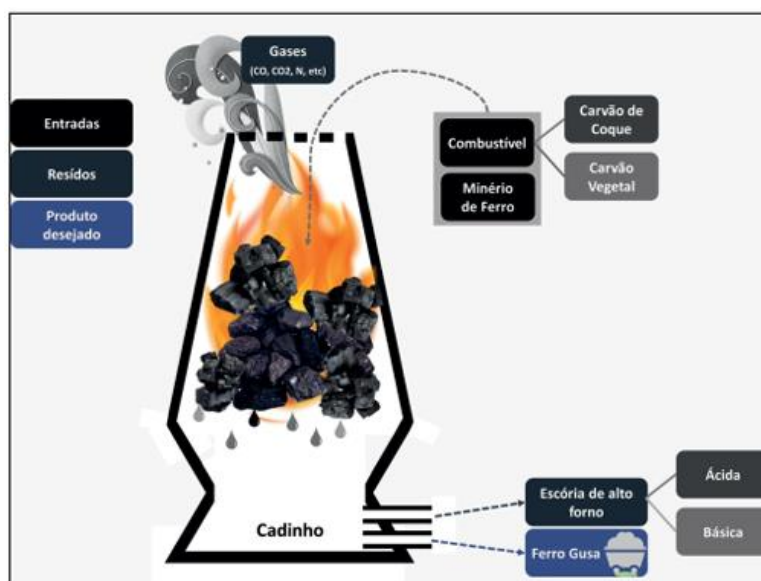


Figura 2.8 – Processo produtivo em alto forno (NEHRING et. al., 2021).

A quantidade e a composição da escória produzida flutuam em conformidade com o tipo de combustível empregado. Nas siderúrgicas que empregam altos fornos abastecidos com coque de carvão, estima-se que sejam gerados cerca de 200 a 300 kg de escória por cada tonelada de ferro gusa fabricado (JOHN e AGOPYAN, 2000).

2.1.6 Características químicas e físicas da escória de alto forno

A maioria dos estudos que buscam avaliar a reatividade da escória estabelece correlações entre a composição química e/ou outras propriedades da escória, tais como, organização atômica, estado vítreo, índice de basicidade, hidraulicidade e a resistência mecânica (DE SOUZA JUNIOR, 2007).

A composição química das escórias está relacionada à homogeneidade da escória líquida, a sua elevada capacidade de retirada do enxofre e a baixa viscosidade (MASSUCATO, 2005).

Os óxidos de cálcio e óxidos de magnésio compõem mais de 60% em peso das escórias brasileiras, além do óxido de cálcio ser indispensável para a basicidade do processo, enquanto o principal papel do óxido de magnésio ser proteção das paredes refratárias dos fornos durante o processo de obtenção das escórias. Os óxidos de silício e alumínio juntos a outros óxidos constituem outros 40% do peso total das escórias (SETIÉN, 2009).

A Tabela 2.4 demonstra a comparação química das escórias brasileiras com as faixas citadas na literatura.

Tabela 2.4 – Composição química das escórias brasileiras (KELLES, 2011)

Constituintes	Teores citados na literatura (%)	Teores das escórias brasileiras (%)
SiO ₂	23 – 55	30 – 35
CaO	27 – 55	40 – 45
Al ₂ O ₃	5 – 55	11 – 18
MgO	2 – 12	2,5 – 9
MnO	0,5 – 3	-
Fe ₂ O ₃	-	0 – 2
FeO	0,5 – 2	0 – 2
S	0,4 – 1,2	0,5 – 1,5

De acordo com a NBR 16697 (2018) se a relação $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$ for atendida, a escória é classificada como básica e adequada para utilização como adições em cimento Portland, caso contrário é classificada como ácida.

Almeida (2014) define o índice de basicidade, no qual uma escória é considerada básica quando a relação $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$, e ácida quando a relação $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$. Escórias com elevado teor de óxido de alumínio (Al₂O₃) possuem características básicas, pois o Al₂O₃, por ser anfótero, pode neutralizar a acidez, deixando a escória com características básicas. A relação CaO/SiO_2 é denominada índice de basicidade já a relação $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$ representa o índice de hidraulicidade.

Grande parte dos métodos estabelecidos se baseia nos "módulos hidráulicos" ou hidraulicidade da escória, que estabelecem uma relação entre a composição química

total (vidro + cristais) e o desempenho mecânico em condições específicas (ALMEIDA, 2014).

O resfriamento é fundamental para o arranjo atômico e na formação de escórias amorfas (vítreas) ou escórias cristalinas. O processo de resfriamento brusco com água gera uma estrutura amorfa (vítreas) com poucas ou quase nenhuma estrutura cristalina o que confere uma alta hidraulicidade. Contudo quando o resfriamento é ao ar e lento, as estruturas cristalinas se formam e a escória perde sua capacidade cimentante (LANGARO, 2016).

2.1.7 Ativadores

Os ativadores mais utilizados são a cal hidratada (Ca(OH)_2), os sulfatos de cálcio hidratado, hidróxidos de metais alcalinos (KOH e NaOH), os silicatos de sódio ou potássio, podendo também obter misturas destes compostos (LANGARO, 2016)

Dessa forma, os ativadores alcalinos podem ser (PACHECO-TORGAL et al., 2008a):

- Hidróxidos (MOH , M(OH)_2);
- Silicatos do tipo ($\text{M}_2\text{O} \cdot n \text{SiO}_2$);
- Aluminatos ($\text{M}_2\text{O} \cdot n \text{Al}_2\text{O}_3$);
- Alumino silicatos ($\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6) \text{SiO}_2$);
- Sais de ácidos fortes (M_2SO_4) Sendo M um íon alcalino;

Misturas de solução alcalina com silicatos solúveis de sódio ou de potássio foram testadas por Palomo et al. (1999) os quais observaram que as reações ocorreram em taxas maiores do que quando são apenas utilizados hidróxidos como ativadores.

2.2 Hidratação e comportamento mecânico de materiais cimentícios com elevada adição de escória de alto forno

Pesquisas mais recentes apontam para utilização de materiais cimentícios suplementares como a escória de alto forno em concentrações que variam de 30 a 80% em substituição ao cimento Portland comum. Essa substituição apresenta resultados inferiores quando não são usadas quantidades adequadas de ativadores alcalinos para potencializar as resistências em idades precoces (MARVILA, 2021).

Estudos foram feitos com misturas ternárias combinando escória de aço, cimento Portland e escória de alto forno ultrafino, os resultados confirmaram que em idades precoces as resistências não atingiram valores consideráveis, o que corrobora para necessidade do uso de ativadores alcalinos, pois quando verifica-se em percentual mássico a oferta de hidróxido de cálcio é reduzida, pois a única fonte seria o clínquer do cimento Portland. O hidróxido de cálcio é o promotor do aumento do pH da solução, o qual gera a reatividade da escória de alto forno. Com essa oferta reduzida a escória, mesmo em uma granulometria ultrafina, tem dificuldade em reagir e formar alumínio silicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) (LIU, 2021).

Segundo Mengasini *et al* (2021) concretos produzidos com uma mistura de escórias de alto forno e de aço, ativadores e agregados apresentam resultados de resistência a compressão e porosidade melhores do que as mesmas misturas sem ativadores e as misturas feitas somente com cimento Portland comum (OPC).

Segundo o estudo de Ahmed (2021) a substituição de 60% de cimento Portland por escória granulada de alto forno em um concreto de ultra alto desempenho sem a utilização de ativadores apresentou resultados de resistência à compressão menores que com cimento referência, todavia ainda sim apresentou resistência ultraelevada (>150 MPa) com 60% de substituição.

A dosagem de íons sódio (Na^+) em solução é extremamente importante, pois em baixas quantidades pode não ter o efeito desejado e em elevadas quantidades aumenta a precipitação de etringita com sódio, elevando a temperatura da solução, diminuindo a trabalhabilidade do sistema e ocorrendo impedimento estérico dificultando a hidratação dos grãos de cimento. Segundo Alzaza (2022) ensaios com substituição de 50% de cimento Portland por escória de alto forno utilizando 1% de NaOH apresentou menor porosidade na matriz e resistências a compressão maiores quando comparadas à mistura com 100% de cimento Portland, porém ao utilizar um percentual maior ($\text{NaOH} > 2\%$) a microestrutura ficou mais porosa e ocorreu uma redução significativa das resistências.

O uso de ativadores com basicidade média e baixa são positivos, contudo, os resultados de resistência à compressão ficaram abaixo dos resultados encontrados em comparação ao cimento Portland sem adições de escória. Nesse estudo foram utilizadas curas entre 5 e 20°C e a variação de temperatura de cura influenciou também nas resistências a compressão e na formação dos hidratos e porosidade das misturas. Para as amostras curadas a 5 °C, o desenvolvimento geral da resistência foi lento, e a

resistência das amostras curadas a 20 °C foi aproximadamente duas vezes a resistência correspondente sob a cura a 5 °C. (ZHAI, 2021).

Argamassas cimentícias feitas com 100% de escória granulada de alto forno apresentaram excelentes resultados usando NaOH e KOH quando analisado a trabalhabilidade da argamassa fresca. O limite de escoamento e a viscosidade plástica das pastas ativadas com KOH foram comparativamente mais baixas do que as pastas contendo NaOH e um aumento na molaridade de qualquer uma das soluções reduziu consistentemente a viscosidade plástica. Porém o tempo de pega tanto com NaOH e KOH diminuíram significativamente o que é comprovado com outros trabalhos em concreto e pasta de cimento devido a formação de etringita com Na^+ e K^+ . Em resumo, para argamassas, quando os parâmetros físicos ajustados, como absorção de água, poros permeáveis e retração por secagem, o NaOH pode ser preferido onde se deseja maior durabilidade, enquanto o KOH pode ser a alternativa onde são necessárias propriedades mecânicas e fluidez mais altas (OMUR, 2022).

Os produtos formados na hidratação de cimentos Portland com mistura de escória de alto forno e *fly ash* (FA) com ativadores alcalinos base fraca, como os carbonato de sódio (NC), apresentaram resultados satisfatórios nas resistências e diminuição de poros. A menor finura da escória e a maior dosagem de NC encurtaram significativamente o período de indução da hidratação da escória e promoveram a formação de silicato de cálcio e alumínio hidratado (C-(N)-S-A-H) e calcita (LI, 2021).

Um estudo feito com cimento com 69% de escória de alto forno, cimento comercial CEM III/B, com e sem ativador alcalino, sulfato de sódio (Na_2SO_4), apresentou resultados para a resistência a compressão superiores quando usando Na_2SO_4 tanto em idades precoces (1 e 7 dias) quanto em idades avançadas (28 e 90 dias). Esse estudo também identifica um aumento no grau de hidratação da alita (C_3S) em 1 dia quando usando Na_2SO_4 enquanto o grau de hidratação do clínquer e da escória é semelhante para todos os sistemas de 7 a 90 dias, O aumento do teor de etringita de Na^+ é observado em todas as idades nos sistemas álcali ativados. A microestrutura e a estrutura dos poros apresentam densificação e redução da quantidade e tamanho com adição de Na_2SO_4 . A adição de Na_2SO_4 aumenta o grau de hidratação da escória nas idades iniciais (até 7 dias), mas nas idades mais avançadas não foi identificado esse aumento de grau de hidratação (JOSEPH, 2022).

Segundo Zhang *et al* (2020) o uso de ativadores individuais em um sistema de alto volume de escória-cimento com teor de escória de 80% mostrou que a dosagem

ideal dos cinco ativadores era de 1% quando adicionados separadamente. Foram feitas combinações entre ativadores o que produziu um melhor efeito de ativação quando analisando a porosidade e as resistências à compressão. A melhor combinação foi $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaSO}_4$, com uma dosagem ótima de 3%. Na idade de 7 dias, o índice de ativação (IA) das amostras com adição de Ca(OH)_2 (IA) e $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaSO}_4$ (CA) aumentou 32,5% e 25,3%, respectivamente, em comparação com os grupos controle (CG), que não teve adição de ativador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará uma descrição dos materiais utilizados e metodologia aplicada para análise química das matérias-primas com a técnica de fluorescência de raios-X (FRX), a análise das fases com a técnica de difração de raios-X (DRX) e a análise quantitativa de fases pelo método de Rietveld, e caracterização de tamanho de partículas pela técnica de granulometria a laser. Para a dinâmica de hidratação foi utilizado a calorimetria isotérmica, preparação dos corpos de prova e ensaio de compressão uniaxial.

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Cimento

Todas as matrizes cimentícias avaliadas foram produzidas a partir de um cimento padrão interno da Votorantim nomeado como CP IND. Esse cimento tem as características de um CP I-S conforme a norma NBR 16697 (2018). O fabricante forneceu os dados de controle de qualidade do lote do cimento utilizado.

A composição química do cimento está disposta na Tabela 3.1. Outros parâmetros dos ensaios químicos e físicos estão dispostos nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3.1 - Composição química do cimento CP IND (VOTORANTIM, 2023).

Óxidos	Concentração (%)
SiO ₂	19,04
Al ₂ O ₃	4,63
Fe ₂ O ₃	3,1
CaO	61,51
MgO	1,74
Na ₂ O	0,26
K ₂ O	0,44
SO ₃	4,12
P ₂ O ₅	0,18
TiO ₂	0,21

Óxidos	Concentração (%)
ZnO	0,01
Cr ₂ O ₃	0,02
SrO	0,18
PF	4,56

Tabela 3.25 - Ensaios químicos do cimento padrão (VOTORANTIM, 2023).

Ensaio	Especificação Norma NBR 16697	Unidade	Valor
PF 950 °C	≤ 6,5	%	4,56
RI	≤ 3,5	%	1,67
PF 950°C – ensaio para caracterizar a perda ao fogo (entre 900°C e 1000°C)			
RI – cálculo da porcentagem de resíduo insolúvel na composição			

Tabela 3.36 - Dados de ensaios físicos do cimento padrão (VOTORANTIM, 2023).

Ensaio	Especificação Norma NBR 16697	Unidade	Valor
Ret. 75 µm	≤ 6,0	%	0,05
Ret. 45 µm	n.a.	%	0,29
Ret. 75 µm – determinação do índice de finura com a peneira 75 µm (nº 200)			
Ret. 45 µm – determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico			

A Figura 3.1 apresenta o difratograma de raio X (DRX) do cimento anidro com o gráfico de refinamento pelo método Rietveld com os resultados quantitativos e indicadores estatísticos. Os resultados mostram a composição típica de um cimento Tipo I CP I-S.

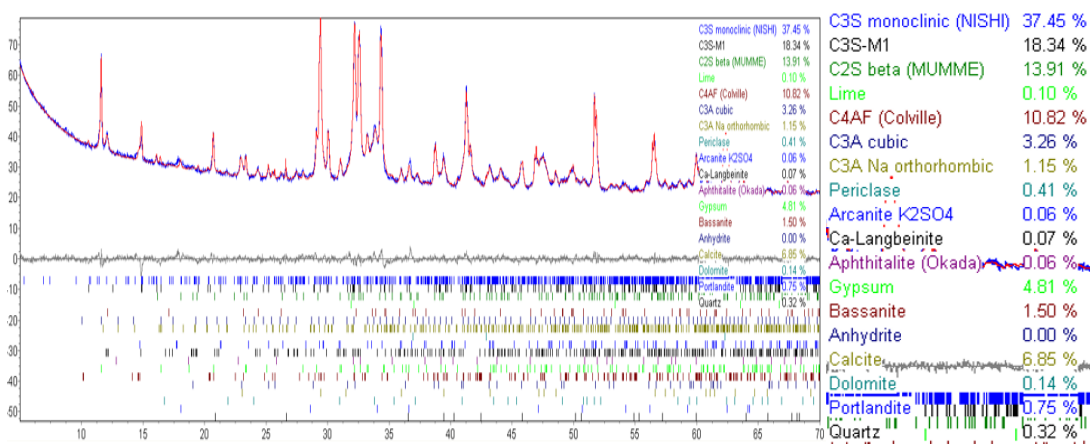


Figura 3.1 – DRX do cimento anidro método de refinamento Rietveld

3.1.2 Escória granulada de alto forno

A escória utilizada foi proveniente da siderúrgica Ternium, produzida por alto forno e enviada para a Votorantim através de correias transportadoras em estado bruto, conforme ilustra a Figura 3.2.



Figura 3.2 – Pátio de escória.

A escória de alto forno passa por beneficiamento em dois moinhos verticais FLS OK 33.4 com capacidade de produção que varia entre 95 e 125 toneladas por hora para atingir a granulometria ideal e a finura adequado, que varia entre 4100 e 4600 cm^2/g , para uso como material complementar cimentante. A Figura 3.3 apresenta o difratograma de raio X (DRX) da escória moída de alto forno mostrando o amorfismo de 100% com os picos de fluoreto de lítio como controle.

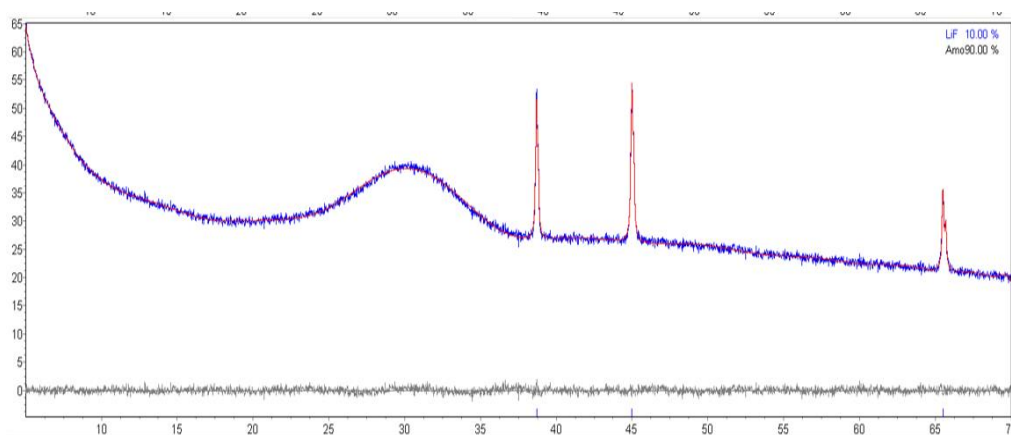


Figura 3.3 – DRX da escória moída de alto forno

Segundo a norma NBR 16697 (2018), a composição química da escória granulada de alto forno deve estar de acordo com a seguinte equação 1, em porcentagem de massa:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad \text{Eq. 1}$$

A composição química da escória utilizada nesse trabalho está disposta na Tabela 3.4. Outros parâmetros dos ensaios químicos estão dispostos na Tabela 3.5.

Tabela 3.47 - Composição química da Escória

Óxidos	Concentração (%)
SiO ₂	37,926
Al ₂ O ₃	12,969
Fe ₂ O ₃	0,434
CaO	41,915
MgO	3,629
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,594
SO ₃	0,975
Mn ₂ O ₃	0,551
P ₂ O ₅	0,019
TiO ₂	0,692
ZnO	0,005
Cr ₂ O ₃	0,104
SrO	0,038

Tabela 3.5 – Ensaios químicos da Escória

Ensaio	Limites Internos	Unidade	Valor
Basicidade	>1	%	1,64
Rel. Hidraulicidade	>0,9	%	0,97
Ca/Si (relação mássica)	>1	%	1,13

3.1.3 Aditivo ativador de escória

O aditivo metassilicato de sódio anidro foi utilizado devido a sua causticidade moderada quando comparado com os ativadores clássicos (NaOH, Na₂CO₃, KOH e Ca(OH)₂). A causticidade dos ativadores clássicos pode gerar acidentes de trabalho e

problemas no processo produtivo no momento da incorporação dos mesmos ao cimento Portland finalizado, pois ocorre corrosão nos equipamentos e aumento da frequência de manutenção.

Com base nas razões molares estabelecidas pelo ensaio de FRX, calculou-se a quantidade necessária de mols, identificando a deficiência de SiO_2 , Na_2O e H_2O . Para remediar isso, optou-se por utilizar 7,5% em massa de silicato anidro como fonte de SiO_2 e Na_2O , complementado com a adição de água para alcançar a proporção desejada.

Os parâmetros físico-químicos do metassilicato anidro estão dispostos nas Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 – Composição química do Metassilicato Anidro

Óxidos	Concentração (%)
SiO_2	45,76
Na_2O	50,72

Tabela 3.78 – Ensaio físico-químico do Metassilicato Anidro.

Ensaio	Limites Internos	Unidade	Valor
Sólidos total	93,8 até 99,00	%	95,46
Relação SiO_2 : Na_2O	1,02 até 1,10	%	1,07

3.1.4 Areias padrão IPT

As areias foram fornecidas pelo IPT nas frações granulométricas de acordo com a NBR 7214 (2015). A distribuição granulométrica da areia normal é expressa na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica da areia normal (IPT, 2023)

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras mm	Unidade	Material retido em massa nas peneiras
Grossa	2,4 e 1,2	%	25 +-5
Média grossa	1,2 e 0,6	%	50 +-5
Média fina	0,6 e 0,3	%	75 +-5
Fina	0,3 e 0,15	%	97 +-3

3.1.5 Agregados

Os agregados utilizados na produção do concreto foram: areia natural média, areia artificial britada e brita 1 de origem gnaisse. Os agregados apresentaram dimensões máximas de 2,4 mm; 4,8 mm e 25,0 mm, respectivamente conforme demonstra a Figura 3.4.



Figura 3.4 – Agregados para traços de concreto.

As areias e a brita foram classificadas em relação à curva granulométrica, por meio de ensaio de peneiramento conforme Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente.

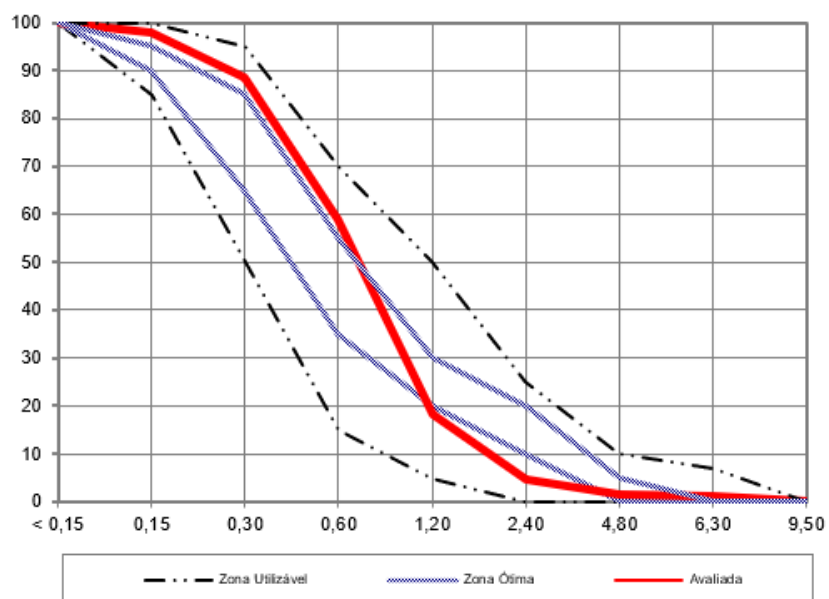


Figura 3.5 – Curva granulométrica Areia Natural Média.

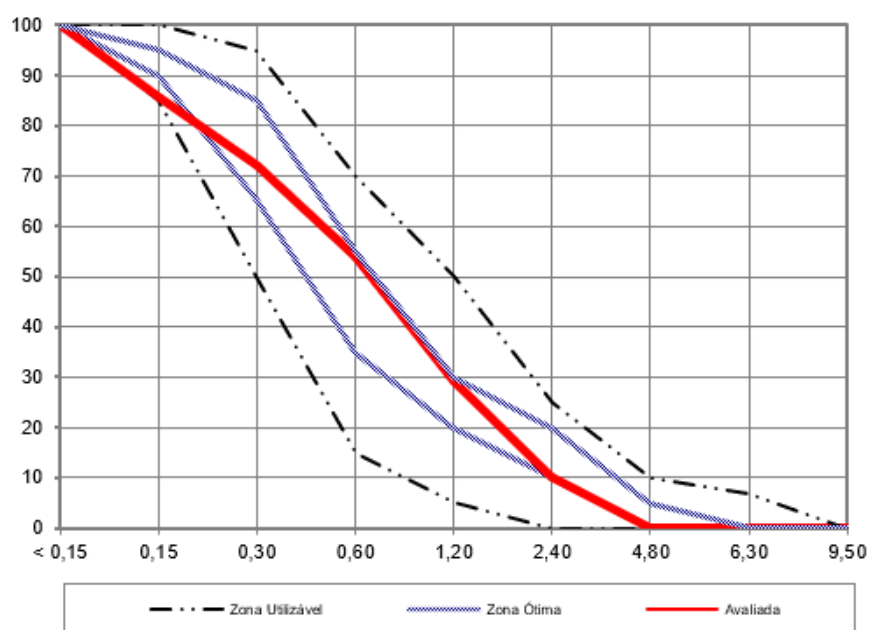


Figura 3.6 – Curva granulométrica Areia Artificial Britada.

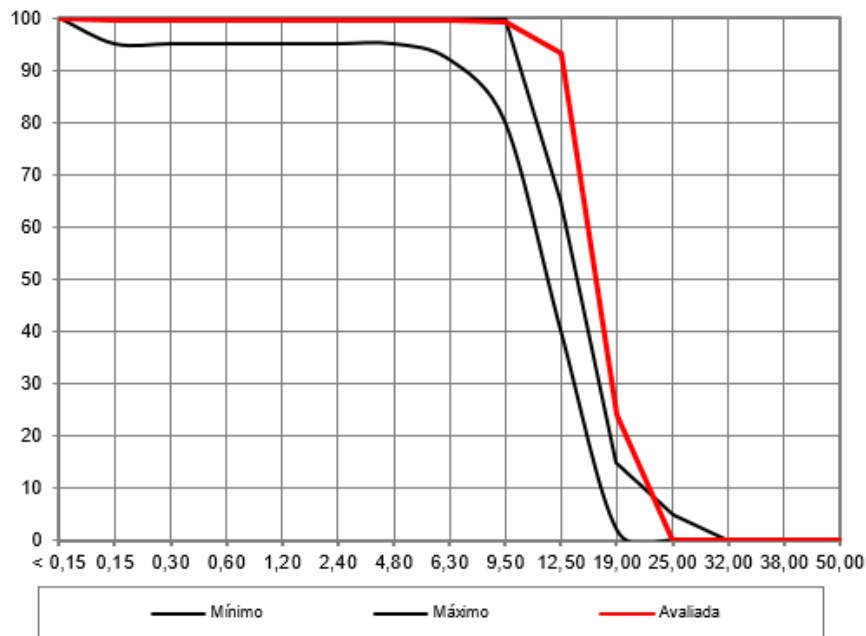


Figura 3.7 – Curva granulométrica – Brita 1

3.1.6 Aditivo

O aditivo utilizado no concreto foi um polifuncional da marca Clarena MR4210, com massa específica de 1122 kg/m³, pH de 6,61 e total de sólidos de 26,80%, na coloração marrom escura.

3.1.7 Procedimento de Mistura e Composição do Traço de Concreto

Todas as misturas realizadas foram de no mínimo 20 litros e foram executadas em betoneira com capacidade para 150 litros. As proporções apresentadas na Tabela 3.9, composição do traço em metro cúbico (m³), foram proporcionalmente reduzidas para o volume necessário para cada etapa e moldagens desejadas. O procedimento seguido durante cada processo de mistura foi o seguinte:

- O tambor da betoneira foi saturado com água e seco com papel absorvente industrial para garantir que a água da mistura não fosse absorvida pelo tambor durante o processo.
- Os agregados foram adicionados à betoneira seguindo a ordem de brita 1, areia natural e areia de britagem.
- Foi adicionado fração de 70% da água da mistura.

- Estes materiais até então adicionados foram misturados por 1 minuto.
- Após esta mistura inicial, foi adicionado o cimento, deixando-o misturar por mais 1 minuto.
- Em seguida, foi adicionada a fração de 20% de água restante, deixando misturar por mais 1 minuto.
- Foi adicionado o aditivo polifuncional e a mistura prosseguiu por mais 5 minutos.
- Foi medido o abatimento com o método de *Slump Test* inicialmente e em seguida o resultado anotado.
- A mistura permaneceu na betoneira parada por 15 minutos para a medição de perda de abatimento.
- Após os 15 minutos foi feita uma homogeneização de 30 segundos para nova medição de abatimento.
- O segundo abatimento foi medido e o restante dos 10% de água, quando necessário foi utilizado para correção do Slump.

Com a finalização de cada mistura e os ensaios de abatimento de tronco de cone para caracterizar o concreto no estado fresco, prosseguiu-se com a moldagem dos corpos de provas para caracterização mecânica dos concretos.

Tabela 3.9 – Composição dos traços utilizados para cada um dos cimentos (valores em kg/m³)

Composição	Traço 1 (60% de Escória)	Traço 2 (85% de Escória)	Traço 3 (85% de Escória e 7,5% de ativador)
CP IND	121	45	45
Escória	181	257	257
Ativador	0	0	19
Brita 1	979	979	979
Areia Natural Média	236	236	236
Areia Artificial			
Britada	561	561	561
Aditivo	2,26	2,26	2,26
Água	204	204	204

3.2 Métodos de Ensaios

3.2.1 Fluorescência de raios-x

Os ensaios foram realizados nas amostras do CP IND e da escória moída de alto forno (EMO) no laboratório da Votorantim Cimentos. O equipamento utilizado foi FRX Axios Panalytical WDX, tubo de cobre (Cu), potência de 24-50kV e amperagem de 40-80mA, diâmetro de máscara 37 μm , colimador 550 μm e detector PIX1, PE002 conforme Figura 3.8.



Figura 3.8 - Espectrômetro de Fluorescência de raio-x

O procedimento do ensaio:

- Calcinou-se a amostra em cadinho de porcelana, em mufla à 950 ± 50 °C, pelo tempo definido de 1 (uma) hora. A quantidade de amostra foi 4,0 g o suficiente para realizar pérolas em duplicatas;
- Após o tempo decorrido, retirou-se o cadinho da mufla, depositou-se sobre uma placa cerâmica, até que desapareceu o “rubro”, após acondicionou-se em dessecador;
- Aguardou-se até que a amostra atingisse a temperatura ambiente;

- Pesou-se $1,0000 \text{ g} \pm 0,0005 \text{ g}$ de cada amostra e $6,0000 \text{ g} \pm 0,0005 \text{ g}$ de fundente em um cadinho de porcelana. Foi feita a homogeneização com a ajuda de uma espátula;
- Colocou-se o molde e os cadinhos de Pt-Au na máquina de fusão;
- Após o término da fusão, aguardou-se o ciclo de resfriamento que levou aproximadamente 5 min e posteriormente retirou-se a pérola do molde;
- A Figura 3.9 mostram exemplos de pérolas fundidas de forma correta.



Figura 3.9 – Pérola correta.

3.2.2 Difração de raios-x

Os ensaios foram realizados nas amostras do CP IND e da escória moída de alto forno (EMO) no laboratório da Votorantim Cimentos. O equipamento utilizado foi Difratorômetro Aeris, com intervalo de medição de 6° a $65^\circ 2\theta$, intervalos de $0,02^\circ$, tubo de cobre (Cu), potência de 40kV e detector PIXCel1D, conforme Figura 3.10.



Figura 3.10 – Difratorômetro de raio-X.

O procedimento de ensaio:

- Foi feita a homogeneização do material e colocado uma alíquota no porta amostra metálico para DRX;
- Foi feita a compactação da amostra com a lateral da chapa metálica (Figura 3.12) até que a amostra ficou compactada por completo, foram feitos movimentos de baixo para cima, indo e voltando, de um lado para o outro, realizando leves batidas com a lateral da chapa a compactação total.

3.2.3 Granulometria à Laser

O equipamento utilizado foi HELOS/BR Sympatec, tipo: VIBRI/L, voltagem de 24V e com o software PAQXOS 4.0, com corte na peneira 500 mesh, conforme Figura 3.11. Os materiais analisados foram o CP IND, escória moída de alto forno e o ativador metassilicato de sódio.

O procedimento do ensaio:

- A homogeneização da amostra foi feita com o auxílio de um saco plástico;
- Em um recipiente, pesou-se 50g da amostra homogeneizada;
- A amostra foi passada na peneira de 300 μ m através do peneiramento manual e utilizou-se o passante para realizar o ensaio no granulômetro;

- O material passante foi colocado num recipiente e atingiu-se 10g de amostra;
- Com um pincel, realizou-se a limpeza do funil, calha e tubo metálico do equipamento;
- Colocou-se as 10g de amostra no funil do equipamento;
- Após o equipamento realizar a leitura da amostra, ele irá gerar um gráfico da curva granulométrica do material;



Figura 3.11 – Analisador de tamanho de partícula por difração a laser.

3.2.4 Resistência à compressão uniaxial

3.2.4.1 Preparo da amostra - Argamassa Padrão

- As amostras foram preparadas seguindo as quantidades da Tabela 3.10:

Tabela 3.10 – Quantidade de material por batelada (IPT, 2023)

Material	Quantidade (g)
Cimento	$624 \pm 0,4$
Areia IPT – n° 16	$468 \pm 0,3$
Areia IPT – n° 30	$468 \pm 0,3$
Areia IPT – n° 50	$468 \pm 0,3$
Areia IPT – n° 100	$468 \pm 0,3$
Água destilada	$300 \pm 0,2$

O processo de mistura foi feito de acordo com a seguinte rotina:

- Todas as frações de areia (aproximadamente 1872g) foram colocadas em um saco plástico e agitada para homogeneização, Figura 3.14;
- Colocou-se na cuba toda a quantidade de água e adicionou-se o cimento. Em seguida, acionou-se o cronômetro;
- A mistura foi levada o conjunto ao misturador, Figura 3.15 e ligou-se o mesmo em velocidade baixa por 30 segundos
- Anotou-se a hora em que o cimento foi misturado à água
- Sem parar o misturador, a areia previamente homogeneizada, foi colocada gradualmente, durante um período de 30 segundos;
- A velocidade foi alterada para modo alto, misturando-se os materiais por mais 30 segundos;
- Após desligar o misturador, nos próximos 30 segundos, com o auxílio de uma espátula, todo o material foi retirado da masseira e das pás do misturador;
- A mistura descansou em repouso por mais 1 minuto;
- Em seguida, o misturador foi ligado novamente em velocidade alta por mais 1 minuto para homogeneizar novamente;



Figura 3.14 – Bancada de mistura de pasta de cimento.



Figura 3.15 – Misturador planetário.

3.2.4.2 Moldagem e rasamento

A moldagem foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa padrão na capela conforme a Figura 3.16:

- O molde foi preparado com uma fina camada de óleo na parte interna. Esse procedimento foi realizado antes da moldagem para não haver acúmulo de óleo.
- Após o preparo, a mistura foi colocada nos moldes com auxílio da espátula de maneira que foram feitas quatro camadas para cada forma e de alturas aproximadamente iguais. Cada camada recebeu 30 golpes uniformes;
- O rasamento foi realizado em até 6 horas após a moldagem, deslizando com uma régua sobre a superfície da argamassa de forma a deixá-la mais nivelada possível.
- Os corpos de prova foram identificados com uma etiqueta e levados imediatamente à câmara úmida conforme Figura 3.17;



Figura 3.16 – Capela de preparo dos corpos de prova.



Figura 3.17 – Corpos de prova.

3.2.4.3 Cura e desforma

Os moldes foram colocados na câmara úmida por 24h, ver Figura 3.18. Após este tempo os corpos de prova foram desmoldados, identificados e colocados no tanque de imersão.



Figura 3.18 – Tanque de imersão.

3.2.4.4 Rompimento

Os corpos de prova foram rompidos em uma máquina de ensaios uniaxial modelo TONINORM número 1543 procedimento da norma brasileira NBR 7215 (2019), ver Figura 3.19.

A cada idade de rompimento existe uma tolerância, que é contada a partir do instante em que o cimento é posto em contato com a água de mistura (registrada na ficha de ensaio). Os corpos de prova foram rompidos nas suas respectivas idades respeitando as tolerâncias especificadas na Tabela 3.11 abaixo:

Tabela 3.11 – Tolerâncias de ruptura por idade (NBR 7215, 2019)

Material	Quantidade (g)
1 dia	± 30 minutos
3 dias	± 1 hora
7 dias	± 2 horas
28 dias	± 4 horas
91 dias	± 24 horas

A velocidade de carregamento ao transmitir a carga de compressão ao corpo de prova, foi de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.



Figura 3.19 – Máquina de compressão uniaxial.

3.2.5 Calorimetria

O equipamento utilizado foi o calorímetro isotérmico Calmetrix i-Cal HPC.

- Com o auxílio de uma pipeta plástica, pesou-se $25 \pm 0,001$ g de água destilada no pote plástico em que será realizado o ensaio;
- Introduziu-se o pote tampado no calorímetro no período de 2 horas, sem interferências, para que a água estabilize a temperatura de 23 °C;
- Em um recipiente, foi pesado $50 \pm 0,001$ g de cada amostra [40% CP IND – 60% escória moída s/ aditivo], [15% CP IND – 85% escória moída s/ aditivo], [15% CP IND – 85% escória moída + 7,5% de metassilicato de sódio anidro] e [CP IND s/ aditivo];
- Após o período de 2 horas, retirou-se o pote plástico com a água destilada estabilizada do calorímetro e inseriu-se a amostra. Com o auxílio de uma colher plástica, realizou-se a mistura da amostra até ficar homogênea;
- A colher plástica permaneceu dentro do pote até o término do ensaio para evitar perda de material, e o pote permaneceu tampado para evitar a evaporação da água da mistura, conforme Figura 3.20;



Figura 3.20 – Mistura da amostra para ensaio de calorimetria.

- Os potes tampados com as misturas foram introduzidos no calorímetro no período de 72 horas, conforme Figura 3.21;

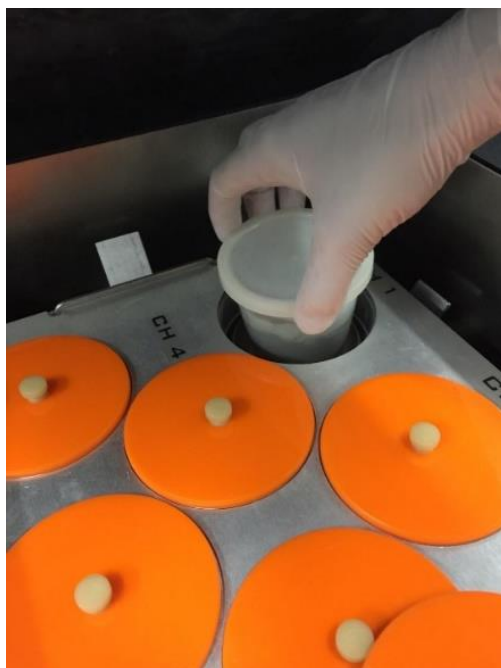


Figura 3.21 - Canais do calorímetro.

3.2.6 Ensaios de Caracterização de Concreto

A avaliação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi feito pelo ensaio de abatimento do tronco de cone especificado pela NBR 16889 (2020), ver figura 3.22. Neste ensaio foram verificados o abatimento, a forma, segregação e exsudação do concreto.

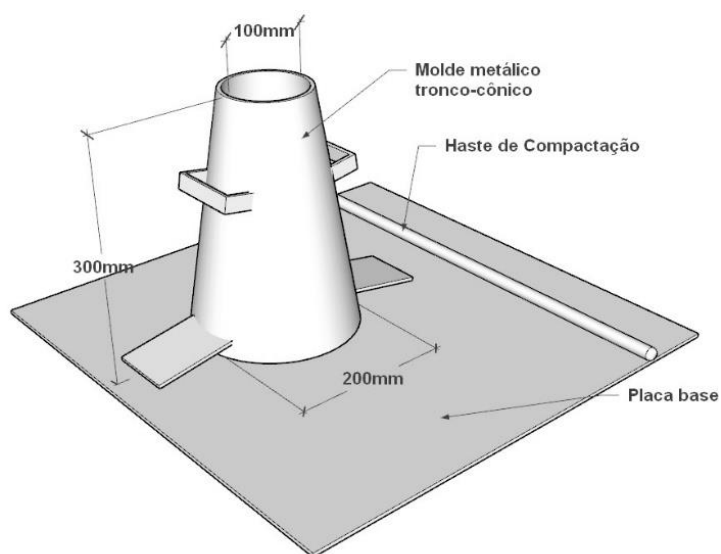


Figura 3.22 – Molde metálico, haste de compactação e placa base

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão uniaxial foram realizados aos 1, 7 e 28 dias após a moldagem dos corpos de prova e cura em câmara úmida como especificado na NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para estes ensaios foram utilizados cilindros de 200mm de altura e 100mm de diâmetro. Antes da moldagem, os moldes foram preparados com o material desmoldante KIMI DESMOLD produzido pela KIMIUM para facilitar a desmoldagem completa, sem danificar os corpos de prova. Durante a moldagem o concreto foi lançado em duas camadas sucessivas e adensado no molde manualmente conforme NBR 5738 (ABNT, 2016). Os moldes então foram cobertos com um pano úmido para garantir a mínima perda de água pela superfície exposta durante as primeiras 24 horas. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e colocados em tanque de água saturado com cal e com temperatura controlada. Anteriormente aos ensaios, com aproximadamente 2 horas, os corpos de

prova foram faceados para regularizar e garantir o paralelismo entre as faces onde foram aplicados o carregamento durante o ensaio.

O equipamento utilizado para a realização destes ensaios foi uma máquina produzida pela empresa SOLOTEST, modelo MCC8, servo-controlada, com capacidade de carga de 2000kN. A velocidade de carregamento utilizada foi de 0,35 MPa/s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à Compressão Uniaxial em Argamassa Padrão de Cimento

Analisando a Tabela 4.1 pode-se verificar uma queda acentuada na resistência em todas as idades quando comparando CP IND com as misturas acrescidas de EMO. Essa diminuição percentual é maior em 1 dia (CP IND x CP 60% EMO branco queda de 71%) e em 28 dias essa queda fica menos expressiva (CP IND x CP 60% EMO branco queda de 16%). Esse comportamento se mantém quando comparado CP IND x CP 85% EMO branco nas mesmas idades, em 1 dia (CP IND x CP 85% EMO branco queda de 93%) e 28 dias (CP IND x CP 85% EMO branco queda de 52%). Esses resultados podem ser explicados devido a baixa solubilidade da escória em água pura, que é devido à duas causas fundamentais: baixo pH da solução (LEEMANN et al, 2024) e a formação de sílico-aluminatos hidratados na superfície dos grãos de escória (ILER, 1955), impedindo assim que os grãos de escoria reajam com a água e gere os produtos de hidratação. Com o intuito de melhorar a hidratação da escória e, por conseguinte, aumentar as resistências em todas as idades, foi incorporado um ativador alcalino. Segundo Sajedi (2010) como exemplo pontual ao comparar cimento Portland comum com uma mistura de 60% de escória ativada com silicato de sódio ocorreu uma perda de aproximadamente 57% saindo de 42 MPa em 3 dias para 18 MPa. Em 7 dias o comportamento foi parecido, porém houve um ganho de 2 MPa quando comparado 3 e 7 dias na mesma mistura ativada com silicato de sódio. Os resultados melhoram quando ocorre a combinação entre ativadores como por exemplo hidróxido de potássio e hidróxido de sódio com um resultado de até 85% de resistência da mistura ativada quando comparado com o cimento Portland comum. Isso pode ser explicado pelo nível de escória utilizada, tipo e dosagem do ativador alcalino e regime de cura.

É importante salientar que, enquanto normalmente a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é considerada crucial para materiais álcali-ativados (RAKHIMOVA et al, 2022), neste caso, priorizou-se a manutenção da relação com o CaO. Esta decisão foi baseada na composição dos materiais utilizados, que possuem uma quantidade significativamente maior de CaO em comparação com Al_2O_3 .

Segundo Zhang et al. (2020) a combinação de ativadores apresenta melhores resultados quando comparado ao uso de ativadores individuais. Nesse estudo, eles fixaram o consumo de escória em 80% em massa e o mesmo demonstra que ao variar o percentual de 0,5% para 5% a maioria dos ativadores perderam resistência em 7 dias, porém ao fixar o percentual ótimo, as misturas ganharam resistência saindo de 18 MPa em 3 dias (CP) para 29 MPa em 3 dias quando utilizando o sulfato de sódio como ativador (80% EMO + NS). Porém em 28 dias esses resultados apresentam uma queda de 48 MPa (CP) para 40 MPa na mistura que utiliza sulfato de sódio, corroborando que o tipo, dosagem e outras variáveis podem influenciar nos resultados de resistência das misturas de escória ativadas.

Os estudos acima demonstram e corroboram que ao fazer a adição do ativador (silicato de sódio) houve um ganho nas resistências iniciais, ocorrendo uma queda menor quando comparando em 1 dia (CP IND x CP 85% EMO ativado queda de 60%, melhor que CP 60% EMO) e 28 dias (CP IND x CP 85% EMO ativado queda de 51%, mesmo resultado do CP 85% EMO branco).

Esse comportamento de ganho acelerado em 1 dia pode estar ligado a dissolução e liberação rápida de íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} formando os primeiros hidratos, a etringita, que se precipita na superfície das partículas de cimento (HEWLETT, 2019). Com o uso do ativador no percentual de 7,5% essa liberação foi potencializada.

A aceleração dessas reações em horas pode ter formado excesso de etringita e hidratos, impedindo que o restante da água de hidratação reagisse com os grãos de cimento.

Considerou-se de grande relevância ser possível concluir que tanto a mistura [15% Cimento CP IND + 85 % EMO branco] como a [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado], atenderam plenamente o limite mínimo admissível de resistência à compressão especificada pela norma NBR 16697 para o cimento Portland de alto forno classe 25, decorridos 28 dias de cura.

O presente estudo mostrou então, ser tecnicamente viável a produção de um cimento tipo Portland a partir de altas adições de escória moída de alto forno, no mesmo nível de resistência à compressão dos atuais cimentos Portland Tipo III Classe 25. No caso da mistura ativada [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado], com os ajustes no ativador mencionados anteriormente, acredita-se que será possível, no âmbito de resistências a compressão, a produção e classificação do cimento com 85% de escória como cimentos Portland Tipo III Classe 32.

Tabela 4.1 – Resistência à compressão uniaxial por idades – argamassa padrão de cimento

Idades (dias)	CP IND (MPa)	CP 60% (MPa)	CP 85% (MPa)	CP 85% Ativado (MPa)	Taxa cresc. 85% at x 60% b (%)	Taxa cresc. 85% at x 85% b (%)
1	24,4	7,1	1,8	9,7	37%	439%
3	37,4	16,9	8,8	15,4	-9%	75%
7	41,8	28,1	16,6	19,8	-30%	19%
28	50,7	42,6	24,4	24,6	-42%	1%
91	58,5	48,9	28,2	30,4	-38%	8%

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a evolução das resistências em função das idades e a taxa de crescimento.

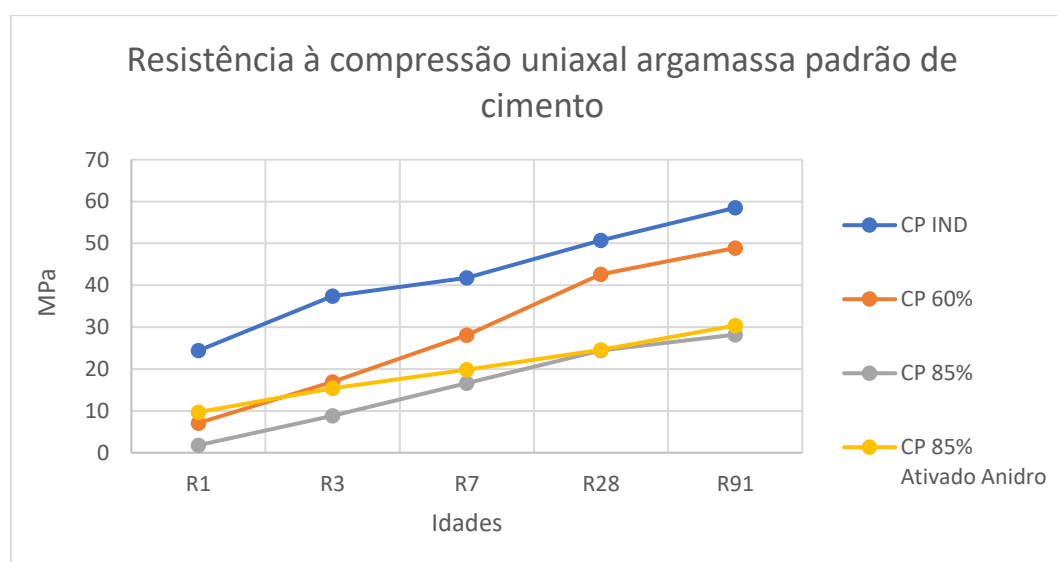


Figura 4.1 – Resistência à compressão uniaxial argamassa padrão de cimento.

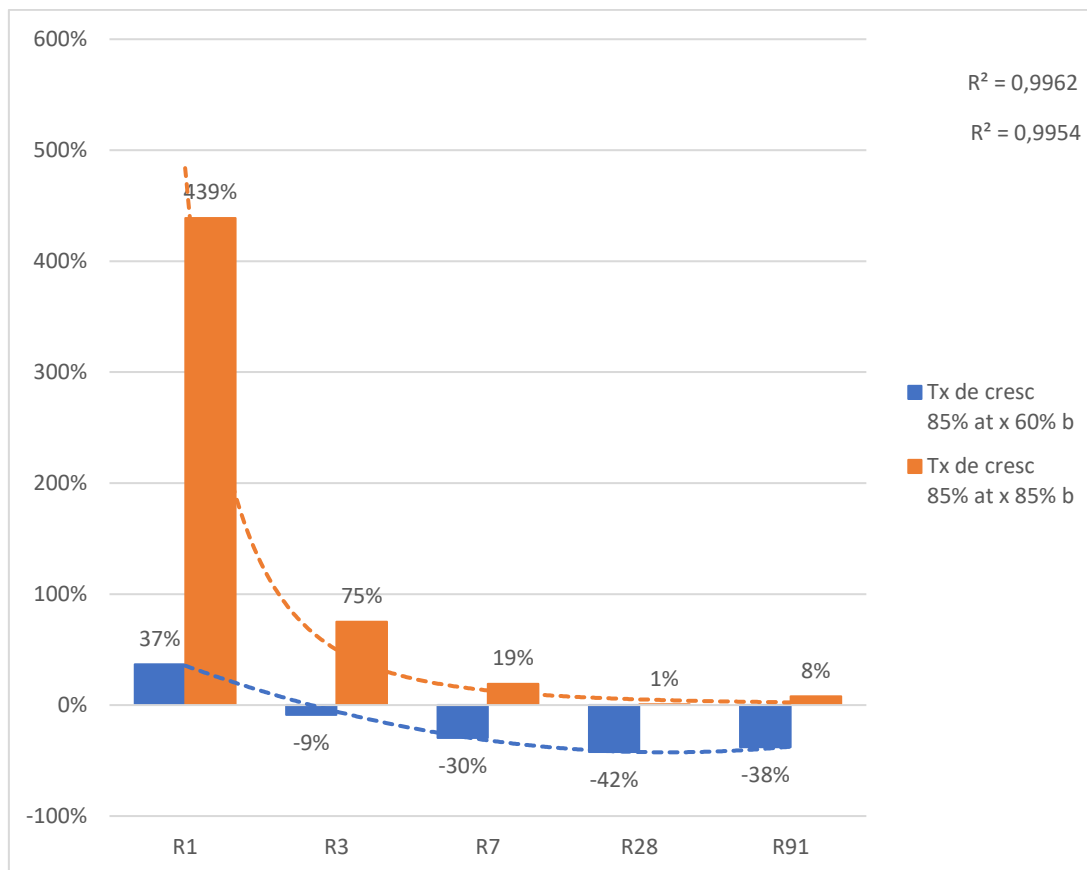


Figura 4.2 – Taxa de crescimento entre misturas argamassa padrão cimento.

4.2 Resistência à Compressão Uniaxial em Concreto

Foram feitos experimentos em concreto com o intuito de confirmar os resultados na argamassa padrão de cimento. Os ensaios de abatimento de tronco de cone foram realizados após cada mistura para definir a trabalhabilidade dos concretos. O estudo no estado fresco demonstrou que o comportamento de trabalhabilidade não sofreu alteração quando variado o percentual de EMO e a inclusão do ativador alcalino na mistura de 85% de EMO.

Estudos em concreto utilizando ativador alcalino (silicato de sódio) e uma mistura de escória de alto forno, cimento Portland, pozolana e agregados, apresentaram perda de trabalhabilidade no estado fresco dificultando o lançamento nas formas para moldagem dos corpos de prova. Isto pode ser atribuído à alta demanda de água da pozolana causada por sua alta porosidade e utilização de aditivo de concreto superplastificante em baixas dosagens. A trabalhabilidade pode ser melhorada com o uso de superplastificantes em dosagens e mais adequados ao traço em questão (MENGASINI et al, 2021).

Segundo Wardhono et al. (2015) é possível fazer um concreto com 100% de escória granulada de alto forno. Esse estudo usou como ativador um mix de silicato de sódio e hidróxido de sódio e obteve os resultados de resistência a compressão crescentes de 3 (33 MPa) até 14 dias (44 MPa), porém ocorreu uma queda na resistência em 28 dias (39 MPa). Essa diminuição pode ser explicada por microfissuras que aumentam conforme o passar do tempo e aumento da porosidade da matriz cimentícia confirmada pelo aumento da absorção de água e diminuição do pulso ultrassônico.

Os dados da tabela 4.2 demonstram que toda a água do traço foi utilizada e que os abatimentos dos concretos permanecem os mesmos.

Tabela 4.2 – Abatimento e consumo de água – concreto

Idades (dias)	Traço 1 (60% de Escória)	Traço 2 (85% de Escória)	Traço 3 (85% de Escória e 7,5% de ativador)
Slump Inicial	190	185	190
Slump Final	115	115	110
Água final	204	204	204
Rel. a/c	0,68	0,68	0,68

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de abatimento para cada traço. Não ocorreu perda de trabalhabilidade devido a inclusão de ativador, mesmo com o aumento de liberação de energia nas primeiras horas conforme será demonstrado nos resultados de calorimetria do item 4.4.



Figura 4.3 – Slump Test concreto com 60% de EMO.



Figura 4.4 – *Slump Test* concreto com 85% de EMO.

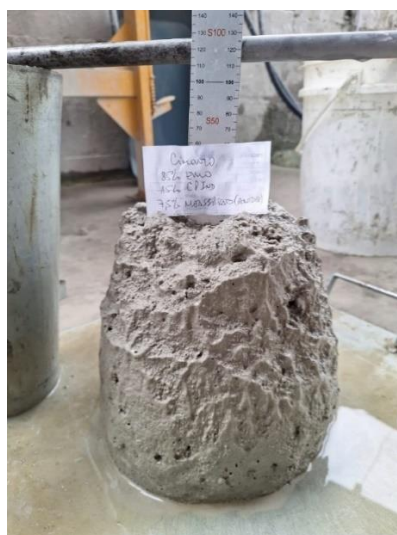


Figura 4.5 – *Slump Test* concreto com 85% de EMO com 7,5% de ativador.

Os estudos no estado endurecido demonstraram uma variação acentuada nas resistências como verificado anteriormente nos ensaios da argamassa padrão de cimento.

Segundo Mengasini et al. (2021) traços de concreto feitos com CP apresentaram resultados de resistência a compressão em 3 dias (48 MPa) levemente melhores que as misturas de EMO + ativador (silicato de sódio) (37 MPa) e EMO + Pozolana + ativador (silicato de sódio) (47 MPa). Aos 28 dias houve crescimento em relação a 3 dias. A taxa de crescimento de 3 para 28 dias foi considerável a saber, CP 15% de crescimento, EMO + ativador 43% e EMO + Pozolana + ativador 11 %.

A diminuição percentual é maior em 1 dia quando compara-se CP 60% EMO branco x CP 85% EMO branco queda de 89% e em 28 dias essa queda fica menos expressiva queda de 27%. Já quando comparado o CP 60% EMO branco com o CP 85% EMO ativado em 1 dia ocorreu crescimento de 221%, o que pode ser explicado pela aceleração da formação dos hidratos, mesmo fenômeno verificado na argamassa padrão de cimento. Em 28 dias ocorreu uma perda elevada de resistência como visto da mesma forma na argamassa padrão de cimento (CP 60% EMO branco x CP 85% EMO ativado queda de 46%).

Quando analisado os resultados na Tabela 4.3, a elevada liberação de energia com a alta liberação de íons Na^+ e a alteração da relação água cimento apresentaram um excelente resultado comparativo em 1 dia, porém ocorreu uma perda significativa em desempenho de resistência em 7 e 28 dias conforme as Figuras 4.6 e 4.7.

A diferença entre o estudo de Mengasini et al. (2021) e o presente trabalho em termos de ganho de resistência de 3 para 28 dias pode ser influenciado na relação de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ que em Mengasini foi de 2 e no presente trabalho foi de 1.

Tabela 4.3 – Resistência a compressão uniaxial por idades – concreto

Idades (dias)	Traço 1 (60% de Escória)	Traço 2 (85% de Escória)	Traço 3	Taxa cresc. 85% at x 60% b (%)	Taxa cresc. 85% at x 85% b (%)
			(85% de Escória e 7,5% de ativador)		
1	1,9	0,2	4,2	221%	2000%
7	14,3	12,6	9	-37%	-29%
28	26,1	19,1	14	-46%	-27%

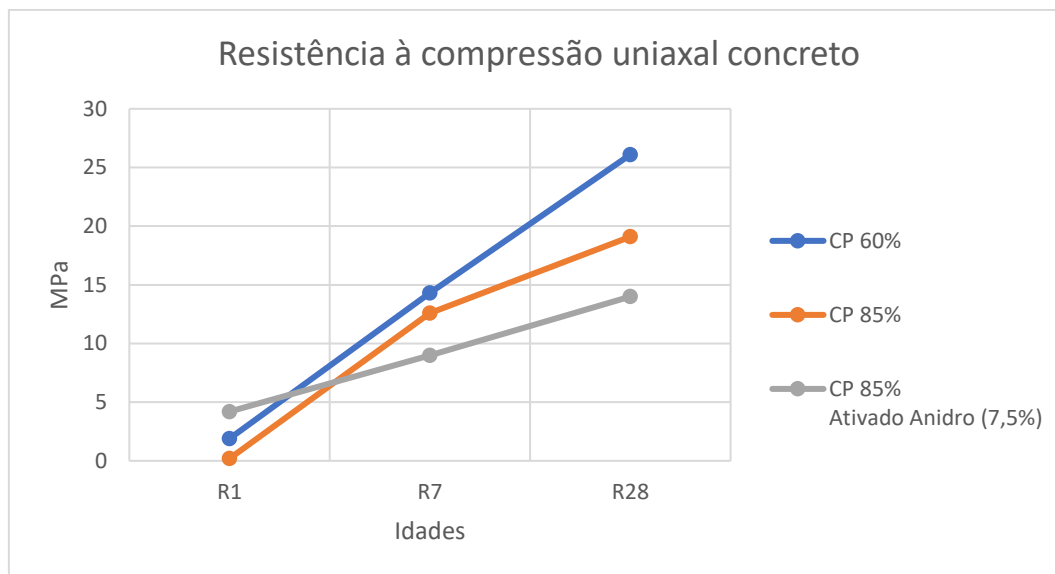


Figura 4.6 – Resistência à compressão uniaxial concreto.

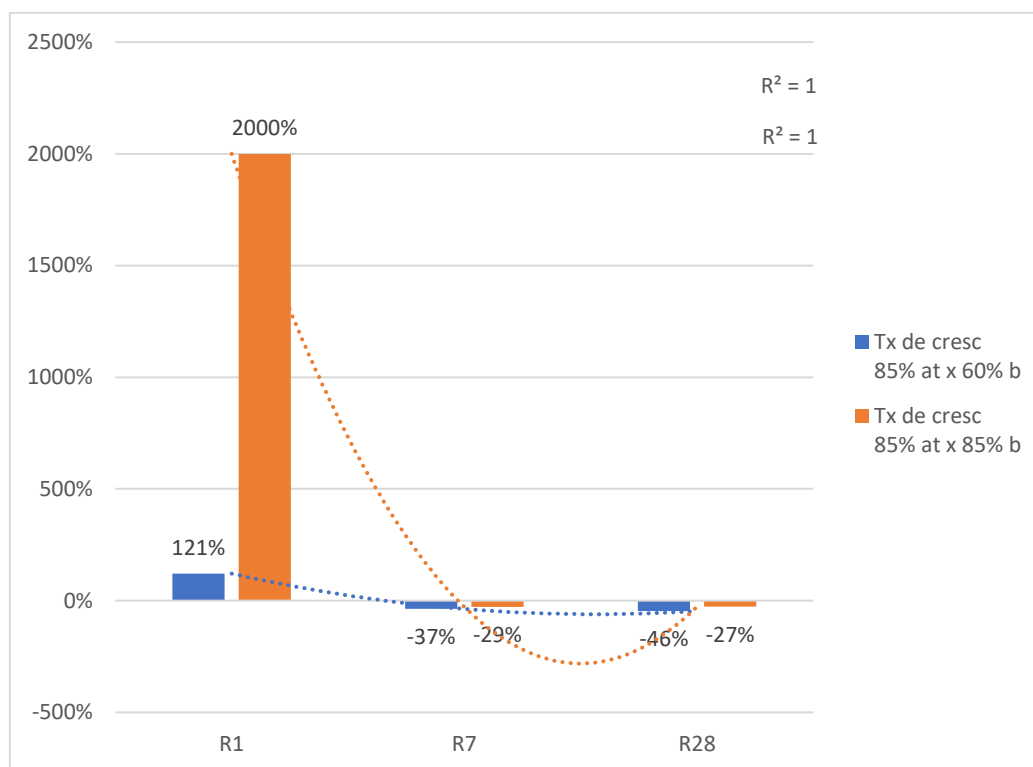


Figura 4.7 – Taxa de crescimento entre misturas concreto.

O traço de concreto com o CP 60% EMO branco (CP Classe 32) atingiu a resistência mínima proposta que era de 25 MPa, e apresentou um comportamento adequado atingindo 57% da resistência em 7 dias e uma taxa de crescimento de 7 para 28 dias de 82%. Essa classe de cimento tem grande resistência na comercialização para preparação de concretos de mercado, pois o consumo de cimento por metro cúbico

aumenta em média 10 a 15% em comparação quando se utiliza um cimento Classe 40 de resistência.

4.3 Granulometria a Laser Comparativa

De acordo com os ensaios de granulometria a laser comparativa entre o cimento, escória moída e ativador alcalino, fica claro que o tamanho das partículas pode ter influência na reatividade das misturas. Como o ativador entra em um percentual relativamente considerável, 7,5% em relação a mistura total, duas soluções seriam possíveis: a primeira seria a moagem do ativador até atingir a granulometria mais próxima do ideal. Essa solução poderia levar a redução do percentual para um nível de 0,5 a 1%, os quais apresentaram resultados mais satisfatórios segundo Zhang (2020). A segunda solução, utilizada nesse trabalho, é a dissolução do ativador na água de amassamento da argamassa padrão de cimento e do concreto, o que demonstrado nos ensaios de concreto não afetaram a trabalhabilidade das misturas. Na Figura 4.8 a análise granulométrica comparativa, demonstra que o CP IND e a escória moída (EMO) estão concentrados entre a faixa granulométrica de 10 a 20 microns e já o ativador, metassilicato de sódio se concentra com o seu pico máximo a 300 microns, aproximadamente 10 vezes maior.

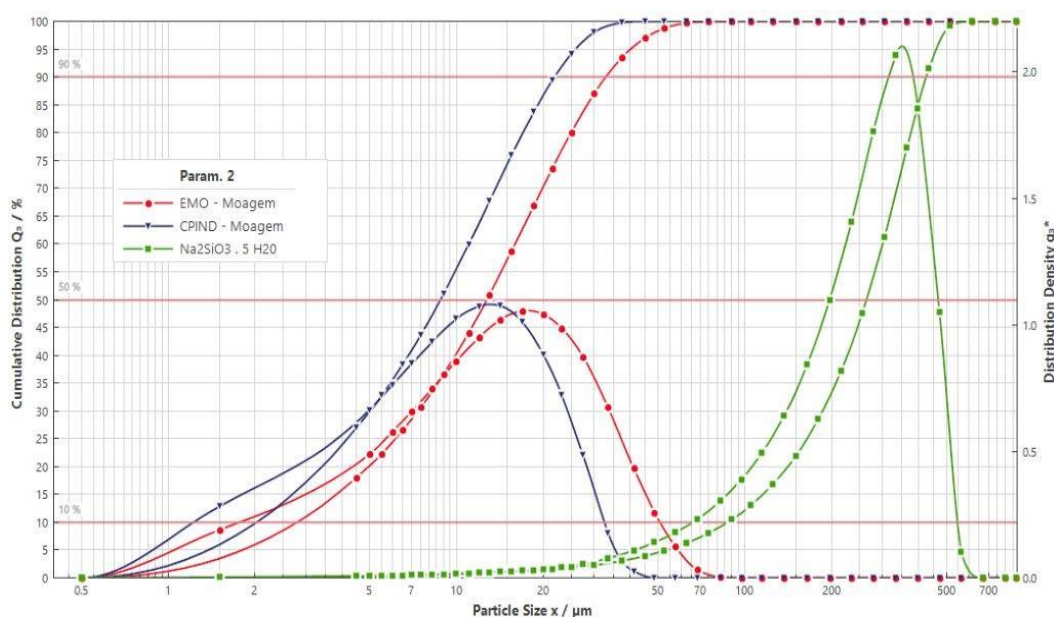


Figura 4.8 – Análise granulométrica a laser comparativa.

4.4 Calorimetria

O mecanismo de hidratação da escória moída de alto forno (EMO) diferencia-se dos cimentos Portland (CP). Ao misturar a escória em água, a hidratação inicial é muito mais lenta do que o cimento Portland quando misturado com água. Ao produzir um sistema binário (cimento Portland comum + escória) essa mistura aumenta a complexidade do processo de hidratação, pois agora a hidratação da EMO depende da quebra e dissolução da estrutura vítrea da escória pelos íons OH^- liberados durante a hidratação do CP, com fonte principal do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e do conteúdo alcalino no cimento Portland (SAJEDI, 2010).

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram os resultados das curvas de calorimetria isotérmica e calor acumulado em Joules. A análise dos hidratos formados nas misturas de CPIND branco, CP 60% EMO branco, CP 85% EMO branco e CP 85% EMO aditivado com 7,5% de metassilicato de sódio, foi feita pelo ensaio de calorimetria isotérmica como descrito no item 3.2.5 e os resultados corroboram que, o uso de ativadores antecipa o pico da primeira etapa ou pré-indução. O cimento entra imediatamente em contato com a água acarretando uma rápida dissolução dos íons Na^+ formando os primeiros hidratos e a etringita, os quais liberam uma grande quantidade de calor muito rápido acelerando as reações de hidratação e se precipitam na superfície dos grãos de cimento, podendo gerar um impedimento físico e obstruir a chegada da água nos grãos restantes do cimento não hidratados (HEWLETT, 2019).

A curva em marrom correspondente ao CP IND (sem escória) apresentou um formato padrão, com os picos de aluminatos e silicatos bem definidos e condizentes com curvas padrão (SANDBERG, 2008). Ao acrescentar e variar os percentuais de adição de escória, curvas em verde e roxo respectivamente, os picos de aluminatos e silicatos variam ficando mais alongados com uma dissociação mais lenta e diminuição da liberação do calor significativamente. Essas curvas tem as etapas mais suaves e em períodos mais extensos, entre 6 e 12 horas o que permite a formação com mais perfeição dos hidratos e aumento das resistências progressivamente. A taxa de hidratação do C_3S aumenta e a formação do C-S-H começa a aparecer aumentando as resistências. Após 12 horas ocorre a liberação máxima de calor, o que pode ser considerado como o fim de pega do cimento (SANDBERG, 2008).

A curva em preto corresponde a mistura de 85% de EMO com ativador, pode-se verificar uma aceleração na liberação de energia apresentando um pico de pré-indução

(aluminatos) em 2 horas, já o período de aceleração, é o período mais significativo na construção das resistências onde praticamente todos os hidratos são formados, no caso da curva em preto esse período é muito curto o que compromete na formação dos silicatos e nos ganhos de resistências tardias.

Essa aceleração em formação dos hidratos iniciais e da alta concentração de íons Na^+ oriundos do silicato de sódio apresentam ótimos resultados em resistências nas primeiras idades como 1 e 3 dias, porém podem influenciar no desenvolvimento das resistências em idades posteriores como 7, 28 e 91 dias, por exemplo, pois a etringita que se formou, nas primeiras horas, ao redor dos grãos de cimento reduzindo a capacidade de hidratação total destes grãos, limita o ganho de resistência em idades mais avançadas. Uma possível solução seria a redução do percentual do ativador para verificar se a hidratação ocorreria mais lentamente e a formação dos cristais de C-S-H fossem mais bem formados aumentando assim possivelmente as resistências finais.

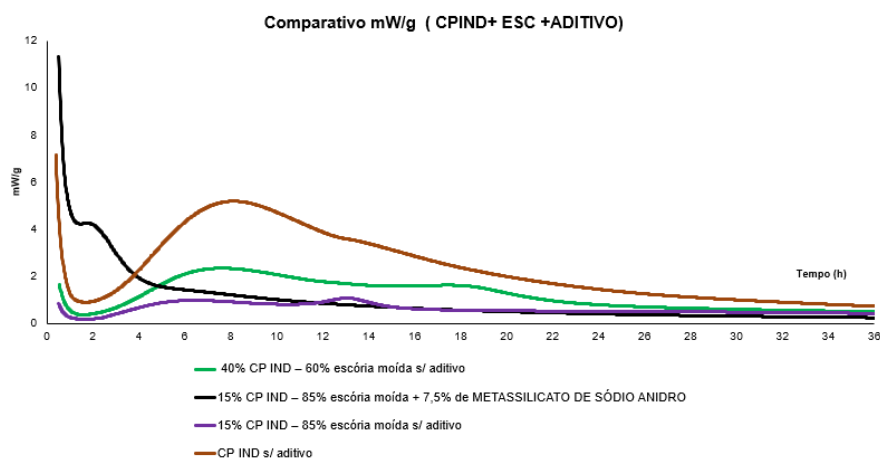


Figura 4.9 – Curvas de calorimetria isotérmica.

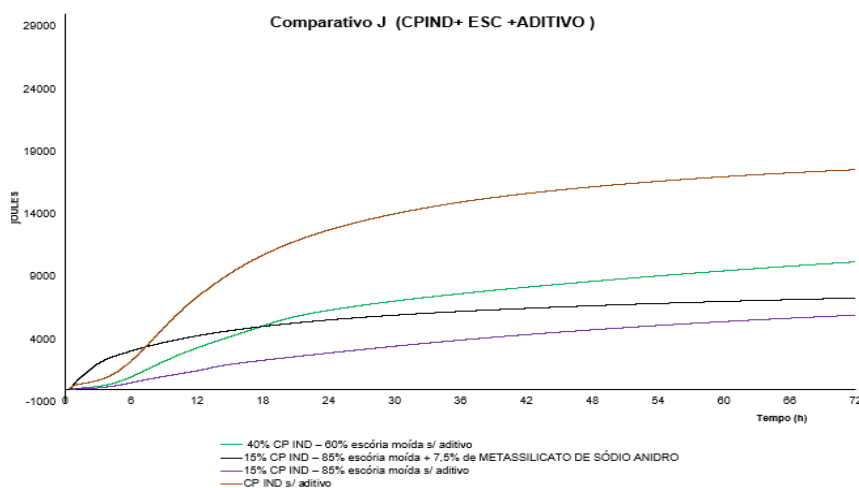


Figura 4.10 – Curva de calor acumulado em Joules.

5 CONCLUSÃO

Comparativamente ambas as misturas [15% Cimento CP IND + 85 % EMO branco] e [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado], satisfizeram a condição de resistência da norma NBR 16697 exigida para os Cimentos Portland de alto forno Tipo III Classe 25 (Cimento Portland com adição de escória de alto forno), nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura.

Adicionalmente foi também possível constatar que a mistura com ativador [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado] está próxima de atender ao valor mínimo de resistência à compressão exigido pelo Cimento Portland de alto forno Tipo III Classe 32, mas somente aos 91 dias de cura. Uma nova mistura com uma granulometria do ativador mais próxima do CP IND e EMO e redução do percentual do ativador poderia ser proposta, para avaliar a possibilidade de se satisfazer esse limite, pois com a alta oferta de íons Na^+ na solução, o efeito da hidratação acelerada e formação de etringita e C-S-H nas primeiras horas foi acentuado, conforme demonstrado nos ensaios de calorimetria. Com isso pode ter acarretado um bloqueio físico, impedindo que a água entrasse em contato com o restante dos grãos de cimento dificultando a hidratação posterior o que poderia acarretar as baixas resistências nas idades avançadas.

Considerou-se de grande relevância ser possível concluir que tanto a mistura [15% Cimento CP IND + 85 % EMO branco] como a [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado], atenderam plenamente o limite mínimo admissível de resistência à compressão especificada pela norma NBR 16697 para o cimento Portland de alto forno classe 25, decorridos 28 dias de cura.

O presente estudo mostrou então, ser tecnicamente viável a produção de um cimento tipo Portland a partir de altas adições de escória moída de alto forno, no mesmo nível de resistência à compressão dos atuais cimentos Portland Tipo III Classe 25.

No caso da mistura ativada [15% Cimento CP IND + 85 % EMO ativado], com os ajustes no ativador mencionados anteriormente, acredita-se que será possível, no âmbito de resistências a compressão, a produção e classificação do cimento com 85% de escória como cimentos Portland Tipo III Classe 32.

6 RECOMENDAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalhos há algumas necessidades que poderiam ser melhor exploradas, como: analisar a microestrutura das misturas e a presença de fases amorfas com propriedades cimentícias que não hidrataram; analise nas misturas de pasta de cimento hidratadas para verificar a quantidade de etringita (AFt) e monossulfoaluminato (AFm) formados e se ocorreu um impedimento estérico da hidratação dos grãos e possivelmente uma diminuição na formação de C-S-H; analisar o tamanho e quantidade de poros nas misturas hidratadas e sua influência nas resistências em todas as idades; e por fim novas propostas com curva de dosagem em calorimetria variando dosagem do ativador assim como ensaios em concreto paralelamente, com as mesmas dosagens com o intuito de verificar se as resistências à compressão nas idades de 7 e 28 dias aumentam.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, Tanvir et al. Development of ECO-UHPC with very-low-C3A cement and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 284, p. 122787, 2021.

ALHADAS, M. F. S. et al. Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto. 2008.

ALMEIDA, G. M. de et al. Utilização de escória produzida em alto forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto. 2014.

ALMEIDA, J. Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte

ALZAZA, A. et al. Enhancing the hardened properties of blended cement paste cured at 0° C by using alkali-treated ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, v. 134, p. 104757, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C125 – 16 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

JOHN, V. M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP): Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo, Boletim Técnico BT-106, 2002.

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

_____. NBR 9778: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 7214: Areia Normal para ensaio de cimento - especificação. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 7215: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

BRASIL Mineral, 2024. <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/producao-brasileira-de-aco-tem-recuo-de-65-em-2023>

BELIZARIO-SILVA, F. et al. Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: uma ferramenta para incorporar indicadores ambientais na construção civil brasileira. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 19, p. 1-13, 2022.

BOIKOVA, A. I., A.I. Domansky, et al. The influence of Na₂O on the structure and Properties of 2CaO.Al₂O₃. Cement and Concrete Research, v.7, n.5, p. 483-492. 1977.

CESARI, V. F. et al. Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. 2015.

CHOTOLI, F. F. Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio: estudo em escala laboratorial. São Paulo, 2006. 170p. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios.

COSTA, E. B. da et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. *Ambiente Construído*, v. 13, p. 75-86, 2013.

DAVIDOVITS, J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. *Géopolymère '99 Conference Proceedings*. Saint-Quentin: Institut Géopolymère. 1999.

_____. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, v. 37, p. 1633-1656, 1991.

_____. Geopolymer cement: a review. Saint-Quentin: Institut Géopolymère. 2013.

DE ORNELAS, D. P. Viabilidade do uso de escória de alto forno na substituição parcial do cimento Portland em concreto usinado. *Repositório de Trabalhos de Conclusão de Curso*, 2021.

DE SOUZA JUNIOR, D. S. et al. Estudo do comportamento de escórias de alto forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação a quente. 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements. *Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009)*. Bath, Reino Unido: 2009.

FONSECA, G. C. da. Adições minerais e disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais

GIROTTI, L. S. Cinética da hidratação do aluminato tricálcico cúbico e ortorrômbico na primeira hora: estudo com fases cristalinas sintéticas e extraídas do clínquer Portland. 2018.

GOBBO, L. de A. Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, J. P. Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

HEWLETT, P.; LISKA, M. (Ed.). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann, 2019.

IEA and WBCSD (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

ILER, R. K. *The colloid chemistry of silica and silicates*. LWW, 1955.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. New York: Cambridge University Press, 2005.

JOSEPH, S.; CIZER, Ö. Hydration of hybrid cements at low temperatures: A study on portland cement-blast furnace slag—Na₂SO₄. *Materials*, v. 15, n. 5, p. 1914, 2022.

KELES, K. C. Influência da basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto. 2011.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, v. 42, i. 3, p. 729-746, 2007.

KIRCHHEIM, A. P. Aluminatos tricálcico cúbico e ortorrômbico: análise da hidratação in situ e produtos formados. 2008.

LANGARO, E. A. et al. Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LEEMANN, A. et al. Alkali silica reaction in concrete-Revealing the expansion mechanism by surface force measurements. *Cement and Concrete Research*, v. 176, p. 107392, 2024.

LI, G. et al. Ground granulated blast-furnace slag/fly ash blends activated by sodium carbonate at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, v. 291, p. 123378, 2021.

LIU, Y. et al. Preparation of sustainable and green cement-based composite binders with high-volume steel slag powder and ultrafine blast furnace slag powder. *Journal of cleaner production*, v. 289, p. 125133, 2021.

MARVILA, M. T. et al. Mechanical, physical and durability properties of activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of % Na₂O. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00723, 2021.

MASSUCATO, C. J. Utilização de escória de alto forno à carvão vegetal como adição no concreto, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais* – 3ª edição. São Paulo Ed.:IBRACON 2014. ISBN.: 978-85-98576-12-1;

MENGASINI, L.; MAVROULIDOU, M.; GUNN, M. J. Alkali-activated concrete mixes with ground granulated blast furnace slag and paper sludge ash in seawater environments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 20, p. 100380, 2021.

MORAES, R. da C. Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto. 2001. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

NEHRING, V. et al. Utilização da escória de alto forno em materiais cimentícios. *A Construção Civil em uma perspectiva econômica, ambiental e social*, v. 21, p. 323-330, 2021.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto - 5ª Edição*. Bookman Editora, 2015. ISBN.: 9788582603659

OMUR, T. et al. The effect of alkaline activators and sand ratio on the physico-mechanical properties of blast furnace slag based mortars. *Journal of Building Engineering*, v. 58, p. 104998, 2022.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, v. 22, ed. 7, 1305–1314 p. 2008a.

PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, M.T.; GRANIZO, M.L.; PUERTAS, F.; VAZQUEZ, T.; GRUTZEK, M.W. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 997-1004, 1999.

PILAR, R. et al. Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento Portland. 2012.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland-estudo em pasta. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RAKHIMOVA, N. R. et al. Blended Alkali-Activated Cements Based on Blast-Furnace Slag and Calcined Clays: Statistical Modeling and Effect of Amount and Chemistry of Reactive Phase. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 6, p. 04022112, 2022.

SAJEDI, F.; RAZAK, H. A. The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars. *Construction and building materials*, v. 24, n. 10, p. 1944-1951, 2010.

SANDBERG, P.; BENINI, H. O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais. *Revista Concreto*, v. 51, p. 36-40, 2008.

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

SENFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. Hidratação do cimento CP V ARI-RS: Influência da água nas reações de hidratação. In: *Congresso brasileiro de cerâmica*. 2005. p. 1-12.

SETIÉN, J.; H, D.; G, J.J.; Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Construction and Building Materials*, v.23, p. 17881794, 2009.

SNIC Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019 64 p.

SOUZA, J. M. de. Estudo do comportamento químico durante a formação de anéis de clínquer em fábrica de cimento. 2009.

TASHIMA, M. M. Cinza de casca de arroz altamente reativa:método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 470p. ISBN: 0 7277 2592 0.

TENÓRIO, J. A. S. et al. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland-Parte I: Alita Pura. REM: Revista Escola de Minas, v. 56, p. 87-90, 2003.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 4, p. 431–442, abr. 2012.

WARDHONO, A.; LAW, D. W.; STRANO, A.. The strength of alkali-activated slag/fly ash mortar blends at ambient temperature. Procedia Engineering, v. 125, p. 650-656, 2015.

WORLD STEEL ASSOCIATION. 2020 World Steel in Figures. Belgium: [s.n.].

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of the alkalis metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineer Aspects, v. 216, p. 27-44, 2003.

ZHAI, Q.; KURUMISAWA, K.. Effect of accelerators on Ca (OH) 2 activated ground granulated blast-furnace slag at low curing temperature. Cement and concrete composites, v. 124, p. 104272, 2021.

ZHANG, J. et al. Activation effects and micro quantitative characterization of high-volume ground granulated blast furnace slag in cement-based composites. Cement and Concrete Composites, v. 109, p. 103556, 2020.

ŽIVICA, V. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. Construction and Building Materials, v. 21, n. 7, p. 1463-1469, 2007.