

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

DEGMAR PEIXOTO DINIZ

**INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE E FINURA DA SÍLICA NA ESTRUTURA DA
ALITA.**

JOÃO PESSOA
2019

Catlogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

D585i Diniz, Degmar Peixoto.

INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE E FINURA DA SÍLICA NA
ESTRUTURA DA ALITA. / Degmar Peixoto Diniz. - João
Pessoa, 2019.

116 f. : il.

Orientação: Sandro Torres.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Alita. 2. Cristalinidade. 3. Rietveld. 4. Quartzo.
5. Sílica Amorfa. 6. Polimorfismo. I. Torres, Sandro.
II. Título.

UFPB/BC

DEGMAR PEIXOTO DINIZ

**INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE E FINURA DA SÍLICA NA ESTRUTURA DA
ALITA.**

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

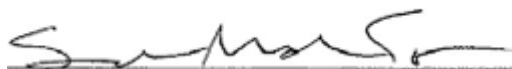
JOÃO PESSOA
2019

DEGMAR PEIXOTO DINIZ

INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE E FINURA DA SÍLICA NA ESTRUTURA DA ALITA.

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

BANCA EXAMINADORA



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



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



Prof. Dr. William Vieira Fernandes – CT/UFPB
Examinador Interno 2

Profa. Dra. Carlyne Kirk – University of Edinburgh.
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha existência, por mais uma oportunidade de evolução Espiritual, e por tantos mistérios a explorar!

Aos meus Pais, “D. Benzica” e “Totó”, e a minha Avó, a “Mam” (In Memoriam), pela educação através dos seus exemplos, e por me ensinar a nunca desistir.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Sandro; pela orientação segura e pelo grande apoio ao longo dessa caminhada.

Aos Profs.; Dr. Marçal Rosas, Dr. Antônio Leal e Dr. William Vieira, pelo incentivo e tantas trocas de ideias.

Ao meu amigo Vilmar, companheiro nessa jornada, pelo incentivo e pelas valiosas discussões sobre o tema.

A minha amiga Victória Mochizuki, pelo incentivo e pela ajuda na organização de textos.

Ao meu amigo José Alysson Medeiros, pelo incentivo e pela parceria em trabalhos conjuntos.

A toda Equipe do Laboratório da Elizabeth Cimentos, em especial a Ailton, Marlilton e Humberto; pelo incentivo e pelo entusiasmo no exaustivo trabalho de preparação de amostras, análises físicas e químicas, e pelas incontáveis repetições de ensaios na busca da perfeição.

Ao meu irmão Geovani e Esposa, Salete; a Gratidão pelo apoio nas fases mais difíceis; também a Geovani, pelo incentivo sempre entusiasmado e pela ajuda na correção do texto e ortografia.

Ao amigo Ricardo pelo apoio, e a valiosa ajuda na execução de tantos ensaios de DRX.

Ao Prof. Nivaldo pela valiosa contribuição na tradução do resumo.

A minha Esposa Simone; pelo constante incentivo, pelo apoio, e por suportar tantas ausências em todo esse período.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

RESUMO

A sustentabilidade é hoje, sem dúvida, a grande preocupação e busca da indústria cimenteira em todo o mundo. O passo gigantesco e necessário na direção dessa meta depende não apenas do conhecimento técnico e do uso de novas tecnologias nas unidades produtivas, mas é também imprescindível o aprofundamento do conhecimento científico, por parte de todo o corpo técnico envolvido no processo. Conforme diversos estudos, parte dessa busca está na produção de cristais de alita cada vez menores e com a maximização da relação polimórfica M1/M3, o que leva à redução do consumo elétrico nas moagens de cimento e intensifica a reatividade do C3S. O fenômeno da formação dos cristais de alita ocorre na superfície das partículas de sílica, e estas afetam a sua estrutura. Para compreender esse efeito, é necessário padronizar as composições químicas e físicas das farinhas, bem como suas condições de queima e resfriamento. Para isso, as técnicas de FRX, Granulometria Lazer, Microscopia Ótica de Luz Transmitida e DRX com refinamento Rietveld são fundamentais; e nesse estudo revelaram a influência da dimensão das partículas de sílica sobre a Cal Livre e a Dimensão do C3S, mostrando que esse efeito se deve apenas à sua dimensão e pureza, e não à sua cristalinidade. Por outro lado, a dimensão das partículas de sílica e a sua cristalinidade mostraram bastante influência sobre a relação morfológica M1/M3 da alita. Por outro lado ainda, a ação conhecida do SO₃ sobre a estabilização da forma morfológica M1, só foi observada para a sílica cristalina e para cristais de C3S oriundos de quartzo com dimensão média < 50 µm. Os resultados mostraram que a combinação da dimensão do quartzo e o % de SO₃ do clínquer são fatores importantíssimos na redução da dimensão média do C3S e na maximização da relação morfológica M1/M3.

Palavras chaves: Alita. Cristalinidade. Rietveld. Quartzo. Sílica Amorfa. Polimorfismo.

ABSTRACT

The sustainability today is, doubtlessly, the major concern and pursuit in cement industry all over the world. The gigantic step is necessary towards this aim depends not only on the technical knowledge and use of new technologies in the productive units, but it is also crucial deepening of the scientific knowledge, on the part of all the technical staff involved in the process. According to several studies, part of this pursuit is in the production of alite crystals increasingly smaller and with the maximization of the polymorphic relation M1/M3, which leads to the reduction of electric consumption in the grinding of cement and intensifies the reactivity of the C3S. The phenomenon of formation of the crystals of alite occur on the surface of the silic particles, and they affect their structure. To comprehend this effect, it is necessary to standardize the chemical and physical compositions of the raw mix, as well as their burning and cooling conditions. For this, the techniques of FRX, Lazer Granulometry, Light Optic Microscopy Transmitted and DRX with Rietveld refining are fundamental; and in this study revealed the influence of the dimension of the particles of silicon on the Free Lime and the dimension of the C3S, showing that this effect is due only to its dimension and pureness, and not to its crystallinity. On the other hand, the dimension of the particles of silica and their crystallinity showed much influence on the morphologic relation M1/M3 of the alite. On the other hand, the action known of the SO₃ on the stabilization of the morphologic M1, was only observed for the crystalline silica and for crystals C3S coming from the quartz with medium dimension < 50 µm. The results showed that the combination of the dimension of the quartz and the % of SO₃ of the clinker are paramount factors in the reduction of the medium dimension of the C3S and in the maximization of the morphologic relation M1/M3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma da fabricação de cimento	4
Figura 2 Mina de calcário.....	6
Figura 3 Caminhão descarregando calcário para o britador.....	6
Figura 4 Retomadora de calcário.	7
Figura 5 Esquema de funcionamento de um moinho vertical de rolos.	9
Figura 6 Silo de homogeneização de farinha.	10
Figura 7 Forno rotativo de clinquerização dotado com torre de pré-aquecimento em suspensão simples, com cinco estágios de ciclones, pré-calcinador.....	11
Figura 8 Resfriador de clínquer.....	14
Figura 9 Fluxograma da produção da moagem de cimento	15
Figura 10 Formação dos cristais com o gradiente de temperatura	17
Figura 11 Aspecto do clínquer ao microscópio destacando os cristais idiomórficos de alita (A).....	18
Figura 12 Temperaturas das transições polimórficas do silicato tricálcico puro. T=triclínico, M=monoclínico e R=romboédrico.	18
Figura 13 Representações da estrutura das alitas do tipo T1.	19
Figura 14 Representações da estrutura das alitas do tipo M3.	19
Figura 15 Cristais arredondados de belita. A=Alita B=Belita F=fase intersticial.	20
Figura 16 Zona Belítica.....	20
Figura 17 Esquema de Modificações Cristalográficas do C2S.	21
Figura 18 Detalhe da fase intersticial do clínquer mostrando cristais ortorrômnicos de C3A (C). E=C4AF e A=Alita.	22
Figura 19 Representação do Ciclo de Voláteis no Forno de Clinquerização.	27
Figura 20 Equipamentos Utilizados para Preparação das Frações de Quartzo: Britador de Mandíbulas, Moinho de Anéis, Peneirador Mecânico e Peneiramento Manual, respectivamente.	29
Figura 21 Equipamentos Utilizados para Análise Química: Axios – Cement - Max – Panalytical e Máquina de Fusão, respectivamente.	30
Figura 22 Nódulo de Farinha para a Clinquerização.....	31
Figura 23 Mufla EDG e Resfriador de clínquer.....	32
Figura 24 Equipamentos para a Preparação e Análise Microscópica.....	32
Figura 25 DRX – Modelo D2 PHASER - BRUKER.....	33
Figura 26 Perfil Granulométrico das frações de Quartzo.....	34
Figura 27 Perfil Granulométrico das Frações de Sílica Amorfa.	35
Figura 28 Quartzo < 38 µm – aumento 500X, Diâmetro Médio de 14,78 µm e Sil.Am < 38 µm – aumento 500x, Diâmetro Médio de 16,47 µm, respectivamente.....	36
Figura 29 Distribuição Granulométrica do Quartzo.....	36
Figura 30 Estruturas silicosas da farinha industrial, após ataque com HCl diluído/a quente; e partículas de quartzo da Fração entre 45 e 63 µm, respectivamente.	37
Figura 31 Relação entre os diâmetros médios de Quartzo e Sílica Amorfa.....	38
Figura 32 Variação da Cal Livre em função do tamanho da partícula de Sílica (D.Médio G.L.).....	40
Figura 33 Relação entre o diâmetro do Quartzo(G.L e Peneiras) e o diâmetro do C3S.....	47
Figura 34 Perfil Granulométrico - Quartzo e Sílica Amorfa - Faixa < 38 micras.....	48
Figura 35 Variação da dimensão do diâmetro médio do C3S em função da dimensão média das partículas de quartzo e sílica amorfa.	49
Figura 36 % acumulado de partículas silicosas > 45 µm em relação a dimensão média do C3S.	50

Figura 37 Distribuição de Frequência do C3S correspondente as amostras 1 e 6 (< 38 µm).	51
Figura 38 Influência da variação do % de MgO e SO ₃ na dimensão dos cristais de C3S nas amostras com quartzo.	52
Figura 39 Influência do MgO e SO ₃ na dimensão dos cristais de C3S nas amostras com sílica amorfa.	53
Figura 40 Correção Linear dos resultados de cada conjunto amostral, de acordo com a variação do SO ₃ dos dois últimos ensaios.	56
Figura 41 Relação entre MgO, SO ₃ e o Polimorfismo da Alita. (TAYLOR/MAKLI.I).	60
Figura 42 Influência do diâmetro do C3S (c/quartzo) sobre a relação polimórfica M1/M3. % SO ₃ Médio = 2,73 => (2,50 a 2,99%).	61
Figura 43 Influência do SO ₃ e MgO sobre a relação M1/M3 no conjunto de amostras com quartzo. % SO ₃ Médio = 2,73 => (2,50 a 2,99%).	62
Figura 44 Relação do diâmetro do quartzo com o polimorfismo do C3S. (SO ₃ médio= 2,73% + amostra SO ₃ = 1,81%).	63
Figura 45 Influência do diâmetro do C3S (c/ síl. Amorfa) sobre a relação polimórfica M1/M3.	64
Figura 46 Relação do diâmetro da sílica amorfa com o polimorfismo do C3S. (SO ₃ médio= 1,86% + amostra SO ₃ = 2,56%).	65
Figura 47 Correlação entre o C3S via DRX e C3S de BOGUE.	66
Figura 48 Amostra 1 – Quartzo < 38 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ Cl (4 s.) – aumento de 200X.	68
Figura 49 Amostra 1 – Quartzo < 38 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ Cl (4s.) – aumento 500X.	69
Figura 50 Amostra 06 – Sílica Amorfa < 38 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.) - Aumento 200X.	70
Figura 51 Amostra 06 – Sílica Amorfa < 38 µm. Ataque HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ Cl (4 s.). Aumento 500X.	71
Figura 52 Amostra 03 – 45 ≤ Q < 63 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	72
Figura 53 Amostra 07 – 45 ≤ Sil.Am. < 63 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.) – Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	72
Figura 54 Amostra 05 – 90 ≤ Q < 125 µm. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	73
Figura 55 Amostra 08 – 90 ≤ Sil.am. < 125 µm – Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	73
Figura 56 Amostra Quartzo < 38 µm - %SO ₃ = 1,81. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	74
Figura 57 Amostra Síl. Amorfa < 38 µm - %SO ₃ = 2,56. Ataque: HNO ₃ (4 s.) + NH ₄ (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais reações do processo de sinterização do clínquer (CENTUORINE, 1993).	12
Tabela 2 Mineralogia do Clínquer Portland (PECCHIO, 2013)	16
Tabela 3 Composição Química Padrão das Amostras de Farinha.....	28
Tabela 4 Conjunto de amostras de Farinha para Ensaio de Clinquerização.	28
Tabela 5 Resumo da Distribuição Granulométrica das Partículas de Sílica.	38
Tabela 6 Composição química das Farinhas.	39
Tabela 7 Cal Livre – Amostras com Quartzo e Amostras com Sílica Amorfa.	40
Tabela 8 Avaliação da Aptidão a Clinquerização.	41
Tabela 9 Evolução da Cal Livre em função da Sílica > 45 µm.....	43
Tabela 10 Análise química dos clínqueres.	45
Tabela 11 Diâmetros médios das partículas de sílica e diâmetro médio dos cristais de C3S.	46
Tabela 12 Influência do enxofre nas amostras com % de sílica < 38 µm.	54
Tabela 13 Coeficientes de Difusão de Elementos de Formação do Clínquer.	57
Tabela 14 Dados do Refinamento Rietveld.....	59
Tabela 15 Diâmetro médio dos cristais de C3S e seu Polimorfismo.	59
Tabela 16 Resumo das medições dos cristais de C3S.	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abreviações utilizadas para fórmulas químicas:

S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 ; C = CaO ; H = H_2O ; F = Fe_2O_3

Abreviações:

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

C_3S - Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$)

C_2S - Silicato Bicálcio ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$)

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.

WBCSD - Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável.

CSI – Iniciativa para Sustentabilidade no Cimento.

GEEs – Gases de Efeito Estufa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	4
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	4
2.1.1	MINERAÇÃO E BRITAGEM	5
2.1.2	PRODUÇÃO DE FARINHA	7
2.1.3	PRODUÇÃO DE CLÍNQUER.....	10
2.1.4	PRODUÇÃO DE CIMENTO	14
2.2	MINERALOGIA DO CLÍNQUER.....	16
2.2.1	ALITA (C3S)	17
2.2.2	BELITA (C2S)	19
2.2.3	ALUMINATO TRICÁLCICO (C3A).....	21
2.2.4	ALUMINATO TRICÁLCICO (C4AF)	22
2.2.5	EFEITO DA GRANULOMETRIA DA FARINHA SOBRE NA QUEIMABILIDADE, NUCLEAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO DAS FASES SILICATO DE CÁLCIO DO CLÍNQUER.....	22
2.2.6	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	DEFINIÇÃO DA FARINHA PADRÃO	27
3.2	DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE AMOSTRAS	28
3.3	PREPARAÇÃO DAS FRAÇÕES DE QUARTZO E SÍLICA AMORFA.....	29
3.4	PREPARAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE FARINHA.....	30
3.5	PREPARAÇÃO DAS FARINHAS PARA A QUEIMA	30
3.6	CLINQUERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	31
3.7	ANÁLISE MICROSCÓPICA DO CLÍNQUER	32
3.8	AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CLÍNQUER POR DRX.....	33
4	RESULTADOS	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS.....	34
4.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS FARINHAS	39
4.3	AVALIAÇÃO DA CAL LIVRE	39
4.3.1	ASPECTOS DO TAMANHO DA PARTÍCULA	42
4.4	INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS SILICÁTICAS SOBRE A DIMENSÃO DO C3S. ..	44
4.4.1	INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO % DE ENXOFRE NO CRESCIMENTO DO C3S.....	54

4.5	INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS DE SÍLICA SOBRE A RELAÇÃO DOS POLIMORFOS M1/M3.....	59
4.5.1	AMOSTRAS COM QUARTZO	61
4.5.2	AMOSTRAS COM SÍLICA AMORFA	64
4.5.3	CORRELAÇÃO ENTRE % DE C3S POR BOGUE E DRX.....	65
4.6	DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES MICROSCÓPICAS	67
4.6.1	AMOSTRAS 1 E 6 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA < 38 µm	68
4.6.2	AMOSTRAS 3 E 7 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA 45 ≤ Síl. < 63 µm	72
4.6.3	AMOSTRAS 5 E 8 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA 90 ≤ Síl. < 125 µm	73
4.6.4	AMOSTRAS COM SÍLICA < 38 µm – Quartzó c/ % de SO ₃ = 1,81; e Sílica Amorfa c/ % de SO ₃ = 2,56.	73
5	CONCLUSÃO	76
6	REFERÊNCIAS.....	78
7	ANEXOS	81
7.1	GRANULOMETRIA A LASER.....	81
7.2	DIFRATOGRAMAS REFINADOS COM USO DO SOFTWARE TOPAS.	101

1 INTRODUÇÃO

O maior desafio do setor produtivo de cimento no mundo, sobretudo a partir dos anos 90, é, sem dúvida, a redução das suas emissões de CO₂, medidos internacionalmente como kgCO₂/t.cimento. Segundo os dados Oficiais do CSI – Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento, orientado pelo WBCSD (Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável), o setor cimenteiro mundial contribui atualmente com cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO₂ do planeta. Esse percentual parece não ser tão significativo. Contudo, considerando o ciclo de vida esperado para esse produto, por esse mesmo Conselho, de cerca de, pelo menos mais 200 anos, se processos e tecnologias não forem desenvolvidas no sentido de reduzir essa emissão específica nos próximos anos, e considerando que todos os outros setores emissores de GEEs cumpram as metas esperadas de redução, no início da segunda metade desse século, o cimento poderá representar 50% das emissões antropogênicas do planeta, o que seria, sem dúvida, insustentável.

Com essa visão, o setor vem implementando um conjunto de medidas que têm permitido a redução sistemática dessas emissões, fato verificado pelos dados Oficiais das emissões do setor, que apontava a média mundial em torno de 800KgCO₂/t.cimento na década de 90, e 670KgCO₂/t.cimento em 2015, conforme relatório oficial do CSI.

Baseado no conceito dos Pilares da Sustentabilidade no Setor, conforme representado ao lado, maciços investimentos foram aplicados em Pesquisa e Desenvolvimento, buscando melhorar a qualidade do clínquer, para diminuir a sua participação na composição dos cimentos; buscando ainda reduzir o consumo de calor nos fornos, reduzir o consumo de energia elétrica em todo o processo, substituir os combustíveis fósseis por biomassa, e também por resíduos industriais com determinado poder calorífico, através do coprocessamento (Relatório SNIC – 2017).



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, e alguns de seus aspectos como: pureza, características geológicas e dimensão de suas partículas, exercem também grande influência em todo o processo de fabricação, desde a moagem da farinha, até a sua homogeneização e queimabilidade, não só no tocante ao desgaste por abrasão e consumo elétrico na moagem de

cru e ao consumo térmico do forno, mas afetando também 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).

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar e demonstrar a influência da dimensão das partículas de quartzo e sílica amorfa, presentes na mistura crua de fabricação do clínquer de cimento Portland, sobre a morfologia dos cristais de alita (C3S).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Padronizar as amostras de quartzo e sílica amorfa moídos dentro de faixas granulométricas específicas, bem como caracterizar a forma dessas partículas, mediante peneiramento mecânico, granulometria Lazer e microscopia ótica.
- Determinar a correlação entre a dimensão das partículas de sílica e a dimensão dos cristais de C3S.
- Determinar a influência da dimensão das partículas de sílica sobre a morfologia dos cristais de C3S, sobretudo a influência dessas partículas sobre estabilização das formas morfológicas M1 e M3.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

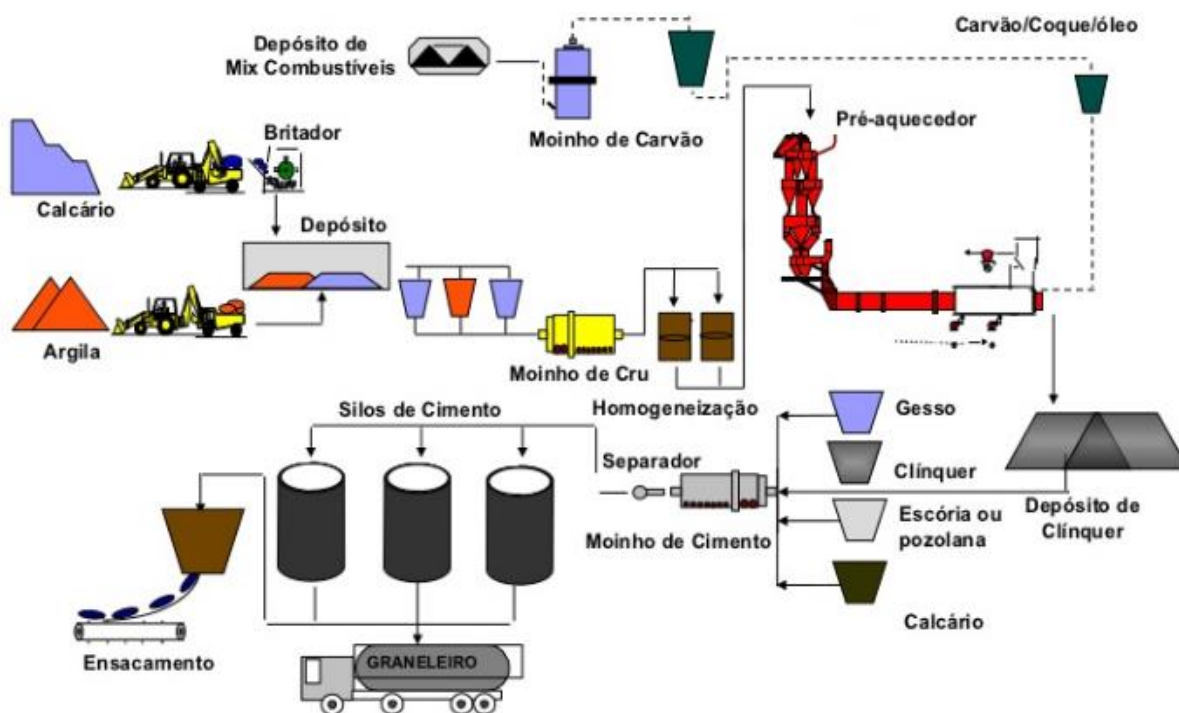
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Na fabricação de Cimento Portland, cada fase ou estágio do processo envolve um conjunto de controles e 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), passando, portanto, por vários estágios intermediários.

Como regra geral, na prática, as matérias-primas básicas historicamente utilizadas na preparação ou formulação dos materiais crus (farinha) destinados à fabricação do clínquer, principal componente do cimento, são calcário, argilas e minério de ferro. A formação acontece a partir da sinterização desses componentes em um forno rotativo de maneira que se transforme em um material granular e rígido, constituído de uma morfologia rica cristalograficamente.

A fabricação de cimento é baseada em cinco etapas: mineração, britagem, produção de farinha, produção de clínquer, produção de cimento e expedição. Segue abaixo uma figura ilustrativa para facilitar o entendimento do processo.

Figura 1 Fluxograma da fabricação de cimento



Fonte: FAESA – Engenharia de produção.

2.1.1 MINERAÇÃO E BRITAGEM

O calcário representa mais de 70% em peso na composição da matéria-prima crua (SILVA, 1994), e esta é uma forte razão para que as fábricas de cimento sejam localizadas próximas às jazidas. A extração do calcário segue as etapas de prospecção, mapeamento e projeto da lavra (PAULA, 2009).

Após o planejamento de extração, a operação que trará indicadores de produção na mineração será a britagem, mais conhecida como britagem primária.

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).

O primeiro passo na produção de cimento é extrair das pedreiras as matérias-primas, que já foram previamente estudadas e qualificadas, e que são: o calcário, a argila arenosa e o minério de ferro. Para transformar as matérias-primas extraídas das minas em um pó fino, se exige uma redução de tamanho das mesmas, de tal modo que não é possível realizar essa redução em uma única etapa. A extração é realizada a céu aberto, como mostrado na figura 2, e, através do método mecânico ou explosivo, é possível desligar pedaços de rochas do solo e assim transportá-las até os britadores, mostrados na figura 3, os quais podem ser de rolos, martelo, mandíbula, giratório, impacto ou cônico, e que têm por finalidade reduzir as matérias-primas a uma granulometria adequada para alimentar a etapa seguinte.

Após a britagem, amostras de calcário seguem para o laboratório, para análise química, para determinação dos teores de cálcio, silício, ferro e alumínio. O calcário segue em correias transportadoras para o pátio de pré-homogeneização (PAULA, 2009).

A armazenagem em pilhas do material britado, figura 4, foi introduzida a partir do aumento de capacidade fabril em cimenteiras, com a finalidade de manter um suprimento uniforme ao processo de moagem. A pré-homogeneização é utilizada para minimizar os efeitos das variações naturais na composição química da matéria-prima. Assim, o material será empilhado em camadas e retomado pelo método de Chevron, que faz com que o retomador alcance do ponto mais alto até a base da pilha, possibilitando uma redução de desvio durante o consumo do material no moinho de farinha.

Figura 2 Mina de calcário



Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA., 2016.

Figura 3 Caminhão descarregando calcário para o britador.



Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA., 2016.

Figura 4 Retomadora de calcário.



Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA., 2016.

2.1.2 PRODUÇÃO DE FARINHA

A produção de farinha compreende o processo de secagem e moagem das matérias-primas em seu estado original, também denominadas de cru, adequadamente dosadas e alimentadas ao moinho. O propósito da moagem de cru é preparar uma mistura homogênea, com composição química e granulometria uniforme, a fim de assegurar a máxima combinação das reações no processo de calcinação e clinkerização.

É uma das fases mais importantes do processo de fabricação de cimento portland, pois é nessa fase que ocorre o início da mistura íntima das matérias-primas, e, ao mesmo tempo, a secagem, pré-moagem, moagem e ajuste final da composição físico-química dos materiais crus alimentados ao moinho. Trata-se de um conjunto de operações e controles destinados a transformar os materiais crus em uma mistura finamente moída, quimicamente e fisicamente homogênea, denominada farinha.

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 , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 depende das relações de teores entre os mesmos. 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 os materiais não fundentes (silicatos) e os fundentes eq (1). Para clínqueres fabricados no Brasil, MS varia de 1,7 a 3,1 (ABCP, 1984). O aumento de MS dificulta a queima, necessitando de maior fornecimento de calor e maior temperatura na zona de clinquerização, provocando consequentemente maior consumo de combustível (Peray and Waddell, 1972 apud Silva, 1994). Já no caso de redução do MS, acarreta em aumento de fase líquida e formação de colagens, beneficiando a queima.

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

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). O MA baixo diminui a viscosidade da fase líquida e facilita a cinética das reações, além de melhorar a granulação do clínquer.

$$MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

O Fator de Saturação de Cal (FSC) será a razão da concentração de óxido de cálcio presente no cru e no clínquer com os demais compostos que reagem eq(3). Os valores considerados ótimos estão entre 90% a 100% (ABCP, 1984). Um FSC alto vai exigir maior consumo de combustível e cal livre alto, enquanto se trabalhando na faixa

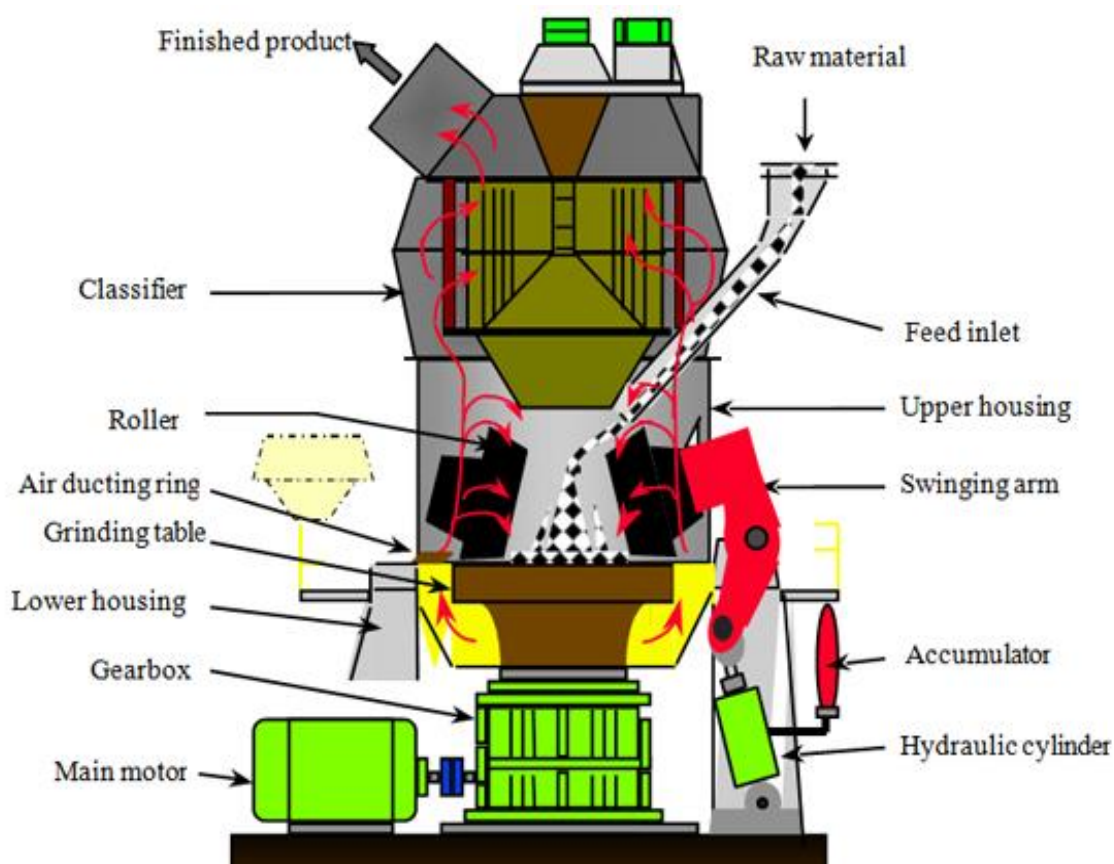
$$FSC = \frac{100x\text{CaO}}{2,8x\text{SiO}_2 + 1,18x\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65x\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (3)$$

Para escolher ou definir um sistema de moagem apropriado, que satisfaça plenamente o processo de secagem e moagem das matérias-primas, muitos fatores devem ser considerados, tais como: granulometria máxima de alimentação, distribuição e espectro granulométrico do material de alimentação, teor de umidade e características mineralógicas dos materiais (dureza, moabilidade, abrasividade, teor de sílica livre). De uma maneira geral, o teor de umidade das matérias primas varia de acordo com a origem e a natureza de cada material.

A fim de satisfazer, por um lado, os requisitos relativos ao produto, e, por outro, a adequação do processo, frente às diferentes características de cada material, os circuitos de moagem podem ser divididos quanto ao processo (úmido ou seco) e quanto ao tipo de moinho (vertical, de rolos ou de bolas, e tubular de bolas), sendo o circuito aberto ou fechado.

Um moinho muito utilizado na produção de farinha é o moinho vertical de rolos. A figura 5 mostra o esquema de funcionamento. O ponto de partida acontece com o material passando pela calha alimentadora e sendo despejado no centro de uma mesa rotativa. Através de força centrípeta, o material vai se dispersando pelas extremidades da mesa e sendo submetido à compressão dos rolos, formando grãos finos e agulhados. Na medida em que o material é comprimido pelos rolos, gases quentes são injetados na base da máquina, garantindo que haja o processo de secagem e seleção da granulometria adequada, através do carregamento desse material até o separador. Sendo assim, os grãos finos saem pela parte superior do moinho e os grossos retornam para a mesa, para serem reprocessados e enquadrados posteriormente.

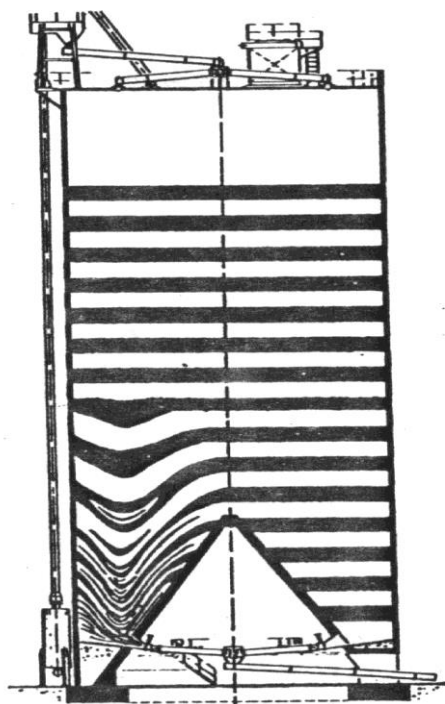
Figura 5 Esquema de funcionamento de um moinho vertical de rolos.



Fonte: CHAENG (Great Wall Machinery) vertical mill slag powder processing.

A farinha produzida é enviada pelo transporte de caixas fluidizadoras e elevador de caçambas, até o topo do silo de homogeneização mostrado na figura 6. Esse silo terá a função de armazenar e diminuir o desvio da mesma, através do sistema de abertura de válvulas na base de saída do material.

Figura 6 Silo de homogeneização de farinha.



Fonte: <http://www.geocities.ws/dmatias/trabalhos/cimento>.

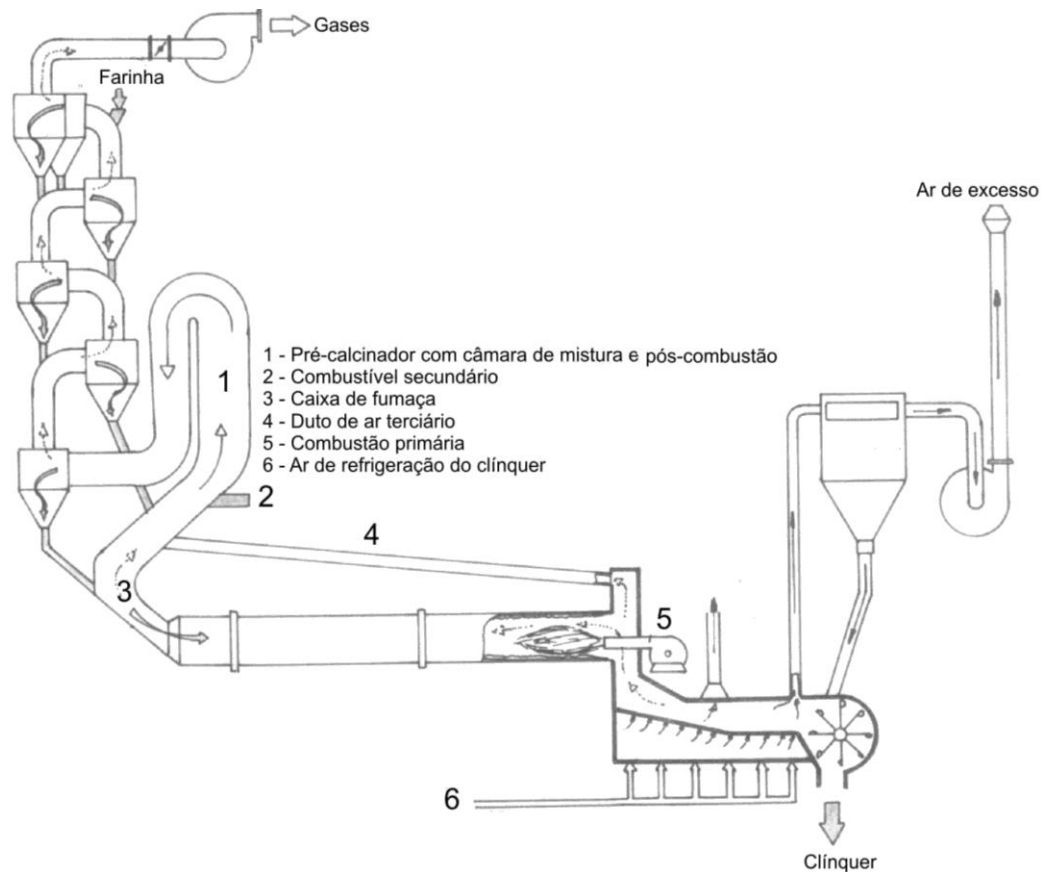
Após a homogeneização da farinha, ela será encaminhada para o processo de clinquerização, que, em resumo, se constituirá na passagem da mesma pela torre de ciclone, forno, resfriador e silo.

2.1.3 PRODUÇÃO DE CLÍNQUER

O processo de clinquerização via seca fundamentalmente se caracteriza por três tipos ou modelos, com técnicas construtivas distintas. São elas: processo via seca sem sistema de pré-aquecimento por suspensão, também denominado de via seca longo; processo via seca com sistema de pré-aquecimento por suspensão com quatro estágios de ciclones, também denominado de sistema convencional; processo via seca dotado com sistema de pré-aquecimento em suspensão com quatro a seis estágios de ciclones e sistema de pré-calcinação integrado à torre de ciclones (sistemas modernos ou de última geração) (FARENZENA, 1995).

Segue na figura 7 o fluxograma do sistema mais usado atualmente em indústria de cimento.

Figura 7 Forno rotativo de clinquerização dotado com torre de pré-aquecimento em suspensão simples, com cinco estágios de ciclones, pré-calcinador.



Fonte: FARENZENA, 1995.

Com a farinha pronta e homogeneizada, passa-se por um pré-aquecimento através da torre de ciclones. Essa torre é constituída por vários ciclones sobrepostos verticalmente, em que cada um é constituído por um cilindro e um cone na parte inferior, mostrado na figura 7. O ar quente e as poeiras provenientes do forno entram pela parte superior do ciclone inferior segundo uma tangente ao cilindro. Devido à configuração do ciclone, as partículas precipitam através da parte inferior, enquanto que o ar quente parcialmente purificado escapa pela parte superior, passando ao ciclone imediatamente acima, onde ocorre o mesmo processo, até que, no último ciclone, o gás é liberado a uma temperatura de 200 °C, arrastando consigo uma quantidade mínima de poeiras encaminhada para os filtros.

A principal finalidade do pré-calcinador é permitir o aporte e a distribuição da energia calórica necessária para o processo de calcinação e clinquerização em dois pontos distintos, concorrendo, assim, para a obtenção de um nível ou grau de decarbonatação e calcinação dos

materiais crus, antes de ingressarem no forno rotativo da ordem de 80-95%, contra 45-50% obtidos nos sistemas convencionais sem pré-calcinador e sem combustão secundária.

Outra finalidade é proporcionar o uso de até 60% de combustíveis no pré-calcinador, muitas vezes de baixo custo e poder calorífico, bem como proporcionar 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 (FARENZENA, 1995).

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

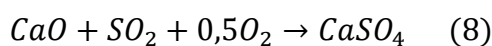
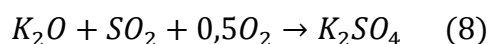
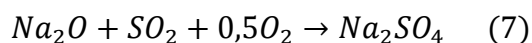
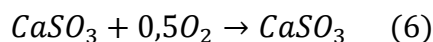
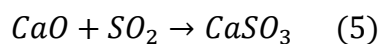
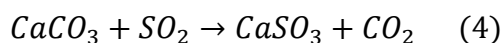
residência, temperatura de zona de queima, grau de enchimento, grau de descarbonatação, perfil de temperatura do forno, cal livre e os cristais.

Ao entrar no forno, a farinha, que já passou pelo processo de descarbonatação no pré-calcinador, inicia então a clínquerização. Este processo é o conjunto de todas as reações físicas e químicas, mostrado na tabela 1, que ocorrem durante o período de cozedura, onde ocorrerá a formação do clínquer. O deslocamento da farinha se dá pela rotação, combinado com a inclinação do forno. Quanto mais rápido se alcançar a temperatura de cozedura, entre 1200°C a 1450°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.

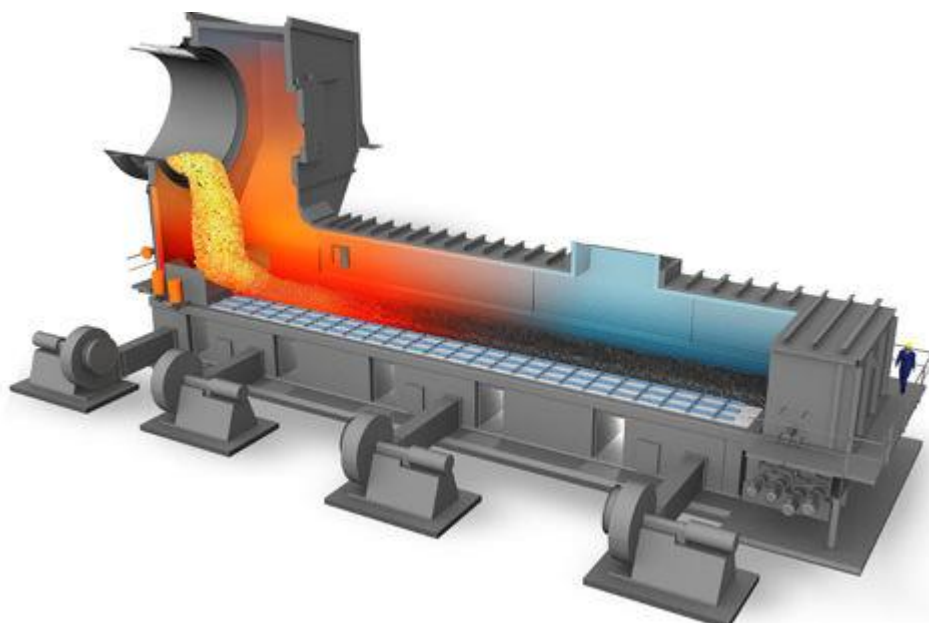
O dióxido de enxofre, originado da queima do coque de petróleo no forno rotativo de produção de clínquer, pode reagir com os compostos de cálcio, sódio e potássio, contidos nas matérias-primas, conforme as Equações 4 a 9, gerando produtos que são incorporados ao clínquer (SANTOS, 2007).



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

Após o processo de cozedura, o material passa por um sistema de arrefecimento intenso, figura 8, com o objetivo de reduzir drasticamente a temperatura do clínquer, assegurando uma boa qualidade do produto.

Figura 8 Resfriador de clínquer



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

O arrefecedor forma, com o forno, um conjunto interdependente no processo de clinquerização, com vistas à obtenção de uma maior produtividade e qualidade do produto. Assim, se por um lado o arrefecedor 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

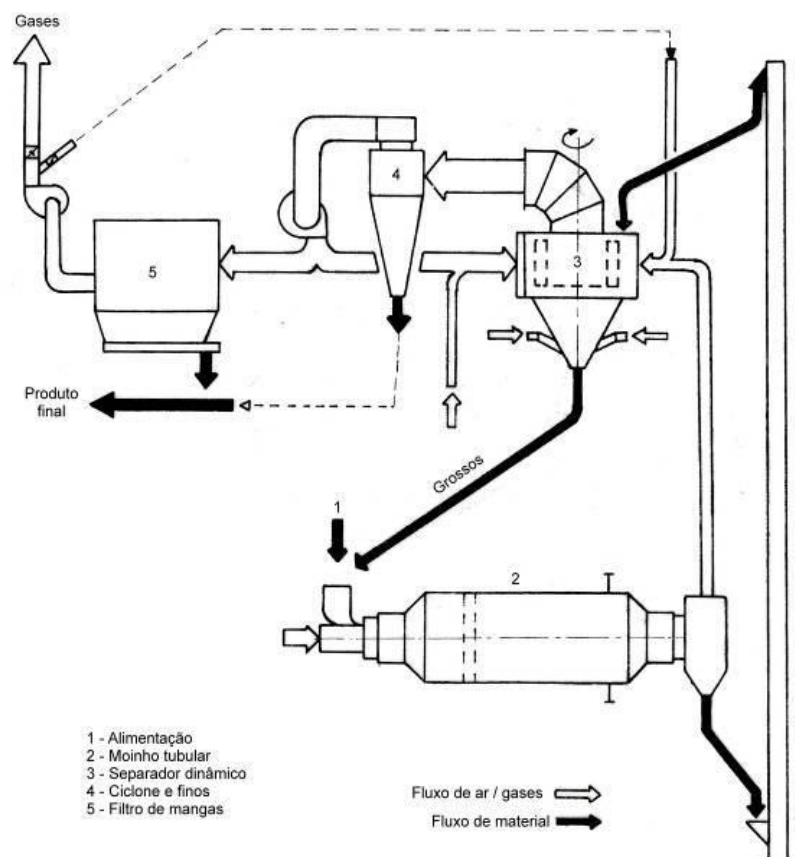
A moagem de cimento constitui a última etapa de fabricação, sendo que, nesta, o clínquer, produzido na etapa anterior, após sofrer resfriamento, vai a um moinho de bolas (SOUZA, 2007).

Esse processo geralmente é constituído por um moinho de bolas de duas câmaras, seguido de um separador a ar dinâmico, em circuito fechado mostrado na figura 8. Inicialmente os materiais são dosados por balanças e direcionados para o interior do moinho.

Ao entrar na primeira câmara, o material sofre uma redução drástica de granulometria, pelos efeitos de corpos moedores maiores. Em seguida, o material passa para a segunda câmara e sofre o efeito de atrito, causando um refinamento no cimento. 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, que será retido nas mangas, enquanto o gás de arraste é jogado para a atmosfera. 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: II Curso de Formação Moinho de bolas – CIMPOR TEC. Edição 02.2-Fev-2007.

Segundo Centurione (1999), o consumo específico de energia de uma cimenteira é em torno de 90kWh/t de cimento, sendo que deste total, 30 a 45% é despendido na moagem de cimento (PITTA, 1996). Ou seja, existe um grande impacto na energia nessa etapa do processo e, por isso, quando se trata de redução de energia, vale a pena apostar alto na otimização da moagem de cimento.

2.2 MINERALOGIA DO CLÍNQUER

O clínquer Portland tem em peso 90 - 97% de óxido em sua composição sendo eles o CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. 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 (SiO₂); A (Al₂O₃); F (Fe₂O₃). Essa notação serve para empregar e facilitar a nomenclatura dos compostos referente aos cristais do clínquer como, por exemplo, 3CaO.SiO₂ (C3S) (PECCHIO, 2013).

Esses elementos combinados dão origem às principais fases cristalinas do clínquer Portland, que são elas C3S, mais conhecida como alita, principal composto do clínquer presente em teores de 50 a 70% em peso; C2S, mais conhecida como belita, responsável pelo desenvolvimento de resistências em longa data em teores em peso de 0,5 – 20%; C3A e C4AF, que preenchem os espaços entre as fases silicáticas em teores médios de 10 – 18% em peso.

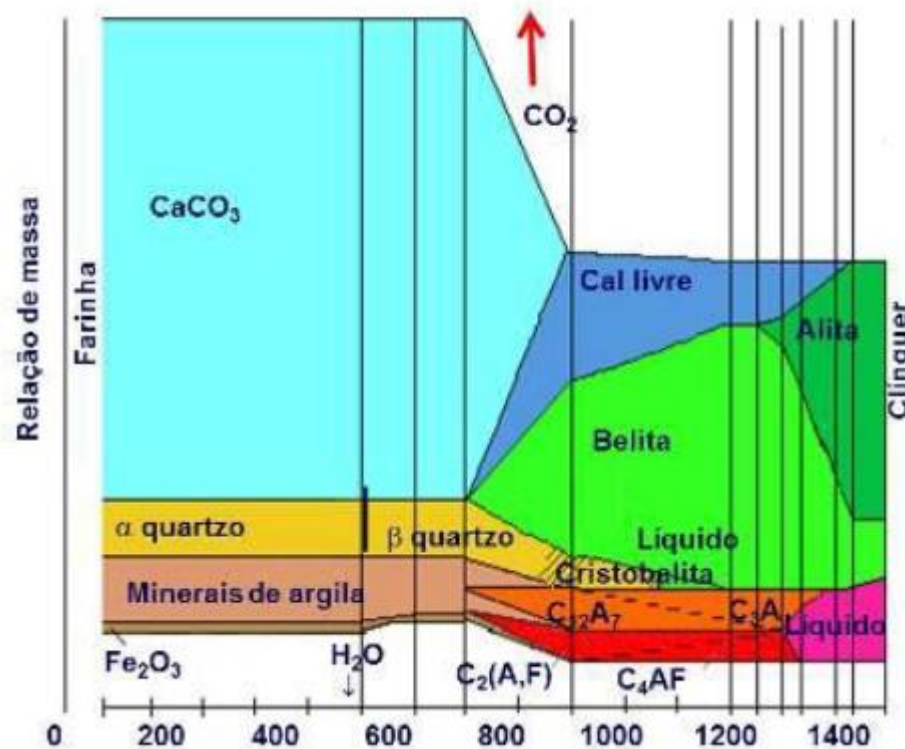
Segue abaixo a tabela 2 que resume os minerais encontrados no clínquer e sua classificação cristalina.

Tabela 2 Mineralogia do Clínquer Portland (PECCHIO, 2013)

Minerais	Composição Química	Sistema Cristalino Predominante
Alita (C ₃ S)	Ca ₃ SiO ₅	Monoclínico
Belita (C ₂ S)	Ca ₂ SiO ₄	Monoclínico
Aluminato (C ₃ A)	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Cúbico e Ortorrômbico
Ferrita (C ₄ AF)	Ca ₂ (Al _x Fe _{x-1})O ₅	Ortorrômbico
Cal livre	CaO	Cúbico
Periclásio	MgO	Cúbico
Anidrita	CaSO ₄	Ortorrômbico
Arcanita	K ₂ SO ₄	Ortorrômbico
Thernardita	Na ₂ SO ₄	Ortorrômbico
Cálcio Langbeinita	K ₂ Ca ₂ (SO ₄) ₃	Cúbica
Aphthitalita	(K ₂ Na) ₃ Na(SO ₄) ₂	Trigonal

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: (WOLTER, 1985).

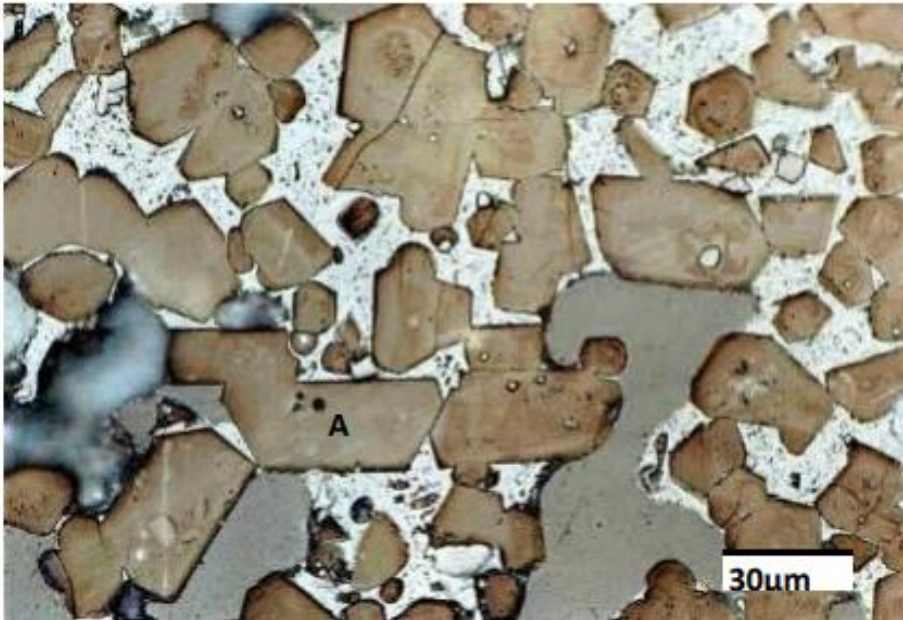
A partir do gráfico acima é possível identificar que a decarbonatação acontece entre 700 a 900°C formando assim cal livre para reagir com a sílica liberada pela decomposição dos argilominerais e das transformação do quartzo para dar origem a belita ou C2S. Em temperatura superior a 1250°C esses aluminatos e ferroaluminatos cálcicos se fundem e dão origem a uma fase líquida, 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.

2.2.1 ALITA (C₃S)

A alita ocorre no clínquer na forma de cristais idiomórficos tabulares e compactos que em seções transversais são pseudo hexagonais (KIHARA ET AL., 1990). É um mesossilicato

artificial com estrutura cristalina definida pela presença de tetraedros independentes de SiO₄ unidos por cátions intersticiais de cálcio (SOUZA, 2007). Na figura 11 mostra um exemplo microscópico dos cristais de alita que são constituídos no clínquer.

Figura 11 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).

Alguns pesquisadores estabeleceram que o silicato tricálcico puro poderia assumir a seguinte sequência de transformações polimórficas, figura 11, quando aquecido a temperatura ambiente até a sua fusão.

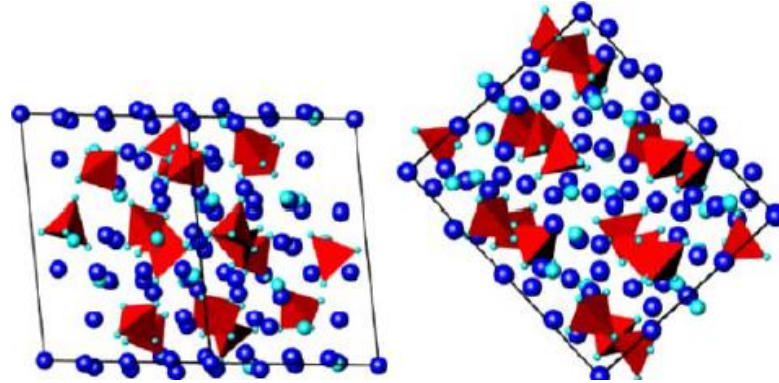
Figura 12 Temperaturas das transições polimórficas do silicato tricálcico puro. T=triclínico, M=monoclínico e R=romboédrico.

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

Dentre os polimorfos da alita, T1 representa o composto puro, quando resfriado a temperatura ambiente, figura 12. Em clínqueres industriais, devido à incorporação de íons, a

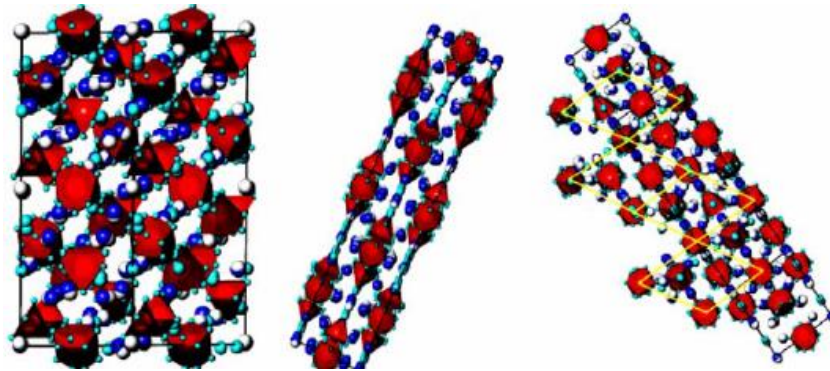
forma presente em temperatura ambiente normalmente se aproxima de M1 ou M3 ou uma mistura dos dois polimorfos, figura 13.

Figura 13 Representações da estrutura das alitas do tipo T1.



Fonte: GOLOVASTIKOV et al., 1975.

Figura 14 Representações da estrutura das alitas do tipo M3.



Fonte: NISHI et al., 1985.

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

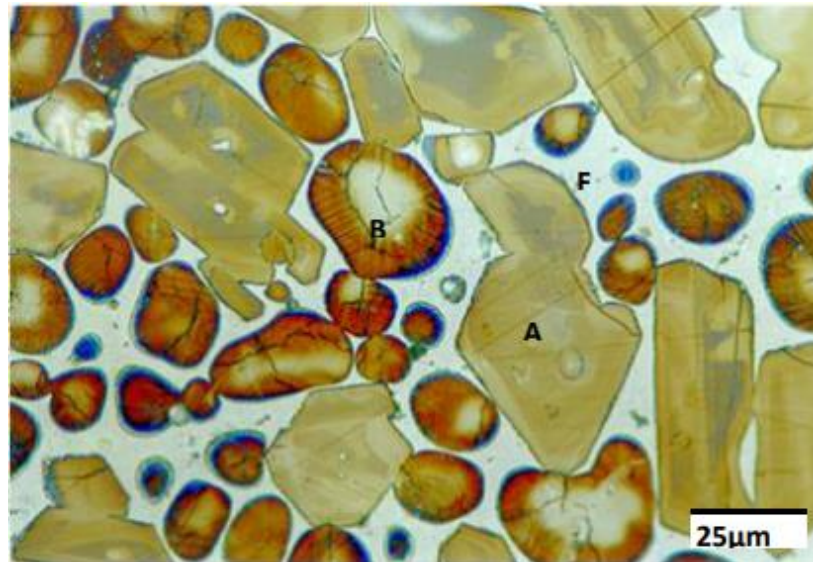
A forma romboédrica da alita, segundo Centurione (1999), é a de maior reatividade potencial, podendo ser estabilizada pela fixação de maior conteúdo de Al_2O_3 e SO_3 nos cristais de alita, pela ação de íons fluoreto.

2.2.2 BELITA (C_2S)

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.

Os cristais de belita apresentam forma predominantemente arredondadas, figura 15. No entanto, sua morfologia depende das condições de resfriamento do clínquer (KIHARA et al. 1990), podendo passar de cristais arredondados a digitados quando o resfriamento que ocorre entre a máxima temperatura do forno e sua saída for lenta (PECCHIO, 2013).

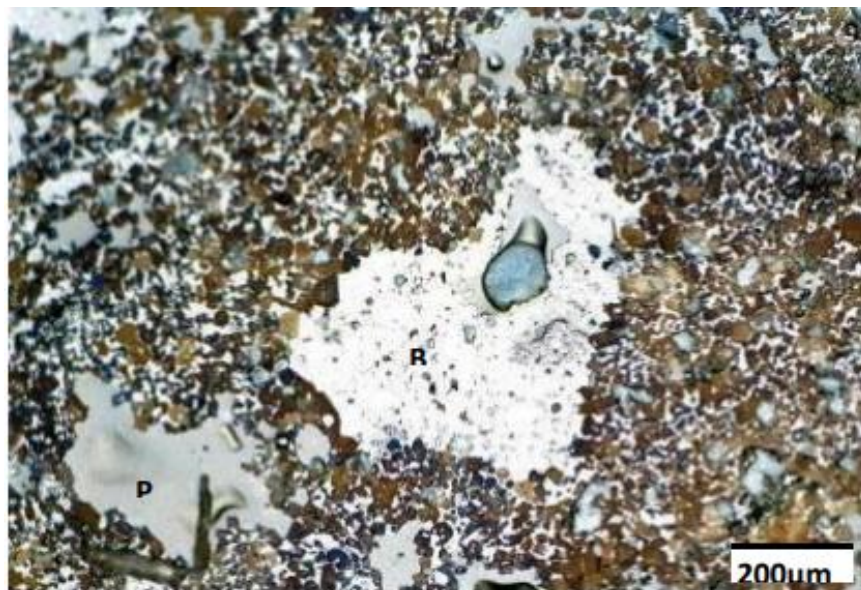
Figura 15 Cristais arredondados de belita. A=Alita B=Belita F=fase intersticial.



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.

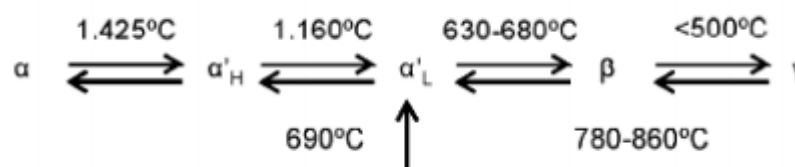


Fonte: PECCHIO, 2013.

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 C_2S são denominadas de α , α' , β , e γ em ordem decrescente de temperatura de estabilização:

Figura 17 Esquema de Modificações Cristalográficas do C_2S .



A fase ortorrômbica C_2S - γ , de baixa temperatura e estável a temperatura ambiente, se transforma na fase α' a aproximadamente 870°C. A modificação para C_2S - α' ocorre a aproximadamente 1.160°C; a elevação da temperatura para 1450°C leva à formação do C_2S - α .

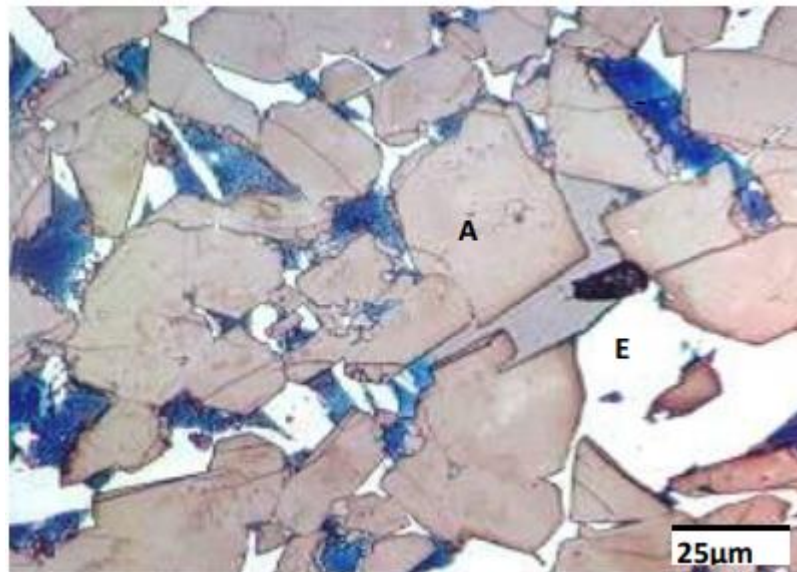
O resfriamento a 670°C resulta na formação de uma fase monoclinica metaestável, denominada C_2S - β . A fase β não é formada a partir do C_2S - γ , durante o tratamento térmico; caso o C_2S - β não seja estabilizado durante o resfriamento, os polimorfos α e α' se reverterem ao C_2S - γ , podendo causar a fragilização do clínquer, transformação em pó, devido ao enorme aumento de volume ocorrido nesta transformação.

2.2.3 ALUMINATO TRICÁLCICO (C_3A)

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 C_3A presente no clínquer sob ataque químico com hidróxido de potássio.

Figura 18 Detalhe da fase intersticial do clínquer mostrando cristais ortorrômnicos de C_3A (C). E= C_4AF e A=Alita.



2.2.4 ALUMINATO TRICÁLCICO (C_4AF)

Em muitos clínqueres, o C_4AF está misturado com o C_3A 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).

2.2.5 EFEITO DA GRANULOMETRIA DA FARINHA SOBRE NA QUEIMABILIDADE, NUCLEAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO DAS FASES SILICATO DE CÁLCIO DO CLÍNQUER.

Vários pesquisadores têm estudado e demonstrado evidências da influência do tamanho das partículas dos silicatos, sobretudo do quartzo, na formação dos cristais de C_2S e C_3S .

Os estudos mais frequentes a respeito do comportamento dessas partículas da mistura crua (farinha), durante o processo de clinquerização, buscam investigar a sua “Queimabilidade”.

THEISEN (1992) define o termo queimabilidade (burnability) como o % de Cal Livre remanescente em um clínquer, após sua queima mediante um tratamento térmico

determinado. Este resultado é comparado ao % de Cal Livre de um clínquer obtido de uma mistura crua Padrão, queimado e resfriado sob as mesmas condições. A metodologia está fundamentada no fato de que os principais constituintes do clínquer, contêm CaO em sua composição. Vários pesquisadores têm demonstrado que a queimabilidade depende de vários fatores, destacando como mais importantes os seguintes: composição química e mineralógica da farinha, granulometria, taxa de aquecimento, tempo e temperatura máxima de processamento, e resfriamento.

(KIHARA et alii, 1983), destaca que a influência da mineralogia dos constituintes da farinha no processo de clínquerização é pouco abordada na literatura, sendo normalmente citados apenas em trabalhos que tratam sobre a influência da finura da matéria-prima sobre a aptidão a clínquerização (queimabilidade).

(KIHARA et alii, 1983), afirma que, para a indústria cimenteira, as fontes principais de óxido de silício (SiO_2) são o quartzo e o grupo dos argilominerais. Secundariamente; feldspatos, micas, anfibólios e piroxênios podem também constituir fontes de silício. As diferentes estruturas cristalinas dessas fases, bem como possíveis desordens estruturais, são características de fundamental importância para o processo de moagem da farinha e para a cinética de reação de formação do clínquer Portland. Dessa forma, estruturas cristalinas mais fechadas aumentam a entalpia de reação, forçando uma moagem mais rigorosa da farinha ou uma queima mais enérgica no forno, elevando os custos de produção e comprometendo a durabilidade dos equipamentos (corpos moedores de moinhos e refratários do forno).

Segundo MAKASHEV (1974), a reatividade dos distintos minerais de sílica (livre ou combinada) aumenta na seguinte ordem: quartzo < calcedônia < opala < α -cristobalita < α -tridimita < feldspatos < micas e anfibólios < minerais argilosos < escória vítrea < vidros naturais de origem vulcânica.

RAUSCHENFELS, 1976; afirma que, para a reação adequada dos constituintes da matéria-prima no processo de clínquerização, um requisito básico é a obtenção de uma finura (granulometria, que garanta a reação completa desses constituintes. A finura dos grãos quartzosos e de calcita, principais constituintes da farinha, é de importância decisiva nesse contexto, visto que os argilominerais não apresentam esse problema. Uma moagem ultrafina da farinha possibilita a formação de cristais de alita a temperaturas inferiores a 1000°C , contudo, os custos associados à moagem ultrafina inviabilizam esse procedimento.

KRAMER (1957) estabeleceu que a granulometria limite, tanto para calcários metamórficos como para quartzo cristalino seria próxima de $100\ \mu\text{m}$.

FUNDAL (1979); MILLER (1981); DORN (1985); CRHISTENSEN (1981) e THEISEN (1992); verificaram que grãos de calcita superiores a 125 μm geravam zonas de cal livre da ordem de 100 μm , e também grãos de quartzo, com diâmetros superiores a 44 μm , davam origem a zonas compactas de belita da ordem de 100 μm , quando submetidas a uma queima a 1.400 °C por 30 min.

Pesquisadores do Centro de Estudos da HOLDERBANK (1988) estabeleceram diâmetros críticos para o quartzo grosseiro, como 32 μm , e 90 μm , para os grãos grosseiros de calcário, baseados em um ensaio de queima a 1.400 °C por 15 min.

CHATTERJEE (1979) demonstrou que cristais de belita, com diâmetro médio entre 20 e 40 μm , são característicos de um tempo normal do material dentro do forno;

A ABCP (1984), baseando-se em trabalhos de ONO (1969), convencionou como tempo Normal de clinquerização aquele que gera cristais de alita entre 30 e 40 μm ; acima de 50 μm , seria considerado Longo, e, abaixo de 20 μm , Curto;

DORN (1978) demonstrou que chamas longas causam um aquecimento lento do material dentro do forno, propiciando um longo tempo de clinquerização, o que causaria maior dimensão dos cristais de alita e belita;

MAKI (1986) atribui à taxa de aquecimento o fator mais importante para o estabelecimento da dimensão dos cristais de alita, pois, a taxa de aquecimento seria responsável pelo aumento da nucleação dos cristais de alita, com consequente decréscimo na taxa de crescimento desses cristais;

KREFT et alii (1987) comenta ser o tipo de forno o fator mais preponderante para a dimensão da alita, de maneira que, fornos longos e horizontais induziriam à formação de cristais desenvolvidos de alita, e o oposto seria observado para os fornos verticais;

SCHEUBEL & BALZER (1984) sustentam que a redução do tamanho máximo dos grãos silicosos na farinha de 100 μm para 75 μm provoca a redução do tamanho médio da alita, de 30 μm para 20 μm , e da belita, de 28 μm para 22 μm , e, consequentemente, reduz em até 15% a resistência à moabilidade do clínquer;

MILLER (1980), embora não apresente dados comprobatórios, afirma que a granulometria da farinha tem um papel importante no crescimento dos cristais de alita, existindo, inclusive, uma proporcionalidade entre esses aspectos.

J. FORTUNE; V. JOHANSEN; E. FUNDAL. (1987) afirmam que, para a adequação de uma farinha industrial, no sentido de obter uma melhor queimabilidade, há que se ajustarem os parâmetros químicos, a finura e a quantidade de grãos grosseiros de calcário e quartzo, para se atingir a eficiência máxima durante a queima. Estudando farinhas industriais,

esses pesquisadores compararam resultados de farinhas do processo industrial com essas mesmas farinhas queimadas em laboratório, segundo o método F.L. SMIDTH. Nesse estudo, compararam farinhas industriais com resíduos da ordem de 10% na malha 170 mesh, com farinhas com resíduo da ordem de 6% na mesma malha. Um dos fatos a serem destacados nesse estudo é que, com a redução do resíduo de 10% para 6%, não foi observada uma queda no % de quartzo acima de 45 μm (1,3%), contudo, os resultados apresentaram uma redução na dimensão média dos cristais, de C_3S de 29 para 26 μm , portanto, uma queda de 10,3%. Uma vez que essa redução na dimensão média do C_3S foi observada em clínqueres industriais, vale ressaltar que outros parâmetros importantes afetam a dimensão dos cristais, tanto de alita, como da belita, e que são consagrados como bastante significativos sobre essa questão como: comprimento da chama, % de descarbonatação, tempo de residência no forno, temperatura de queima e influência de elementos menores; contudo, essas variáveis não foram apresentadas no trabalho, portanto, torna-se difícil assegurar que essa redução seja atribuída a alteração granulométrica.

Os autores ainda ressaltam que houve uma elevação de 17KWh/t para 19,2 KWh/t, um aumento de 12,94% no consumo de energia elétrica na moagem de cru; e um ganho de produção de 3,7% para os cimentos de Alta Resistência Inicial, o que não justificaria a redução do resíduo, uma vez que não foram observados ganhos de resistências para os cimentos. Contudo, não foram apresentados dados operacionais mais detalhados relativos ao comportamento dos moinhos de cru e cimento durante o período considerado para uma melhor avaliação do desempenho.

Vale ressaltar que as condições tecnológicas das fábricas por ocasião desses estudos eram outras, não só nas moagens de cru, onde atualmente se trabalha com consumos de energia elétrica sensivelmente mais baixos, mas, também, nos sistemas de queima, compreendendo torres de ciclones, maçaricos e resfriadores mais eficientes. Outra questão, e de fundamental importância, são as técnicas atuais para avaliação tanto da mistura crua, como das características do clínquer produzido, como: Granulometria Lazer, DRX, MEV e outros.

DORN, J.D. (1985), afirma que, sob condições favoráveis de clinquerização, as partículas silicáticas inferiores a 45 μm reagem prontamente com o CaO disponível, dando origem aos cristais de C_2S e C_3S do clínquer. Contudo, partículas silicáticas grosseiras podem originar zonas belíticas desenvolvidas, geralmente com poros centrais. A origem dessas zonas com poros centrais pode ser explicada pela mobilidade moderada e viscosidade relativamente alta da sílica, que se move lentamente do centro dos grãos para as áreas adjacentes.

No mesmo estudo, o autor afirma que, após medir cuidadosamente partículas de quartzo e adicionar a uma mistura crua industrial, queimou em laboratório por tempo e temperatura normais, obtendo uma série de clínqueres que apresentaram uma interdependência entre os diâmetros das partículas de quartzo e os cristais de C_2S e C_3S .

Embora tenha demonstrado uma correlação entre os diâmetros do quartzo e os cristais de C_2S e C_3S , não foram evidenciadas as condições de preparação dessas partículas de quartzo, e ainda, as partículas foram introduzidas em uma mistura crua industrial, portanto, com suas características próprias. Logo, dificilmente poderíamos reproduzir o ensaio. Por outro lado, a preparação do quartzo para obtenção de partículas dessas dimensões não é uma tarefa simples, pois, as partículas apresentam aspectos prismáticos, dificultando sua classificação, através de peneiras, e a contaminação de frações menores nas frações superiores e vice versa, dificilmente é evitado. A melhor forma de abordagem do problema, do ponto de vista das partículas de quartzo, parece ser o uso da granulometria Lazer, levando assim para a análise dos resultados o efeito das contaminações entre as frações. Por outro lado, com o objetivo de isolar o efeito das partículas de quartzo, e criar condições de reprodutibilidade do ensaio, torna-se necessário o uso de compostos puros para a composição da farinha.

2.2.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Conforme descrito acima, nos diversos estudos citados, não existe um consenso a respeito do diâmetro crítico de cada componente mineralógico, especialmente o quartzo. Mesmo porque as metodologias de ensaios também foram muito diferentes. Porém, é unânime a posição de que as partículas de quartzo, na medida em que crescem suas dimensões, interferem negativamente no processo de clínquerização, tanto no consumo de combustível, quanto na qualidade do clínquer. Contudo, em sua grande maioria, os estudos são relacionados a “queimabilidade da farinha”, e raros trabalhos abordam a questão do efeito sobre as dimensões dos cristais do clínquer ou sobre sua estrutura como um todo. Destaque seja dado aos seguintes questionamentos carentes de estudos sistemáticos envolvendo técnicas avançadas de caracterização dos pontos abaixo:

- Existe de fato, uma relação direta entre o diâmetro das partículas de quartzo e o diâmetro dos cristais de C_3S ?
- O tamanho das partículas de quartzo teria influência sobre a estabilização das formas morfológicas, sobretudo, do C_3S ?

- No sentido de abordar essas questões, é imprescindível o uso das técnicas como: Granulometria Lazer, DRX, entre outras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

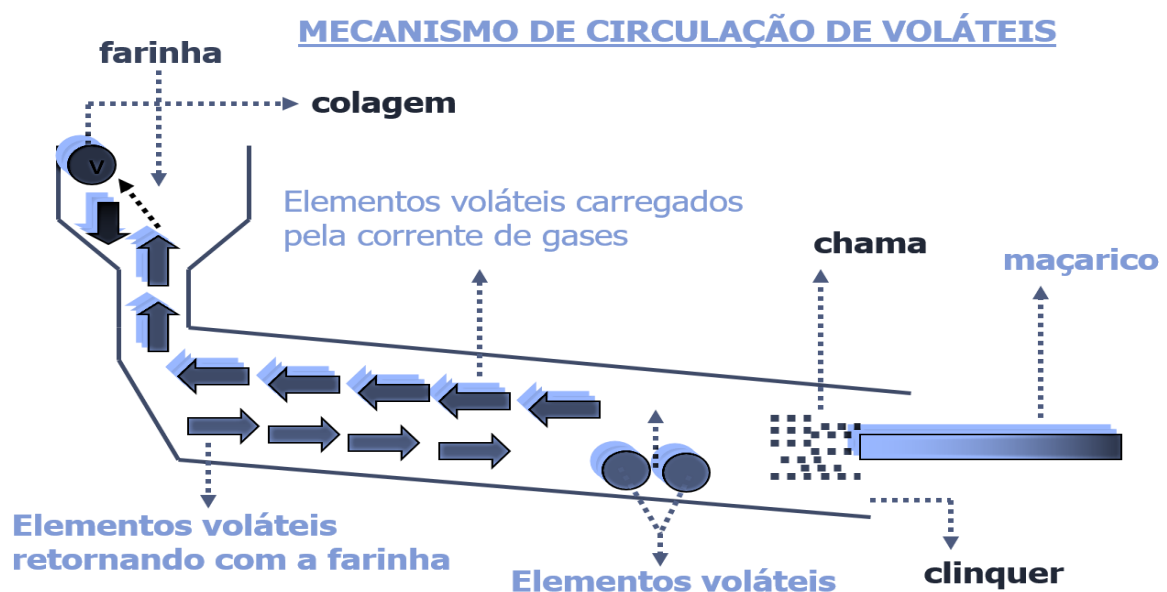
A partir dos questionamentos levantados na revisão crítica da literatura, as metodologias escolhidas visam:

3.1 DEFINIÇÃO DA FARINHA PADRÃO

O trabalho baseou-se no uso de 2 fontes de sílica: quartzo de alta pureza, e sílica amorfa (na forma de sílica gel). Para o restante dos óxidos foi usado compostos químicos puros (P.A). Dessa forma, buscou-se eliminar a influência de quaisquer outras partículas que pudessem influenciar no processo de clinquerização.

Como composição química Padrão, foi adotado a composição média da farinha de entrada do forno da Elizabeth Cimentos. A adoção da composição química da entrada do forno, visa levar em consideração a incorporação dos elementos voláteis que se desprendem do material na zona de queima principalmente, sobretudo os Sulfatos Alcalinos, precipitando e se reincorporando à farinha na entrada do forno, o que caracteriza o ciclo de voláteis na clinquerização, figura 19.

Figura 19 Representação do Ciclo de Voláteis no Forno de Clinquerização.



Obs.: A variação do % de enxofre, determinado na forma de SO₃, na entrada desse forno varia entre 1,50% e 2,50%, em operação equilibrada. Foi feita a opção para a composição com a concentração 2,50%, valor máximo, como forma de garantir uma maior absorção de enxofre por parte do clínquer, uma vez que, a queima em laboratório é estática, e sem o ciclo dos voláteis.

Tabela 3 Composição Química Padrão das Amostras de Farinha.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
12,7	2,9	1,8	40,4	2,9	2,5	1,5	0,15
FSC		MS		MA		SO ₃ /Alc.	
100,62		2,7		1,61		1,56	

3.2 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE AMOSTRAS

Foram definidas 5 faixas granulométricas para as partículas de sílica.

- 1) Sílica < 38 µm;
- 2) 38 µm ≤ Sílica < 45 µm;
- 3) 45 µm ≤ Sílica < 63 µm;
- 4) 63 µm ≤ Sílica < 90 µm;
- 5) 90 µm ≤ Sílica < 125 µm.

Com a definição das faixas granulométricas para as partículas de sílica, foi também estabelecido o conjunto de amostras de farinha para ensaios de queima. Conforma tabela 4 abaixo.

Tabela 4 Conjunto de amostras de Farinha para Ensaios de Clinquerização.

Conjunto de Amostras de Farinha para a Clinquerização				
QUARTZO (µm)				
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Q < 38	38 ≤ Q < 45	45 ≤ Q < 63	63 ≤ Q < 90	90 ≤ Q < 125
SÍLICA AMORFA (µm)				
Amostra 6		Amostra 7		Amostra 8
S.A < 38		45 ≤ S.A < 63		90 ≤ S.A < 125

Conforme mostrado acima, o conjunto de amostras somam 8. 5 amostras correspondem as amostras com Quartzo (amostras 1 a 5), e 3 amostras correspondem a Sílica Amorfa (amostras 6 a 8).

3.3 PREPARAÇÃO DAS FRAÇÕES DE QUARTZO E SÍLICA AMORFA.

Para a preparação das amostras de sílica, foram usados os seguintes equipamentos de laboratório: Britador de Mandíbulas, Moinho de Anéis, Peneirador Mecânico e Peneiras Manuais, conforme fotos abaixo.

Figura 20 Equipamentos Utilizados para Preparação das Frações de Quartzo: Britador de Mandíbulas, Moinho de Anéis, Peneirador Mecânico e Peneiramento Manual, respectivamente.



Após a britagem dos materiais, Quartzo e Sílica Amorfa, as 5 frações foram separadas de acordo com os limites dimensionais mostrados na tabela 4.

Para ambos os materiais, quartzo e sílica amorfa, estabeleceu-se o tempo de 5 minutos para os peneiramentos, criando assim todas as frações. Após a separação, de acordo com as faixas determinadas, procedeu-se um peneiramento a úmido do material de cada faixa, com o objetivo de eliminar os finos contaminantes de cada faixa. Esse procedimento foi feito usando a peneira de abertura inferior de cada faixa selecionada. Para os peneiramentos de eliminação dos finos foram usados 150 g de material a cada batelada. Após o procedimento, os materiais foram levados a estufa a 100 C°. Usando as mesmas massas para o peneiramento a úmido, cada fração foi novamente submetida ao peneiramento mecânico na peneira de abertura inferior de cada faixa estabelecida, até a não observação da presença de finos no recipiente de fundo. O tempo para essa operação foi de 25 minutos. Em seguida as frações foram acondicionados para a preparação das farinhas. Dessa forma, foram preparados cerca de 1.000 g de Quartzo e 1.000 g de Sílica Amorfa para cada faixa de partículas de sílica.

Uma amostra de cada faixa granulométrica foi enviada ao Laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, para determinação da distribuição granulométrica por Granulômetro Lazer. O equipamento utilizado pelo Laboratório foi o Granulômetro SILAS – 1064. Os ensaios foram feitos em meio líquido (Etanol). Laudos – Anexo 1.

3.4 PREPARAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE FARINHA

De posse das frações de Quartzo e Sílica Amorfa, foram preparadas as 8 Amostras de Farinha, conforme apresentado nas tabelas 3 e 4.

Com uso de Balança Analítica, foram preparadas 1.000 g de cada amostra. A homogeneização das amostras foi feita manualmente. Foram retiradas 3 porções de cada amostra para análise.

A determinação da composição química das amostras, foi feita através da Fluorescência de Raio-X. A Norma empregada foi ABNT NBR 14656 – Cimento Portland e Matérias Primas – Análises Química por Espectrometria de Raios-X.

As análises químicas de todas as amostras, quartzo, sílica amorfa, farinha e clínquer, foram feitas em triplicata, e tomou-se como resultado final o valor médio de cada triplicata. Outras Normas empregadas para as análises químicas tanto das farinhas como dos clínqueres produzidos foram: 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.

O Equipamento usado para análise química foi o Axios – 100 – Panalytical, com uso de pastilhas fundidas.

Figura 21 Equipamentos Utilizados para Análise Química: Axios – Cement - Max – Panalytical e Maquina de Fusão, respectivamente.



3.5 PREPARAÇÃO DAS FARINHAS PARA A QUEIMA

O primeiro passo para a clínquerização, foi a preparação dos nódulos de farinha, com a umidificação da mistura crua, formação manual dos nódulos em diversos tamanhos, secagem

em estufa a 100 C° por 60 minutos, e, em seguida, armazenamento em dessecador para posterior queima.

Figura 22 Nódulo de Farinha para a Clinquerização.



3.6 CLINQUERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A metodologia empregada na queima das amostras foi baseada nos diversos métodos de avaliação da Queimabilidade de Farinhas utilizados na indústria cimenteira. O tempo utilizado na queima foi de 20 minutos, que é o tempo de residência aproximado da farinha no forno da Elizabeth Cimentos, e a temperatura de queima foi de 1.450 °C. Após a queima, as amostras foram resfriadas imediatamente em corrente de ar a temperatura ambiente. O fluxo de ar do resfriador usado na pesquisa foi ajustado para uma condição de resfriamento semelhante àquela obtida no resfriador industrial dessa Empresa. Esse ajuste foi feito mediante observações microscópicas em seções polidas do clínquer industrial e de clínqueres produzidos no equipamento usado na pesquisa, e nas mesmas condições do ensaio proposto para esse trabalho.

O equipamento utilizado para a clinquerização das amostras foi a Mufla – EDG – Tem. Máx. – 1.700 °C.

Figura 23 Mufla EDG e Resfriador de clínquer.



Após o resfriamento, as amostras de clínquer foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em dessecador para as análises.

3.7 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO CLÍNQUER

Todas 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. Os equipamentos utilizados são mostrados na figura 24.

Figura 24 Equipamentos para a Preparação e Análise Microscópica.

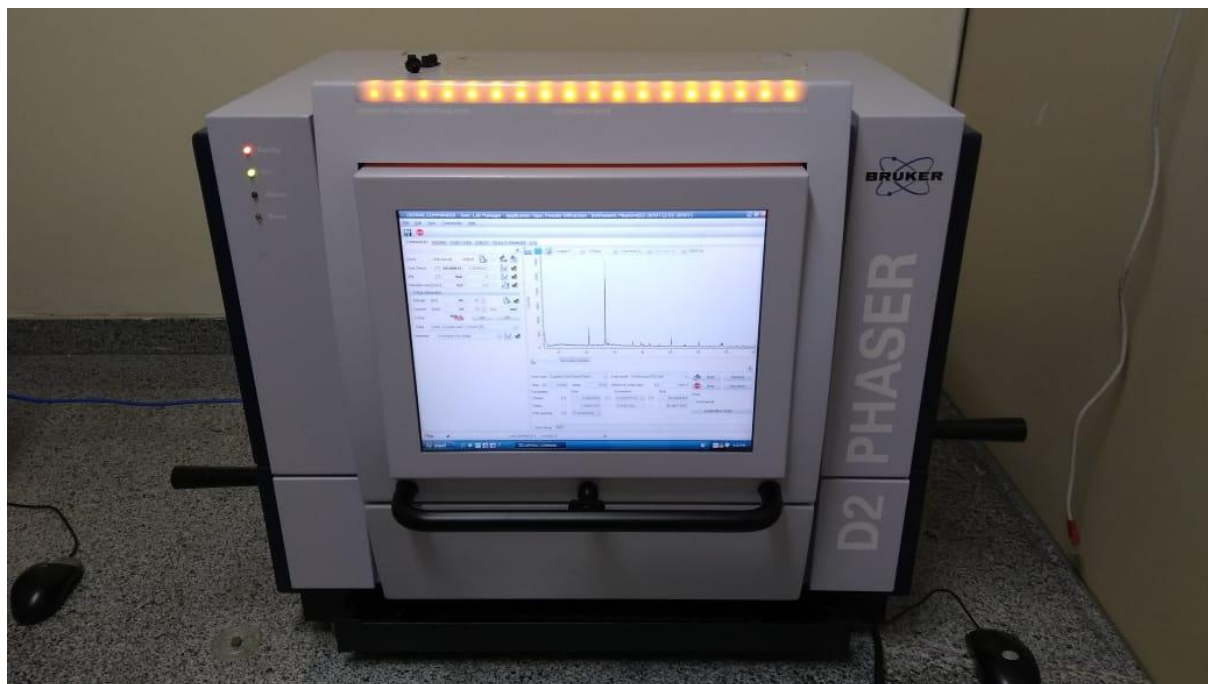


Todas as amostras de clínquer foram preparadas com resina fenólica sob vácuo; posteriormente lixadas com lixas de gramatura entre 200 e 1.600 e polidas com Pasta Diamantada de gramatura 0,25 μm .

3.8 AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CLÍNQUER POR DRX

Tanto as amostras de sílica, como as amostras de clínquer, foram analisadas via DRX, e seus Padrões Difratométricos refinados estruturalmente com o uso do Software TOPAS. As amostras foram moídas em moinho de Anéis, até uma granulometria 100% passante em 38 μm . O Equipamento usado foi o modelo D2 PHASER – BRUKER.

Figura 25 DRX – Modelo D2 PHASER - BRUKER.



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 um 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 o cuidado na acomodação da superfície para evitar a orientação preferencial. Por fim, insere-se porta amostra no equipamento.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS

4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O perfil granulométrico das frações de Quartzo e Sílica Amorfa, obtidos via Granulometria Lazer, encontra-se nos gráficos abaixo. Anexos - Laudos 1 a 8.

Figura 26 Perfil Granulométrico das frações de Quartzo.

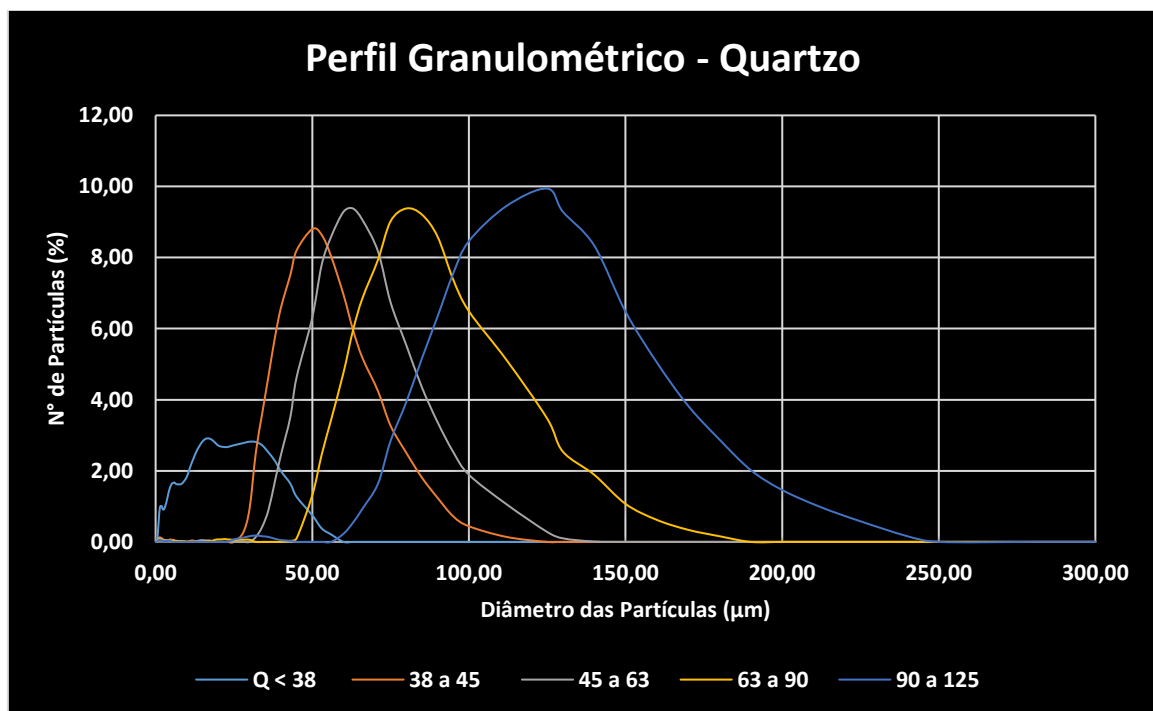
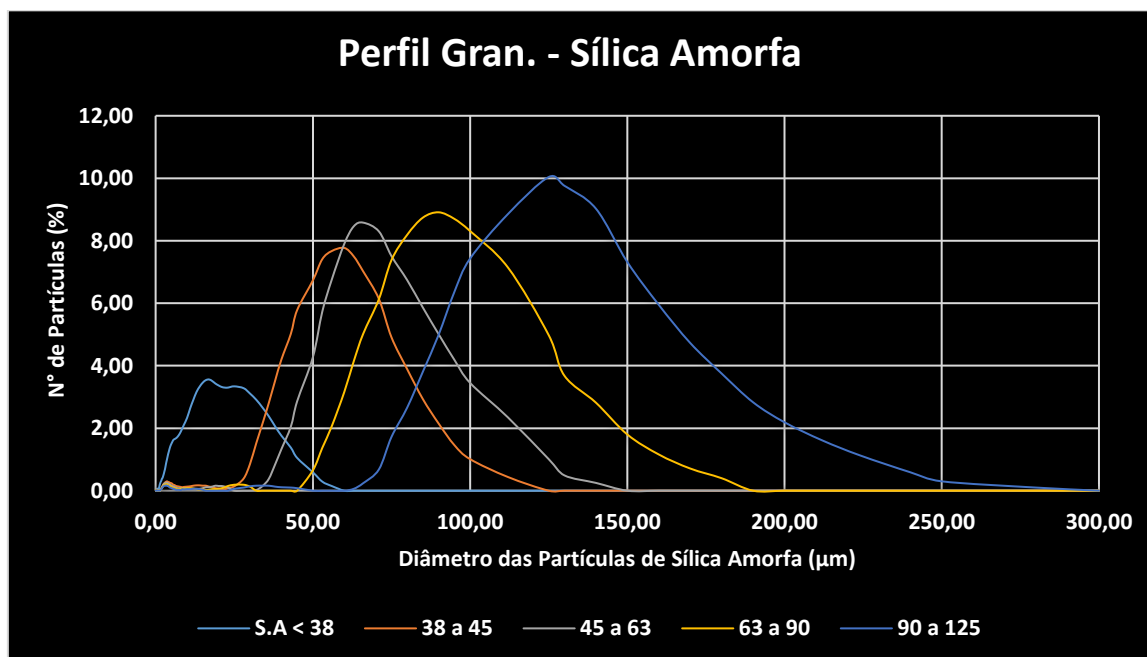


Figura 27 Perfil Granulométrico das Frações de Sílica Amorfa.



Obs.: Foram produzidas 05 frações de sílica dentro dos limites de diâmetros estabelecidos, tanto para Quartzo, como para Sílica Amorfa, contudo, para a Sílica Amorfa, foram preparadas 3 amostras de farinhas para queima.

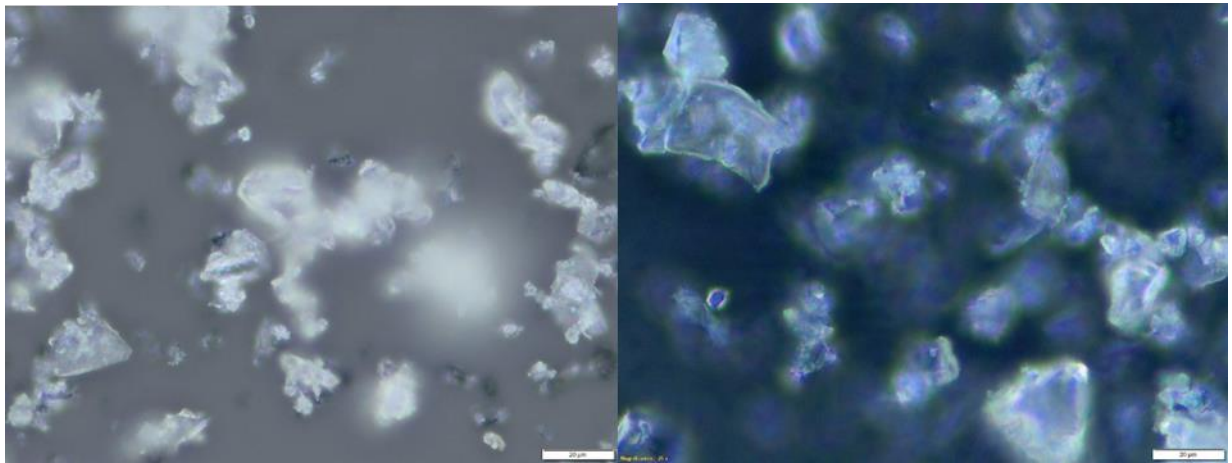
Note-se que, tanto para as curvas de distribuição das partículas de quartzo, como de sílica amorfa, há evidências de uma considerável contaminação, tanto de finos, quanto de grossos, em todas as faixas preparadas para os ensaios. Essas contaminações persistiram, mesmo após uma segunda passagem do material pelas 2 peneiras que limitam os intervalos das frações, e também a um peneiramento a úmido de cada fração. Esse fato só pode ser determinado, por exemplo, com o uso da Granulometria Lazer, e pode ser de fundamental importância para a interpretação dos resultados.

Esse fato parece ser devido à forma das partículas produzidas no Moinho de Anéis, que apresentam um aspecto prismático, e isso ocorre, tanto para as partículas de quartzo, como para as de sílica amorfa.

Contudo, mesmo considerando as características muito distintas das durezas dos dois materiais usados, quartzo puro e sílica amorfa, nota-se que os perfis das distribuições granulométricas são muito semelhantes.

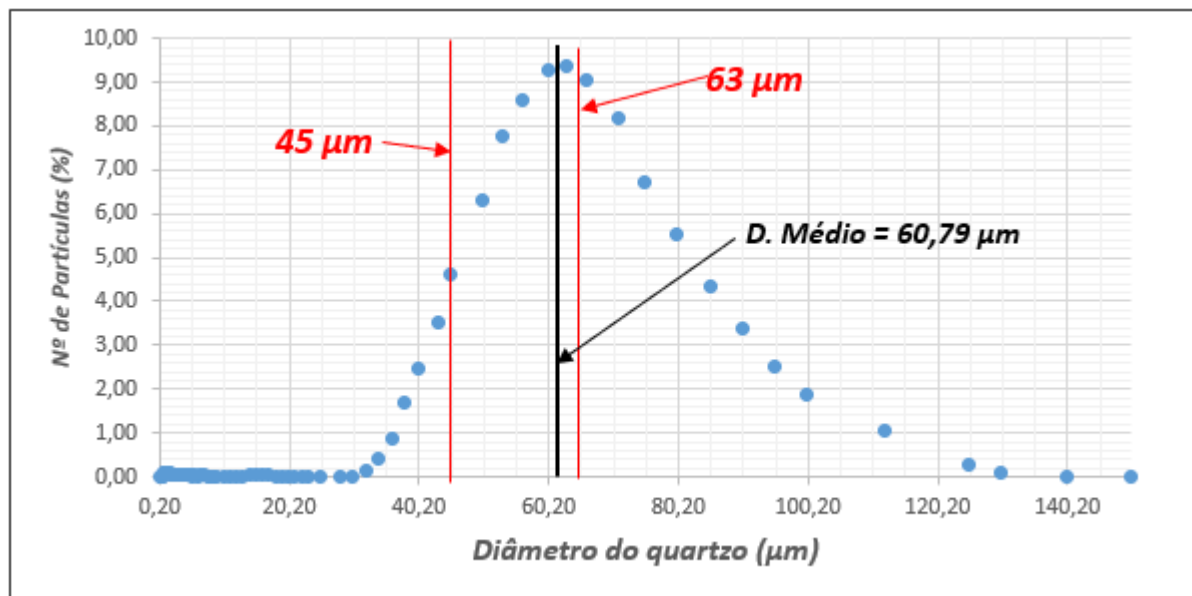
As fotos abaixo, obtidas por microscopia de Luz Refletida, ilustram essa semelhança das estruturas dos dois materiais.

Figura 28 Quartzo < 38 μm – aumento 500X, Diâmetro Médio de 14,78 μm e Sil.Am < 38 μm – aumento 500x, Diâmetro Médio de 16,47 μm , respectivamente.



A seguir, um exemplo da contaminação de finos e grossos para o quartzo, na faixa granulométrica entre 45 e 63 μm .

Figura 29 Distribuição Granulométrica do Quartzo.

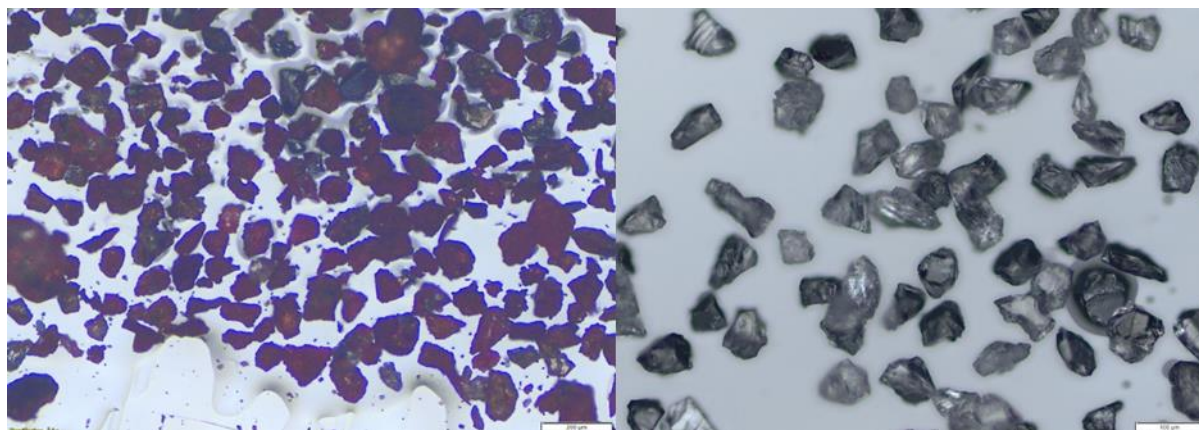


Nessa faixa, observamos uma contaminação de 10,96% de finos abaixo de 45 μm , e uma contaminação de 52,48% de grossos superior a 63 μm . Esse fato só pode ser determinado com maior precisão com o uso da técnica de Granulometria Lazer.

Buscando avaliar as semelhanças estruturais com a farinha industrial da Elizabeth Cimentos, uma vez que a farinha Padrão foi baseada em sua composição média, tomou-se o resíduo na malha 45 μm de uma porção dessa farinha, e em seguida a submeteu a um ataque

com HCl diluído, a quente, até completa dissolução dos carbonatos. O resíduo dessa dissolução foi lavado e observado ao microscópio sob de luz refletida. Abaixo estão as fotografias dessas estruturas residuais, e também das partículas de quartzo da fração 45 a 63 μm usada na composição da amostra 3.

Figura 30 Estruturas silicosas da farinha industrial, após ataque com HCl diluído/a quente; e partículas de quartzo da Fração entre 45 e 63 μm , respectivamente.



Nota-se uma semelhança estrutural entre as partículas. Essa semelhança pode ser devida não só às características geológicas do material, como também à tecnologia empregada na moagem industrial, Moinho de Rolos, que reduz a dimensão das partículas por esmagamento, assim como no Moinho de Anéis.

Outra observação importante a ser registrada é a característica alongada de diversas partículas, tanto na fração de quartzo entre 45 a 63 μm , como no resíduo da farinha industrial. Isso justifica parte da contaminação de partículas maiores dentro de todas as faixas granulométricas, e o aspecto prismático das partículas podem explicar a contaminação de finos dentro dessas mesmas faixas de Quartzo e Sílica Amorfa, dada a dificuldade de partículas com esse formato serem separadas por peneiras de malha quadrada.

Abaixo está um resumo das características principais de todas as frações de quartzo e sílica amorfa usadas na pesquisa.

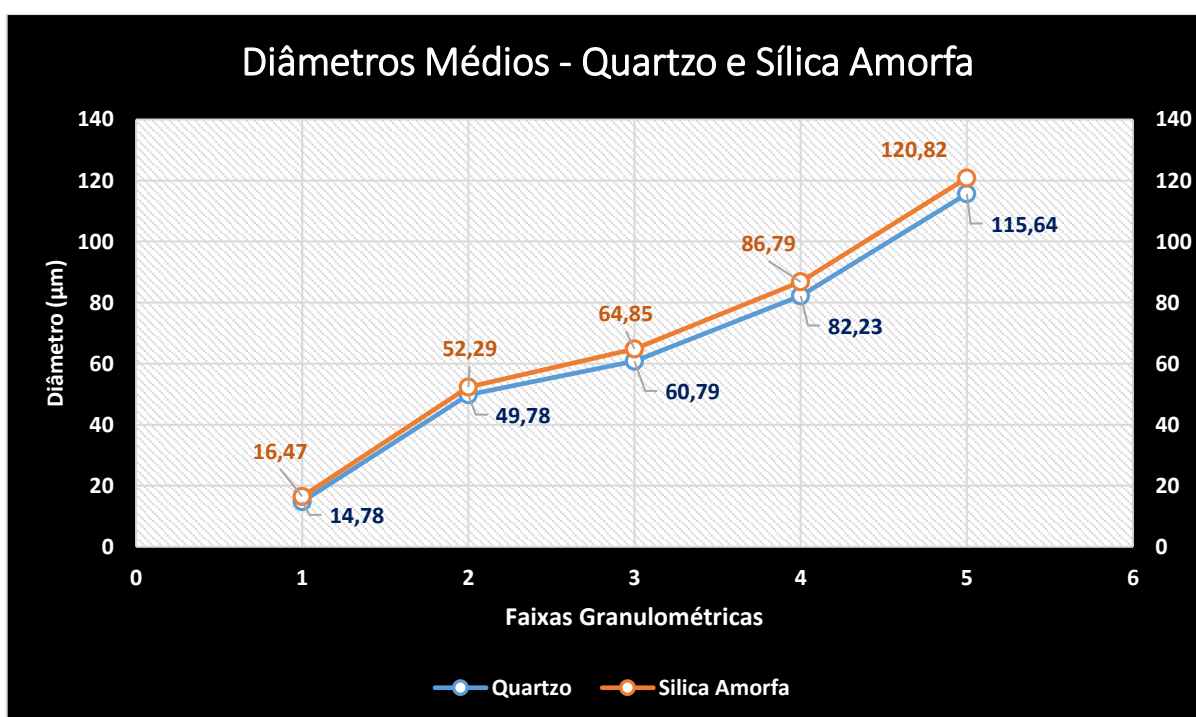
Tabela 5 Resumo da Distribuição Granulométrica das Partículas de Sílica.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA - CILAS 1064 - Meio Líquido (Etanol)								
	QUARTZO (μm)				SÍLICA AMORFA (μm)			
	D. a 10%	D. a 50%	D. a 90%	D. Médio	D. a 10%	D. a 50%	D. a 90%	D. Médio
$Sil. < 38$	1,57	11,89	33,36	14,78	3,85	14,31	32,61	16,47
$38 \leq Sil. < 45$	33,63	48,44	70,51	49,78	30,42	52,76	77,06	52,29
$45 \leq Sil. < 63$	41,75	59,61	84,23	60,79	41,47	64,37	94,25	64,85
$63 \leq Sil. < 90$	56,05	79,47	116,15	82,23	56,77	85,98	124,07	86,79
$90 \leq Sil. < 125$	78,42	112,99	159,85	115,64	81,46	118,68	170,47	120,82

Apesar da dureza bastante superior do Quartzo, nota-se que o diâmetro médio das frações de sílica amorfa são, em média, 5,57% superiores aos diâmetros médios das frações de Quartzo. É interessante essa observação, uma vez que um dos objetivos fundamentais dessa pesquisa é avaliar a influência do tamanho da partícula de sílica sobre a dimensão do C3S.

O gráfico abaixo mostra os diâmetros médios das partículas de Quartzo e Sílica Amorfa.

Figura 31 Relação entre os diâmetros médios de Quartzo e Sílica Amorfa.



4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS FARINHAS

Com base na Composição Química Padrão, e nas faixas granulométricas estabelecidas para o Quartzo e para a Sílica Amorfa, foram compostas as 8 amostras de farinhas para a clinquerização.

As análises químicas das amostras de farinha estão na tabela 6.

Tabela 6 Composição química das Farinhas.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS FARINHAS									
Farinha de Referência - Industrial (%)		QUARTZO					SÍLICA AMORFA		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
		Q < 38	38 ≤ Q < 45	45 ≤ Q < 63	63 ≤ Q < 90	90 ≤ Q < 125	S.A < 38	45 ≤ S.A < 63	90 ≤ S.A < 125
PF	35,44	35,39	35,28	35,19	35,25	35,13	35,42	36,25	35,90
SiO ₂	12,50	12,59	12,69	12,65	12,67	12,64	12,76	12,73	12,80
Al ₂ O ₃	2,90	2,94	2,93	3,04	3,05	2,94	2,91	2,89	2,90
Fe ₂ O ₃	1,80	1,81	1,78	1,81	1,81	1,78	1,80	1,82	1,89
CaO	40,00	40,50	40,50	40,62	40,68	40,53	40,72	40,39	40,55
MgO	2,90	3,39	3,36	3,48	3,49	3,36	3,15	3,01	3,00
SO ₃	2,50	2,35	2,32	2,48	2,43	2,32	2,49	2,40	2,32
K ₂ O	1,50	1,27	1,27	1,30	1,29	1,26	1,27	1,27	1,22
Na ₂ O	0,15	0,13	0,10	0,11	0,13	0,14	0,12	0,13	0,10
FSC	101,03	101,53	100,89	101,09	101,05	101,27	100,96	100,38	100,15
MS	2,66	2,65	2,70	2,61	2,61	2,68	2,71	2,70	2,67
MA	1,61	1,62	1,65	1,68	1,69	1,65	1,62	1,59	1,53
S/Alc	1,56	1,73	1,74	1,81	1,77	1,72	1,85	1,78	1,81

As análises químicas das amostras, apresentam boa uniformidade no tocante a sua correspondência à composição Padrão adotada. Como referência para essa variação, sobretudo quanto ao FSC, é aceito industrialmente como ótimo um Desvio Padrão do FSC da farinha de alimentação dos fornos $\leq 1,0$. O Desvio Padrão Amostral do FSC apresentado pelo conjunto de amostras é de 0,60; consideravelmente abaixo.

4.3 AVALIAÇÃO DA CAL LIVRE

Após a clinquerização em Mufla, foram feitas, em triplicata, a determinação da Cal Livre de todas as amostras, segundo a Norma - ABNT NBR NM 13 – CIMENTO PORTLAND – Análise Química – Determinação de Óxido de Cálcio Livre pelo Etileno Glicol. A determinação da Cal Livre é de fundamental importância, pois trata-se de uma

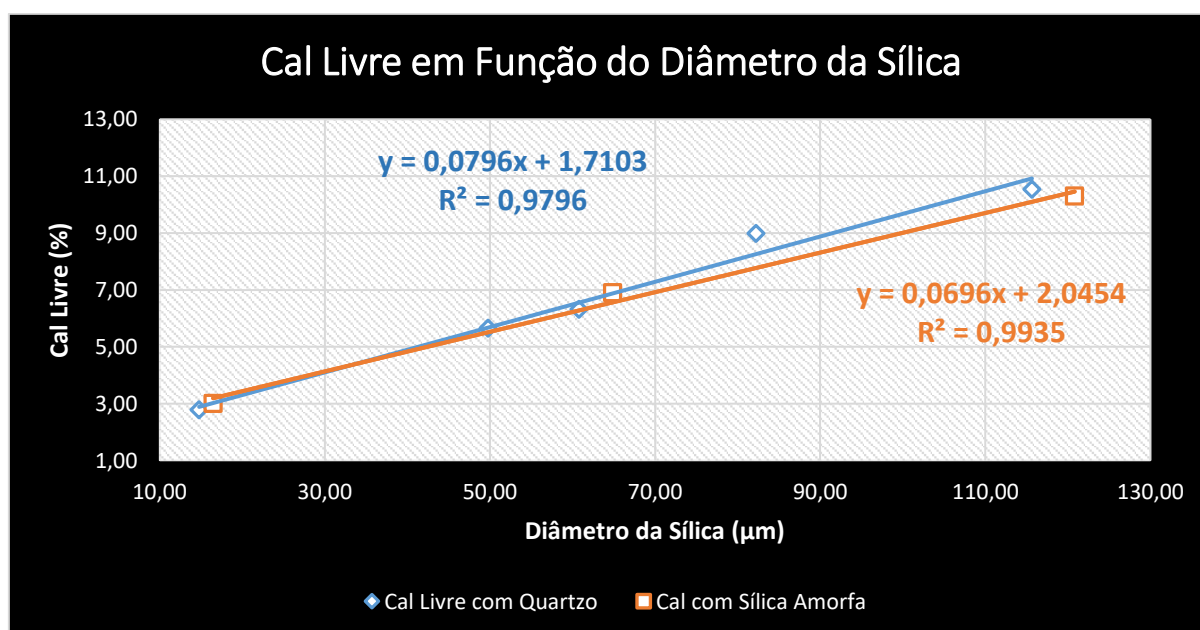
primeira avaliação da qualidade do material clínquerizado. Essa é razão pela qual encontram-se diversas metodologias de avaliação da Aptidão a Clinquerização de Farinhas, todas elas baseadas em tempos e temperaturas padronizadas de queima, tomando como parâmetro de qualidade a Cal Livre residual dessas farinhas.

Tabela 7 Cal Livre – Amostras com Quartzo e Amostras com Sílica Amorfa.

CAL LIVRE DAS AMOSTRAS DE CLINQUER COM QUARTZO E SÍLICA AMORFA					
	QUARTZO				
	Síl.<38	38 ≤ SíL.< 45	45 ≤ SíL.< 63	63 ≤ SíL.< 90	90 ≤ SíL.< 125
Cal Livre (%)	2,78	5,66	6,32	8,99	10,54
	SÍLICA AMORFA				
Cal Livre (%)	3,01		6,90		10,30

Nota-se, em uma primeira observação, a boa correlação existente entre a dimensão média das partículas de Sílica e a Cal Livre. Fato esse já relatado em inúmeros trabalhos científicos e comprovado no dia a dia da produção industrial de clínquer. O gráfico abaixo, figura 32, facilita a avaliação.

Figura 32 Variação da Cal Livre em função do tamanho da partícula de Sílica (D.Médio G.L.)



Analisando a questão da Queimabilidade, ou a “Aptidão a Clinquerização” das farinhas, conforme descrito na Revisão Bibliográfica, podem-se aqui fazer algumas

observações. Independentemente da metodologia usada para essa avaliação, todas elas estão fundamentadas na queima por um tempo e temperaturas determinadas, com a comparação da Cal Livre residual em relação a um valor Padrão. Para a avaliação da variação da Cal Livre em relação ao Padrão, comparam-se os módulos da farinha (FSC, MS e MA, etc.), e, normalmente, os resíduos de Quartzo e Calcário. Usualmente, avalia-se o % de Quartzo > 45 μm e o % de Calcário > 125 μm .

Por exemplo, tomando os dados das amostras 1 e 6, com Quartzo e Sílica Amorfa, correspondente aos grãos de sílica < 38 μm , pode-se estabelecer uma comparação de suas queimabilidades, tomando como base a cal livre e outras características das farinhas.

Tabela 8 Avaliação da Aptidão a Clinquerização.

AVALIAÇÃO DA APTIDÃO A CLINQUERIZAÇÃO		
<i>Fração de Sílica < 38 μm</i>		
	<i>AMOSTRA 1(quartzo)</i>	<i>AMOSTRA 6 (Sílica Amorfa)</i>
Cal Livre (%)	2,78	3,01
FSC	101,53	100,96
MS	2,65	2,71
MA	1,62	1,62
Quartzo > 45 μm (%)	1,34	
Sílica Am. > 45 μm (%)		1,03
Calcário > 125 μm (%)	0,00	0,00

A Cal Livre da amostra 6, com sílica amorfa, apresenta um valor 8,27% superior à Amostra 1, com quartzo, embora os parâmetros químicos das farinhas apresentem similaridade. Tomando o critério da Cal Livre, pode-se afirmar, em uma primeira análise, que a Amostra 1, com quartzo, teria uma melhor Aptidão a Clinquerização. Porém, alguns fatores devem ser abordados. Por exemplo: a cal livre da amostra 1 é inferior, mesmo considerando que o seu % de partículas de sílica (quartzo) acima de 45 μm é 30% superior ao % de sílica amorfa superior a 45 μm . Porém, o módulo de sílica (MS) da amostra 6, é 2,26% superior ao

MS da amostra 1, o que poderia contribuir negativamente com sua aptidão, quando comparada à amostra 1.

Contudo, do ponto de vista industrial, vale ressaltar que variações de Cal Livre desse nível, e variações de FSC, MS e MA dessa ordem, apresentadas pelas 2 amostras (Tabela – 08), são inerentes ao processo; assim, as duas farinhas poderiam ser consideradas equivalentes.

De fato, DORN, J.D. (1985) afirma que: sob condições favoráveis de clínquerização, as partículas silicáticas inferiores a 45 μm reagem prontamente com o CaO disponível, dando origem aos cristais de C2S e C3S do clínquer.

Os resultados encontrados confirmam tal postulação, pois, mesmo considerando a natureza estrutural totalmente distinta das frações silicáticas, as duas farinhas apresentam um desempenho semelhante, do ponto de vista da sua queimabilidade, ou seja, nas duas situações, as partículas de sílica, quase na sua totalidade abaixo de 45 μm , reagiram prontamente, produzindo cristais. Por outro lado, o fato de as amostras serem cristalograficamente diferentes, aparenta contradizer as expectativas como postuladas por MAKASHEV (1974) e CHATTERJEE (1985), onde afirmam que a reatividade dos diferentes tipos mineralógicos de sílica, livre ou combinada, aumenta segundo a seguinte ordem: quartzo - calcedônia – opala - alfa tridimita e alfa cristobalita – feldspato – micas e anfibólios – argilominerais – escórias vítreas. Portanto, a expectativa apontaria para uma maior reatividade da sílica amorfa. No entanto, não há informações para esclarecer sistematicamente o efeito do tamanho das partículas nos trabalhos dos referidos autores, porém, há evidências para se supor e esperar uma melhor reatividade no caso da sílica amorfa.

4.3.1 ASPECTOS DO TAMANHO DA PARTÍCULA

Considerando as condições padronizadas dos ensaios - tempo, temperatura e resfriamento, a uniformidade da composição química, e os materiais silicosos bastante distintos quanto a sua natureza estrutural - espera-se uma facilidade maior na combinação química para a farinha com sílica amorfa, baseada na afirmação acima. Contudo, isso não ocorreu, sobretudo para as farinhas com frações de sílica até 63 μm . Os dados indicam que, sobretudo nesse intervalo, o efeito da dimensão das partículas silicáticas parece se sobrepor ao efeito da mineralogia, pois, conforme Tabela 05 – Distribuição Granulométrica das Partículas de Sílica, e Tabela 07 – Cal Livre, o fator mais preponderante parece ser o Diâmetro Médio das Partículas Silicáticas, pois, em média, nas duas amostras dentro desse intervalo, o

diâmetro médio da Sílica Amorfa é 7,60% superior ao diâmetro médio do quartzo; e a Cal Livre do clínquer correspondente às farinhas com Sílica Amorfa é 8,90% superior aos clínqueres produzidos com as farinhas com quartzo.

Portanto, os dados indicam uma maior relevância do Fator Diâmetro Médio das partículas silicáticas sobre as características mineralógicas dessas partículas, sobretudo para as partículas silicáticas no intervalo até 63µm.

FUNDAL, E. (1985), mostrou que uma mistura crua contendo 1% de quartzo maior que 44 µm dá origem a um acréscimo de 0,93% de cal livre após aquecimento a 1.400 °C por 30 min. Por outro lado, 1% de feldspato com dimensões superiores a 63 µm propicia um acréscimo de 0,2% de cal livre sob mesmas condições de clinquerização.

Os dados dos ensaios, listados na tabela abaixo, permitem uma avaliação nessa direção.

Tabela 9 Evolução da Cal Livre em função da Sílica > 45 µm.

<i>Evolução da Cal Livre X Part. > 45 µm</i>			
	<i>QUARTZO</i>		
	<i>% > 45 µm</i>	<i>Cal Livre (%)</i>	<i>Cal Livre/Síl.> 45</i>
Amostra 1	1,34	2,78	
Amostra 2	57,95	5,66	0,051
Amostra 3	84,45	6,32	0,043
Amostra 4	97,98	8,99	0,064
Amostra 5	98,12	10,54	0,080
	<i>Média</i>		0,059
	<i>SÍLICA AMORFA</i>		
Amostra 6	1,03	3,01	
Amostra 7	86,85	6,90	0,045
Amostra 8	96,13	10,30	0,077
	<i>Média</i>		0,061

Nota-se que, na tabela acima, temos o % acumulado das partículas $> 45 \mu\text{m}$ e a cal livre relativa a todas as amostras da pesquisa. Na coluna da direita, temos a relação de cada ponto % de sílica acumulada $> 45 \mu\text{m}$ em relação à cal livre residual, tomando-se por base a amostra 1 para o quartzo, e a amostra 6 para a sílica amorfa. Isso significa que, a cada ponto % de sílica acumulada $> 45 \mu\text{m}$, acrescentamos em média 0,059 pontos % de cal livre, para as amostras com quartzo; enquanto para a sílica amorfa esse valor é de 0,061 pontos %. Portanto, nessas condições de ensaios, a 1.450°C e 20 min., a cal livre relativa às amostras de sílica amorfa supera em 3,39% a cal livre das amostras com quartzo. Contudo, conforme já mostrado, o diâmetro médio das partículas de sílica amorfa supera em 4,23% ao diâmetro médio das partículas de quartzo. Nota-se, aí, mais um forte indício da maior dependência da cal livre em relação ao diâmetro das partículas de sílica, do que de sua origem mineralógica, o que parece estar em desacordo com FUNDAL, E. (1985), mesmo considerando as condições de queima diferentes dos ensaios.

Porém, a questão da Cal Livre encerraria a análise da influência das partículas silicáticas sobre a qualidade dessas farinhas?

A fase seguinte da avaliação dos dados mostra que não, pois a influência do tamanho das partículas de Quartzo e Sílica Amorfa, vai muito além da Cal Livre, pois afeta de forma significativa, e bastante distinta, o diâmetro médio do C3S e também o Polimorfismo do C3S.

4.4 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS SILICÁTICAS SOBRE A DIMENSÃO DO C₃S.

Após a queima das farinhas, o clínquer obtido foi preparado para as diversas análises, e suas composições químicas encontram-se na tabela 10.

Tabela 10 Análise química dos clínques.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CLÍNQUERES								
Composição Química (%)	QUARTZO					SÍLICA AMORFA		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Q < 38	38 ≤ Q < 45	45 ≤ Q < 63	63 ≤ Q < 90	90 ≤ Q < 125	S.A < 38	45 ≤ S.A < 63	90 ≤ S.A < 125
PF	0,60	0,55	0,58	0,57	0,52	0,60	0,55	0,51
SiO ₂	19,63	19,71	19,53	19,63	19,64	20,05	19,69	19,92
Al ₂ O ₃	4,62	4,61	4,58	4,60	4,45	4,42	4,38	4,59
Fe ₂ O ₃	2,63	2,60	2,61	2,64	2,61	2,71	2,73	2,71
CaO	63,01	63,04	62,42	62,71	62,80	62,95	62,73	62,89
MgO	5,08	5,07	5,20	5,07	5,00	4,91	4,97	4,90
SO ₃	2,65	2,69	2,99	2,81	2,50	1,88	1,82	1,87
K ₂ O	1,54	1,49	1,82	1,66	1,55	1,68	1,73	1,79
Na ₂ O	0,21	0,18	0,10	0,06	0,18	0,14	0,14	0,15
FSC	101,44	101,15	101,03	100,97	101,39	99,74	101,06	99,90
MS	2,71	2,74	2,71	2,71	2,78	2,81	2,77	2,73
MA	1,76	1,77	1,75	1,74	1,70	1,63	1,60	1,69
F.L	26,67	26,53	27,03	26,77	25,95	25,56	25,47	26,18
S/Alc	1,58	1,67	1,59	1,65	1,50	1,06	1,00	0,99

Comprovando as análises das farinhas, as análises dos clínques correspondentes apresentam baixo desvio padrão nas suas composições químicas, o que é fundamental para o isolamento do efeito das partículas de sílica.

Obs.: Nota-se que, embora as farinhas tenham sido padronizadas com relação às suas composições químicas, houve uma absorção consideravelmente maior de SO₃ para os clínques com quartzo; pois absorveram, em média, 46,14% a mais que as suas correspondentes amostras de clínquer com sílica amorfa. Essa questão será abordada mais à frente.

A tabela 11 resume os dados relativos à dimensão média das partículas de sílica, obtidas via Granulometria Lazer e Peneiras, e a dimensão média dos cristais de C₃S, obtidas pela microscopia de Luz Transmitida, baseada no Método de ONO (1969), adaptado pela ABCP – Associação Brasileira de Cimentos Portland.

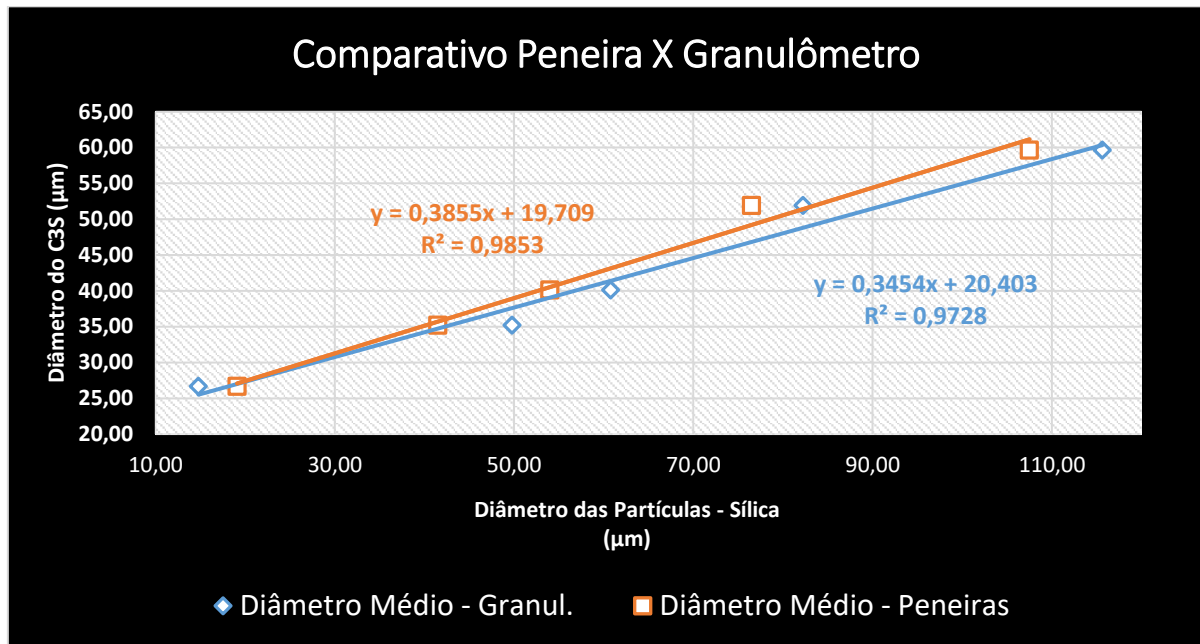
Tabela 11 Diâmetros médios das partículas de sílica e diâmetro médio dos cristais de C3S.

<i>Diâmetros Médios da Sílica e Diâmetros Médios do C3S</i>			
<i>Faixas Granulométricas - Sílica</i>	<i>D.Médio G.L(μm)</i>	<i>*Ponto Médio da Faixa (μm)</i>	<i>D. Médio C3S (μm)</i>
	<i>QUARTZO</i>		
<i>Amostra 1 (Q < 38) μm</i>	<i>14,78</i>	<i>19,10</i>	<i>26,70</i>
<i>Amostra 2 (38 ≤ Q < 45) μm</i>	<i>49,78</i>	<i>41,50</i>	<i>35,23</i>
<i>Amostra 3 (45 ≤ Q < 63) μm</i>	<i>60,79</i>	<i>54,00</i>	<i>40,15</i>
<i>Amostra 4 (63 ≤ Q < 90) μm</i>	<i>82,23</i>	<i>76,50</i>	<i>51,92</i>
<i>Amostra 5 (90 ≤ Q < 125) μm</i>	<i>115,64</i>	<i>107,50</i>	<i>59,65</i>
	<i>SÍLICA AMORFA</i>		
<i>Amostra 6 (S.A < 38) μm</i>	<i>16,47</i>	<i>19,10</i>	<i>13,22</i>
<i>Amostra 7(45 ≤ S.A < 63) μm</i>	<i>64,85</i>	<i>54,00</i>	<i>24,56</i>
<i>Amostra 8(90 ≤ S.A < 125) μm</i>	<i>120,82</i>	<i>107,50</i>	<i>34,19</i>

**Considerado o diâmetro médio como o ponto médio da faixa correspondente.*

O gráfico seguinte, figura 33, mostra a correlação encontrada entre os diâmetros médios das partículas de quartzo, obtidas através do Granulômetro Lazer e o diâmetro do quartzo tomado como o ponto médio de cada faixa considerada, ambos em relação a dimensão média dos cristais de C₃S.

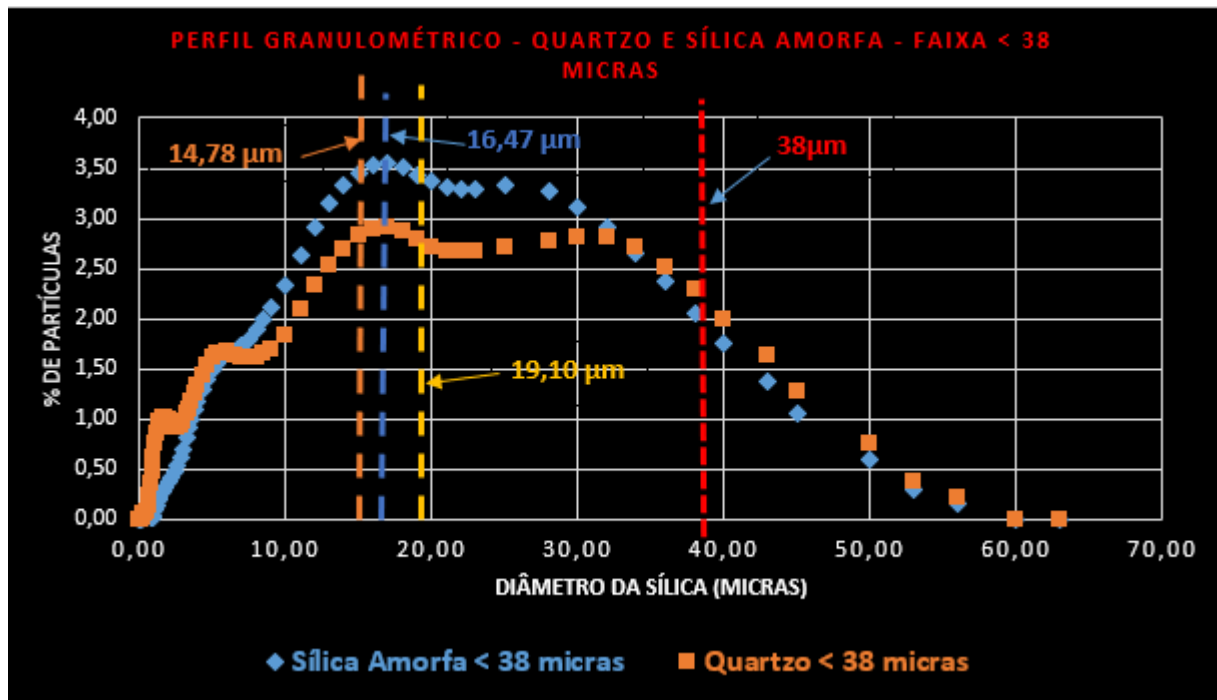
Figura 33 Relação entre o diâmetro do Quartzo (G.L e Peneiras) e o diâmetro do C₃S.



A figura 33 mostra a boa correlação entre o diâmetro médio do quartzo e o diâmetro médio do C₃S, deixando clara a dependência da dimensão média dos cristais de C₃S em relação ao tamanho médio das partículas de quartzo. Note-se que, tomando a correlação em relação ao diâmetro médio do quartzo pelo Granulômetro Lazer ou assumindo o diâmetro médio como ponto médio das faixas consideradas, a correlação se apresenta de mesma ordem, ou seja, mesmo considerando a existência da contaminação de grossos, figura 34, e também revelado em todas as faixas granulométricas, figuras 26 e 27, a conclusão nas duas situações é a mesma.

Nesse trabalho, foram adotadas para os comentários sempre as relações com o diâmetro médio das partículas de sílica obtidas via Granulômetro Lazer, por apresentar uma visão muito mais realística da distribuição das partículas.

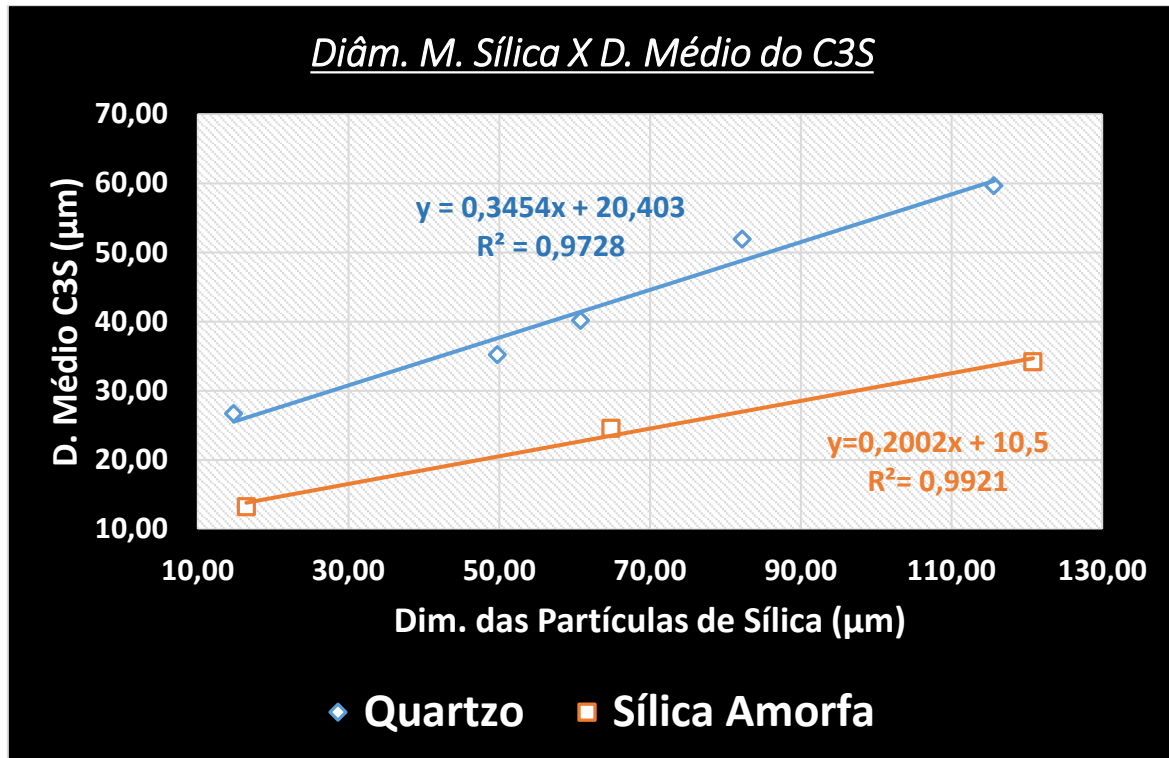
Figura 34 Perfil Granulométrico - Quartzo e Sílica Amorfa - Faixa < 38 micras.



Na figura 34, correspondente às frações de sílica < 38 µm, as linhas mostram o diâmetro médio do Quartzo 14,78 µm (Gran. Lazer); o diâmetro médio da Sílica Amorfa, 16,47 µm (Gran. Lazer), 19,10 µm (ponto médio da faixa), e a linha correspondente a 38 µm, evidenciando a contaminação de grossos.

Abaixo é apresentado o gráfico comparativo entre os clínqueres derivados das farinhas com quartzo e das farinhas com sílica amorfa, com as mesmas faixas granulométricas.

Figura 35 Variação da dimensão do diâmetro médio do C3S em função da dimensão média das partículas de quartzo e sílica amorfa.



Nota-se em ambos os gráficos a excelente correlação entre os diâmetros, tanto do quartzo, como da sílica amorfa, em relação ao diâmetro médio do C3S. Contudo, também se percebe uma considerável diferença, no que aparenta ser uma influência das duas estruturas mineralógicas da sílica.

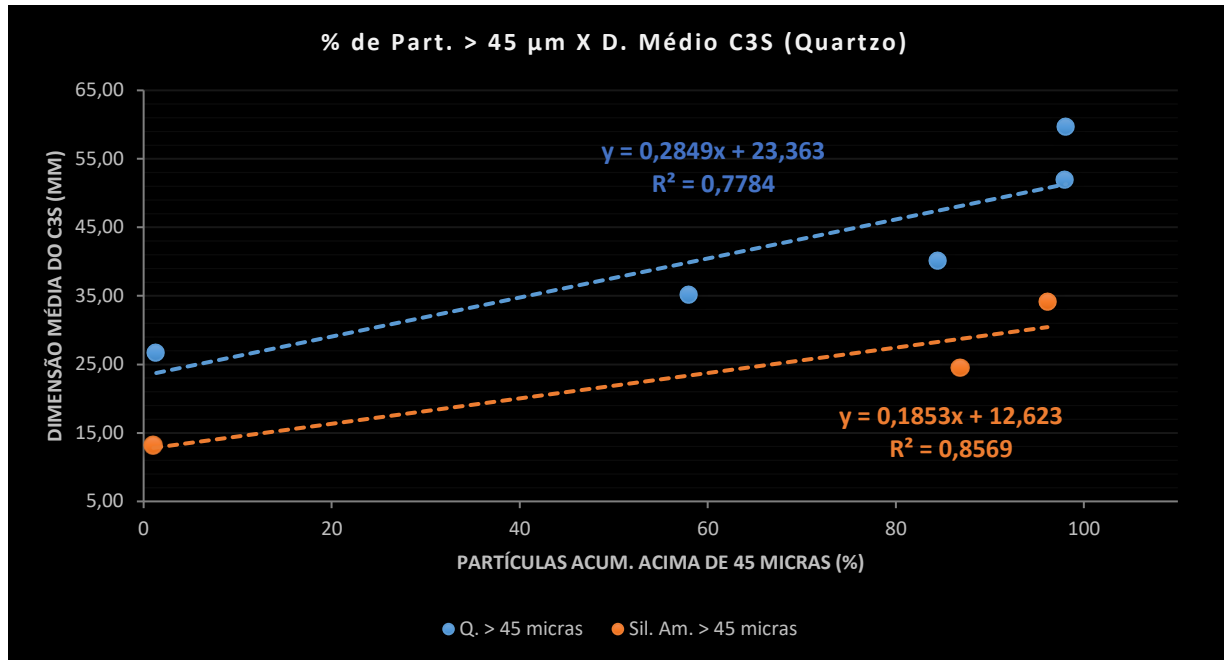
Tomando o valor médio dos diâmetros das duas estruturas da sílica, para as 3 faixas granulométricas consideradas, o diâmetro médio das partículas de sílica amorfa é 5,72% superior à média dos diâmetros das partículas de quartzo, contudo, os diâmetros médios dos C3S das faixas correspondentes do quartzo é 75,77% superior ao C3S derivado das amostras com sílica amorfa. Isso é muito significativo, pois a dimensão do C3S impacta de forma acentuada a moabilidade do clínquer, sendo um dos principais fatores a determinar o consumo de energia elétrica nessa fase, conforme SCHEUBEL & BALZER - 1984.

SCHEUBEL & BALZER (1984) sugere que a redução do tamanho máximo dos grãos silicosos na farinha, de 100 μm para 75 μm, provoca a redução do tamanho médio da alita de 30 μm para 20 μm.

Buscando avaliar aspectos relacionados com a afirmação acima, o gráfico a seguir apresenta a relação entre o % acumulado de partículas silicosas > 45 μm, de quartzo e sílica

amorfa, obtidas nos ensaios de granulometria lazer, em relação à dimensão média dos cristais de C3S.

Figura 36 % acumulado de partículas silicosas > 45 µm em relação a dimensão média do C3S.



De acordo com a curva obtida com os dados da distribuição granulométrica do quartzo e sílica amorfa, e a dimensão média do C3S, oriundo de seus clínqueres correspondentes, tem-se as seguintes equações:

- QUARTZO: $Y = 0,2849 * x + 23,363$ (9), sendo Y a dimensão média do C3S, x a porcentagem de quartzo acima de 45µm.
- SÍLICA AMORFA: $Y = 0,1853 * x + 12,623$ (10), sendo Y a dimensão média do C3S, x a porcentagem de sílica amorfa acima de 45µm.

Tomando as curvas acima, verifica-se que, com um aumento de 2% para 20% no número de partículas de quartzo acima de 45 µm, a dimensão média dos cristais de C3S sobe de 23,99 µm para 29,06 µm, portanto, um acréscimo de 21,13%. Para o caso da sílica amorfa, um aumento de 2% para 20% levaria a um acréscimo da dimensão média dos cristais de C3S de 12,99 µm para 16,33 µm, portanto, um acréscimo de 25,71%.

No sentido inverso, para o quartzo, uma redução no % de partículas acima de 45 µm de 100 para 75%, levaria a uma redução da dimensão média do C3S de 51,8 µm para 44,73 µm, uma redução de 13,65%. Para o caso da sílica amorfa, uma redução dos mesmos percentuais, levaria a uma redução da dimensão média do C3S de 31,15 µm para 26,52 µm, portanto, uma redução de 14,86%.

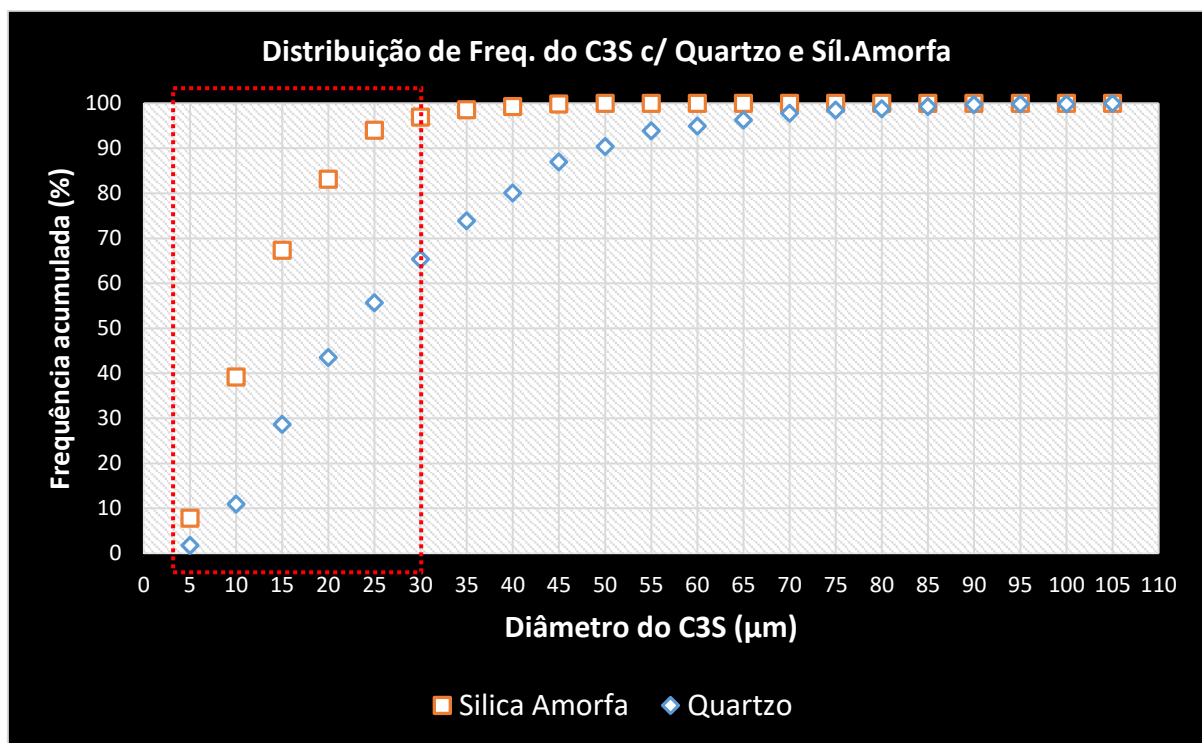
MILLER (1980), embora não apresente dados comprobatórios, afirma que a granulometria da farinha tem um papel importante no crescimento dos cristais de alita, existindo, inclusive, uma proporcionalidade entre esses aspectos.

Os dados encontrados comprovam de forma clara a afirmação acima, mostrando inclusive qual é essa proporcionalidade.

SCHEUBEL & BALZER (1984), sustentam que uma redução da dimensão média dos cristais de C3S pode levar a uma redução de até 15% no consumo de energia elétrica na moagem de cimento.

Diante disso, a distribuição de frequência dos diâmetros dos cristais de C3S obtidas via Microscopia de Luz Refletida das amostras 1 e 6, mostrada abaixo, apresenta informações importantes.

Figura 37 Distribuição de Frequência do C3S correspondente as amostras 1 e 6 (< 38 μm).



NEVILLE, A.M. (2016), assegura: atualmente tem-se que uma proporção de até 95% de partículas na faixa de 3 a 30 μm no cimento, resulta em uma melhora da resistência inicial, bem como da resistência final do concreto produzido com esse cimento.

Considerando a afirmação acima, para a amostra 1, derivada do quartzo, 65% do total dos cristais de C3S estão dentro da faixa entre 3 e 30 μm ; enquanto para a amostra 6, correspondente a sílica amorfa, praticamente 100% dos cristais de C3S estão dentro dessa

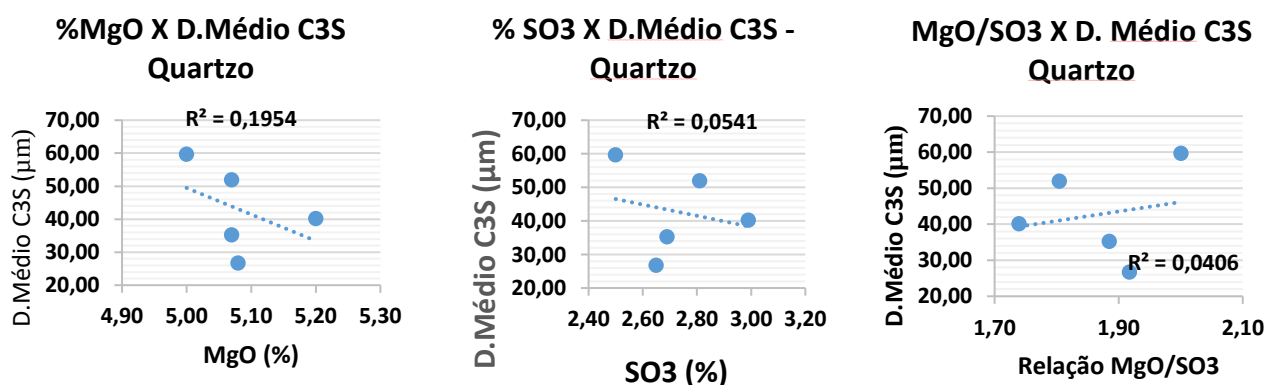
faixa de diâmetros. Dessa forma, parece evidente que em uma situação prática, o trabalho de moagem para produzir partículas entre 3 e 30 μm para a amostra derivada do quartzo é consideravelmente maior, consumindo mais energia elétrica.

Essa questão está inserida em um dos pontos mais importantes na indústria cimenteira, pois a moagem do cimento é a fase de maior consumo de energia elétrica no processo produtivo. A busca da redução do consumo de eletricidade em todas as fases é norteadas por índices internacionais, monitoradas por organizações ligadas aos Sindicatos das Indústrias Cimenteiras, por exemplo, o CSI – Iniciativa para a Sustentabilidade no Cimento -, que estabelecem metas a serem atingidas e divulgam melhores práticas. Portanto, o caminho da redução da dimensão dos cristais de C3S está alinhado ao mais crucial tema ligado ao futuro da Indústria Cimenteira, a Sustentabilidade.

Porém, MAKI, I. (1986), mostra que o aumento do MgO na farinha afeta a taxa de nucleação dos cristais de C3S e pode levar à substituição de grandes cristais de alita por pequenos cristais facetados, constituindo praticamente de M3, com raras inclusões. Por outro lado, a presença de SO₃ na farinha estimula o processo de crescimento dos cristais de alita, favorecendo a ocorrência de grandes cristais individuais e a estabilização da forma M1. Portanto, MgO e SO₃ têm efeitos antagônicos sobre as taxas de nucleação e crescimento dos cristais de C3S.

Diante das afirmações, torna-se necessária a avaliação do impacto que a variação do % de MgO e SO₃ possa ter exercido sobre as amostras dessa pesquisa, uma vez que o objetivo é isolar o efeito da dimensão das partículas de sílica sobre a dimensão da Alita. Abaixo, estão os gráficos, tanto para as amostras com quartzo, como para as amostras com sílica amorfa.

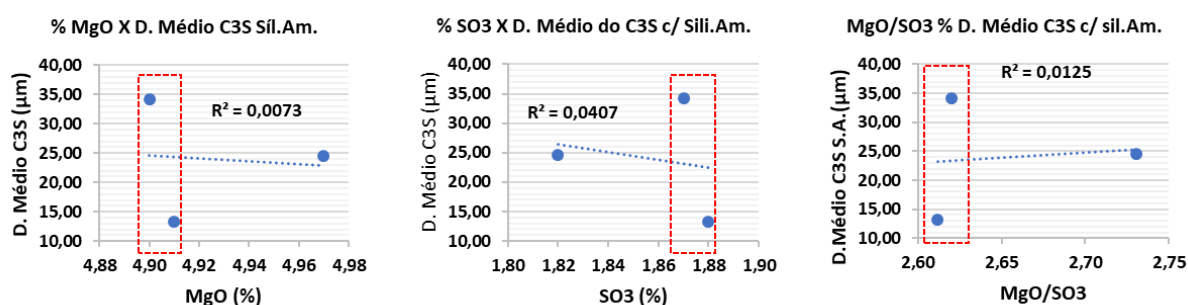
Figura 38 Influência da variação do % de MgO e SO₃ na dimensão dos cristais de C3S nas amostras com quartzo.



Nota-se, em todos os gráficos, a baixa correlação do MgO e SO₃ sobre o crescimento dos cristais de C3S. Esse fato está ligado à padronização da composição química das amostras, fato extremamente importante para isolar a influência dos grãos de quartzo, nesse caso. Portanto, a influência do tamanho das partículas de quartzo sobre os cristais de C3S não sofreram influência significativa desses elementos, do ponto de vista de sua variação.

Da mesma forma, os gráficos abaixo mostram o efeito da variação do % de MgO e SO₃ sobre o crescimento dos cristais de C3S nas amostras com sílica amorfa.

Figura 39 Influência do MgO e SO₃ na dimensão dos cristais de C3S nas amostras com sílica amorfa.



Para as amostras com sílica amorfa, notam-se variações dos % de MgO e SO₃ ainda menores, e, conseqüentemente, apresentam correlações ainda menos significativas em relação ao crescimento do C3S, conforme mostram os coeficientes R^2 . Nota-se, inclusive, que os diâmetros mínimo e máximo do C3S estão dentro de uma faixa extremamente estreita.

Diante disso, é possível afirmar que, também para as amostras com sílica amorfa, a variação do % desses elementos não interferira de forma significativa no crescimento dos cristais de C3S.

Contudo, conforme observado anteriormente, as amostras de clínquer com quartzo absorveram, em média, 46,14% de SO₃ a mais do que suas correspondentes amostras com sílica amorfa. Embora esteja demonstrado que o isolamento do efeito do quartzo e da sílica amorfa sobre os cristais de C3S tenha sido alcançada, no tocante ao efeito da variação dos % de MgO e SO₃ em seus conjuntos amostrais, a comparação entre os conjuntos requer a equalização do % de enxofre.

Diante dessa necessidade, duas novas amostras de clínquer foram produzidas, uma nova amostra com quartzo < 38 μm e menor % de SO₃, e uma nova amostra com sílica amorfa < 38 μm e % de SO₃ superior.

4.4.1 INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO % DE ENXOFRE NO CRESCIMENTO DO C3S.

A tabela abaixo mostra os dados referentes às novas amostras com % diferenciados de enxofre, comparativamente às amostras do primeiro ensaio.

Tabela 12 Influência do enxofre nas amostras com % de sílica < 38 μ m.

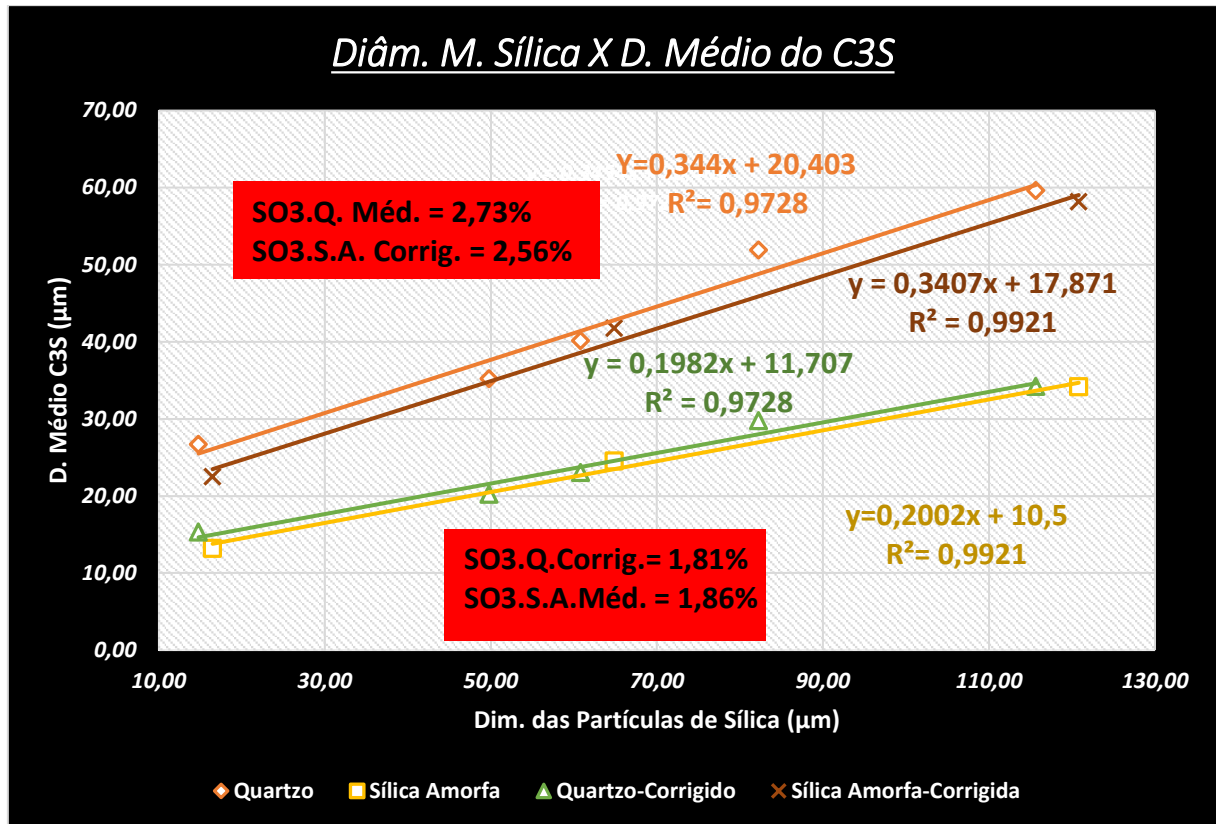
<i>Efeito da Variação do Enxofre - Amostras c/ Sílica < 38 μm</i>				
	<i>Quartzo < 38 μm</i>		<i>Síl. Amorfa < 38 μm</i>	
	<i>% SO₃ ></i>	<i>% SO₃ <</i>	<i>% SO₃ ></i>	<i>% SO₃ <</i>
<i>PF</i>	0,60	0,60	0,60	0,60
<i>SiO₂</i>	19,63	20,14	19,60	20,05
<i>Al₂O₃</i>	4,62	4,35	4,46	4,42
<i>Fe₂O₃</i>	2,63	2,83	2,78	2,71
<i>CaO</i>	63,01	63,61	62,78	62,95
<i>MgO</i>	5,08	4,75	4,55	4,91
<i>SO₃</i>	2,65	1,81	2,56	1,88
<i>K₂O</i>	1,54	1,60	1,70	1,68
<i>Na₂O</i>	0,21	0,16	0,12	0,14
<i>FSC</i>	101,44	100,39	101,34	99,74
<i>MS</i>	2,71	2,81	2,71	2,81
<i>MA</i>	1,76	1,54	1,60	1,63
<i>S/Alc</i>	1,58	1,06	1,44	1,06
<i>D.M. C₃S(μm)</i>	26,70	15,32	22,50	13,22
<i>Relação M₁/M₃</i>	9,54	2,52	2,78	4,69

Pode-se, portanto, concluir que há uma influência predominante do enxofre sobre o grau de cristalinidade da sílica no tocante ao crescimento do C3S. Por sua vez, a influência do teor de enxofre e cristalinidade da sílica na relação dos polimorfos M1/M3, ainda carece de avaliações mais sistemáticas, uma vez que não há correlações possíveis de serem feitas nesses dois sistemas.

Essa questão reforça consideravelmente a necessidade da avaliação da influência ou não da cristalinidade da sílica sobre o crescimento dos cristais de C3S. Nota-se que a correção do enxofre na amostra com sílica amorfa, % SO₃ >, levou a dimensão média dos cristais de 13,22 µm para 22,50 µm, portanto, um aumento de 70,20%. Por outro lado, a redução do enxofre na amostra com quartzo, % SO₃ <, impôs uma diferença na dimensão média dos cristais de C3S de 74,28%. Assumindo o comportamento como linear, nota-se a seguinte situação, buscando equalizar o efeito do enxofre, ao corrigir a média dos diâmetros do C3S do conjunto de amostra com sílica amorfa, com a correção de 70,20%, e comparando com a média dos diâmetros médios do C3S do conjunto de amostras com quartzo, chegamos a um efeito da cristalinidade de 3,27%. Por outro lado, tomando como base a ação do enxofre na amostra com % SO₃ <, e corrigindo a dimensão média dos cristais de C3S do conjunto de amostras com quartzo, com o valor de 74,28%, e em seguida comparando ao conjunto de amostras com sílica amorfa, o efeito da cristalinidade cai para 0,85%. Tomando o efeito do enxofre em ambas as amostras como o valor médio, 72,24%, e corrigindo os dois conjuntos de amostras, chegamos a um efeito da cristalinidade da ordem de 2%. Essa questão, assim como observado nos resultados da Cal Livre, leva ao questionamento do efeito da cristalinidade sobre o crescimento dos cristais de C3S, o que reforçaria a conclusão de que apenas o diâmetro das partículas de sílica teria relevância sobre o diâmetro do C3S.

O gráfico abaixo, figura 40, ilustra essa avaliação.

Figura 40 Correção Linear dos resultados de cada conjunto amostral, de acordo com a variação do SO₃ dos dois últimos ensaios.



Com a correção linear, baseada nos dois novos ensaios, nota-se que o efeito da cristalinidade parece ter pouca influência sobre as Taxas de Crescimento e Nucleação dos cristais de C3S. Portanto, nesse caso, a relevância é apenas da dimensão das partículas de sílica.

Considerações sobre o Cinética de Formação dos cristais de Alita.

TIMASHEV, V.V (1986), assegura que, a baixas temperaturas (1000-1.200 °C), ocorre a formação de fase líquida de natureza ácida na forma de pequenas gotas próximas às partículas de quartzo, a qual contém, sobretudo, os íons S, F, Cl, Na, K, e O e, através dessa fase líquida, os íons Ca^{+2} são transferidos até a superfície do SiO₂, onde o C2S é sintetizado. Dessa forma, todo o fenômeno ocorre em torno da partícula de quartzo, e a causa fundamental está ligada aos Coeficientes de Difusão dos elementos envolvidos. A partir de 1.350 °C, outros elementos fundentes se juntam (S, F, Cl, Na, K + **Al, Mg, Fe, Ti, Mn, outros**) enriquecendo a Fase Líquida, formando misturas Eutéticas de acordo com a composição da mistura, e a 1.450 °C o % de F.L. atinge o máximo. Nos clínques industriais a quantidade dessa fase situa-se entre 23 a 30% da composição do clínquer, e é nessa etapa do processo onde ocorre a formação do C3S.

Os dados da tabela abaixo dão indícios da dependência da Cinética da Reação com relação ao Coeficiente de Difusão do Cálcio.

Tabela 13 Coeficientes de Difusão de Elementos de Formação do Clínquer.

TABELA DE COEFICIENTES DE DIFUSÃO (1.450 - 1.525 °C)	
<i>Elemento</i>	<i>Coeficiente de Difusão (m²/s)</i>
<i>Cálcio</i>	<i>(5,31 - 8,55) x 10⁻⁹</i>
<i>Ferro</i>	<i>(5,70 - 14,2) x 10⁻¹⁰</i>
<i>Alumínio</i>	<i>(2,35 - 7,10) x 10⁻¹⁰</i>
<i>Silício</i>	<i>(4,73 - 15,8) x 10⁻¹¹</i>

Fonte: TIMASHEV, V.V. (1985).

Nota-se que o Coeficiente de Difusão do Cálcio é significativamente superior ao do Silício. As reações de formação do C2S, e, em seguida, do C3S, são reações em estado sólido, porém, totalmente dependentes da fase líquida. Ainda sobre a fase líquida, TIMASHEV (1985), mostra que a fase líquida formada a partir de 1.350 °C é composta, predominantemente, por aluminoferrossilicatos fundidos altamente alcalinos, que possuem baixo grau de polimerização, confirmado pelos baixos valores de viscosidade (0,1 a 0,3 Pa. s) e pela dependência exponencial à temperatura. As características reológicas dessa fase afetam diretamente a cinética de formação dos cristais de C2S e C3S, e essa reologia é alterada pela presença maior ou menor de micro e macro elementos que, principalmente pelo seu caráter ácido ou básico, alteram a condutividade elétrica, a viscosidade e a tensão superficial, o que afeta as taxas de dissolução do C2S e dos íons Ca⁺², interferindo no processo de formação dos C3S pela variação das taxas de crescimento e nucleação.

O mesmo autor, mostra que a cinética da expansão da zona de C3S é governada pela equação abaixo:

$X = k \times t$ (11), onde **X** é o diâmetro do cristal de C3S, **t** é o tempo de reação e **k** é uma constante (cm²/s). A constante **k** aumenta com a elevação da quantidade de fase líquida, com a redução da viscosidade e com o aumento da temperatura.

Nas zonas de fase líquida onde predomina o caráter ácido, a formação do C3S é controlada pela taxa de dissolução dos íons cálcio e pela taxa de dissolução do C2S. Os cristais de C3S crescem em direção aos cristais de C2S.

Nas zonas de fase líquida onde há predomínio do caráter alcalino, especialmente na presença de Sódio e Potássio, a taxa de dissolução de C2S é elevada consideravelmente, e o processo é limitado pela difusão dos íons cálcio, e os cristais de C3S são formados em vários pontos da fase líquida.

Conforme considerações acima, todo o fenômeno da formação dos cristais silicáticos, ocorre em torno das partículas de sílica. A alta mobilidade dos íons cálcio em relação a sílica, de acordo com seus respectivos Coeficientes de Difusão, determina essa condição durante a formação do C2S, que é favorecida pela fase líquida ácida (1000 a 1.200 °C). Na segunda etapa, o coeficiente de dissolução do C2S e Ca^{+2} comanda as taxas de crescimento e nucleação, de acordo com acidez da fase líquida. Portanto, esse aspecto parece esclarecer o fato da pouca influência da Cristalinidade da Sílica sobre a Cal Livre, e também sobre a Dimensão dos Cristais de C3S, onde apenas a dimensão da partícula de sílica se mostrou relevante, de acordo com os resultados para as amostras com Quartzo e Sílica Amorfa. Dessa forma, podemos inferir que mesmo considerando a diferença nas energias de ligação da sílica na forma cristalina e amorfa, a concentração pontual desse elemento é mais significativa, ou seja, a dimensão da partícula é mais significativa do que sua cristalinidade, pois, ainda que haja um consumo maior de energia para o rompimento das ligações no caso do quartzo, o fenômeno é apenas dependente da mobilidade dos íons Ca^{+2} para a formação do C2S nas temperaturas mais baixas (1.000 a 1.200 °C), e dependente da taxa de dissolução do C2S e íons Ca^{+2} nas temperaturas mais elevadas (acima de 1.350 °C) para a formação do C3S.

Dessa forma, também pode-se compreender o efeito do SO_3 no crescimento dos cristais de alita observado nesse trabalho, pois como um elemento acidificante, a elevação do seu teor reduz a taxa de dissolução do C2S na fase líquida, conduzindo o crescimento do C3S na direção dos cristais de C2S, conforme mostrado por TIMASHEV, favorecendo, portanto, o processo de crescimento em detrimento do processo de nucleação. O oposto poderíamos afirmar para as altas taxas de MgO, que, como elemento alcalinizante, elevaria as taxas de dissolução do C2S na fase líquida, favorecendo a nucleação, ou seja, uma maior velocidade de migração dos cristais de C2S a partir do seu ponto de formação, a partícula de sílica, seja ela cristalina ou amorfa, levando assim à formação de um grande número de pequenos cristais de C3S.

4.5 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS DE SÍLICA SOBRE A RELAÇÃO DOS POLIMORFOS M1/M3.

Dados do Refinamento Rietveld c/Software TOPAS, e outros correspondentes aos cristais de C3S estão listados nas tabelas 14 e 15. Ver Difrátogramas nos Anexos.

Tabela 14 Dados do Refinamento Rietveld.

Refinamento Rietveld										
Fase/Polimorfo	C3S/M1	C3S/M3	C2Sβ			C3A cúbico		Ferrita		Periclásio
ICSD	Willian/2018-UFPB	94742	81096			1841		9197		9863
Amostras	AM 1	AM 1- <SO3	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AM 6	AM 6 - >SO3	AM 7	AM 8
RWP	7,760	7,830	8,080	7,850	9,170	9,290	7,280	7,250	7,820	8,860
GOF	2,080	2,010	2,130	2,120	2,440	2,520	2,000	2,030	2,170	2,410

Obs.: os baixos índices RWP e GOF obtidos reforçam a boa qualidade do Refinamento Rietveld.

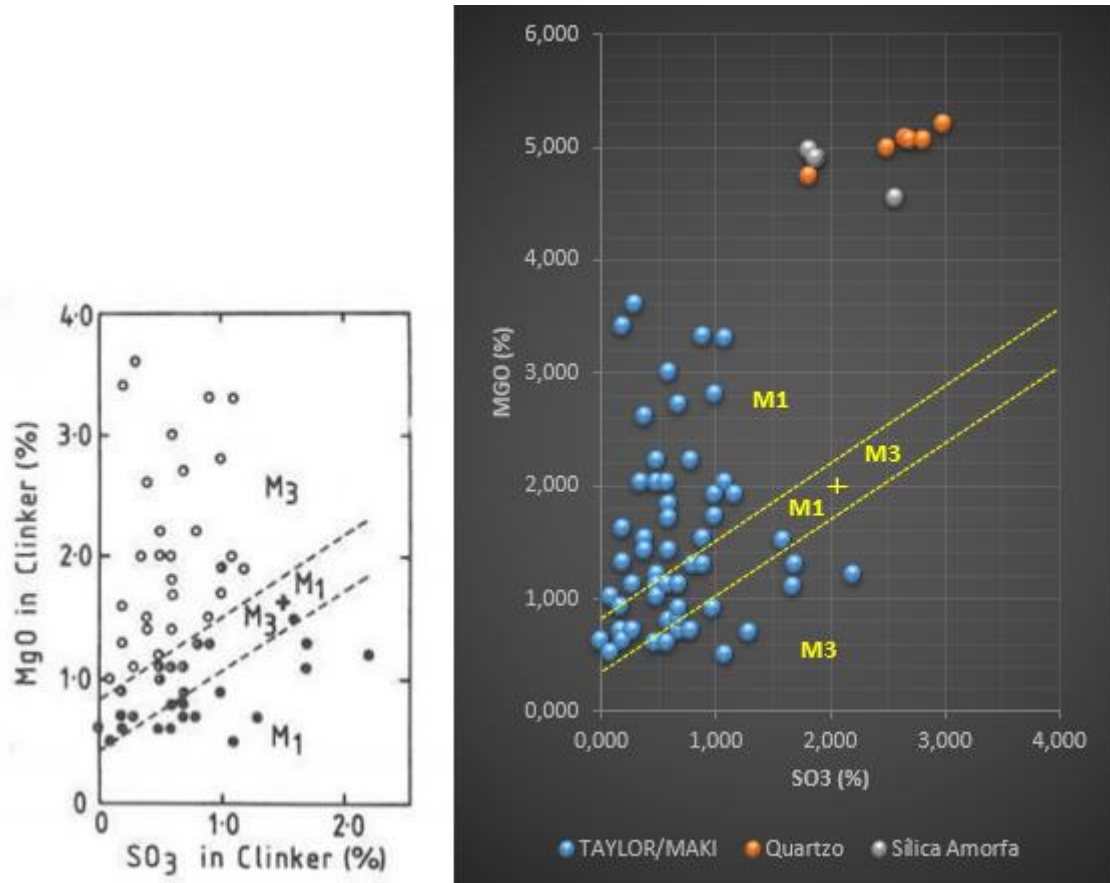
Tabela 15 Diâmetro médio dos cristais de C3S e seu Polimorfismo.

DIÂMETRO E POLIMORFISMO DO C3S								
	D.Médio C3S (μm)	% SO ₃	% MgO	C3S TOTAL DRX (%)	C3S - M1 (%)	C3S - M3 (%)	M1/M3	C3S - BOGUE (%)
QUARTZO (μm)								
Q < 38	26,70	2,65	5,08	77,24	69,91	7,33	9,54	53,67
38 ≤ Q < 45	35,23	2,69	5,07	58,77	52,36	6,41	8,17	41,44
45 ≤ Q < 63	40,15	2,99	5,20	54,12	43,08	11,04	3,90	36,93
63 ≤ Q < 90	51,92	2,81	5,07	44,88	34,74	10,14	3,43	26,53
90 ≤ Q < 125	59,65	2,50	5,00	37,11	27,43	9,77	2,81	22,73
SÍLICA AMORFA (μm)								
S.A. < 38	13,22	1,88	4,91	73,47	60,55	12,92	4,69	52,71
45 ≤ S.A < 63	24,56	1,82	4,97	55,01	43,77	11,24	3,89	39,12
90 ≤ S.A < 125	34,19	1,87	4,90	36,95	30,25	6,70	4,51	22,66

Conforme demonstrado na Seção – 4.4, a dimensão das partículas de sílica, na forma de quartzo ou sílica amorfa, afeta de forma significativa a dimensão dos cristais de C3S. Para o conjunto de amostras com Quartzo, os dados da tabela 14 mostram também uma correlação entre o diâmetro do C3S e o Polimorfismo desse cristal.

Vale ressaltar que, TAYLOR & MAKI. I (1986), falam da influência do % de MgO e SO₃ sobre o polimorfismo da Alita, baseado nos dados do gráfico abaixo.

Figura 41 Relação entre MgO, SO₃ e o Polimorfismo da Alita. (TAYLOR/MAKI.I).



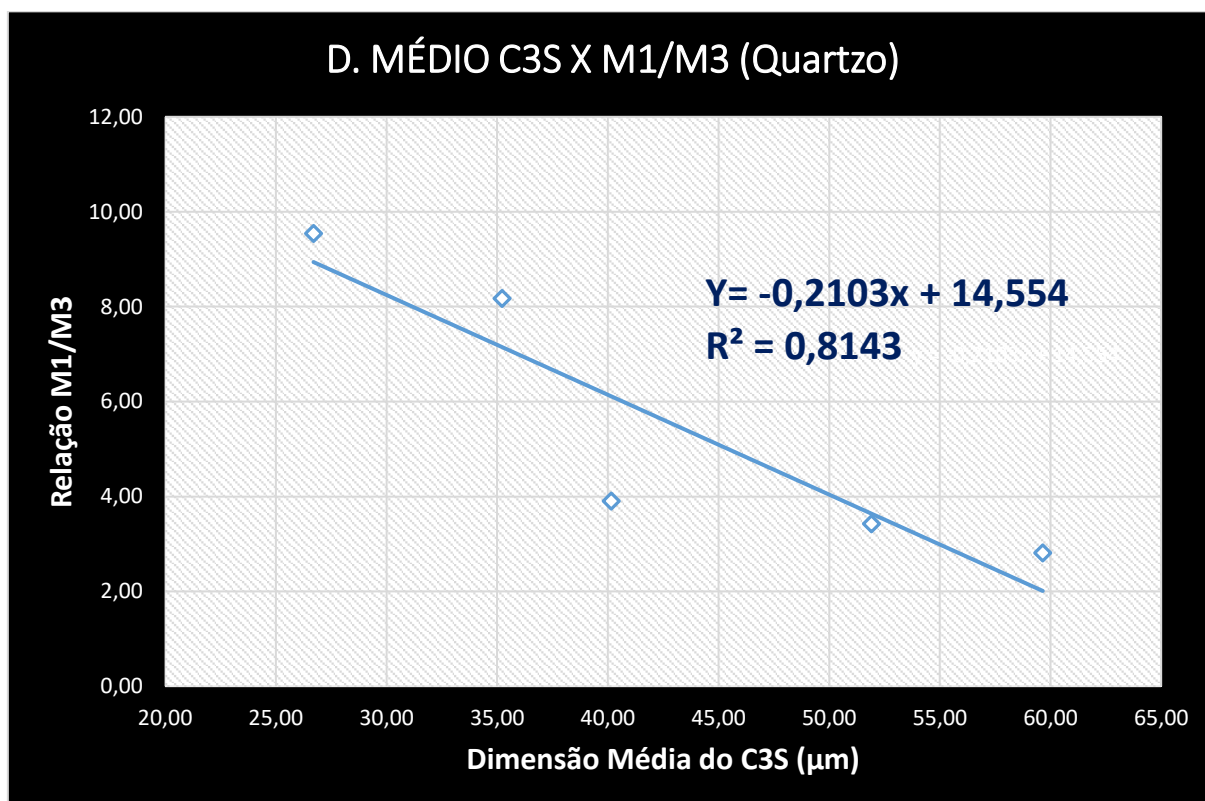
Nota-se que a relação SO₃ X MgO das amostras pesquisadas, tanto de Quartzo como de Sílica Amorfa, estão posicionadas em uma faixa fora do estudo conduzido por TAYLOR e MAKI. I.

Obs.: A julgar pelo posicionamento das amostras dessa pesquisa no gráfico acima, o polimorfismo esperado diverge bastante daquele encontrado nos ensaios. Porém, não temos informações seguras sobre as condições dos ensaios, assim como, da metodologia empregada por esses pesquisadores para a determinação desse polimorfismo. De toda forma, os avanços da técnica de DRX, e o desenvolvimento de novos modelos para os polimorfos podem trazer novas e valiosas informações a esse respeito.

4.5.1 AMOSTRAS COM QUARTZO

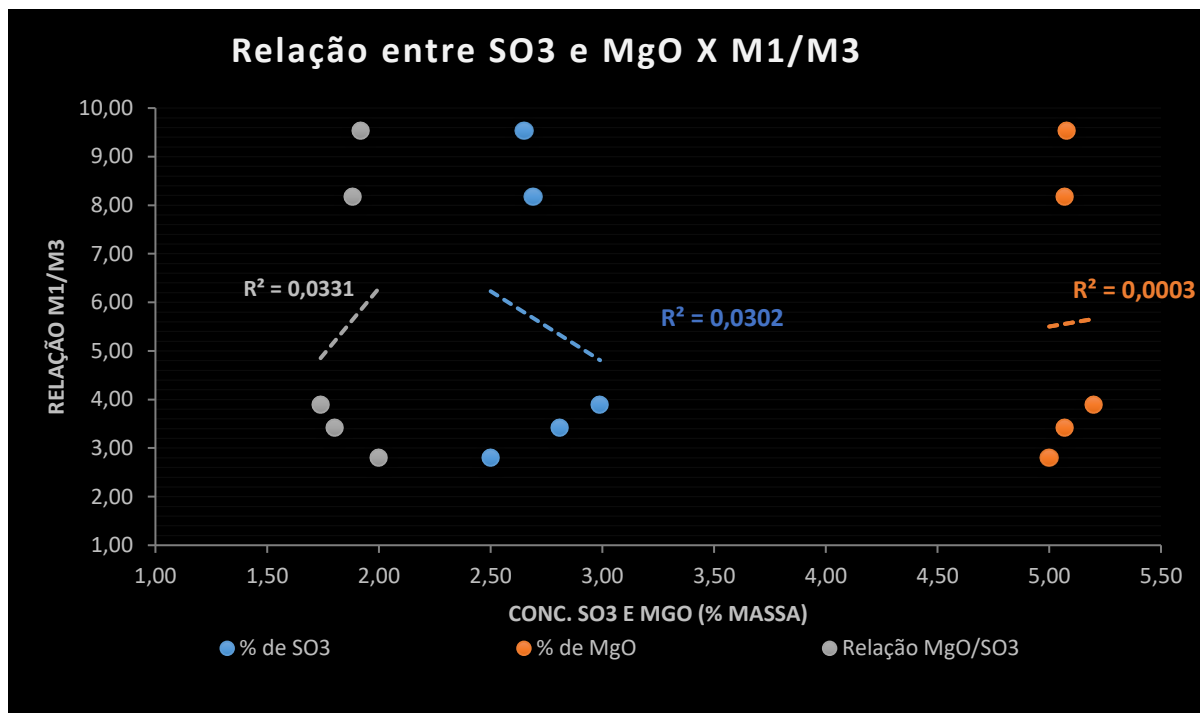
Diante da abordagem acima, torna-se necessária uma avaliação das relações, sobretudo, obedecendo os teores de SO₃, uma vez que, a variação do % de MgO foi muito baixa nos dois conjuntos amostrais, variando apenas absorção de SO₃, conforme mostrado na tabela 14.

Figura 42 Influência do diâmetro do C3S (c/quartzo) sobre a relação polimórfica M1/M3. % SO₃ Médio = 2,73 => (2,50 a 2,99%).



Observa-se uma forte correlação entre o diâmetro do C3S e a relação polimórfica M1/M3 para as amostras de clínquer oriundas da sílica cristalina (quartzo). À medida que crescem as partículas de quartzo, crescem também os cristais de C3S, porém, a relação M1/M3 decresce. Contudo, torna-se necessária a avaliação da influência do SO₃ e MgO, nesse conjunto de amostras no sentido de isolar a influência da dimensão do C3S.

Figura 43 Influência do SO₃ e MgO sobre a relação M1/M3 no conjunto de amostras com quartzo. % SO₃ Médio = 2,73 => (2,50 a 2,99%).

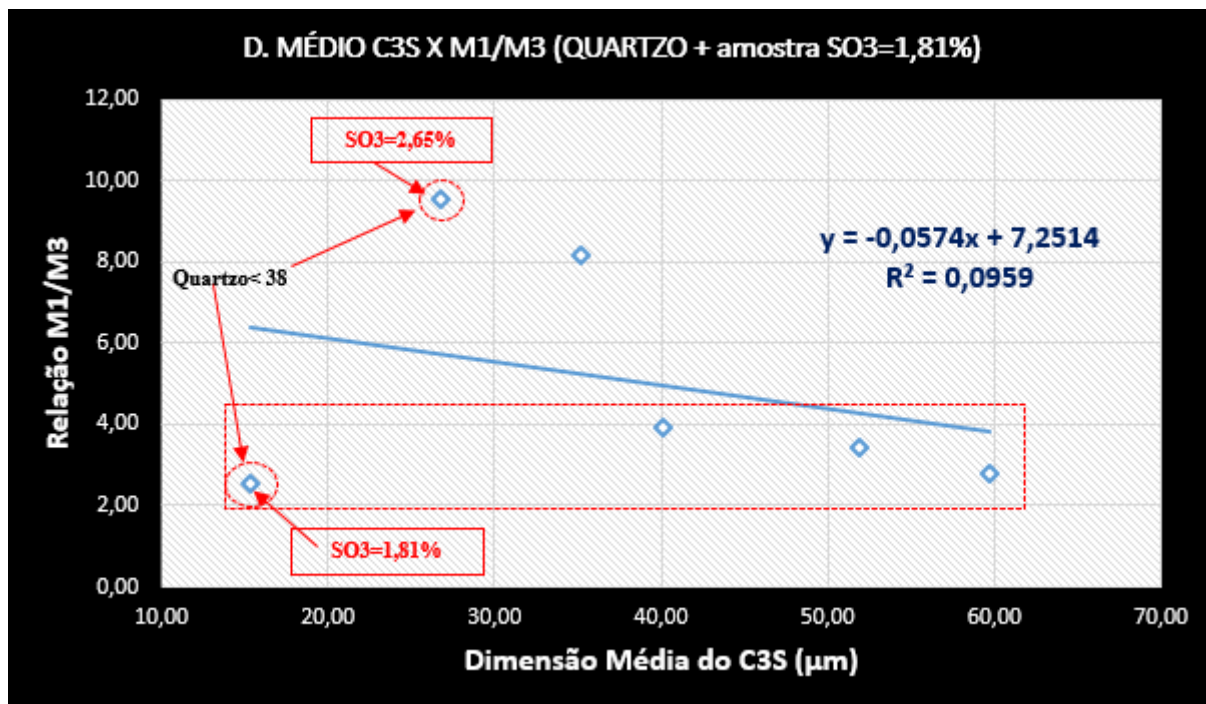


Nota-se no gráfico, com base no índice R^2 , a correlação pouco significativa da variação dos % de SO₃, MgO e também da relação MgO/SO₃, sobre a relação dos polimorfos M1/M3. O fato está ligado à baixa variação dos % de SO₃ e MgO entre as amostras com quartzo, condição essa imposta para permitir a investigação do efeito da granulometria do quartzo sobre os cristais de C3S. Portanto, parece evidente a forte influência da dimensão do quartzo, e consequentemente da dimensão dos cristais de C3S sobre o polimorfismo da Alita, considerando o intervalo de variação tanto de SO₃ quanto de MgO.

WILLIAN; V. (2018), mostra que a reatividade do polimorfo M1 do C3S, é consideravelmente maior que a do polimorfo M3. Essa característica é de fundamental importância para a indústria, pois maior reatividade potencializa maiores adições aos cimentos produzidos, o que é um dos pilares da Sustentabilidade no setor.

Porém, na tabela 12, temos a inclusão da amostra (quartzo) com baixo teor de SO₃ (1,81%). No gráfico abaixo há a inclusão dessa amostra ao conjunto de amostras da figura 42.

Figura 44 Relação do diâmetro do quartzo com o polimorfismo do C3S. (SO₃ médio= 2,73% + amostra SO₃= 1,81%).



Nota-se que, com a introdução da amostra com quartzo < 38 μm e % de SO₃ de 1,81; houve uma queda substancial na dimensão média dos cristais de C3S, conforme demonstrado na seção anterior; porém, verifica-se também uma perda total da correlação entre a dimensão média dos cristais de C3S e a relação M1/M3. Esse aspecto deixa clara a forte influência do SO₃ sobre a estabilização da forma morfológica M1 do C3S, pois a queda do % de SO₃, de 2,65 para 1,81, provocou a queda na relação M1/M3 de 9,54 para 2,52 no clínquer com quartzo < 38 μm. Do ponto de vista qualitativo, esta constatação está plenamente em acordo com o que foi postulado por MAKI, I. (1986), pois nota-se a influência significativa do SO₃ sobre o crescimento do C3S, como também sobre a estabilização do polimorfo M1.

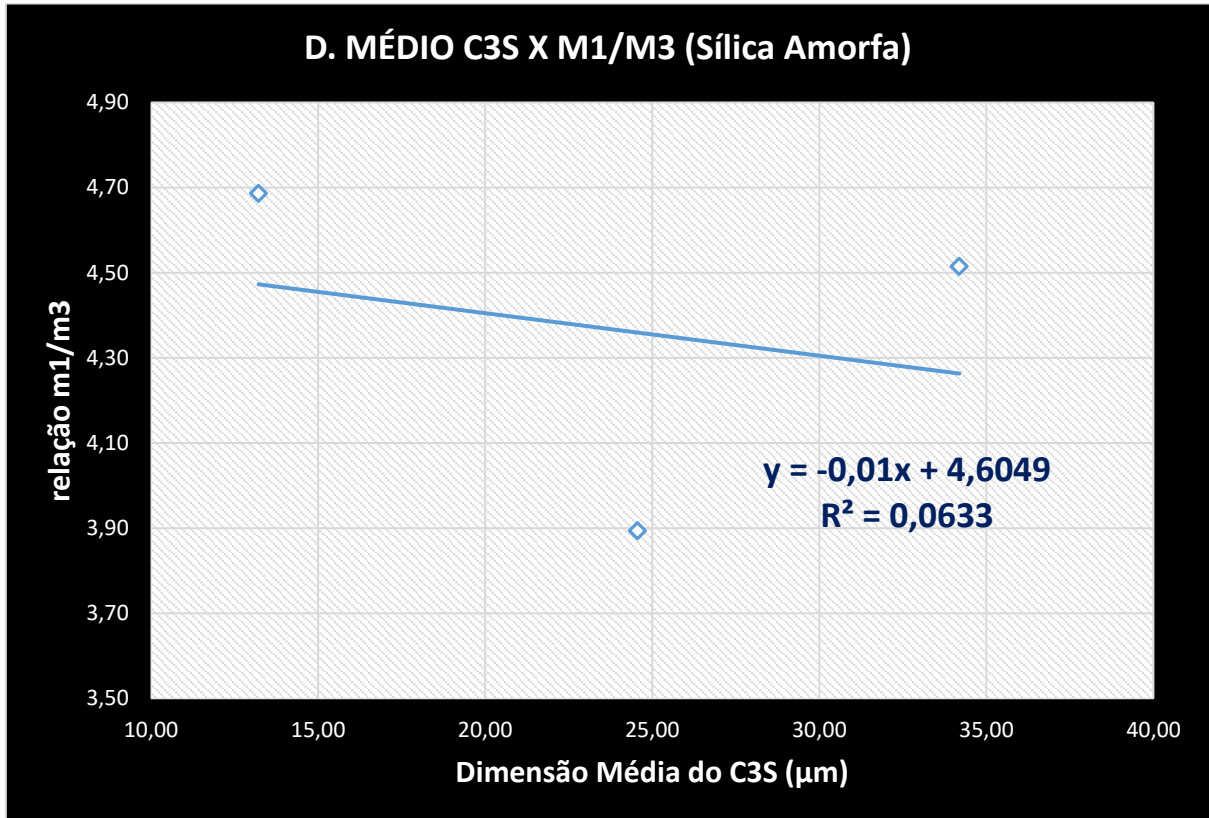
Porém, podemos também assegurar, com base nos dados acima, que, para o caso da sílica cristalina, para maximizar a estabilização da forma M1 do C3S, não é suficiente elevar os teores de SO₃, pois clínques que apresentam cristais de C3S com média a partir de 40 μm, independentemente de seu teor de SO₃, apresentam relação M1/M3 abaixo de 4,0.

Portanto, no sentido de maximizar a relação M1/M3, o % de SO₃ no clínquer deve ser elevado para % próximos a 2,50%, e o diâmetro médio das partículas de quartzo da farinha devem estar abaixo de 50 μm, o que equivaleria à dimensão média de C3S inferiores a 40 μm.

4.5.2 AMOSTRAS COM SÍLICA AMORFA

Para o caso das amostras de clínqueres oriundos da sílica amorfa, não se observa o mesmo comportamento.

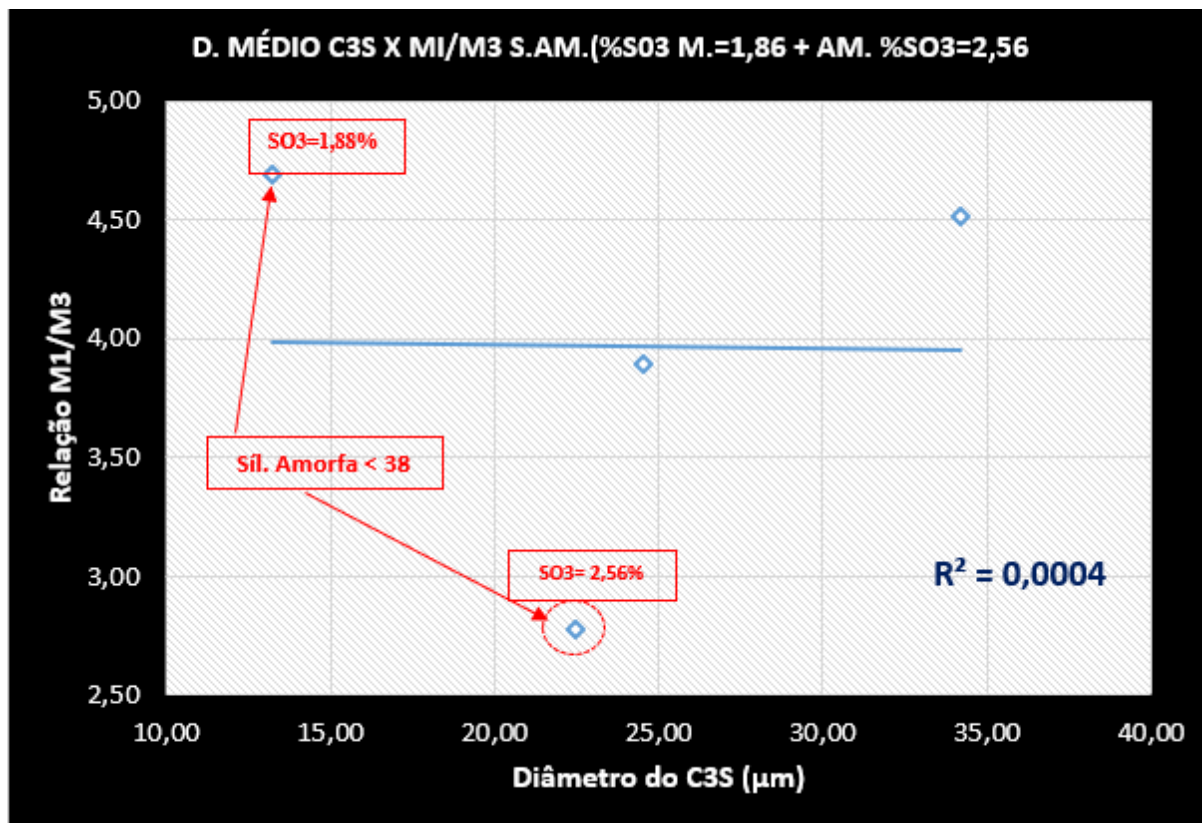
Figura 45 Influência do diâmetro do C3S (c/ síl. Amorfa) sobre a relação polimórfica M1/M3.



Embora a dimensão das partículas de sílica amorfa também afete o crescimento dos cristais de C3S com a mesma magnitude das partículas de quartzo, conforme demonstrado na seção 4.4.1, os dados não indicam uma correlação da sílica amorfa com o polimorfismo da Alita, conforme indica o baixíssimo coeficiente de correlação R^2 .

Assim como no caso do quartzo, o gráfico abaixo mostra a introdução da amostra com sílica amorfa $< 38 \mu\text{m}$ e % de SO_3 maior, 2,56.

Figura 46 Relação do diâmetro da sílica amorfa com o polimorfismo do C3S. (SO3 médio= 1,86% + amostra SO3= 2,56%).



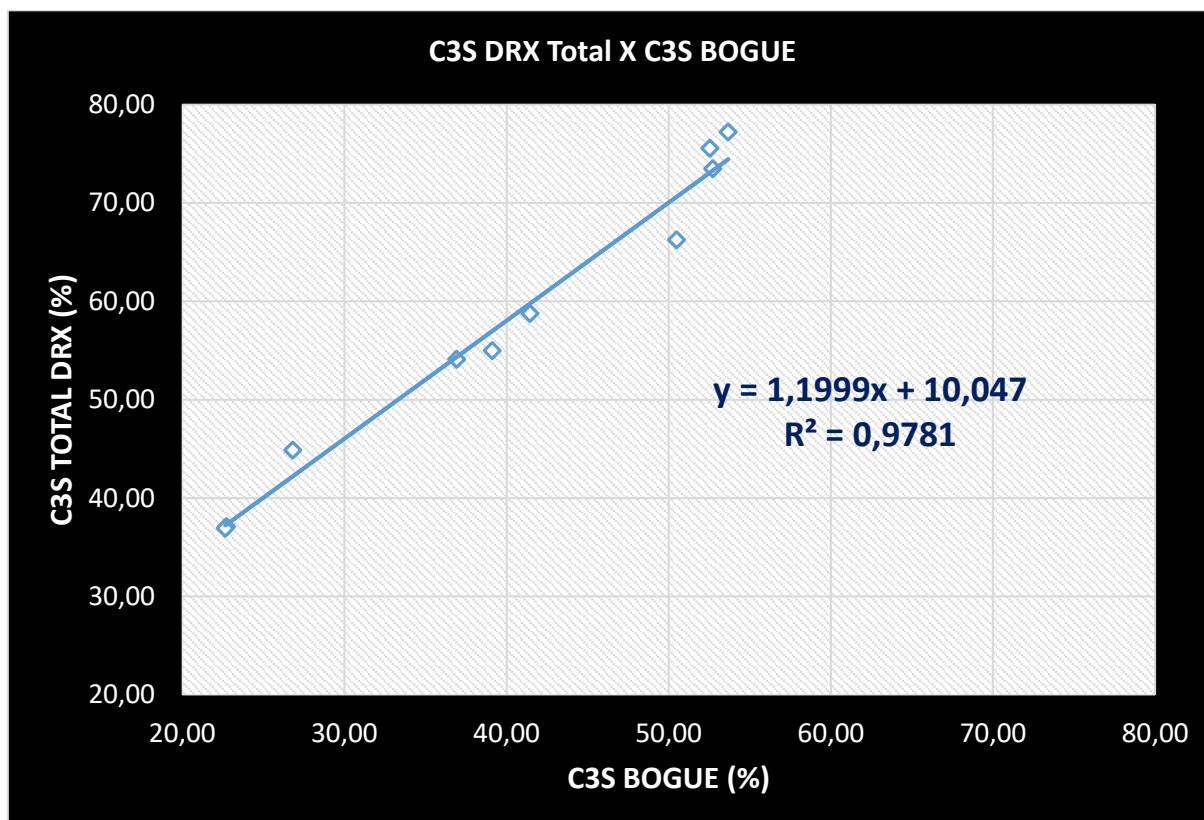
Com a introdução da amostra com alto teor de SO₃, 2,56%, o conjunto de amostras continua apontando para a insignificância da correlação entre C3S oriundos da sílica amorfa e a relação M1/M3. Outro aspecto observado é que a elevação do teor de SO₃ de 1,88% para 2,56%, reduziu a relação M1/M3 de 4,69 para 2,78, o que contraria o que foi postulado por MAKI, I (1986) no tocante ao efeito do SO₃ sobre a estabilização da forma M1. Contudo, em relação ao efeito do SO₃ sobre a taxa de crescimento do C3S, mais uma vez a postulação foi confirmada.

Portanto, o estudo aponta para a influência do grau de cristalinidade da sílica sobre o polimorfismo da Alita, ao contrário do que foi observado quanto a Cal Livre e o crescimento dos cristais de C3S.

4.5.3 CORRELAÇÃO ENTRE % DE C3S POR BOGUE E DRX

Os dados amostrais permitem também uma avaliação entre o % de C3S calculado pelas fórmulas de BOGUE, e % de C3S determinado pelo Refinamento Rietveld. O gráfico abaixo mostra essa correlação.

Figura 47 Correlação entre o C3S via DRX e C3S de BOGUE.



Embora haja uma discrepância entre os valores absolutos do C3S determinado pelo refinamento Rietveld dos espectros da DRX e o C3S estimado pelas fórmulas de BOGUE, existe uma forte correlação entre eles, o que justifica plenamente o uso dessas fórmulas no âmbito industrial. Tomando a média dos valores encontrados, os resultados do C3S via DRX são 45,18% superiores aos valores obtidos pelas fórmulas de BOGUE.

De acordo com TAYLOR, H.F.W. (1990), os cristais silicáticos absorvem em sua estrutura outros elementos, como Al, Fe, MgO, S, Álcalis, entre outros; em porcentagens que variam segundo a composição química e as condições operacionais. Esse fato não é previsto nas fórmulas de BOGUE, o que justificaria a discrepância.

4.6 DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES MICROSCÓPICAS

A tabela abaixo mostra o resumo dos dados relativos à medição dos cristais de C3S das 08 amostras correspondentes, com quartzo e sílica amorfa.

Tabela 16 Resumo das medições dos cristais de C3S.

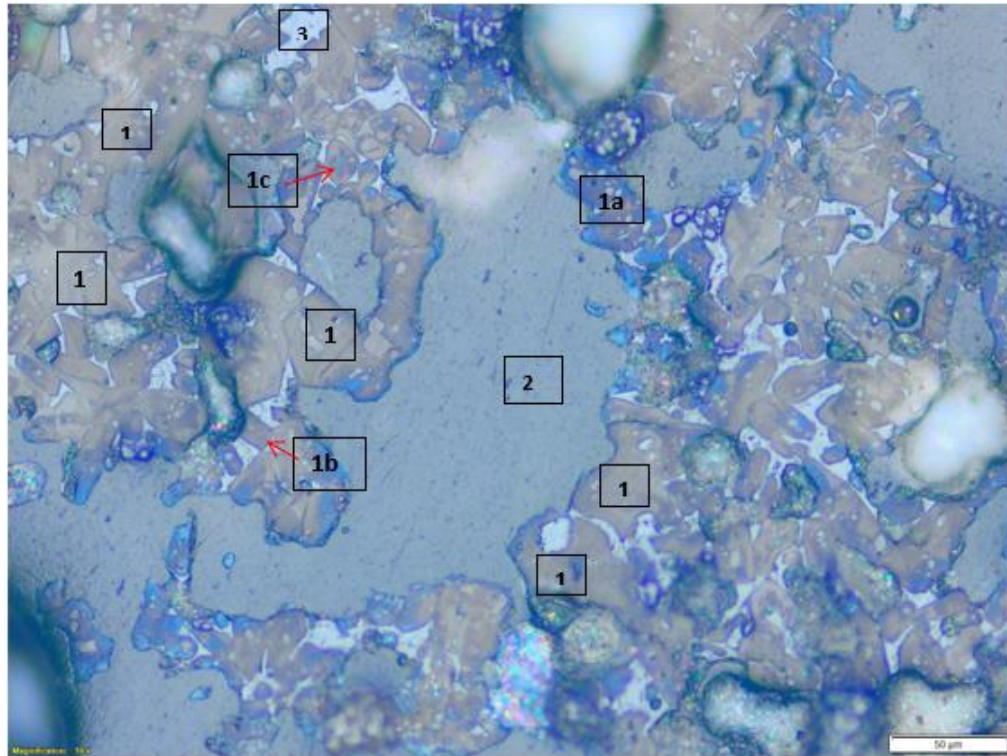
MEDIÇÃO DOS CRISTAIS DE C3S								
	QUARTZO				SÍLICA AMORFA			
	< 38	Q < 38 *	45 ≤ Q < 63	90 ≤ Q < 125	< 38	S.A. < 38*	45 ≤ Q < 63	90 ≤ Q < 125
Nº Medições	666	1.218	436	732	551	823	437	512
D. Mín.(µm)	2,85	1,47	2,36	3,88	2,24	1,89	2,36	3,06
D. Máx.(µm)	102,15	70,64	172,09	239,54	48,95	123,57	94,41	109,53
D. Méd.(µm)	26,70	15,32	40,15	59,65	13,22	22,50	24,56	34,19

Obs. Q < 38* => SO3=1,81; S.A. < 38* => SO3=2,56.

Além da medição dos cristais de C3S, outras observações são de interesse para o objetivo da pesquisa. São apresentadas abaixo algumas fotos e comentários a respeito das 4 amostras de clínqueres obtidos a partir do quartzo, e suas 4 amostras correspondentes com sílica amorfa. As observações foram qualitativas e direcionadas ao foco principal da pesquisa, os cristais de C3S.

4.6.1 AMOSTRAS 1 E 6 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA < 38 μm

Figura 48 Amostra 1 – Quartzo < 38 μm . Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4Cl (4 s.) – aumento de 200X.



1 Cristais de C3S essencialmente xenomórficos, exibindo um grande número de inclusões de predominância absoluta de C2S. Dimensão média 26,70 μm . Ver detalhes das inclusões na foto seguinte.

1a Cristal xenomórfico de C3S apresentando zoneamento dos polimorfos M3 (azul) e M1 (marrom claro). M3 recobrindo M1.

1b Cristal de idiomórfico de C3S.

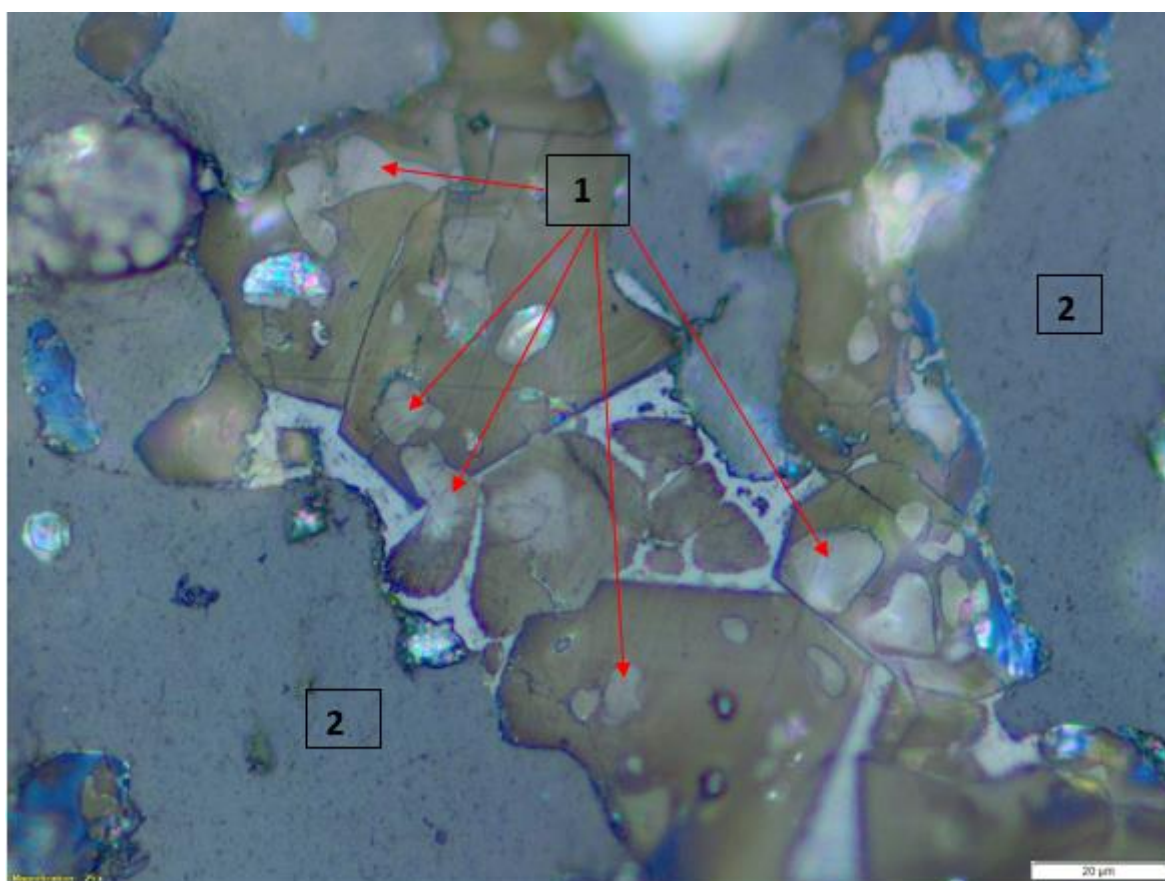
1c Cristal pseudo-idiomórfico apresentando zoneamento reverso. M1 recobrindo M3 (azul).

2 Porosidade preenchida com resina poliéster. Porosidade irregular, interligada e de grandes dimensões.

3 Fase intersticial, composta essencialmente de C3A e C4AF semi-cristalizada, caracterizando um resfriamento normal a rápido.

Observação: a caracterização M3 (azul) e M1(marrom claro) para os polimorfos do C3S, quando atacados com NH_4Cl , é uma convenção aceita na prática da microscopia de luz refletida aplicada a indústria, e aceita por grande número de pesquisadores, como MAKI, I. (1981). Porém, a veracidade desse fato pode vir a ser comprovada, combinando as técnicas da Microscopia Ótica, DRX, e MEV de Alta Temperatura.

Figura 49 Amostra 1 – Quartzo < 38 μm . Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4Cl (4s.) – aumento 500X.

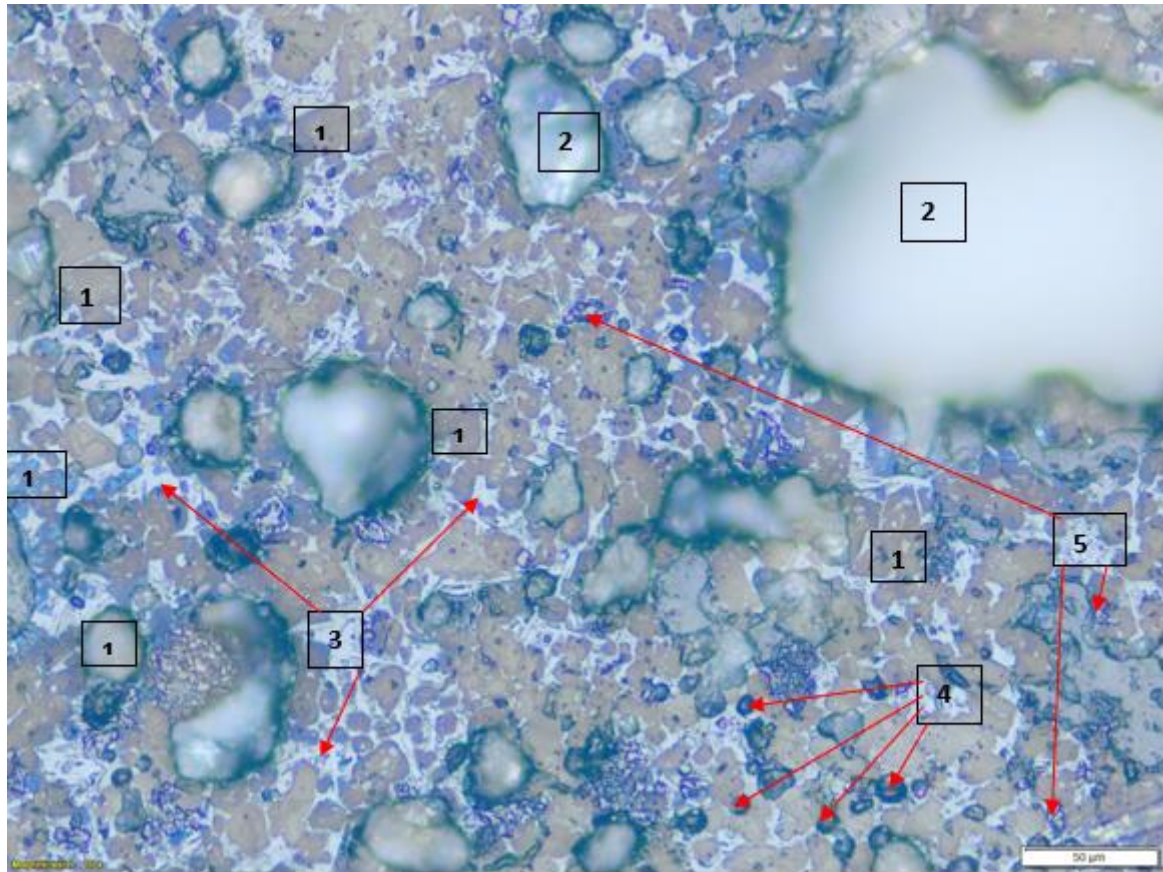


1 Cristais peseudo-idiomórficos de C3S apresentando acentuado número de inclusões de C2S. Caracterizando uma taxa de crescimento elevada.

Embora seja claro o predomínio dos cristais de C3S, o que é positivo, destaca-se nas seções a evidente má formação desses cristais, com a predominância de cristais xenomórficos, caracterizando uma alta taxa de crescimento, também evidenciada pelo grande número de inclusões, sobretudo, inclusões de C2S. Outro aspecto característico, é a má distribuição da fase líquida ($\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$), evidenciada pelo grande número de cristais de C3S aglomerados em sítios, criando condições para ocorrência de fusões de acordo com seus planos cristalinos.

No tocante a fase líquida, cabe ressaltar que as composições químicas das amostras foram padronizadas, portanto, suas quantidades são semelhantes. Ver tabela 10.

Figura 50 Amostra 06 – Sílica Amorfa < 38 μm . Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.) - Aumento 200X.



1 Cristais de C3S bem distribuídos, apresentando uma predominância de cristais idiomórficos a pseudo-idiomórfico. Nota-se a grande presença de micro cristais distribuídos por toda seção. Dimensão média de 13,22 μm .

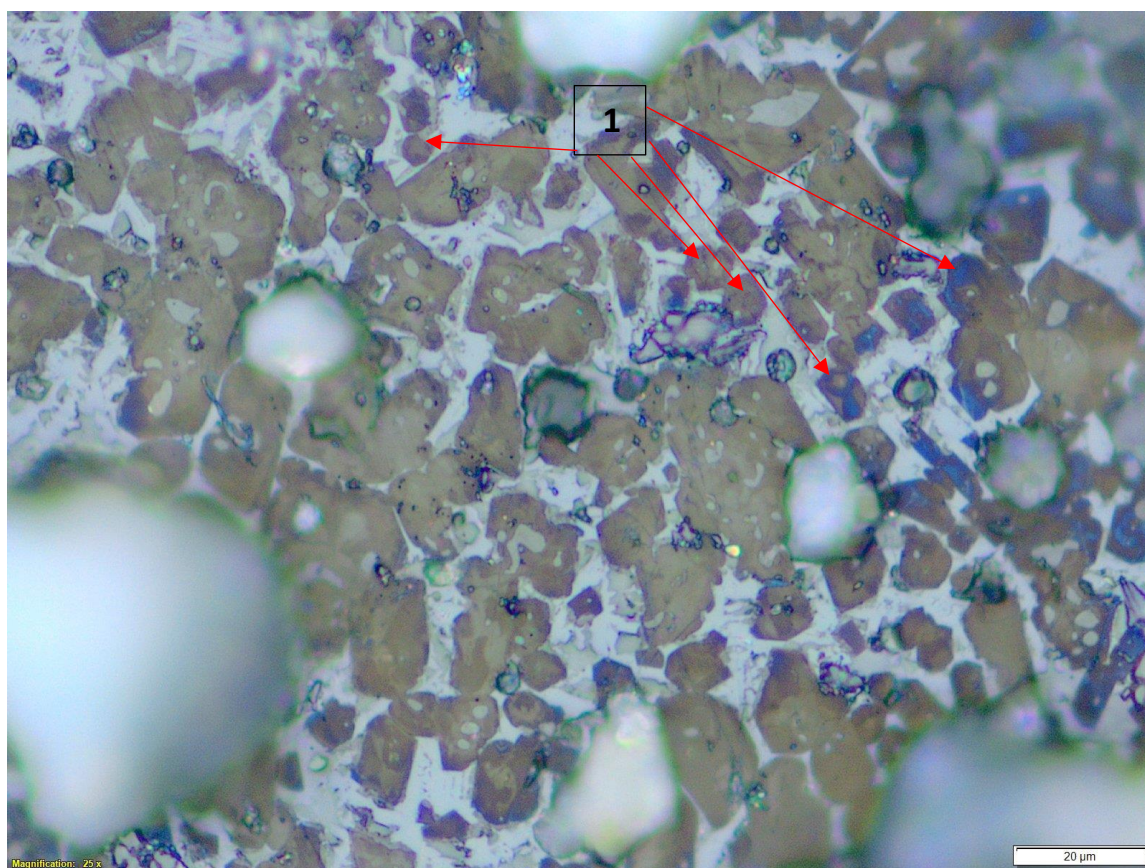
2 Porosidade bem distribuída, apresentando poros arredondados e de pequenas dimensões, sem interligação.

3 Fase Intersticial bem distribuída em todo o nódulo. Essa característica também justifica as características positivas da porosidade.

4 Cal Livre. Cristais de CaO .

5 Periclásio. Cristais de MgO .

Figura 51 Amostra 06 – Sílica Amorfa < 38 μm . Ataque HNO_3 (4 s.) + NH_4Cl (4 s.). Aumento 500X.



1 Cristais de C3S bem distribuídos e de pequenas dimensões. Nota-se claramente a presença de M3 (azul) recobrindo M1 (marrom claro), e também casos de zoneamento reverso, com M1 recobrindo M3.

As Amostras 1 (c/ quartzo) e 6 (c/ sílica amorfa), mesmo apresentando dimensões dos grãos de sílica de mesma ordem; % de Cal Livre também de mesma ordem; e % totais de C3S próximos, conforme revelado pela DRX; apresentam características morfológicas, do ponto de vista da microscopia ótica, bastante divergente. Enquanto os cristais de C3S oriundos do quartzo são predominantemente xenomórficos, os cristais derivados da sílica amorfa são idiomórficos a pseudo-idiomórficos. A fase líquida (fase intersticial) é nitidamente melhor distribuída na amostra com sílica amorfa, fato também reforçado pela melhor distribuição e dimensão dos poros, embora os % de fase líquida tenham sido padronizados nas suas composições químicas. Os cristais de C3S derivados da sílica amorfa, apresentam um número normal de inclusões, enquanto os da amostra 1, com quartzo, apresentam um grande número de inclusões, com grandes dimensões. Contudo, o fato mais marcante entre as amostras é a

dimensão média dos cristais de C3S, pois, enquanto a amostra 1 apresenta cristais com dimensão média de 26,70 μm , a amostra 6 tem dimensão média de 13,22 μm .

Portanto, do ponto de vista da microscopia, o clínquer 6 é um clínquer superior ao da amostra 1.

4.6.2 AMOSTRAS 3 E 7 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA $45 \leq \text{Sil.} < 63 \mu\text{m}$

Figura 52 Amostra 03 – $45 \leq Q < 63 \mu\text{m}$. Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.

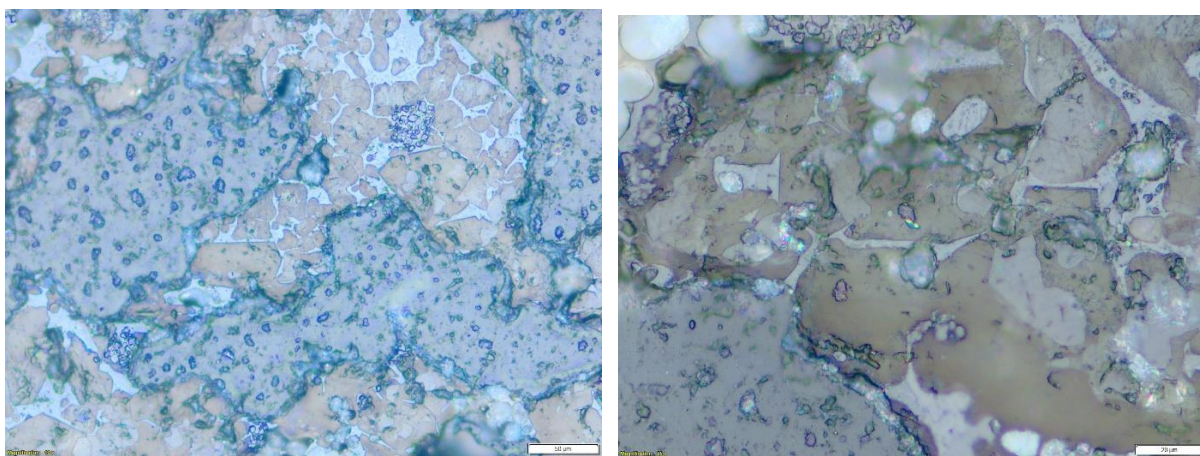
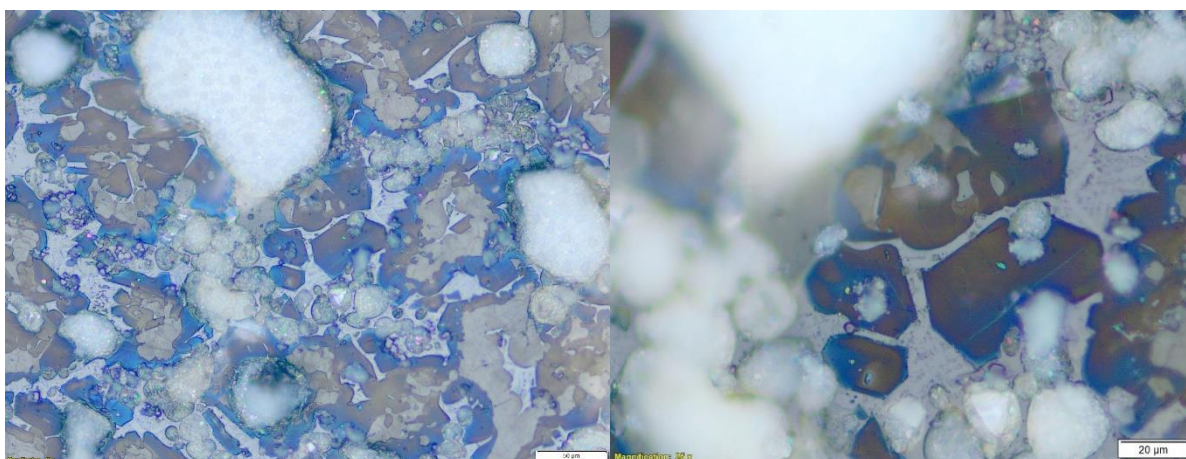


Figura 53 Amostra 07 – $45 \leq \text{Sil.Am.} < 63 \mu\text{m}$. Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.) – Aumento de 200x e 500x, respectivamente.



4.6.3 AMOSTRAS 5 E 8 – FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA $90 \leq \text{Síl.} < 125 \mu\text{m}$

Figura 54 Amostra 05 – $90 \leq Q < 125 \mu\text{m}$. Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.

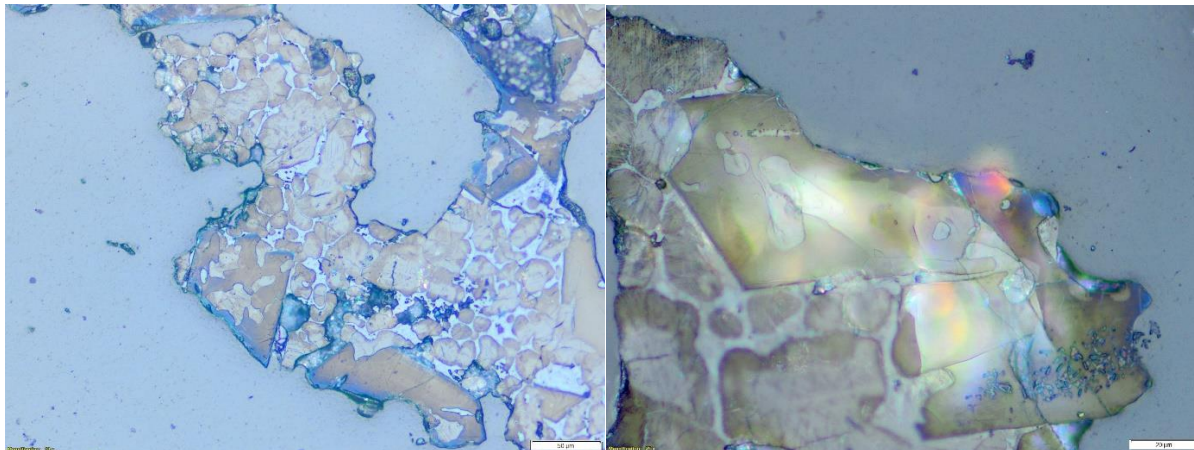
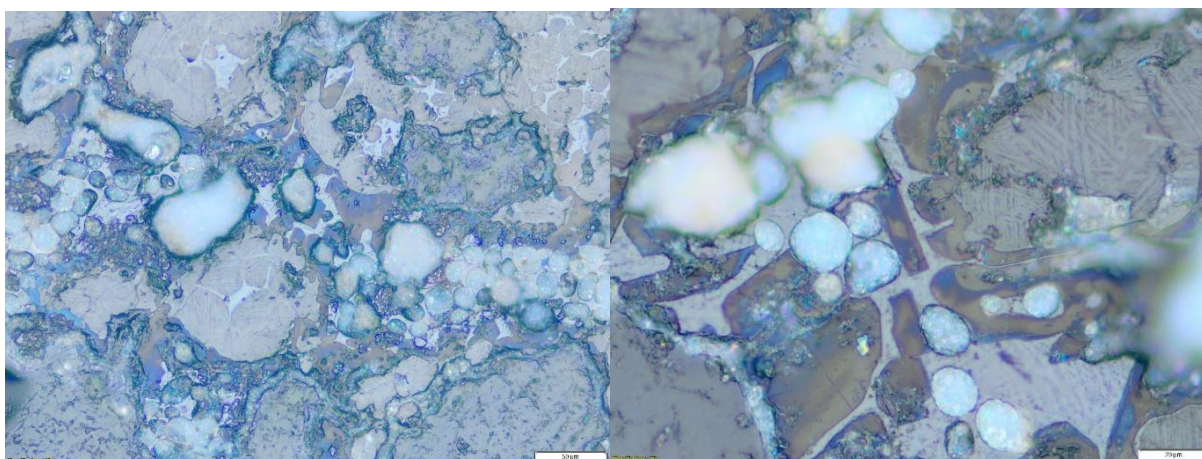


Figura 55 Amostra 08 – $90 \leq \text{Sil.am.} < 125 \mu\text{m}$ – Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.



Para o conjunto de amostras 3 e 7, assim como para o conjunto 5 e 8, as mesmas observações das amostras 1 e 6 são válidas. À medida que cresce a dimensão das partículas de sílica, também crescem a Cal Livre e a dimensão dos cristais de C3S, e as feições dos cristais são semelhantes.

4.6.4 AMOSTRAS COM SÍLICA $< 38 \mu\text{m}$ – Quartzo c/ % de $\text{SO}_3 = 1,81$; e Sílica Amorfa c/ % de $\text{SO}_3 = 2,56$.

Porém, as amostras complementares, com sílica $< 38 \mu\text{m}$, e com teor mais baixo de SO_3 para a amostra com quartzo (% $\text{SO}_3 = 1,81$) e teor mais elevado para a mostra com sílica amorfa (% $\text{SO}_3 = 2,56$), mostraram novas evidências, conforme mostram as fotos abaixo.

Figura 56 Amostra Quartzo < 38 μm - $\%\text{SO}_3 = 1,81$. Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.

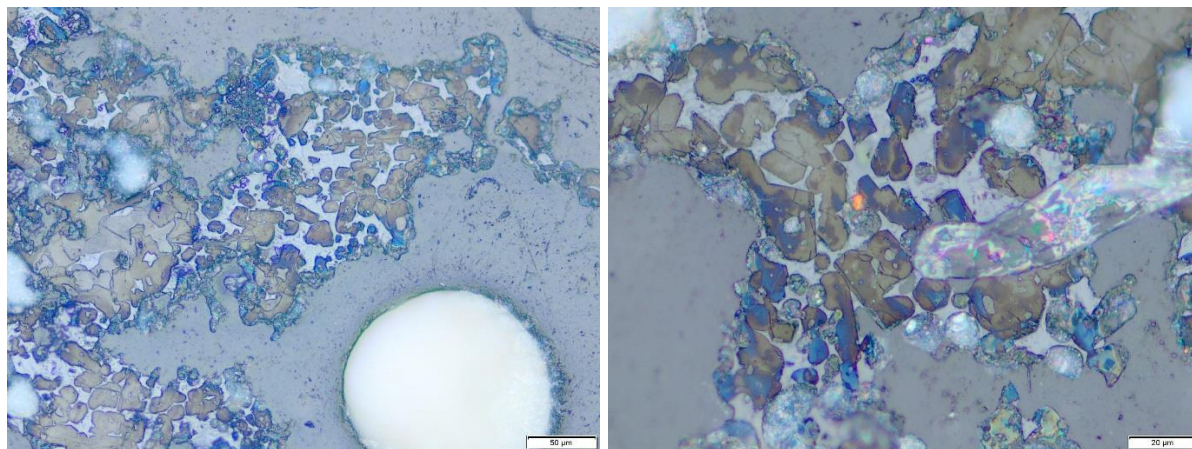
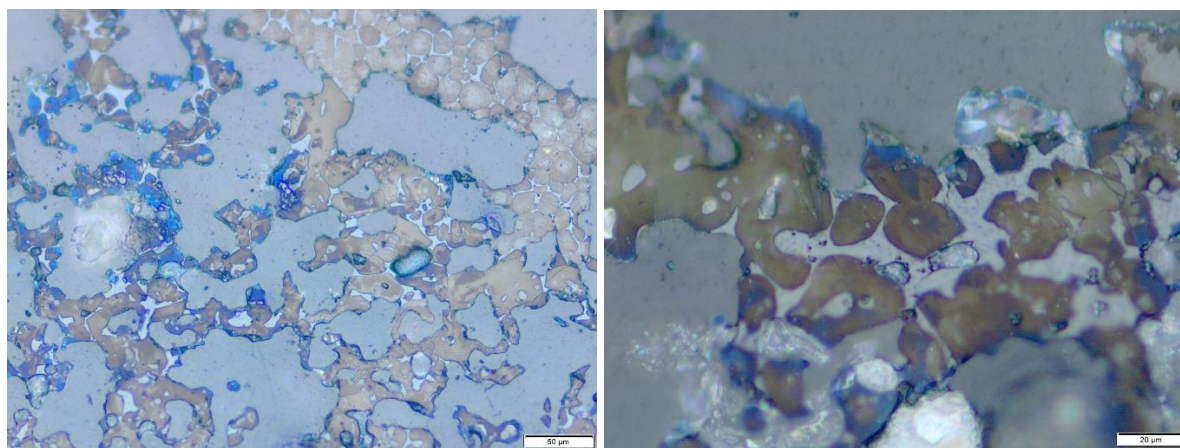


Figura 57 Amostra Síl. Amorfa < 38 μm - $\%\text{SO}_3 = 2,56$. Ataque: HNO_3 (4 s.) + NH_4 (4 s.). Aumento de 200x e 500x, respectivamente.



Nota-se que, com a redução do $\%\text{SO}_3$ para a amostra com Quartzo (1,81%), e a dopagem da amostra com Sílica Amorfa para a obtenção do clínquer com alto teor de SO_3 (2,56%), houve praticamente uma inversão das características microscópicas observadas no primeiro conjunto (mostras 1 e 6). No primeiro caso, na amostra com quartzo, com a redução do teor de SO_3 , observa-se também redução da dimensão média dos cristais de C3S de 26,70 μm para 15,32 μm . Por outro lado, com a elevação do teor de SO_3 (2,56%) da amostra com sílica amorfa, observa-se também um aumento na dimensão média dos cristais de C3S de 13,22 μm para 22,50 μm . Do ponto de vista do idiomorfismo do C3S, nota-se também uma inversão com a alteração do teor de SO_3 . Com teores mais baixos de SO_3 , a amostra com quartzo apresentou um maior número de cristais idiomórficos, de forma semelhante àquela apresentada pela amostra 6, com sílica amorfa. Por outro lado, a amostra com teor mais elevado de SO_3 (2,56%), passou a apresentar um grande número de cristais subdiomórficos e, sobretudo, cristais xenomórficos, de forma semelhante àqueles vistos na

amostra 1, onde se notam cristais de alita anormalmente desenvolvidos e com aspectos ameboides.

Portanto, o que de fato parece ser o fator mais significativo nessa questão é a maior ou menor presença de SO_3 . O enxofre exerce uma grande influência sobre a taxa de crescimento dos cristais de C3S, e, nessa questão, o fato da sílica apresentar-se como quartzo ou amorfa, demonstra ter pouca relevância, ou seja, importa apenas a dimensão da partícula de sílica, e não sua cristalinidade. Essa constatação está de acordo com efeito do SO_3 postulado por MAKI, I. (1986).

5 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados e avaliados reforçam a importância e o cuidado a ser dedicado na preparação da mistura crua, a “farinha”, no dia a dia da fabricação de cimento. É importante reformular o conceito industrial da granulometria da farinha para a avaliação da granulometria da sílica da farinha, pois é na superfície das partículas de sílica onde reside o fenômeno mais significativo da produção do clínquer, a formação dos cristais de C2S e C3S.

Ficou estabelecida, de forma clara, a influência direta da dimensão das partículas de sílica sobre a dimensão dos cristais de C3S e o % de Cal Livre, em acordo com diversos trabalhos anteriores, porém, e mais importante, ficou clara a pouca significância da cristalinidade da sílica sobre esses dois aspectos, evidenciada pelos resultados das farinhas padronizadas com Quartzo e Sílica Amorfa. Apenas o diâmetro e pureza da sílica é significativo sobre esses dois aspectos, sua cristalinidade é secundária.

Quanto ao polimorfismo da Alita, a cristalinidade da sílica apresentou uma correlação direta, pois a técnica da DRX empregada, juntamente ao refinamento Rietveld com o Software TOPAS, corroborado pelos baixos índices RWP e GOF, mostrou outro importante fato; a dimensão das partículas de Quartzo não só influencia o % de Cal Livre e a Dimensão do C3S, mas, também, estabelece importante influência sobre a relação polimórfica M1/M3 da Alita. Por outro lado, a dimensão da Sílica Amorfa demonstrou pouca relevância sobre esse aspecto. Essa questão merece um estudo específico para identificação de suas causas.

Pôde-se também certificar a grande influência do SO₃ sobre a taxa de crescimento dos cristais de C3S, e que essa influência provoca um crescimento desordenado dos cristais de alita, aumentando significativamente o % de cristais xenomórficos, tanto nos cristais de alita oriundos da sílica cristalina, como da sílica amorfa. Confirmando dados da literatura, também se verificou a influência do SO₃ sobre a relação polimórfica M1/M3, porém, o aumento do % de SO₃ somente maximizou essa relação quando as amostras de clínquer foram derivadas do quartzo, e ainda, para partículas de quartzo com diâmetro médio < 50 µm. Para C3S originários de quartzo com diâmetro médio superior a 50 µm, esse aumento da estabilização da forma polimórfica M1 não se verificou. Para o sistema amorfo, o SO₃ não apresentou relevância sobre a estabilização da forma morfológica M1, não afetando de forma significativa a relação M1/M3.

As constatações têm importância prática na indústria, pois indicam caminhos precisos para a redução da dimensão dos cristais de C3S, assim como para a maximização da relação M1/M3, fatores fundamentais para a redução do consumo elétrico nas moagens de cimento e

para a reatividade do clínquer; pilares importantíssimos na busca da Sustentabilidade no Setor.

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.

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 — Modeling 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.

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.

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.

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

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

KIHARA, Y. — 1973 - Estudo mineralógico de clínquer 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.

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.

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.

7 ANEXOS

7.1 GRANULOMETRIA A LASER



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 217296-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : < 38 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/10/2018 Hora : 15:15:01
 Índice med. : 668

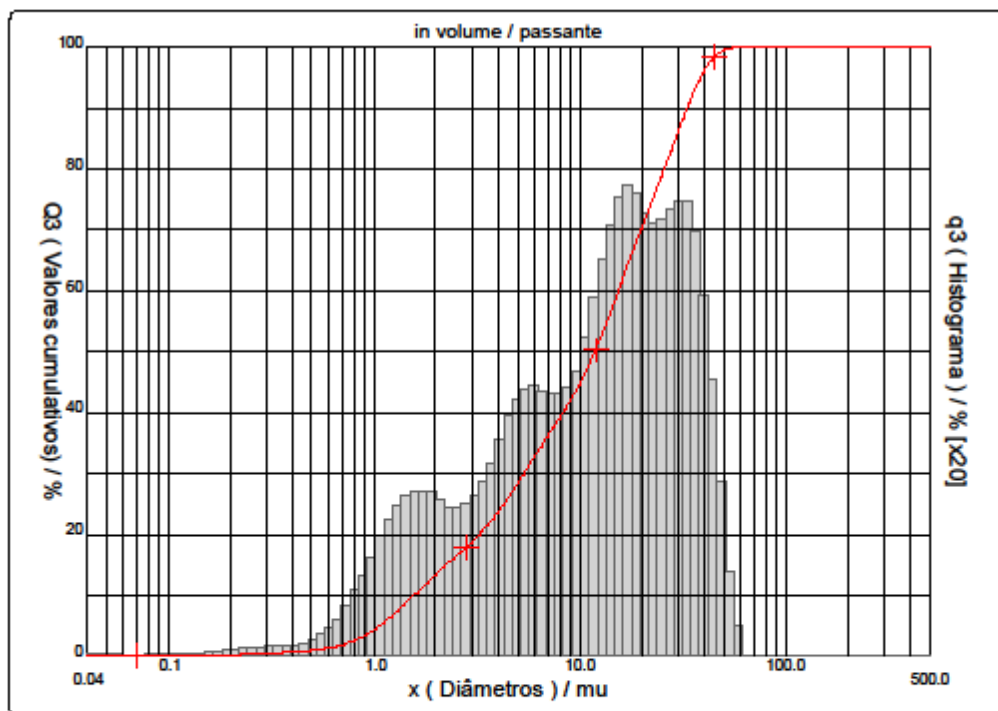
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 199
 Diâmetro a 10% : 1.57 μ m
 Diâmetro a 50% : 11.89 μ m
 Diâmetro a 90% : 33.36 μ m
 Diâmetro médio : 14.78 μ m
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	6.80	13.40	18.73	23.49	28.30	32.56	33.69	39.13	44.64	51.74

x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	61.37	87.80	88.41	95.94	99.53	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79

Ref : 1.r111.m0.45A1818/3.30/668/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8hVQ-0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0V.3.10/630



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 217298-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : < 38 um
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/10/2018 Hora : 15:15:01
 Índice med. : 668

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 199
 Diâmetro a 10% : 1.57 mu
 Diâmetro a 50% : 11.89 mu
 Diâmetro a 90% : 33.36 mu
 Diâmetro médio : 14.78 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.02	0.05	0.07	0.23	0.49	0.73	0.98	1.34	1.84	2.52
q3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.06	0.08	0.14	0.23	0.36
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	3.32	4.23	5.24	6.28	7.32	8.34	10.24	11.92	13.40	14.65
q3	0.48	0.61	0.75	0.85	0.92	0.98	1.01	1.01	1.00	0.93
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	15.77	16.80	17.78	18.73	19.68	20.62	21.57	22.52	23.49	24.96
q3	0.91	0.91	0.94	0.98	1.05	1.10	1.18	1.25	1.34	1.44
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	26.41	28.30	29.65	30.94	32.56	34.40	36.09	37.66	39.13	40.54
q3	1.53	1.61	1.65	1.66	1.67	1.63	1.62	1.62	1.62	1.65
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	41.91	44.64	47.46	50.31	53.17	55.99	58.74	61.37	63.85	66.16
q3	1.70	1.84	2.10	2.33	2.54	2.70	2.83	2.90	2.91	2.87
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	68.28	70.24	72.08	73.83	75.50	78.69	83.12	85.86	88.41	90.73
q3	2.79	2.71	2.68	2.67	2.67	2.72	2.78	2.82	2.81	2.72
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	92.76	94.50	95.94	97.61	98.42	99.53	99.84	100.00	100.00	100.00
q3	2.52	2.29	1.99	1.64	1.27	0.75	0.38	0.21	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 217297-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 38 μ m e < 45 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/10/2018 Hora : 15:37:50
 Índice med. : 670

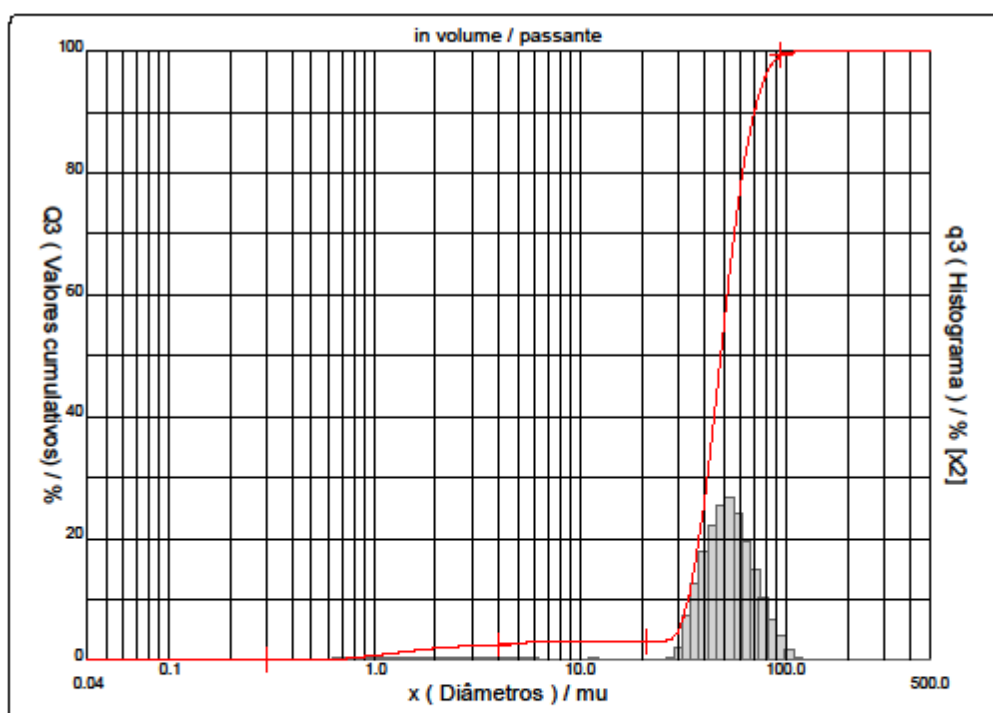
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 172
 Diâmetro a 10% : 33.63 μ m
 Diâmetro a 50% : 48.44 μ m
 Diâmetro a 90% : 70.51 μ m
 Diâmetro médio : 49.78 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	1.18	2.01	2.39	2.58	2.79	2.95	2.95	2.95	2.95	3.05
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	3.05	6.39	7.15	25.13	54.43	81.72	95.90	99.75	100.00	100.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/670/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8hVQ- 0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.QV 3.10/830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 217297-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 38 μ m e < 45 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/10/2018 Hora : 15:37:50
 Índice med. : 670

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 172
 Diâmetro a 10% : 33.63 μ m
 Diâmetro a 50% : 48.44 μ m
 Diâmetro a 90% : 70.51 μ m
 Diâmetro médio : 49.78 μ m
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08	0.10	0.16	0.26	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.58	0.76	0.94	1.10	1.26	1.40	1.65	1.85	2.01	2.13
q3	0.09	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.08
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	2.22	2.29	2.34	2.39	2.43	2.47	2.50	2.54	2.58	2.64
q3	0.07	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	2.71	2.79	2.85	2.90	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95
q3	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.95	2.95	3.00	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05
q3	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.53	4.56	7.15	10.62
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.94	2.52	3.60
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	14.85	19.76	25.13	33.76	39.69	54.43	62.43	69.47	77.09	81.72
q3	4.65	5.71	6.59	7.51	8.20	8.80	8.64	8.04	6.95	5.97
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	85.55	90.47	93.32	95.90	97.64	98.77	99.39	99.75	100.00	100.00
q3	5.18	4.24	3.27	2.51	1.81	1.24	0.72	0.44	0.14	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

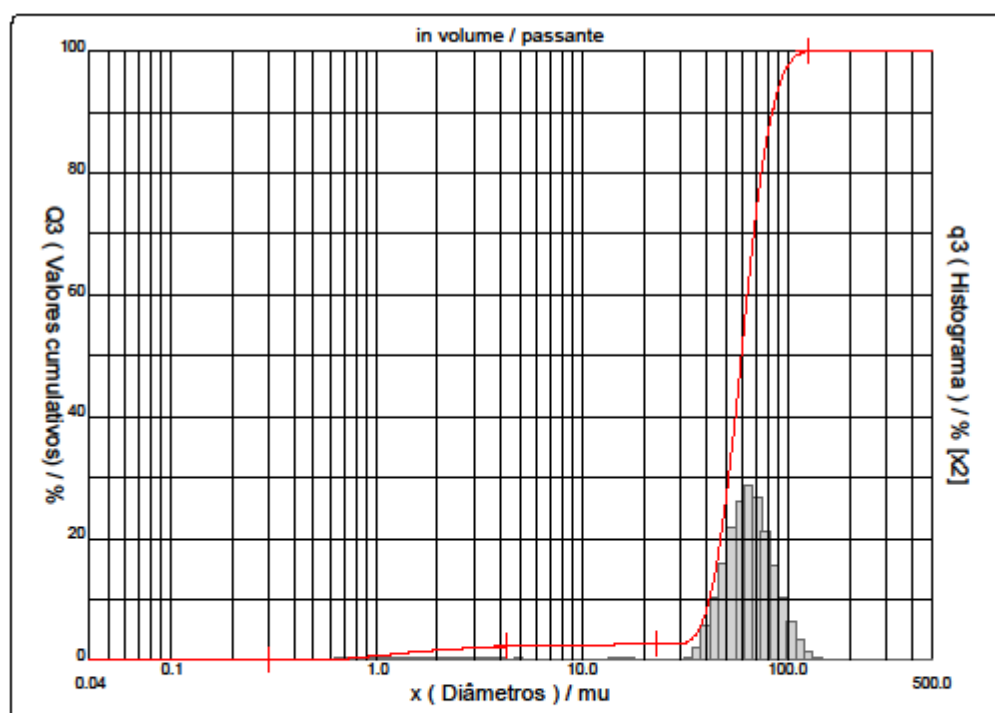
Ref da amostra : 217298-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 45 μ m e < 63 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 07:22:48
 Índice med. : 672

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 177
 Diâmetro a 10% : 41.75 μ m
 Diâmetro a 50% : 59.61 μ m
 Diâmetro a 90% : 84.23 μ m
 Diâmetro médio : 60.79 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	1.05	1.69	2.03	2.21	2.32	2.39	2.42	2.50	2.50	2.51
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	2.67	2.82	2.88	7.58	25.76	58.33	86.40	97.50	99.93	100.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79

Ref : 2.r111.m0.66A1818/3.30/672m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8hVQ- 0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.QV 3.10/630



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 217298-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 45 um e < 63 um
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 07:22:48
 Índice med. : 672

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 177
 Diâmetro a 10% : 41.75 mu
 Diâmetro a 50% : 59.61 mu
 Diâmetro a 90% : 84.23 mu
 Diâmetro médio : 60.79 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.09	0.12	0.18	0.27	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.56	0.71	0.86	0.99	1.11	1.22	1.42	1.57	1.69	1.79
q3	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.87	1.93	1.98	2.03	2.07	2.11	2.15	2.18	2.21	2.24
q3	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	2.28	2.32	2.34	2.37	2.39	2.43	2.46	2.48	2.50	2.50
q3	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.50	2.50	2.50	2.50	2.53	2.58	2.63	2.67	2.71	2.73
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.88	3.29
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.42
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	4.11	5.56	7.58	11.67	15.06	25.76	33.06	40.66	50.97	58.33
q3	0.89	1.67	2.45	3.51	4.63	6.31	7.79	8.58	9.29	9.38
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	65.11	74.71	80.65	86.40	90.64	93.74	95.94	97.50	99.43	99.93
q3	9.06	8.17	6.74	5.54	4.35	3.37	2.53	1.89	1.06	0.28
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

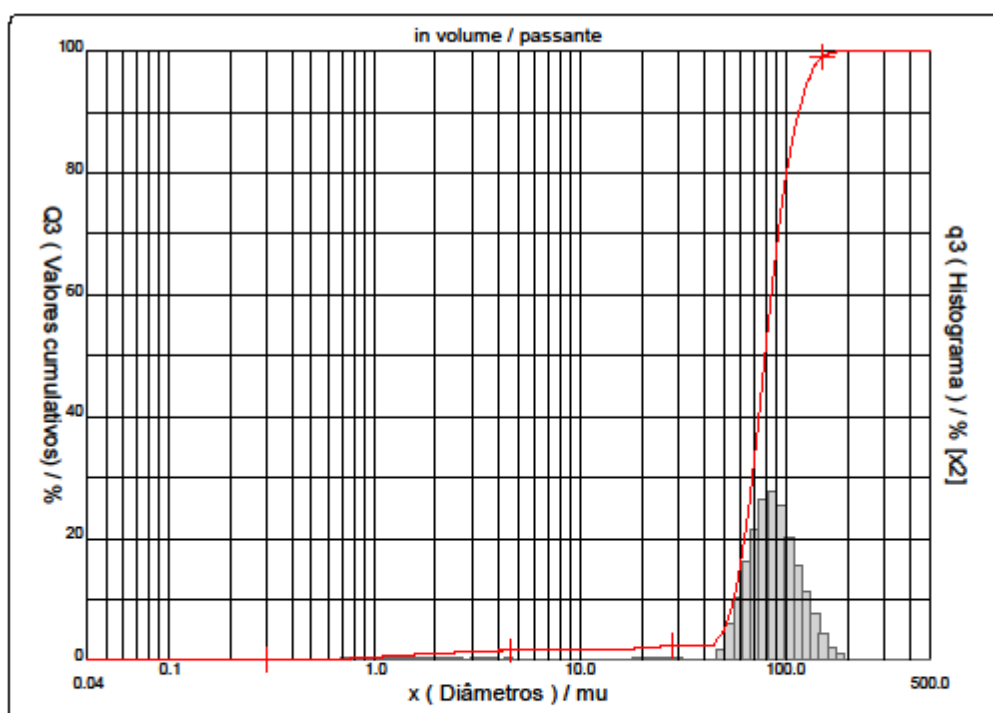
Ref da amostra : 217299-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 63 μ m e < 90 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 07:44:56
 Índice med. : 674

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 155
 Diâmetro a 10% : 56.05 μ m
 Diâmetro a 50% : 79.47 μ m
 Diâmetro a 90% : 116.15 μ m
 Diâmetro médio : 82.23 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.74	1.18	1.41	1.56	1.66	1.73	1.74	1.81	1.87	1.87
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	1.89	2.47	2.47	2.47	4.73	19.64	50.98	78.92	93.99	99.54

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/674/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.BhVQ-0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.QV.3.10/630



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 217299-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 63 um e < 90 um
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 07:44:56
 Índice med. : 674

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 155
 Diâmetro a 10% : 56.05 mu
 Diâmetro a 50% : 79.47 mu
 Diâmetro a 90% : 116.15 mu
 Diâmetro médio : 82.23 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.08	0.12	0.19	0.29
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.39	0.50	0.60	0.69	0.78	0.85	0.99	1.09	1.18	1.24
q3	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.05	0.05	0.04
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.29	1.34	1.37	1.41	1.44	1.48	1.51	1.54	1.56	1.60
q3	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	1.63	1.66	1.68	1.70	1.73	1.75	1.77	1.79	1.81	1.83
q3	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	1.85	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.89	1.92	1.95
q3	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	2.00	2.06	2.11	2.17	2.22	2.30	2.41	2.47	2.47	2.47
q3	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	2.47	2.47	2.47	2.50	2.57	4.73	6.97	9.93	15.09	19.64
q3	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	1.31	2.45	3.43	4.77	5.95
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	24.64	33.73	41.48	50.98	59.74	67.44	73.70	78.92	88.02	93.99
q3	6.85	7.94	9.02	9.38	9.21	8.59	7.38	6.49	5.12	3.47
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	95.55	97.75	98.91	99.54	99.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	2.54	1.89	1.07	0.62	0.34	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 217300-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 90 μ m e < 125 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 08:45:04
 Índice med. : 676

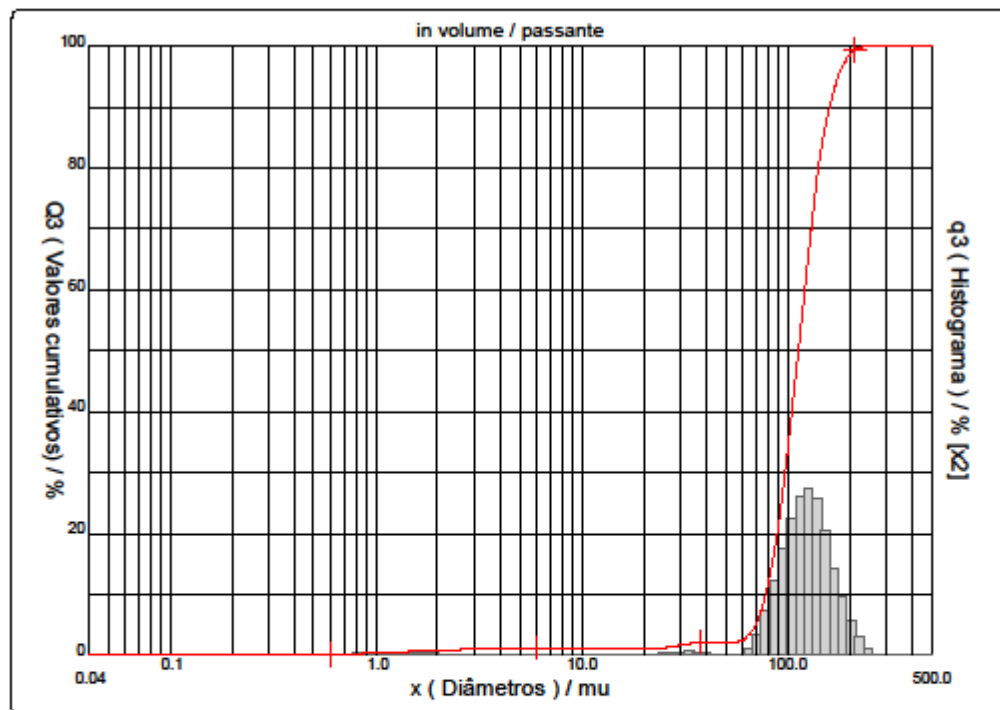
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 159
 Diâmetro a 10% : 78.42 μ m
 Diâmetro a 50% : 112.99 μ m
 Diâmetro a 90% : 159.85 μ m
 Diâmetro médio : 115.64 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.53	0.86	1.01	1.12	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	1.21	1.78	1.82	2.19	2.22	2.83	11.14	33.17	64.58	90.07

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/676/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.BhVQ- 0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V.3.10/830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 217300-A
 Tipo produto : Quartzo
 Cliente : ABCP
 Comentários : > 90 μ m e < 125 μ m
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 01/11/2018 Hora : 08:45:04
 Índice med. : 676

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 159
 Diâmetro a 10% : 78.42 μ m
 Diâmetro a 50% : 112.99 μ m
 Diâmetro a 90% : 159.85 μ m
 Diâmetro médio : 115.64 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.13	0.20
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.28	0.36	0.43	0.50	0.57	0.62	0.72	0.80	0.86	0.90
q3	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	0.93	0.96	0.98	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15
q3	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	1.18	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
q3	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.29	1.49	1.85	1.82	1.96
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.12	0.16	0.18	0.16
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	2.08	2.15	2.19	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.45	2.83
q3	0.14	0.09	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.54
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	3.46	5.20	7.46	11.14	15.68	20.94	26.87	33.17	48.73	64.58
q3	0.93	1.64	2.84	3.93	5.16	6.34	7.55	8.46	9.45	9.94
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	69.87	78.85	85.34	90.07	93.44	95.83	97.42	98.51	99.35	99.84
q3	9.29	8.34	6.48	5.05	3.83	2.88	2.02	1.46	0.99	0.61
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218747-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : SIO2 < 38
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:09:35
 Índice med. : 729

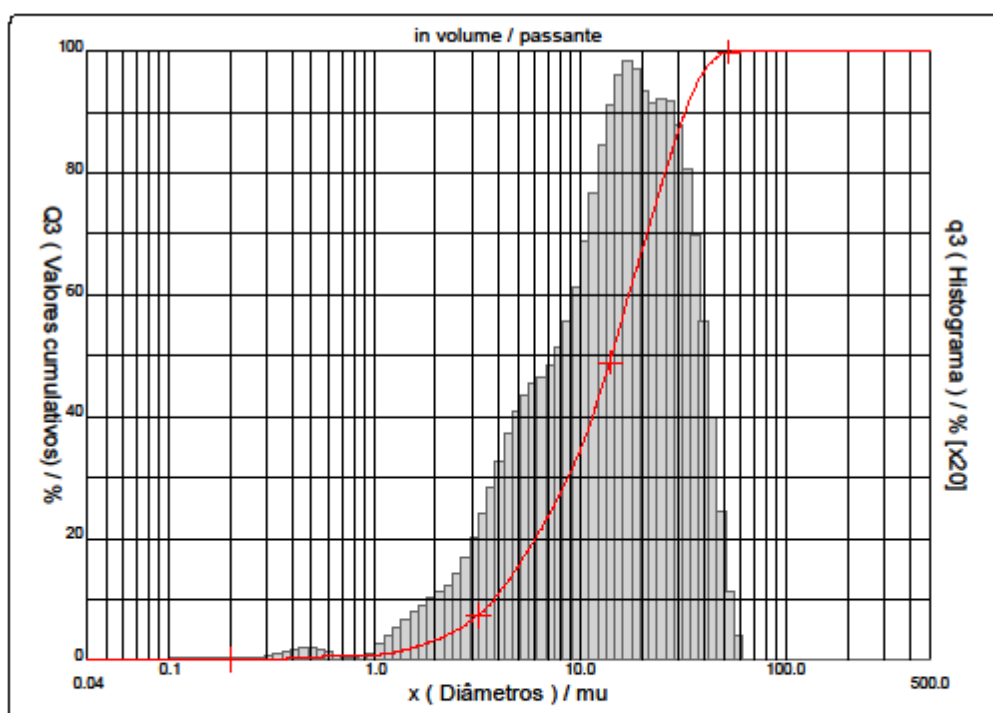
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 167
 Diâmetro a 10% : 3.85 mu
 Diâmetro a 50% : 14.31 mu
 Diâmetro a 90% : 32.61 mu
 Diâmetro médio : 16.47 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	1.28	3.32	6.50	10.67	15.25	19.56	20.75	27.02	34.17	43.42
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	55.73	88.61	89.26	96.56	99.63	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79

Ref : 1.r111.m0.45A1818/3.30729m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8hVQ- 0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.QV 3.10/830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 218747-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : SIO2 < 38
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:09:35
 Índice med. : 729

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 167
 Diâmetro a 10% : 3.85 μ m
 Diâmetro a 50% : 14.31 μ m
 Diâmetro a 90% : 32.61 μ m
 Diâmetro médio : 16.47 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.12	0.18	0.33	0.55	0.69	0.75	0.77
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.07	0.05	0.03	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.80	0.85	0.99	1.17	1.39	1.63	2.17	2.73	3.32	3.89
q3	0.02	0.03	0.10	0.14	0.19	0.22	0.28	0.32	0.38	0.41
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	4.49	5.12	5.79	6.50	7.27	8.08	8.92	9.78	10.67	12.04
q3	0.47	0.54	0.62	0.70	0.81	0.91	1.00	1.09	1.18	1.29
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	13.42	15.25	16.58	17.89	19.56	21.53	23.41	25.23	27.02	28.80
q3	1.40	1.50	1.56	1.62	1.65	1.68	1.73	1.80	1.89	2.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	30.57	34.17	37.85	41.56	45.26	48.88	52.38	55.73	58.89	61.83
q3	2.11	2.33	2.64	2.91	3.16	3.33	3.46	3.54	3.56	3.51
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	64.55	67.08	69.45	71.70	73.85	77.93	83.37	86.51	89.26	91.62
q3	3.43	3.37	3.32	3.30	3.30	3.34	3.28	3.11	2.91	2.66
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	93.61	95.24	96.56	98.02	98.72	99.63	99.88	100.00	100.00	100.00
q3	2.38	2.06	1.76	1.38	1.05	0.59	0.29	0.15	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

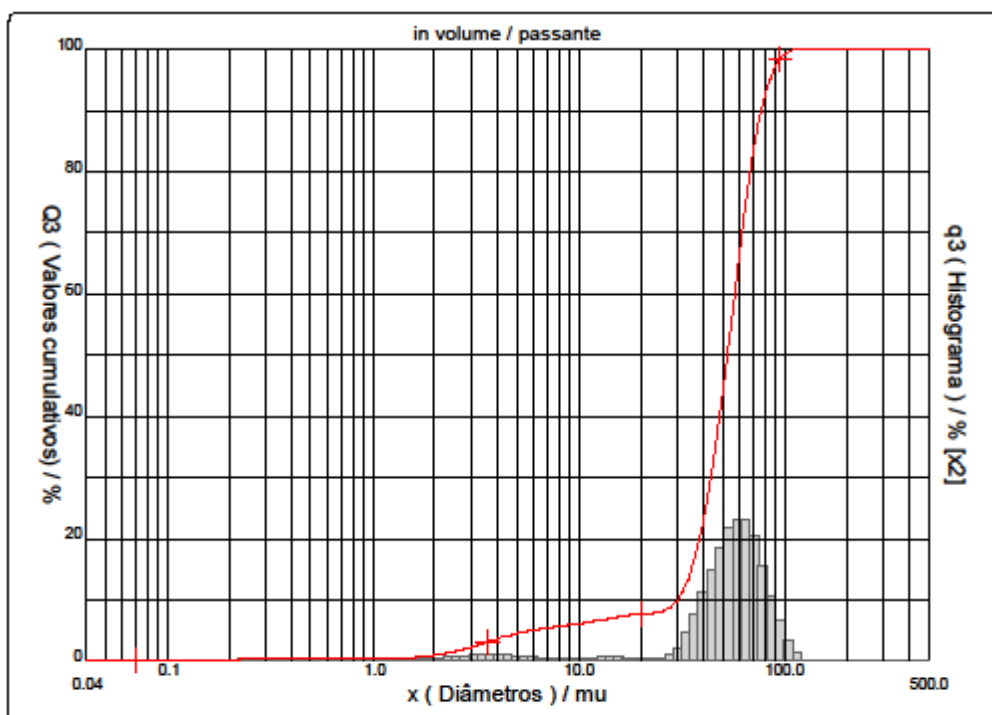
Ref da amostra : 218748-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 38 > SiO₂ < 45
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:30:31
 Índice med. : 731

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 161
 Diâmetro a 10% : 30.42 μ m
 Diâmetro a 50% : 52.78 μ m
 Diâmetro a 90% : 77.08 μ m
 Diâmetro médio : 52.29 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.58	0.95	2.29	3.61	4.51	5.08	5.20	5.69	6.13	6.67
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	7.32	10.79	11.23	22.35	43.64	71.66	92.33	99.21	100.00	100.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/731/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8VQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0V.3.10830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218748-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 38 > SIO2 < 45
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:30:31
 Índice med. : 731

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 161
 Diâmetro a 10% : 30.42 mu
 Diâmetro a 50% : 52.76 mu
 Diâmetro a 90% : 77.06 mu
 Diâmetro médio : 52.29 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.03	0.09	0.12	0.26	0.47	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
q3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.62	0.76	0.95	1.18
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.11	0.15
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.44	1.72	2.00	2.29	2.58	2.86	3.13	3.38	3.61	3.92
q3	0.19	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29	0.30	0.29	0.28	0.27
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	4.19	4.51	4.71	4.88	5.08	5.27	5.43	5.57	5.69	5.80
q3	0.25	0.24	0.22	0.19	0.18	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	5.91	6.13	6.34	6.56	6.78	6.98	7.16	7.32	7.45	7.56
q3	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.17	0.16	0.16	0.13	0.12
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	7.63	7.69	7.73	7.77	7.83	8.01	8.72	9.66	11.23	13.31
q3	0.08	0.07	0.05	0.05	0.08	0.14	0.39	0.85	1.52	2.15
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	15.87	18.91	22.35	28.14	32.33	43.64	50.53	57.27	65.82	71.66
q3	2.81	3.52	4.20	5.02	5.78	6.73	7.41	7.67	7.77	7.50
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	76.87	84.03	88.32	92.33	95.16	97.12	98.38	99.21	100.00	100.00
q3	7.02	6.14	4.91	3.89	2.93	2.15	1.46	1.01	0.44	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218749-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 45 > SIO2 < 63
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:45:28
 Índice med. : 733

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 164
 Diâmetro a 10% : 41.47 mu
 Diâmetro a 50% : 64.37 mu
 Diâmetro a 90% : 94.25 mu
 Diâmetro médio : 64.85 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

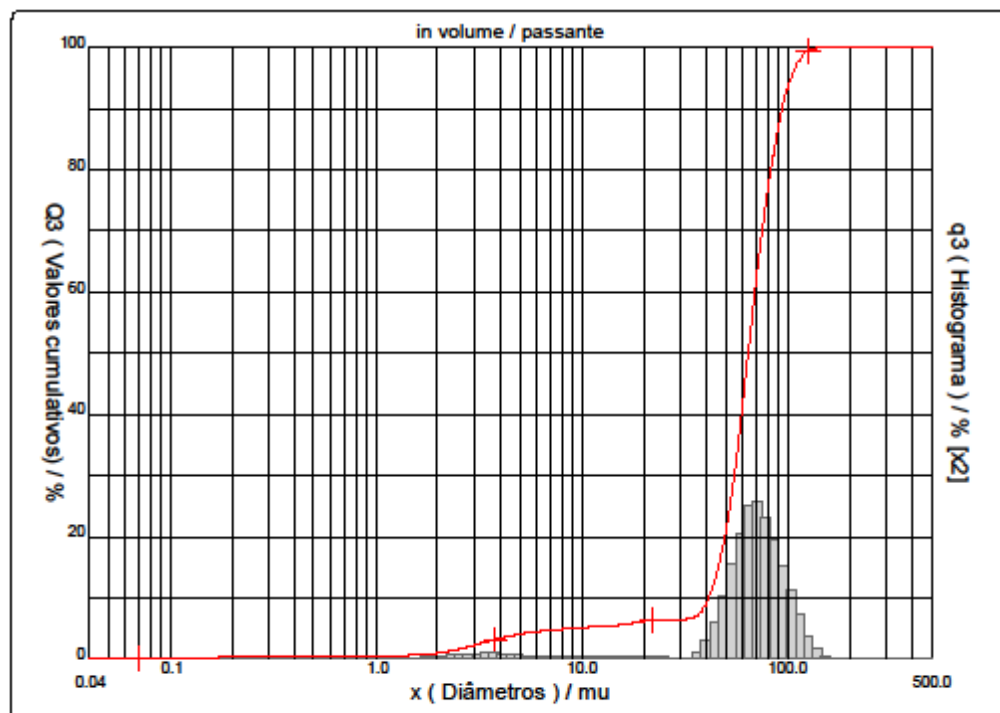
Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.64	0.98	2.26	3.42	4.11	4.50	4.58	4.90	5.17	5.39

x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	5.70	6.49	6.50	8.82	20.46	47.05	76.65	93.38	99.39	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79 Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/733m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8VQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0V.3.10830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 218749-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 45 > SiO₂ < 63
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:45:28
 Índice med. : 733

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 164
 Diâmetro a 10% : 41.47 μ m
 Diâmetro a 50% : 64.37 μ m
 Diâmetro a 90% : 94.25 μ m
 Diâmetro médio : 64.85 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.04	0.10	0.14	0.29	0.52	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
q3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.68	0.81	0.98	1.20
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.10	0.14
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.45	1.72	1.99	2.26	2.52	2.77	3.01	3.22	3.42	3.67
q3	0.18	0.21	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26	0.24	0.24	0.22
x	4.80	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	3.88	4.11	4.25	4.37	4.50	4.63	4.73	4.82	4.90	4.97
q3	0.19	0.17	0.15	0.14	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	5.04	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.59	5.70	5.81	5.93
q3	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	0.11	0.11	0.13
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	6.07	6.19	6.31	6.41	6.48	6.48	6.48	6.48	6.50	6.65
q3	0.16	0.15	0.15	0.13	0.10	0.00	0.00	0.00	0.02	0.15
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	7.00	7.73	8.82	11.19	13.27	20.46	25.80	31.74	40.45	47.05
q3	0.38	0.84	1.33	2.05	2.86	4.27	5.73	6.75	7.90	8.46
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	53.43	63.12	69.70	76.65	82.33	86.91	90.53	93.36	97.61	99.39
q3	8.58	8.30	7.51	6.74	5.86	5.01	4.19	3.45	2.35	1.01
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	99.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.49	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218750-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 63 > SIO2 < 90
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:59:58
 Índice med. : 735

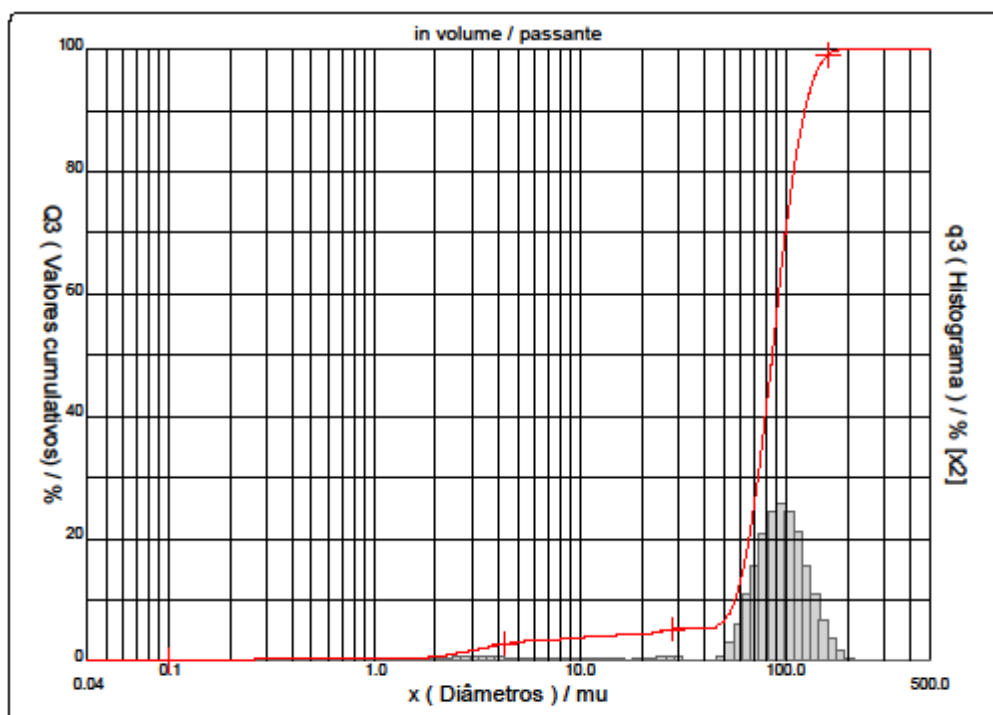
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 162
 Diâmetro a 10% : 56.77 mu
 Diâmetro a 50% : 85.98 mu
 Diâmetro a 90% : 124.07 mu
 Diâmetro médio : 86.79 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.46	0.74	1.75	2.62	3.11	3.36	3.41	3.61	3.87	4.10
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	4.23	5.34	5.34	5.34	6.39	15.74	40.36	69.88	90.57	98.99

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/735m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8VQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0V.3.10830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218750-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 63 > SIO2 < 90
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 14:59:58
 Índice med. : 735

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 162
 Diâmetro a 10% : 56.77 mu
 Diâmetro a 50% : 85.98 mu
 Diâmetro a 90% : 124.07 mu
 Diâmetro médio : 86.79 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.03	0.07	0.09	0.20	0.37	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
q3	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50	0.60	0.74	0.92
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.09	0.12
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.12	1.33	1.54	1.75	1.95	2.14	2.32	2.48	2.62	2.80
q3	0.15	0.17	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.19	0.18	0.16
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	2.95	3.11	3.21	3.28	3.36	3.44	3.50	3.56	3.61	3.68
q3	0.15	0.13	0.11	0.08	0.08	0.07	0.05	0.06	0.05	0.08
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	3.74	3.87	3.98	4.07	4.13	4.17	4.21	4.23	4.26	4.30
q3	0.07	0.08	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	4.34	4.39	4.45	4.53	4.63	4.87	5.20	5.34	5.34	5.34
q3	0.05	0.06	0.08	0.11	0.15	0.19	0.19	0.13	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	6.39	7.61	9.34	12.66	15.74
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	1.37	2.06	3.16	4.14
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	19.30	26.13	32.30	40.36	48.44	56.21	63.38	69.88	82.23	90.57
q3	5.02	6.13	7.38	8.19	8.74	8.91	8.70	8.31	7.15	4.98
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	92.77	95.98	97.85	98.99	99.65	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	3.68	2.82	1.80	1.16	0.71	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 218751-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 90 > SiO₂ < 125
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 15:12:53
 Índice med. : 737

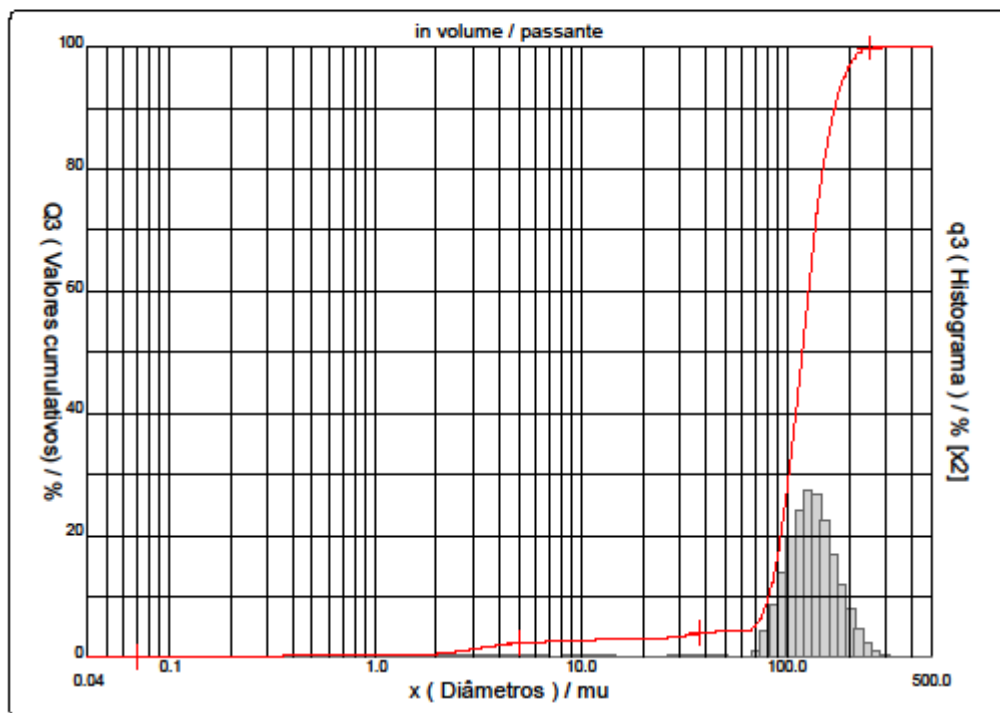
Ultrassom : 60 s
 Concentração : 159
 Diâmetro a 10% : 81.48 μ m
 Diâmetro a 50% : 118.88 μ m
 Diâmetro a 90% : 170.47 μ m
 Diâmetro médio : 120.82 μ m
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50
Q3	0.33	0.57	1.38	2.04	2.38	2.54	2.57	2.66	2.81	2.99
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	3.10	3.58	3.62	4.07	4.22	4.26	9.00	27.01	57.55	85.89

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 79

Ref: 2.r111.m0.66A1818/3.30/737/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.8hQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.QV.3.10/830



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 218751-A
 Tipo produto : Sílica
 Cliente : ABCP
 Comentários : 90 > SIO2 < 125
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 31/01/2019 Hora : 15:12:53
 Índice med. : 737

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 159
 Diâmetro a 10% : 81.46 mu
 Diâmetro a 50% : 118.68 mu
 Diâmetro a 90% : 170.47 mu
 Diâmetro médio : 120.82 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

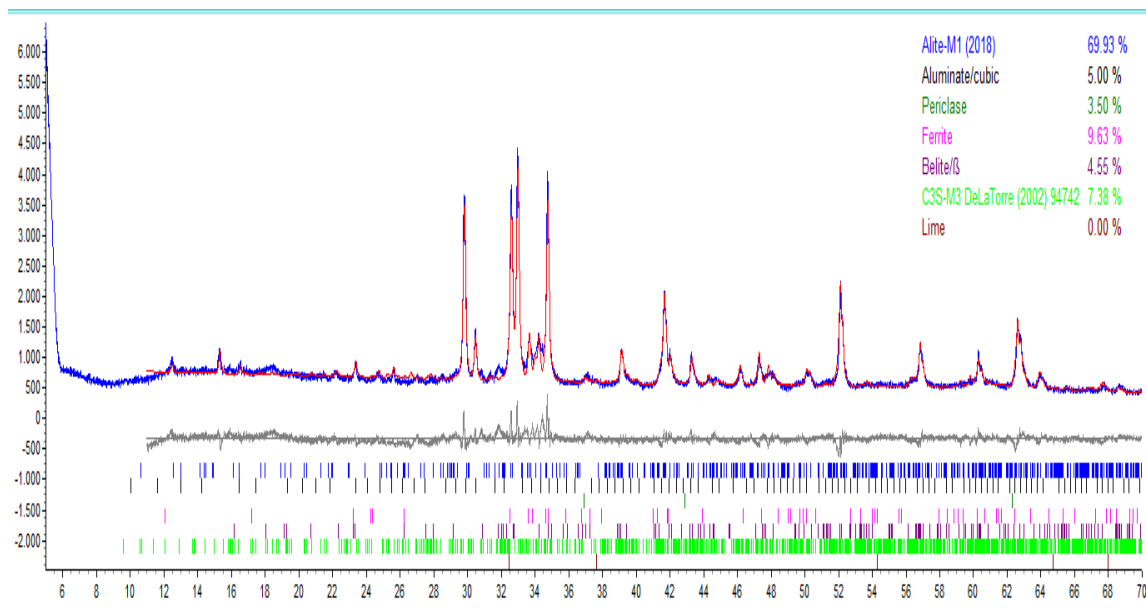
in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.02	0.05	0.06	0.14	0.27	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.45	0.57	0.72
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.11
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	0.88	1.05	1.22	1.38	1.53	1.68	1.81	1.93	2.04	2.17
q3	0.13	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	0.12
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	2.27	2.38	2.44	2.49	2.54	2.58	2.61	2.64	2.66	2.70
q3	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.73	2.81	2.88	2.95	3.02	3.07	3.10	3.10	3.10	3.10
q3	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.17	3.33	3.47	3.62	3.76
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.10	0.14	0.16	0.16
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	3.89	3.99	4.07	4.17	4.22	4.22	4.22	4.22	4.22	4.26
q3	0.16	0.13	0.11	0.10	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	4.42	5.14	6.51	9.00	12.35	16.49	21.48	27.01	41.56	57.55
q3	0.24	0.68	1.72	2.66	3.81	4.99	6.36	7.43	8.85	10.04
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	63.10	72.80	80.12	85.69	89.85	92.96	95.18	96.81	98.17	99.07
q3	9.76	9.03	7.32	5.95	4.73	3.75	2.83	2.19	1.61	1.13
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	99.66	99.84	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.59	0.30	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

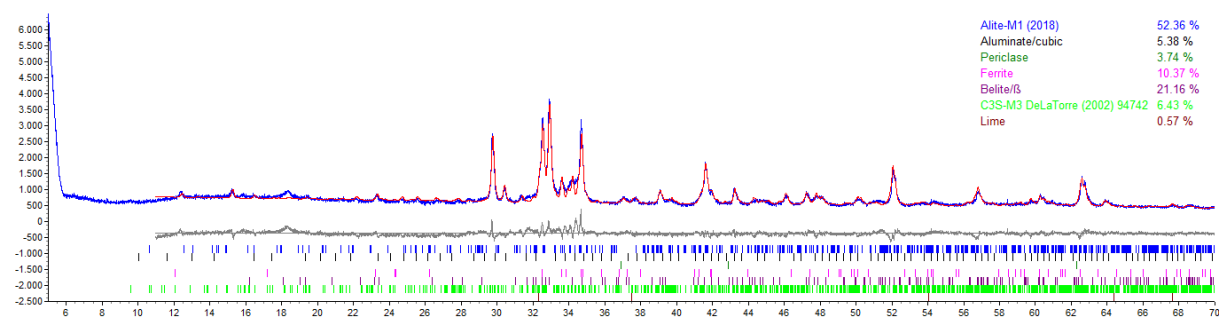
x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

7.2 DIFRATOGRAMAS REFINADOS COM USO DO SOFTWARE TOPAS.

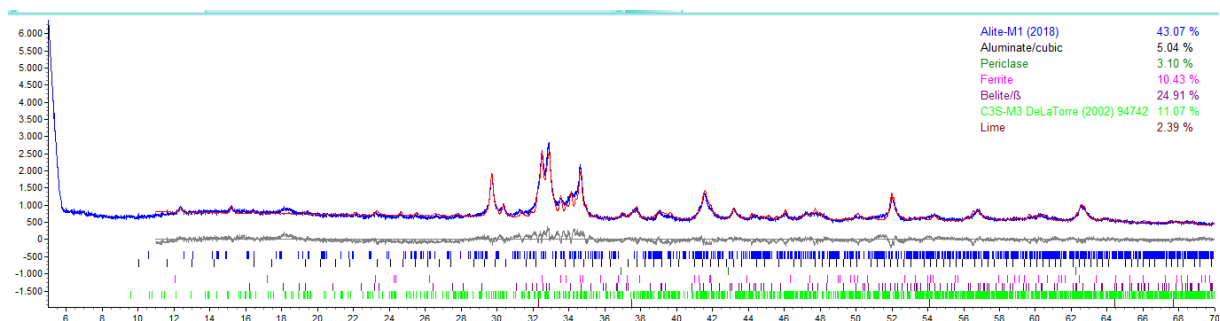
Amostra 01 – Quartzo < 38 μm .



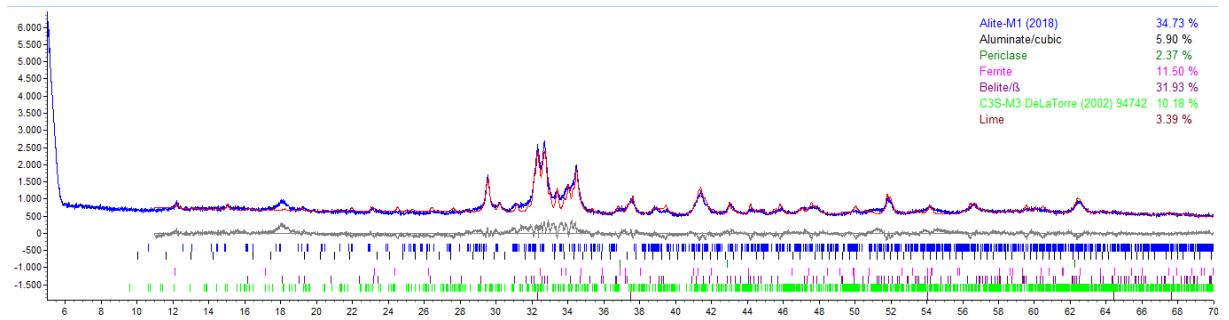
Amostra 02 – 38 ≤ Quartzo < 45 μm



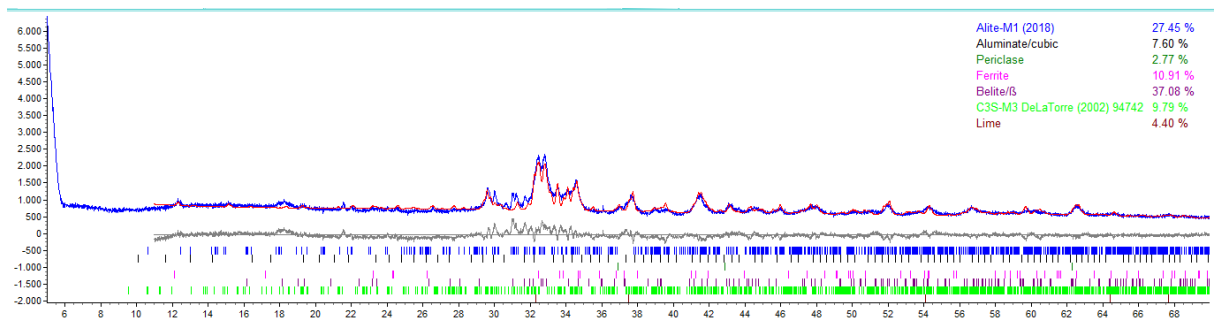
Amostra 03 – 45 ≤ Quartzo < 63 μm



Amostra 04 – $63 \leq \text{Quartzo} < 90$

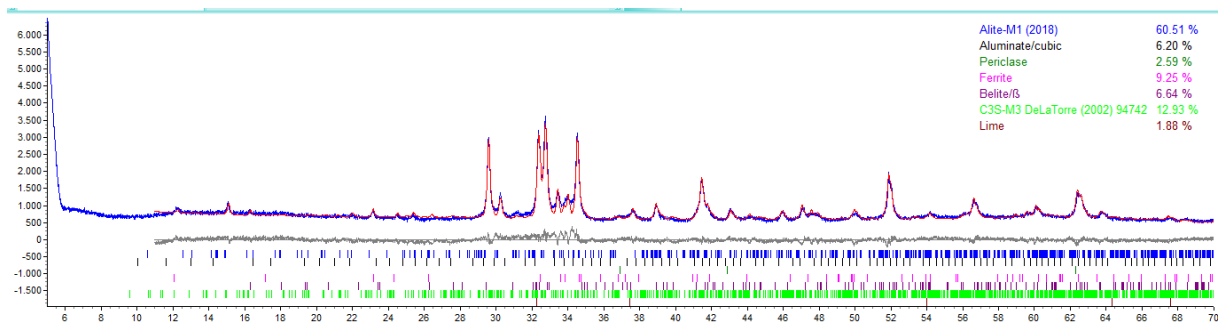


Amostra 05 – $90 \leq \text{Quartzo} < 125 \mu\text{m}$

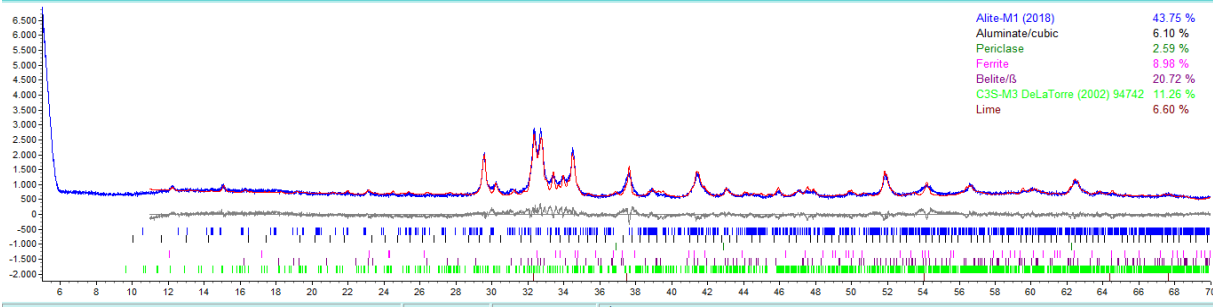


- **SÍLICA AMORFA**

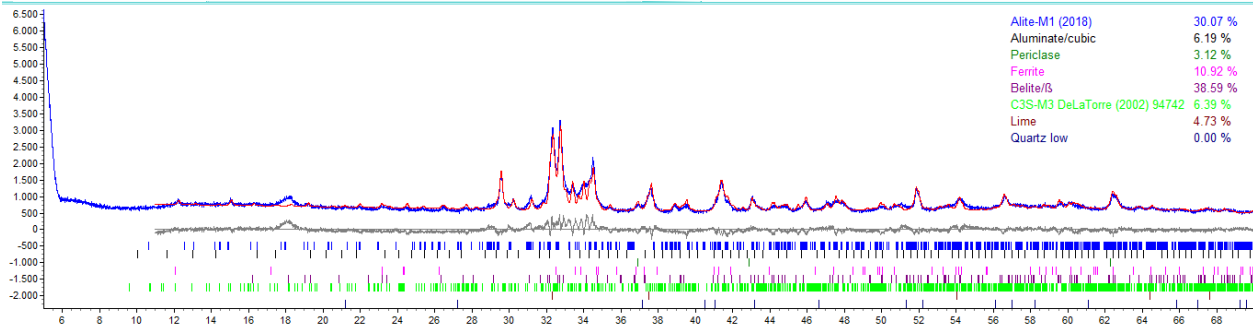
Amostra 06 – Sílica Amorfa < 38 μm .



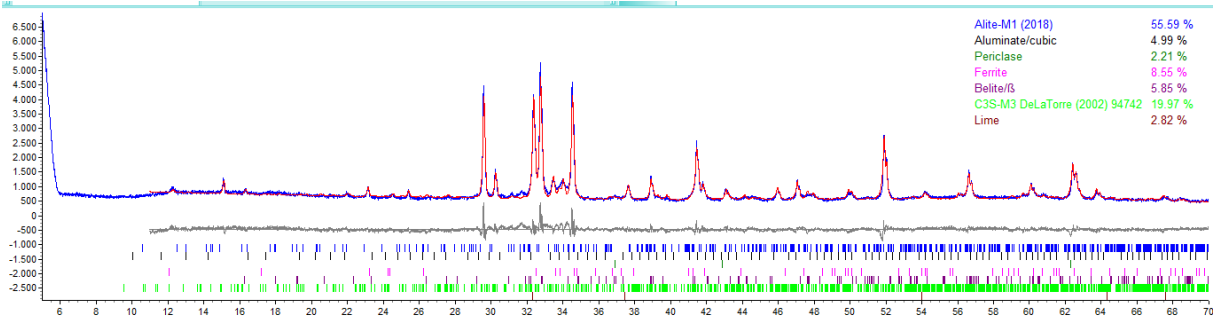
Amostra 07 – $45 \leq \text{Sílica Amorfa} < 63 \mu\text{m}$.



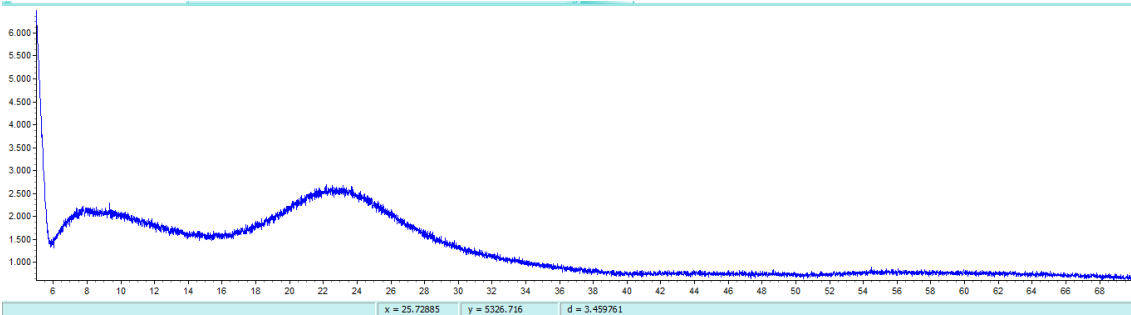
Amostra 08 – $90 \leq \text{Sílica Amorfa} < 125 \mu\text{m}$.



Amostra 06 – Sílica Amorfa < $38 \mu\text{m}$ – Dopada C/ SO₃.



Difratograma da Sílica Amorfa usada nas composições.



Difratograma do Quartzo usado nas composições.

