

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VICTÓRIA DE LIMA MOCHIZUKI

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS CRISTALINAS NA ENERGIA DE
PRODUÇÃO DE CLÍNQUER E CIMENTO PORTLAND**

JOÃO PESSOA
2022

VICTÓRIA DE LIMA MOCHIZUKI

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS CRISTALINAS NA ENERGIA DE
PRODUÇÃO DE CLÍNQUER E CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica da Universidade Federal da Paraíba para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Sandro Marden Torres.

JOÃO PESSOA
2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M688e Mochizuki, Victória de Lima.

Efeito da distribuição de partículas cristalinas na energia de produção de clínquer e Cimento Portland / Victória de Lima Mochizuki. - João Pessoa, 2022.

75 f. : il.

Orientação: Sandro Marden Torres.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Cimento. 2. Clínquer. 3. Enxofre. 4. Alita. I. Torres, Sandro. II. Título.

UFPB/BC

CDU 691.54(043)

VICTÓRIA DE LIMA MOCHIZUKI

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS CRISTALINAS NA ENERGIA DE
PRODUÇÃO DE CLÍNQUER E CIMENTO PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

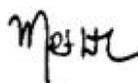
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Sandro Marden Torres – PPGEM/CT/UFPB
Orientador



Prof. Dr. Rodinei Medeiros Gomes – PPGEM/UFPB
Examinador interno 1



Prof. Dr. Marçal Rosas – PPCEM/CT/UFPB
Examinador externo 1

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha existência e por estar ao lado das pessoas certas e no lugar certo.

A minha mãe pelo amor incondicional, por estar ao meu lado e torcendo por mim a todo momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sandro, pela excelente orientação, direcionamento, disponibilidade e oportunidade de estar em uma pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Marçal Rosas, pela orientação e suporte na produção do artigo científico.

Ao Mr. Wesley Maciel, pela contribuição no tratamento dos dados, na construção dos gráficos, disponibilidade e suporte na etapa final do trabalho.

Ao meu amigo Mr. Degmar Diniz, por todas as oportunidades que até hoje já me concedeu e por todos os conhecimentos passados.

Ao meu amigo Mr. Vilmar Manoel, por ter sido a minha primeira porta de entrada no ramo cimenteiro, por todos os ensinamentos desde o estágio, por todo o apoio profissional e emocional.

Ao meu amigo José Ailton, por ter me apoiado e ajudado em toda a parte laboratorial, além de ter disponibilizado sua equipe e laboratório da fábrica para realizar os ensaios químicos e físicos dos testes industriais e laboratoriais.

Ao meu amigo Wellington Delmiro, pelo apoio e pela disponibilização da equipe para o desenvolvimento do mix de coque para realização dos testes industriais.

Ao meu amigo Genilson Paiva, por ter disponibilizado a equipe de operação para realizar os testes industriais no forno.

A minha equipe Moagem de Cimento, pelo empenho em garantir a eficiência dos testes industriais.

Ao técnico Ricardo, pelo apoio e a valiosa ajuda na execução dos ensaios de DRX.

A minha namorada Alyne e minha querida irmã Valentina, por sempre acreditar no meu potencial e me segurar nos momentos mais difíceis.

RESUMO

A indústria de cimento é regida por três pilares, redução de consumo de energia, substituição térmica por resíduos alternativos e competitividade no mercado. Para se alcançar bons resultados, faz-se necessário investir em tecnologia e ciência. O trabalho mostra como a ciência pode contribuir para se alcançar resultados industriais. A metodologia foi dividida em três etapas, sendo elas, duas industriais e uma laboratorial. Na etapa industrial foram realizadas quatro operações, sendo duas no forno e duas na moagem de cimento, todas as operações foram registradas, coletadas e analisadas, sendo possível realizar um comparativo do desempenho com a mudança do %SO₃ na chama. Já na etapa laboratorial, foi desenvolvida uma metodologia com o moinho de anéis para comparar a moabilidade de clínques com diferentes tamanhos de diâmetros de C₃S. De acordo com todos os dados obtidos, foi possível concluir que o enxofre contribui positivamente na qualidade do clínquer. Além disso, se esse clínquer com alto teor de enxofre resultar em um diâmetro de C₃S abaixo de 27 µm, haverá um alto desempenho na moagem de cimento.

Palavras-chave: Clínquer; Cimento; Eficiência; Enxofre; Alita.

ABSTRACT

The cement industry is ruled by three pillars, the reduction of energy consumption, thermal substitution by alternative residues and market competitiveness. To achieve good results, it is necessary to invest in technology and science. This dissertation explains how science can contribute to achieving industrial results. The methodology was divided in three steps, two industrial and one laboratory. At the industrial step, four operations were executed, two in the kiln and two in the cement grinding, all operations were recorded, collected and analyzed, making possible to compare the performance with the variation of %SO₃ in the flame. In the laboratory step, it was developed a methodology with the mill rings to compare the grinding of clinkers with different sizes of C₃S diameters. According to all the obtained data, it was possible to conclude that the sulfur contributes positively to the quality of the clinker. Also, if this high sulfur clinker results in a C₃S diameter below 27 μm, there will be a high performance in the cement grinding.

Keywords: Clinker; Cement; Efficiency ;Sulfur; Alite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma da fabricação de cimento	3
Figura 2 Extração da Mina de calcário	4
Figura 3 Caminhão descarregando calcário para o britador.	5
Figura 4 Pilha de Calcário Britado.	5
Figura 5 Esquema de funcionamento de um moinho vertical de rolos.	7
Figura 6 Fluxograma Operacional Torre de Ciclones.	8
Figura 7 Resfriador de clínquer	11
Figura 8 Distribuição do Consumo de Energia Elétrica em Fábrica de Cimento.....	12
Figura 9 Fluxograma da produção da moagem de cimento.....	13
Figura 10 Formação dos cristais com o gradiente de temperatura	14
Figura 11 Morfologia dos minerais de clínquer	15
Figura 12 Aspecto do clínquer ao microscópio destacando os cristais idiomórficos de alita (A).....	16
Figura 13 Temperaturas das transições polimórficas do silicato tricálcico puro. T=triclínico, M=monoclínico e R=romboédrico.	17
Figura 14 Forma polimórfica do C3S em função do MgO e SO ₃	18
Figura 15 Cristais arredondados de belita. A=Alita B=Belita F=fase intersticial.	19
Figura 16 Zona Belítica.	19
Figura 17 Esquema de Modificações Cristalográficas do C2S.	20
Figura 18 Detalhe da fase intersticial do clínquer mostrando cristais ortorrômnicos de C3A (C). E=C4AF e A=Alita.	21
Figura 19 Esquema ilustrativo do fenômeno de difração de raios X.....	22
Figura 20 Fluxograma do resumo geral da metodologia.	24
Figura 21 Máquina de fusão elétrica.	26
Figura 22 Equipamentos Utilizados para Análise Química: Axios – Cement - Max – Panalytical.	26
Figura 23 Conjunto de filtrantes e tituladores para realizar o ensaio de Cal Livre.	27
Figura 24 Mufla para ensaio de Perda ao Fogo.	27
Figura 25 Moinho de anéis.	28
Figura 26 DRX – Modelo D2 PHASER - BRUKER.	28
Figura 27 Misturador mecânico de argamassa	29
Figura 28 Corpos de prova para o ensaio de resistência.....	30
Figura 29 Máquina de compressão para ensaio de resistência.	30
Figura 30 Conjunto de materiais para realizar o capeamento de enxofre no corpo de prova. .	30
Figura 31 Tanque de cura.	31
Figura 32 Câmara úmida.	31
Figura 33 Granulômetro Laser.	32
Figura 34 Equipamentos para a Preparação e Análise Microscópica.....	32
Figura 35 Peneirador aerodinâmico.....	33
Figura 36 Britador de mandíbulas laboratorial.....	33
Figura 37 Fluxograma resumo do ensaio do teste de moabilidade do clínquer.	34
Figura 38 Distribuições Normais do FSC utilizado para os testes.	35
Figura 39 Distribuições Normais do MS utilizado para os testes.....	35

Figura 40 Distribuições Normais do MA utilizado os testes.....	36
Figura 41 Distribuições Normais da pesagem do coque nos testes.....	36
Figura 42 Distribuições Normais do peso do SO ₃ nos testes.....	37
Figura 43 Curvas de distribuição normal do %SO ₃ do clínquer durante os testes.	37
Figura 44 Curvas de distribuição normal da Produtividade do Forno durante os testes.	38
Figura 45 Curvas de distribuição normal do Consumo Específico de Energia durante os testes.	38
Figura 46 Curvas de distribuição normal da Temperatura de Zona de Queima nos dois testes.	39
Figura 47 Curvas de distribuição normal do Peso Litro dos clínqueres produzidos nos dois testes.	40
Figura 48 Curvas de distribuição normal da produtividade do moinho nos dois testes.	41
Figura 49 Curva de distribuição normal da rotação do separador nos dois testes.....	42
Figura 50 Curvas de distribuição normal do Consumo Específico de Energia dos testes.	43
Figura 51 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO ₃ com várias zonas de porosidade.....	43
Figura 52 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO ₃ com muitos cristais de C3S.	44
Figura 53 Microscopia óptica (20x) do clínquer amostra Alto SO ₃ com cristais de C3S bem definidos.	44
Figura 54 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO ₃	45
Figura 55 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO ₃ com zonas de belita.....	45
Figura 56 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO ₃ com C3S, C2S e poros. ..	46
Figura 57 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Baixo SO ₃	46
Figura 58 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Baixo SO ₃	47
Figura 59 Microscopia Óptica (20x) do clínquer amostra Baixo SO ₃	47
Figura 60 Curvas de distribuição normal dos diâmetros dos cristais de C3S dos clínqueres dos testes.	48
Figura 61 Curvas de distribuição granulométrica dos dois cimentos dos testes industriais. (Azul – cimento com clínquer “Baixo SO ₃ ”, Vermelho – cimento com clínquer “Alto SO ₃ ”)	49
Figura 62 Curvas Granulométricas das amostras do 1º semestre.....	52
Figura 63 Curvas Granulométricas dos ensaios do 2º semestre.	53
Figura 64 Gráfico demonstrativo da influência do diâmetro de C3S no tempo de moagem. ..	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais reações do processo de sinterização do clínquer (CENTUORINE, 1993).	9
Tabela 2 Dados do Refinamento Rietveld com Software TOPAS.....	40
Tabela 3 Resultado do Polimorfismo das Amostras.....	40
Tabela 4 Resultados das análises físicas dos cimentos dos testes industriais.	48
Tabela 5 Distribuição Granulométrica das Amostras.....	49
Tabela 6 Dimensões características e parâmetros de RRSB.	50
Tabela 7 Resultado de FRX das amostras escolhidas.....	51
Tabela 8 Resultado FRX das amostras escolhidas do 2º semestre.	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abreviações utilizadas para fórmulas químicas:

S = SiO₂; A = Al₂O₃; C = CaO; H = H₂O; F = Fe₂O₃

Abreviações:

Cal livre – Óxido de cálcio livre que não reagiu

Cru – Farinha que passará pela queima para se transformar em clínquer

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

C₃S - Silicato Tricálcico (3CaO.SiO₂)

C₂S - Silicato Bicálcio (2CaO.SiO₂)

DRX - Difração de Raio X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

FRX – Fluorescência de Raio-X

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

FSC – Fator de Saturação de Cálcio.

MS – Módulo de sílica

MA – Modulo de Alumínio.

F.L. – Fase Líquida.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	ASPECTOS TEÓRICOS	3
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	3
2.1.1	MINERAÇÃO E BRITAGEM.....	4
2.1.2	PRODUÇÃO DE FARINHA	6
2.1.3	PRODUÇÃO DE CLÍNQUER.....	8
2.1.4	PRODUÇÃO DE CIMENTO.....	11
2.2	MINERALOGIA DO CLÍNQUER	13
2.2.1	ALITA (C3S).....	16
2.2.2	BELITA (C2S)	18
2.2.3	ALUMINATO TRICÁLCICO (C3A)	20
2.2.4	ALUMINATO TRICÁLCICO (C4AF)	21
2.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	21
2.3.1	MÉTODO DE RIETVELD	22
2.4	PARÂMETROS DE QUEBRA DE CLÍNQUER	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	TESTES INDUSTRIAIS	25
3.1.1	ENSAIOS QUÍMICOS	26
3.1.2	ENSAIOS FÍSICOS	29
3.1.3	TESTE DE MOABILIDADE DO CLÍNQUER EM MOINHO DE ANEIS	33
4	RESULTADOS	35
4.1	TESTE INDUSTRIAL	35
4.1.1	TESTE INDUSTRIAL NO FORNO	37
4.1.2	TESTE INDUSTRIAL NA MOAGEM DE CIMENTO.....	41
4.1.3	MICROSCOPIA ÓPTICA	43
4.1.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA.....	48
4.1.5	GRANULOMETRIA LASER.....	49
4.2	TESTE LABORATORIAL	51
5	CONCLUSÃO	54
6	REFERÊNCIAS	55
7	ANEXOS.....	59

7.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRIA A LASER.....	59
7.1. DIFRATOGRAMAS REFINADOS COM USO DO SOFTWARE TOPAS.	64

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de cimento se iniciou antes do século XVIII e somente foi patenteada em 1830 pelo inglês Joseph Aspdin, que o chamou de “Cimento Portland”. Esse material é composto por majoritariamente clínquer, componente responsável pela resistência, seguido de adições em proporções a depender do tipo de cimento a ser produzido.

Os silicatos na indústria cimenteira são matérias primas fundamentais para a fabricação do clínquer, eles participam da composição da farinha (mistura crua) para a formação dos principais cristais do clínquer. Alguns aspectos como pureza, características geológicas e dimensão de suas partículas, exercem grande influência em todo o processo de fabricação, não só no tocante ao desgaste por abrasão e consumo elétrico na moagem de cru, mas também ao consumo térmico do forno, pois afeta a estrutura cristalina do clínquer, influenciando, conseqüentemente, o comportamento da moagem do cimento, o desempenho das resistências mecânicas e outras características do cimento (F.L. SMIDTH INSTITUTE - 2006).

A estrutura cristalina e a morfologia do clínquer recebem não só influência da matéria-prima como também dos parâmetros de processo na etapa de sinterização e resfriamento. Essas características influenciam desde o consumo térmico do clínquer até ao consumo de energia da moagem de cimento.

O foco do trabalho é estudar o efeito da distribuição de partículas cristalinas na energia de produção do clínquer e de cimento Portland. De modo geral, o estudo gira em torno de respostas da influência da dimensão do cristal de C3S, da morfologia predominante do clínquer e da qualidade do produto resultante da moagem de cimento.

É de se esperar nesse estudo como consequência das variações, impactos significativos tanto em consumo específico de energia, já que a moagem de cimento é onde tem a maior concentração de consumo de energia na fábrica de cimento, como também na resistência final do produto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a influência do teor de SO_3 na chama na operação do forno, nas características físico-químicas do clínquer e os impactos na performance da moagem de cimento com os clínqueres resultantes, sobretudo no aspecto energético. Além disso, analisar laboratorialmente a influência do diâmetro médio do cristal de C_3S no poder de moagem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a operação do forno nas condições distintas de teor de enxofre no combustível;
- Investigar a microscopia e a morfologia dos clínqueres produzidos;
- Avaliar o impacto na mudança do clínquer na performance da moagem de cimento e no consumo de energia;
- Realizar comparativo a partir ensaios químicos e físicos dos cimentos dos testes;
- Realizar ensaios no moinho de anéis para avaliar a influência do diâmetro médio do cristal de C_3S na moabilidade do clínquer

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

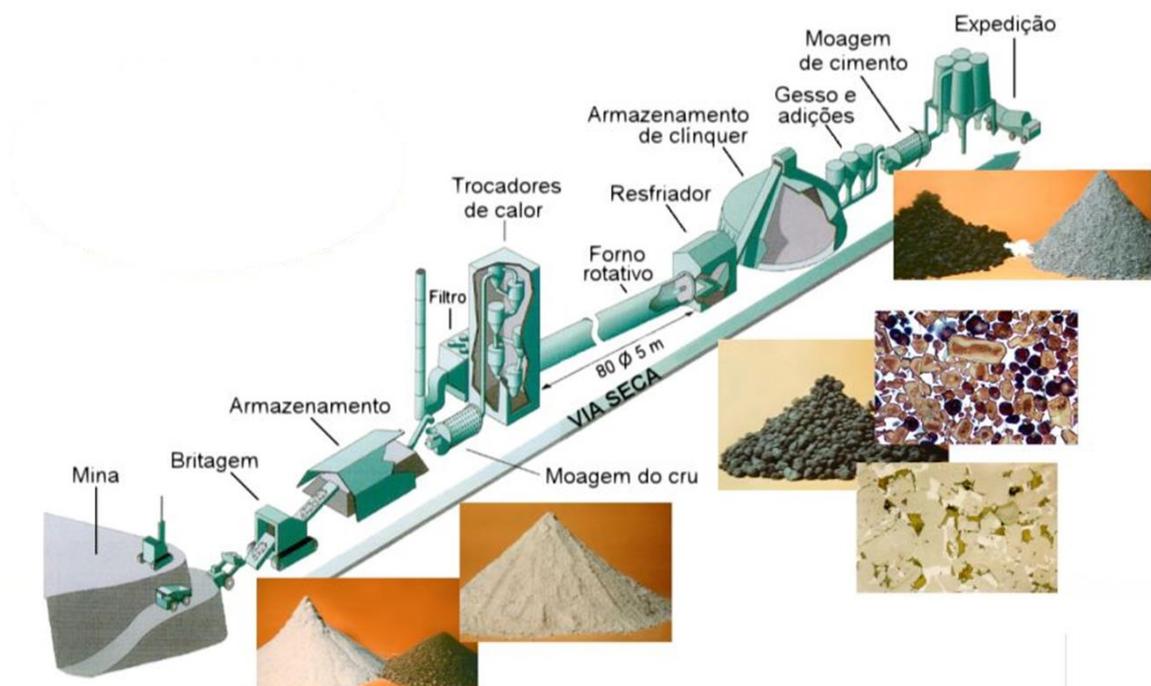
De forma geral, a fabricação de cimento é baseada em cinco grandes fases que são: mineração, produção de farinha, produção de clínquer, produção de cimento e, por fim, a expedição. Cada estágio do processo envolve um conjunto de operações unitárias as quais, são responsáveis pelas transformações físico-químicas das matérias-primas, desde o estado original (calcário, argilas e outros materiais corretivos e aditivos), até o estado final (cimento).

O principal componente do cimento é o clínquer, que nada mais é do que a sinterização de matérias-primas ricas em calcário, sílica, ferro e alumínio. A formação desse componente acontece dentro de um forno horizontal rotativo constituído de um pré-aquecedor de cinco estágios.

Após a formação do clínquer, ele é resfriado e direcionado para a moagem de cimento onde será adicionado, além do clínquer, gesso e adições dentro de um moinho de bolas.

Após produzir o cimento, esse produto será direcionado para um silo onde será expedido a granel ou ensacado. Segue abaixo a figura 1 demonstrando o fluxograma geral de uma fabricação de cimento.

Figura 1 Fluxograma da fabricação de cimento



2.1.1 MINERAÇÃO E BRITAGEM

O ponto de partida na fabricação de cimento é a extração do calcário, que representa mais de 70% em peso na composição da farinha, que é a mistura moída de várias matérias-primas ricas em cálcio, alumínio, ferro e silício. Não é à toa que em determinadas regiões do Brasil existam polos cimenteiros, pois, para que uma fábrica de cimento se torne rentável é necessário que ela esteja próxima a jazida para não perder em custo de produção.

A extração do calcário segue as etapas de prospecção, mapeamento e projeto da lavra (PAULA, 2009). A extração é realizada a céu aberto, figura 2, e, através do método explosivo, desligam-se pedaços de rochas do solo. Essas rochas de calcário são levadas pelos caminhões RK até o britador, figura 3.

A britagem pode ser definida como o conjunto de operações que tem como objetivo a fragmentação de grandes materiais, levando-os a granulometrias compatíveis, para utilização direta ou para posterior processamento. Uma operação unitária, que pode ser utilizada em sucessivas etapas, com equipamentos apropriados para a redução de tamanhos convenientes (FIGUEIRA et al, 2004).

Após a britagem, o calcário segue para o galpão de pré-homogeneização. Com o intuito de minimizar as variações naturais do calcário, a armazenam em pilhas, figura 4, foi adotada a partir do aumento da produtividade fabril. Assim, o material será empilhado em camadas e retomado pelo método de Chevron, que tem por finalidade alcançar o ponto mais alto até a base da pilha, possibilitando uma redução de desvio durante o consumo do material na moagem.

Figura 2 Extração da Mina de calcário



Figura 3 Caminhão descarregando calcário para o britador.



Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA., 2019.

Figura 4 Pilha de Calcário Britado.



Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA., 2019.

2.1.2 PRODUÇÃO DE FARINHA

Para haver a clínquerização, antes é necessário acontecer a produção da farinha, que é a mistura seca de calcário e argilas ricas em alumínio, ferro e silício.

As matérias-primas (calcário, argila, areia e minério de ferro) são armazenados separadamente em silos equipados com balanças dosadoras na base. Os técnicos analisam as matérias-primas e calculam as dosagens, com base em parâmetros químicos pré-estabelecidos (módulos químicos), que dependem das características de composição apresentada pelas matérias-primas estocadas. A dosagem de cada matéria-prima é feita por meio das balanças dosadoras automatizadas, controladas pelo Painel Central (PAULA, 2009).

A determinação da porcentagem de cada componente para composição da farinha depende essencialmente da composição química das matérias-primas e da composição que se deseja para o clínquer. O efeito sobre a queima dos óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ depende das relações de teores entre eles. Estas relações são definidas pelos Módulos de Controle da Mistura. Os mais utilizados são: Módulo de Sílica, Módulo de Alumina e Fator de Saturação de Cal (PAULA, 2009).

O Módulo de Sílica (MS) é a razão entre o dióxido de silício e os óxidos de alumínio e ferro, eq 1. Para clínqueres fabricados no Brasil, MS varia de 1,7 a 3,1 (ABCP, 1984). Segundo PERAY (1972), a influência de sua variação para mais acarreta a dificuldade de queima e alto consumo térmico. Já para menos, acarreta aumento de fase líquida e formação de colagens, beneficiando a queima.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

O Módulo de Alumina (MA) é a razão entre a concentração de óxido de alumínio e óxido de ferro eq 2. Para o clínquer fabricados no Brasil, MA varia de 1,2 a 3,2 (ABCP, 1984). A influência de sua variação para menos, diminui a viscosidade da fase líquida e facilita a cinética das reações, além de melhorar a granulação do clínquer.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2)$$

O Fator de Saturação de Cal (FSC) será a razão do óxido de cálcio com os demais compostos que reagem eq 3. Os valores considerados ótimos estão entre 90% e 100% (ABCP, 1984). A influência de sua variação para mais, exigirá maior consumo de combustível e cal livre alto.

$$FSC = \frac{100xCaO}{2,8xSiO_2 + 1,18xAl_2O_3 + 0,65xFe_2O_3} \quad (3)$$

Após a dosagem, esses materiais são encaminhados para a moagem. O moinho utilizado na Elizabeth Cimentos é o moinho vertical de rolos. A figura 5 mostra o esquema de funcionamento. O material é despejado no centro de uma mesa rotativa e à medida que rotaciona, o material vai sendo dispersado para as extremidades da mesa e sendo submetido à compressão dos rolos, formando grãos finos e agulhados. Na medida em que o material é moído pelos rolos, gases quentes carregam o material mais fino para o separador que fica mais acima do conjunto de mesa e rolos, garantindo que haja o processo de secagem e seleção da granulometria adequada. Sendo assim, os grãos finos saem pela parte superior do moinho e os grossos retornam para a mesa, para serem reprocessados e enquadrados posteriormente.

Figura 5 Esquema de funcionamento de um moinho vertical de rolos.



Fonte: <https://www.castolin.com/pt-PT/reparacao-de-moinhos-de-rolos-verticais-e-de-caldeiras>.

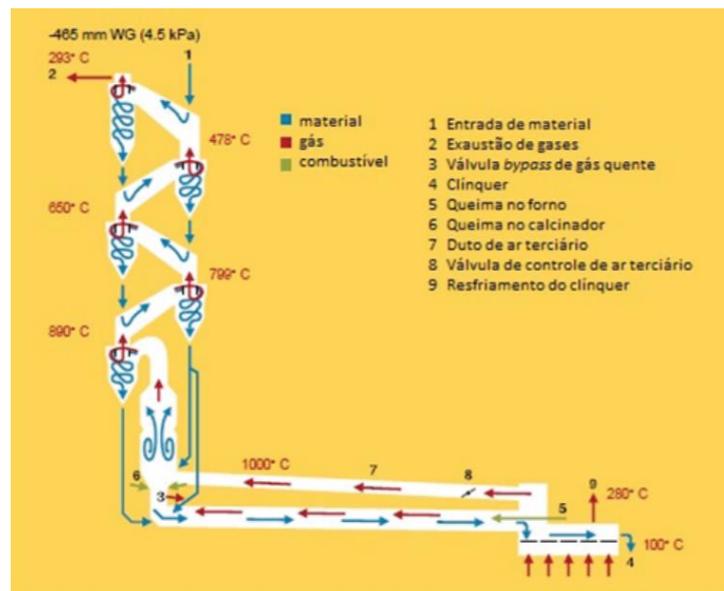
A farinha produzida é enviada pelo transporte de caixas fluidizadoras e elevador de caçambas, até o topo do silo de homogeneização. Esse silo terá a função de armazenar e diminuir o desvio dela, através do sistema de abertura de válvulas na base de saída do material.

Após a homogeneização da farinha, ela será encaminhada para o processo de clinquerização, que, em resumo, se constituirá na passagem da mesma pela torre de ciclone, forno, resfriador e silo.

2.1.3 PRODUÇÃO DE CLÍNQUER

O clínquer é o componente mais importante na fabricação do cimento e ele é o resultado da sinterização da farinha. Existem vários modelos de processo de clínquerização, sendo na Elizabeth Cimentos por via seca dotado com sistema de pré-calcinação com 5 estágios de ciclones. A torre é constituída por cinco ciclones sobrepostos verticalmente com a finalidade de preparar a farinha para entrar no forno, figura 6.

Figura 6 Fluxograma Operacional Torre de Ciclones.



Fonte: FLSMIDTH, 2012.

A farinha pronta e homogeneizada entra no topo da torre de ciclone para ser submetida há um pré-aquecimento. Os gases entram com temperatura em torno de 1000°C e sai a aproximadamente 300°C. A principal função de um ciclone é fazer a separação dos gases com os sólidos, mas, no caso da torre, haverá a grande troca térmica fazendo com que a farinha já entre pronta para passar pela reação de clínquerização.

Dentro do conjunto da torre, existe o pré-calcinador que irá permitir que aconteça a descarbonatação da farinha, ou seja, o carbonato de cálcio perderá dióxido de carbono ao chegar a 900°C e assim entrará como óxido de cálcio no forno, pronta para reagir com os outros óxidos e formar o clínquer. Além disso, o pré-calcinador proporciona o aumento da capacidade produtiva do sistema de até 100% em relação a uma instalação convencional dotada com forno rotativo de mesmo porte ou dimensão similar.

Buscando situar as etapas do processo de clínquerização e correlacioná-las com as fases formadas, a tabela abaixo apresenta as principais reações que ocorrem a cada intervalo de

temperatura da torre até o final do forno, destacando os compostos do clínquer formados durante o processo de sinterização (CENTURIONE, 1993).

Tabela 1 Principais reações do processo de sinterização do clínquer (CENTUORINE, 1993).

Temperatura (°C)	Reação
100 – 200	Liberação de água livre
500 – 700	Desidroxilação dos argilominerais; Transformação do quartzo- α em quartzo- β
700 – 900	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO_2 ; Primeiras reações de estado sólido, levando à formação de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos [$C_{12}A_7$ e $C_2(AF)$] e início de formação da belita ($2CaO + SiO_2 \rightarrow Ca_2SiO_4$); Conversão de quartzo- β em cristobalita
900 – 1200	Conversão de ferroaluminatos e aluminatos em C_4AF e C_3A ; Formação da belita a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre
1200 – 1350	Cristalização das primeiras alitas ($\sim 1200^\circ C$), a partir de cristais pré-existent de belita e cal livre ($Ca_2SiO_4 + CaO \rightarrow Ca_3SiO_5$); A partir de $\sim 1280^\circ C$ inicia-se a formação de fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com consequente nodulização do clínquer
Acima de 1350	Desenvolvimento dos cristais de alita

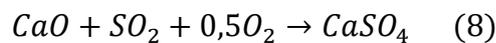
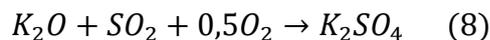
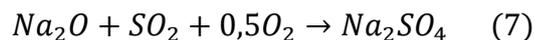
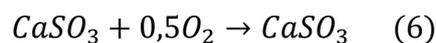
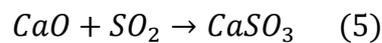
Os parâmetros do forno durante a produção de clínquer são a fase líquida, relação álcalis/enxofre, fator de saturação, módulos de sílica e alumina, peso litro, tempo de residência, temperatura de zona de queima, grau de enchimento, grau de descarbonatação, perfil de temperatura do forno, cal livre e os cristais.

Ao entrar no forno, a farinha, que já passou pelo processo de descarbonatação no pré-calcinador, inicia então a clinquerização. Este processo é o conjunto de todas as reações físicas e químicas, mostrado na tabela 1, que ocorrem durante o período de queima, onde ocorrerá a formação do clínquer. O deslocamento da farinha se dá pela rotação, combinado com a sutil inclinação do forno. Quanto mais rápido se alcançar a temperatura de queima, entre $1100^\circ C$ a $1450^\circ C$, maior a probabilidade de se obter um clínquer de qualidade.

As principais fontes geradoras de calor em fornos de cimento são provenientes dos queimadores principal e secundário, quando o forno é dotado de um calcinador. O combustível é atomizado, sob alta pressão, no bico do queimador, em partículas menores – quanto menor a partícula, melhor a combustão – e injetado no forno junto com o ar primário pelo mesmo bico ou por bicos diferentes. O ar primário é necessário para que a queima seja completa, tendo ainda as funções de resfriar o duto do queimador, iniciar e estabilizar a ignição do combustível e auxiliar a formatação da chama. À pressão de atomização, a proporção de ar primário é baixa, cerca de 3% do total de ar de combustão (DUDA, 1985).

O combustível utilizado para o forno e o calcinador é o coque verde. Em princípio, qualquer tipo de coque de petróleo pode ser usado como combustível. Porém, o coque verde apresenta menor resistência à moabilidade o que facilita seu preparo de otimização para a queima.

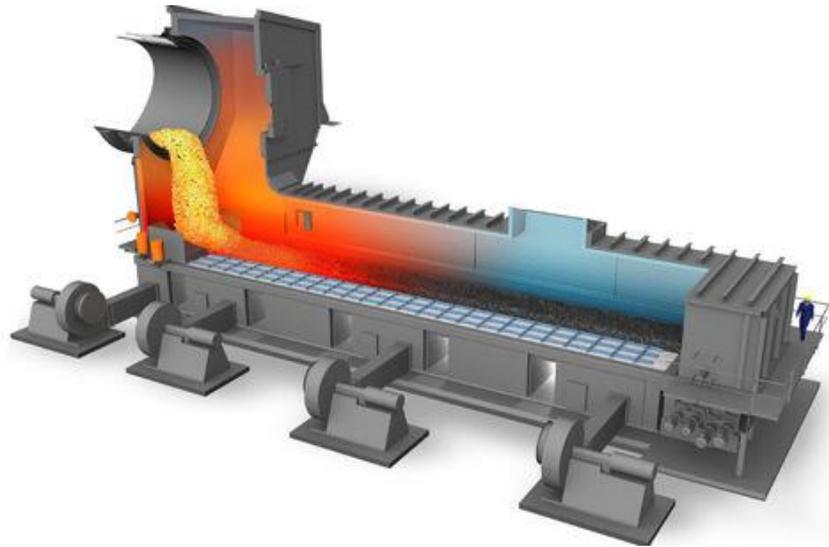
O dióxido de enxofre, originado da queima do coque de petróleo no forno rotativo de produção de clínquer, pode reagir com os compostos de cálcio, sódio e potássio, contidos nas matérias-primas, conforme as Equações 4 a 9, gerando produtos que são incorporados ao clínquer (SANTOS, 2007).



As reações do enxofre com os álcalis gerarão colagem no forno e servirão para proteção e controle do processo.

Após a queima, o material passa por um sistema resfriamento intenso, figura 7, com o objetivo de reduzir drasticamente a temperatura do clínquer, de 1200°C a 100°C, assegurando uma boa qualidade do produto.

Figura 7 Resfriador de clínquer



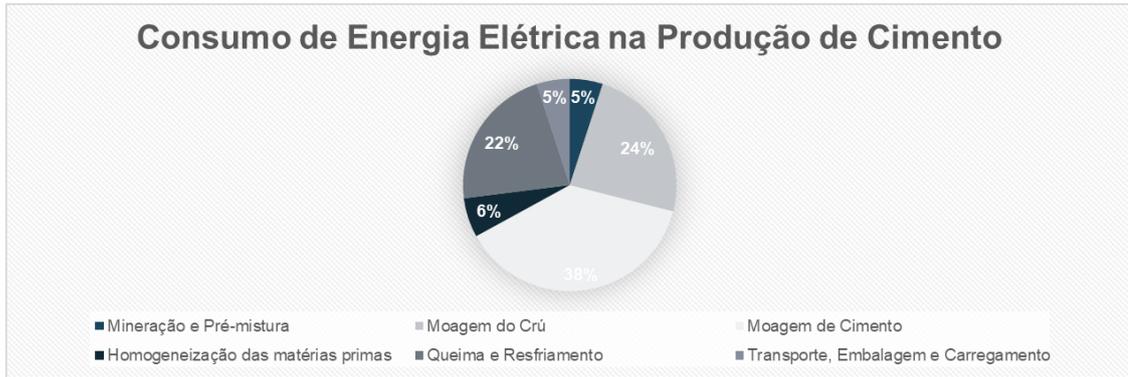
Fonte: <http://www.directindustry.com/pt/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco/product-62016-552481.html>

O resfriador forma um conjunto interdependente no processo de clínquerização, com vistas à obtenção de uma maior produtividade e qualidade do produto. Assim, se por um lado o resfriador tem de conseguir uma temperatura baixa no clínquer, imediatamente depois da sua saída do forno, por outro, o forno tem de garantir uma descarga de clínquer uniforme, um clínquer com distribuição granulométrica uniforme e uma temperatura constante na zona de cozedura.

2.1.4 PRODUÇÃO DE CIMENTO

A produção de cimento na maioria dos casos é acontecida através de moinhos bolas, equipamentos que são conhecidos por alto consumo de energia. Uma fábrica de cimento moderna consome de 80 a 120 KWh/ton de energia elétrica por tonelada de cimento. A moagem de cimento é responsável por 30 a 45% da energia total consumida da fábrica, pois, cada moinho de bolas consome entre 25 a 40 KWh/ton cada, figura 8.

Figura 8 Distribuição do Consumo de Energia Elétrica em Fábrica de Cimento.



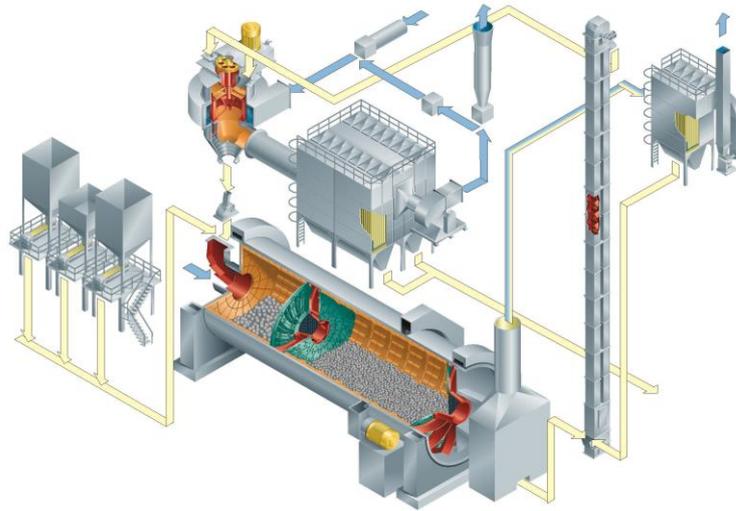
Fonte: Treinamento da CHRISTIAN PFEIFFER, 2020.

Apesar do alto consumo de energia, o sistema fechado de moinho de bolas é uma tecnologia confiável e de fácil operação, requerendo baixa manutenção e com capacidade de produzir cimento bastante fino. A qualidade do cimento é universalmente aceita sendo considerada premium quality em alguns mercados (PFEIFFER, 2020).

O moinho é dividido em duas câmaras seguido de um separador a ar dinâmico, figura 9. Inicialmente os materiais são dosados por balanças e direcionados para o interior do moinho. Ao entrar na primeira câmara, o material sofre uma grande redução de granulometria, com perfil de corpos moedores de diâmetro de 60 a 90 mm. Em seguida, o material passa para a segunda câmara e sofre o efeito de atrito, com perfil de corpos moedores de diâmetro de 50 a 17 mm. Após sair do moinho, o cimento é direcionado para o separador, que, pelo controle de sua rotação, é possível classificar a finura e destinar o cimento nas especificações adequadas.

Após ser classificado, o produto é direcionado para um filtro de mangas, o gás de arraste é jogado para a atmosfera e o material é despejado pela base após se desligarem das mangas. Esse material seguirá para um silo e posterior ensacamento, assim finalizando seu percurso de produção de cimento.

Figura 9 Fluxograma da produção da moagem de cimento



Fonte: Seminário sobre a visão geral de moinho de bolas – CHRISTIAN PFEIFFER, 2020.

A moagem de cimento é uma grande porta de estudo e otimização para conseguir grandes reduções de consumo de energia e altas produtividades. Os principais fatores que afetam na performance da moagem de cimento são: moabilidade da matéria-prima, finura requerida do produto, projeto e engenharia da planta, uso de aditivos e cargas, operação e manutenção da planta.

Nesse trabalho vai ser possível observar a performance do moinho com clínqueres de alto e baixo teor de SO_3 .

2.2 MINERALOGIA DO CLÍNQUER

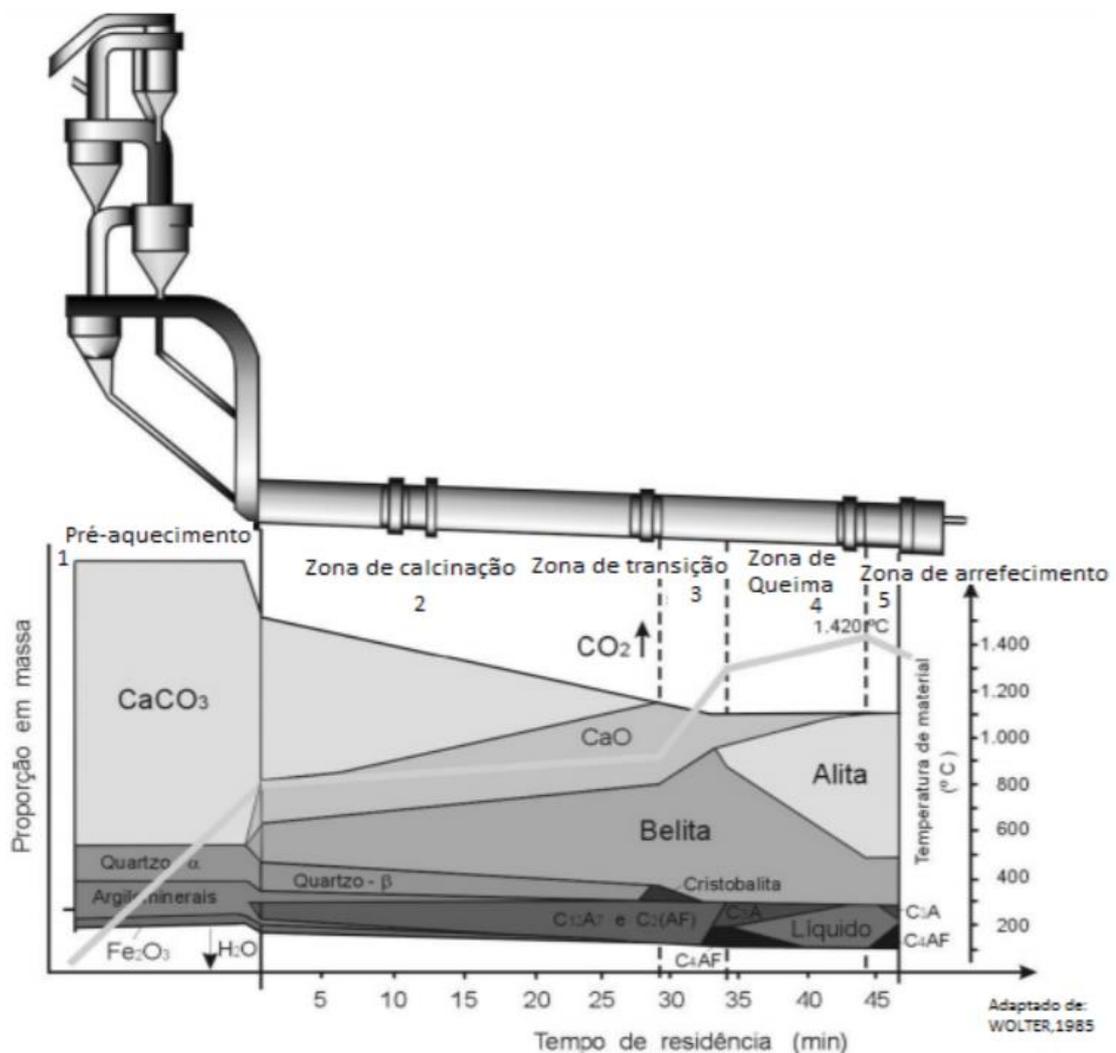
O processo de clinquerização leva à formação da mineralogia que integra os constituintes principais do clínquer que são, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Esses óxidos se interagem e formam predominantemente cristais de silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$), silicato bicálcico ($2CaO.SiO_2$), aluminoferrato tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) e aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$).

O clínquer Portland tem em peso 90 - 97% de óxido em sua composição. Os demais 3 - 10% constituem de óxidos de magnésio, álcalis, enxofre e uma grande variedade de elementos menores. A literatura técnica especializada utiliza a seguinte notação para denominar os óxidos principais: C (CaO); S (SiO_2); A (Al_2O_3); F (Fe_2O_3). Essa notação serve para empregar e facilitar a nomenclatura dos compostos referente aos cristais do clínquer como, por exemplo, $3CaO.SiO_2$ (C_3S) (PECCHIO, 2013).

As principais fases cristalinas do clínquer Portland são: C_3S , mais conhecida como alita, principal composto do clínquer presente em teores de 50 a 70% em peso; C_2S , mais conhecida como belita, responsável pelo desenvolvimento de resistências em longa data em teores em peso de 0,5 – 20%; C_3A e C_4AF , que preenchem os espaços entre as fases silicáticas em teores médios de 10 – 18% em peso.

A formação dos minerais do clínquer é proveniente de uma série de transformações químico-mineralógica das matérias-primas durante o processo de calcinação. Segue abaixo na figura 10 a evolução da formação dos cristais com o gradiente da temperatura.

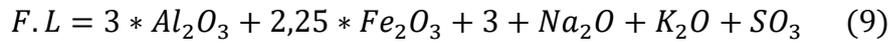
Figura 10 Formação dos cristais com o gradiente de temperatura



Fonte: Mohamed Aldieb, Hesham Ibrahim, 2010.

De acordo com a figura 10, a formação do C_2S acontece quando a sílica liberada pela decomposição dos argilominerais reage com o óxido de cálcio livre. Ao chegar a temperaturas superiores a $1250^{\circ}C$, esses aluminatos e ferroaluminatos cálcicos se fundem e dão origem a

uma fase líquida, eq. 9, cujo aparecimento facilita e torna possível a reação entre a belita e a cal livre, promovendo a formação do silicato tricálcico, a alita. Ao final do aquecimento a composição cristalina do clínquer basicamente será alita, belita e uma fase fundida que somente após o resfriamento dará origem ao C3A e o C4AF.



A composição mineralógica do clínquer pode ser estimada pelo método de Bogue, que pode não apresentar valores exatos das proporções dos diferentes minerais do clínquer devido às considerações tidas em conta nos cálculos, mas é um bom guia para perspectivar algumas propriedades do cimento. Atualmente, a quantificação por difração de raio-X é um método mais exato. As equações utilizadas pelo método de Bogue são:

$$C_3S = 4,071x(CaO_{total} - CaO_{livre}) - 7,6xSiO_2 - 6,718xAl_2O_3 - 1,43xFe_2O_3 \quad (10)$$

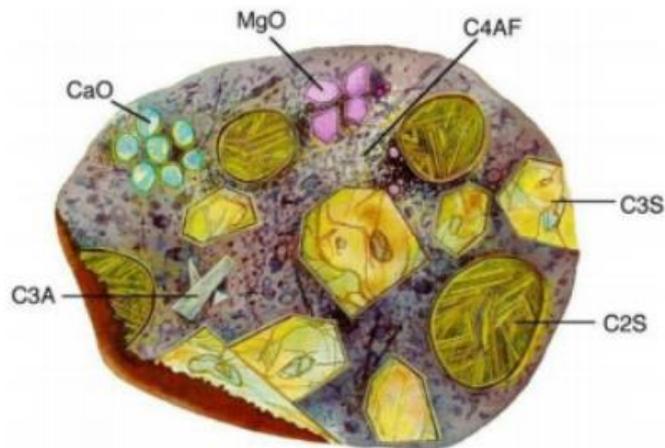
$$C_2S = 2,867xSiO_2 - 0,7544xC_3S \quad (11)$$

$$C_3A = 2,65xAl_2O_3 - 1,692xFe_2O_3 \quad (12)$$

$$C_4AF = 3,043xFe_2O_3 \quad (13)$$

As morfologias desses cristais são distintas, figura 11, o C3S em seção transversal tem formato hexagonal, sendo a sua forma idiomórfica com possibilidade de variação, o C2S tem formato arredondado e idiomórfico contendo lamelas multidirecionais, o C3A e o C4AF apresentam-se vítreos em caso de queima rápida e cristalizados em caso de queima lenta, sendo o C3A retangular e o C4AF tabular variando em preenchimentos intersticiais de forma prismática, a Cal Livre tem forma arredondada, e o MgO, quando idiomórfico, tem forma hexagonal ou quadrangular.

Figura 11 Morfologia dos minerais de clínquer



Fonte: BARRON, 2010.

2.2.1 ALITA (C₃S)

A alita tem um importante papel nas resistências mecânicas iniciais, apresentando-se sob grande número de polimorfos, porém com pouca variação da sua estrutura cristalina (COUTINHO,1997). Alguns aspectos morfológicos e texturais relacionados aos cristais de alita podem ser correlacionados ao processo de fabricação do clínquer e podem ser utilizados como ferramenta para seu aprimoramento (MENINO, 2015). A figura 12 mostra como são vistos os cristais de alita no microscópio óptico.

Figura 12 Aspecto do clínquer ao microscópio destacando os cristais idiomórficos de alita (A).



Fonte: PECCHIO, 2013

O C₃S puro apresenta uma série de transições de fases reversíveis quando submetido a variações de temperatura, o que pode ser detectado pela combinação de análises termodiferenciais, difração de raios-X em alta temperatura e microscopia óptica (TAYLOR, 1997).

A alita pode apresentar diferentes fases reversíveis entre si, dependendo das variações de temperatura a que estiver sujeita. As formas cristalinas polimórficas são divididas em triclinicas, monoclinicas e romboédricas, figura 13 (TAYLOR, 1997).

Figura 13 Temperaturas das transições polimórficas do silicato tricálcico puro. T=triclínico, M=monoclínico e R=romboédrico.

	620°C		920°C		980°C		990°C		1060°C		1070°C	
T1	↔	T2	↔	T3	↔	M1	↔	M2	↔	M3	↔	R

Fonte: BIGARE et al., 1967.

Dentre os polimorfos da alita, T1 representa o composto puro, quando resfriado a temperatura ambiente. Em clínqueres industriais, devido à incorporação de íons, a forma presente em temperatura ambiente normalmente se aproxima de M1 ou M3 ou uma mistura dos dois polimorfos.

Na ausência de quantidade apreciável de MgO no clínquer e sob condições de elevada temperatura, pode ocorrer a forma triclínica T2, embora ela seja mais rara (SOUZA, 2007).

A forma romboédrica da alita, segundo Centurione (1999), é a de maior reatividade potencial, podendo ser estabilizada pela fixação de maior conteúdo de Al₂O₃ e SO₃ nos cristais de alita, pela ação de íons fluoreto.

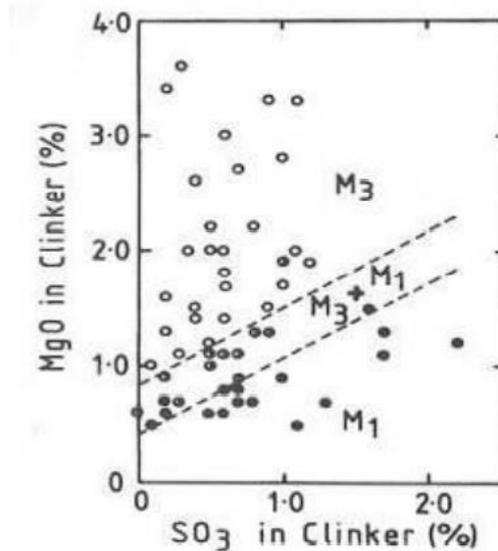
MAKI et. Al. (2004), analisaram a cristalização da alita utilizando seções delgadas em microscópio óptico de alta temperatura com análises térmicas e difração de raios X. A alita se cristaliza a partir de um líquido a cerca de 1450°C na forma R, transformando-se em formas de mais baixa temperatura com o resfriamento.

Em altas temperaturas de formação ou recristalização, pequenos cristais de alita se formam com relativamente alto conteúdo de íons substituintes podendo se transformar no polimorfo M3 durante o resfriamento até a temperatura ambiente. Os cristais formados em temperaturas mais baixas são grandes e pobres em íons substituintes em T2. Os conteúdos de MgO e SO₃ são importantes controladores da transformação M1 (MAKI et. Al. , 2004). O magnésio substitui exclusivamente o cálcio em suas posições cristalográficas na estrutura da alita (MAKI et. Al., 1992).

Elevadas concentrações de MgO e SO₃, figura 14, favorecem a formação de pequenos cristais euhedrais de M3. Em contraste, baixas concentrações desses elementos, favorecem o rápido e instável crescimento, produzindo cristais grandes e de formas irregulares do polimorfo M1. Esses podem ser esqueletais ou dendríticos com alto conteúdo de inclusões de fase e pequenos cristais de belita e cal livre. Cristais contendo as duas formas polimórficas, M1 e M3, podem ocorrer e são normalmente zonados com núcleos de M1 e as regiões periféricas de M3. O zoneamento ocorre porque o líquido do clínquer vai progressivamente se enriquecendo em

Mg) com o decorrer da cristalização fazendo com que o material que se deposita tardiamente seja M3. A transformação M3 para M1 é também afetada pelas taxas de resfriamento, de modo que resfriamentos lentos favorecem o aparecimento de M1 (TAYLOR, 1997).

Figura 14 Forma polimórfica do C₃S em função do MgO e SO₃.



Fonte: TAYLOR, 1997.

Os experimentos desenvolvidos por Stanek e Sulovsky (2002) atribuem à fase polimórfica M1, estabilizada pela adição de SO₃, o desenvolvimento de resistências mecânicas superiores às obtidas em cimentos com predomínio da forma M3.

2.2.2 BELITA (C₂S)

A belita é responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas a longas idades já que, segundo Taylor (1997), 30% dos cristais de belita reagiriam até os 28 dias de cura e 90% com um ano, além de liberar uma menor quantidade de hidróxido de cálcio em relação a alita.

Segundo KIHARA et.al. (1990), a morfologia do cristal de belita depende das condições de resfriamento do clínquer, podendo passar de cristais arredondados a digitados quando o resfriamento que ocorre entre a máxima temperatura do forno e sua saída for lenta.

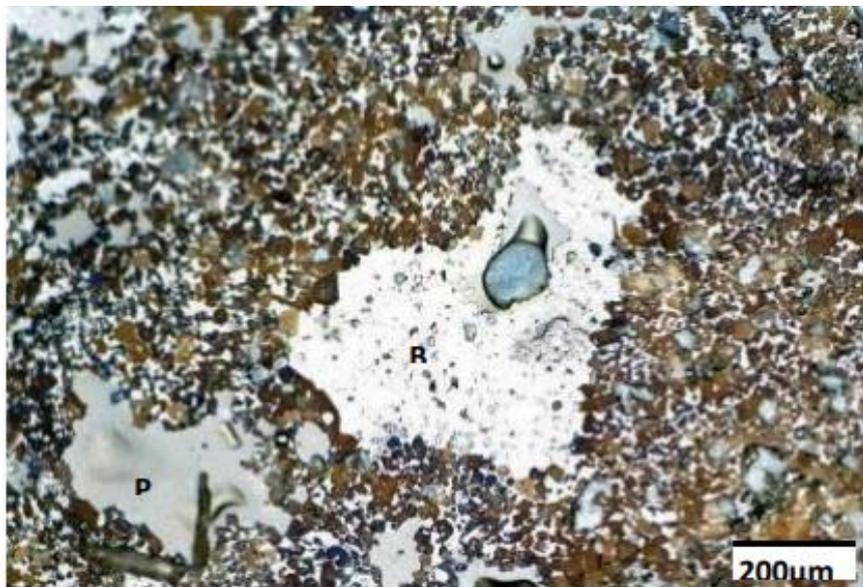
Figura 15 Cristais arredondados de belita. A=Alita B=Belita F=fase intersticial.



Fonte: PECCHIO, 2013.

É frequente que ocorram zonas de belitas, ou seja, um agrupamento de cristais belíticos no clínquer apresentado na figura 16. Essas zonas constituem irregularidades texturais, podem possuir formas regulares ou ameboides de grandes dimensões.

Figura 16 Zona Belítica.



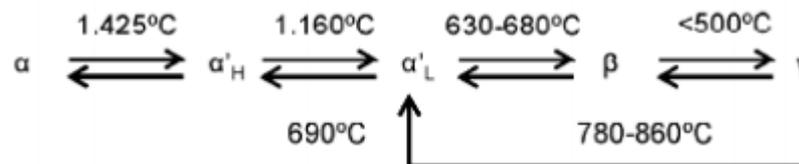
Fonte: PECCHIO, 2013.

A ocorrência de heterogeneidades texturais está frequentemente relacionada a problemas de preparação das matérias-primas. Quando as zonas de belita são regulares, são correlacionadas a problemas de moagem, com presença de grão silicoso grosseiro na matéria-prima. Problemas nos equipamentos de homogeneização do cru, por sua vez, podem ser

responsáveis pelo aparecimento de zonas irregulares de grandes dimensões no clínquer, associadas a zonas de cal livre (KIHARA et al., 1990).

As quatro modificações cristalográficas do C₂S são denominadas de α , α' , β , e γ em ordem decrescente de temperatura de estabilização:

Figura 17 Esquema de Modificações Cristalográficas do C₂S.



A fase ortorrômbica C₂S- γ , de baixa temperatura e estável a temperatura ambiente, se transforma na fase α' a aproximadamente 870°C . A modificação para C₂S- α' ocorre a aproximadamente 1.160°C ; a elevação da temperatura para 1450°C leva à formação do C₂S- α .

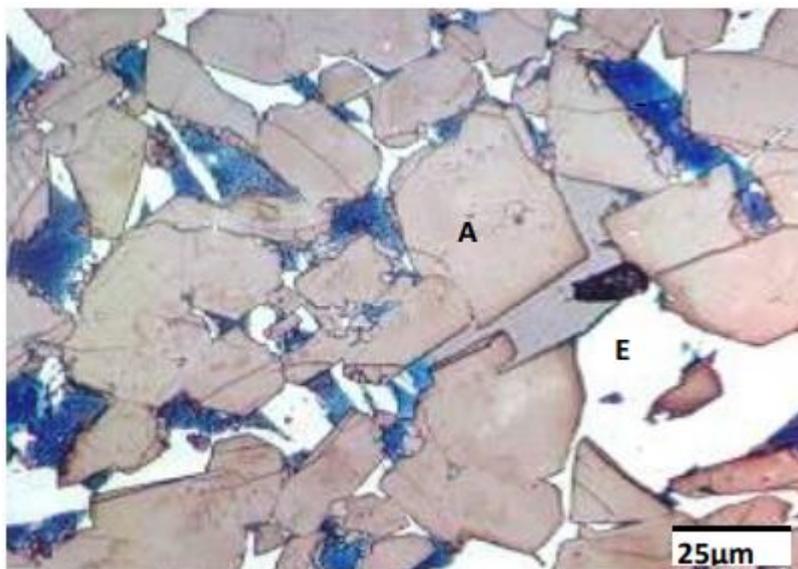
O resfriamento a 670°C resulta na formação de uma fase monoclinica metaestável, denominada C₂S- β . A fase β não é formada a partir do C₂S- γ , durante o tratamento térmico; caso o C₂S- β não seja estabilizado durante o resfriamento, os polimorfos α e α' se reverterem ao C₂S- γ , podendo causar a fragilização do clínquer, transformação em pó, devido ao enorme aumento de volume ocorrido nesta transformação.

2.2.3 ALUMINATO TRICÁLCICO (C₃A)

Esse cristal nada mais é do que a cristalização do material que se funde durante o processo. Normalmente tem estrutura cristalina cúbica, não ocorrendo modificação polimórfica por variação de temperatura, e, sim, por variação composicional. Sua estrutura cristalina pode contar a grande maioria dos óxidos em proporções de até 10% em peso.

Clínqueres industriais normalmente contêm formas de aluminato cúbico ou ortorrômbico, isoladas ou combinadas. A forma ortorrômbica é conhecida por ser prismática e se mostrar como um material intersticial escuro e por vezes pseudotetragonal. A fase cúbica se constitui de cristais uniformes, xenomórficos a retangulares. Segue abaixo um exemplo de C₃A presente no clínquer sob ataque químico com hidróxido de potássio.

Figura 18 Detalhe da fase intersticial do clínquer mostrando cristais ortorrômnicos de C₃A (C). E=C₄AF e A=Alita.



2.2.4 ALUMINATO TRICÁLCICO (C₄AF)

Em muitos clínqueres, o C₄AF está misturado com o C₃A devido à similaridade dos parâmetros de cela e possível intercrescimento. Esse fato dificulta a realização de microanálises por microsondas ou por microscopia eletrônica, de maneira que as composições químicas apresentadas na literatura diferem significativamente (TAYLOR, 1997).

2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

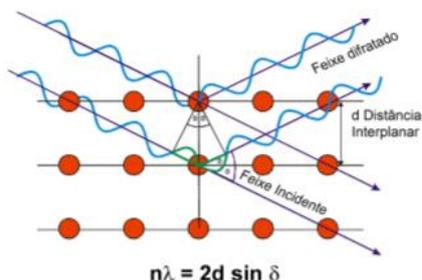
A difração de raios X representa o fenômeno de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado (GLOBBO, 2009).

Os físicos ingleses Sir W.H. Bragg e seu filho Sir W.L. Bragg, em 1913, desenvolveu uma equação, eq. 14, que explica porque as faces clivadas de cristais refletem feixes de raios X a certos ângulos de incidência (θ). Sendo assim, quando um material possui átomos arranjados periodicamente no espaço, o fenômeno da difração de raios X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (14)$$

Sendo θ o ângulo medido entre o feixe incidente e determinados planos do cristal, “d” a distância entre os planos dos átomos e “n” a ordem de difração, como demonstrado na figura 18.

Figura 19 Esquema ilustrativo do fenômeno de difração de raios X.



Fonte: GLOBBO, 2009.

As análises são realizadas por difratômetros e alguns fatores são cruciais para se obter um resultado de qualidade, são eles, fatores instrumentais, fatores característicos da amostra, tamanho de partículas; espessura da amostra, superfície da amostra, transparência da amostra, orientação preferencial e microabsorção.

2.3.1 MÉTODO DE RIETVELD

O método de Rietveld (1969), ao contrário dos outros métodos baseados na integração da intensidade de picos característicos de fases, tem por base a simulação do perfil difratométrico a partir das estruturas das fases componentes de uma amostra. O procedimento além de refinar os parâmetros geométricos também considera as características cristalográficas.

A metodologia é por comparação do espectro real de uma amostra com espectros teóricos simulados a partir de misturas hipotéticas das fases. A aplicabilidade deste método exige o conhecimento da estrutura das fases componentes da mistura com um bom grau de aproximação além da posse dos dados difratométricos de boa qualidade.

Os parâmetros de refinamento são: fator de escala, que corresponde à correção de proporcionalidade entre o padrão difratométrico calculado e o observado; background, que fornece informações a respeito da presença de fases amorfas na amostra e que pode ser incluída em uma rotina de quantificação das fases envolvidas; perfil de pico, que é um conjunto de funções analíticas em que se modelam efeitos relacionados ao perfil; parâmetros de cela, importante para a indexação dos picos; fator estrutura; deslocamento, parâmetros de correção dos deslocamentos devido à fuga do ponto focal da óptica do difratômetro; e orientação preferencial, que é a correção de problemas gerados na preparação de amostra.

A qualidade do refinamento é verificada através de indicadores estatísticos numéricos, que são utilizados durante o processo iterativo e após o término deste, para verificar se o refinamento está se procedendo de modo satisfatório (Post e Bish, 1989).

Os indicadores estatísticos mais frequentemente utilizados são: R-fator estrutura (R_F), R-Bragg (R_B), R-perfil (R_P), R-perfil ponderado (R_{WP}), S (Goodness of Fit – GOF) e R-esperado (R_e). Do ponto de vista matemático, R_{WP} é um dos índices que melhor reflete o progresso do refinamento, por ter no numerador o resíduo que é minimizado, e o GOF deve ser equivalente a 1,0 em um refinamento perfeito. Na prática valores inferiores a cinco refletem um refinamento otimizado.

2.4. PARÂMETROS DE QUEBRA DE CLÍNQUER

As características mais desejadas e buscadas no clínquer nas indústrias de cimento são a reatividade, que garante a resistência, e a moabilidade, que garante a produção. Esses dois parâmetros possuem impactos diretos nos custos e na sustentabilidade.

No que se refere a moabilidade, existem estudos que mostram influência química, mineralógica e operacional. Os estudos de Tovarov et al. (1974), Dorn (1980) e Hills (1999), por exemplo, afirmam que agrupamentos de belitas diminuem a moabilidade do clínquer. Presumindo, portanto, que a energia de moagem do clínquer se distribui em termos referentes à ruptura de ligações e deformações plásticas dos constituintes.

A belita como já citado no tópico anterior, pode se apresentar de forma arredondada ou digitada. Segundo Hornain & Regourd (1980), cristais de C2S desviam as fissuras que se propagam nos cristais de C3S. Os cristais são arredondados, deformáveis e têm certa mobilidade relativa à fase intersticial, resultado na sua liberação durante a moagem; cristais individuais ficam frequentemente intactos no final da moagem. Assim, quanto mais arredondado o cristal de C2S, maior será a sua resistência à moagem, opostamente ao que deve acontecer quando já estiver em início de digitação ou possuir uma estrutura lamelar.

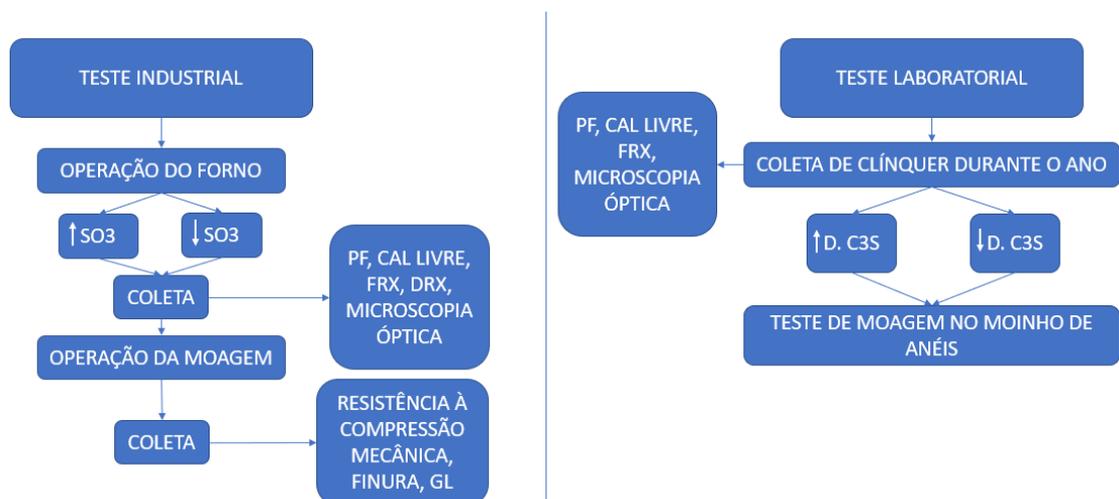
Além da relação belítica, existem outros fatores que influenciam na moagem do clínquer, são eles: tamanho dos cristais, polimorfismo, porosidade, Cal livre, periclásio, FSC, MS, MA etc. Segundo Akatsu (1970), o aumento de C2S e a redução de C3S, aumenta a porosidade. Além disso, Butt (1974) descreve que existem relações entre a porosidade e o conteúdo de fase líquida. Cada estudo vai se ligando ao outro e chegando a várias influências na moabilidade.

Sobre a influência dos tamanhos dos cristais de alita e belita, segundo Bayles & Gouda (1981), os cristais de alita são difíceis de cominuir quando ocorre sobreaquecimento do clínquer e os cristais formam aglomerados de diferentes tamanhos. Além disso, estudos de Duda (1977) e Frigione et. Al. (1983) afirmam que um alto teor de alita resulta em crescimento de moabilidade, maior quantidade de fase líquida reduz a moabilidade e uma maior taxa de resfriamento aumenta a moabilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em dois grandes testes industriais e um teste laboratorial, são eles, operação do forno com alto teor de enxofre em seguida operação da moagem de cimento com o clínquer resultante, operação do forno com baixo teor de enxofre em seguida operação da moagem de cimento com o clínquer resultante, e, por fim, teste de moagem laboratorial com os clínqueres de cristais de C3S pequenos e grandes, figura 20.

Figura 20 Fluxograma do resumo geral da metodologia.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

Durante os testes industriais foram coletados todos os dados de processo para a fabricação de cada situação e amostras de clínquer e cimento respectivo. Em posse das amostras de clínqueres foram realizados ensaios de Perda ao Fogo, Determinação de Óxido de Cálcio Livre, Fluorescência de Raio X, Difração de Raio X e Microscopia Óptica. Já com as amostras de cimentos produzidos pelos respectivos clínqueres, foram feitos ensaios de Finura, Resistência Mecânica à Compressão nas idades 1, 3, 7 e 28 dias e análise granulométrica por difração à laser.

No teste de moagem laboratorial, existiram dois momentos, no primeiro semestre de 2021 realizamos o teste de moagem nos tempos de 1, 2, 3 e 4 min, e no segundo semestre reduzimos os tempos para 5, 10, 15 e 30s. Através da microscopia óptica, selecionamos os clínqueres de diâmetro médio de C3S de, aproximadamente, 22 μm e de 35 μm , para então realizar o teste de moagem em moinho de anéis.

3.1. TESTES INDUSTRIAIS

Os testes industriais foram realizados na fábrica Elizabeth Cimentos, sendo o combustível utilizado na clínquerização o coque. Para variar o teor de enxofre no coque, trabalhou-se com dois fornecedores de coques distintos, sendo um de baixo teor de enxofre e outro de alto.

A primeira pilha de coque foi preparada com alto teor de enxofre e foi consumida na produção do clínquer no dia 07 de setembro de 2020. De forma casada, o clínquer produzido estava sendo consumido na moagem de cimento na produção do cimento CPV-ARI.

As variáveis independentes foram o teor de %SO₃ no coque que abasteceu o forno sendo a de baixo com média de 3,1% e a de alta com média 5,5%, além disso, para garantir que a única influência seria essa, os parâmetros químicos e físicos da farinha e o consumo de coque são os mesmos para ambos os testes.

No que tange as variáveis dependentes dessas alterações, foram divididas em 3 setores, forno, moagem de cimento e laboratório. Sendo as que compõe o processo do forno: produtividade, consumo específico de energia, temperatura de zona de queima e pesagem da balança de coque. As que compõe o processo da moagem de cimento: produtividade, consumo específico de energia e rotação do separador. Por fim, as que compõe o laboratório: teor de enxofre no clínquer, peso litro, teor dos óxidos, parâmetros químicos, fases cristalinas, parâmetros microscópicos e energia de cominuição.

Para as análises laboratoriais, as coletas foram feitas in loco de 1 em 1 hora em todo o processo, sendo na saída do resfriador, na balança de clínquer que abastece a moagem de cimento e no elevador que abastece o silo de cimento. Já os dados de processo, foi utilizado o software SkySystem, onde se foi gerado a cada minuto informações de todas as variáveis da operação.

Esse procedimento foi realizado para os dois testes industriais sendo um realizado no 07 de setembro de 2020 e o outro no dia 14 de setembro de 2020.

3.1.1. ENSAIOS QUÍMICOS

De posse das amostras de clínquer e cimento dos testes industriais, foram realizados os ensaios químicos de Fluorescência de Raio X, Cal Livre, Perda ao Fogo e Difração de Raio X.

Para a determinação da composição química das amostras, foi feita a Fluorescência de Raio X empregando a Norma ABNT NBR 14656 – Cimento Portland e Matérias Primas – Análises Químicas por Espectrometria de Raios X. O equipamento utilizado para análise foi o Axius – 100 – Panalytical, figura 21, com pastilhas fundidas provenientes da máquina de fusão elétrica Panalytical THEOX ADVANCED , figura 20, todos pertencidos ao laboratório da Cimento Elizabeth.

Figura 21 Máquina de fusão elétrica.



Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/malvern-panalytical/product-14669-1949412.html>

Figura 22 Equipamentos Utilizados para Análise Química: Axius – Cement - Max – Panalytical.



Fonte: https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Axius_mAX_brochure_tcm50-51984.pdf.

As análises de determinação de Cal Livre e Perda ao Fogo foram de acordo com as normas ABNT NBR NM 13 – CIMENTO PORTLAND – Análise Química – Determinação de Óxido de Cálcio Livre pelo Etileno Glicol; e ABNT NBR NM 18 – CIMENTO PORTLAND – Análise Química – Determinação da Perda ao Fogo, respectivamente. Os equipamentos utilizados foram no laboratório da Cimento Elizabeth, sendo eles, filtrantes com titulação, figura 23, e mufla Quimis Microprocessamento modelo Q318M, figura 24.

Figura 23 Conjunto de filtrantes e tituladores para realizar o ensaio de Cal Livre.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

Figura 24 Mufla para ensaio de Perda ao Fogo.



Fonte: <https://www.quimis.com.br/produtos/detalhes/forno-mufla-microprocessado>

Como as coletas foram de 1 em 1 hora, foi realizado esses ensaios na mesma sequência e no final fez a média para medida de comparação.

Para a realização de Difração de Raio X, foram analisadas as amostras de clínquer e cimento já homogêneas de cada teste industrial. No caso das amostras de clínquer, no

laboratório da Cimento Elizabeth, elas passaram pelo moinho de anéis, figura 25, para garantir a finura necessária, granulometria 100% passante em 38 μm , para realizar a análise.

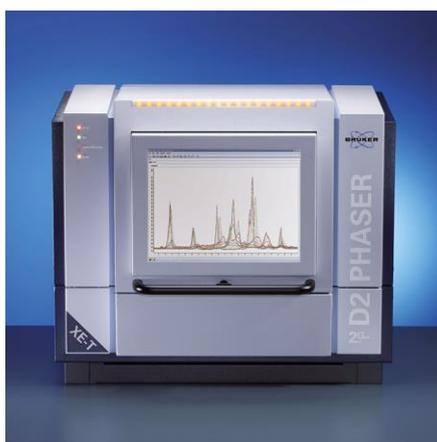
Figura 25 Moinho de anéis.



Fonte: https://www.dialmatica.com.br/pg3.php?id_cat=2&id=128.

Todas foram baseadas em padrões difratométricos refinados estruturalmente com o uso do software TOPAS. O equipamento utilizado foi o modelo D2 PHASER – BRUKER, figura 26.

Figura 26 DRX – Modelo D2 PHASER - BRUKER.



Fonte: <https://www.bruker.com/pt/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d2-phaser.html>

O equipamento trabalha com radiação $K\alpha$ de cobre – Potência - 30 kV e 10 mA, e a varredura de 2θ feita entre 5° e 70° , com passo de $0,02^\circ$ e tempo de 0,5 s, usando uma porta amostra “Zero Background”. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais da UFPB.

O procedimento experimental segue a seguinte rotina: insere-se uma pitada de amostra em recipiente de porcelana, adicionam-se algumas gotas de álcool etílico para homogeneização, em seguida acomoda-se a fração no porta amostra “Zero Background” com cuidado na acomodação da superfície para evitar a orientação preferencial. Por fim, insere-se porta amostra no equipamento.

3.1.2. ENSAIOS FÍSICOS

Além dos ensaios químicos, também foram realizados os ensaios físicos de Resistência Mecânica à Compressão, Microscopia Óptica, Análise Granulométrica por Difração à Laser, e Finura.

Com as amostras de cimento, foi realizado o ensaio da Resistência Mecânica à Compressão nas idades 1, 3, 7 e 28 dias de acordo com a Norma ABNT NBR 7215 – CIMENTO PORTLAND – Determinação da Resistência Mecânica à Compressão. Os equipamentos utilizados foram da fábrica Cimento Elizabeth, sendo a balança, misturador mecânico modelo AG-5 Metal Cairo, figura 27, molde para os corpos-de-prova, figura 28, máquina de ensaio de compressão forney modelo F250, figura 29, chapa para aquecer a panela de enxofre para realizar o capeamento, figura 30, tanque de cura, figura 31, câmara úmida, figura 32.

Figura 27 Misturador mecânico de argamassa



Fonte: http://www.metalcairo.com/pt/produto/1556_Argamassadeira-AG-5

Figura 28 Corpos de prova para o ensaio de resistência.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

Figura 29 Máquina de compressão para ensaio de resistência.



Fonte: <https://forneyonline.com/machine/forney-250-series-compression-machine-with-automatic-vfd-controls-and-standard-frame-f/>

Figura 30 Conjunto de materiais para realizar o capeamento de enxofre no corpo de prova.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

Figura 31 Tanque de cura.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

Figura 32 Câmara úmida.



Fonte: PRÓPRIA, 2022.

No intuito de avaliar a influência da distribuição granulométrica do cimento, foram realizadas Análise Granulométrica por Difração à Laser no Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos (LAPAMA) pelo equipamento CILAS 1090LD, figura ---. Neste ensaio a dispersão do material dura 1 minuto através do dispersor ultrassônico.

Figura 33 Granulômetro Laser.



Fonte: <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/cilas-1090-particle-size-analyzer-0002>

As amostras de clínquer foram analisadas microscopicamente usando a metodologia de ONO (1969), adaptada para o processo de fabricação de cimento pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. O microscópio utilizado foi o Microscópio Nikon- modelo: BX51. O processo para essa análise se resume a selecionar o grão de clínquer, preparar em resina, polir e, por fim, analisar no microscópio, esse procedimento foi realizado no laboratório da Cimento Elizabeth. Todas as amostras de clínquer foram preparadas com resina fenólica sob vácuo; posteriormente lixadas com lixas de gramatura entre 200 e 1.600 e polidas com Pasta Diamantada de gramatura 0,25 μm , figura 24.

Figura 34 Equipamentos para a Preparação e Análise Microscópica.



Fonte: DINIZ, 2019.

O ensaio de finura seguiu a Norma ABNT NBR9202 – CIMENTO PORTLAND – Determinação da finura por meio da peneira 44 μm (nº 325). Os equipamentos utilizados para

realização desse ensaio foram a balança e o peneirador aerodinâmico da metal cairo modelo PVE-I, figura 35, todos realizados no laboratório da Cimento Elizabeth.

Figura 35 Peneirador aerodinâmico.



Fonte: http://www.metalcairo.com/pt/produto/3366_PENEIRADOR-AERODINAMICO-PVE-I

3.1.3. TESTE DE MOABILIDADE DO CLÍNQUER EM MOINHO DE ANEIS

Esse teste foi realizado no laboratório de controle de qualidade da Cimento Elizabeth utilizando os equipamentos britador de mandíbulas, figura 36, peneirador aerodinâmico, figura 35, e moinho de anéis, figura 25. Inicialmente foi realizado ensaio de microscopia óptica em algumas amostras de clínqueres para determinar os diâmetros médios do cristal de C3S. A partir disso, foram escolhidos clínqueres de diâmetro médio de $22\mu\text{m}$ e de $35\mu\text{m}$. Essas amostras passaram pelo processo de homogeneização pelo método de quarteamento, em seguida foram britadas no britador de mandíbulas de maneira que atingisse 100% de passante na malha #3.

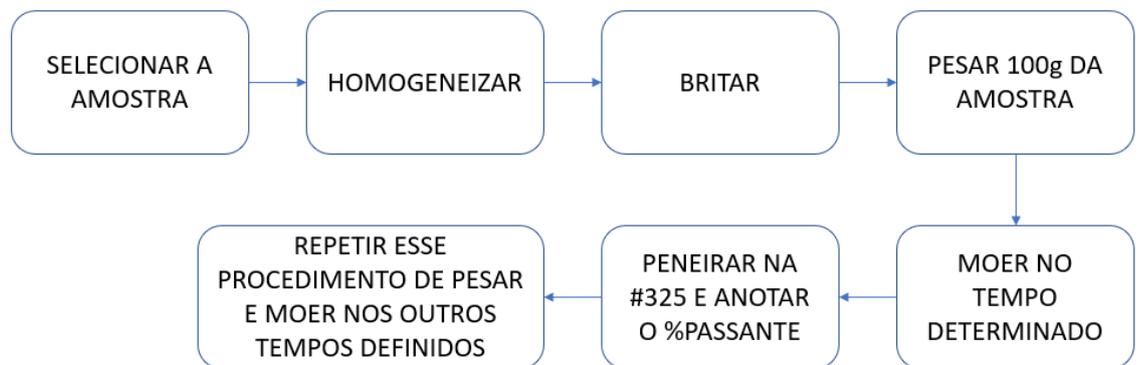
Figura 36 Britador de mandíbulas laboratorial.



Fonte: <https://solotest.com.br/novo/produtos/britador-de-mandibulas-220v-trif--/4.507.320>.

Com os materiais previamente britados, foram pesados 100 g a cada batelada, sendo ao todo 4 por amostra. No primeiro semestre de 2021 a moagem foi realizada nos tempos de 1, 2, 3 e 4 min, já no segundo semestre, nos tempos de 5, 10, 15 e 30 segundos. Foi reduzido o tempo a fim de garantir que não exista a influência de formação de grumados nas paredes dos anéis por conta do tempo maior de moagem. Em cada tempo foi realizado o ensaio de peneiramento e quantificado a porcentagem de retido na malha #325.

Figura 37 Fluxograma resumo do ensaio do teste de moabilidade do clínquer.



Fonte: PRÓPRIA, 2021.

4. RESULTADOS

4.1. TESTE INDUSTRIAL

Para realizar os testes industriais, foi necessário garantir algumas considerações técnicas, como citadas no procedimento. Por isso, se as variáveis independentes atingem os critérios necessários, valida o comparativo do %SO₃ das variáveis dependentes. A começar pelos parâmetros químicos da farinha que se resume em FSC, MA e MS nos testes com alto %SO₃ e baixo %SO₃, figura 38, 39 e 40.

Figura 38 Distribuições Normais do FSC utilizado para os testes.

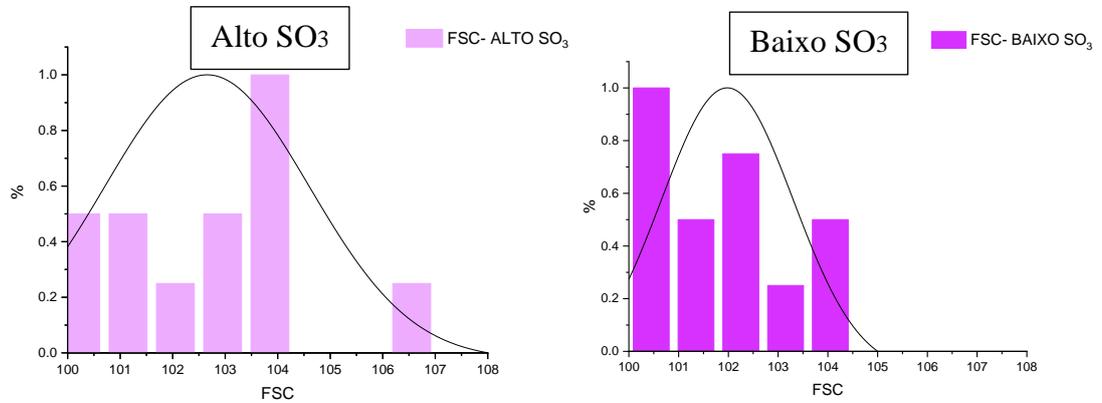


Figura 39 Distribuições Normais do MS utilizado para os testes.

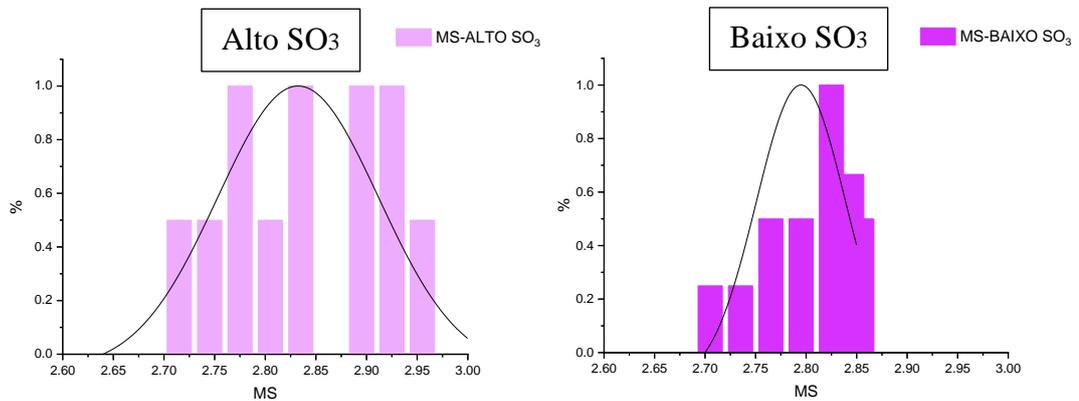
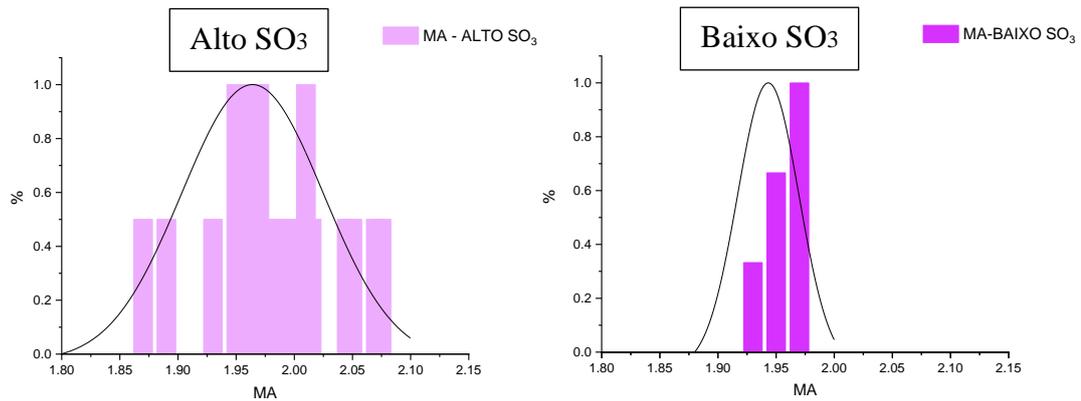


Figura 40 Distribuições Normais do MA utilizado os testes.



De acordo com os gráficos de distribuição normal dos parâmetros da farinha, fica evidente que os picos das curvas se localizam no mesmo valor, apesar de uns possuírem mais variações que outros, mas todos ficam na faixa de controle onde permite que o desenvolvimento do forno seja semelhante para ambas as situações dos testes. As médias dos parâmetros foram: MS de 2,80 (alto SO₃) e 2,83 (baixo SO₃); MA de 1,96 (alto SO₃) e 1,94 (baixo SO₃); FSC de 102,6% (alto SO₃) e 102% (baixo SO₃). Em uma fábrica de cimento é considerado que para se ter influência significativa no forno com os parâmetros de farinha é necessário existir uma variação de 0,5 para os módulos, e 5 para o fator de saturação.

Além dos parâmetros da farinha, outro fator importante é a pesagem de coque para o maçarico, figura 41. É possível observar que o consumo de coque para ambos os testes foi semelhante, média de 7t/h para ambos, variando significativamente apenas o peso do enxofre com média de 39 kg/t (alto SO₃) e 22 kg/t (baixo SO₃), figura 42.

Figura 41 Distribuições Normais da pesagem do coque nos testes.

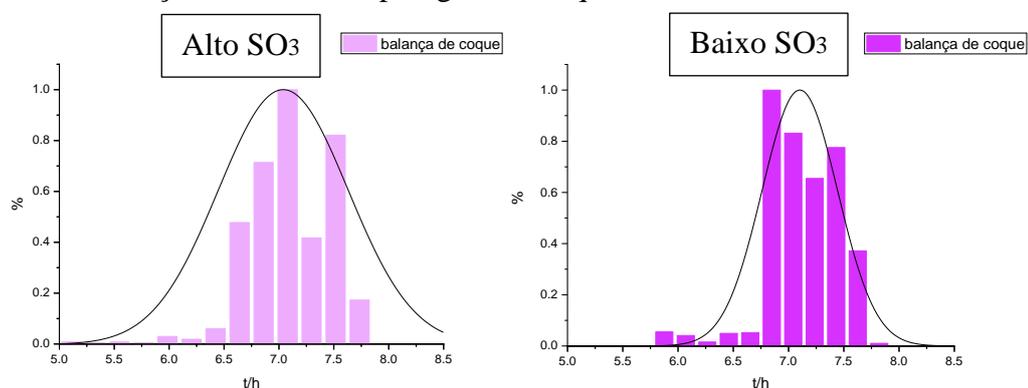
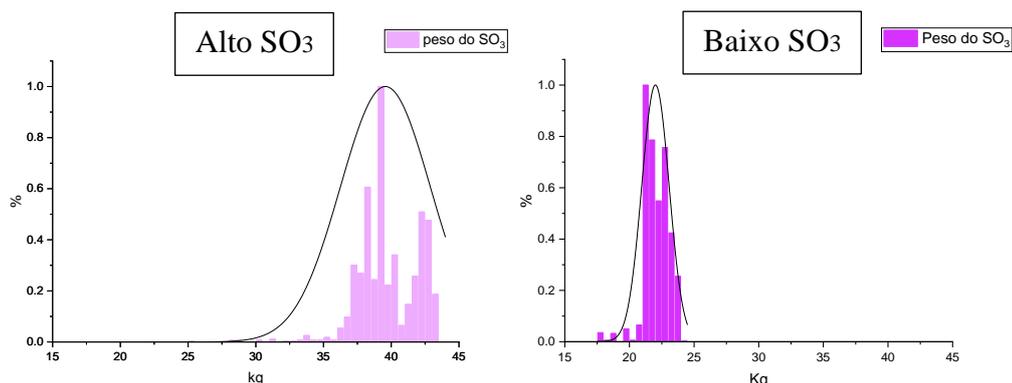
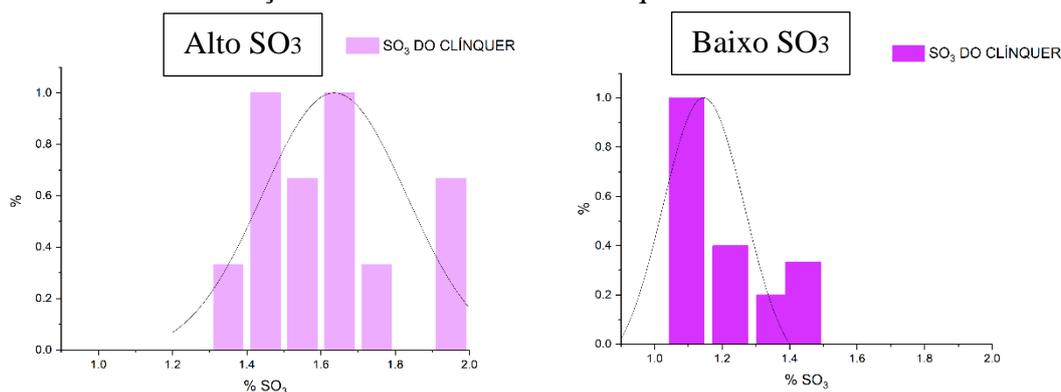


Figura 42 Distribuições Normais do peso do SO₃ nos testes.



Além do peso do enxofre, foi medido o %SO₃ do clínquer, sendo mais uma validação da variação do %SO₃ da chama, figura 43. Em escala industrial, a partir de uma variação de 0,3%SO₃ no clínquer já se torna significativa.

Figura 43 Curvas de distribuição normal do %SO₃ do clínquer durante os testes.



Todas as curvas das variáveis independentes validam avaliar o efeito do enxofre. Partindo dessas considerações, é possível analisar as variáveis dependentes onde será observado o comportamento da operação e a qualidade do produto de acordo com as duas condições.

4.1.1. TESTE INDUSTRIAL NO FORNO

O início do teste aconteceu na preparação do coque, sendo o coque utilizado para a produção do clínquer “Alto SO₃” com teor de enxofre médio de 5,62% e o coque para a produção do clínquer “Baixo SO₃” com teor de enxofre médio de 3,10%.

Durante a operação do forno, foi observado que trabalhando com teor de enxofre mais alto, é gerado mais voláteis. Essa maior geração de elementos menores, segundo TIMASHEV et. al., influencia na viscosidade e na tensão superficial da fase líquida. Esses dois parâmetros,

ainda segundo TIMASHEV et. al., afetam no processo de nodulização, na densidade e na porosidade do clínquer. Qualitativamente, é possível sentir que o clínquer produzido com enxofre mais alto tem características pulverulentas, pois surge uma maior necessidade de limpeza na caixa de fumaça, o que acarreta maior instabilidade durante a operação.

Durante o teste, estatisticamente, para manter a estabilidade do processo, o forno trabalhou majoritariamente com produtividade de 210 t/h com coque de alto teor de SO_3 , enquanto com coque de baixo teor de SO_3 , há uma maior probabilidade de o forno trabalhar com produtividade de 220 t/h, figura 44. Isso equivale a uma redução média de 5% na produtividade do forno trabalhando com o teor maior de SO_3 . Consequência disso, o consumo específico de energia trabalhando com o teor maior de SO_3 foi na maioria das vezes 27,6 kWh/t, enquanto o de baixo teor de SO_3 foi 25,8 kWh/t, resultando em um aumento médio de 6,5%, figura 45.

Figura 44 Curvas de distribuição normal da Produtividade do Forno durante os testes.

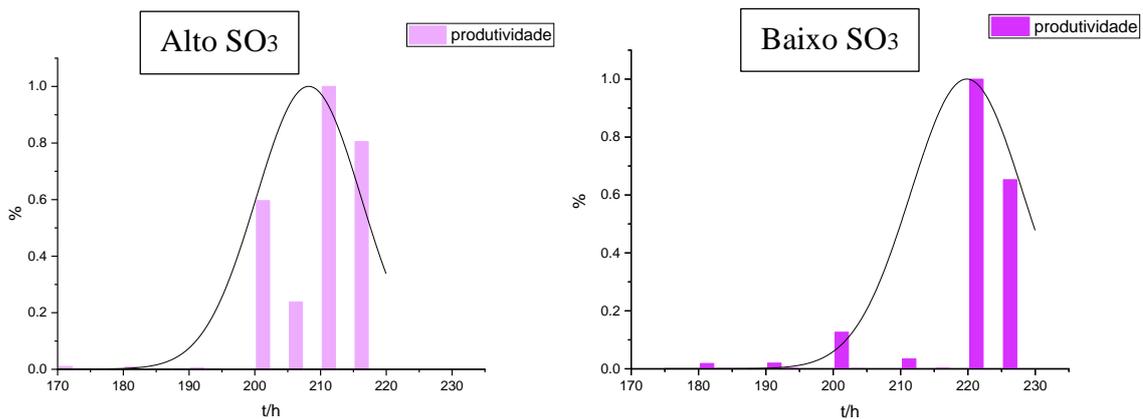
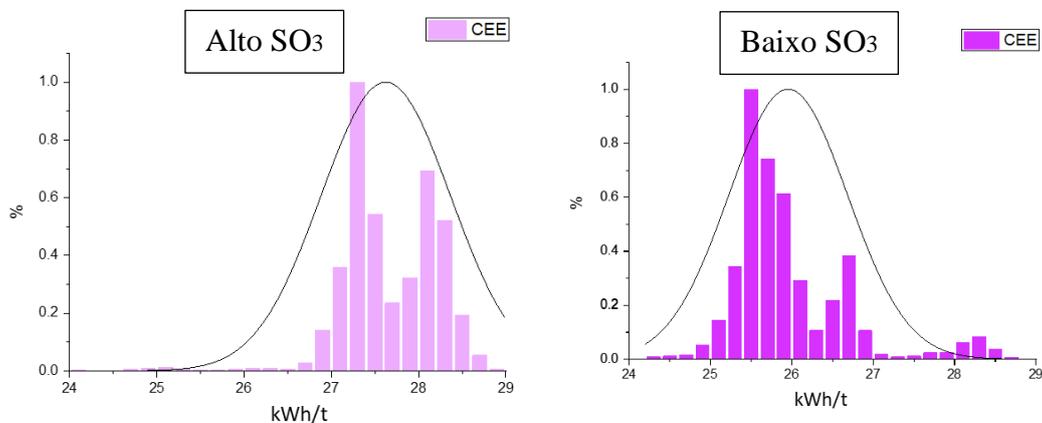


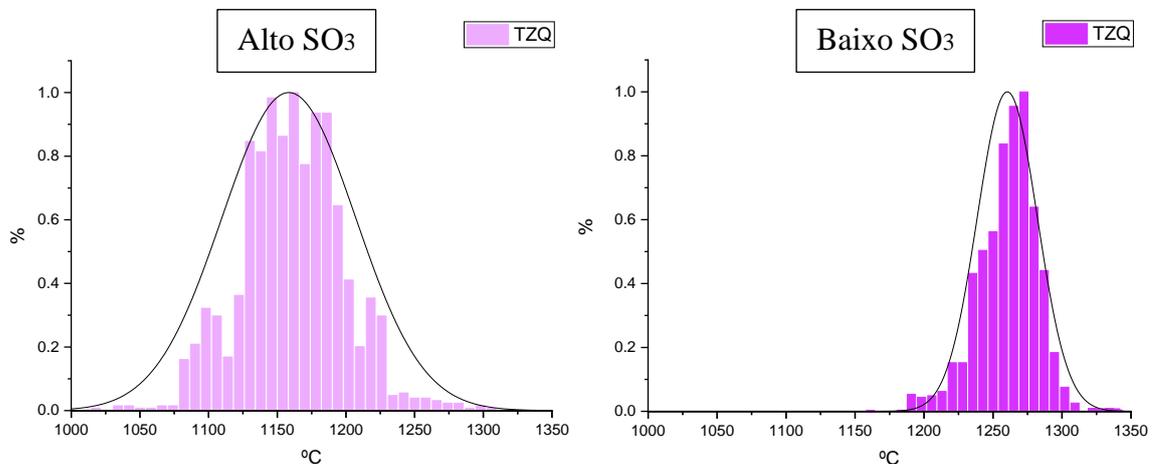
Figura 45 Curvas de distribuição normal do Consumo Específico de Energia durante os testes.



Segundo TIMASHEV et. al., a presença de elementos menores reduz a temperatura da zona de queima. Foi possível enxergar uma diferença significativa na temperatura de zona de

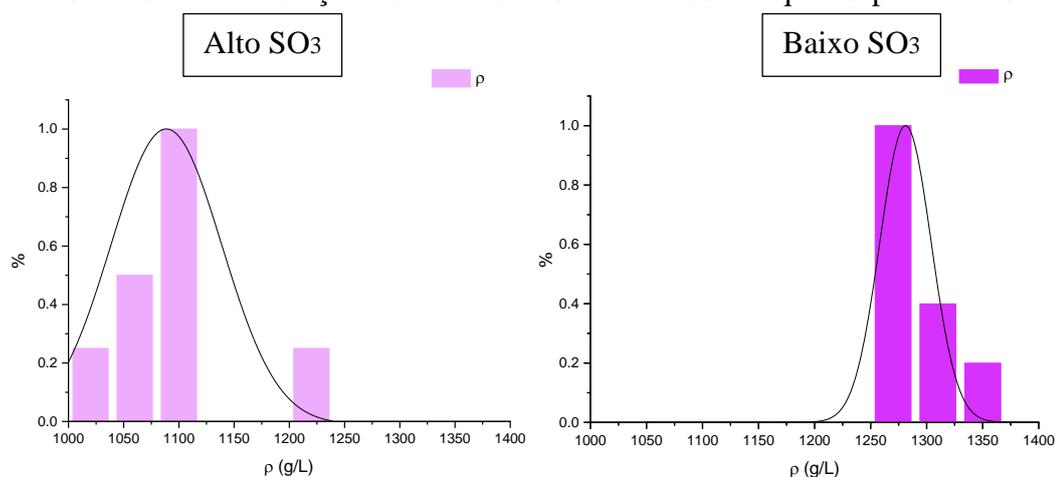
queima trabalhando com as duas condições. É possível notar na curva de distribuição “Alto SO₃” que se trabalhou majoritariamente com temperatura da zona de queima na faixa de 1160°C, enquanto na curva de “Baixo SO₃” trabalhou na faixa de 1260°C. De acordo com a figura 17, a formação da fase M1 do clínquer fica na faixa de 990°C a 1060°C, fica evidente que, considerando que a temperatura do clínquer deva ser um pouco menor que a temperatura de zona de queima do forno, é de se esperar que há uma maior formação de fase M1 no clínquer produzido com maior %SO₃. Outra observação é que a curva “Alto SO₃” gerou um sino mais largo, o que estatisticamente conclui-se que houve maior variação, diferente da curva “Baixo SO₃” que apresentou um sino mais estreito, concluindo menor variação, figura 46.

Figura 46 Curvas de distribuição normal da Temperatura de Zona de Queima nos dois testes.



Além da temperatura de zona de queima, também foi observado a influência do enxofre no peso litro resultante do clínquer, figura 47. A produção com teor de enxofre mais alto resultou em um clínquer com peso litro de 1089 g/L, enquanto na produção com teor de enxofre mais baixo, o clínquer produzido resultou em um peso litro de 1235 g/L, além de existir maior variação, o que torna esse material com um maior desvio de moabilidade. Dessa maneira fica evidente também que os resultados estão indo na mesma linha que a conclusão do estudo de TIMASHEV et. al, que afirma que a geração de elementos menores influencia diretamente na densidade do clínquer.

Figura 47 Curvas de distribuição normal do Peso Litro dos clínqueres produzidos nos dois testes.



Como citado anteriormente, pela teoria é de se esperar maior formação de fase M1 no clínquer de maior teor de enxofre. Por essa razão, realizamos o ensaio de difração de raio x no clínquer médio de cada teste. Essas duas amostras foram submetidas a difração de raio x e os dados do Refinamento Rietveld com software TOPAS, e outros correspondentes aos demais cristais de C₃S estão listados na tabela 2.

Tabela 2 Dados do Refinamento Rietveld com Software TOPAS.

Refinamento Rietveld						
Fase/Polimorfo	C ₃ S/M1	C ₃ S/M3	C ₂ Sβ	C ₃ A cúbico	Ferrita	Periclásio
ICSD	Willian/2018- UFPB	94742	81096	1841	9197	9863
Amostras	A	B				
RWP	7,08	7,97				
GOF	1,71	1,92				

Como mostrado na tabela 4, os baixos índices de R_{WP} e GOF só reforçam a boa qualidade do Refinamento Rietveld. Diante disso, o resultado morfológico das amostras pela DRX é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 Resultado do Polimorfismo das Amostras.

POLIMORFISMO DO C ₃ S					
Amostra	C ₃ S total (%)	C ₃ S M1 (%)	C ₃ S M3 (%)	M1/M3	C ₃ S Bogue (%)
ALTO SO₃	70,97	67,89	3,08	22,04221	59,93
BAIXO SO₃	72,23	37,11	35,12	1,056663	61,71

A amostra “Alto SO₃”, com alto teor de SO₃, apresentou uma razão M1/M3 muito superior que a amostra “Baixo SO₃”, o que condiz com a teoria citada anteriormente. Segundo MAKI (1986), o SO₃ no clínquer também pode alterar em grande medida a constituição das fases da alita. Em um de seus estudos, ele mostra que com o acréscimo no teor de SO₃, promove a formação de M1, bem como o crescimento do grão de alita.

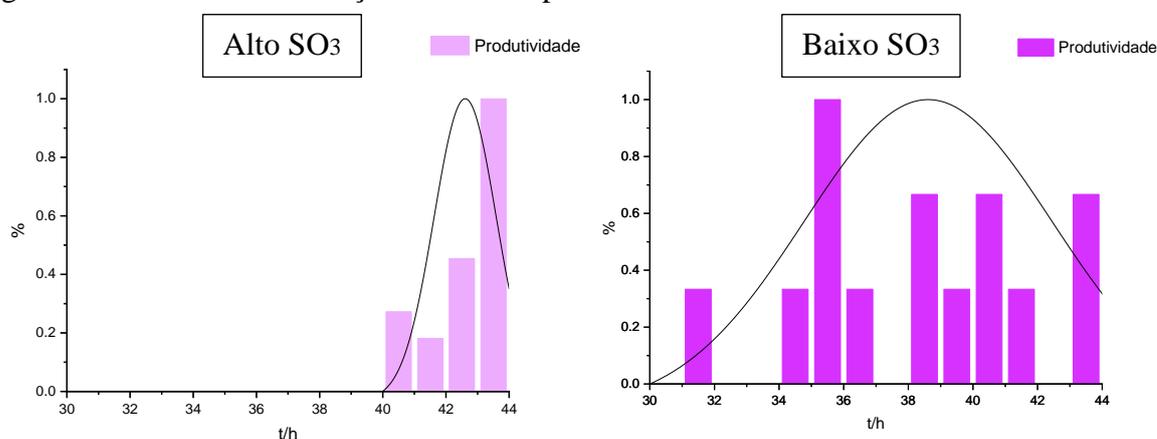
O SO₃ no clínquer reduz consideravelmente a viscosidade e a tensão superficial da fase líquida, assim, reduzindo a taxa de nucleação e conduzindo maior formação de M1, com o crescimento de cristais de alita (Maki, 1981).

4.1.2. TESTE INDUSTRIAL NA MOAGEM DE CIMENTO

Diante dos dois clínqueres produzidos, chega o momento de avaliar o desempenho na moagem de cimento. Os testes foram realizados produzindo o cimento CPV-ARI com 85% clínquer, 8% calcário e 7% gesso. A escolha do tipo de cimento foi justamente para avaliar o componente majoritário da receita, o clínquer. O resultado da operação com alto teor de enxofre, irá se chamar clínquer “Alto SO₃” e o da operação com baixo teor de enxofre, irá se chamar clínquer “Baixo SO₃”.

A produtividade do moinho com o clínquer “Alto SO₃” foi de 43 t/h, pelo sino estreito podemos concluir a estabilidade da operação, mostrando ser um material benéfico para moer. Já com o clínquer “Baixo SO₃” foi alcançada uma produtividade de 38 t/h, pelo sino mais largo podemos concluir a instabilidade da operação, mostrando ser um material mais difícil de moer, figura 48.

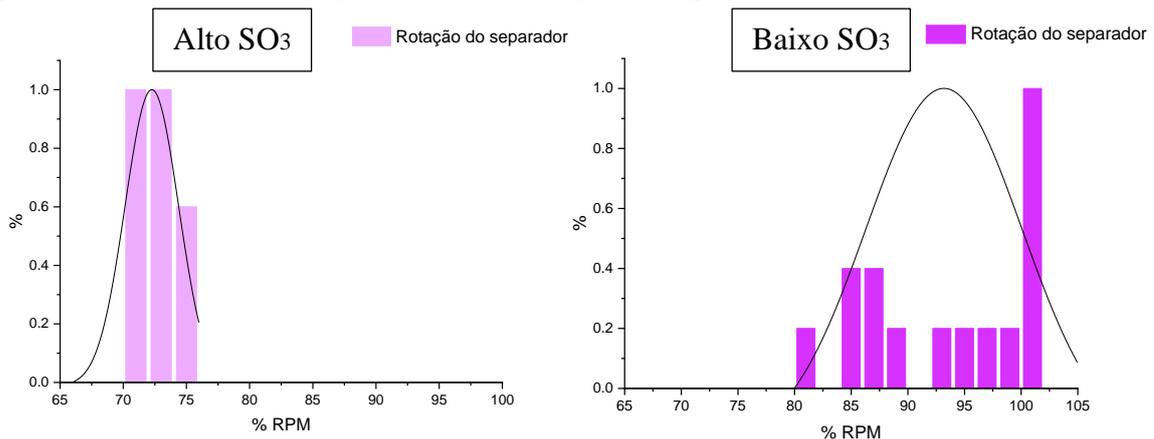
Figura 48 Curvas de distribuição normal da produtividade do moinho nos dois testes.



Pode-se notar que a produtividade do moinho foi consideravelmente maior, ganho médio de 5,74 t/h ou 15% a mais de produção, utilizando o clínquer com alto teor de enxofre. A finura para a produção desse tipo de cimento é no máximo 1,5% de retido na peneira #325.

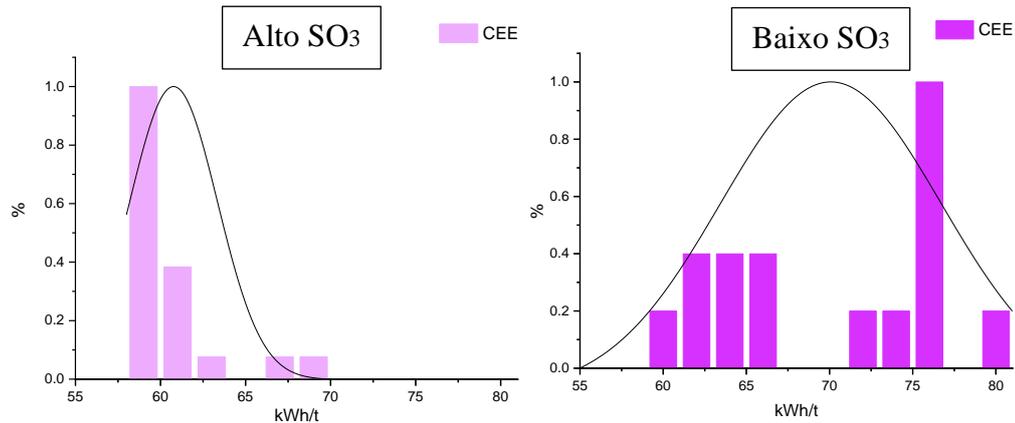
O cimento produzido com o clínquer “Alto SO₃” atingiu finura de 1,4%, dentro dos parâmetros estabelecidos pelo controle da qualidade, enquanto com o clínquer “Baixo SO₃” obteve finura de 1,7%, fora dos parâmetros estabelecidos. A figura 50 mostra como cada separador precisou trabalhar para conseguir atingir as finuras. Percebe-se que trabalhando com o clínquer “Alto SO₃” foi possível atingir finuras adequadas e sem aumentar nem alterar muito a rotação do separador. Em contrapartida, com o clínquer “Baixo SO₃”, a rotação do separador chegou a trabalhar em 100% da sua velocidade para atingir finuras no limite superior do permitido pelo controle da qualidade.

Figura 49 Curva de distribuição normal da rotação do separador nos dois testes.



O consumo específico de energia, figura 51, que é o consumo de energia por tonelada produzida de cimento, foi menor trabalhando com o clínquer “Alto SO₃”, 61 kWh/t, enquanto o clínquer “Baixo SO₃” foi 70 kWh/t. Isso se deve a estabilidade do processo e a maior produtividade.

Figura 50 Curvas de distribuição normal do Consumo Específico de Energia dos testes.

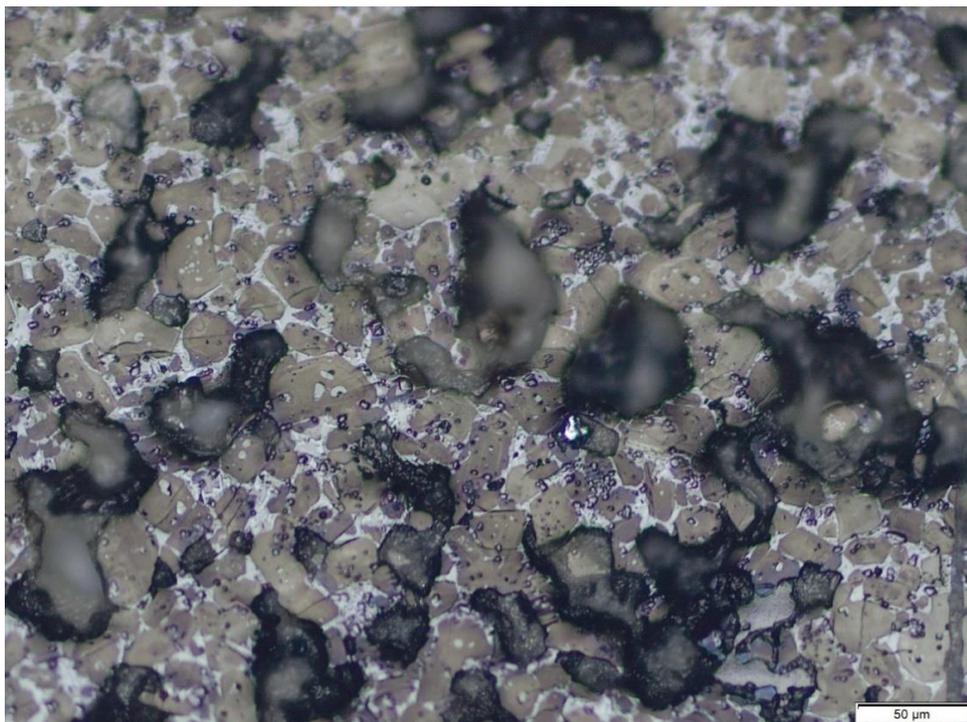


O ganho em redução do consumo de energia médio nos dois testes foi de 12,8 kWh/t, isso representa uma redução de quase 18% no consumo de energia na produção do cimento CPV-ARI.

4.1.3. MICROSCOPIA ÓPTICA

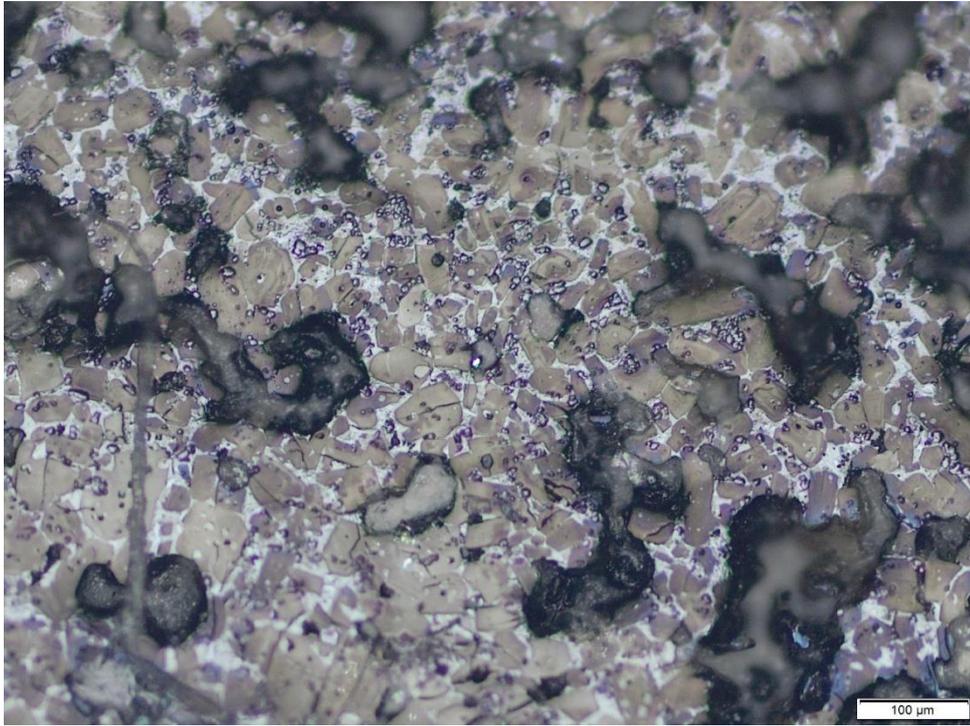
Nessa linha de pensamento, foi realizada a microscopia óptica das duas amostras de clínquer para analisar de maneira qualitativa qual o aspecto da seção do clínquer. Na figura 51 a 56 mostra a imagem da microscopia do clínquer “Alto SO₃”.

Figura 51 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO₃ com várias zonas de porosidade.



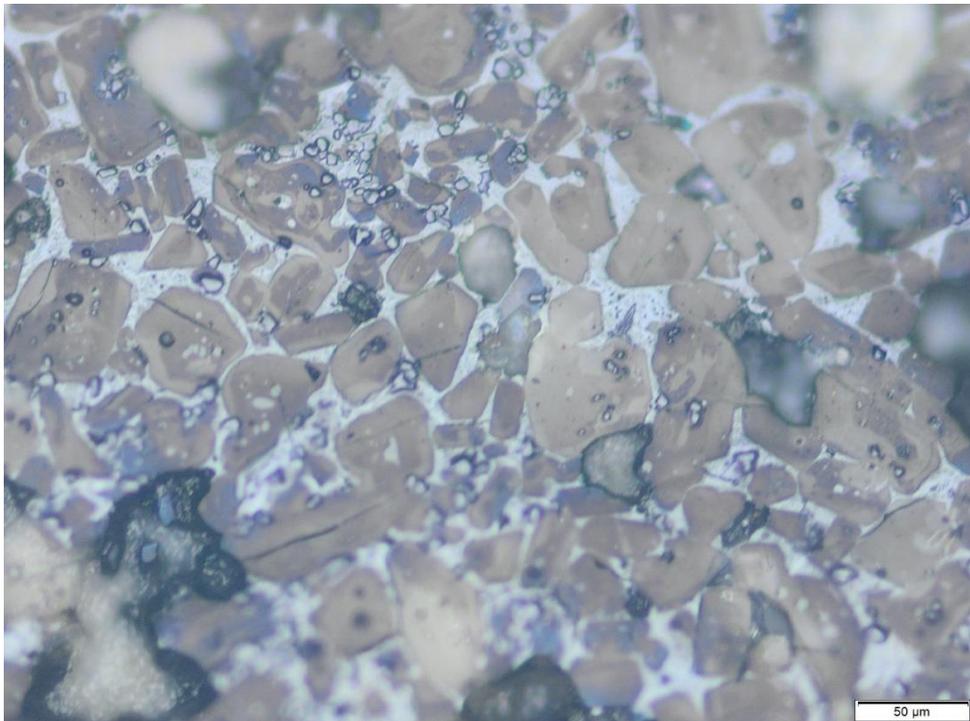
Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Figura 52 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO₃ com muitos cristais de C₃S.



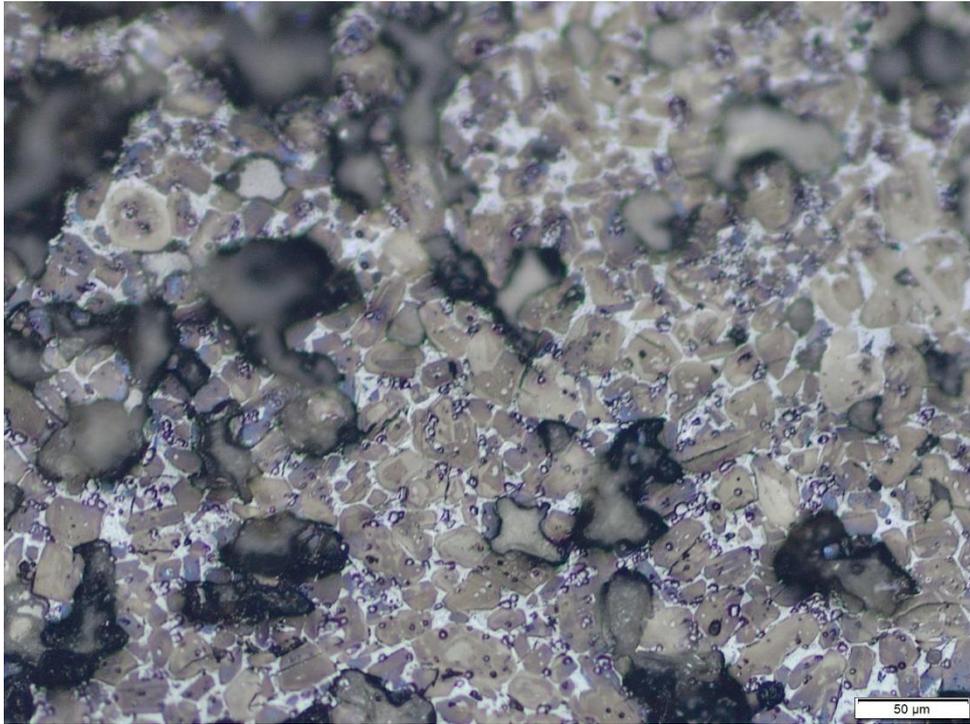
Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Figura 53 Microscopia óptica (20x) do clínquer amostra Alto SO₃ com cristais de C₃S bem definidos.



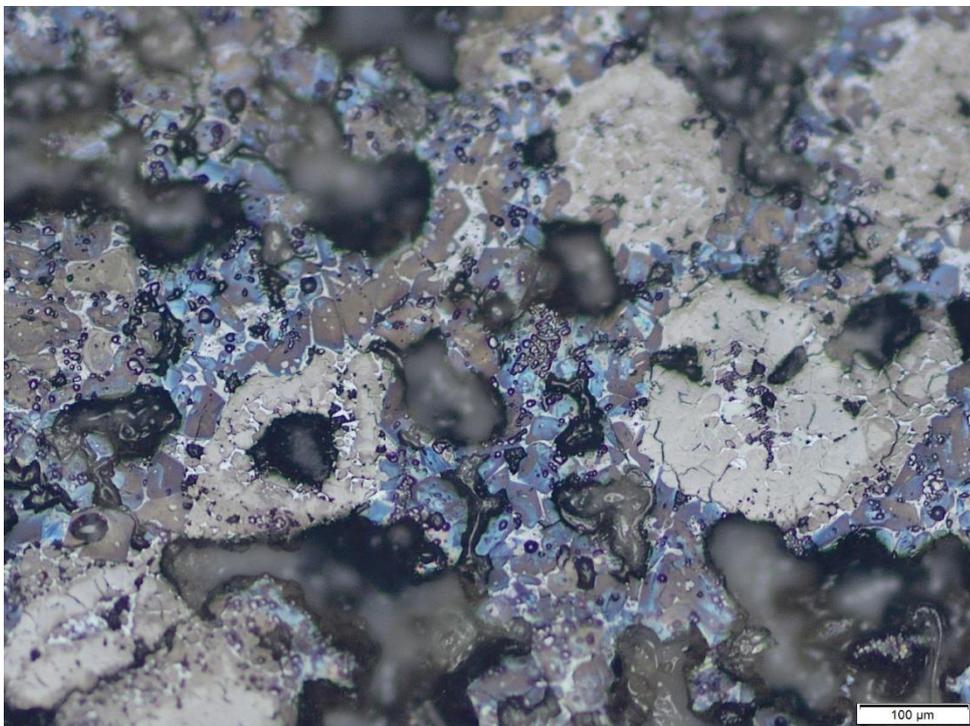
Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Figura 54 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO₃.



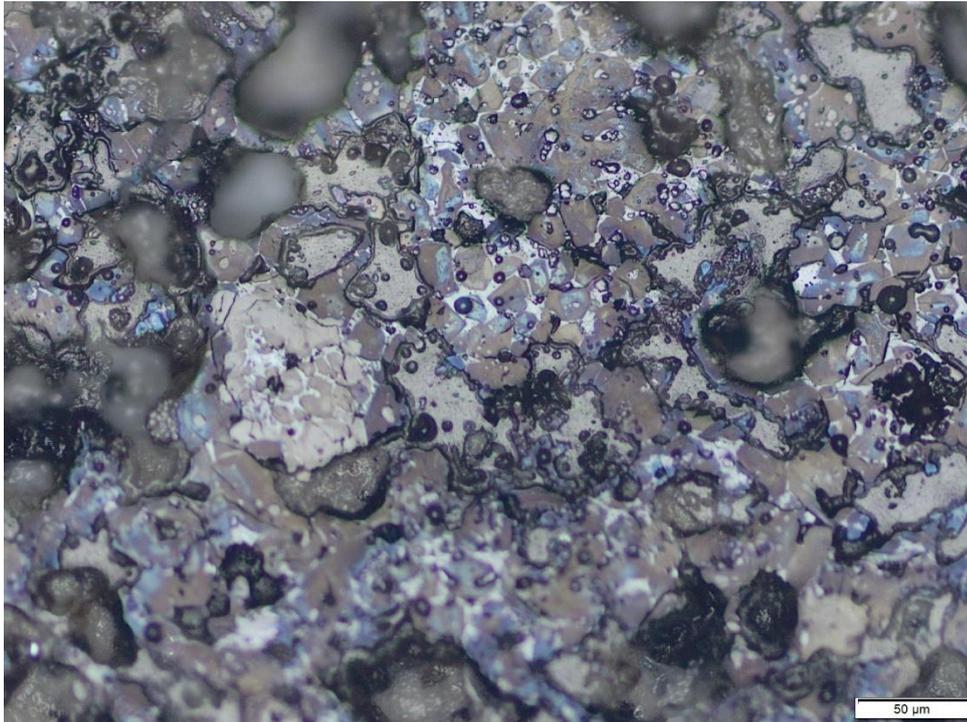
Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Figura 55 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO₃ com zonas de belita.



Fonte: PRÓPRIA, 2020.

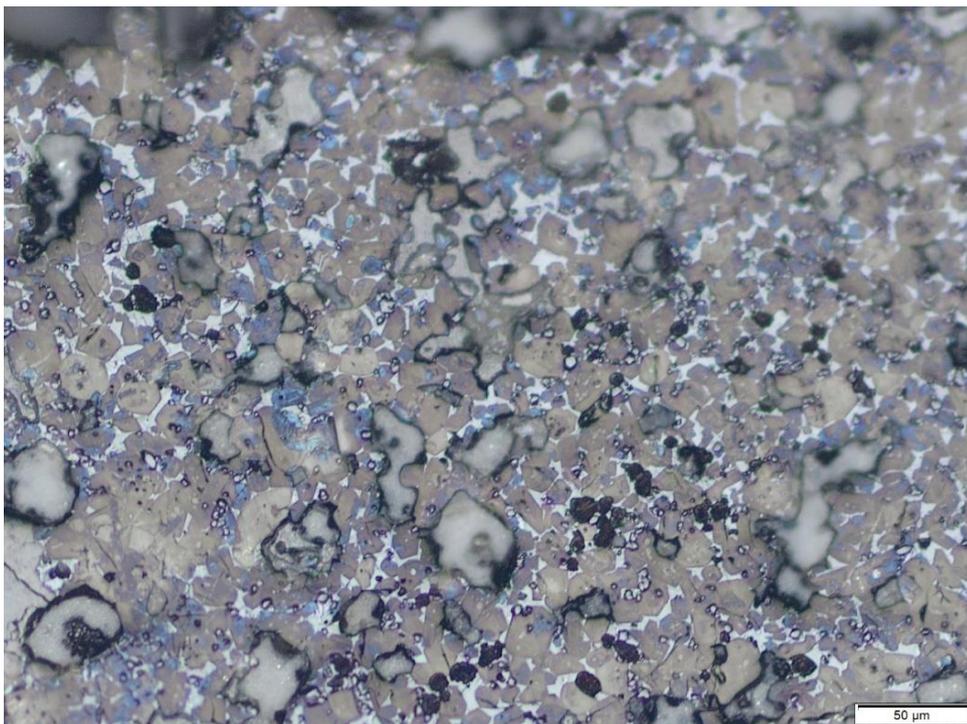
Figura 56 Microscopia óptica (10x) do clínquer amostra Alto SO₃ com C₃S, C₂S e poros.



Fonte: PRÓPRIA, 2020.

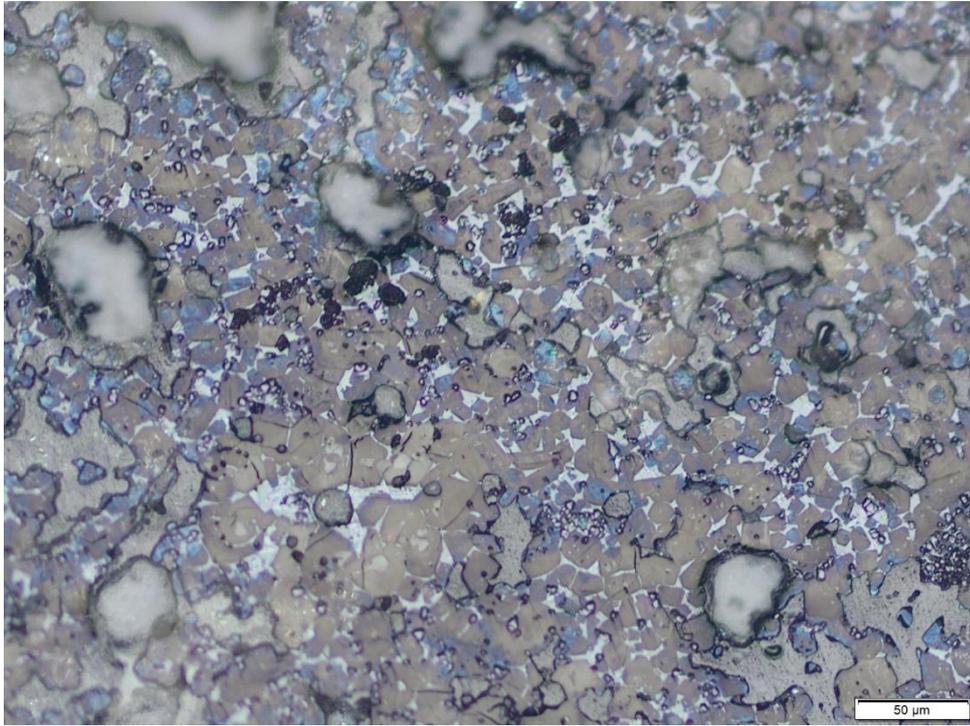
A partir dessas imagens, pode-se notar que o clínquer de alto teor de enxofre tem um perfil bastante poroso e com cristais de C₃S muito bem definidos. Na figura 57 a 59, mostra a microscopia do clínquer “Baixo SO₃”. De maneira qualitativa, podemos perceber que o clínquer de baixo teor de enxofre tem um perfil menos poroso e zonas de micro cristais de C₃S.

Figura 57 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Baixo SO₃.



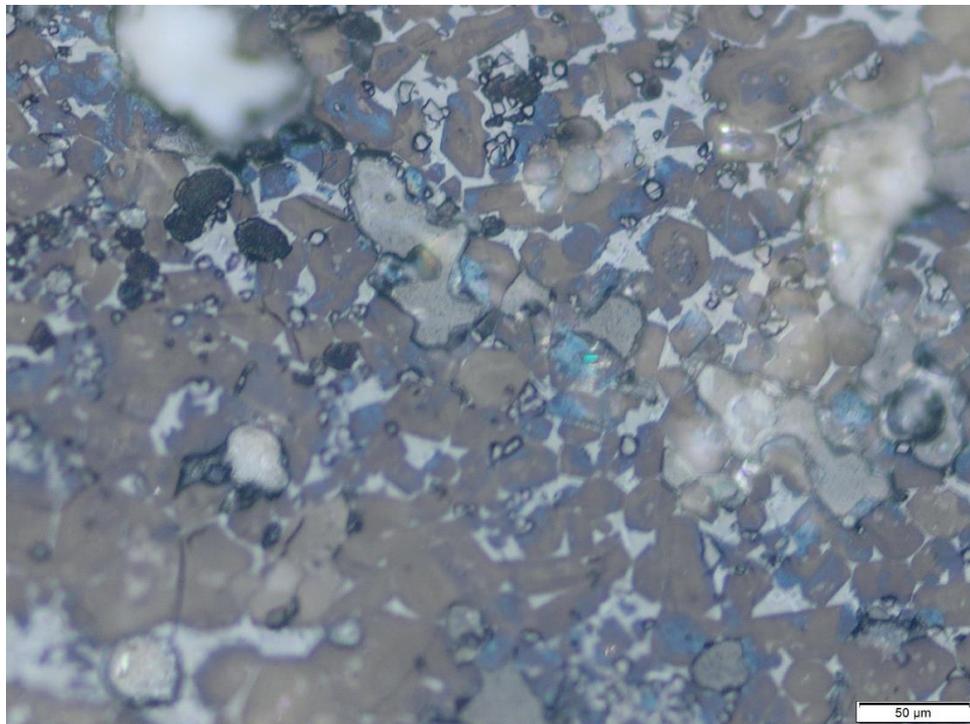
Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Figura 58 Microscopia Óptica (10x) do clínquer amostra Baixo SO₃.



Fonte: PRÓPRIA, 2020.

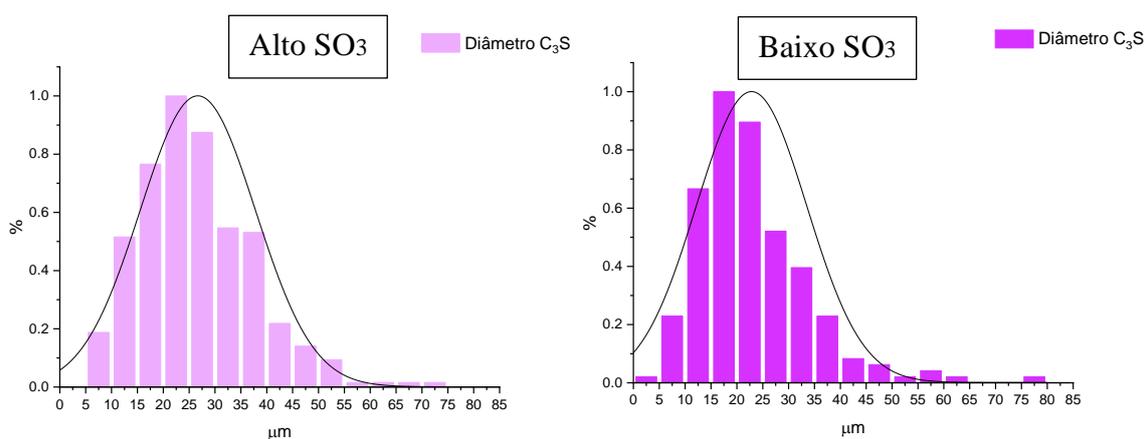
Figura 59 Microscopia Óptica (20x) do clínquer amostra Baixo SO₃.



Fonte: PRÓPRIA, 2020.

Além dessa avaliação, foi realizada uma varredura na superfície do clínquer medindo o diâmetro de 300 cristais de C₃S para obter uma média. O clínquer “Alto SO₃” resultou em um diâmetro médio de 26,7 μm, e o clínquer “Baixo SO₃” em 22,9 μm, ou seja, o clínquer de maior teor de SO₃ obteve um diâmetro de C₃S maior quando comparado do clínquer de menor teor, as curvas de distribuição das medições mostram um perfil semelhante, mas com ligeira redução do diâmetro de C₃S, figura 53.

Figura 60 Curvas de distribuição normal dos diâmetros dos cristais de C₃S dos clínqueres dos testes.



Segundo Maki et. Al. (1986), o teor de SO₃ influencia no diâmetro do cristal de C₃S, de maneira que quanto maior for o percentual de SO₃ no clínquer, maior será o diâmetro do cristal de C₃S.

4.1.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA

Segue na tabela 4 os resultados das resistências dos cimentos produzidos no teste industrial.

Tabela 4 Resultados das análises físicas dos cimentos dos testes industriais.

Amostra	Finura (%)	Blaine (cm ² /g)	R1 (MPa)	R3 (MPa)	R7 (MPa)	R28 (MPa)
ALTO SO₃	1,7	4830	27,6	37,5	43,1	49,0
BAIXO SO₃	2,1	5230	23,8	36,8	41,2	46,1

A partir do resultado, é possível observar que o clínquer com alto teor de SO₃ apresentou uma resistência inicial maior que o clínquer com baixo teor de SO₃. Isso se deve também pela melhor performance de moagem com o clínquer de alto teor de SO₃, pois conseguimos uma finura menor durante o teste sem estressar os equipamentos. Já o blaine da amostra A deu menor que o da amostra B, isso reflete na performance do separador, que, para produzir a amostra B,

precisou trabalhar com rotação consideravelmente maior que a amostra A, aumentando assim o by-pass do equipamento, reduzindo eficiência e gastando mais energia.

4.1.5. GRANULOMETRIA LASER

Um fator muito importante para avaliarmos o cimento é analisar como se comportou a distribuição granulométrica do cimento de cada teste industrial. Segue abaixo os resultados dos ensaios, sendo eles, as curvas granulométricas, figura 54, a distribuição granulométrica por faixa, tabela 5, e as dimensões características, tabela 6.

Figura 61 Curvas de distribuição granulométrica dos dois cimentos dos testes industriais. (Azul – cimento com clínquer “Baixo SO₃”, Vermelho – cimento com clínquer “Alto SO₃”)

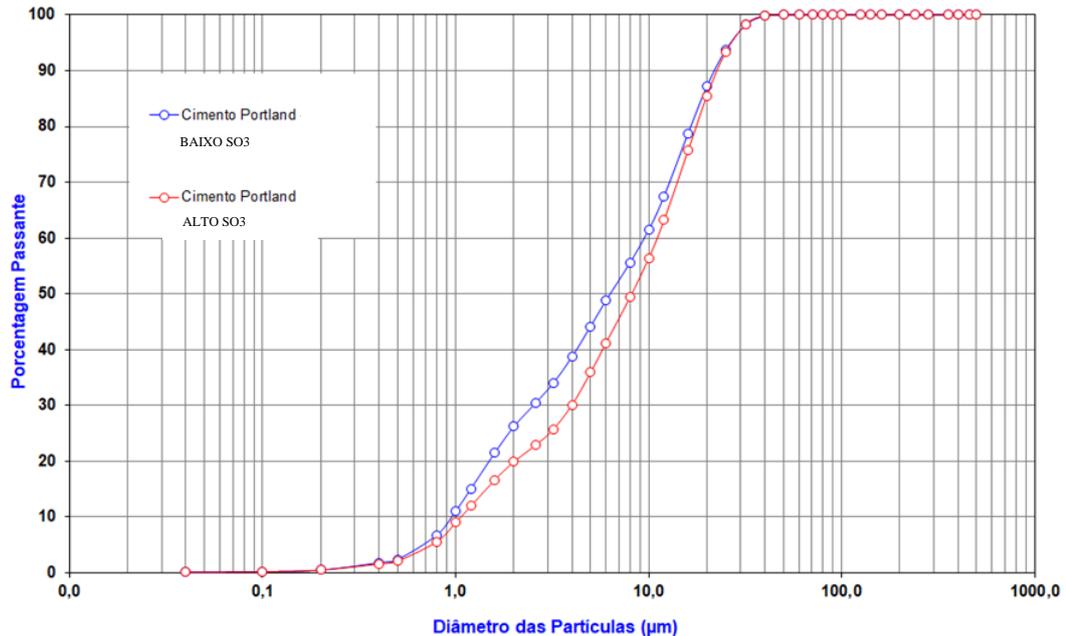


Tabela 5 Distribuição Granulométrica das Amostras.

Identificação das amostras	Resultados (%)		
	< 2 µm	3 a 30 µm	> 50 µm
Cimento Portland BAIXO SO ₃	26,2	64,6	0,0
Cimento Portland ALTO SO ₃	19,8	72,8	0,0

Tabela 6 Dimensões características e parâmetros de RRSB.

Identificação das amostras	D (µm)	N	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)
Cimento Portland <small>BAIXO SO₃</small>	9,2	0,9136	6,3	1,0	21,9
Cimento Portland <small>ALTO SO₃</small>	10,8	1,0115	8,2	1,1	22,6

NOTAS: D = diâmetro correspondente a 63,2% de partículas passantes

N = coeficiente angular da reta

A partir dos resultados, pode-se notar que o cimento produzido com o clínquer B apresentou maior geração de superfinos e menor na faixa de 3 a 30µm. Isso impacta de forma negativa no cimento. Segundo Neville, a hidratação começa na superfície das partículas, ou seja, é na área superficial total de cimento que representa o material disponível para hidratação. Portanto, a velocidade de hidratação depende da finura das partículas do cimento e, para um rápido desenvolvimento de resistência, é necessária uma finura elevada. Entretanto, o custo de moagem e o efeito da finura em outras propriedades, por exemplo, teor de sulfato de cálcio necessário, trabalhabilidade do concreto e comportamento em longo prazo, devem ser levados em conta.

É compreensível entender que quanto maior a finura mais rápido será o desenvolvimento de resistência, mas existe um limite de finura favorável para o desenvolvimento de resistência em idades maiores. Segundo Neville, para uma dada área específica do cimento, o desenvolvimento da resistência às primeiras idades seja melhor se pelo menos 50% das partículas tenham entre 3µm e 30µm, com, respectivamente menos partículas muito finas e menos partículas muito grandes. Acredita-se que se essa proporção granulométrica chegar a 95%, alcançará uma maior resistência inicial e uma resistência final do concreto.

A razão dos efeitos benéficos das partículas de tamanho intermediário pode ser encontrada nos ensaios de Aitcin que acharam que a moagem de cimento resulta segregação de uma certa quantidade de compostos. Especificamente, partículas menores que 4µm são muito ricas em SO₃ e em álcalis enquanto as partículas entre 4µm e 30µm são ricas em C3S.

No entanto, deve-se notar que não existe uma relação simples entre a resistência e distribuição de tamanho das partículas de cimento: por exemplo, um clínquer exposto ao tempo e parcialmente hidratado, depois de moído resulta um cimento com uma área superficial ilusoriamente grande.

A avaliação da evolução da hidratação do cimento pode ser realizada através de diferentes parâmetros que permitem determinar o grau de hidratação do cimento (TAYLOR, 1997).

Estruturalmente falando é possível que esses superfinos, advindos do processo, podem ser caracterizados como Grãos de Hadley, que são grãos menores que $5\mu\text{m}$ que podem parecer reagir completamente antes do fim do período intermediário e antes que tenha se depositado no interior gerando assim espaços vazios. Isso acarreta que durante a hidratação destes grãos, eles tendem a se fundir com os grãos maiores no quais as cascas vazias tendem a desaparecer após aproximadamente 7 dias.

4.2. TESTE LABORATORIAL

Um fato intrigante que ocorreu no teste industrial foi que o clínquer com cristal de alita de diâmetro médio $26,7\mu\text{m}$ resultou em um desempenho melhor do que o de $22,9\mu\text{m}$. De acordo com a teoria, era de se esperar o contrário no que diz respeito a esse tema em específico. Por isso, seguiu-se a segunda etapa do trabalho que foi analisar clínqueres com parâmetros semelhantes, mas diâmetros médios de cristal de alita distintos.

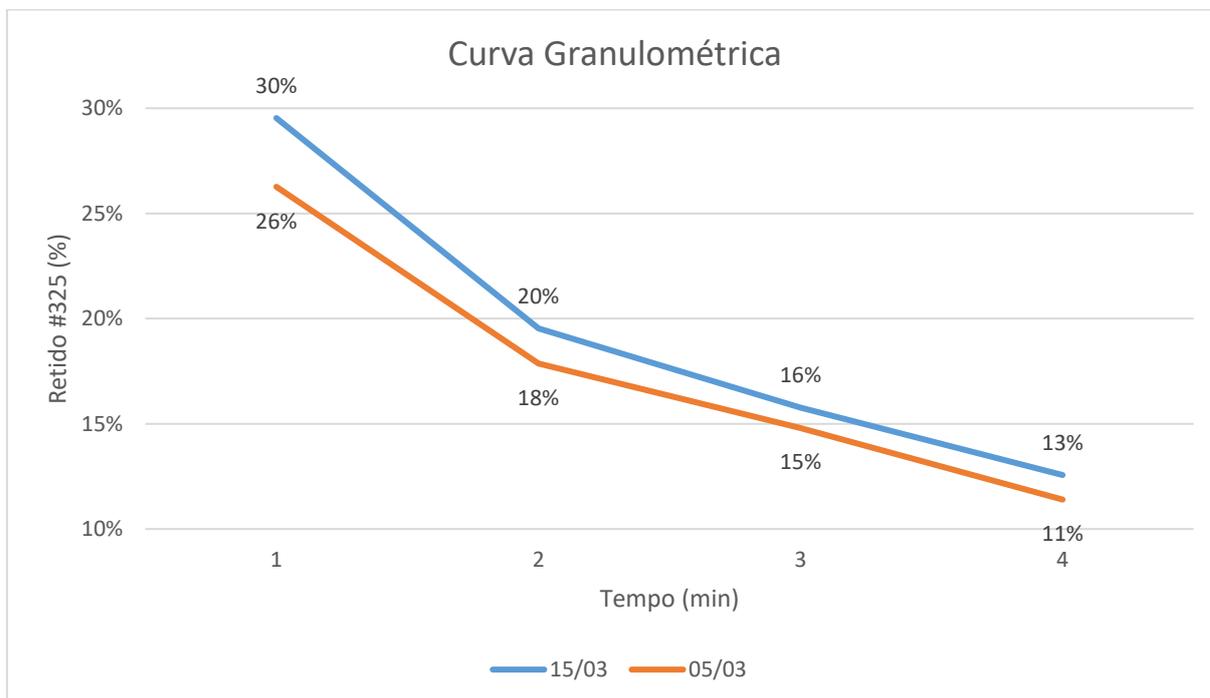
Foram coletadas amostras de clínqueres em diferentes períodos do ano e realizado ensaios de microscopia óptica. Após esse momento, foi separado as amostras com parâmetros de qualidade semelhantes, mas com o tamanho médio dos cristais de alita distintos. No primeiro semestre de 2021, foram escolhidas as amostras do dia 05 de março de 2021 e 15 de março de 2021. Essas amostras foram pegas a cada hora do dia, chegando ao final do dia, elas foram homogeneizadas e analisadas, resultado abaixo na tabela 9.

Tabela 7 Resultado de FRX das amostras escolhidas.

Amostra	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	MgO/S O ₃	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO Livre (%)
05/03	19,3	4,5	2,6	64,1	6,02	1,8	3,34	0,14	1,07	0,41	3,37
15/03	19,08	4,45	2,61	64,07	6,06	1,77	3,42	0,13	1,03	0,4	3,46

Através da microscopia óptica, a amostra de 05/03 obteve um diâmetro médio de C3S de $21,3\mu\text{m}$, e a amostra de 15/03 $36,7\mu\text{m}$. Diante disso, utilizando a metodologia explicada anteriormente para realizar o ensaio de moagem, nos tempos 1, 2, 3 e 4 min, com repetibilidade de 3, obteve-se as seguintes curvas granulométricas, figura 34.

Figura 62 Curvas Granulométricas das amostras do 1º semestre.



Diante do gráfico, pode-se notar que a amostra do dia 05/03, com diâmetro de cristal médio de alita menor, apresentou uma maior moabilidade. Durante o teste, nos tempos a partir de 2 min foi sendo observado formação de colagem nas paredes dos anéis do moinho, gerando desconfiância no desempenho de moagem. Por isso, no segundo semestre de 2021, realizou-se um novo ensaio com novas amostras reduzindo o tempo de moagem para 5, 10, 15 e 30s.

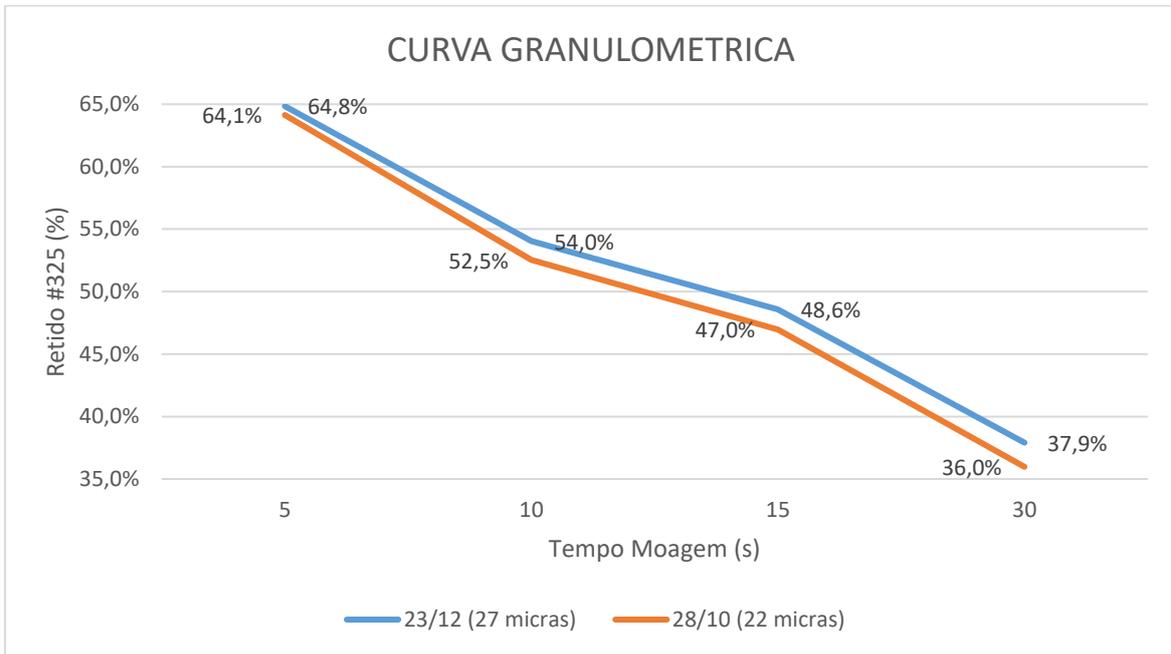
As amostras escolhidas para o segundo teste laboratorial foram da produção dos dias 28 de outubro de 2021 e 23 de dezembro de 2021. Os resultados químicos de cada amostra seguem na tabela 7.

Tabela 8 Resultado FRX das amostras escolhidas do 2º semestre.

Amostra	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	MgO/S O ₃	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO Livre (%)
28/10	19,55	4,11	2,63	63,05	7,04	1,55	4,54	0,11	1,09	0,41	2,07
23/12	19,24	4,49	2,54	64,09	6,69	1,57	3,84	0,09	1,06	0,44	2,56

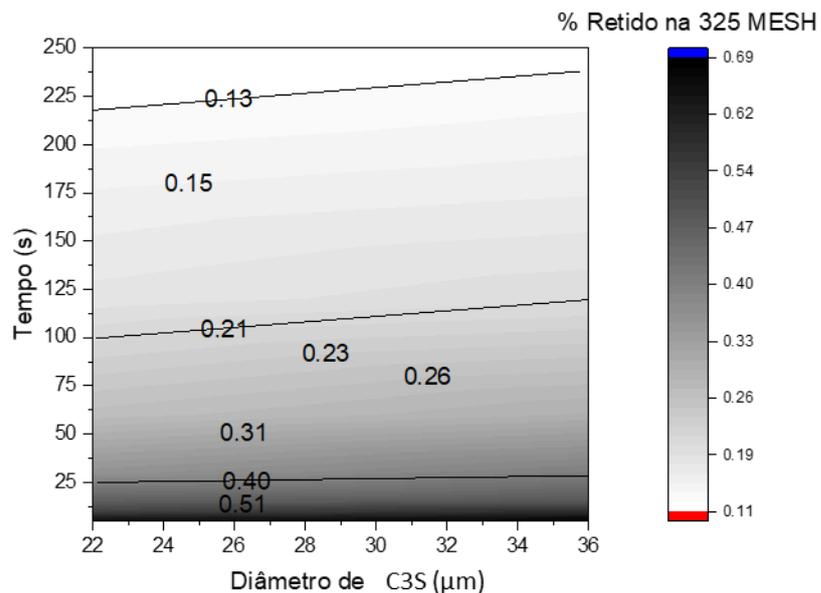
As amostras do dia 28/10 e 23/12 deram um diâmetro médio de 22µm e 27µm, respectivamente. No gráfico abaixo, figura 35, mostra o resultado do ensaio de moagem.

Figura 63 Curvas Granulométricas dos ensaios do 2º semestre.



É possível notar, a partir do resultado, que o tamanho do cristal de alita possui influência na moabilidade. Por essa razão, a figura 57 mostra de que forma essa influência acontece.

Figura 64 Gráfico demonstrativo da influência do diâmetro de C3S no tempo de moagem.



Pode-se notar que à medida que o diâmetro do cristal de C3S aumenta, mais tempo e, provavelmente, energia, será gasta para reduzir a granulometria.

5. CONCLUSÃO

Em resumo, o trabalho foi dividido em duas partes, a primeira sendo uma análise industrial sobre o impacto do teor de enxofre do combustível no forno, clínquer, moagem e cimento, e a segunda sendo uma análise laboratorial sobre a influência do tamanho do cristal de C₃S na moabilidade do clínquer.

Nos testes industriais é possível concluir que o teor de enxofre no combustível influencia nas operações tanto do forno como na moagem de cimento.

No forno quando se trabalha com alto teor de enxofre, há uma necessidade maior de oxigênio e redução de combustível para não haver formação de anéis, além de acontecer uma maior geração de elementos menores impactando na densidade e porosidade do clínquer, tornando-o mais pulverulento e exigindo maior frequência de limpeza na caixa de fumaça. Por isso, é de se esperar, uma redução na alimentação para estabilizar o processo. Consequência disso, há um aumento no consumo específico de energia e redução de temperatura na zona de queima. Pela microscopia, o tamanho do cristal de C₃S do clínquer de alto teor de enxofre foi maior, e, pela difração de raio-x, maior formação da fase M1.

Na moagem de cimento, a produção com clínquer de alto teor de enxofre resultou em: ganho de 15% na produção, maior finura exigindo menor rotação do separador, redução de 13% no consumo específico de energia, maior resistência à compressão e menor geração de superfinos.

Na análise laboratorial sobre a influência do tamanho do cristal de C₃S na moabilidade do clínquer, foi identificado que a moabilidade melhora quando há redução do tamanho do cristal se mantiver os teores de enxofre.

De forma geral, podemos concluir que o teor de enxofre e o tamanho do cristal de C₃S possuem influência na moabilidade e reatividade do clínquer, tendo como consequências impacto no consumo específico de energia. Apesar de haver um aumento no consumo específico de energia do forno, a redução no consumo de energia da moagem de cimento é maior, principalmente, porque o consumo de energia da moagem representa 40% do consumo da energia total da fábrica.

Por fim, fica concluído que o SO₃ é positivo para a qualidade do clínquer e cimento, trazendo aumento de produtividade da moagem e redução total no consumo específico de energia.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - 1984 _Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica; NBR 6474* Rio de Janeiro

BALZER, H.J. — 1983 — Microscopic examination of cement clinker using the linear traverse technique for determination of clinker grindability. Zement—Kalk—Gips, Wiesbaden, v. 36, n^o 11, p. 9—11, Nov.

BAYLES J.; GOUDA G. R. Study of clinker grinding in a ball mil. Proceedings of the Third International Conference on Cement Microscopy – International Cement Microscopy Association, Duncaville, Texas, p.106-121, 1981.

CENTURIONE, Sergio Luiz. **A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos.** 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CENTURIONE, Sérgio Luiz. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland.** 1993. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHATTERJEE, A. Cement raw materials and raw mixes. Word Cement, London, v. 10, n^o 4, p. 20-27, May. 1985

CHATTERJEE, A.K. - 1979 — Phase composition, microstructure , quality and burning of portland cement clinkers ; a review phenomenological interrelations, part 1. World Cement, London, v. 10, n^o 4, p. 124—35, May.

CHATTERJEE, A.K. Phase composition, Microstructure, quality and burning of Portland Cement Clinkers; a review phenomenological interrelations, part 1. Word Cement, London, v. 10, n^o 4, p. 124-135, May. 1985.

CHRISTENSEN, N.H. 1978 The effects of magnesia on lime combination in clinker. World Cement, London , v. n^o 7, p. 223-226, Oct. 1981 — Model ling the clinker reaction.

DORN, J.D. The influence of coarse quartz in kiln feed on the quality of clinker and cement. INTERNATIONAL Conference on Cement Microscopy, 7th, Ft. Worth, USA. 1985.

DUDA, W. H. **Cement data book:** international process engineering in the cement industry. 3. Ed. Berlin: Wiesbaden, 1985. 560p.

DUDA, W. H. **Cement data book:** Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, p. 173-176, 1977.

FARENZENA, Hélio. **Fabricação do cimento Portland**, Aspectos Gerais, Edição Cimentec, 1995.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B.; Cominuição; In: **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, 2004; Capítulo quatro.

FRIGIONE G.; ZEZONE F.; ESPOSITO M. V. The effect of Chemical composition on Portland cement clinker grindability. **Cement and Concrete Research**, v.13, n. 4, p.483-492, 1983.

FUNDAL, E. Microscopy of cement raw mix and clinker. FLS Review. 1975.

FUNDAL, E. The burnability of cement raw mixes world cement technology. FLS Review. 1975.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HILLS L. M. The Effect of clinker microstructure on grindability; extended bibliographies. Portland Cement Association, 1995.

HOLDERBANK MANAGEMENT AND CONSULTING. Aptitude a la cocion de las mesclas de crudo (clinkerization). Seminario de Cemento, Tecnologia de Materiais, México. 1988.

HORNAIN H.; REGOURD M. Cracking and grindability of clinker. Ciments, Betons, Platres, Chaux, n. 727, p. 355-359, 1980 (Originally from the 7^a International Congress on the Chemistry of Cement, 1980).

JOHANSEN, V. — 1979 — Role of liquid phase and mineral sizers. FLS Review, Copenhagen: F. L. Smidth.

KIHARA, Y. — 1973 - Estudo mineralógico de clinquer de cimento Portland. São Paulo, (Dissertação de Mestrado IG - USP).

KRAMER, H. — 1957 — Les déséquilibres dans les clinkers et leurs causes. Paris, CERILH. (Traduction n.º 847) .

KREFT, W. ; SCHEUBEL, B. & SCHÜTTE, R. 1987. Clinker quality, power economy and environmental load influencing factors and adaptation to the burning process, part I . **Zement-Kalk-Gips**, v. 40 , n º3, p. 107-111, Mar.

- MAKASHEV, S.D . M. — 1974 - Effect of raw material physico— chemical properties on reactivity of raw mix and on clinker mineralogenesis processes In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 6th Moscow. v. 4.
- MAKI, I. - 1986 — Relationship of processing parameters to clinker properties; influence of minor components 8th. INTERNATIONAL Congress on the chemistry of Cement, Rio de Janeiro, v. 1.
- MENINO, Amândio Filipe Santos. Otimização de resistências mecânicas do cimento com base nas suas características químicas e mineralógicas. 2015. Tese de Doutorado.
- MILLER, F. M. 1980 Dust clinker and grindability problems. Rock Products, Chicago, v * 83, 4, p. 152157, Apr.
- PAUL, MARCUS. Effect of grain size of raw meal on burnability and clinker polymorphs. 2016.
- PAULA, Luiz Gonzaga de. Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos. 2009.
- PECCHIO, Marcelo. **A influência de fósforo, enxofre e estrôncio na mineralogia do clínquer portland.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- RAUSCHENFELS, E. 1976 — clinkerability of cement raw meal . **Zement-Kalk-Gips**, Wiesbaden, v. 29, n^o 2, p. 78—85, Feb.
- SANTOS, Aldo Ramos. A geração de coque de petróleo devido ao processamento de petróleos pesados e o seu uso na produção de clínquer de Cimento Portland. 2007.
- SCHEUBEL, B. - 1986 — Investigation on the influence of the . kiln system on clinker quality. INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro.
- SOUZA, Vlândia Cristina Gonçalves de. Influência das características mineralógicas, físicas e químicas dos clínqueres de cimento Portland sobre sua moabilidade. 2007.
- STANĚK, Theodor; SULOVSĚKÝ, Petr. The influence of the alite polymorphism on the strength of the Portland cement. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 7, p. 1169-1175, 2002.
- TAYLOR, Harry FW et al. Cement chemistry. London: Thomas Telford, 1997.
- THEISEN, K. - 1992 — The influence of raw mix burnability on cement clinker. World Cement, London v. 23 , n^o 08 - p. 17-23, Aug.

TIMASHEV, V.V. The kinetics of Clinquer's formation. Its structure, composition and phases. INTERNACIONAL Congress on the Chemistry of Cement. Moscov. 1985.

TIMASHEV, V. V. The Kinetics of Clinker Formation The Structure and Composition of Clinker and its Phases. in 7th ICC, v. 1, 1980.

TOVAROV V.V.; KOSENKO A.V.; ZASLAVSKII V.I. Effect of temperature on grindability of clinkers. Tsement, v.3, p.12-15, 1974.

7. ANEXOS

7.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRIA A LASER

 Associação Brasileira de Cimento Portland	ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 132548	1/5
	Interessado: Elizabeth Cimentos Ltda. Endereço: Av. Gleba Andreza Macatu s/nº LT Parc 4A – Alhandra/PB Referência: Pedido de compra 317073	

Amostras nºs: 234598 e 234599	Data de entrada: 01.12.20
Material declarado: Cimento Portland	
Período de realização dos ensaios: 03.12.20	
Objetivo: Determinação da curva granulométrica por granulômetro de difração a <i>laser</i>	

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta a distribuição granulométrica obtida por meio do analisador de partículas por difração a *laser* de duas amostras de cimento Portland. As amostras coletadas e enviadas pelo interessado receberam as seguintes identificações:

ABCP	Interessado
234598	Cimento Portland T 159
234599	Cimento Portland T 5707

2. MÉTODO DE ENSAIO

PO-GT-1043 rev. 00 Distribuição granulométrica a *Laser*(*)

3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica a laser foi realizada na fração passante na peneira de 0,42 mm. As *Tabelas 2 e 3* apresentam as distribuições granulométricas das amostras enviadas e as *Figuras 1 a 3* ilustram os resultados obtidos.

TABELA 1 – Peneiramento na fração 0,42 mm

ABCP	Interessado	% passante	% retida
234598	Cimento Portland T 159	100,0	0,0
234599	Cimento Portland T 5707	100,0	0,0



TABELA 2 – Porcentagem passante – Cimento Portland – T 159

D (µm)	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
P: (%)	0,1	0,1	0,2	0,5	1,3	1,8	2,4	3,4	4,8	6,8
D (µm)	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
P: (%)	9,0	11,1	13,2	15,1	17,0	18,7	21,6	24,1	26,2	27,8
D (µm)	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3
P: (%)	29,2	30,5	31,7	32,9	34,0	35,2	36,4	37,5	38,7	40,4
D (µm)	4,6	5,0	5,3	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
P: (%)	42,1	44,2	45,7	47,1	48,8	50,7	52,5	54,1	55,6	57,1
D (µm)	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
P: (%)	58,6	61,5	64,5	67,5	70,5	73,4	76,2	78,8	81,2	83,4
D (µm)	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	25,0	28,0	30,0	32,0	34,0
P: (%)	85,4	87,2	88,8	90,2	91,5	93,7	96,2	97,4	98,3	99,0
D (µm)	36,0	38,0	40,0	43,0	45,0	50,0	53,0	56,0	60,0	63,0
P: (%)	99,4	99,7	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

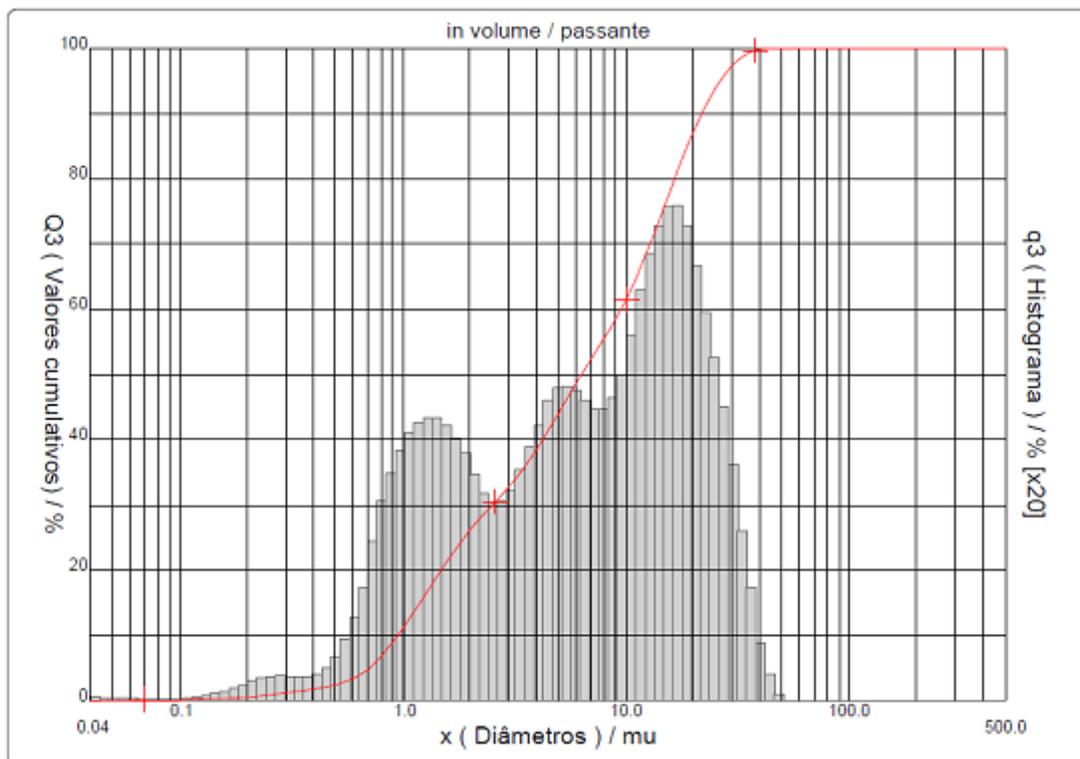


FIGURA 1 – Distribuição granulométrica – Cimento Portland – T 159



TABELA 3 – Porcentagem passante – Cimento Portland – T 5707

D (µm)	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
P (%)	0,1	0,1	0,2	0,5	1,2	1,6	2,1	2,9	4,1	5,6
D (µm)	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
P (%)	7,3	9,0	10,5	12,0	13,4	14,6	16,7	18,4	19,9	21,0
D (µm)	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3
P (%)	21,9	22,9	23,8	24,7	25,7	26,8	27,9	29,0	30,1	31,9
D (µm)	4,6	5,0	5,3	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
P (%)	33,6	35,9	37,6	39,2	41,2	43,5	45,6	47,6	49,4	51,2
D (µm)	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
P (%)	53,0	56,4	59,8	63,2	66,5	69,7	72,8	75,7	78,5	81,0
D (µm)	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	25,0	28,0	30,0	32,0	34,0
P (%)	83,4	85,5	87,4	89,1	90,6	93,3	96,2	97,5	98,4	99,1
D (µm)	36,0	38,0	40,0	43,0	45,0	50,0	53,0	56,0	60,0	63,0
P (%)	99,5	99,7	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

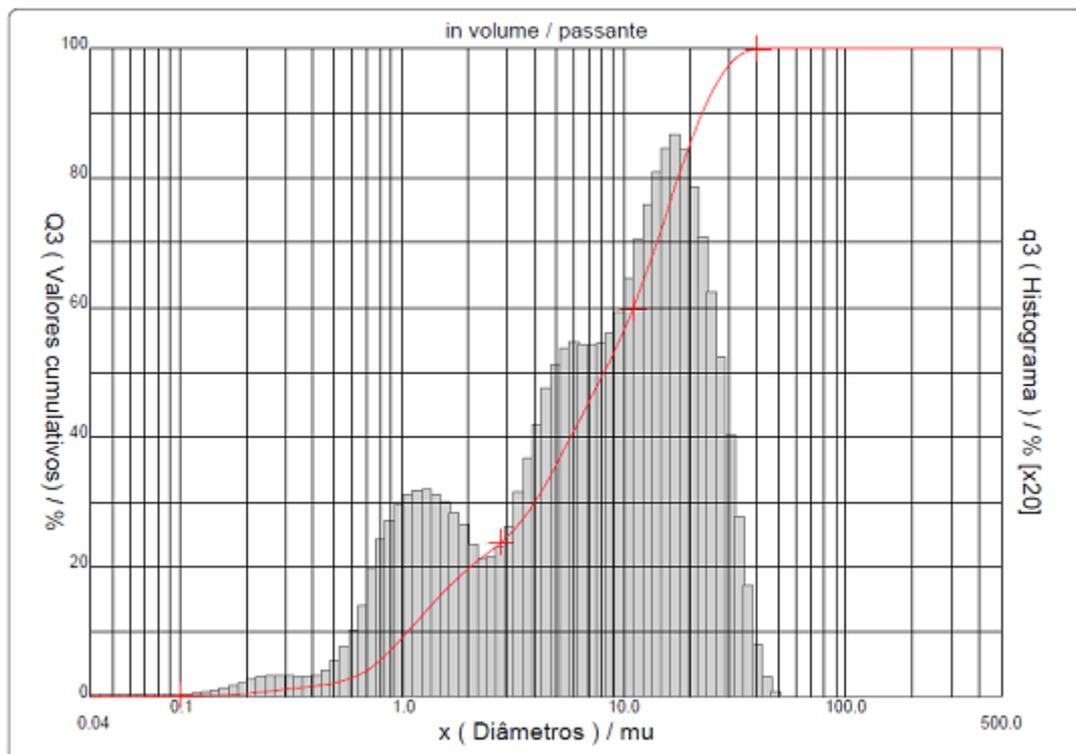


FIGURA 2 – Distribuição granulométrica – Cimento Portland – T 5707

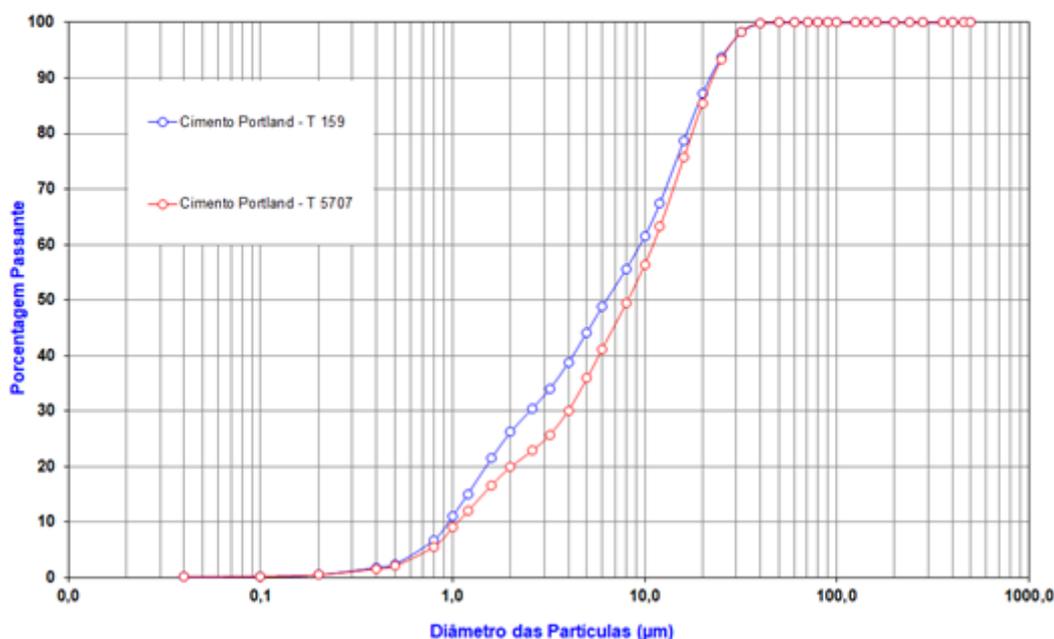


FIGURA 3 – Distribuição granulométrica das amostras de cimento

Os parâmetros necessários para a representação gráfica por meio de uma reta na malha de RRSB (segundo a norma alemã DIN 66145), bem como os valores de dimensão média e a equivalente a 10 e 90% de partículas passantes, são apresentados na *Tabela 4*.

TABELA 4 - Dimensões características e parâmetros de RRSB.

Identificação das amostras	D (µm)	N	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)
Cimento Portland T 159	9,2	0,9136	6,3	1,0	21,9
Cimento Portland T 5707	10,8	1,0115	8,2	1,1	22,6

NOTAS: D = diâmetro correspondente a 63,2% de partículas passantes
N = coeficiente angular da reta



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao desempenho de cimentos, com base exclusivamente na distribuição granulométrica, são desejáveis volumes de partículas de 3 a 30 μ m entre 60 e 70%. Partículas abaixo de 2 μ m de diâmetro pouco influenciam para o aumento de resistência, contribuindo mais expressivamente para o aumento do requerimento de água para uma mesma trabalhabilidade. Por outro lado, partículas maiores que 50 μ m comportam-se praticamente como inertes. A *Tabela 5* apresenta os valores obtidos para as amostras analisadas.

TABELA 5 - Distribuição granulométrica por faixa

Identificação das amostras	Resultados (%)		
	< 2 μ m	3 a 30 μ m	> 50 μ m
Cimento Portland T 159	26,2	64,6	0,0
Cimento Portland T 5707	19,8	72,8	0,0

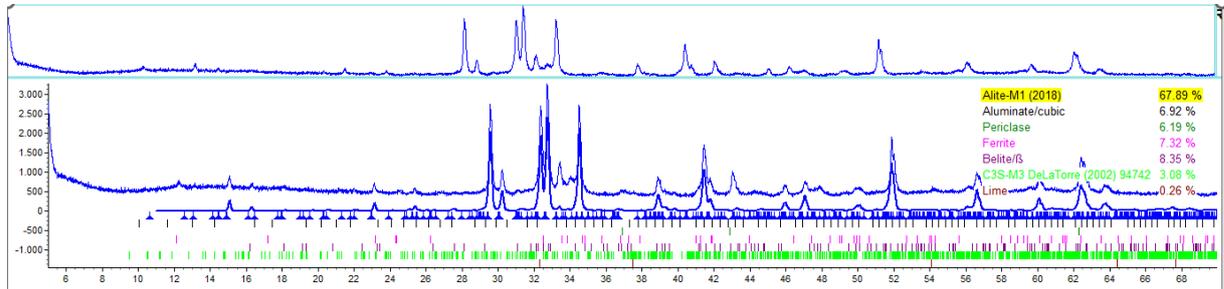
São Paulo, 16 de dezembro de 2020.


 Eng. Flávio André da Cunha Munhoz
 Supervisor Laboratório de Cimento


 Geól. Arnaldo Forti Battagin
 Gerente do Laboratório
 CREA nº 0600586647

7.1.DIFRATOGRAMAS REFINADOS COM USO DO SOFTWARE TOPAS.

AMOSTRA ALTO SO₃



AMOSTRA BAIXO SO₃

