



**FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO E NEGÓCIOS  
DE SERGIPE - FANESE**

Associação de Ensino e Pesquisa "Gracco Cardoso"  
Coordenação do Curso de Engenharia de Produção

**WAGNER SANTOS DE ARAUJO**

**A IMPORTÂNCIA DA MICROSCOPIA DE CLÍNQUER NA  
PRODUÇÃO DE CIMENTO**

Aracaju – Sergipe - Brasil  
Dezembro - 2005

**WAGNER SANTOS DE ARAUJO**

**A IMPORTÂNCIA DA MICROSCOPIA DE CLÍNQUER NA  
PRODUÇÃO DE CIMENTO**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe, em cumprimento às exigências e requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. João Vicente Santiago do Nascimento

Aracaju – Sergipe - Brasil  
Dezembro - 2005

WAGNER SANTOS DE ARAUJO

## **A IMPORTÂNCIA DA MICROSCOPIA DE CLÍNQUER NA PRODUÇÃO DE CIMENTO**

O presente trabalho de monografia, requisito parcial para o cumprimento do estágio curricular em Engenharia de Produção, foi submetido e aprovado com média 8,0 pela banca examinadora formada pelos seguintes professores.

Aprovado em 22 / 12 / 2005

### BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. João Vicente Santiago do Nascimento  
Orientador

---

Prof. Dr. Francisco Luiz Gomes Lopes  
Primeiro examinador

---

Prof. Msc. Helenice Leite Garcia  
Segundo examinador

*Dedico este trabalho a minha mãe por se constituir diferentemente enquanto pessoa, admirável em essência, estímulos que me impulsionaram a buscar vida nova a cada dia, meus agradecimentos por ter me estimulado sempre na minha companhia pelos estudos, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por guiar todos os meus passos e estar presente em todos os momentos, estendendo sua mão e confortando o coração.

A todos os professores que se empenharam ao máximo para transmitir seu conhecimento em todo esse tempo para minha formação, aos professores João Vicente, Francisco Lopes e Helenice Garcia pelas orientações para elaboração deste trabalho.

A minha família, pelo apoio em toda minha vida acadêmica, em especial as minhas irmãs. Aos amigos e colegas, que alegraram e preencheram meus dias, em especial aos que me acompanharam nos estudos e viradas de noites.

*“Um passo a frente e você não está mais no mesmo lugar”*(CHICO SCINCE, 1994)

## RESUMO

A indústria cimenteira busca cada vez mais otimizar seu processo e qualidade do produto aliado a um custo baixo. A influência mineralógica do clínquer no resultado final da produção de cimento pôde ser evidenciada através da variação dos seus minerais no decorrer do tempo. Cada feição dos minerais ocasionada por uma variação no processo, muda o comportamento do clínquer na produção de cimento e de sua qualidade. O estudo mineralógico através do microscópio de luz polarizada refletida, permitiu um acompanhamento da produção do clínquer podendo evidenciar problemas que só é possível através de uma visualização das características dos cristais. A realização da microscopia de clínquer como auxílio de controle da qualidade, permitiu demonstrar e avaliar a morfologia do clínquer para possíveis influências negativas no processo. A partir de dados colhidos na Cimento Sergipe S/A - CIMESA os resultados mostraram que as diferentes feições no clínquer reagem de formas diferentes causando variações no processo e na qualidade do cimento.

Palavras-chave: microscopia, morfologia, processo.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais reações na fabricação do clínquer.....	19
Tabela 2 - Fases polimórficas do cristal de alita .....	20
Tabela 3 - Densidades das fases do clínquer.....	23



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de fabricação de cimento.....	15
Figura 2 – Zona compacta proveniente do grão grosseiro de calcário.....	25
Figura 3 – Cristais grossos de quartzo.....	26
Figura 4 – Zona de cristais de belita com poro central.....	27
Figura 5 – Amplas zonas de CaO e de belita próximas.....	28
Figura 6 – Cristais alongados de alita.....	28
Figura 7 – Cristal de alita com 170 µm de desenvolvimento.....	29
Figura 8 – Cristal de alita com bordas corroídas.....	30
Figura 9 – Cristais de belita secundária.....	31
Figura 10 – Dimensão das zonas de belita.....	31
Figura 11 – Dimensão média dos cristais de alita da Cimesa.....	33
Figura 12 – Porcentagem de alita no clínquer.....	33
Figura 13 – Comparativo entre consumo específico de energia elétrica e moabilidade do clínquer.....	34
Figura 14 – Desvio R28 CII F 32.....	35

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	VII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IX
<b>I. INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 Objetivo Geral.....	12
1.2 Objetivo Específico .....	12
1.3 Justificativa .....	12
<b>II FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	13
2.1 A História do Cimento .....	13
2.2 Processo de Fabricação de Cimento .....	14
2.2.1 Moagem .....	15
2.2.2 Dosagem da mistura crua.....	16
2.2.3 Homogeneização da mistura crua.....	17
2.2.4 Clinquerização.....	17
2.2.5 Resfriamento .....	18
2.2.6 Termoquímica do processo de fabricação de cimento.....	18
2.3 Mineralogia do Clínquer.....	19
2.3.1 Alita.....	20
2.3.2 Belita.....	21
2.3.3 Fase intersticial .....	22
2.4. Estudo Microscópico.....	23
2.4.1 Moabilidade do clínquer por microscopia.....	23
<b>III METODOLOGIA</b> .....	24
<b>IV RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	24
4.1 Análise da Moagem de Cru.....	25
4.2 Análise da Homogeneização de Cru.....	27
4.3 Avaliação da Clinquerização.....	28
4.4 Avaliação do Resfriamento.....	30
4.5 Análise de Dados Quantitativos.....	31
<b>V CONCLUSÃO</b> .....	36
<b>REFERENCIAS</b> .....	37

## I. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de cimento é bastante complexo, e precisa de um acompanhamento bastante rigoroso para garantia da qualidade do produto, inclusive no que diz respeito a sua morfologia. O uso do microscópio na análise de clínquer possibilita uma verificação visual dos principais constituintes do clínquer. A análise microscópica ótica de luz refletida possibilita fazer uma relação com as etapas de produção do clínquer e com as análises dos dados obtidos fazer uma previsão das etapas seguintes para a fabricação do cimento.

Com análise dos minerais do clínquer é possível, além de verificação do processo, fazer interpretações de suas feições, relacionando-as com a qualidade do cimento que vai ser gerado com este clínquer. Os minerais do clínquer atuam diretamente na qualidade do cimento por isso é importante o conhecimento do tamanho, frequência, desenvolvimento e formas dos cristais. Essa análise da textura dos constituintes do clínquer só é possível através de microscópio, justificando a importância de fazer acompanhamento com frequência dos minerais do clínquer nas fábricas de cimento. A Cimento Sergipe S/A – CIMESA, empresa pertencente ao Grupo Votorantim, pela qual onde foi extraído os dados deste trabalho, possui um acompanhamento para se estabelecer as condições de fabricação e verificação de possíveis anomalias no processo.

Essas anomalias são identificadas com a textura mineralógica do clínquer. Para cada item analisado no clínquer é montado um banco de dados e feito relação para aprimoramento com a configuração de operação e qualidade. É para demonstrar a importância desta ferramenta e a utilização otimizada do microscópio

com apreciação mineralógica ótica, foram recolhidos dados do processo de uma determinada cimenteira.

### **1.1. Objetivo Geral**

Analisar a influência dos minerais que constituem o clínquer no processo de fabricação de cimento, através da técnica de microscopia ótica de luz polarizada.

### **1.2. Objetivo Específico**

Demonstrar como a morfologia do clínquer, ou seja, formas, frequência e tamanhos dos cristais influencia na fabricação de cimento nos equipamentos como também na qualidade do produto final, para que se busque um aperfeiçoamento no controle do processo.

### **1.3. Justificativa**

As indústrias buscam cada vez mais aperfeiçoamento da qualidade e otimização dos seus processos produtivos visando um custo menor possível, o avanço tecnológico e as técnicas de análises desenvolvidas é a base para alcançar esses objetivos.

As fábricas de cimento não são diferentes. Para garantir qualidade do produto utilizam os métodos de acompanhamento dos óxidos de silício, alumínio, cálcio e ferro para controle e certificação do seu processo produtivo através de análise

química por raios-x. Sendo assim, neste trabalho pretende-se avaliar uma técnica de apoio em paralelo a já existente. Através da microscopia de clínquer é possível caracterizar o produto e fazer uma relação com o processo sendo possível realizar um ajuste fino, de dentro para fora, analisando também os minerais formados.

## **II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 História da Microscopia de Clínquer**

Lê Chatelier (1887) foi pioneiro em desenvolver trabalhos com descrições microscópicas das fases do clínquer. Ele utilizou métodos de análises em rochas observando a existência de cristais angulares e claros; cristais arredondados, turvos amarelados e uma substância marrom-escura intermediária.

Tornebohm (1897) verificou que por causa das variações na composição dos minerais do clínquer, utilizar nomes de minérios fossem mais adequados para as fases do clínquer do que fórmulas químicas. Além disso, descreveu claramente as características óticas das principais fases do clínquer em seções finas e amostras de pó e nomeou os termos de alita, belita, celita e felita, e também a fase vítrea.

Richardson (1904) demonstrou que é possível fazer uma previsão da qualidade do cimento através da análise microscópica do clínquer. Se a estrutura é mais grossa e os elementos forem mais segregados, o cimento de tal clínquer é menos confiável.

Rankin (1915) estabeleceu as propriedades óticas para os minerais do clínquer de compostos puros e as fases principais do cimento. Esta pesquisa analisou aproximadamente 1000 combinações de cal, alumínio e sílica utilizando diferentes temperaturas e exames microscópicos. Ele concluiu que com variações no tempo e temperatura, bem como a qualidade da mistura crua, influenciam na formação da alita e belita.

Brown (1938) publicou um relatório descrevendo a aplicação do microscópio para eventuais problemas no cimento Portland. Posteriormente, Brown (1948) publicou um outro estudo mais detalhado sobre clínqueres microscopicamente analisados correlacionando a composição mineral com a queima do forno, possibilitando fazer uma relação da análise microscópica com a etapa de clinquerização.

Em 1980, a International Cement Microscopy Association (ICMA) publicou procedimentos sobre os métodos e controle da qualidade através da microscopia, e esses procedimentos são aplicados nas indústrias cimenteiras. No Brasil existe a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) onde disseminou procedimentos e cursos para a aplicação da microscopia de clínquer nas indústrias brasileiras.

## **2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO**

A fabricação de cimento Portland envolve um conjunto de operações que pode ser resumido nas seguintes etapas, de acordo com a Figura 1. A análise microscópica por luz refletida atua na verificação das seguintes etapas de fabricação: moagem de cru, dosagem da mistura crua, homogeneização, queima

(clinkerização), resfriamento, moagem do cimento e uma previsão da resistência a compressão mecânica aos 28 dias (R 28). Essas etapas são descritas a seguir:

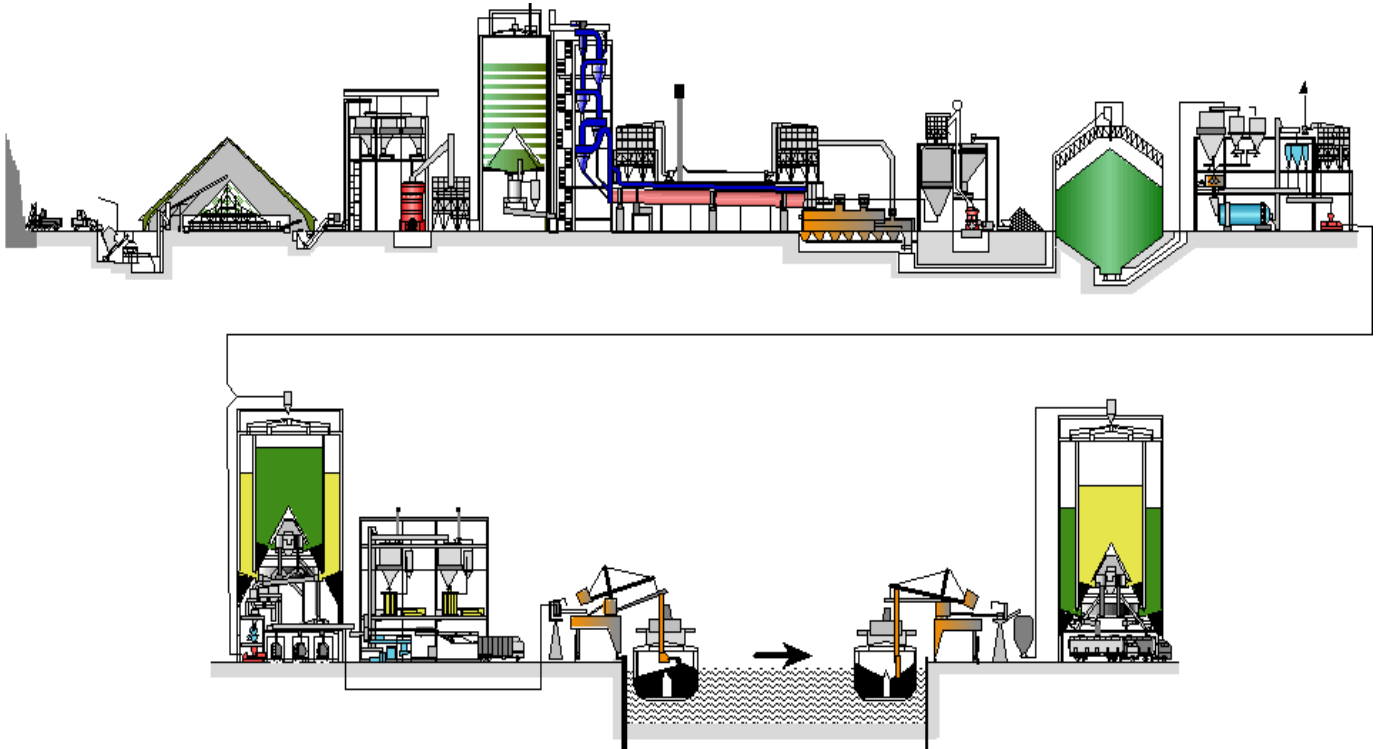


Figura 1 – Processo de fabricação de cimento  
 Fonte: Programa Trainee 2005 – Votorantim Cimentos.

### 2.2.1 Moagem de cru

A preparação da mistura crua consiste no tratamento da matéria-prima (calcário e argila) nos britadores e moinhos com finalidade de reduzir a granulometria do material. A granulometria da mistura crua tem grande importância para a etapa de clinkerização. O Calcário compacto com granulometria fina reage menos que um calcário menos compacto e poroso com a mesma granulometria (KRAMER, 1957). O calcário e argila alimentam um moinho de bolas ou de rolos, cuja granulometria é reduzida para um valor médio de 0,05 mm. O controle da

moagem de cru é feito com análise do percentual retido na malha de 100 mesh, O valor ideal varia de acordo com material e de cada fábrica.

### 2.2.2 Dosagem da mistura crua

A dosagem é o controle químico dos óxidos presentes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para uma composição ideal da mistura crua, Durante o processo de fabricação de cimento esse controle é feito com uma frequência bastante elevada e por espectrometria de raios-X. Os parâmetros controlados são os seguintes:

- Fator de saturação de cal (FSC): é a relação do  $\text{CaO}$  com os demais elementos, os valores mais usados nas indústrias cimenteiras ficam entre 0,95 e 1,0.

$$FSC = \frac{CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,2 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3}$$

- Módulo de sílica (MS): é a relação da sílica com os fundentes alumínio e ferro expresso em porcentagem. Esses valores também variam para cada fábrica e cada forno, os valores mais usados ficam entre 2,0 e 4,0.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

- Módulo de alumínio (MA): é a relação do alumínio com o ferro. É importante na fabricação da mesma forma que os anteriores e no tipo de cimento.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

O controle desses parâmetros acima da mistura crua tem muita importância para que possibilite uma boa formação dos minerais do clínquer, durante a clínquerização.



### 2.2.3 Homogeneização da mistura crua

Após moagem da mistura crua, com uma finura e uma adequada dosagem, a sua homogeneização é feita em um silo para garantir sua qualidade e também uma boa combinação dos elementos para daí então alimentar o forno e formar o clínquer. O sistema de extração do silo é por variação nas válvulas localizadas no fundo do silo, o qual permite que haja uma retirada de diversas camadas da mistura crua que se formam no silo.

### 2.2.4 Clinquerização

A etapa de clinquerização constitui uma série de reações a partir da mistura crua devidamente controlada em um forno, o qual pode atingir uma temperatura de 1500°C, e tem como produto final o clínquer. Essas reações a partir do meio da mistura crua conduzem a formação dos quatro principais componentes do clínquer: silicato tricálcio ( $C_3S$ ), silicato bicálcio ( $C_2S$ ), aluminato tricálcio ( $C_3A$ ) e ferro-aluminato tetracálcio ( $C_4AF$ ).

Os cristais vão se formando com o aumento da temperatura e do tempo de exposição da mistura crua. No forno é feito um controle de acordo com a característica da mistura crua, a condição de operação do forno pode formar diferenças estruturais nos cristais obtidos no clínquer.

Essas diferenças na morfologia do clínquer somente podem ser observadas com auxílio da microscopia de ótica de luz transmitida ou refletida.

### **2.2.5 Resfriamento**

A etapa de resfriamento do clínquer é responsável pela estabilização das reações que ocorreram anteriormente sendo dividido em duas etapas; a primeira refere-se ao resfriamento que ocorre ainda dentro do forno e a segunda refere-se ao resfriamento que acontece em um resfriador industrial. O clínquer que apresenta um resfriamento lento, decompõe o cristal de alita em  $C_2S$  e  $CaO$  livre secundários (HOFMANNER, 1973). Isso só pode ser percebido por microscopia ótica de luz refletida. Essa decomposição vai influenciar na qualidade do cimento produzido com este tipo de clínquer.

O segundo resfriamento demonstra o grau de cristalização da fase intersticial ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), onde se verifica o meio no qual ocorreu a reação de clinquerização. A característica da feição da fase também só pode ser observada por microscopia ótica de luz refletida.

### **2.2.6 Termoquímica do processo de fabricação de cimento**

No processo de fabricação de clínquer são várias reações que ocorrem para a formação de seus minerais (HOFMANNER, 1973). As principais reações estão na Tabela 01.

Tabela 01 – Principais reações na fabricação do clínquer.

Temperatura em °C	Processo	
100	Evaporação de água livre	Endotérmica
500	Desidroxilação dos minerais argilosos	Endotérmica
800	Decomposição do calcário	Endotérmica
900	Recristalização dos minerais de argila	Exotérmica
900 a 1.200	Reação de CaO com os alumínio-silicatos	Exotérmica
1.200 a 1.280	Início de formação da fase líquida	Endotérmica
1.300	Formação do C <sub>2</sub> S	Exotérmica
1.300 a 1.330	Formação principal da fase líquida e formação de C <sub>3</sub> S	-
1.330 a 1.450	Crescimento dos cristais de C <sub>3</sub> S e C <sub>2</sub> S	-
1.200	Cristalização da fase líquida	Exotérmica

Fonte: ABCP

As reações que ocorrem são do tipo endotérmica e exotérmica. Anteriormente boa parte das reações aconteciam dentro do forno, com avanço tecnológico e construção de fornos com pré-calcinador a mistura crua já entra no forno praticamente descarbonatada.

### 2.3 Mineralogia do clínquer

O clínquer é dividido em quatro fases identificadas nas indústrias cimenteiras com as seguintes nomenclaturas: C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, como mencionado anteriormente. Assim, Campbell (1979) conceituou o clínquer típico sendo uma massa porosa de cristais interligados, formando um mosaico cristalino. As nomenclaturas citadas são válidas somente para as fases puras.

A formação e as características dessas fases são funções da finura da mistura crua, das condições de clínquerização e resfriamento. Em clínqueres industriais não ocorre fases puras por causa das inclusões dos elementos menores. Duas outras fases mineralógicas são constituídas pelo magnésio ou periclásio e óxido de cálcio (CaO) livre, provenientes de problemas no processo de fabricação.

Os cristais de alita e belita são os principais componentes do clínquer. A alita é responsável pela resistência do cimento nos primeiros dias de reação, já a belita atuará para a resistência a partir dos 28 dias. A forma e freqüência que aparecem no clínquer influenciam diretamente na moagem de cimento.

### 2.3.1 Alita

A alita é uma série de soluções sólidas modificadas em seus arranjos estruturais, que é geralmente denominado de  $C_3S$  abreviação de  $Ca_3SiO_5$  na indústria de cimento. A alita é um mineral do clínquer de cimento Portland que pode se apresentar sob diferentes formas polimórficas. Existem sete formas cujos pontos de transição são estão na Tabela 2 (MAKI, 1986).

Tabela 2 – Fases polimórficas do cristal de alita

Fases Polimórficas	Temperatura de conversão (°C)
R2	1070
M3	1060
M2	980
M1	980
T3	920
T2	620
T1	20

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

Sendo: T = triclinico; M = Monoclinico; R = Romboédrica

As diferentes formas polimórficas de  $C_3S$  apresentam pouca variação estrutural. Suas transformações são do tipo deslocativas, estando em jogo diferenças de energias tão fracas que não modificam sensivelmente as ligações químicas, resultando que todas as formas polimórficas possuem reatividades distintas. As variações no grau de reatividade estão relacionadas a desordens estruturais nos cristais de  $C_3S$  provocadas pela substituição de elementos menores (LOCHER, 1960).

A alita pode conter até aproximadamente 4% de impureza (GROSH, 1983). Esta compreende de 50 a 75% do clínquer de cimento Portland, cuja densidade é de 3,13 a 3,22 mg/m<sup>3</sup>. Os cristais de  $C_3S$  geralmente se apresentam com seis lados, na forma de cristais idiomórficos tabulares e compactos que, em seções transversais, são pseudo-hexagonais. Esta é a forma mais reativa e que geralmente apresenta maior contribuição para a resistência mecânica do cimento.

Em determinadas condições, os cristais podem apresentar uma ou mais bordas irregulares. Estas formas são conhecidas como subidiomórficas, que apresentam reatividade média e também média qualidade. Às vezes todos os contornos apresentam reentrâncias e saliências, cujas formas são ditas xenomórficas. Estas formas são as menos reativas. Tamanhos normais dos cristais variam de 25 a 65  $\mu\text{m}$ . A dureza da alita é aproximadamente 5 na escala de Mohs. A alita cristaliza-se em 1.200°C e 1.450°C a partir da fusão.

### **2.3.2 Belita**

A belita é uma série de solução sólida com variedades na sua estrutura. O silicato bicálcio impuro, normalmente chamado de  $C_2S$  abreviação de  $Ca_2SiO_4$  na

indústria de cimento, sua. Sua frequência no clínquer varia de 5 a 30%, com uma dureza de 4 a 5 na escala de Mohs. A impureza da belita pode chegar até 6% (GROSH, 1983).

A morfologia mais freqüente é de cristais arredondados e daí por alterações no processo essas forma podem variar com suas bordas passando de arredondados para um desgaste em suas bordas e até completamente quebrado na forma de traços.

### **2.3.3 Fase intersticial**

A fase intersticial é formada por  $C_3A$  e  $C_4AF$ , que é originada a partir da cristalização durante o resfriamento da fase líquida. Esta fase constitui um importante papel na clínquerização, favorecendo as reações dos silicatos. De acordo com o processo ela pode se denominada na indústria cimenteira de vítrea, semi-cristalizada ou cristalizada.

O aluminato tricálcio ou  $C_3A$  abreviação de  $Ca_2Al_2O_6$ , se apresenta na fase entre os cristais de alita e belita. Ele pode compor até 18% do clínquer comum. As impurezas podem aproximar-se a 10% (GROSH, 1983). O  $C_3A$  tem um efeito catalisador no comportamento do  $C_3S$  e no desenvolvimento das resistências nos primeiros dias de resistência do cimento.

O ferro – aluminato tetracálcio ou  $C_4AF$  abreviação de  $Ca_2AlFeO_5$ , possui pouca participação na resistência do cimento. Ele é o responsável pela coloração cinza do clínquer. As impurezas podem alcançar 13% (GROSH, 1983).

## 2.4 Estudo Microscópico

A microscopia ótica consiste em uma técnica para avaliação das microestruturas do clínquer, analisando as características do  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , periclásio e  $CaO$  livre. A análise qualitativa do clínquer por microscopia ótica de luz refletida permite fazer a reconstituição das condições de fabricação, e conseqüentemente fazer uma otimização do processo.

Além da análise qualitativa é possível realizar análise quantitativa do clínquer. Os valores contados dos cristais correspondem à proporção volumétrica das fases, sendo necessário corrigir para as porcentagens em massa, a partir de cálculos utilizando suas respectivas densidades. As densidades dos principais compostos do clínquer são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Densidades das Fases do Clínquer

Fase do Clínquer	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Alita	3,18
Belita	3,31
$C_3A$	3,03
$C_4AF$	3,73
Cal livre	3,35
Periclásio	3,58

Fonte - ASTM C 1356M - 1996

### 2.4.1 Moabilidade do clínquer por microscopia

A moabilidade indica o grau de dureza do clínquer que vai alimentar o moinho de cimento. O seu valor corresponde ao teor, a dimensão dos cristais de alita, e como estão dispostos os cristais de belita no clínquer. A ABCP desenvolveu um

método de avaliação da moabilidade através de um coeficiente mineralógico do clínquer e uma simulação de moagem em laboratório, onde se pode prever a influência no moinho de cimento.

### **III. METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica com finalidade de fornecer conceitos e informações sobre a análise microscópica de clínquer.

A estratégia de pesquisa na obtenção de dados experimentais sobre a morfologia de clínquer, foi realizada na CIMESA – Cimento Sergipe S.A. com a utilização da microscopia de clínquer viabilizando o estudo de problemas gerados na produção de cimento. De acordo com os procedimentos CIMESA foram realizados ensaios de diversos clínqueres que foi produzido no período da amostragem com uma periodicidade semanal. Foi catalogado as diversas e diferentes características dos cristais formados, e que eram observadas pelo ensaio de microscopia. De acordo com as características da morfologia dos clínqueres produzidos e consumido foi montado um banco de dados e comparados com dados de moagem de cimento e qualidade da resistência a compressão.

### **IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no processo de fabricação de cimento através da microscopia de clínquer da CIMESA - Cimento Sergipe S.A. As principais feições dos clínqueres produzidos pela Cimesa e sua



influência nas moagens através de testes de moabilidade e variação das resistências do seu produto final foram estudadas neste trabalho. Através da análise de microscopia foi possível caracterizar as principais etapas de fabricação do clínquer e verificar a influência da morfologia do clínquer no cimento.

#### 4.1 Análise da moagem de cru

O grau de moagem do cru mede a granulometria adequada da mistura de calcário e argila para um bom desenvolvimento das reações de clinquerização.

Kramer (1957) afirmou que o limite máximo para grãos de calcários compactos e quartzo é de no máximo 100  $\mu\text{m}$ . A partir deste valor, há formação de zonas no clínquer. De acordo com a Figura 2, foi observada uma granulometria elevada, ocasionando zonas de CaO livre.

Esta característica ocorre durante a clinquerização. O centro do grão de calcário maior que 100  $\mu\text{m}$  não reage devido à pequena mobilidade iônica permanecendo no clínquer sob forma de CaO livre, o qual dificulta a queima, podendo ocasionar problemas no produto final.

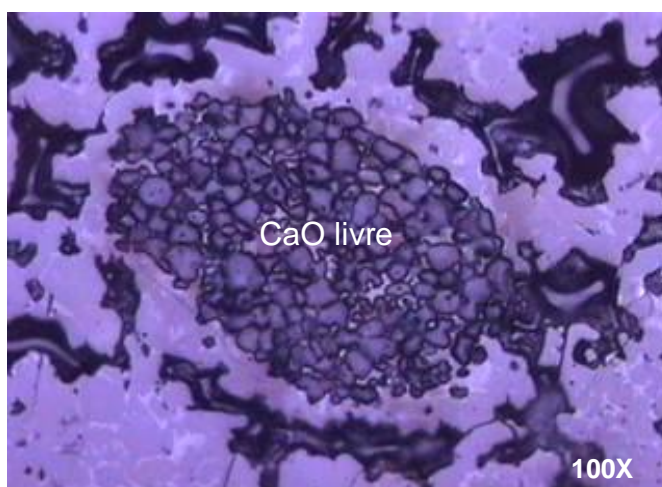


Figura 2 – Zona compacta proveniente do grão grosseiro de calcário

A Figura 3 mostra uma micrografia por microscópio de luz transmitida de um grão grosseiro de quartzo encontrado na mistura crua de alimentação do forno após tratamento químico e retido na malha de 125  $\mu\text{m}$ .

Os grãos de quartzo maiores que 100  $\mu\text{m}$  são responsáveis por zonas de belita. A sílica apresenta tendência à migração. Ela dá origem a um poro central rodeado por cristais de belita, conforme micrografia de luz transmitida.

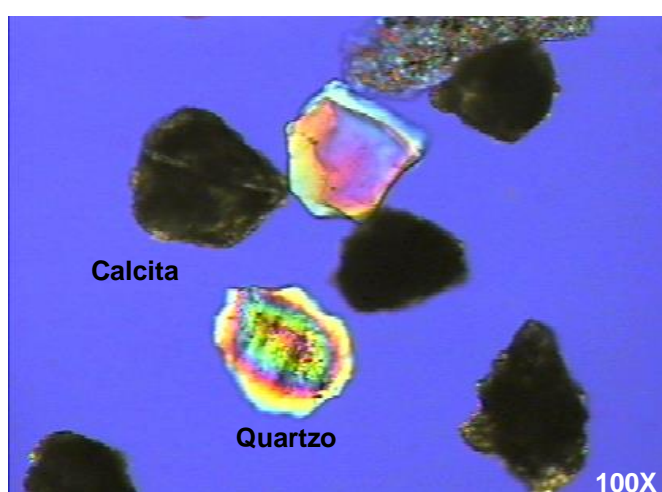


Figura 3 – Cristais grossos de quartzo

A observação de zonas de cristais de belita com grandes dimensões significa a evidência de problemas de moagem. Foi observado durante a amostragem várias zonas deste cristal conforme a Figura 4, zonas estas que refletem na moagem de cimento.

A influência e granulometria do calcário nas reações de clínquer indicam que quanto menor for o diâmetro dos grãos, maior é o conteúdo e formação dos cristais de alita e melhor é a queima do clínquer (LEHMANN e THORMANN, 1964).

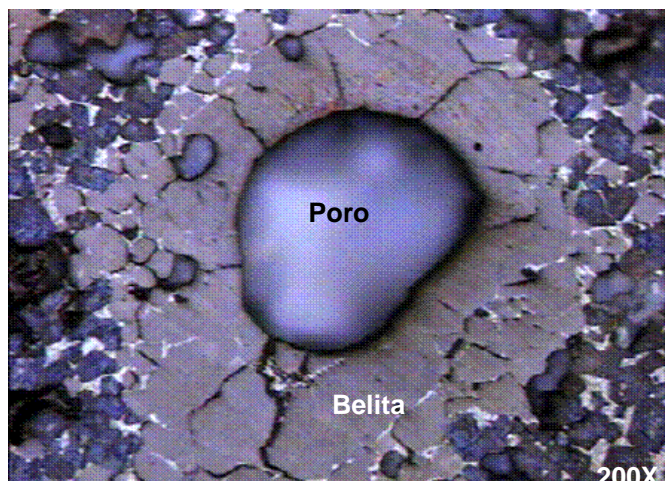


Figura 4 – Zona de cristais de belita com poro central

#### 4.2 Análise da homogeneização de cru

O grau de homogeneização da mistura crua foi medido por microscopia ótica de luz refletida avaliando a disposição dos cristais no clínquer. A homogeneização corresponde à boa distribuição dos compostos de calcário e argila. Foram observados problemas de homogeneização nos ensaios de microscopia. A Figura 5 mostra uma má distribuição dos elementos ocasionando aparecimentos de amplas zonas de cristais de belita e CaO livre no clínquer.

A má distribuição dos cristais de belita e CaO livre, influencia na deficiência de queima, fazendo com que poucos cristais de alita sejam formados. Com isso, o clínquer com esta característica, influenciará de forma negativa a qualidade do cimento.

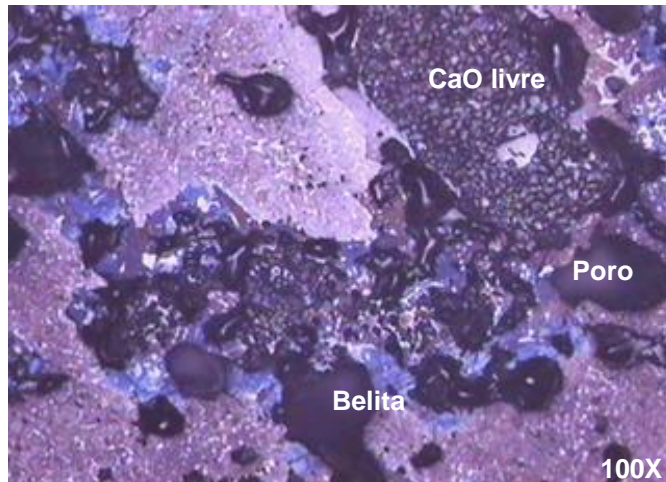


Figura 5 – Amplas zonas de CaO e de belita próximas

#### 4.3 Avaliação da clinquerização

A temperatura de queima é um ponto fundamental para o desenvolvimento das reações de clinquerização. A temperatura age principalmente no cristal de alita, daí a importância no seu controle. A Figura 6 mostra uma característica do cristal de alita do clínquer que por motivo operacional sofreu a ação de uma temperatura muito alta, alongando os cristais. O cristal de alita quando alongado apresenta uma baixa reatividade e causa uma redução da atividade hidráulica no cimento (GOLDA, 1980).

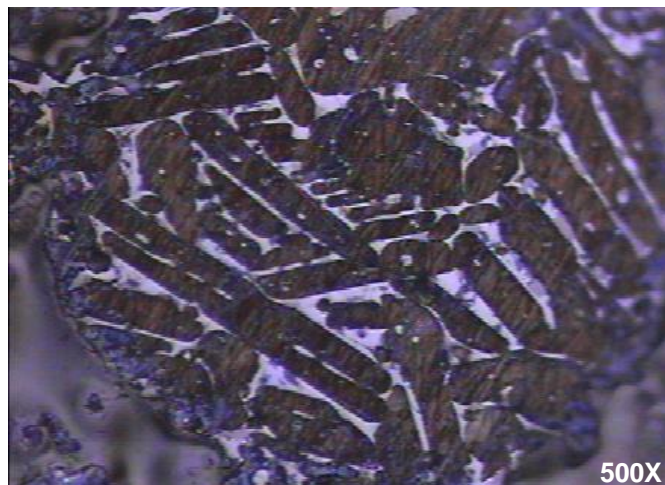


Figura 6 – Cristais alongados de alita

Paris (1968) mostrou que o tempo de clinquerização é evidenciado pela forma e desenvolvimento dos cristais. A ABCP conceitua tempo longo quando os cristais de alita são superiores a 60  $\mu\text{m}$ . O tempo é normal para 30 a 40  $\mu\text{m}$  e tempo curto inferior a 20  $\mu\text{m}$ . A CIMESA verificou com testes, que para seu controle de qualidade, um tempo longo de clinquerização é caracterizado quando a dimensão média dos cristais de alita são superiores a 30  $\mu\text{m}$ . A Figura 7 ilustra uma micrografia do clínquer quando o forno exerce uma queima forte. O cristal de alita apresentou um crescimento excessivo em vários ensaios realizados, atingido muitas das vezes uma dimensão maior que 150  $\mu\text{m}$ .

Um clínquer com grandes dimensões dos cristais de alita apresenta uma moabilidade ruim para a moagem de cimento, uma baixa reatividade além de possuir uma baixa atividade hidráulica no cimento em todas as idades (GOLDA, 1980).

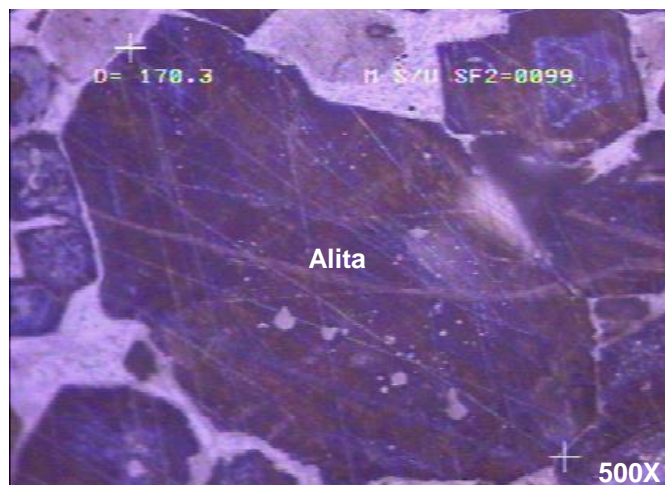


Figura 7 – Cristal de alita com 170  $\mu\text{m}$  de desenvolvimento



#### 4.4 Avaliação do resfriamento

O resfriamento do clínquer é uma das etapas mais importantes da sua formação. Esta etapa representa o momento onde ocorre à estabilização das reações de clinquerização. Caso ocorra uma demora na sua estabilização, a análise de microscopia ótica de luz refletida consegue visualizar este problema, caracterizado pela ocorrência da decomposição da alita, conforme a Figura 8.



Figura 8 – Cristal de alita com bordas corroídas

Foi verificado na amostragem, ocorrência da reação inversa com formação de CaO livre e belita secundária a partir do cristal de alita, Figura 9.

Segundo Woemann, 1960, estudando o problema da decomposição dos cristais de alita e da reação inversa, verificou que isso ocorria também em clínqueres onde seu processo de queima sofria aquecimento em ambiente redutor, ou seja, com pouco oxigênio dentro do forno.

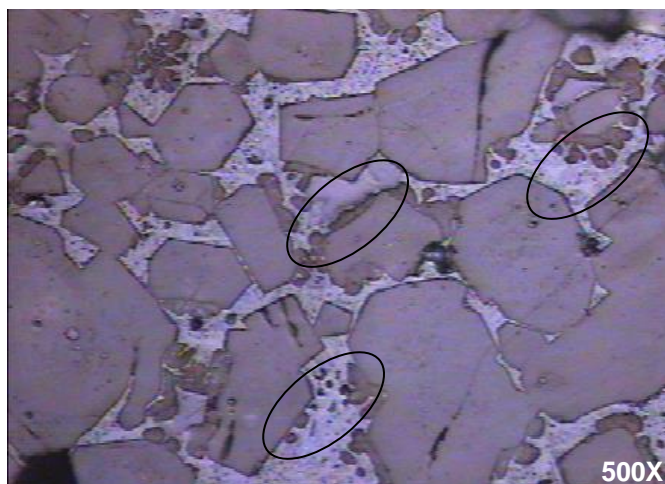


Figura 9 – Cristais de belita secundária

Ambas características dos cristais apresentam baixa reatividade e uma péssima atividade hidráulica no cimento em todas as idades (GOLDA, 1980).

#### 4.5 Análise de dados quantitativos

A seguir são apresentados dados quantitativos dos clínqueres produzidos durante a amostragem dos fornos da CIMESA. A Figura 10 mostra as médias mensais das dimensões das zonas de cristais de belita dos fornos da CIMESA.

Em relação a granulometria do grão de quartzo foi constatado que sempre se manteve elevada em todo o período da amostragem, o mês de Abril um dos fornos estava parado e não foi observado presença de zonas, lembrando-se que a meta da CIMESA para ser atingida é menor que 100  $\mu\text{m}$ . o não atendimento desta meta acarretou em problemas para a moagem do clínquer, causando um consumo específico maior durante a produção do cimento. A granulometria elevada aumentou a produtividade do moinho de cru e impossibilitou uma queima adequada.

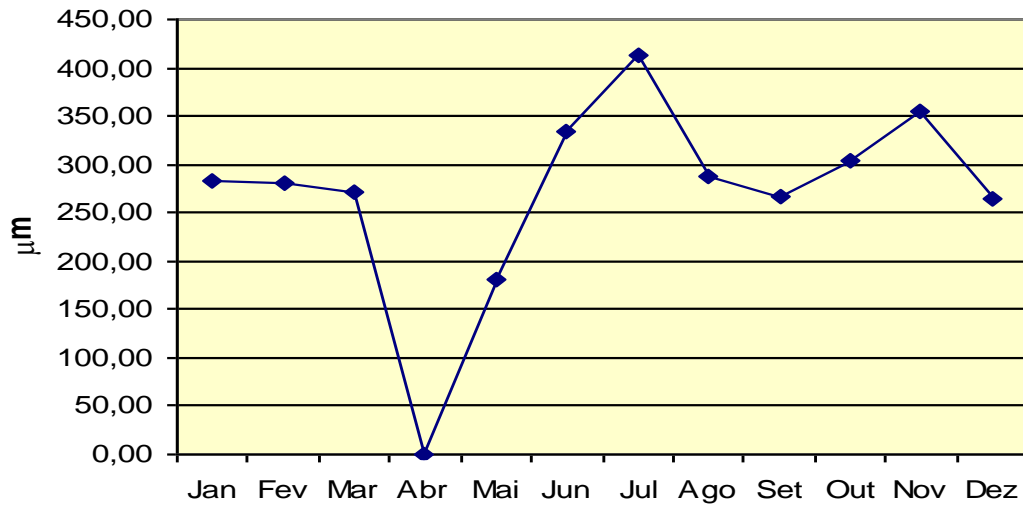


Figura 10 – Dimensão das zonas de belita

.A Figura 11 mostra os valores obtidos para as dimensões dos cristais de alita nos dois fornos da Cimesa, que são ligados diretamente às condições de queima estabelecidas e qualidade da mistura crua utilizada.

Os dois fornos da CIMESA foram alimentados pela mesma mistura crua. Nos meses de maio a agosto houve uma queima acentuada ocasionando crescimento dos cristais de alita. A meta estabelecida pela CIMESA é entre 20 e 25  $\mu\text{m}$ , o que praticamente não foi possível durante a amostragem.



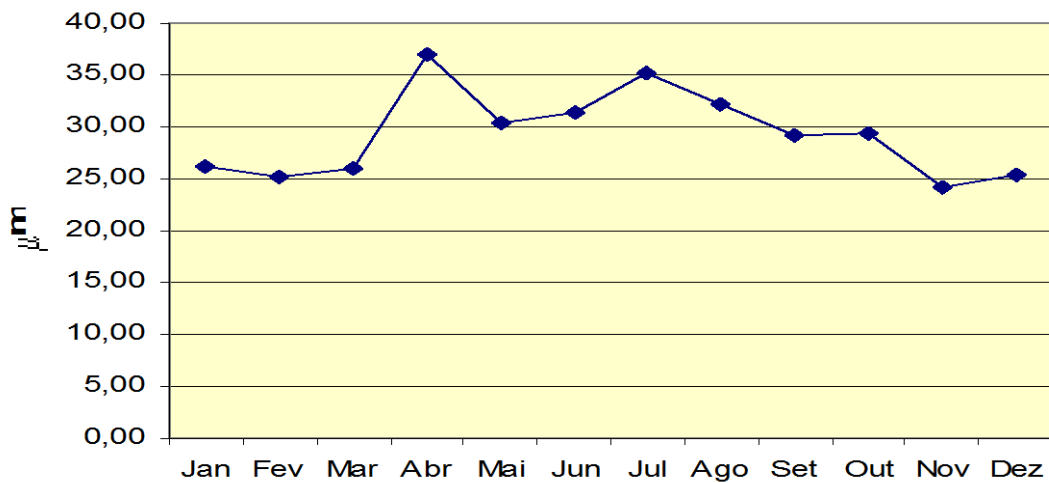


Figura 11 – Dimensão média dos cristais de alita da Cimesa

A Figura 12 mostra os percentuais do principal constituinte do clínquer, a alita. Neste trabalho observou que quanto menor o percentual de alita mais difícil de moer e menos reativo ficou o clínquer. A meta estabelecida pela CIMESA é maior que 70%. O aumento na quantidade de cristais de belita prejudicam a moagem e qualidade do cimento. Este cristal é mais difícil de moer e menos reativo.

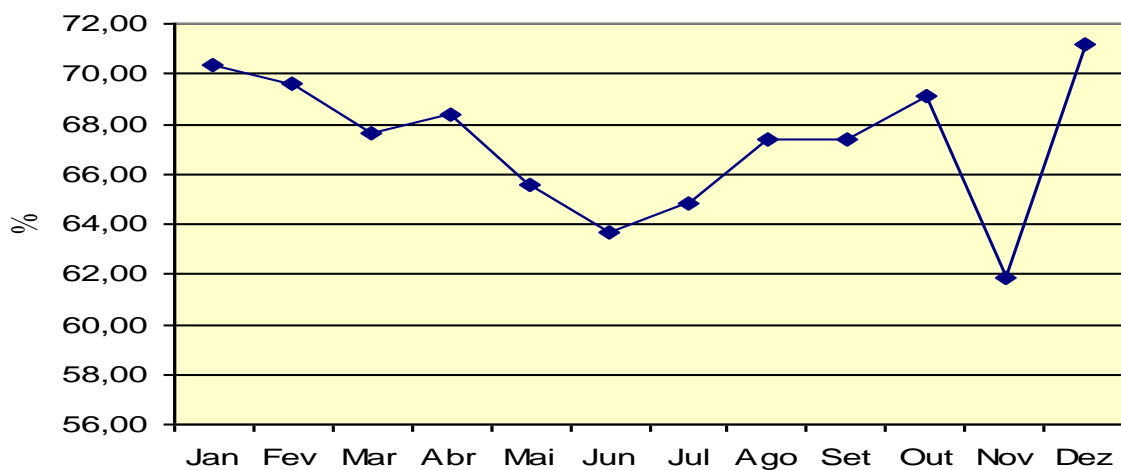


Figura 12 – Porcentagem de alita no clínquer

A Figura 13 demonstra os resultados médios dos dois fornos de moabilidade comparados ao consumo específico de energia elétrica no moinho de cimento. O resultado de moabilidade é dado em percentual, o consumo específico de energia elétrica é dado em kwh/ton. Este indicador representa a quantidade de energia para se produzir uma tonelada de cimento, no período da amostragem a meta da CIMESA era de 34,5 kwh/ton.

Como foi mencionada anteriormente a moabilidade do clínquer influencia na moagem de cimento, de acordo com os resultados de moabilidade o moinho de cimento variou em sua produtividade, acompanhando a tendência da qualidade do clínquer. O resultado de moabilidade foi ocasionado pelas características dos clínqueres produzidos, para ser considerada boa deve estar abaixo de 32%.

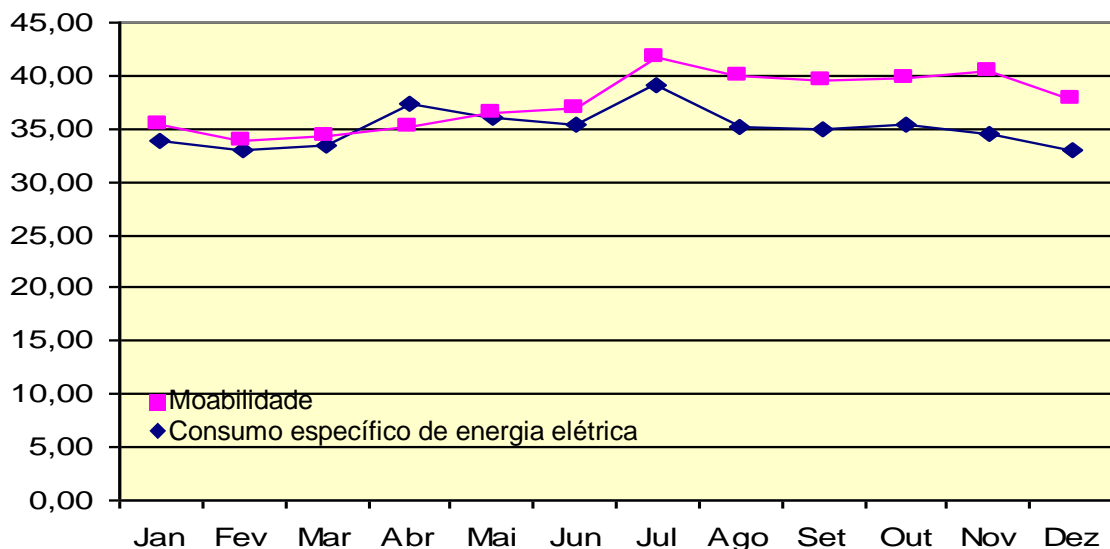


Figura 13 – Comparativo entre consumo específico de energia elétrica e Moabilidade do clínquer

A influência da variação mineralógica do clínquer pode ser observada na Figura 14, com a elevação do desvio padrão da resistência aos 28 dias.

A partir do momento que houve variação no processo, e os minerais de clínqueres acompanharam essa variação, foi verificado que no período da amostragem houve oscilação das resistências à compressão, o qual causou um aumento do desvio padrão. A heterogeneidade da morfologia do clínquer causou distorções nas resistências, em momentos com clínquer bem reativo elevando o resultado de resistência, e com momento com baixa reatividade, o qual não contribuiu para elevação da resistência, comprovando instabilidade do processo.

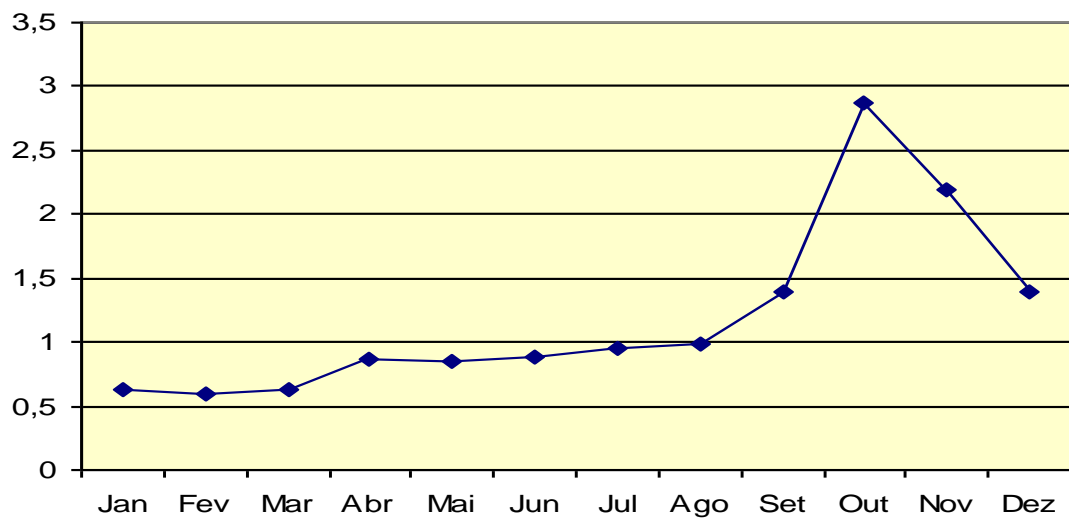


Figura 14 – Desvio R28 CII F 32

## V – CONCLUSÃO

A influência da morfologia do clínquer sobre processo de moagem e qualidade do cimento foram evidenciados. O trabalho desenvolvido demonstrou através de dados quantitativos e qualitativos a partir de análise microscópica de luz refletida problemas no processo e na qualidade do cimento. As séries de características dos cristais que podem ocorrer durante a clinquerização reforçam a importância de um acompanhamento mais rigoroso do processo produtivo. As variações mineralógicas só podem ser identificadas por microscopia ótica.

A preparação da mistura crua é de fundamental importância, uma vez mal controlada toda as etapas seguintes vão sofrer influência, principalmente quando se tem uma grande quantidade de cristais de quartzo com dimensões elevadas. Neste caso, o forno sofre uma alteração nas condições de queima causando uma queima intensa para compensar a granulometria elevada, causando crescimento e surgimento de anomalias no cristal de alita, como foi percebido neste trabalho. Além disso, se essa compensação não for realizada o clínquer não sai do forno bem queimado elevando a quantidade dos cristais de belita, que influencia na moabilidade do clínquer e na qualidade do cimento.

A aplicação industrial do estudo da morfologia do clínquer através da microscopia, com coleta de dados, identificação de cada feição dos cristais formados e o correlacionamento com o processo permite uma avaliação da performance do processo na indústria cimenteira. Com esse estudo também é possível montar critérios para se manter condições ótimas de operação e de qualidade, buscando sempre o ponto ideal de qualidade, produtividade e custo do processo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. 2<sup>o</sup> edição. São Paulo, (1994).

BROWN, L. S, and Swayze, M. A. “Autoclave Tests and the Microscope”, (1938)

CAMPBELL, D. H. Comparative Microscopy of Foreign and North American Clinkers Illinois, (1979).

CAMPBELL, D. H. Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker, second edition. (1999).

FERNANDEZ PARIS, J. M. Microscopia del clinker de cemento portland; manuales y normas. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, (1968)

GOLDA, G. R. Clinker Microstructure by Scanning Electron Microscope, Second Annual Conference on cement and Clinker Microscopy, Dallas, Texas, 1980.

GROSH, S. K. “Portland Cement Phases: Polymorphism, Solid Solution, Defect Structure, and Hydraulicity,” in Advances in Cement Technology, ed S. K. GROSH, Pergamon Press, New York (1983).

HOFMANNER, F. Microstructure of Portland Cement Clinker Holderbank Management and Consulting, Ltd, Switzerland, (1973)

KRAMER, H. Klinkerungleichgewichte und ihre Ursachen. Wiesbaden, (1957)

LÊ CHATELIER, H. Constitution of Hydraulic Mortars, New York, (1887).

LEHMANN, H. e THORMANN, P. Sobre la influencia del tamaño de grano de la caliza em la formacion de los minerales Del clinker. Materiales de Construccion, Madrid, (1964).

LOCHER. F. W. Solid solution of alumina and magnesia in tricalcium silicate. In International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington D.C. (1960).

MAKI, I. Relationship of processing to clinker properties, influence of components. In International Congress the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, (1986).

RANKIN, G. A. and Wright, F. E. Ternary System CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, American journal of Science, (1915)

RICHARDSON, C. Conclusions to Be Drawn from Preceding Investigations and Outline of problems to be Studied, Zement, (1904).

TORNEBOHM, A. E "The Petrography of Portland Cement", Torudustrie Zeitung, 1987.

WOEMANN, E. Decomposition of Alite in Technical Portland Cement Clinker, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement Paper II. Washington, D.C. (1960)