

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de mestrado

Análise da aglomeração a frio no processo
HPS (Hybrid Pelletized Sinter) com ênfase
nas matérias-primas envolvidas

Autor: Aécio Januzzi

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Abril – 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Aécio Januzzi

**ANÁLISE DA AGLOMERAÇÃO A FRIO NO PROCESSO
HPS (Hybrid Pelletized Sinter) COM ÊNFASE NAS MATÉRIAS-PRIMAS
ENVOLVIDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008

Agradecimentos

Ao Professor Paulo Roberto G. Brandão e ao amigo José de Alencar dos Santos meus sinceros agradecimentos.

Ao colega Raimundo Nonato B. Braga obrigado pela ajuda e pelo apoio.

Aos meus familiares, na pessoa de minha esposa e filhos obrigado pela paciência e pela ajuda recebida.

4.2.2.3 – Análise por microscópio eletrônico de varredura	37
4. 2.3 – Outros métodos de caracterização	38
4.2.3.1 – Ensaios de classificação por peneiramento.....	38
4.2.3.2 – Análise de área superficial específica	38
4.2.3.3 – Análise de reatividade pelo método Wührer.....	41
4. 3 – Plano de trabalho desenvolvido	41
4.3.1 - Caracterizações das diversas matérias-primas.....	41
4.3.2 – Estudos da aglomeração a frio no HPS.....	42
4.3.3 – Adequações das matérias-primas.....	44
4.3.4 – Validações do processo.....	45
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1- Análise da representatividade da amostragem.....	46
5.1.1 – Minério de ferro sinter-feed Andrade	47
5.1.2 – Cal virgem calcítica	48
5.1.3 – Serpentinó	50
5.1.4 – Calcário calcítico	51
5.1.5 – Minério de ferro-manganes	52
5.2 – Caracterização tecnológica das matérias-primas	54
5.2.1 – Caracterização da composição química	54
5.2.1.1 – Análise química quantitativa por via úmida	54
5.2.1.2 – Análise qualitativa por FRX	55
5.2.2 – Caracterização da composição mineralógica, forma e textura	57
5.2.2.1 – Análise por DRX	57
5.2.2.2 – Análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV)	59
5.2.3 – Outros ensaios de caracterização realizados	73
5.2.3.1 – Análise da distribuição granulométrica das matérias-primas.....	73
5.2.3.2 – Análise da área superficial específica	78
5.2.3.3 – Análise da reatividade da cal método Wührer	80

5.3 - Estudo da aglomeração a frio no HPS	82
5.3.1 – Micropelotização no tambor de mistura.....	82
5.3.1.1 – Regime de operação do misturador	83
5.3.1.2 – Índice de granulação	85
5.3.2 – Quase-partícula nos discos de pelotização	86
5.3.2.1 – Regime de operação do disco de pelotização	86
5.3.2.2 – Formação da quase-partícula	87
5.3.3 – A aglomeração a frio no HPS da Usina de Monlevade	90
5.3.3.1 – Formação das micropelotas no tambor de mistura	90
5.3.3.2 – Formação das quase-partículas nos discos de pelotização	94
5.3.3.3 – Etapa de recobrimento com combustível sólido	97
 5.4 – Adequação das matérias-primas	 100
5.4.1 – Serpentinó	100
5.4.2 – Calcário Calcítico	101
5.4.3 – Minério de Manganês	102
5.4.4 – Minério de ferro sinter-feed Andrade	103
5.4.5 – Cal virgem calcítica	107
 5.5 – Validação do processo	 113
5.5.1 – No tambor de mistura	114
5.5.2 – Nos discos de pelotização	116
5.5.3 – No tambor de cobertura de coque	118
5.5.4 – Na máquina de sinter	119
 6 – CONCLUSÕES	 121
 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 123
 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 124

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1- Mapa de localização da Mina do Andrade, da Usina de Monlevade e algumas minas do Quadrilátero Ferrífero.....	1
Figura 1.2 – Processo convencional de sinterização.....	2
Figura 3.1- O processo HPS comparado ao processo de sinterização convencional (adaptado de Sakamoto et al.,1993).....	10
Figura 3.2 - Estrutura da quase-partícula (adaptado de Niwa et al., 1990).....	11
Figura 3.3 - Efeitos da adição de pellet-feed nas propriedades do HPS (adaptado de Niwa et al. 1990).....	12
Figura 3.4 –Tendência de melhorias do processo HPS após os primeiros resultados industriais (adaptado de Niwa et al. 1990).....	14
Figura 3.5 - Comparação entre o sínter convencional e o sínter HPS (adaptado de Sakamoto ,op.cit).....	16
Figura 3.6 – Etapa de segregação no SSW (Segregation Slit Wire) implantado na Usina de Monlevade.....	16
Figura 3.7 - Fluxograma da instalação de beneficiamento da Mina do Andrade...	18
Figura 3.8 – Comparação entre as curvas granulométricas da mistura da NKK e da Usina de Monlevade (adaptado de Borges et al.,2004).....	19
Figura 3.9 – Adequação da curva granulométrica da mistura após o HPS.....	20
Figura 3.10 – Tipologias de minérios existentes na Mina do Andrade (Januzzi,1999).....	21
Figura 3.11 – Diagrama esquemático do processo de sinterização	24
Figura 3.12 – Etapas do processo de sinterização	27
 Figura 4.1- Discos de Pelotização na Usina de Monlevade.....	 30
Figura 4.2 – Tambor de “coating” para camada de cobertura de combustível.....	31
Figura 4.3 – Fluxograma do processo HPS na Usina de Monlevade.....	31
Figura 4.4 – Ponto de coleta das amostras de matérias-primas.....	32
Figura 4.5 – Quarteamento das amostras.....	32
Figura 4.6 – Fluxograma para tratamento das amostras coletadas.....	33
Figura 4.7 – Interação entre um feixe de elétrons e a amostra sólida (fonte: notas de aula da disciplina Métodos de instrumentação e análise da UFMG).....	35

Figura 4.8 – Conceito de formação da monocamada (fonte: notas de aula da disciplina Métodos de instrumentação e análise da UFMG).....	39
Figura 4.9 – Ponto de coleta da amostra de micropelotas	42
Figura 4.10 – Ponto de coleta da amostra de quase-partícula	43
Figura 4.11 – Ponto de coleta da amostra de quase-partícula na saída do tambor de cobertura	43
 Figura 5.1 – Qualidade química da amostra de SFAN comparada com os dados do ano de 2006	47
Figura 5.2 – Distribuição granulométrica da amostra de SFAN comparada com os dados de 2006	48
Figura 5.3- Qualidade química da amostra de cal comparada com os dados de 2006	49
Figura 5.4 – Distribuição granulométrica da amostra de cal comparada com os dados de 2006	50
Figura 5.5 – Qualidade química da amostra de serpentinito comparada com os dados de 2006	50
Figura 5.6 – Distribuição granulométrica da amostra de serpentinito comparada com os dados de 2006	51
Figura 5.7 – Qualidade química da amostra de calcário comparada com os dados de 2006	51
Figura 5.8 – Distribuição granulométrica da amostra de calcário comparada com os dados de 2006	52
Figura 5.9 – Qualidade química da amostra de manganês comparada com os dados de 2006	52
Figura 5.10 – Distribuição granulométrica da amostra de minério de manganês comparada com os dados de 2006	53
Figura 5.11 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração >1,0 mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma lisa e facetada dos grãos de hematita especular (mais claro) em uma microestrutura foliada (lepidoblástica) com cristais de talco (mais escuro) dispostos nos planos de foliação. Observa-se ainda a baixa ocorrência de poros (pontos negros) no fragmento analisado. Aumento de 300X	60

Figura 5.12 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de diversos fragmentos da fração <1,0 mm e > 0,15 mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de uma visão de diversos grãos amontoados mostrando a forma facetada dos grãos de hematita especular, com superfície extremamente lisa, pouca ou nenhuma rugosidade e ausência de poros. Alguns grãos apresentam bordas agudas. Aumento de 400X. 61

Figura 5.13 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em uma partícula da fração < 0,15 mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de grãos extremamente lisos, pouca ou nenhuma rugosidade, aspecto foliado. Aumento de 700X. 61

Figura 5.14 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração >2,0 mm do serpentinito. Trata-se de uma visão geral da superfície do fragmento mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila detectada na DRX. Nota-se a rugosidade dos grãos e a presença de poros (pontos negros) no fragmento analisado. Aumento de 500X 62

Figura 5.15 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <2,00 mm e >0,15mm do serpentinito. Trata-se de uma visão localizada mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila detectada na DRX. Nota-se a presença de um cristal de magnetita (mais claro) que explica a análise de FRX que detectou o elemento químico ferro em concentração média. A rugosidade e porosidade do fragmento é um aspecto notável na amostra analisada. Aumento de 312X 63

Figura 5.16 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <0,15mm do serpentinito. Trata-se de uma visão mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila, a rugosidade excessiva do grão e a porosidade bem marcante. Aumento 1000X 63

Figura 5.17 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de alguns em fragmentos amontoados da fração >1,00 mm do calcário calcítico. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular dos fragmentos, o aspecto da microrugosidade e microporosidade dos grãos. Os fragmentos se mostram com forma arredondada, com a superfície coberta por grãos extremamente finos de calcário evidenciando certa facilidade do calcário em aglomerar a frio os grãos finos. Aumento de 14X 64

Figura 5.18 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmentos da fração <1,00 mm e >0,15mm do calcário calcítico. Trata-se de uma visão em detalhe de um fragmento mostrando a forma irregular, o aspecto da microrugosidade e microporosidade. Novamente se observa a cobertura da superfície do fragmento por grãos de calcário extremamente fino. Aumento 100X 65

Figura 5.19 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmento da fração <0,15mm do calcário calcítico. Trata-se de uma visão geral de alguns fragmentos mostrando grãos irregulares e alguns grãos facetados recobertos com material extremamente fino. Aumento 308X 65

Figura 5.20 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um aglomerado de fragmentos da fração >1,0 mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular, o aspecto terroso, a excessiva rugosidade e porosidade. Os grãos do minério de manganês de uma forma particular apresentam o aspecto terroso, com superfície corroída o que leva a interpretar um alto grau de intemperismo neste tipo de material. Aumento 62X 66

Figura 5.21 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um aglomerado de fragmentos da fração <1,0mm e >0,15mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral mostrando duas populações distintas de grãos. A primeira delas (1) na foto, de tonalidade cinza mais clara apresenta os grãos com forma irregular, aspecto terroso, rugosidade bastante pronunciada, tratando-se de minerais de manganês. A segunda população (2), de tonalidade cinza mais escura, apresenta grãos de forma facetada, superfície lisa, tratando-se de grãos de hematita. Aumento 589X 67

Figura 5.22 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmentos da fração <0,15mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral de um aglomerado de fragmentos mostrando a forma irregular, o aspecto da rugosidade e porosidade, os grãos mais finos aglomerados na superfície dos grãos maiores. Aumento 1000X ... 68

Figura 5.23 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de fragmentos da fração >1,0mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular, o aspecto da rugosidade e porosidade, os grãos mais finos aglomerados na superfície dos grãos maiores. Aumento 28X 69

Figura 5.24 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <0,15mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão geral de um aglomerado de grãos de cal mostrando a forma arredondada e o aspecto cimentado . Observa-se porém que esse aspecto arredondado se deve a uma sinterização da superfície do grão causada pela queima do calcário no forno de combustão. Este fato se torna mais claro quando analisamos a imagem 5.25 a seguir. Outro ponto a ser ressaltado é a excessiva porosidade intergranular porém a baixa ou ausente porosidade intragranular. Aumento 1000X 70

Figura 5.25 – Fotomicrografia obtida em MEV-SE de um fragmento da fração <0,15mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão detalhada de um aglomerado de grãos de cal onde se evidencia o aspecto sinterizado da superfície do grão, chegando a adquirir uma superfície de aspecto vítreo. Novamente se pode notar a ausência da porosidade intragranular e a baixa rugosidade do grão individualizado. Aumento 2391X 71

Figura 5.26- Curva de distribuição granulométrica do sinter-feed Andrade 74
 Figura 5.27- Curva de distribuição granulométrica do Serpentinó 74
 Figura 5.28- Curva de distribuição granulométrica do Calcário Calcítico 75
 Figura 5.29- Curva de distribuição granulométrica do Minério de Manganês 75
 Figura 5.30- Curva de distribuição granulométrica da Cal Calcítica 77
 Figura 5.31 – área superficial específica obtida pelo método BET 79
 Figura 5.32- isoterma de adsorção do nitrogênio para a cal virgem calcítica 80
 Figura 5.33 – Carta de controle da reatividade da cal virgem 81

Figura 5.34 - Diagrama esquemático das duas etapas de aglomeração a frio no HPS 82
 Figura 5.35 – Tambor de aglomeração da mistura na primeira etapa de aglomeração a frio no HPS 83
 Figura 5.36 – Regime de operação de um misturador (adaptado de Perez&Serra,1991) 84
 Figura 5.37 –Processo de granulação de uma mistura após a adição de água. Fonte: GranTec Tecnologia 87
 Figura 5.38 Imagem de uma micropelota com aumento de 18X 91
 Figura 5.39 Detalhe da imagem anterior com aumento de 40X 91

Figura 5.40 - Imagem MEV mostrando a forma facetada e superfície lisa do minério Andrade posicionado no núcleo, e uma película envoltória de material fino aglomerado. Aumento de 35X.	92
Figura 5.41- Imagem MEV mostrando a superfície de descolamento da película no núcleo devido sobretudo à característica de baixa porosidade intragranular do minério Andrade. Aumento de 150X.	93
Figura 5.42- Imagem MEV mostrando um detalhe da película que envolve o núcleo . Aumento de 500X.	94
Figura 5.43 – Imagem de uma quase-partícula coletada na saída do disco de pelletização (aumento de 15X)	95
Figura 5.44 – Detalhe da imagem anterior mostrando a auréola de reação existente na interface película-núcleo (aumento 35X)	96
Figura 5.45 – Detalhe da imagem anterior mostrando a presença de poros (aumento 40X)	96
Figura 5.46 – Detalhe das duas películas formadas na quase-partícula após a saída dos discos de pelletização. Aumento de 150X.	97
Figura 5.47 – Imagem de uma quase-partícula na saída do tambor de cobertura de combustível (aumento 15X)	98
Figura 5.48 – Detalhe da Imagem anterior mostrando a auréola de reação (a) com a penetração de cal nos poros da partícula de minério de ferro, a camada com mais cal (b) e a camada com mais finos de minério (c). Aumento de 32X	99
Figura 5.49 - Evolução das frações >2,76mm e <0,105mm no serpentinito no ano de 2007	101
Figura 5.50 - Adequação das frações >4,75mm e <0,105mm no calcário calcítico no ano de 2007	102
Figura 5.51 - Adequação da fração >6,35mm no minério de manganês no ano de 2007	103
Figura 5.52 - Correlação entre os finos contidos no minério de ferro e a granulação da quase-partícula (adaptado de Sakamoto,1989)	105
Figura 5.53 – Experimentos com sinter-feed Andrade acrescidos de pellet-feed...	106
Figura 5.54 – Distribuição granulométrica das cales A e B estudadas e o foco na fração <0,105mm	109
Figura 5.55 - Correlação entre a reatividade, A.S.E e % da fração <0,105mm ...	111

Figura 5.56 – Gráfico comparativo entre as três cales utilizadas nos testes industriais	112
Figura 5.57 – Evolução do percentual da fração >3,0mm na saída do misturador	115
Figura 5.58 – Evolução do tamanho médio das micro pelotas na saída do misturador	115
Figura 5.59 – Evolução do percentual da fração >3,0mm das quase-partículas na saída dos discos de pelletização	117
Figura 5.60 – Evolução do tamanho médio das quase-partículas na saída dos discos de pelletização	117
Figura 5.61 – Evolução do percentual >3,0mm na quase-partícula na saída do tambor de cobertura de coque	118
Figura 5.62 – Evolução do tamanho médio das quase-partículas na saída do tambor de cobertura de coque	119
Figura 5.63 – Comportamento da depressão e da altura de camada na máquina de sinter	120

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
Tabela I. 1 – Minérios de ferro utilizados no processo HPS da NKK Co e da Usina de Monlevade.....	3
Tabela I.2 - Comparação entre os processos de Sinterização – HPS - Pelotização.....	4
Tabela III. 1 – Histórico do desenvolvimento do processo HPS (fonte: Sakamoto et al.,1993).....	9
Tabela III. 3 – Composição percentual dos minerais constituintes nas tipologias de minério da Mina do Andrade (Januzzi,1999).....	22
Tabela III.4 – Necessidades básicas para o desenvolvimento do Processo HPS..	27
 Tabela IV.1 –Trabalhos executados para caracterização tecnológica das matérias-primas	 29
Tabela IV. 2 – Experimentos em escala piloto com as matérias-primas da sinterização.....	45
 Tabela V.1 – Análise química global das matérias-primas amostradas na sinterização	 55
Tabela V.2 – Resultados da análise qualitativa por FRX das amostras de matérias-primas	56
Tabela V.3 – Minerais e fases minerais presentes nas amostras	58
Tabela V.4 – Principais características de forma observadas nas matérias-primas	72
Tabela V.5- Resumo das observações na análise da distribuição granulométrica das matérias-primas	78
 Tabela V.6 – Dados do misturador primário da sinterização da Usina de Monlevade	 85
Tabela V.7 Correlação parâmetros operacionais versus resultados esperados ..	87
Tabela V.8 - Planejamento para caracterização tecnológica de duas cales de fornecedores distintos	108
 Tabela V.9 – Análise química quantitativa por via úmida de duas cales (reatividade em ml HCl 4N)	 109

Tabela V.10 – Análise química quantitativa por via úmida da cal A em faixas granulométricas distintas	109
Tabela V.11 Comparação da performance das cales com um período de referência	113

LISTA DE NOTAÇÕES:

As definições abaixo estão baseadas nas normas NBR 8652 e NBR 8886 da ABNT, versão 01.007 do ano de 1985.

- Rendimento do bolo de síter – é expresso em percentagem e obtido pela seguinte equação $R = \frac{SP}{SP + SR} \times 100\%$, onde SP = massa do síter produto e SR massa do síter retorno
- Sinter-feed – minério de ferro com 100% abaixo de 10,0 mm
- Pellet-feed – minério de ferro com 100% abaixo de 0,15 mm. Quando moído apresenta no mínimo 85% abaixo de 0,044 mm.
- Volume de escória – quantidade de escória produzida por uma tonelada de gusa
- Basicidade do síter – relação entre o teor de CaO e o teor de SiO₂ da escória do síter
- R.D.I. – Índice de degradação sob redução
- R.I – Índice de redutibilidade
- Produtividade da máquina de síter – Relação entre a produção de síter e a área útil da esteira da máquina de síter, equivalente a 24 h de operação contínua.
- Índice de Tamboramento (Tumbler Index) – ensaio normalizado que mede a geração de finos no síter após 200 voltas em um tambor.
- Poder de aglomeração a frio – capacidade de aglomeração de um material influenciada pela área superficial específica, distribuição granulométrica e presença de argilas
- Depressão da máquina de síter – é a pressão negativa formada pela sucção do exaustor medida em mBar ou mmHg
- Permeabilidade da mistura – capacidade da mistura se deixar atravessar com maior ou menor facilidade pelo fluxo de gás succionado pelo exaustor na máquina de síter
- Índice de granulação (IG) – mede o desempenho do equipamento de aglomeração permitindo a comparação entre diferentes equipamentos.

RESUMO

A ArcelorMittal Usina de Monlevade começou a estudar o processo de aglomeração a frio HPS (Hybrid Pelletized Sinter) a partir do ano de 2000 devido à semelhança entre a distribuição granulométrica do minério de ferro sinter-feed Andrade e a mistura de minérios utilizada pela NKK Co.

No início do ano de 2002 a planta do HPS já estava entrando em regime de operação na Usina de Monlevade consumindo 100% do sinter-feed Andrade.

Diferenças nas características das matérias-primas levaram a uma distorção do processo HPS na ArcelorMittal Monlevade em relação ao processo original da NKK Co, chegando a não ser possível em Monlevade a realização da etapa de recobrimento de combustível conforme previsto no projeto original.

Nesta dissertação elaborou-se um minucioso estudo sobre a contribuição das matérias-primas na aglomeração a frio nas etapas do misturador e do disco de pelotização do HPS, visando criar condições para resgatar o recobrimento do combustível nas quase-partículas semelhante ao HPS original conforme idealizado pela equipe da NKK Co, atualmente JFE Steel – Japão.

Assim, foi possível observar a importância da cal virgem na aglomeração a frio, permitindo, após a adequação granulométrica desta, um ganho expressivo no tamanho médio da quase-partícula e na produtividade da sinterização.

Outras mudanças executadas foram na distribuição granulométrica das matérias-primas: calcário, serpentinito e minério de manganês aumentando a quantidade das frações mais finas, mas mantendo-se as mesmas características do minério de ferro sinter-feed Andrade.

Os ensaios em laboratório e testes industriais demonstraram a relevância dos resultados obtidos, causando impacto positivo na performance do processo HPS na Usina de Monlevade.

ABSTRACT

ArcelorMittal Monlevade Steel works was motivated to study HPS (Hybrid Pelletized Sinter) process due to the similarity between the mix of iron ore from NKK Co and the natural fine iron ore from Andrade Mine owned by ArcelorMittal. The study began in the year 2000 and in the first quarter of 2002 the new plant facilities have started up with 100% of the Andrade sinter-feed (fine sinter-feed). Different characteristics in raw-materials have introduced distortions in the original HPS technology in the Monlevade sinter plant. The fuel coating step of the original HPS could not be achieved in Monlevade plant. In this research, a study was carried out on the raw-materials effects in cold agglomeration phenomena and in the process conditions for establishing the conditions to recover the coke coating of the pristine HPS process. The burnt lime properties and its contribution to cold agglomeration were studied, reaching an increase in average size of the quasi-particles and in the sinter machine productivity. The other raw material such as limestone, serpentine, and manganese ore were studied and changes in size distribution (to increase the proportion of smaller fractions) were implemented aiming to improve the agglomeration performance. Laboratory and Industrial scale tests carried out in the Monlevade sinter plant yielded results showing that the changes made in the raw materials caused a positive and relevant outcome.

1 – INTRODUÇÃO

O mundo globalizado vem passando por uma constante transformação mercadológica e tecnológica, impulsionada nos últimos anos, em grande parte, pelo chamado “efeito China”.

O setor siderúrgico não se viu imune a estas mudanças e o reflexo tem sido a crescente escalada nos preços das matérias-primas, combustíveis e aços no mercado mundial e, como consequência, o aumento da produção mundial de aço.

A ArcelorMittal Brasil, inserida no contexto mundial da Siderurgia, buscou em um primeiro momento adaptar-se às mudanças estruturais impostas pelo mercado e mais gradativamente vem buscando a exploração dos diferenciais competitivos existentes em seus domínios, como forma de elevar a capacidade de geração de recursos e aumentar a qualidade e competitividade de seus produtos frente à concorrência.

Tendo como foco esta estratégia, a ArcelorMittal Brasil investiu no ano de 2001 em uma instalação de aglomeração de finos de minério de ferro denominada HPS (Hybrid Pelletized Sinter) buscando otimizar o uso de 100% de minério próprio (sinter-feed com alta percentagem de finos), existente na Mina do Andrade, que distancia 11 km da usina de sinterização (figura 1.1). Até então, eram utilizados somente 45% deste minério, não aproveitando o potencial da Mina do Andrade.

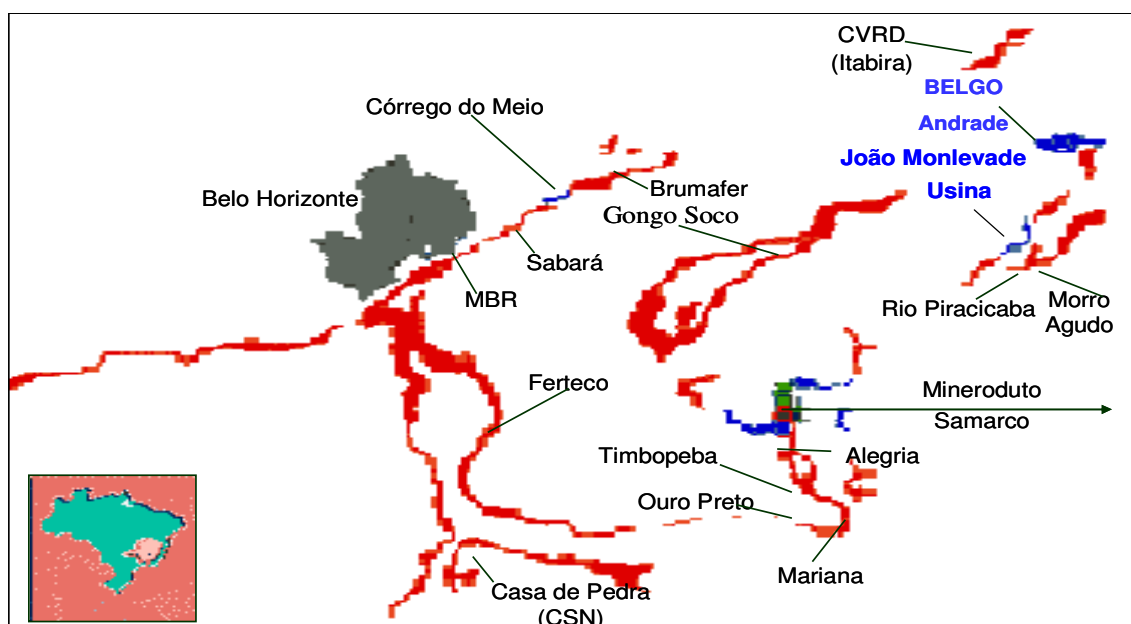


Figura 1.1 - Mapa de localização da Mina do Andrade, da Usina de Monlevade e algumas minas do Quadrilátero Ferrífero (fonte: Relatório Interno da ArcelorMittal Monlevade).

O processo HPS foi desenvolvido durante a década de 1980 pela NKK Co, atual JFE Steel, como forma de poder absorver um pellet-feed, minério de ferro fino proveniente do Brasil, com baixo teor de sílica, alumina e fósforo, em uma mistura com sinter-feed Australiano.

Os resultados obtidos pela equipe da NKK Co nos ensaios realizados em escala piloto (ver capítulo III) justificaram o investimento em uma instalação industrial de HPS na Usina de Fukuyama – Japão, com início de operação no ano de 1988.

Somente 10 anos depois de iniciados os estudos do HPS, ou seja, em 1990, é que foram divulgadas as primeiras notícias sobre este novo processo.

O interesse da ArcelorMittal - Usina Monlevade pelo HPS surgiu no início do ano de 2000, quando da necessidade de aumento da produção de sinter em função do início das operações de um novo alto-forno a coque. Neste contexto, o HPS veio como uma solução para a melhoria da produtividade, das qualidades física e química do sinter, eliminando um investimento na Mina do Andrade.

No processo convencional de sinterização (figura 1.2) a melhoria de produtividade e da qualidade física do sinter se dá pela perda de qualidade química, tal como o aumento do teor de sílica e o conseqüente aumento do volume de escória, já que no processo convencional a etapa de sinterização é realizada por meio de ligações escorificantes (slag bond structures).

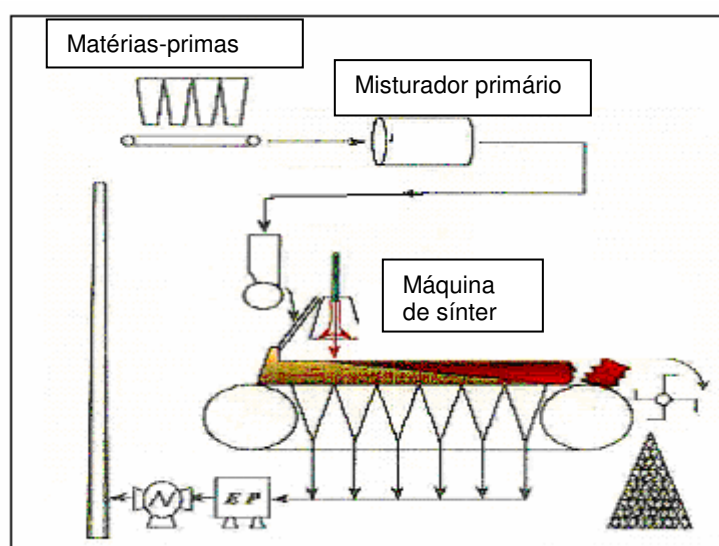


Figura 1.2 – Processo convencional de sinterização (fonte: relatório interno da BELGO).

Há, portanto uma piora nas condições de operação do alto-forno em decorrência da melhora nos indicadores de produtividade da sinterização. Condições

de operação estas que podem ser traduzidas pelo aumento do consumo de coque metalúrgico, pela redução nas taxas de injeção de carvão pulverizado e pelo aumento da quantidade de escória por tonelada de gusa.

No caso específico da Usina de Monlevade, altas participações de sinter na composição da carga metálica do alto-forno obrigam que o sinter tenha baixo volume de escória e baixo índice de basicidade, e em contrapartida que a sinterização tenha alta produtividade. Um contra senso para o caso de uma sinterização convencional.

O processo HPS surgiu justamente para buscar uma solução para o problema acima descrito, ou seja, produção de sinter com baixa sílica e altas taxas de produtividade conforme postulado por seus idealizadores.

O desenvolvimento do processo HPS no Japão se deu com matérias-primas diferentes das atualmente utilizadas pela Usina de Monlevade, principalmente naquilo que diz respeito ao minério de ferro. Na NKK Co o minério base é uma mistura de minérios de origem australiana e indiana (sinter-feed) caracterizados pela excelente performance na aglomeração a frio verificada pelo baixo consumo de cal, com minérios finos do tipo pellet-feed de origem brasileira e chilena (tabela I.1).

Tabela I.1 – Minérios de ferro utilizados no processo HPS da NKK Co e da Usina de Monlevade.

MINÉRIO	MINERAL	ORIGEM	%						
			Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC	< 0,044 mm	Cal (kg/t)
SF	HG	Venezuela	69,39	0,14	0,11	0,24	0,39	30	34
SF	GO	Austrália	60,45	0,11	5,44	2,62	6,77	18	
SF	HG	Índia	67,92	0,41	1,47	1,37	0,39	13	
PF	HG	Brasil	67,80	0,09	0,81	0,63	0,58	64	
PF	HE	Brasil	67,68	0,07	2,42	0,37	0,62	56	
PF	MG	Chile	69,81	26,30	1,22	0,42	zero	75	
PF	MG	Austrália	69,28	29,18	0,02	0,39	zero	84	
PF	MG+HG	Índia	68,44	14,97	2,02	0,31	0,12	65	
MINÉRIO UTILIZADO PELA AM Monlevade									
SF	HE	Brasil	65,50	1,5	4,30	1,20	0,70	18	51

Legenda: PF: pellet-feed; SF: sinter-feed;
 HG: hematita granular; MG: magnetita;
 HE: hematita especular; GO: goethita;
 Cal: consumo específico em kg por tonelada de sinter.

O processo HPS na Usina de Monlevade busca justamente a crescente utilização de um minério de ferro de características diferentes do minério australiano. Textura lepdoblástica, alto teor de hematita especular, cristais alongados, aciculares e planares, baixa porosidade intergranular e intragranular são características comuns no sinter-feed Andrade (ver capítulos 3 e 5), o que confere a este minério um baixo poder de aglomeração a frio, e justifica de certa forma o elevado consumo de cal virgem como aglomerante (ver tabela I.1). Outro fato ainda a ser destacado é o percentual da fração abaixo de 0,044 mm existente no pellet-feed consumido pela NKK Co, muito acima quando comparado com o minério Andrade.

A tabela I.2 mostra uma comparação entre o processo convencional de sinterização e o processo HPS, juntamente com o processo de pelotização.

Tabela I. 2 – Comparações entre os processos de Sinterização -HPS- Pelotização.

Item	Sinterização convencional	Sinterização com HPS	Pelotização
Distribuição granulométrica do minério	Sinter-feed (curva de Astier - <0,125 mm <20%)	Sinter-feed + pellet-feed com distribuição ampla (<0,125 mm ~50%)	Pellet-feed (< 0,044 mm > 85%)
Processo de aglomeração a frio	Tambor de mistura	Tambor de mistura + discos pelotizadores	Discos ou tambor de pelotização
Faixa granulométrica do aglomerado	Micro pelotas de 3 a 5 mm	Quase-partículas de 3 a 10 mm	Pelotas verdes de 8 a 16 mm
Combustível	Finos de coque e/ou antracito junto com a mistura (finos < 3,0 mm)	cobertura de finos de coque (finos < 1,0 mm)	Finos de coque ou coque de petróleo junto com a mistura (pulverizado) mais óleo combustível.

O problema então residiu na possibilidade de se conseguir uma melhor performance do HPS na Usina de Monlevade, quando comparada à performance anterior a este trabalho (ano de 2006), conhecendo e melhorando as demais matérias-primas utilizadas (calcário, serpentinito, cal virgem), visto que o minério não foi alterado em suas características texturais. Durante o decorrer deste estudo, um ajuste químico e granulométrico no sinter-feed Andrade foi necessário, porém não houve mudança de minério.

Neste contexto, o estudo em pauta para esta dissertação de mestrado, mostrou a possibilidade de se aumentar a produtividade da sinterização por meio da melhoria

significativa da permeabilidade da mistura na máquina de sinter, provocada pela melhoria no tamanho médio e na resistência das partículas aglomeradas, denominadas de quase-partículas, nos discos de pelotização do processo HPS da ArcelorMittal Monlevade.

A variável resposta medida em todas as etapas deste trabalho foi a distribuição granulométrica das quase-partículas (tamanho médio e percentual >3,0 mm) e a permeabilidade na máquina de sinter medida pela depressão do exaustor.

O estudo abrangeu o conhecimento do comportamento na etapa de aglomeração a frio de cada matéria-prima envolvida no processo HPS, partindo do emprego de diversas técnicas de caracterização detalhada de materiais e da análise do processo industrial antes e após as alterações sugeridas.

Para a caracterização detalhada de materiais, estudos de mineralogia, química mineral, forma dos grãos, textura, reatividade e área superficial específica foram executados visando compreender a influência de cada matéria-prima na formação da quase-partícula (ver mais detalhes nos capítulos 4 e 5).

Para a análise do processo industrial, gráficos sequenciais foram elaborados evidenciando o comportamento do processo antes e depois das alterações sugeridas (ver capítulo 5).

O desafio deste estudo foi o de restabelecer na ArcelorMittal Monlevade as condições originais do processo HPS desenvolvido pela NKK Co, criando condições para implementar a etapa de recobrimento de combustível (coke coating), fundamental para se conseguir melhorias significativas na qualidade do sinter com baixo teor de sílica. Cabe ressaltar, porém que não foi objeto desta dissertação de mestrado o estudo do recobrimento de combustível propriamente dito, visto se tratar de assunto de grande abrangência e apurada técnica que por si só já dá origem a uma outra dissertação de mestrado ou tese de doutorado.

O minério de ferro sinter-feed pesquisado é aquele lavrado na Mina do Andrade localizada na porção NE do Quadrilátero Ferrífero conforme mostrado anteriormente e que será discutido mais detalhadamente nos capítulos 3 (revisão bibliográfica) e 5 (resultados).

O calcário é proveniente da região de Sete Lagoas, pertencente ao conjunto de rochas do Super-Grupo São Francisco, bem como a cal virgem também oriunda desta região.

O serpentinito utilizado como fonte de MgO (óxido de magnésio) é originado do conjunto de rochas verdes (greenstone-belt) do Grupo Quebra Ossos conforme definido por Schorscher (1978), aflorantes na região de Catas Altas.

O minério de ferro-manganês é originado das formações ferríferas manganésíferas descritas por Door (1969) pertencentes à porção superior da Formação Cauê do Grupo Itabira, Supergrupo Minas, aflorante na região de Belo Vale porção SW do Quadrilátero Ferrífero.

Nos capítulos subseqüentes apresentam-se os objetivos do presente estudo (capítulo 2), uma revisão bibliográfica detalhada e atualizada sobre o desenvolvimento do processo HPS no Japão e na ArcelorMittal Monlevade (capítulo 3), uma descrição da metodologia utilizada (capítulo 4), os resultados obtidos juntamente com discussões sobre tais resultados (capítulo 5), as conclusões (capítulo 6), a relevância dos resultados possibilitando o desenvolvimento do processo industrial (capítulo 7) e finalmente sugestões para trabalhos futuros (capítulo 8).

2 – OBJETIVOS

A idéia central deste trabalho foi a de estudar o grau de influência de cada matéria-prima na aglomeração a frio do processo HPS, criando condições para a execução da etapa de recobrimento de combustível nas quase-partículas.

Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo:

- caracterizar as diversas matérias-primas envolvidas no processo HPS da Usina de Monlevade;
- estudar a contribuição de cada matéria-prima na aglomeração a frio;
- adequar os parâmetros de especificação das matérias-primas visando uma melhoria na performance do processo de aglomeração;
- validar os parâmetros de controle de processo atualmente existentes.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. 1 - Histórico do processo de sinterização

(Cappel e Lungen, 1999).

O processo de sinterização de minérios teve início em 1897 quando T. Huntington e F. Heberlein patentearam um método que envolvia uma forma de reação para retirada do chumbo em minérios sulfetados. Consta no registro da patente a primeira descrição da palavra sinterização. Tratava-se de um processo descontínuo, que tinha como combustível o próprio enxofre do minério e o carvão vegetal, colocados em um pote com uma grelha no fundo, sendo soprado de cima para baixo.

No ano de 1902, Carl R.W. Job adaptou o método para o uso de minério de ferro fino e pirita calcinadas, tendo como combustível o carvão mineral. Carl Job tornou-se então conhecido como o inventor do processo de sinterização para minério de ferro.

A primeira planta de sinterização em pote foi montada no ano de 1904 na usina da Cockerill em Liège na Bélgica.

O aperfeiçoamento do método veio em 1909 com a invenção do processo contínuo de sinterização em carros de grelha feita por A.S. Dwight e R.L. Lloyd. Além dos carros de grelha em movimento, foi proposta também a sucção ao invés do sopro de ar para a queima do combustível. Esta máquina ficou então conhecida como a máquina de Dwight-Lloyd.

Encontrava-se aberto o caminho para a indústria de projetos e equipamentos para sinterização de minério de ferro. Surgia assim a Lurgi S. A, e junto surgia o primeiro ciclo da fase de aglomeração de finos de minério de ferro no mundo.

3. 2 - Histórico do processo de pelletização

(Cappel e Lungen, 1999).

O processo de pelletização foi inventado em 1912 por A.G.Anderson e C.A. Brackelsberg, e somente teve aceitação na indústria de minério de ferro quando em 1926 uma planta piloto com capacidade para 120 t/dia de pellets foi construída nas instalações da Krupp Stahl em Rheinhausen na Alemanha.

Um grande impulso para o processo de pelletização veio dos Estados Unidos quando no final da segunda guerra mundial o minério granulado (lump-ore) da região de Minnesota, intensamente minerada durante a guerra, encontrava-se extremamente escasso. Os taconitos não substituíam o minério rico nos altos-fornos devido ao baixo

teor de ferro (~30%) tendo como mineral predominante a magnetita. A moagem se fazia necessária para o beneficiamento e a faixa granulométrica exigida era de 85% abaixo de 0,044 mm. Nesta faixa granulométrica tão fina, o processo de sinterização não é aplicável, logo, o desafio de uma inovação tecnológica se fazia presente e foi prontamente conduzido pela “Mines Experimental Station of the University of Minnesota” no ano de 1943.

Em 1946, após tomar conhecimento dos estudos realizados em Minnesota, a Suécia estabeleceu um comitê para estudar a viabilidade de pelletizar os concentrados de minério de ferro existentes naquele país.

Estava iniciado assim o ciclo da pelletização, considerado o segundo ciclo da fase de aglomeração de minério de ferro no mundo.

3. 3 - Histórico do processo HPS (Hybrid Pelletized Sinter)

Durante o período de alto crescimento econômico experimentado pelo Japão na década de 1970 a 1980, foram construídas grandes plantas de sinterização e altos-fornos como forma de atender à demanda de gusa que se fazia presente. O aumento das máquinas de sinter se deu mais em função da mudança da carga metálica dos altos-fornos, saindo do “lump-ore” para aglomerados devido à busca constante para aumento de produtividade e redução do custo do gusa (Saito, 1999).

Na década de 1980 a 1990 a economia japonesa entrou em depressão, obrigando às usinas siderúrgicas a redução dos custos fixos como forma de garantia de sobrevivência. Na área de redução (alto-forno e sinterização), grandes esforços foram feitos no sentido de obtenção do aumento de produtividade, o que obrigava a uma redução no consumo de combustível (fuel rate) e ao aumento da redutibilidade do sinter (RI) obrigando às sinterizações reduzir o volume de escória ($\text{CaO}+\text{SiO}_2$) (Niwa et al. 1990).

Neste contexto econômico, o centro de pesquisa da Nippon Kokan Co (atualmente JFE Steel), localizado em Kawasaki, Japão, começou a estudar a partir do ano de 1981 a possibilidade de produzir sinter com baixa sílica para atender à meta de redução de combustível do alto-forno (Sakamoto et al., 1993).

Como forma de reduzir a sílica do sinter-feed, a NKK passou a estudar a adição de pellet-feed natural, com baixo teor de sílica, e baixo custo, implantando uma etapa a mais de aglomeração em discos pelletizadores no processo convencional de sinterização (figura 3.1). Surgia assim o processo de aglomeração a frio denominado HPS (Hybrid Pelletized Sinter).

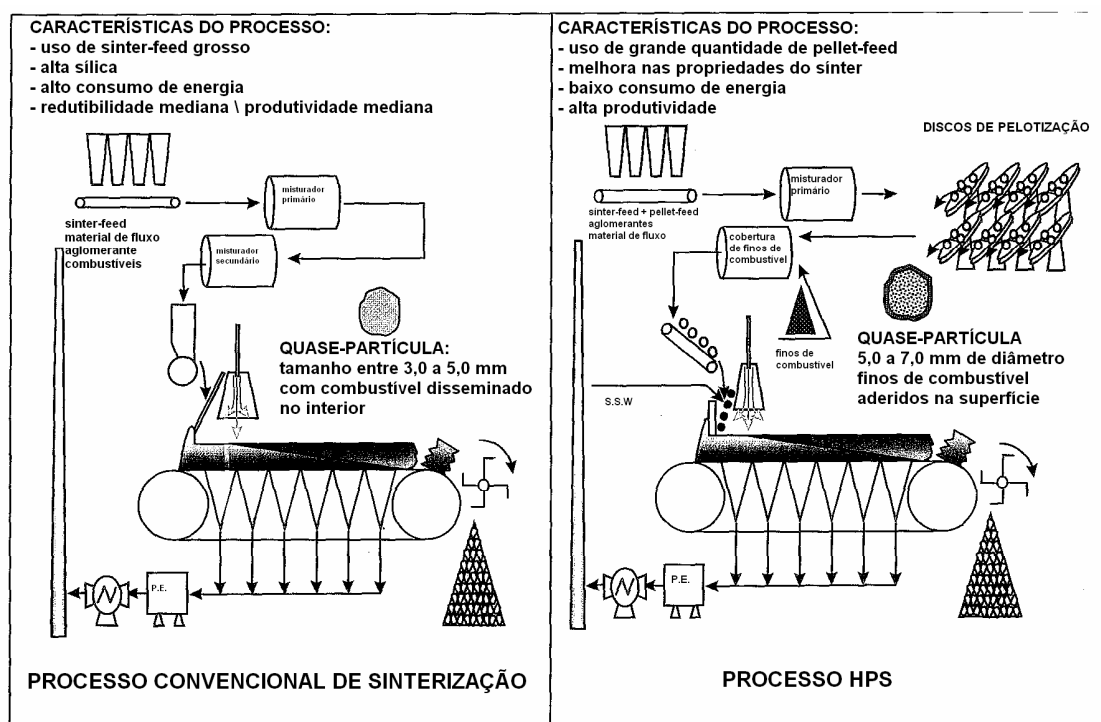


Figura 3.1 - O processo HPS comparado ao processo de sinterização convencional (adaptado de Sakamoto et al. 1993).

Niwa et al. (1990) descrevem o novo processo HPS como um complemento ao processo de aglomeração a frio da sinterização, desenvolvido após uma década de pesquisa e investigação, de características híbridas entre a sinterização e a pelotização, com a possibilidade de absorção de matérias-primas que apresentam uma curva granulométrica mais ampla.

No ano de 1988 a primeira planta de HPS entrou em operação na usina de Fukuyama da NKK Co, Japão. É possível ver pela tabela III. 1 as etapas de desenvolvimento do novo processo e os tempos gastos em cada etapa.

Tabela III. 1 – Histórico do desenvolvimento do processo HPS (fonte: Sakamoto et al., 1993).

PERÍODO DE 1978 A 1985 – Estudo dos Fundamentos e Aplicações: • Desenvolvimento de modelos matemáticos de simulação; • Realização de testes de sinterização em escala piloto (pot sintering tests); • Avaliação da estrutura mineral do sinter produzido nos testes piloto (determinação de fases)
PERÍODO DE 1986 – Testes em planta em escala semi-industrial: • Construção de uma máquina de sinterização com 7m² de área útil; • Operação da máquina em escala semi-industrial por longo tempo; • Desenvolvimento da planta industrial com base nos dados das plantas piloto e semi-industrial
PERÍODO DE 1987 A 1988 – Construção da planta industrial de HPS: • Remodelamento da máquina de sinter n^o 5 de Fukuyama com área útil de 530 m² • Novembro 1988, “start-up” das operações da planta industrial.

3. 4 - O conceito do processo HPS

O processo HPS foi idealizado a partir do ano de 1980 por Sakamoto e equipe, dentro das instalações do centro de pesquisa da Nippon Kokan Co (NKK, atual JFE Steel), com as seguintes metas:

matéria-prima

- possibilitar uma flexibilidade na distribuição granulométrica do minério;
- possibilitar um aumento no teor de ferro já que o pellet-feed geralmente é oriundo de uma concentração, tendo, portanto maior teor de ferro.

sínter

- alta produtividade e alto rendimento sob condições de baixa sílica;
- baixo consumo de energia;
- alta redutibilidade;
- baixo RDI.

Conscientes de que os processos de sinterização convencional (curva de Astier) e pelotização ($85\% < 0,044\text{mm}$) necessitam de uma matéria-prima com uma distribuição granulométrica muito específica, Sakamoto e equipe sentiram então a necessidade de melhorar a etapa de aglomeração a frio na sinterização convencional, agregando os discos pelotizadores e a etapa de recobrimento das quase-partículas com combustível moído abaixo de 1,0 mm, realizada em um tambor de mistura, denominada de etapa de recobrimento (coke coating) como forma de melhorar a transferência térmica e, por conseguinte reduzir combustível no processo. Desta forma, a matéria-prima para o processo HPS poderia ser consumida em uma faixa granulométrica mais ampla, justificando a mistura com o pellet-feed.

O processo HPS se caracteriza pela produção da quase-partícula que é constituída por três camadas de cobertura (figura 3.2), sendo o minério mais grosso no centro, o minério mais fino e o material de fluxo (calcário, cal, serpentinito) na segunda camada e o combustível sólido (coque/antracito) na camada de cobertura.

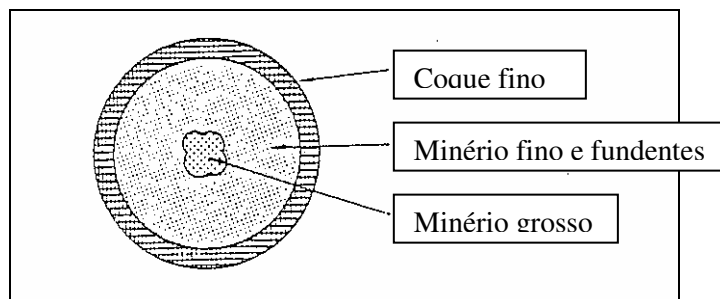


Figura 3.2 - Estrutura da quase-partícula (adaptado de Niwa et al., 1990).

As principais características do processo HPS são:

- I. o processo é capaz de manusear matérias-primas com uma larga distribuição granulométrica predominando a fração fina ($<0,125$ mm ~ 50%): com efeitos positivos nas propriedades do sínter (figura 3.3)

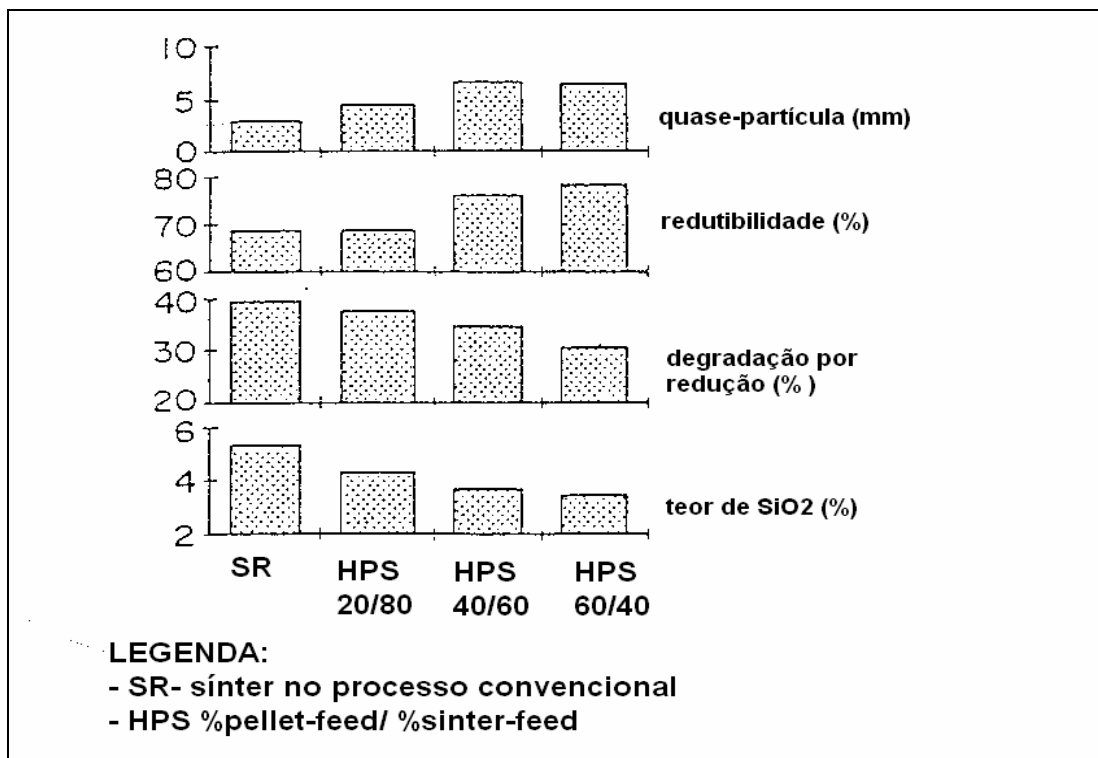


Figura 3.3 Efeitos da adição de pellet-feed nas propriedades do HPS (adaptado de Niwa et al., 1990).

- II. o sínter apresenta uma melhora no índice de redutibilidade ($RI > 80\%$) e no índice de degradação por redução ($RDI < 30\%$) devido ao fato de a microestrutura cristalina do sínter HPS ser constituída basicamente por finos cristais de calcioferritas e hematita, atribuída à taxa de aquecimento e resfriamento e à baixa sílica do minério, (figura 3.3):
- III. devido ao aumento da granulação nos discos de pelletização, uma melhora sensível na permeabilidade da camada de mistura é notada, levando a uma queda nos patamares da pressão de sucção na máquina de sínter,
- IV. devido à melhora na etapa de segregação, no carregamento da mistura na máquina, um aumento no rendimento da sinterização é notado,
- V. o processo HPS é melhor que o processo de sinterização convencional no que diz respeito às características de qualidade do produto.

Como forma de manter uma operação estável no processo HPS, as seguintes recomendações devem ser observadas (Niwa et al., 1990):

- I. deve ser mantida uma operação de granulação estável, considerando que a matéria-prima apresenta uma distribuição granulométrica bem ampla,
- II. a operação de sinterização deve ser eficiente,
- III. as metas de qualidade do sínter devem ser mantidas,
- IV. um refinado controle de umidade na granulação é necessário para a obtenção das quase-partículas porque cada matéria-prima tem seu ponto ótimo de umidade,
- V. o tamanho desejável do combustível deve ser abaixo de 1,0 mm devido ao fato do combustível grosso levar a uma adesão ruim na etapa de recobrimento e conseqüentemente a uma segregação na etapa de carregamento da máquina de sínter.

Com o início de operação da primeira planta industrial do HPS na usina de Fukuyama, da NKK, alguns ajustes foram necessários para a otimização do processo. A meta inicial de 60% de pellet-feed na mistura foi reduzida para 40% em função do consumo elevado de cal (Niwa et al., 1990). Resultados relevantes, porém foram conseguidos, como podem ser vistos na figura 3.4.

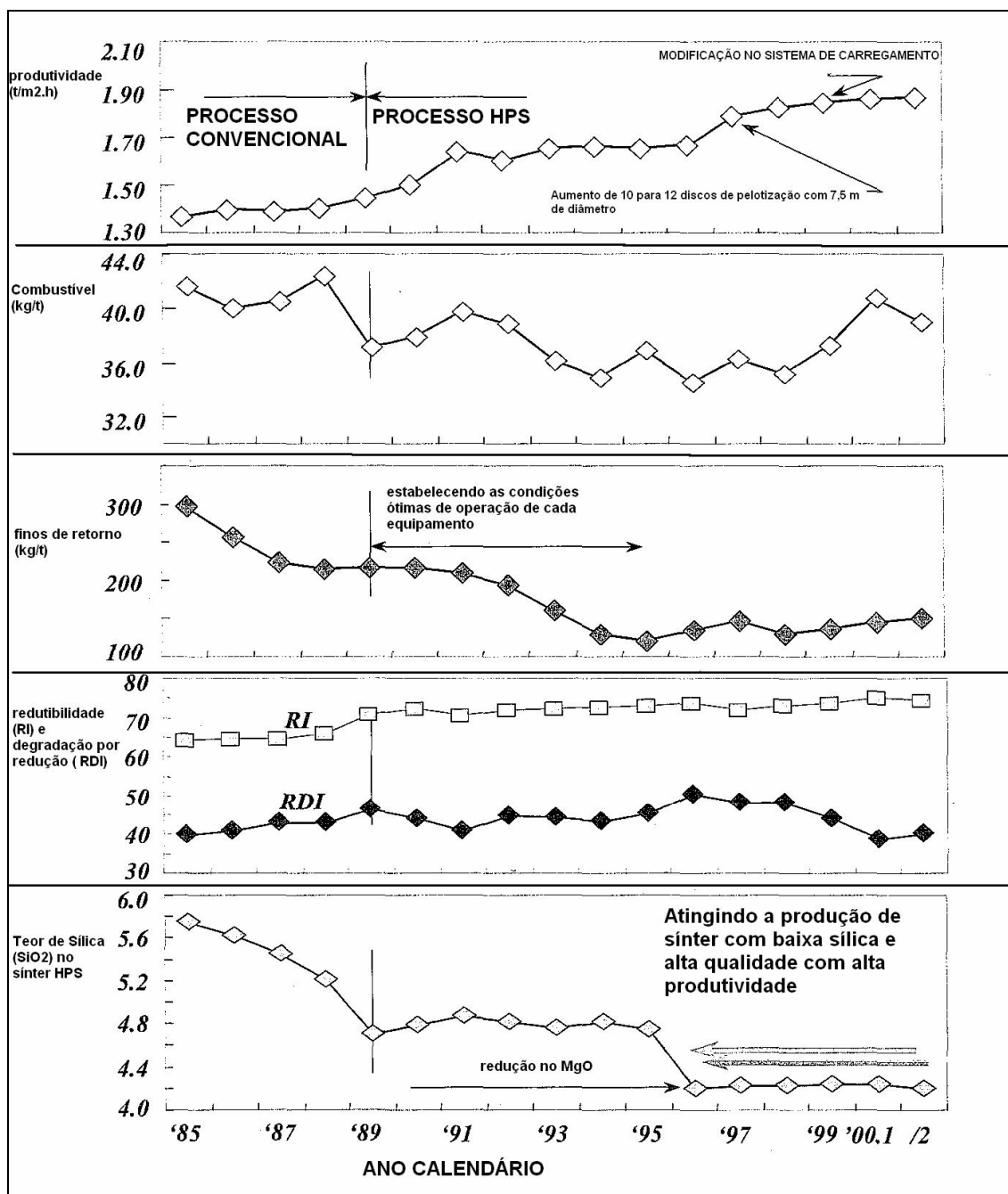


Figura 3.4 – Tendência de melhorias do processo HPS após os primeiros resultados industriais (adaptado de Niwa et al., 1990).

A produtividade aumentou enquanto que a fração < 0,125 mm no minério subiu de 22,5% para patamares de até 40%. O consumo de combustível foi reduzido em 5kg/t devido à etapa de recobrimento, e a mistura de minério teve o tamanho médio reduzido de 2,15 mm para 1,59 mm.

Outra importante característica observada por Niwa et al. (1990) foi a diferença da microestrutura cristalina entre o sinter convencional e o sinter HPS. O sinter HPS é

mais poroso que o sinter convencional, e os cristais de calcioferritas observados no HPS são extremamente finos ($<0,010$ mm) e bem formados, enquanto no sinter convencional a forma prismática predomina com tamanho da ordem de 0,050 mm.

Sakamoto et al., (1993) relatam ainda que a experiência industrial permitiu observar:

- I. de acordo com o modelo de transferência de calor e massa, e na condição de que o modelo de aquecimento é o mesmo da sinterização convencional, o diâmetro das quase-partículas não poderá exceder a 10 mm. Quando isso acontecer, a microestrutura e a mineralogia do núcleo não se transformam devido a um atraso na transferência de calor,
- II. levando-se em consideração o rendimento e a produtividade, o diâmetro das quase-partículas deve ser maior que 3,0 mm,
- III. a camada de “coke-breeze” adicionada na superfície da quase-partícula é mais adequada que o método convencional. Se no processo convencional o diâmetro da quase-partícula, contendo coque em seu interior é grande, então a difusão de oxigênio será suprimida durante a reação de combustão, faltando temperatura para o processo,
- IV. para ganhar em produtividade e rendimento é importante que na operação de carregamento da quase-partícula na máquina de sinterização não haja segregação do coque,

Quanto à estrutura mineral e propriedades do HPS, Sakamoto et al. (1993) observam:

- I. a sílica do sinter foi reduzida de 5,2% para 4,7%
- II. a resistência à queda das quase-partículas aumentou no HPS quando comparada com o processo convencional
- III. o sinter do HPS é formado principalmente por uma fase porosa (figura 3.5) constituída de finos grãos de hematita e pequenas agulhas de calcioferritas envoltas em uma pequena quantidade de escória.

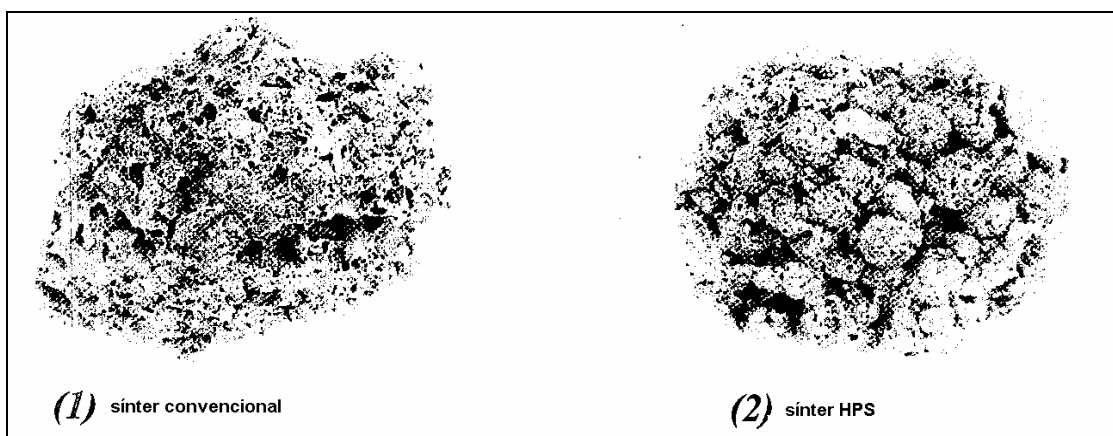


Figura 3.5 – Comparação entre o sínter convencional e o sínter HPS (Sakamoto, op. cit.).

Sato et al., (2001) descrevem uma evolução na questão da segregação do coque relatando que para se conseguir um aumento na velocidade de sinterização é necessário um aumento na permeabilidade da camada de sínter, da mesma forma que para se obter altos rendimentos do bolo de sínter, é importante manter a distribuição de combustível uniforme do topo ao fundo da camada. Tais premissas obrigaram a NKK Co a desenvolver um sistema de segregação no carregamento da máquina de sinterizar baseado em cordoalhas móveis, denominado de SSW (Segregation Slit Wire – figura 3.6).

A função do SSW é de evitar a degradação da quase-partícula e garantir a segregação das partículas maiores no fundo da máquina de sinterizar.



Figura 3.6 – Etapa de segregação no SSW (Segregation Slit Wire implantado na Usina de Monlevade).

Sato et al., (2001) observaram ainda que o SSW provoca um aumento da concentração de combustível na parte superior da camada, o que é um fato que

contribui para o aumento da produtividade, eliminando ou reduzindo a camada conhecida como “soft sinter” (sinter frágil).

Quanto ao desafio de produzir sinter com baixa sílica Sato et al., (2001) observaram que a redução no teor de sílica do sinter convencional e conseqüentemente no volume de escória causa uma degradação nas características físicas do sinter, tais como dureza (medida pelo Tumbler Index) e RDI (Índice de Degradação por Redução). Como o processo HPS trabalha com alta quantidade de pellet-feed, associado à etapa de recobrimento de combustível (coke coating), durante a etapa de sinterização a estrutura de aglomeração por difusão é reforçada, podendo assim ser obtido sinter com baixo teor de sílica.

O sinter com baixa sílica melhorou o índice de redutibilidade (RI) causado principalmente pela diferença na estrutura cristalina do sinter. O sinter convencional apresenta uma estrutura com cristais de hematita envoltos em cristais milimétricos de cálcio-ferrita, enquanto que o sinter produzido no HPS apresenta cristais de hematita porosa envolvidos por cristais micrométricos de cálcio-ferrita porosa e muitos micro-poros.

Mais recentemente Oyama et al (2005) apresentaram melhorias que estão sendo desenvolvidas na etapa de recobrimento do combustível, chegando esta etapa a ser realizada no próprio misturador (1º estágio de aglomeração) por meio da adição de coque fino e calcário utilizando uma correia transportadora em alta velocidade na parte final do misturador, na planta de sinterização número dois da usina de Kurashiki da JFE Steel no Japão.

Foi estudado ainda o recobrimento da quase-partícula com calcário, sendo observada uma mudança na composição mineralógica do sinter.

Como conclusão dos estudos, Oyama et al (2005) mostraram que o recobrimento da quase-partícula com combustível e calcário pode trazer:

- o controle do tempo de recobrimento (coating time) é fundamental para uma boa performance, evitando a destruição das quase-partículas caso haja um tempo excessivo de misturamento;
- a dureza da quase-partícula é melhorada;
- o recobrimento com calcário permite que haja uma ligação entre as quase-partículas formada basicamente por cálcio-ferritas de extrema dureza.

3. 5 - O processo HPS na Usina de Monlevade

A tecnologia do processo HPS foi incorporada à planta de sinterização da Usina de Monlevade a partir de dezembro de 2002, permitindo o uso de 100% de minério fino oriundo da Mina do Andrade, também de propriedade da ArcelorMittal.

O sinter-feed da Mina do Andrade, originado da simples britagem e peneiramento a seco da hematita (figura 3. 7), apresenta como principal característica um alto percentual de partículas abaixo de 0,15 mm, “o que o torna um mix natural de sinter-feed e pellet-feed”, (Borges et al., 2004).

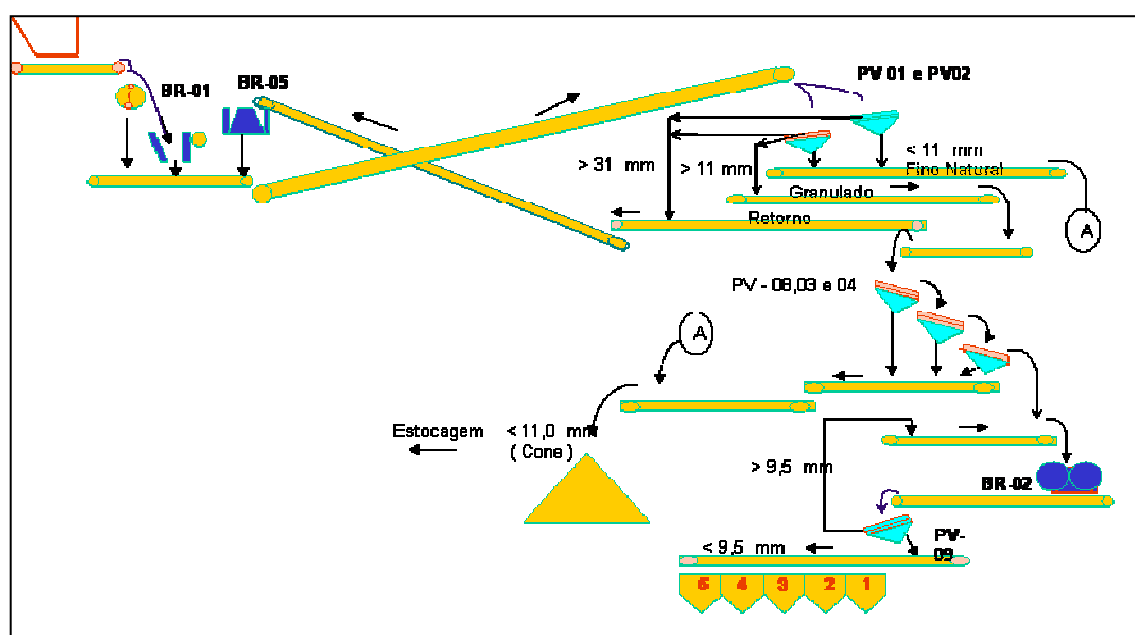


Figura 3.7 – Fluxograma da instalação de beneficiamento da Mina do Andrade (fonte: relatório interno da ArcelorMittal).

Devido à similaridade da distribuição granulométrica entre o minério Andrade (figura 3.8) e a mistura de sinter-feed e pellet-feed usada pela NKK Co na planta de HPS de Fukuyama, a ArcelorMittal optou pela implantação do HPS na Usina de Monlevade.

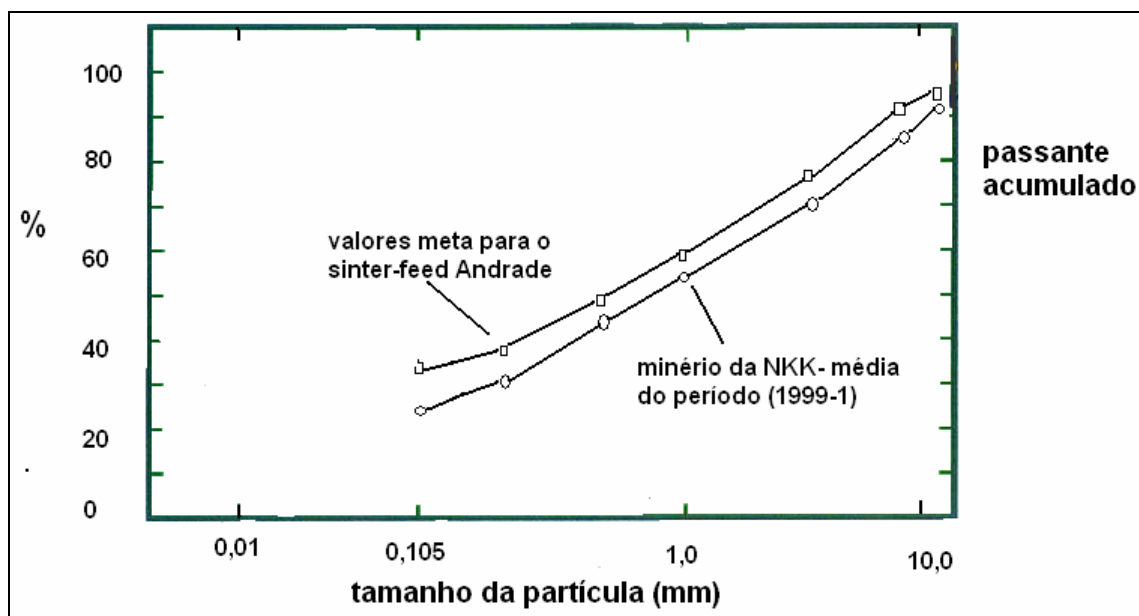


Figura 3.8 – Comparação entre as curvas granulométricas da mistura da NKK e da Usina de Monlevade (adaptado de Borges et al., 2004).

Borges et al. (2004) apontam as vantagens da introdução do HPS na Usina de Monlevade:

- I. possibilidade do uso de 100% de minério próprio da Mina do Andrade
- II. eliminação da compra de minério externo
- III. redução do uso de pelotas na carga metálica do alto-forno
- IV. redução no custo de produção do sinter-feed devido ao aumento de demanda
- V. redução do consumo de combustível na sinterização
- VI. aumento da produtividade ($t/m^2 \cdot 24h$)
- VII. melhoria na qualidade química do sinter.

Uma outra grande vantagem do HPS é a adequação da curva granulométrica da mistura após as etapas de aglomeração, conforme pode ser visto na figura 3.9.

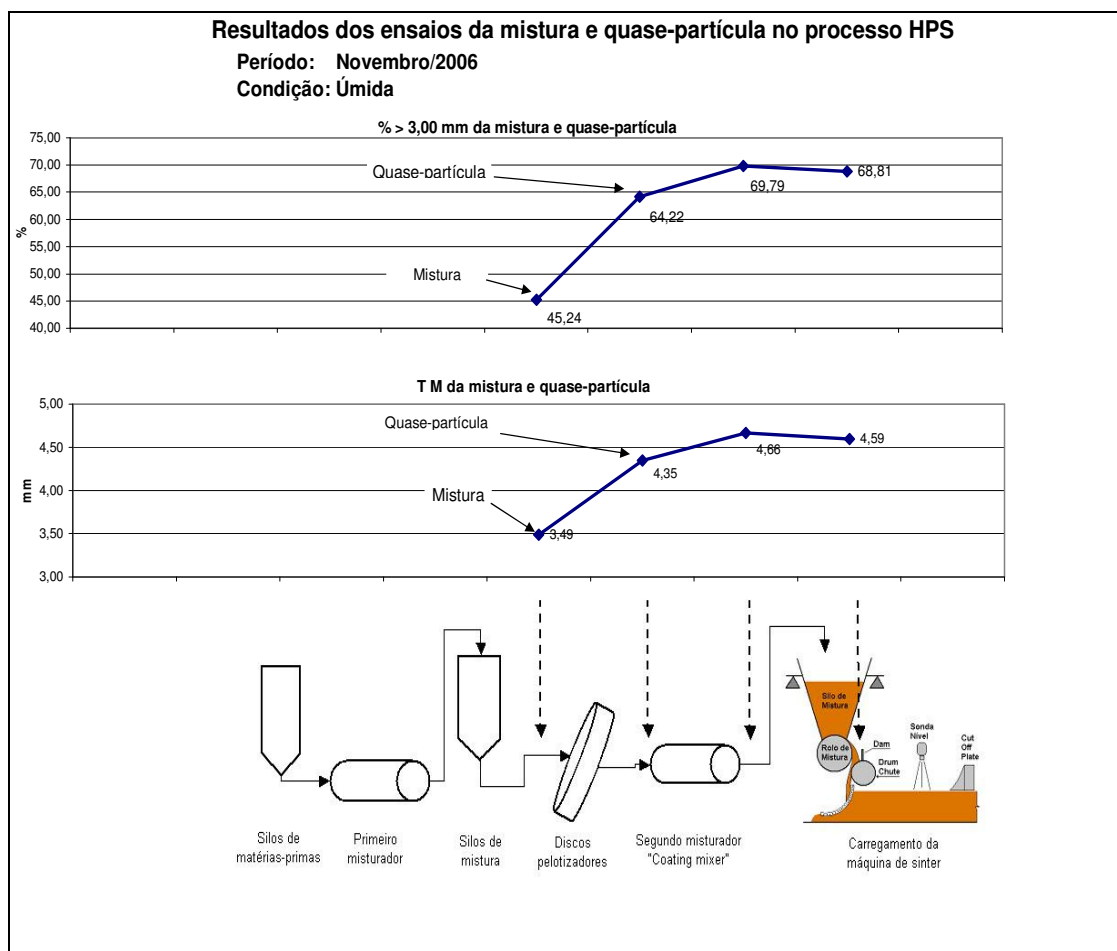


Figura 3.9 – Adequação da curva granulométrica da mistura após o HPS (fonte: relatório interno da Usina de Monlevade).

Borges et al. (2004) relatam ainda a grande dificuldade de se implantar a etapa de recobrimento do combustível (coke coating) nas quase-partículas devido, sobretudo às características das matérias-primas utilizadas pela Usina de Monlevade e a granulometria do combustível.

3. 6 - O minério de ferro da Mina do Andrade

Posicionada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, a Mina do Andrade dista 11km da Usina de Monlevade, interligada por uma estrada de ferro própria. Neste contexto, o papel estratégico desta mina como fornecedora de matéria-prima a custos competitivos é fundamental para a usina.

Em função das características do minério, muitos estudos foram feitos para a implantação de um beneficiamento a úmido, capaz de corrigir a curva granulométrica do sinter-feed nas especificações desejadas pela usina. Estes estudos sempre

esbarraram na quantidade excessiva de finos (<0,15 mm) que eram gerados, e no conseqüente investimento necessário para o tratamento destes finos e posterior utilização nos processos siderúrgicos.

O sinter-feed Andrade é composto basicamente da britagem e peneiramento de um mix de diferentes tipologias de hematita conforme descrito por Januzzi (1999) e apresentado na figura 3.10 :

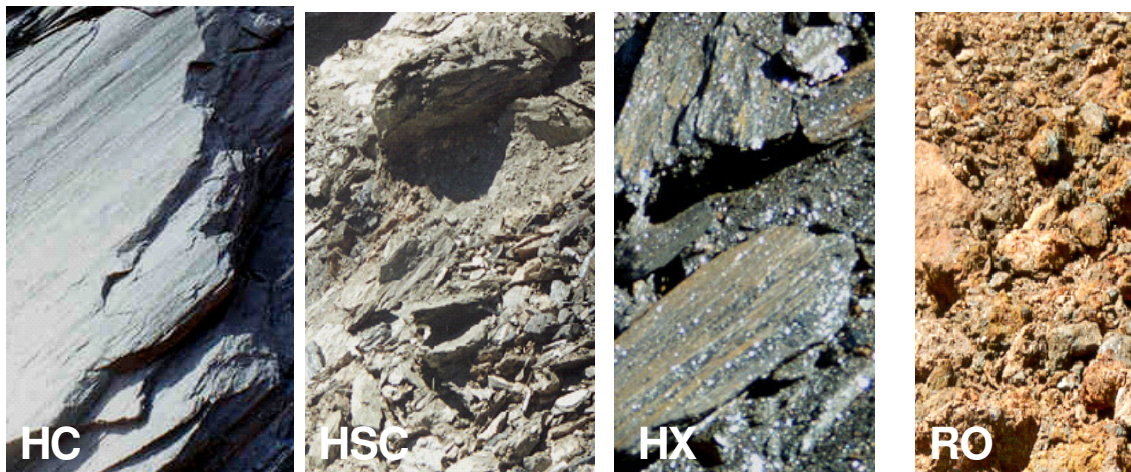


Figura 3.10 – Tipologias de minério da Mina do Andrade (Januzzi, 1999).

As tipologias de hematita estão posicionadas em um contexto estrutural conforme descrito abaixo por Januzzi (1999):

hematita compacta: (minério hematítico) presente em áreas de menor deformação tectônica, apresenta-se com textura granoblástica a granolepidoblástica, com uma foliação (S1) pouco definida e lineação (L1) bem marcada. Nas seções paralelas à lineação os cristais apresentam-se de forma lamelar / tabular. É comum observar um bandamento composicional definido pela diferença de granulação dos cristais e pela alternância de níveis mais porosos, produto da lixiviação de carbonatos (dolomita possivelmente). São observados nesta tipologia de minério cristais de magnetita e martita (kenomagnetita) sub orientados segundo a foliação. Domingues Ramos (1996) observou ainda relictos de magnetita em cristais recristalizados de hematita (sugerindo a presença de magnetita primária), e cristais de specularita pouco estirados. Porfiroblastos com sombra de pressão ligeiramente assimétrica, caracterizada por quartzo, ou cavidades deixadas por carbonatos que foram lixiviados também são observados, mostrando movimento reverso, no sentido da lineação.

hematita xistosa compacta e semicompacta: (minério hematítico/especularítico) ocorre em áreas posicionadas próximo às escamas de cavalgamento, muito próximo às zonas de cisalhamento. Microscopicamente exibem textura lepidoblástica, algumas

vezes lepidogranoblástica, marcada pela foliação (S1) e lineação (Lm) bem definida. Os cristais de especularita apresentam o aspecto tabular a lamelar, gradando para acicular quanto mais se aproxima das zonas de cisalhamento. São observados também agregados lenticulares de hematita com textura granoblástica, envolvidos pela foliação, sugerindo que porções do material foram preservadas durante a fase de deformação (D1), representando uma geração anterior de cristais (Domingues Ramos, op. cit.). São raros de se observar os cristais de martita e magnetita, observam-se somente relictos de magnetita nos cristais de especularita. A mineralogia mais comum, além daquela dos minerais de ferro, é a presença de caolinita sob a forma de palhetas orientadas segundo a lineação e quartzo. Microzonas de cisalhamento são comuns, paralelas à foliação, marcada por cristais idióblásticos de hematita com hábito lamelar a tabular, definindo estruturas do tipo S-C.

hematita xistosa friável: (minério especularítico) posicionadas no interior das zonas de cisalhamento, as hematitas xistosas apresentam a particularidade de se desagregar em forma de ripas e cristais aciculares alongados. São constituídas essencialmente por especularita quartzo. Microscopicamente apresentam textura lepidoblástica, com foliação (Sm) e lineação (Lm) bem definidas. Também é comum observar nesta tipologia a existência de cristais tardios de martita orientados obliquamente à foliação (talvez relacionados à fase de transpressão). No campo são descritos como verdadeiros milonitos de formação ferrífera, de aspecto untuoso ao tato e brilho metálico intenso.

hematita rolada: (minério goethítico) trata-se de uma tipologia que é considerada à parte da correlação estrutural feita acima, mas que adquire um papel importante no processo de aglomeração a frio na sinterização. É uma espessa cobertura de minério rolado proveniente de depósito de colúvio, contendo seixos de formação ferrífera envoltos em uma matriz ferruginosa constituída basicamente de goethita e argilas.

A tabela III. 2 apresenta a composição percentual em massa dos minerais constituintes das diversas tipologias de minério descritas acima, de acordo com Januzzi (1999):

Tabela III. 2 – Composição percentual dos minerais constituintes nas tipologias de minério da Mina do Andrade (Januzzi, 1999).

Minério	Mineralogia (%)						FORMA		
	ESP	HEM	MAR	GOT	MAG	OUT	TMC	TMP	MORFOLOGIA
Hematítico	15,8	83,1	0,4	0,2	0,1	0,4	189	162	Angulosos
Hematítico/Especularítico	48,0	47,2	4,6	zero	0,1	0,1	217	229	Angulosos
Especularítico	81,4	18,0	0,1	0,1	0,1	0,3	558	435	Angulosos e descontínuos
Goethítico	26,7	63,7	2,0	7,3	zero	0,3	146	270	Sub-arredondados

Legenda:

ESP: especularita;

HEM: hematita;

MAR: martita;

GOT: goethita;

MAG: magnetita;

OUT: outros;

TMC: tamanho médio dos cristais em micrometros;

TMP: tamanho médio dos poros intergranulares em micrometros.

Magalhães (2003) ao estudar o grau de influência do minério de ferro sinter-feed na composição final do sínter produzido na Usina de Monlevade, constatou que no sinter-feed Andrade existe uma grande predominância de hematita lamelar com orientação preferencial bem definida. As hematitas granular, granular alongada e goethítica ocorrem de forma secundária juntamente com minerais de ganga tais como quartzo, caulinita e gibbsita.

Outra característica observada por Magalhães (2003) é o fato de o minério possuir baixa porosidade intergranular e intragranular, devido principalmente à textura lepidoblástica dominante.

A composição mineralógica básica do sinter-feed Andrade é predominantemente hematita (Fe_2O_3) na forma especular, correspondendo entre 92,2% a 93,6% em peso e 0,35% a 0,68% de FeO em peso, o que demonstra tratar-se de um minério com baixos teores de magnetita, refletindo baixos valores de suscetibilidade magnética (SM) segundo Magalhães (op. cit.).

Magalhães et al. (2004) observou também que os minérios de adição que na época do estudo eram misturados ao sinter-feed Andrade na Usina de Monlevade, possuem uma excessiva porosidade intergranular e intragranular, o que pode ser uma característica que contribui para o poder de aglomeração a frio melhor destes minérios

em relação ao sinter-feed Andrade, além da predominância de hematita granular em detrimento da hematita lamelar.

Diante das considerações acima, o grande desafio da implantação do HPS na Usina de Monlevade está em aglomerar um minério especularítico, com baixa porosidade intergranular e intragranular, tornando-o uma quase-partícula com tamanho médio entre 4,0 a 5,0 mm com resistência suficiente para ser encaminhada até a máquina de síter, passando antes pela etapa de recobrimento de combustível.

3.7 - O processo de sinterização:

O processo de sinterização consiste na preparação de carga metálica para o alto-forno conforme diagrama esquemático apresentado abaixo (figura 3.11).

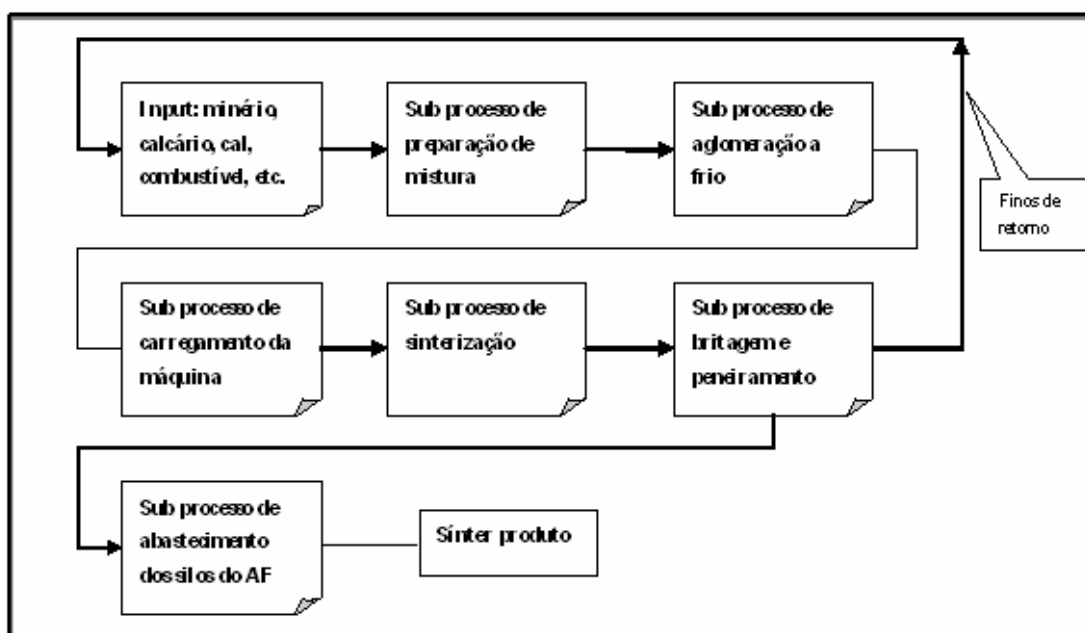


Figura 3.11 – Diagrama esquemático do processo de sinterização.

O conceito de sinterizar é, portanto o ato de aglomerar "a quente" uma mistura de finos de minério de ferro, materiais reciclados, fundentes e aditivos com o uso de combustíveis (finos de coque, antracito, finos de carvão vegetal) distribuídos homogeneamente na mistura. Tal mistura é carregada em uma máquina que contém um fundo na forma de grelhas que permitem a passagem do ar em sucção, que provoca uma depressão (pressão negativa). A temperatura deste processo pode chegar entre 1200 a 1400⁰ C durante um curto espaço de tempo, permitindo assim a fusão desta mistura e formando o síter.

Trata-se, portanto de um conceito convencional de sinterização, já que no processo HPS, o combustível não é adicionado à mistura, mas sim à quase-partícula formando uma camada de recobrimento.

Nas usinas de sinterização tanto do tipo convencional quanto do tipo HPS é dada muita ênfase ao minério de ferro por se tratar do maior constituinte percentual na mistura. Um minério de ferro com boa qualidade química e adequada distribuição granulométrica reflete diretamente na performance do processo. As usinas que possuem o processo convencional utilizam como base minérios que estejam próximos à curva de Astier (Azevedo & Carneiro, 1977: in Magalhães, 2003) que estabelece limites de tamanho para as partículas:

- nenhuma partícula acima de 9,5 mm;
- máximo de 5% com tamanho superior a 6,35 mm;
- 45 a 60% entre 1,0 a 6,35 mm;
- 10 a 25% abaixo de 0,105 mm.

Outra importante propriedade a ser analisada no minério de ferro é o poder de aglomeração a frio, ou seja, a capacidade do minério de formar micro-pelotas. Esta propriedade é medida indiretamente pelo índice de granulação do minério (IG) que será discutido mais detalhadamente no capítulo V.

Os fundentes possuem um papel importante também no processo, tanto para adequação da qualidade química, quanto para facilitar na aglomeração a frio do minério de ferro. Neste sentido se destacam a cal virgem e o calcário.

Os aditivos possuem o papel de agregar ao sínter componentes químicos que são necessários ao alto-forno, destacando-se o serpentinito como fonte de MgO e o minério de manganês.

Um componente extremamente importante no processo de sinterização é o combustível, que deve possuir poder calorífico elevado, boa reatividade e distribuição granulométrica adequada para que não ocorra segregação durante o carregamento da mistura na máquina de sínter.

O processo de aglomeração a frio anterior à etapa de sinterização é de extrema importância para a adequação granulométrica da mistura. Nele, o controle de umidade, os parâmetros de operação do misturador e dos discos de pelotização (especificamente no HPS), tais como: inclinação, rotação, velocidade crítica, local de injeção de água devem ser monitorados e adequados à realidade de cada matéria-prima. Este item será novamente debatido no capítulo V.

Finalmente, a máquina de sinter propriamente dita se destaca pela ocorrência de quatro zonas, diferenciadas pelos tipos de reações que nelas se processam:

- I. zona fria e úmida: consiste na mistura original, a umidade desta zona aumenta à medida que o processo evolui;
- II. zona seca: nesta área a mistura é aquecida rapidamente, e no topo dela a água ligada quimicamente é removida. Nesta área também começa a decomposição dos carbonatos presentes na mistura;
- III. frente de chama: trata-se de uma área com temperatura bastante elevada, onde a combustão do coque ocorre totalmente. Alguns fenômenos ocorrem nesta área, tais como – liberação dos carbonatos, formação de escória primária, ataque aos óxidos que se tornam pastosos e se dissolvem parcialmente, redução dos óxidos, re-oxidação, precipitação dos óxidos de ferro e solidificação e cristalização da escória.
- IV. zona de sinter: uma zona que consiste apenas de sinter e processa o resfriamento do sinter que acabou de ser produzido.

Temos ainda que considerar como importante item de controle do processo de sinterização a capacidade de sucção da máquina de sinter. Este item define o fluxo de gás que irá passar pela esteira de sinterização e conseqüentemente determina o perfil térmico da máquina. A capacidade de sucção influencia diretamente na depressão sob a máquina de sinter que tem correlação direta com a permeabilidade da mistura carregada na máquina.

O conceito de permeabilidade é entendido como a capacidade de uma mistura se deixar atravessar com maior ou menor facilidade pelo fluxo de gás succionado na máquina de sinter.

As etapas do processo de sinterização podem ser então resumidas de acordo com a figura 3.12, onde se observam os insumos de entrada, a etapa intermediária de aglomeração a frio, a sinterização propriamente dita e o sinter produto.

MISTURA CRUA	AGLOMERAÇÃO A FRIO	SINTERIZAÇÃO	SÍTER
Óxidos de ferro Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Hidróxido de ferro ($\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) + ganga (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , K_2O) Combustíveis Carbono+ganga Fundentes Calcário, dolomito Aditivos Serpentinó, manganês	Quase-partícula (aglomerado da mistura crua + água + cal)	Queima do combustível, fusão dos componentes e oxidação	Óxidos de ferro Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Óxidos combinados Ferritas e silicatos de ferro Ganga silicatada Silicato de cálcio

Figura 3.12 – Etapas do processo de sinterização.

A tabela III.3 apresenta as necessidades básicas que levaram ao desenvolvimento do processo HPS e que no processo convencional de sinterização tornaram-se limitadores de eficiência operacional.

Seria possível afirmar após a leitura da tabela III. 4 abaixo que o processo HPS é na realidade uma evolução tecnológica do processo convencional de sinterização.

Tabela III. 3 – Necessidades básicas para o desenvolvimento do Processo HPS.

NECESSIDADE	PROBLEMAS NO PROCESSO CONVENCIONAL	DESENVOLVIMENTO NO HPS
- melhoria na redutibilidade do sínter	- ligações escorificantes devido à grande quantidade de ganga nas matérias-primas - redução do volume de escória limitada devido à resistência do sínter	- controle das fases minerais buscando melhoria da porosidade usando alta quantidade de pellet-feed - produção de quase-partículas densas pela granulação em discos pelletizadores
- economia no consumo de combustíveis	- baixa eficiência de combustão dos finos de coque dentro das micro-pelotas	- introdução da tecnologia da cobertura de coque na superfície das quase-partículas
- redução do custo da carga metálica	- restrição à carga de minérios devido a problemas de permeabilidade na camada a sinterizar	- melhoria na permeabilidade devido à melhoria na granulação da mistura

Conforme teremos oportunidade de verificar nos capítulos seguintes, a aglomeração a frio impacta diretamente na permeabilidade da mistura, que por sua vez impacta na depressão da máquina de sínter. O estudo em pauta buscou justamente atuar na aglomeração a frio.

4 – METODOLOGIA

A busca pelas informações necessárias ao entendimento do problema abordado se deu pelo uso de diversos métodos instrumentais conforme mostrado na tabela IV. 1 abaixo.

Tabela IV. 1 – Trabalhos executados para caracterização tecnológica das matérias-primas.

MÉTODO \ MATERIAL		MINÉRIO DE FERRO	CAL VIRGEM	SERPEN TINITO	CALCÁ RIO	MINÉRIO DE Mn	QUASE-PARTÍCULA
MINERALOGIA TRAMA E MICROESTRUTURAS	DRX	X	X	X	X	X	X
	MEV-BSE e SE	X	X	X	X	X	X
	Microscopia Ótica						X
QUÍMICA	FRX	X	X	X	X	X	
	VIA ÚMIDA	X	X	X	X	X	
REATIVIDADE	WHÜRER		X				
A.S.E.	BET		X				
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	CLASSIFICAÇÃO EM PENEIRAS	X	X	X	X	X	X

Legenda:

DRX: difração de raios-X;

MEV-BSE: microscopia eletrônica de varredura (imagens de elétrons retroespalhados);

MEV-EDS: espectrometria de raios-X por dispersão de energia;

MEV-SE: imagens de elétrons secundários;

A.S.E.: área superficial específica pelo método BET.

FRX: espectrometria de fluorescência de raios-X;

Primeiramente serão discutidas a metodologia de amostragem e a preparação das amostras (item 4. 1). Posteriormente faz-se uma apresentação resumida de cada método instrumental analítico com uma justificativa do que está motivando o uso daquele método (item 4. 2). Finalmente, apresenta-se detalhadamente o plano de trabalho que foi desenvolvido (item 4. 3).

4. 1 – PLANEJAMENTO DA AMOSTRAGEM DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas atualmente empregadas na produção de sinter na Usina de Monlevade são oriundas de diversos fornecedores e se caracterizam pelas variabilidades intrínsecas devido, sobretudo às misturas de diferentes tipologias existentes nas jazidas lavradas.

Foram caracterizadas as seguintes matérias-primas:

- calcário calcítico;
- cal virgem calcítica;
- minério de ferro-manganês;
- serpentinito;
- minério de ferro sinter-feed.

O restante dos materiais envolvidos no processo de sinterização (subproduto, retorno de sinter degradado e combustível sólido) não foram caracterizados devido ao fato de ser creditada pouca influência destes materiais no processo de aglomeração a frio.

4. 1.1 – DEFINIÇÃO DO PONTO DE AMOSTRAGEM

O processo HPS implantado na Usina de Monlevade da ArcelorMittal conta com três discos de pelotização dispostos paralelos conforme figura 4.1.



Figura 4.1 – Discos de pelotização na Usina de Monlevade.

Associado aos discos, na seqüência do processo, foi também implantado o tambor de revestimento de combustível, conforme figura 4.2.

Para uma amostragem representativa de todas as matérias-primas envolvidas no processo HPS da usina de Monlevade, o ponto de coleta das amostras (figura 4.4) foi nas balanças de dosagem de matéria-prima separando por tipo de material. A amostragem foi feita em 24 horas com alíquotas de 0,5 kg retiradas a cada 30 minutos com o auxílio de uma pá de amostragem própria para material fino (pá COPAM), seguindo as normas ISO 3082 e 3085.

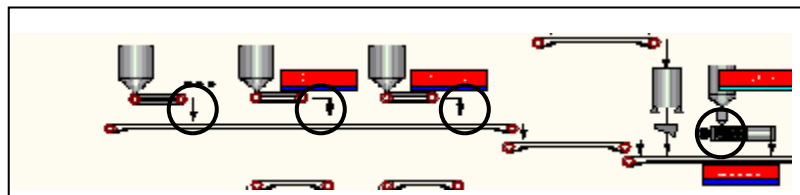


Figura 4.4 – Ponto de coleta das amostras de matérias-primas.

Ao final da coleta foram obtidos aproximadamente 12 kg de material para o desenvolvimento deste estudo.

Especificamente para a cal virgem calcítica a amostra foi coletada no parafuso de alimentação da balança de dosagem (figura 4.4) seguindo o mesmo padrão de amostragem descrito anteriormente.

4. 1. 2 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Todas as cinco amostras coletadas passaram por um processo de secagem em estufa à temperatura de 110°C , com posterior homogeneização com o uso de pá convencional (pá de pedreiro), seguido de quarteamento em cone (figura 4.5) quando então foram retiradas duas alíquotas de 500 gramas e o restante da amostra foi reservado conforme coletada.

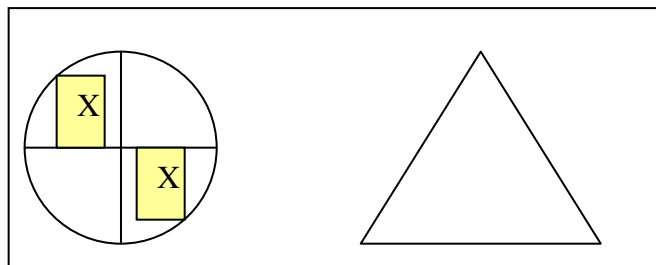


Figura 4.5 – Quarteamento das amostras.

Uma das alíquotas foi encaminhada à pulverização (100% abaixo de 0,044mm) e devidamente homogeneizada e quarteada em duas frações de 250

gramas, sendo uma encaminhada à análise química quantitativa (amostra total) e outra às análises de FRX e DRX.

A outra alíquota de 500 gramas foi encaminhada à classificação por peneiramento para análise granulométrica que será descrita posteriormente neste capítulo.

As amostras que passaram pelo MEV e A.S.E. pelo método BET foram obtidas após o peneiramento juntando-se algumas faixas granulométricas mais características de cada matéria-prima, conforme será descrito no capítulo V.

O fluxograma da figura 4.6 resume os trabalhos de preparação de amostras acima descritos.

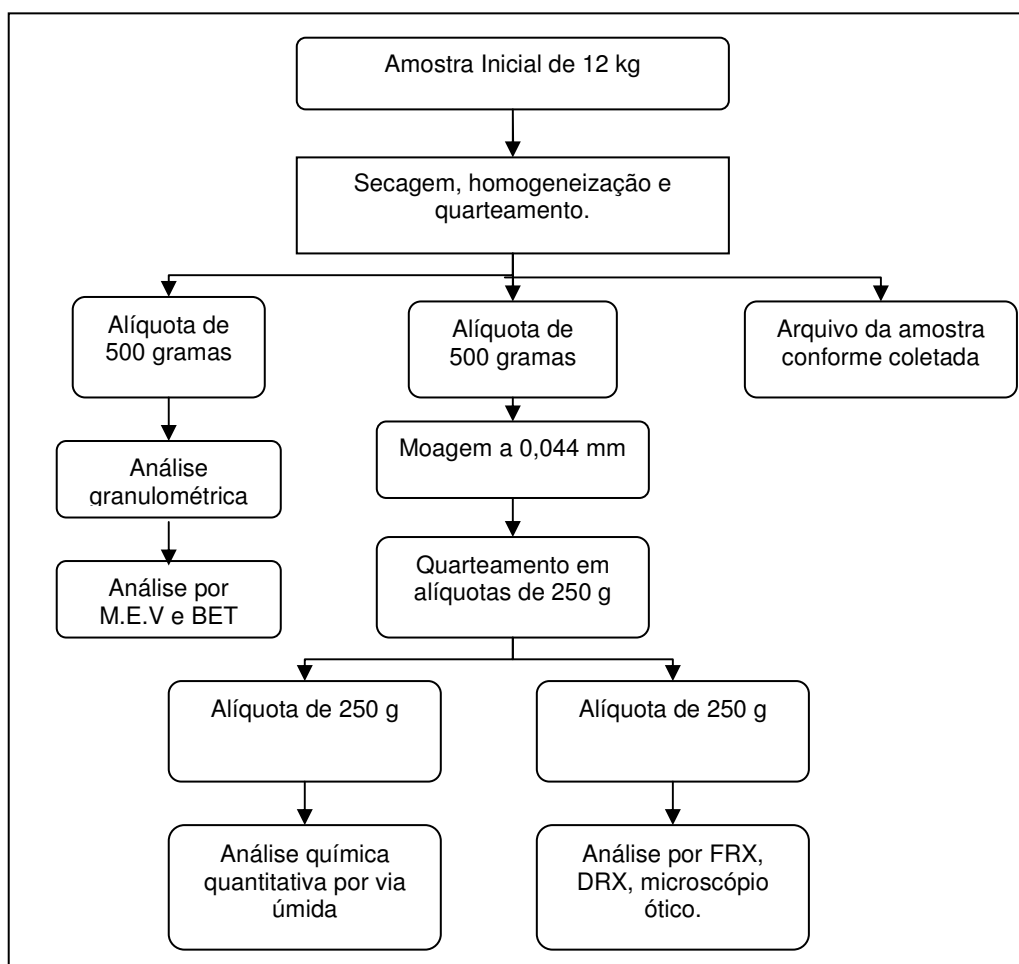


Figura 4.6 – Fluxograma para tratamento das amostras coletadas.

4. 2 – MÉTODOS INSTRUMENTAIS ANALÍTICOS:

4. 2.1 – MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

4. 2.1.1- Análise química quantitativa por via úmida

As análises por via úmida seguiram o padrão de análise por titulação, gravimetria e colorimetria, dependendo do elemento que se está analisando. Foram analisados os elementos característicos de cada matéria-prima, sendo: calcário (CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, P e PPC), serpentinito (MgO, SiO₂, Al₂O₃, Mn, CaO, Cr, P e PPC), cal virgem calcítica (CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, P e reatividade), minério de ferro (Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn, CaO, MgO, P e PPC) e minério de manganês (Fe, Mn, SiO₂, Al₂O₃, P e PPC).

As alíquotas de 250 gramas de cada material coletado foram encaminhadas ao laboratório de análises por via úmida da Usina de Monlevade e entraram na rotina de análises deste laboratório.

Os resultados destas amostras foram comparados aos resultados diários das matérias-primas amostradas rotineiramente (ver capítulo 5), verificando a pertinência dos resultados estatisticamente.

4.2.1.2- Análise química qualitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)

Quando um feixe de raios-X irradia uma amostra, origina uma interação com os constituintes atômicos da mesma a partir de três processos principais: o efeito fotoelétrico, o efeito da dispersão elástica (Rayleigh) ou dos elétrons retroespalhados e o efeito inelástico (ou espalhamento de Compton) onde uma radiação é emitida ocasionando perda de energia ao átomo.

A espectrometria de fluorescência de raios-X ou emissão de RX trabalha justamente com a análise do espectro formado pela emissão de radiação característica de cada elemento durante o espalhamento de Compton, ou seja, durante a emissão de radiações eletromagnéticas originadas do átomo excitado pelos raios-X, após a mudança de raia energética.

O fenômeno de fluorescência de RX é o resultado da emissão de uma radiação secundária. Tal emissão é característica dos elementos presentes no material irradiado, sendo resultante da transição de um elétron, em geral do nível K ou L de energia. A técnica de fluorescência ou emissão de raios-X registra este resultado de excitação, que é traduzido na forma de espectros característicos.

Este método foi escolhido para ser utilizado nos trabalhos de caracterização devido, sobretudo:

- ampla capacidade de detecção
- elevada exatidão
- alta reprodutibilidade
- simplicidade na preparação da amostra
- versatilidade analítica
- limite de sensibilidade muito bom (ppm até ppb)
- caráter não destrutivo da amostra.

4.2.1.3- Microscopia eletrônica de varredura – análise de espectrometria de raios-X por dispersão de energia (MEV-EDS)

A figura abaixo (figura 4.7) mostra os efeitos provocados pela incidência de um feixe de elétrons sobre a superfície de uma amostra, evidenciando as interações elétron – amostra.

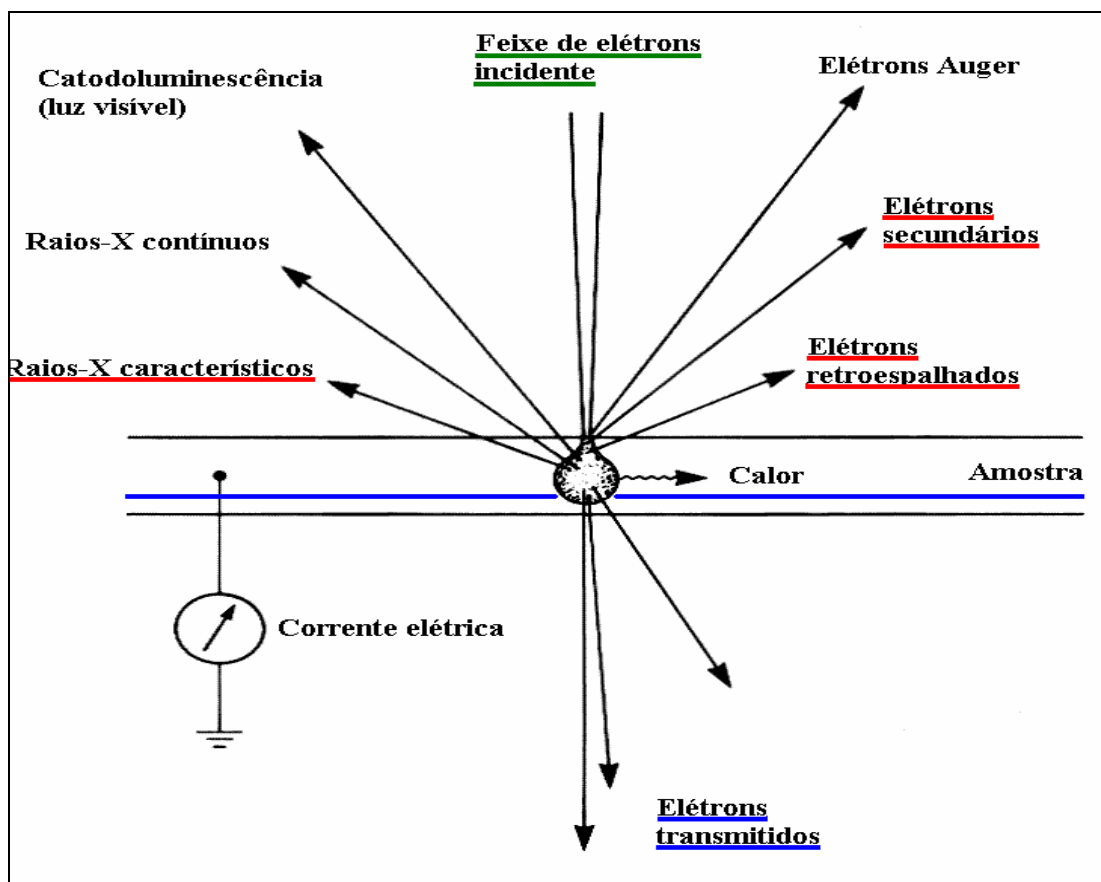


Figura 4.7 – Interação entre um feixe de elétrons e a amostra sólida (fonte: notas de aula da disciplina Métodos de Instrumentação e Análise da UFMG).

Quando um feixe de elétrons incide sobre uma amostra em um sistema a vácuo, também são emitidos raios-X que podem ser detectados por espectrômetros, proporcionando assim uma leitura sobre a composição química do mineral irradiado.

A espectrometria por dispersão de energia (EDS) baseia-se nas energias produzidas pela amostra a partir de uma radiação. O feixe primário de elétrons penetra na amostra de 1µm a 2µm excitando os átomos da substância a ser analisada, irradiando raios-X característicos, permitindo assim análises pontuais.

O objetivo principal de se ter utilizado este método foi o da investigação detalhada de componentes químicos capazes de auxiliar na investigação mineralógica das fases envolvidas.

As análises foram realizadas no laboratório de microscopia eletrônica de varredura da ArcelorMittal Monlevade em um microscópio eletrônico de varredura, marca PHILIPS, modelo XL30 equipado com microanalisador de raios-X EDAX.

4.2.2 –MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA, FORMA E TEXTURA:

4.2.2.1- Análise por difratometria de raios-X (DRX)

Este é um método muito importante desta etapa de caracterização devido à necessidade de se conhecer as fases mineralógicas envolvidas em cada matéria-prima. É de conhecimento amplo que o processo de aglomeração a frio tem uma relação direta com fases mineralógicas, principalmente com os argilo-minerais e carbonatos, que têm o papel de aglomerantes. O objetivo deste estudo é identificar qual matéria-prima contribui mais acentuadamente para o efeito de aglomeração.

O método analítico de DRX permite o conhecimento das fases mineralógicas envolvidas em cada matéria-prima.

Os raios-X empregados neste método ocupam um intervalo muito estreito, na faixa de comprimento de ondas (0,7 a 2,3 Å). Esta radiação ocorre no momento em que uma partícula carregada eletricamente e com energia cinética suficiente é desacelerada devido ao choque com um alvo. O espalhamento destes átomos, denominado de espalhamento Rayleigh é denominado de difração quando o raio incide seguindo a lei de Bragg.

O método mede a distância d característica do empacotamento cristalino de cada material.

Existem quatro condições a serem atendidas para que ocorra a difração dos elétrons:

- é necessário que as ondas tenham um mesmo comprimento de ondas
- é necessário que haja reflexão com o mesmo ângulo de incidência
- é necessário que haja interferência construtiva nas ondas que estão se propagando
- é necessário que as ondas se propaguem na mesma direção.

O resultado da análise será um difratograma onde será possível identificar a composição mineralógica do material analisado, tendo como base padrões de análise fornecidos pelo ICDD (International Center for Diffraction Data).

A técnica da difratometria de raios-X foi empregada neste trabalho como uma ferramenta auxiliar que objetivou averiguar a mineralogia de cada matéria-prima. Trata-se de importante contribuição para o estudo da caracterização mineralógica.

O aparelho utilizado foi um difratômetro PHILIPS, com gerador PW1830/40 e goniômetro PW3020/00, com potência de 40kV, corrente de 20mA, tubo de cobre e ângulo 2θ entre $3,53^\circ$ a $73,91^\circ$ existente no Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG.

4.2.2.2- Análise por microscópio óptico

A microscopia óptica é uma técnica amplamente difundida e conhecida como a principal ferramenta para a determinação mineralógica, estudo de tramas e descrição e análise de microestruturas e relações entre fases mineralógicas.

O microscópio óptico estereoscópico permitiu aumentos de 15 a 40 vezes do tamanho original das micropelotas e das quase-partículas, permitindo que fases mineralógicas fossem selecionadas para a posterior visualização no MEV.

O aparelho utilizado foi o microscópio óptico estereoscópico (lupa), para luz refletida (difusa e especular) e transmitida da marca Leitz/Leica, modelo MZ6, com câmera digital Cânon PowerShot S80 existente no Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas da EEUFMG.

4.2.2.3- Análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Este método consiste em incidir em uma amostra um feixe de elétrons (figura 4.7) com o mínimo de diâmetro possível ($< 40 \text{ A}^\circ$), e obter imagens por meio da leitura da emissão dos elétrons retroespalhados (imagem topográfica BSE) ou da leitura da emissão de elétrons secundários (imagens SE).

O MEV propicia aumentos elevados (até 150.000 vezes), com excelente resolução pelo fato de trabalhar com comprimentos de onda muito pequenos. Tal característica facilita em muito o detalhamento e observação de diversos aspectos morfológicos e microestruturais da amostra.

As imagens amplamente utilizadas neste estudo foram as de elétrons retroespalhados (BSE) e elétrons secundários (SE).

A escolha do método foi devido ao fato de se tratar de uma potente ferramenta para o estudo da forma, trama e microestruturas das amostras de matérias-primas e aglomerados estudados.

O aparelho utilizado foi o MEV existente no laboratório de microscopia da ArcelorMittal Monlevade. Trata-se de um aparelho da marca PHILIPS, modelo XL30.

Também foi utilizado o aparelho de microscopia eletrônica da marca Jeol JSM-5410, com um microanalisador de raios-X dispersivo em energia da marca Noran TN-M3055, com acessórios para recobrimento das amostras com película de carbono da marca Denton Desk II existente no Departamento da Engenharia de Minas da EEUFMG.

4.2.3 – OUTROS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO:

4.2.3.1- Ensaio de classificação por peneiramento

A caracterização granulométrica busca o conhecimento da distribuição do material nas diversas faixas de tamanho das malhas de peneiras existentes.

Após o ensaio de peneiramento, e de posse da massa retida ou passante em cada malha, pode-se traçar a curva de distribuição granulométrica do material.

Os ensaios de caracterização granulométrica foram escolhidos para serem utilizados neste trabalho devido, sobretudo à grande influência da granulometria das matérias-primas no processo de aglomeração a frio, conforme será demonstrado no capítulo V.

4.2.3.2- Análise da área superficial específica (A.S. E)

É de conhecimento geral que toda superfície apresenta imperfeições tais como rugosidade, vazios, poros, etc. Estas imperfeições afetam a medição da área superficial real, chegando a elevar estes valores quando comparados aos valores teóricos advindos de modelos matemáticos. Um material poroso exibe maior A.S.E. quando comparado com uma partícula do mesmo tamanho, porém com baixa porosidade (Loweel & Shields, 1991).

Outro fato importante na medição da área superficial específica é a forma da partícula, que contribui substancialmente para o aumento ou diminuição da superfície de contato entre dois fragmentos. De todas as formas geométricas, a esfera é a que exibe a menor taxa área (m^2)/ volume (m^3).

Partindo do conceito de que o fenômeno de aglomeração a frio ocorre em toda a área superficial de um material particulado por unidade de massa, e que a rugosidade, a forma e a porosidade, associado à distribuição granulométrica das partículas são fatores determinantes para estimular a aglomeração, optou-se então para a utilização da técnica de análise direta por adsorção gasosa conhecida como técnica BET (Brunauer, Emmet e Teller).

A técnica analítica BET utiliza o princípio da adsorção de gás (adsorvato) por uma partícula (adsorvente). O gás mais usado é o nitrogênio, que apresenta o diâmetro de sua molécula já determinado em 0,45 nm.

O conceito da formação da monocamada de nitrogênio envolvendo toda a partícula (figura 4.8) é fundamental para o desenvolvimento desta técnica, e o maior cuidado que se deve ter é que não haja a formação de multicamadas, o que causará erro nos resultados.

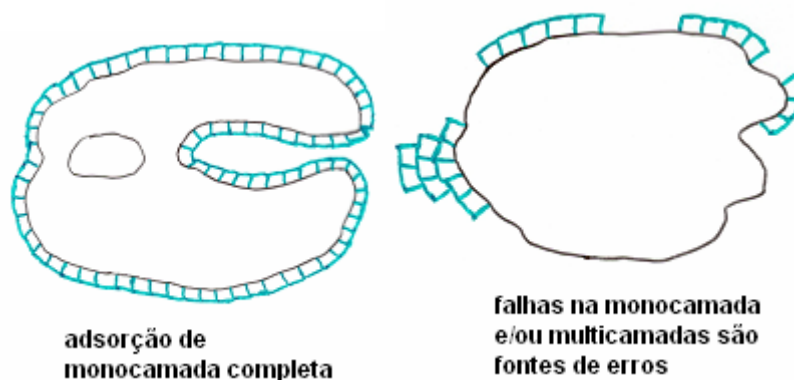


Figura 4.8 – Conceito de formação da monocamada (fonte: notas de aula da disciplina Métodos de Instrumentação e Análise da UFMG).

A adsorção de gases pela partícula pode ser determinada utilizando a equação de Langmuir abaixo, onde:

$$p/V = 1/V_m b + p/V_m \quad (\text{equação IV. 1})$$

p = pressão de equilíbrio;
 V = volume de gás adsorvido;
 V_m = volume de gás adsorvido na monocamada completa;
 b = constante característica da adsorção, isto é, da reatividade adsorvente-adsorvato.

A equação de BET utiliza os dados extraídos da equação de Langmuir como pode ser visto abaixo:

$$p/V = 1/V_m C + [(C-1)/V_m C] p/p_o \quad (\text{equação IV. 2})$$

p = pressão de equilíbrio;
 p_o = pressão de saturação ou de condensação do gás;
 V = volume de gás adsorvido;
 V_m = volume de gás adsorvido na monocamada completa;
 C = constante da adsorção, definida por:
 $C = \exp[(E_1 - E_L)/RT]$
 E_1 = calor de adsorção da primeira camada adsorvida;
 E_L = calor de liquefação do gás adsorvido.

A equação de BET pode também ser escrita da seguinte forma, para combinações de adsorvente e adsorvato que seguem a isoterma característica:

$$1/W((p_o/p) - 1) = 1/W_m C + ((C-1) / W_m C) (p/p_o) \quad (\text{equação IV. 3})$$

W = massa de gás adsorvido na pressão relativa p/p_o ;
 W_m = massa de gás adsorvido como monocamada completa.

A área superficial específica será calculada pela fórmula abaixo:

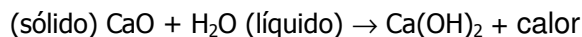
$$S_t = W_m N A_{pa} / M \quad (\text{equação IV. 4})$$

N = número de Avogadro;
 M = massa molecular do adsorvato;
 A_{pa} = área projetada da molécula do adsorvato: para o $N_2 = 16,2 \text{ \AA}^2$
 a temperatura constante (isoterma) geralmente é de 77 K.

O instrumento usado para a medição da A.S.E. é do tipo QUANTACHROME modelo NOVA existente na EEUFMG.

4.2.3.3- Análise de Reatividade pelo Método Wührer

A análise de reatividade se aplica especificamente à cal virgem e busca medir a capacidade de hidratação da cal diante da reação de interface sólido-líquido, como mostrado a seguir:



A reatividade da cal virgem para Aciaria é definida e determinada segundo a norma NBR 8815 (Determinação da reatividade pelo método Wührer). Esta reatividade mede a extensão da reação de hidratação da cal virgem. Como esta reação se dá na interface sólido – líquido, a área superficial específica da cal influencia muito no índice de reatividade.

O índice de reatividade é determinado pela neutralização progressiva com ácido clorídrico 4N, da alcalinidade liberada pela cal durante a etapa de hidratação. O volume médio de ácido clorídrico utilizado para neutralizar a alcalinidade é então medido e o valor correspondente ao tempo de reação é anotado conjuntamente.

Aplica-se a fórmula abaixo:

$$R_w = \frac{V_{HCl} \times F_{HCl}}{F_{bureta}}$$

onde V_{HCl} – Volume de ácido clorídrico gasto

F_{HCl} – Fator de correção da solução de HCl 4N

F_{bureta} – Fator de correção de volume da bureta

Tem-se desta forma o valor da reatividade medida no tempo, dado por ml de HCL4N em 3 minutos. Valores mais altos significam cales mais reativas.

4. 3 – PLANO DE TRABALHO DESENVOLVIDO

Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta das etapas de estudo realizadas no decorrer deste trabalho.

4. 3.1 – Caracterização das diversas matérias-primas

Esta etapa consistiu de:

- amostragem representativa de todas as matérias-primas envolvidas no processo HPS em conformidade ao que foi descrito no item IV. 1 acima
- análise química qualitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X
- análise química quantitativa por via úmida
- análise de fases mineralógicas por difratometria de raios-X
- análise de área superficial específica pelo método BET para o caso da cal
- análise de textura e morfologia pelo microscópio óptico estereoscópico

-análise da forma do grão e da química pontual pelo MEV com microanalisador EDS acoplado.

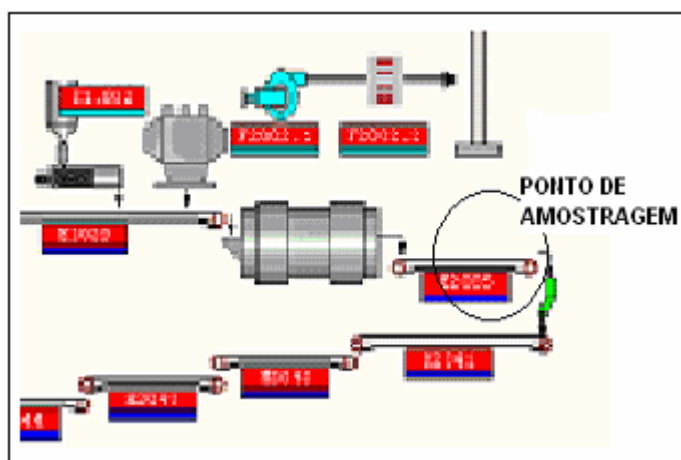
A caracterização das matérias-primas permitiu o conhecimento detalhado das características de forma dos grãos, composição química e mineralógica e textura dos materiais.

4.3.2 - Estudo da aglomeração a frio no HPS

Esta etapa consistiu em estudar o fenômeno de aglomeração a frio no tambor de mistura e nos discos de pelletização do HPS visando conhecer as reações químicas (sólido-sólido, sólido-líquido) que ocorrem nas interfaces das partículas envolvidas, bem como prováveis fases mineralógicas que estejam se formando nestas interfaces. Tornou-se também uma boa oportunidade para o estudo da estrutura da quase-partícula conforme apresentada por Niwa et al. (1990), na figura 3.2 do capítulo III, principalmente o envolvimento das partículas grossas pelas finas e a distribuição dos poros entre as partículas.

Esta etapa demandou um processo criterioso de amostragem e preservação da amostra de quase-partícula para que não houvesse a degradação e a conseqüente perda de informações.

As amostras foram coletadas na correia transportadora que retira as micropelotas do tambor de mistura e na correia que retira as quase-partículas dos discos de pelletização e as encaminha para a etapa de recobrimento de combustível (coating), conforme pode ser visto na figura 4.9 e figura 4.10.



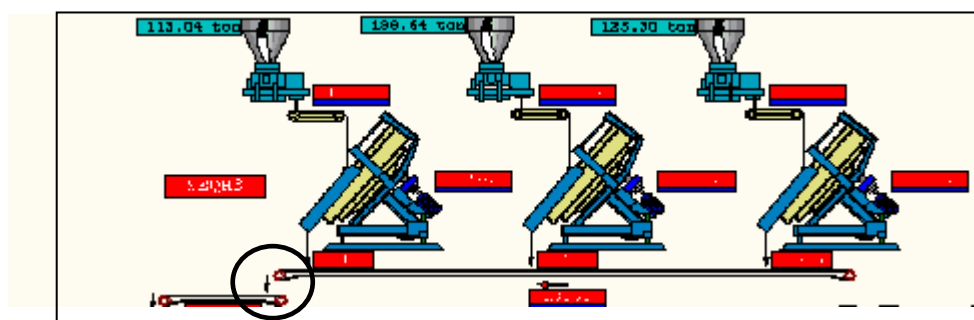


Figura 4.10 – Ponto de coleta da amostra de quase-partícula.

Também foram coletadas as quase-partículas na saída do tambor de cobertura de coque conforme pode ser visto na figura 4.11.

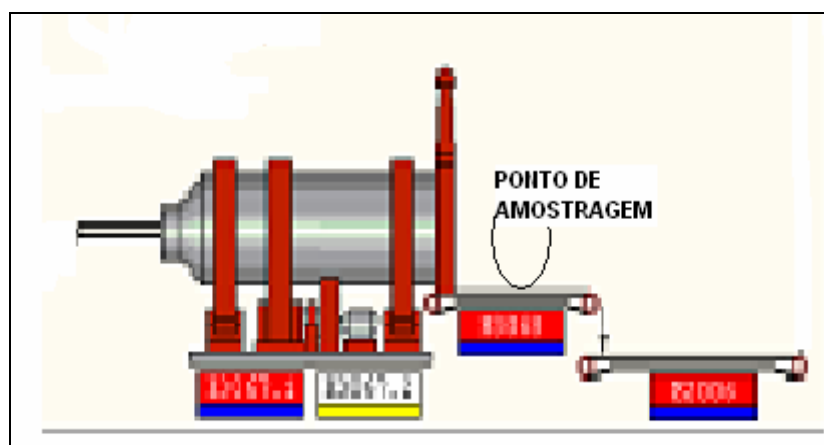


Figura 4.11 – Ponto de coleta da amostra de quase-partícula na saída do tambor de cobertura.

Durante a coleta dessas amostras foi necessário o desenvolvimento de uma técnica específica de tratamento e acondicionamento deste material, visto que se trata de um material que está com um teor de umidade entre 7 a 8 %, com as reações químicas ainda em desenvolvimento e as fases mineralógicas características ainda sendo formadas. Esta amostragem demandou o uso de uma resina especial para que fosse obtido um bloco de material nas dimensões aproximadas de 50 x 50 x 50 mm. A partir deste bloco, foram serradas algumas seções para análises por lupa binocular, microscópio óptico estereoscópico e foram retirados alguns fragmentos para análise no microscópio eletrônico de varredura.

A resina utilizada é da marca EPOXIGLASS, número de referência 1504, e o líquido endurecedor também é da EPOXIGLASS número de referência 1604.

O procedimento consta de misturar o líquido endurecedor na resina, na proporção de 1 volume para 10 volumes, e verter sobre a amostra deixando em repouso por 24 horas na estufa a 60°C. O produto será um bloco de resina e amostra que posteriormente poderá ser serrado em diversas seções.

Como não existia até então um procedimento interno normalizado para este tipo de amostragem, durante a realização desta foi-se desenvolvendo tal procedimento que será posteriormente padronizado dentro dos requisitos do sistema de gestão da Usina de Monlevade. A idéia é que este procedimento se transforme em rotina de análise para controle do processo HPS do ponto de vista mineralógico e microestrutural.

4.3.3 – Adequação das matérias-primas

Esta etapa foi considerada a fase experimental deste trabalho. Nesta fase, elaborou-se o planejamento de experimentos em escala piloto, onde por meio da fixação de algumas variáveis e da mudança de outras, procurou-se obter uma superfície de resposta capaz de simular o processo industrial para aqueles parâmetros analisados em cada matéria-prima.

A intenção inicial foi a de estudar a variação das características granulométricas de algumas matérias-primas, e observar a variável resposta destas alterações sempre objetivando uma boa performance na aglomeração a frio, tendo como indicadores de performance o tamanho médio e o percentual da fração >3,0mm nas quase-partículas.

Sabendo-se que o HPS está adequado para trabalhar com matérias-primas com uma larga faixa granulométrica, e que os testes industriais realizados pela NKK Co na Usina de Fukuyama mostraram que na medida em que se aumenta a participação do pellet-feed ocorre um aumento do consumo de cal, o objetivo dos testes foi o de definir, dentro das características do minério de ferro (sinter-feed Andrade) utilizado na Usina de Monlevade, qual deve ser a contribuição da cal, do serpentinito e do calcário para se otimizar o processo HPS.

Foram realizados então os seguintes experimentos, conforme tabela IV. 2.

Tabela I V. 2- Experimentos em escala piloto com as matérias-primas da sinterização.

MATÉRIA-PRIMA	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2	EXPERIMENTO 3
SINTER-FEED ANDRADE	65% SFAN e 35% PF natural	65% SFAN e 35% PF moído	50% SFAN e 50% PF moído
CAL VIRGEM CALCÍTICA	Cal A	Cal B	Cal C

A variável resposta medida em todos os ensaios foi a distribuição granulométrica das quase-partículas (tamanho médio e percentual >3,0 mm) após a etapa de aglomeração no disco piloto, buscando sempre os limites determinados por Sakamoto et al. (1993) que são quase-partículas maiores que 3,0 mm e menores que 10,0mm.

4.3.4 – Validação do processo

De posse dos resultados dos experimentos realizados no item 4.3.3, partiu-se para a realização de um teste industrial na sinterização da Usina de Monlevade para confirmação dos resultados e otimização dos parâmetros avaliados.

Nesta etapa, os parâmetros até então controlados na aglomeração a frio foram analisados para verificar se cobrem todas as etapas do processo e se possuem os pontos de controle (set-points) mais adequados.

Algumas alterações foram sugeridas e novos parâmetros de controle foram implantados.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos itens tratados a seguir desenvolve-se a apresentação dos resultados obtidos no decorrer deste estudo e abrem-se algumas discussões mediante os resultados.

A forma de apresentação se dará seguindo as mesmas etapas apresentadas no capítulo 4.

No item 5.1 é feita uma discussão sobre a representatividade das amostras coletadas nas balanças dosadoras da sinterização, visto que as amostras têm obrigatoriamente que representar qualitativamente as matérias-primas avaliadas.

No item 5.2 são apresentados os ensaios de caracterização tecnológica das matérias-primas com base na análise das amostras coletadas e são abertas algumas considerações com o objetivo de interpretar e consolidar os dados até então levantados.

No item 5.3 é estudada a aglomeração a frio no tambor de mistura e nos discos de pelotização com foco nas qualidades das matérias-primas analisadas.

No item 5.4 são abordadas as especificações de algumas matérias-primas e se discute uma melhoria no controle destas especificações.

Finalmente no item 5.5 são discutidos novos parâmetros de controle para a avaliação rotineira da performance do processo HPS.

5.1 – ANÁLISE DA REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRAGEM

A amostragem das matérias-primas foi realizada conforme os procedimentos relatados no capítulo 4 (Metodologia). As amostras necessárias para a etapa de caracterização tecnológica foram coletadas na forma de incrementos amostrais a cada 30 minutos, fechando o ciclo de 24 horas nos pontos de queda das balanças dosadoras de matérias-primas na instalação de sinterização.

Especificamente para o caso da cal virgem calcítica a amostra foi retirada no tubo que alimenta o parafuso da dosadora.

De posse das amostras, o fluxograma da figura 4.6 foi seguido e uma alíquota de 250 gramas foi enviada ao laboratório de análise química por via úmida e outra de 500 gramas ao laboratório de análise granulométrica seguindo as rotinas de trabalho dos laboratórios.

Os resultados de análise química por via úmida e granulometria realizados nos laboratórios da ArcelorMittal Monlevade serviram de base para a comparação com os

resultados do material recebido no ano de 2006 na instalação de sinterização da Usina de Monlevade, analisado nos laboratórios dos fornecedores, permitindo assim uma verificação da representatividade da amostra coletada quando comparada com dados da rotina diária.

A preocupação com a representatividade das amostras se faz necessária devido ao fato deste trabalho estar focado diretamente no desenvolvimento das matérias-primas visando melhorias na aglomeração a frio no processo HPS.

Apresentam-se a seguir os dados distribuídos por tipo de matéria-prima.

5.1.1 - Minério de ferro sinter-feed da Mina do Andrade (SFAN)

A amostra de sinter-feed Andrade no que diz respeito à qualidade química se mostrou bastante representativa, conforme pode ser visto na figura 5.1 .

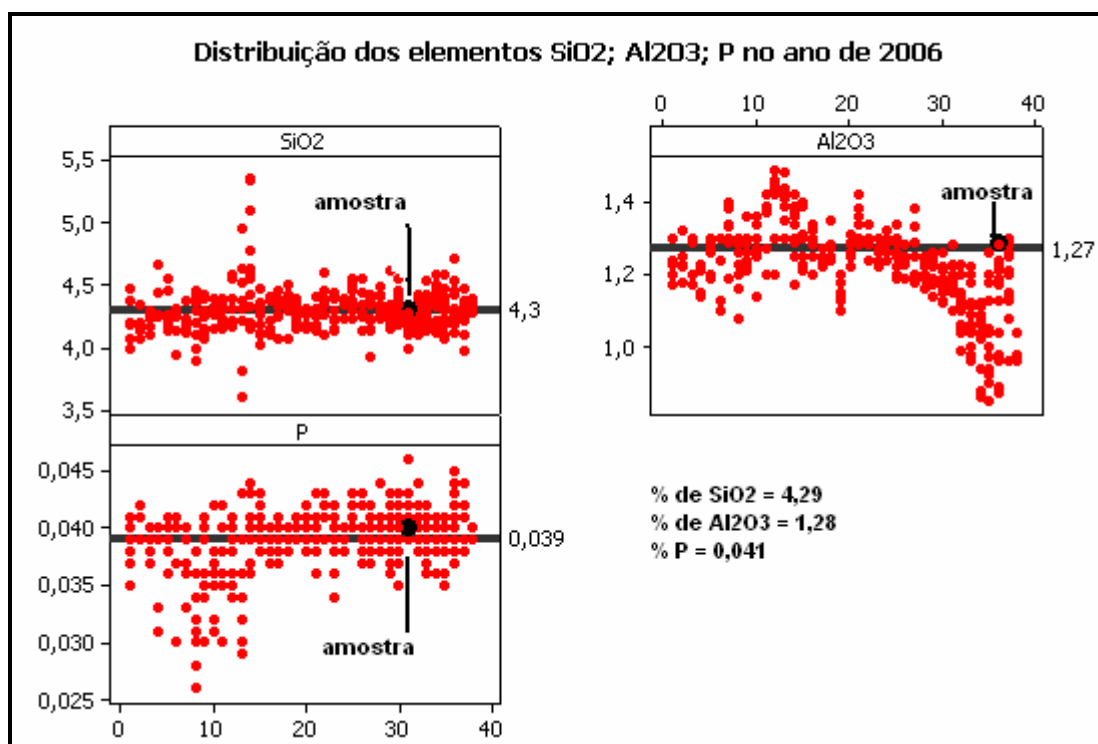


Figura 5.1 – Composição química da amostra de SFAN comparada com os dados do ano de 2006.

A distribuição granulométrica também se mostrou adequada conforme pode ser visto na figura 5.2 a seguir.

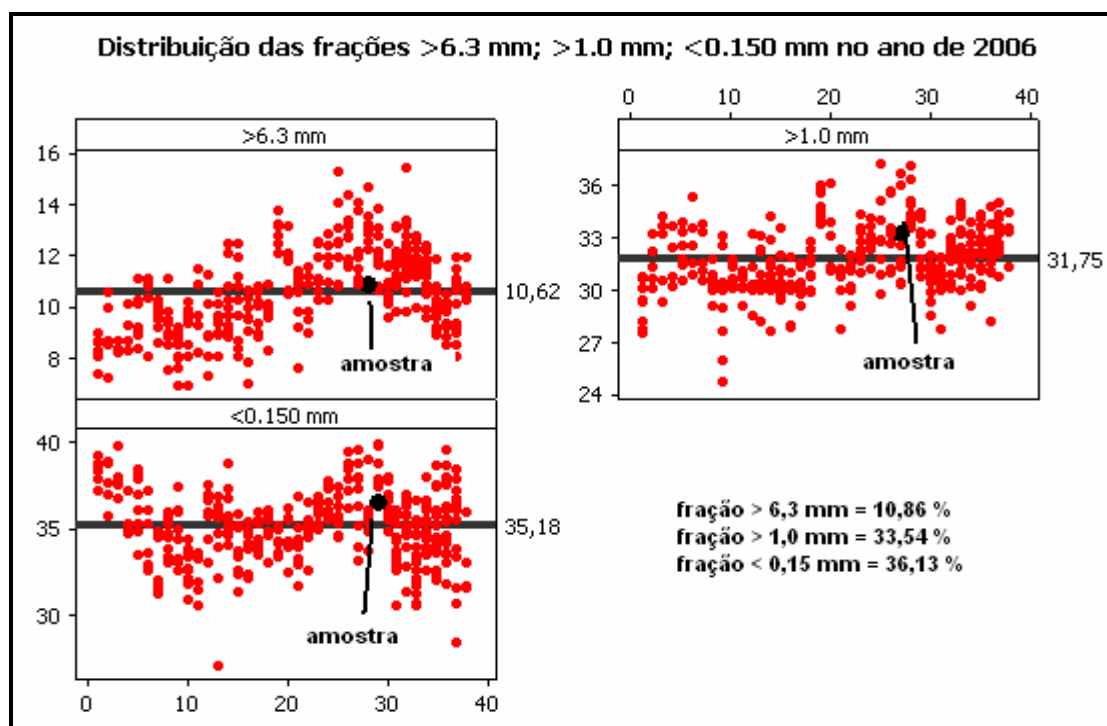


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica da amostra de SFAN comparada com os dados de 2006.

5.1.2 - Cal virgem calcítica

A figura 5.3 mostra a qualidade da cal virgem calcítica amostrada no tubo que alimenta o parafuso da balança dosadora. Pode-se observar que a representatividade desta amostra é boa principalmente no item mais importante para a qualidade da cal que é a reatividade.

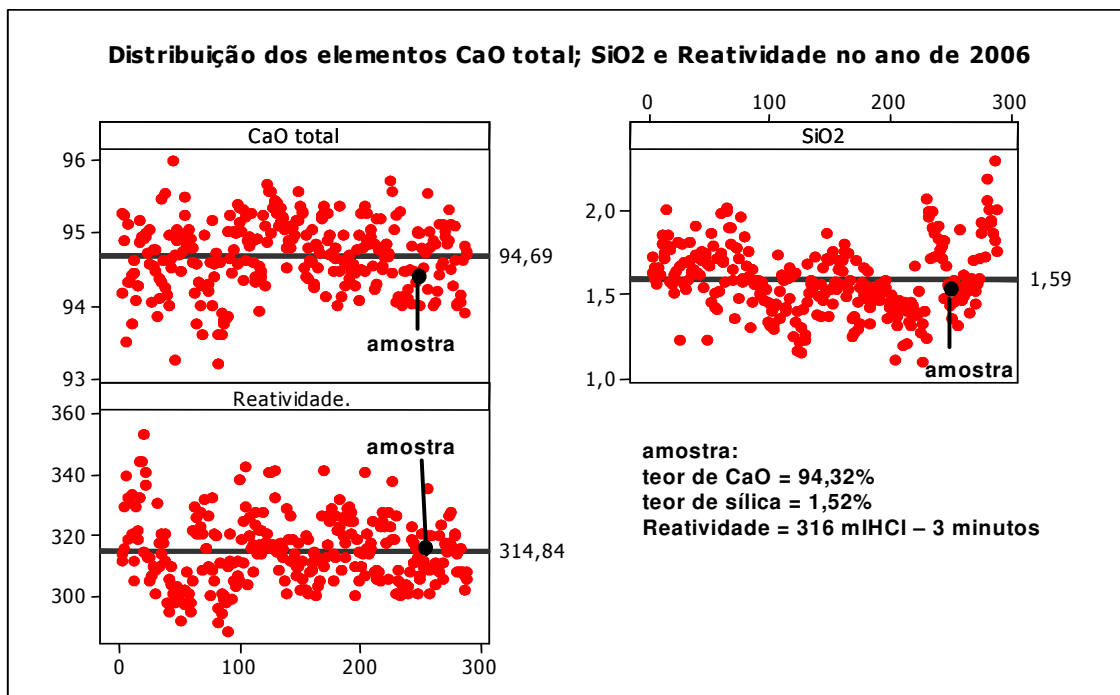


Figura 5.3 - Composição química da amostra de cal comparada com os dados de 2006.

Também a distribuição granulométrica da amostra de cal se mostrou dentro da qualidade média observada no ano de 2006 conforme pode ser visto na figura 5.4 abaixo.

Neste ponto é interessante observar que a representatividade da amostra de cal é muito importante para os resultados deste trabalho já que, conforme vimos no capítulo 3, a cal é utilizada como agente aglomerante na aglomeração a frio e como veremos mais à frente, a contribuição da cal é fundamental para a boa performance do processo de sinterização, já que uma mistura bem aglomerada irá refletir em uma boa permeabilidade na máquina de sínter.

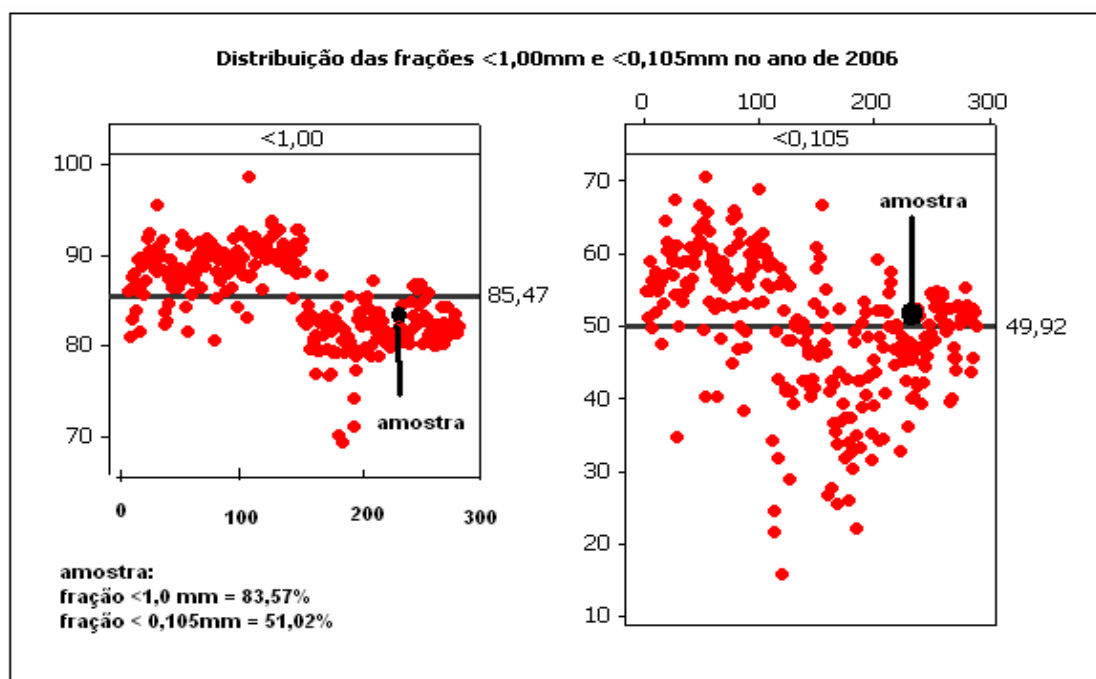


Figura 5.4 – Distribuição granulométrica da amostra de cal comparada com os dados de 2006.

5.1.3 - Serpentinito

A representatividade quanto às qualidades química e granulométrica da amostra de serpentinito pode ser observada nas figuras 5.5 e 5.6 .

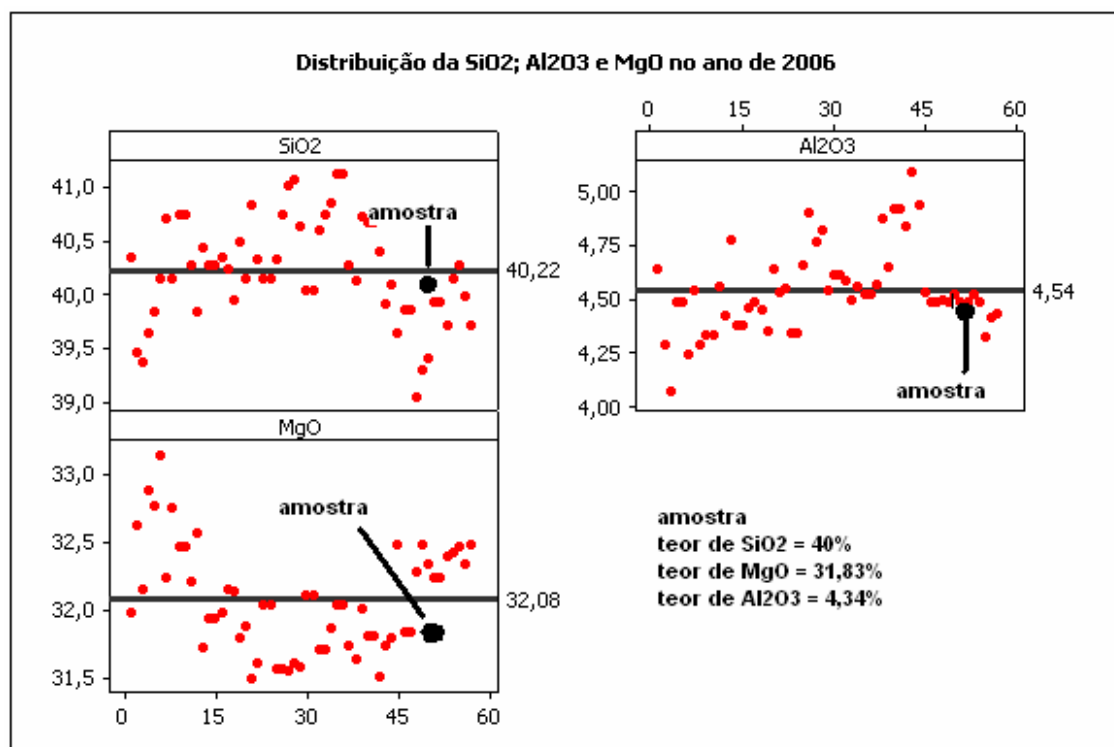


Figura 5.5 – Composição química da amostra de serpentinito comparada com os dados de 2006.

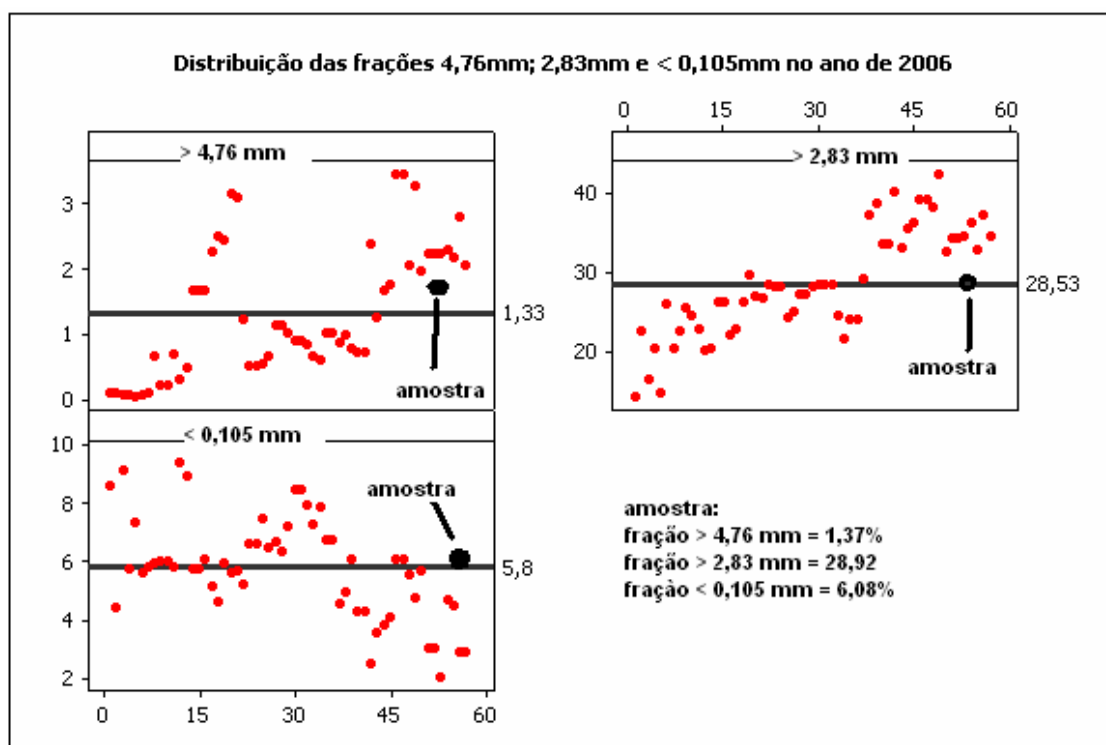


Figura 5.6 – Distribuição granulométrica da amostra de serpentinito comparada com os dados de 2006.

5.1.4 - Calcário Calcítico

A amostra de calcário coletada para a caracterização mostrou uma boa representatividade conforme pode ser visto nas figuras 5.7 e 5.8 .

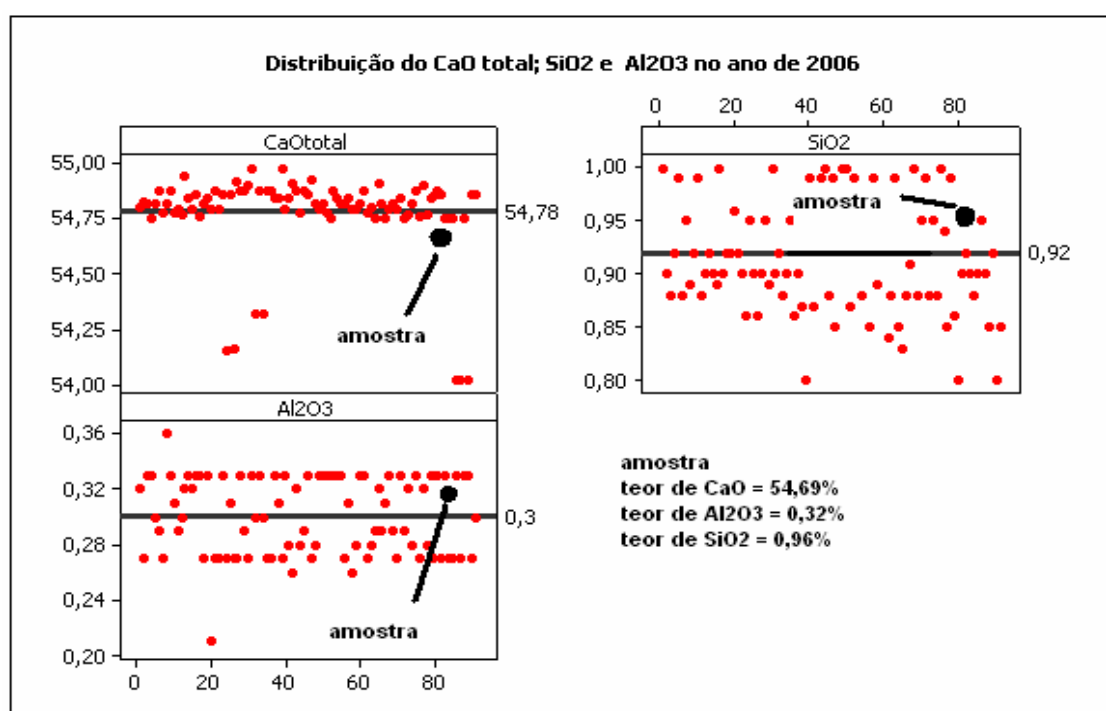


Figura 5.7 – Composição química da amostra de calcário comparada com os dados de 2006.

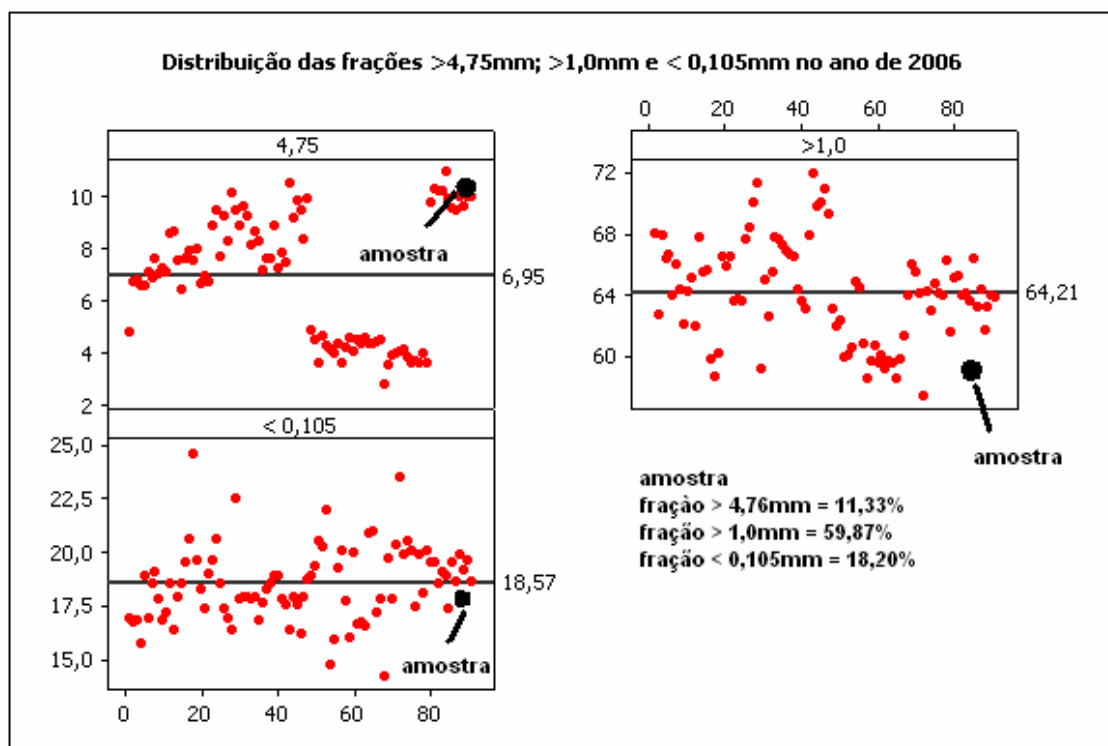


Figura 5.8 – Distribuição granulométrica da amostra de calcário comparada com os dados de 2006.

5.1.5 - Minério de Ferro- Manganês

O minério de ferro manganês coletado na balança dosadora apresentou os resultados conforme pode ser visto nas figuras 5.9 e 5.10 abaixo:

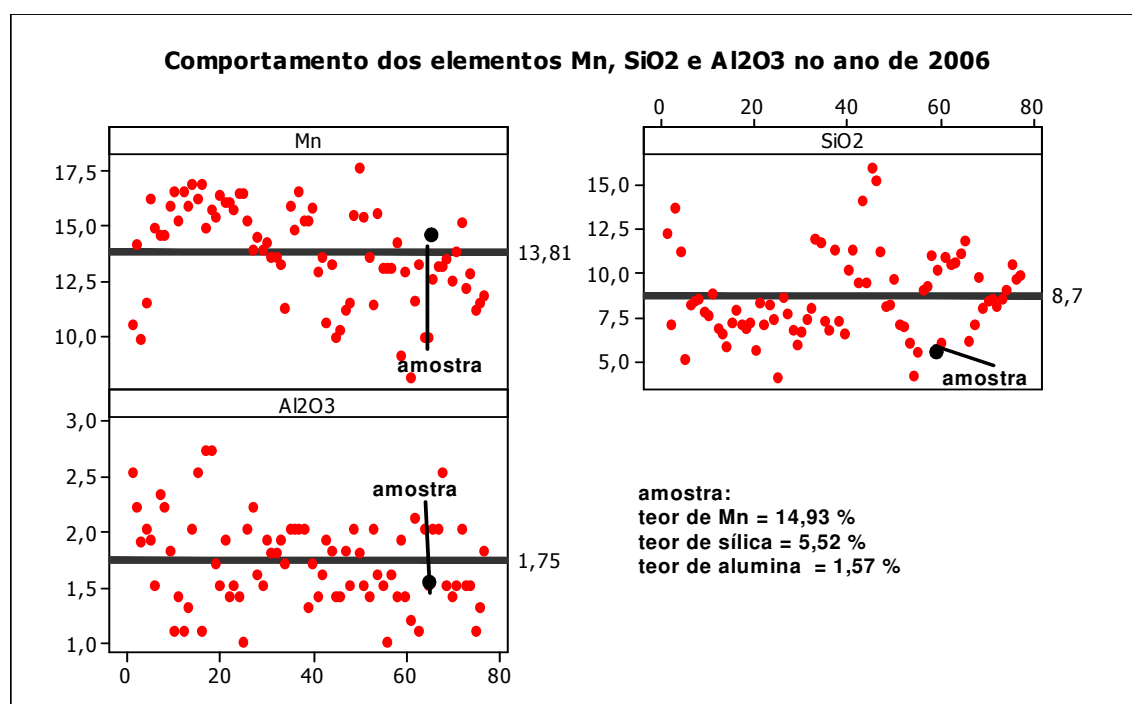


Figura 5.9 – Composição química da amostra de manganês comparada com os dados de 2006.

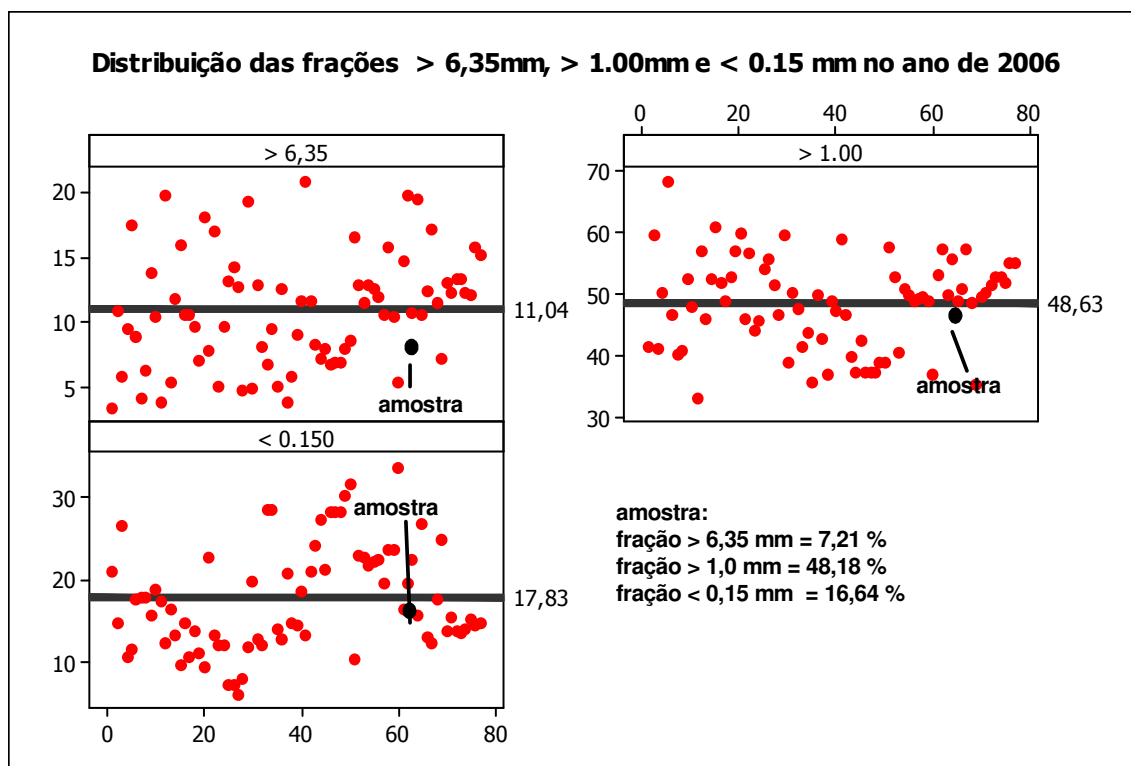


Figura 5.10 – Distribuição granulométrica da amostra de minério de manganês comparada com os dados de 2006.

A comparação entre a qualidade das amostras coletadas para este trabalho de dissertação e as análises rotineiras obtidas durante o ano de 2006 permitiu concluir pela boa representatividade destas amostras tanto na qualidade química quanto na distribuição granulométrica, habilitando então à fase seguinte do estudo que é a caracterização tecnológica das matérias-primas.

Nos itens que serão tratados a seguir, desenvolve-se em primeiro lugar a caracterização da composição química das amostras (item 5.2.1), destacando-se as qualidades obtidas pelo método quantitativo (via úmida) e pelo método qualitativo (FRX). Posteriormente desenvolve-se a caracterização da composição mineralógica e microestrutural das amostras (item 5.2.2) dando-se ênfase ao estudo da forma dos grãos, e finalmente apresentam-se outros tipos de ensaios de caracterização que foram realizados (item 5.2.3) com o objetivo de complementar os dados sobre as matérias-primas envolvidas na aglomeração a frio do processo HPS.

5.2- CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A caracterização tecnológica de um material é entendida como um conjunto de estudos desenvolvidos com o objetivo de se conhecer as principais propriedades deste material, buscando a utilização industrial ou a disposição de uma forma ambientalmente correta.

Trata-se de um trabalho que exige paciência, persistência e perseverança na busca contínua de informações referentes ao material em questão, para que seja possível uma aplicação de forma adequada, buscando-se a melhoria da performance.

5.2.1 - CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As amostras coletadas, após passarem por todo o processo de quarteamento e cominuição previstos no fluxograma apresentado na figura 4.6, tiveram uma alíquota enviada ao laboratório de análise química por via úmida existente nas instalações da ArcelorMittal Monlevade onde foram analisadas obedecendo à rotina dos padrões operacionais de análise, e outra alíquota enviada ao Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais da EEUFMG para análise no espectrômetro de fluorescência de raios-X. Os resultados são apresentados a seguir.

5.2.1.1 - Análise química quantitativa por via úmida

A análise química global das cinco amostras de matérias-primas coletadas é mostrada na tabela V.1 .

Com base nos dados da tabela V.1, pode-se calcular por estequiometria a percentagem em peso dos óxidos envolvidos na análise, quais sejam:

- SFAN - $\%Fe_2O_{3\text{ total}} = 1,4297 \text{ Fe}_{\text{ total}}$ (utilizando-se a massa atômica do Fe= 55,84 e do Oxigênio = 16), logo, o percentual de $Fe_2O_{3\text{ total}}$ na amostra de sinter-feed Andrade é de 92,47%.
 $\%P_2O_5 = 2,2913 \text{ P}_{\text{ total}}$, portanto o percentual de P_2O_5 é de 0,0939.
 $\%MnO = 1,2914 \text{ Mn}_{\text{ total}}$, portanto o percentual de MnO é de 0,155.
- Manganês - $\%MnO = 1,2914 \text{ Mn}_{\text{ total}}$, portanto o percentual de MnO no minério de manganês é de 19,28%.

Tabela V.1 – Análise química global das matérias-primas amostradas na sinterização.

Amostra	Resultados em % em peso									
	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	CaO	MgO	P	Cr	S	PPC
Sinter-feed Andrade	64,68	4,29	1,28	0,12	0,062	0,108	0,041	-	-	0,81
Serpentinito	-	40,0	4,34	0,11	2,67	31,83	0,020	0,133	-	12,46
Cal Virgem Calcítica	-	1,52	0,24	-	94,32	0,53	0,085	-	0,126	4,82
Calcário Calcítico	-	0,96	0,32	-	54,69	0,36	0,078	-	0,074	41,62
Manganes	47,77	5,52	1,57	14,93	-	-	0,064	0,044	-	6,58

PF = perda ao fogo

5.2.1.2 - Análise qualitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X

As amostras de matérias-primas devidamente cominuídas na granulometria <0,044 mm (325 malhas) foram encaminhadas para o Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais da EEUFMG - DEMIN onde foram analisadas de uma forma global, no espectrômetro de fluorescência de raios-X (FRX) seqüencial marca PHILIPS (PANALYTICAL) modelo PW-2400.

A amostra é prensada na forma de uma pastilha e levada ao aparelho para leitura direta dos elementos químicos existentes.

Os resultados qualitativos são apresentados na tabela V.2 .

Tabela V.2 – Resultados da análise qualitativa por FRX das amostras de matérias-primas.

Amostra	Concentração dos elementos			
	Alta	Média	Baixa	Traços
Sinter-feed Andrade	Fe , O	SiO ₂ , Mg , Al	Mn , P	Ca, Ti, Cr, S, Cl, V
Serpentinito	Si , Mg , O	Fe	Al , Ca , Ni , Cr , Mn	Ti , V , P , S , Cl
Calcário Calcítico	Ca , O , C		Mg , Si , Sr , Fe , Al	K , P , S , Mn , Ti , Cr , Cl , Na
Cal Virgem Calcítica	Ca , O		Mg , Si , Sr , S , P	Fe , Al , K , Mn, Cr, Ti , Cl, Na
Minério de Manganês	Fe , Mn , O	Si , Al	Mg , P , Sr	Cl , S , K , Ca , Ti , Ba , Cr , Zn , P

As tabelas V.1 e V.2 acima evidenciam uma correlação muito boa entre os teores obtidos pelo método via úmida e as concentrações dos elementos obtidas pelo método da FRX. Algumas considerações, porém devem ser feitas:

- no caso do sinter-feed Andrade, o teor de MgO obtido na análise por “via úmida” (0,108%) está entre os limites “baixos” ou mesmo “traços” de concentração, enquanto na FRX aparece com concentração média. Pode-se interpretar que na amostra de FRX apareceu algum mineral portador de MgO que não se apresentou na amostra analisada por “via úmida”. Desta forma, algum erro de homogeneização da amostra pode ter causado a discrepância das análises.
- no serpentinito, o elemento Fe não foi analisado por “via úmida”, porém aparece na análise de FRX. Trata-se de um elemento com concentração média, o que implica que na análise mineralógica poderá aparecer alguma evidência deste mineral conforme será visto mais adiante.
- ainda no serpentinito os elementos Ni e Cr aparecem com maior concentração que nas outras matérias-primas estudadas. O Cr foi medido em 133 ppm pela análise “via úmida”, e o Ni não foi analisado.

- tanto no calcário calcítico quanto na cal virgem calcítica foi detectada a presença do elemento Sr (estrôncio) pela análise de FRX. Trata-se de um fato curioso e que merece um estudo profundo sobre a gênese destes tipos de calcários do Grupo Bambuí, mas que não será alvo de estudo nesta dissertação
- outro fato importante é o alto valor de perda ao fogo encontrado na amostra de cal virgem calcítica (4,82%), o que caracteriza que mesmo tendo sido adotados os devidos cuidados de armazenamento, a amostra de cal se hidratou consideravelmente.

5.2.2 - CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA, FORMA E TEXTURA.

Os métodos empregados nesta dissertação para a análise mineralógica são representados pela difração de raios-X (DRX) para uma análise preliminar mais global, e pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) para uma análise de detalhe, bem como para uma análise de forma de grão e textura.

5.2.2.1 - Análise por difratometria de raios-X (DRX)

As amostras pulverizadas na granulometria de $<0,044$ mm foram homogeneizadas de forma a garantir a representatividade e posteriormente estas amostras foram prensadas em pastilhas e então encaminhadas ao difratômetro com tubo de Cu da marca Philips com gerador PW 1830/40 e goniômetro PW 3020/00 do Laboratório de análises por raios-X do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

A tabela V.3 apresenta os resultados da análise de DRX das matérias-primas da sinterização.

A identificação dos minerais e das fases minerais presentes nas amostras foi feita utilizando o banco de dados do ICDD (International Centre for Diffraction Data) com atualização até o ano de 2001.

Tabela V.3 – Minerais e fases minerais presentes nas amostras.

Amostra	Concentração dos minerais (fases) presentes na amostra			
	Abundante	Médio	Baixo	Traços
SFAN	hematita	talco	caulinita quartzo	goethita gibbsita
Serpentinó	clinocrisotila	talco nimita (Ni-clorita) tremolita	goethita cromita	
Calcário	calcita magnesiana		quartzo	
Cal virgem calcítica	óxido de cálcio		portlandita	
Minério de Manganês	hematita quartzo	pirolusita		goethita gibbsita magnetita caulinita

Fórmula química de acordo com o site <http://webmineral.com>Calcita magnesiana ($\text{Ca}_{0,97} \text{Mg}_{0,03} \text{O}$)Gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ Hematita (Fe_2O_3)Goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ Magnetita (Fe_3O_4)Cromita FeCr_2O_4 Óxido de cálcio (CaO)Quartzo (SiO_2)Pirolusita (MnO_2)Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Uma análise das tabelas V.1, V.2 e V.3 acima, somada às observações apresentadas no item V.2.1.2, remete a algumas considerações muito importantes nesta etapa do trabalho, quais sejam:

- de fato a presença do mineral “talco” (portador de MgO) no sinter-feed Andrade pode alterar o resultado do teor de magnésio na amostra
- ainda no sinter-feed Andrade, a goethita aparece em quantidades pouco expressivas o que confirma de certa forma o baixo valor de perda ao fogo (PF) obtido na análise por “via úmida”, característica deste minério.
- a presença abundante da clinocrisotila, um filossilicato com fórmula do tipo $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, também conhecida como a variedade fibrosa da serpentina (Dana, 1978), enfatiza a denominação de serpentinito para a rocha verde oriunda do Grupo Quebra Ossos da região de Catas Altas.

- o metal níquel medido em baixas concentrações na FRX e o cromo também medido na análise “via úmida” têm seus minerais detectados na análise por DRX pela presença da nimita e da cromita no serpentinito
- a presença da goethita no serpentinito certamente explica a presença do elemento ferro medido na análise de FRX
- com relação à presença de portlandita na cal virgem calcítica, certamente se trata de uma hidratação da cal devido à exposição ao ambiente natural.

5.2.2.2 - Análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Conforme já relatado no capítulo IV, a análise do MEV nesta etapa do trabalho está ligada à capacidade de aumentos elevados (até 150.000 vezes) e à excelente resolução da imagem. Este recurso associado ao MEV permitiu o reconhecimento de diversos aspectos morfológicos e microestruturais das amostras e uma correlação direta com dados obtidos nas análises já discutidas neste capítulo.

As imagens do tipo BSE (elétrons retroespalhados) foram as que permitiram uma visualização perfeita da morfologia dos grãos individualizados ou em conjunto.

Como os elétrons retroespalhados são resultados de interações profundas entre a amostra e o feixe de elétrons incidentes, estas interações denotam as variações de relevo da superfície analisada, aparecendo, portanto contrastes de tonalidades de cor quando da diferença do mineral analisado. Para minerais com maior número atômico (Z) a tonalidade de cinza se torna cada vez mais clara.

No caso específico das amostras de calcário calcítico e cal virgem calcítica foi necessário utilizar a técnica do recobrimento com uma película muito fina de ouro objetivando criar uma camada que diminuísse o efeito de carregamento da superfície. Além disso, uma fita condutora de cobre extremamente fina foi utilizada visando assegurar um perfeito contato elétrico entre a amostra e o porta-amostra metálico.

As condições de operação do MEV para obtenção das imagens de BSE corresponderam ao potencial de 15 kv e a distância de trabalho variou de 9,0 a 25 mm dependendo da amostra analisada.

Todas as análises foram feitas no laboratório de microscopia eletrônica da ArcelorMittal Monlevade em um aparelho da marca Philips, modelo XL30 equipado com analisador de raios-X EDAX.

As imagens das amostras de matérias-primas são apresentadas abaixo em diversas faixas granulométricas

a) sinter-feed Andrade

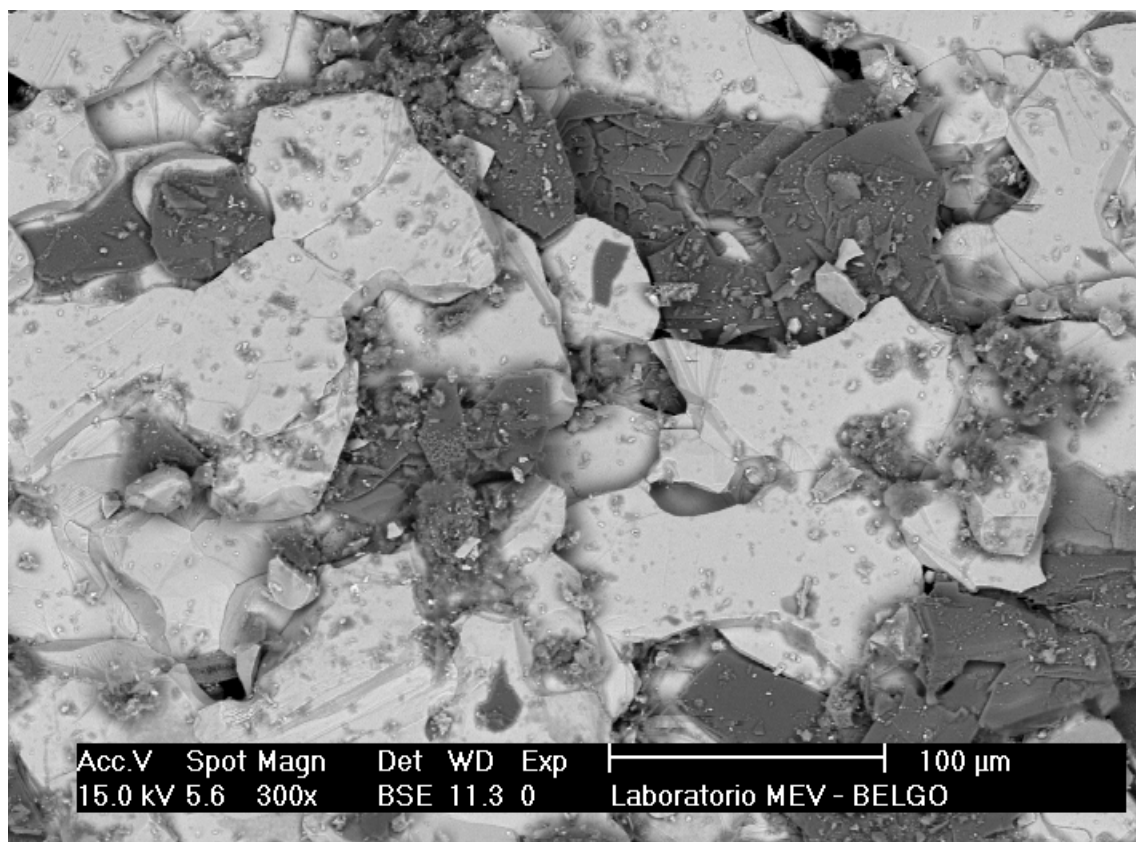


Figura 5.11 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração >1,0 mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma lisa e facetada dos grãos de hematita especular (mais claro) em uma microestrutura foliada (lepidoblástica) com cristais de talco (mais escuro) dispostos nos planos de foliação. Observa-se ainda a baixa ocorrência de poros (pontos negros) no fragmento analisado. Aumento de 300X.

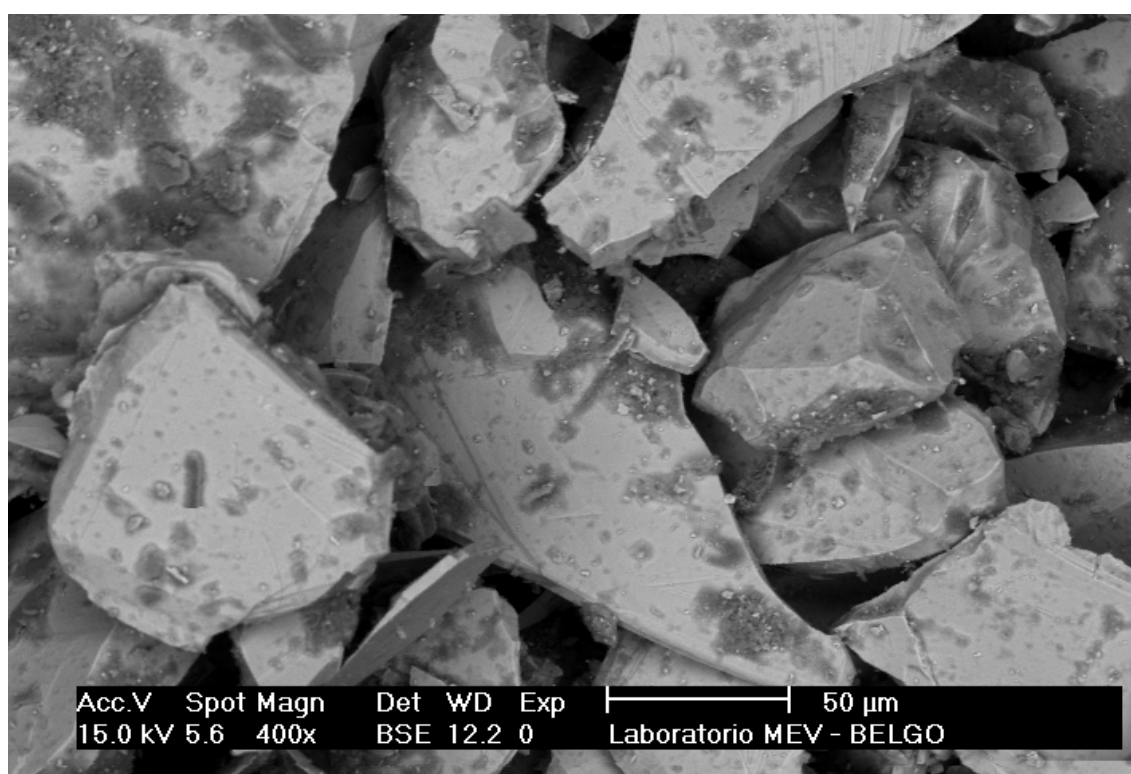


Figura 5.12 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de diversos fragmentos da fração $<1,0$ mm e $> 0,15$ mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de uma visão de diversos grãos amontoados mostrando a forma facetada dos grãos de hematita especular, com superfície extremamente lisa, pouca ou nenhuma rugosidade e ausência de poros. Alguns grãos apresentam bordas agudas. Aumento de 400X.

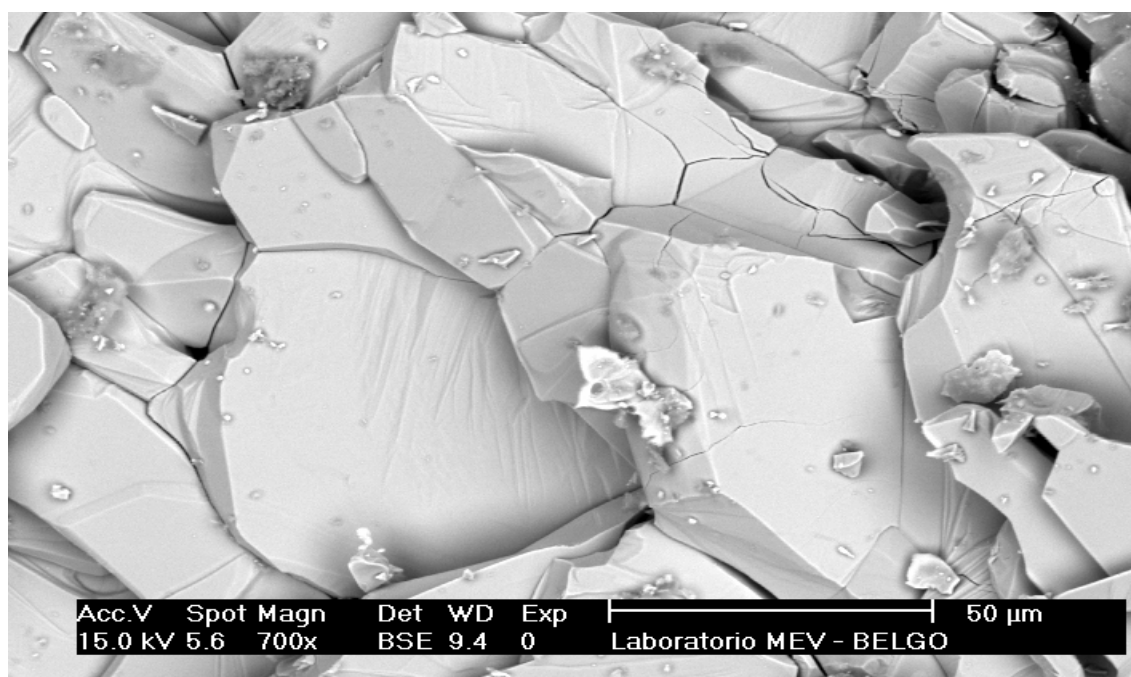


Figura 5.13 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em uma partícula de hematita da fração $< 0,15$ mm do sinter-feed Andrade. Trata-se de grãos extremamente lisos, pouca ou nenhuma rugosidade, aspecto foliado. Aumento de 700X.

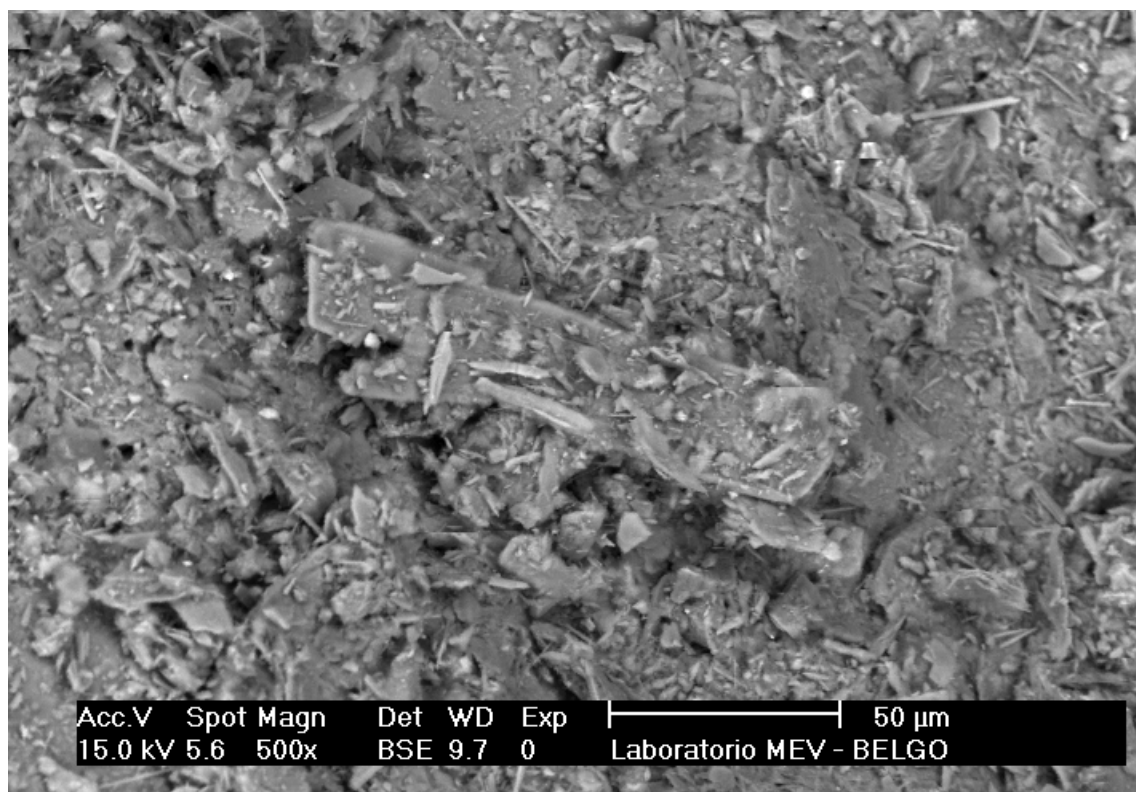
b) serpentinito

Figura 5.14 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração >2,0 mm do serpentinito. Trata-se de uma visão geral da superfície do fragmento mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila detectada na DRX. Nota-se a rugosidade dos grãos e a presença de poros (pontos negros) no fragmento analisado. Aumento de 500X.



Figura 5.15 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <2,00 mm e >0,15mm do serpentinito. Trata-se de uma visão localizada mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila detectada na DRX. Nota-se a presença de um cristal de magnetita (mais claro) que explica a análise de FRX que detectou o elemento químico ferro em concentração média. A rugosidade e porosidade do fragmento é um aspecto notável na amostra analisada. Aumento de 312X.

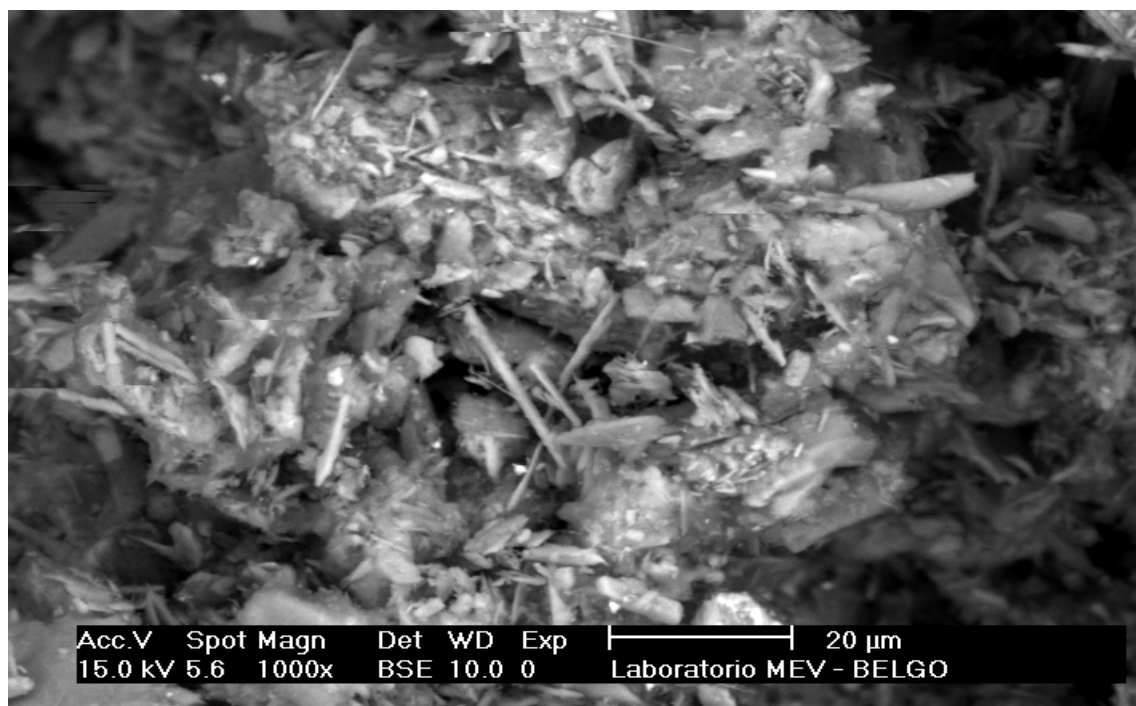


Figura 5.16 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <0,15mm do serpentinito. Trata-se de uma visão mostrando o aspecto fibroso da clinocrisotila, a rugosidade excessiva do grão e a porosidade bem marcante. Aumento 1000X.

c) Calcário calcítico

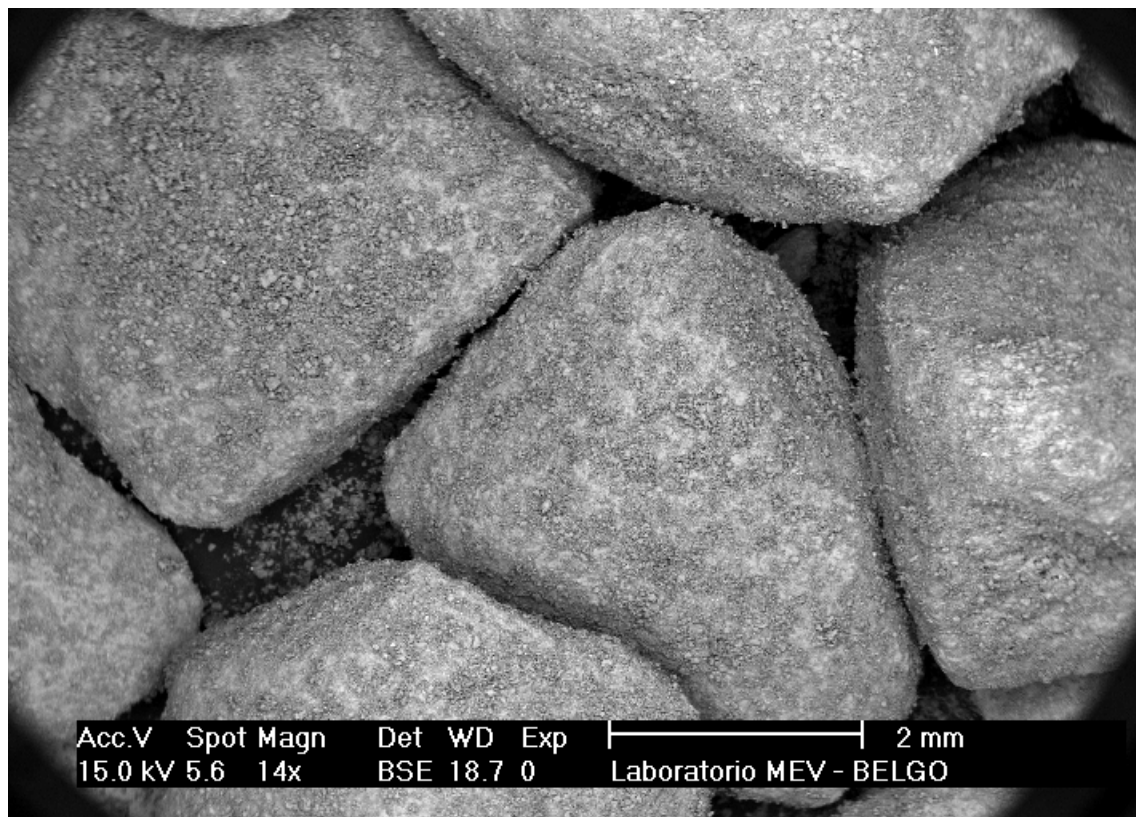


Figura 5.17 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de alguns fragmentos amontoados da fração >1,00 mm do calcário calcítico. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular dos fragmentos, o aspecto da microrugosidade e microporosidade dos grãos. Os fragmentos se mostram com forma arredondada, com a superfície coberta por grãos extremamente finos de calcário evidenciando certa facilidade do calcário em aglomerar a frio os grãos finos. Aumento de 14X.

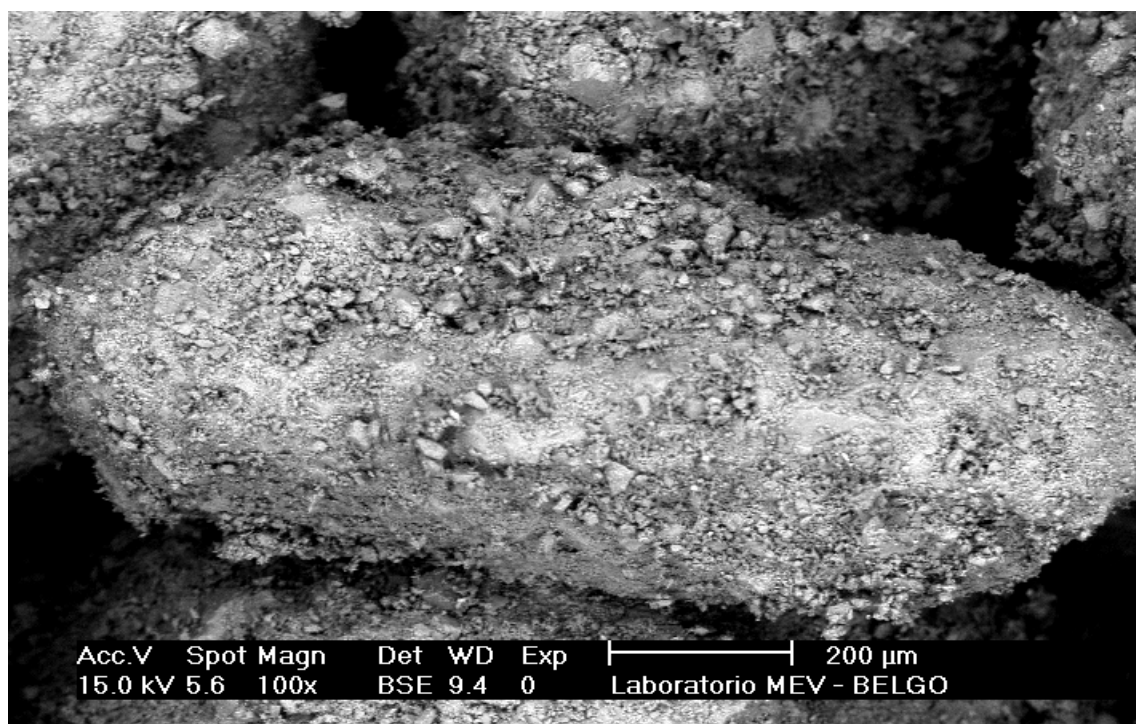


Figura 5.18 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmentos da fração $<1,00\text{ mm}$ e $>0,15\text{ mm}$ do calcário calcítico. Trata-se de uma visão em detalhe de um fragmento mostrando a forma irregular, o aspecto da microrugosidade e microporosidade. Novamente se observa a cobertura da superfície do fragmento por grãos de calcário extremamente fino. Aumento 100X.

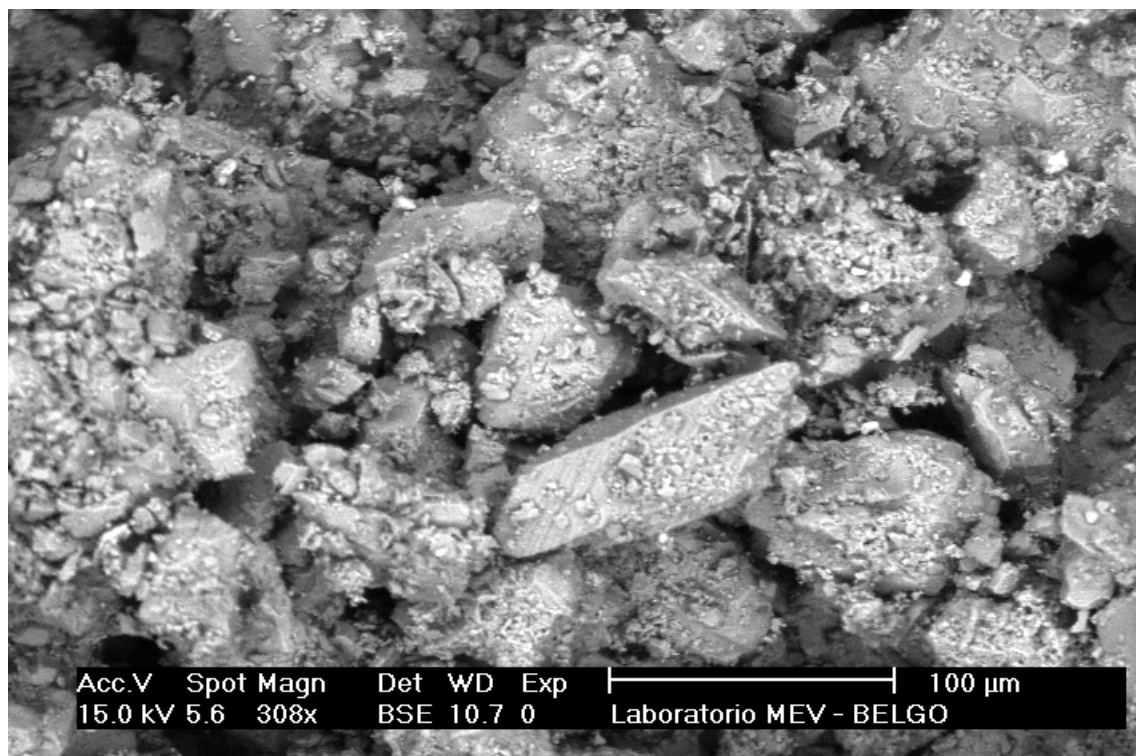


Figura 5.19 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmento da fração $<0,15\text{ mm}$ do calcário calcítico. Trata-se de uma visão geral de alguns fragmentos mostrando grãos irregulares e alguns grãos facetados recobertos com material extremamente fino. Aumento 308X.

d) Minério de Manganês

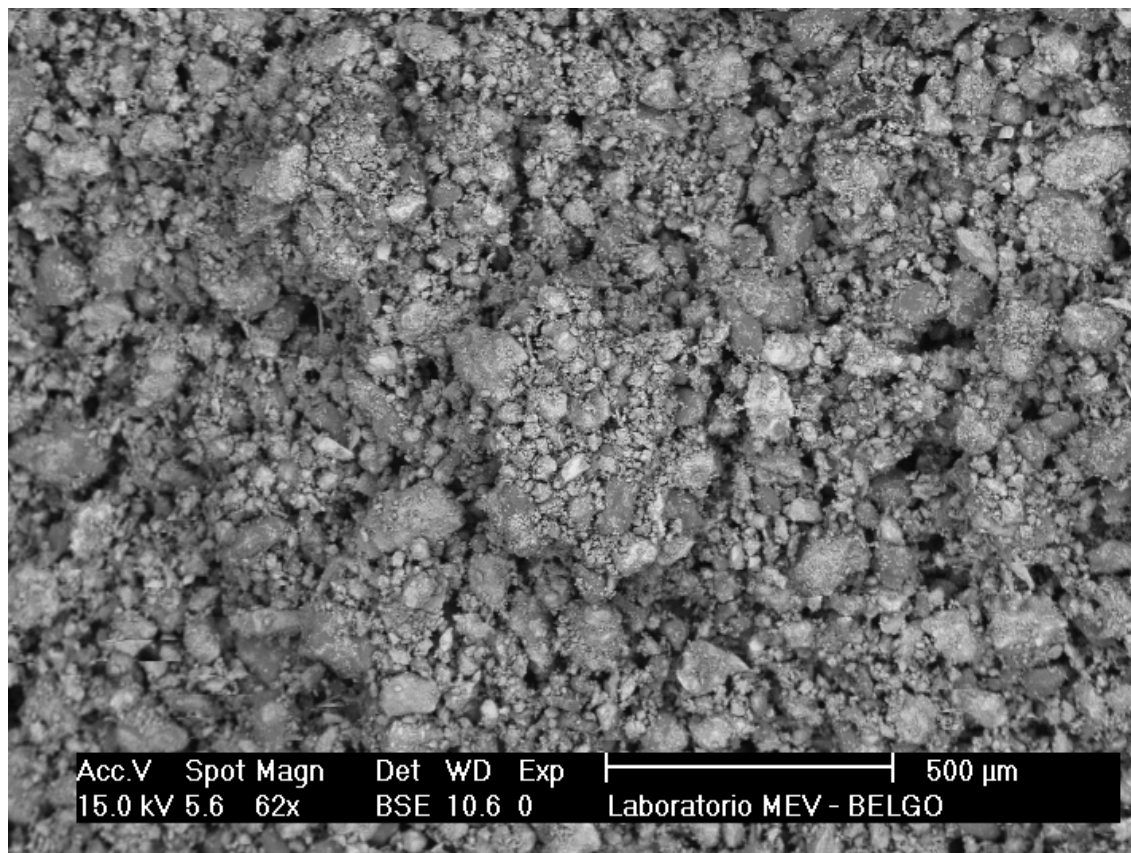


Figura 5.20 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um aglomerado de fragmentos da fração >1,0 mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular, o aspecto terroso, a excessiva rugosidade e porosidade. Os grãos do minério de manganês de uma forma particular apresentam o aspecto terroso, com superfície corroída o que leva a interpretar um alto grau de intemperismo neste tipo de material. Aumento 62X.

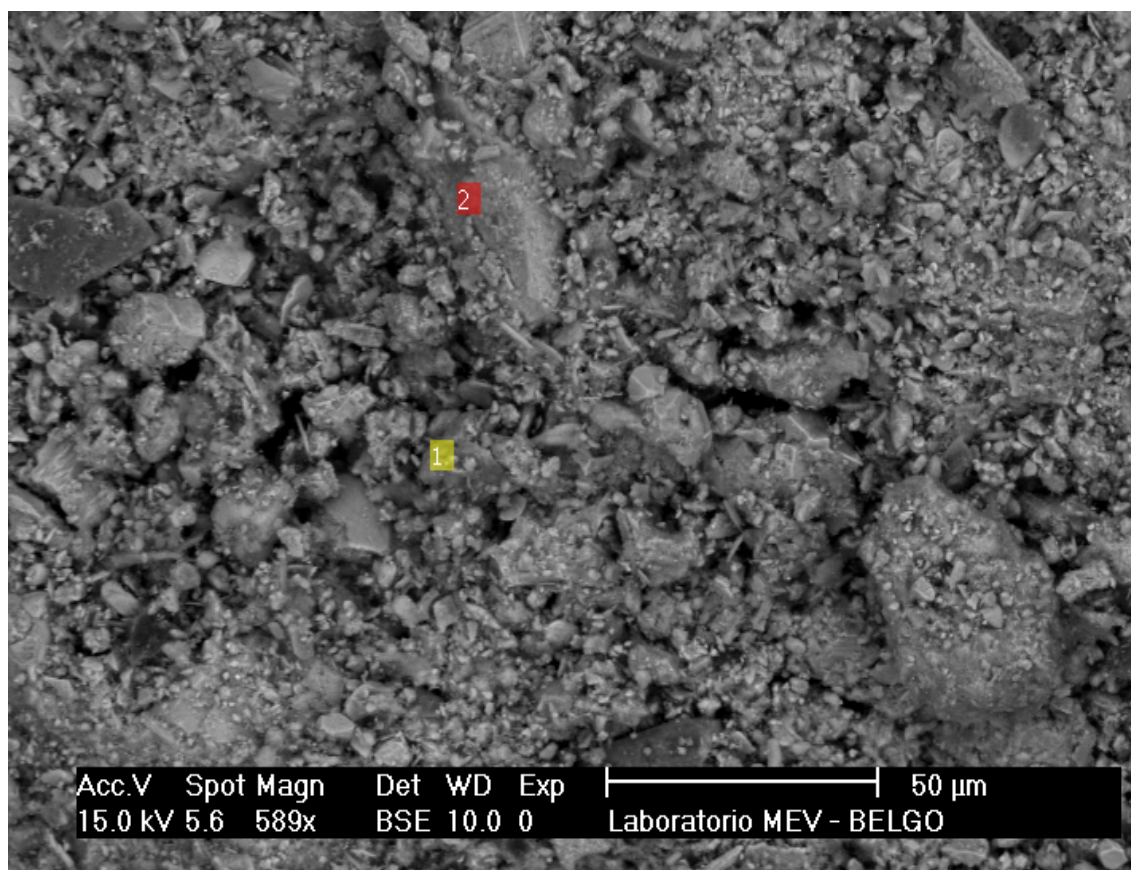


Figura 5.21 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um aglomerado de fragmentos da fração <1,0mm e >0,15mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral mostrando duas populações distintas de grãos. A primeira delas (1) na foto, de tonalidade cinza mais clara apresenta os grãos com forma irregular, aspecto terroso, rugosidade bastante pronunciada, tratando-se de minerais de manganês. A segunda população (2), de tonalidade cinza mais escura, apresenta grãos de forma facetada, superfície lisa, tratando-se de grãos de hematita. Aumento 589X.

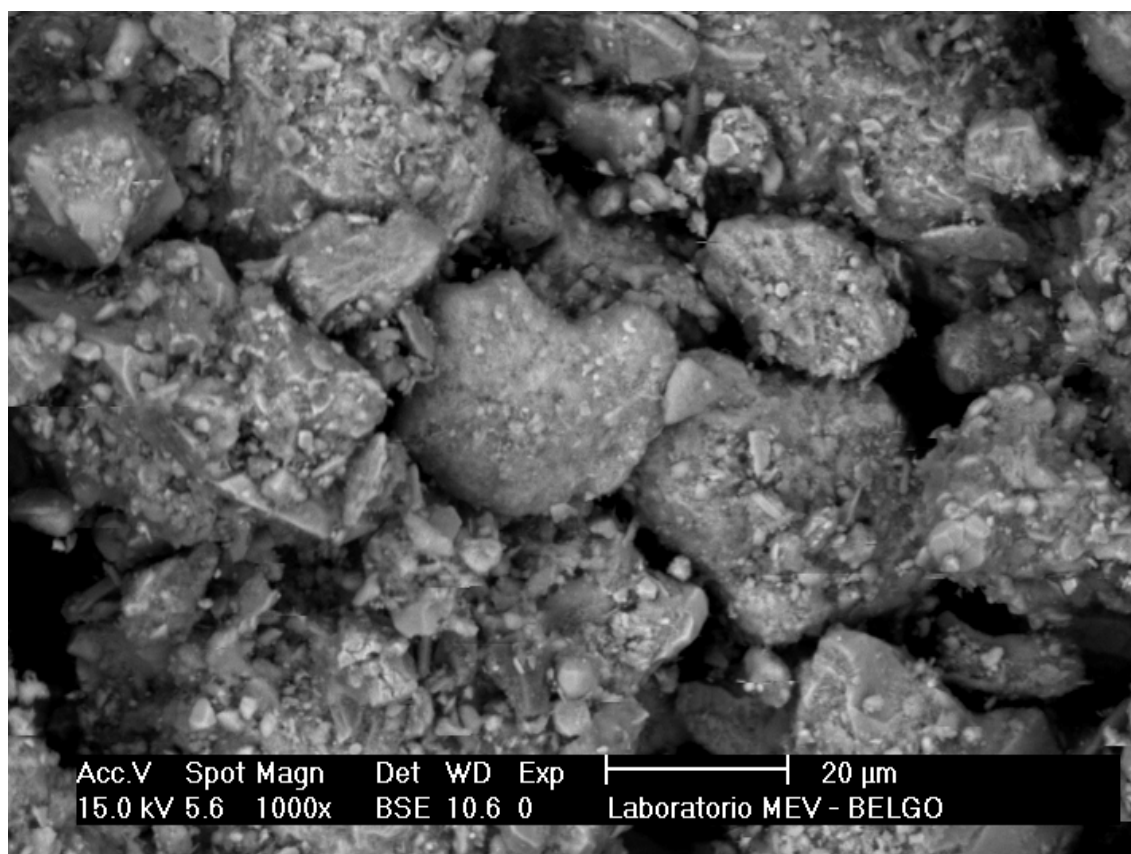


Figura 5.22 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE em fragmentos da fração <0,15mm do minério de manganês. Trata-se de uma visão geral de um aglomerado de fragmentos mostrando a forma irregular, o aspecto da rugosidade e porosidade, os grãos mais finos aglomerados na superfície dos grãos maiores. Aumento 1000X.

e) Cal virgem calcítica

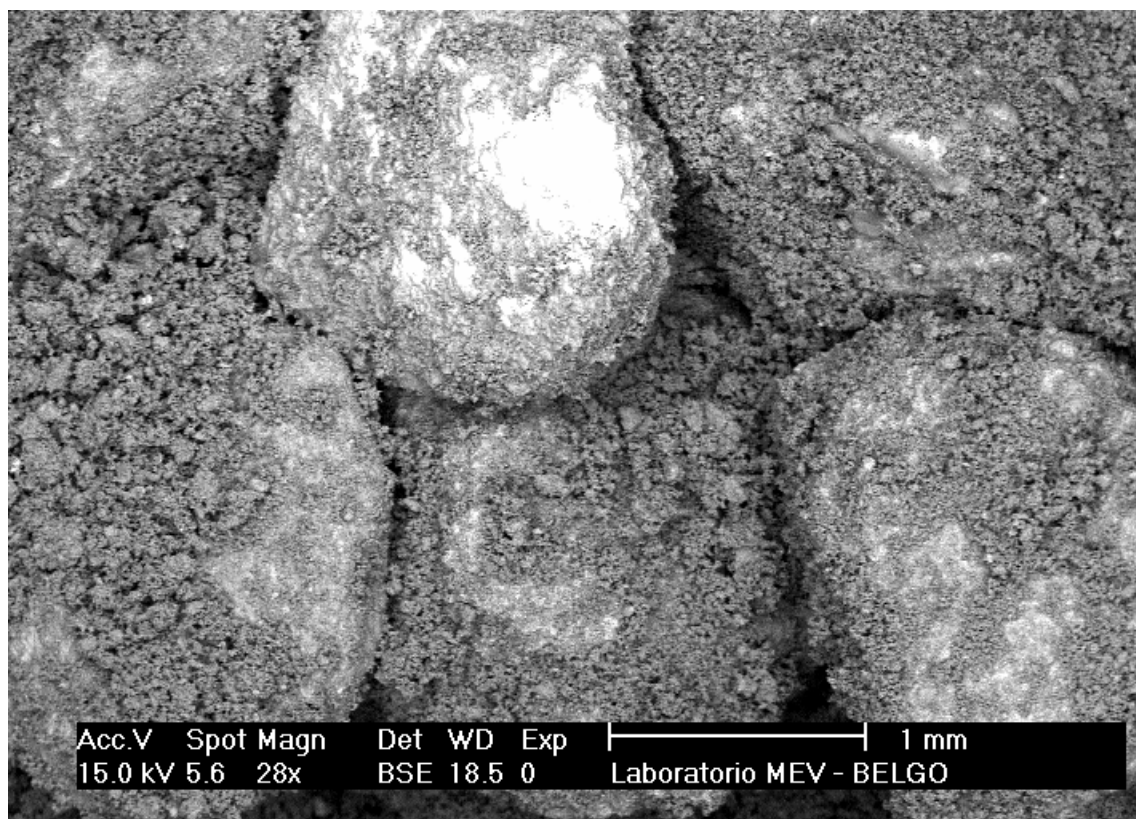


Figura 5.23 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de fragmentos da fração >1,0mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão geral mostrando a forma irregular, o aspecto da rugosidade e porosidade, os grãos mais finos aglomerados na superfície dos grãos maiores. Aumento 28X.

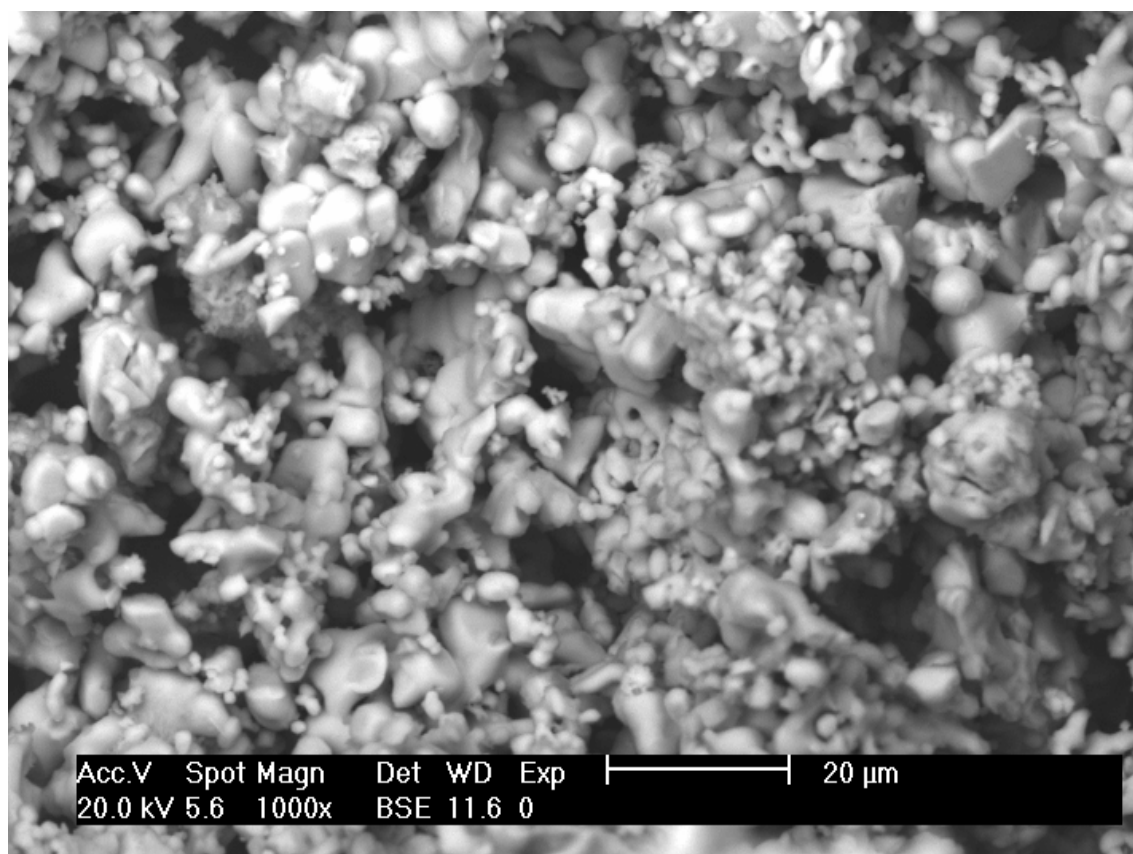


Figura 5.24 – Fotomicrografia obtida em MEV-BSE de um fragmento da fração <0,15mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão geral de um aglomerado de grãos de cal mostrando a forma arredondada e o aspecto cimentado. Observa-se, porém que esse aspecto arredondado se deve a uma sinterização da superfície do grão causada pela queima do calcário no forno de combustão. Este fato se torna mais claro quando analisamos a imagem 5.25 a seguir. Outro ponto a ser ressaltado é a excessiva porosidade intergranular, porém a baixa ou ausente porosidade intragranular. Aumento 1000X.

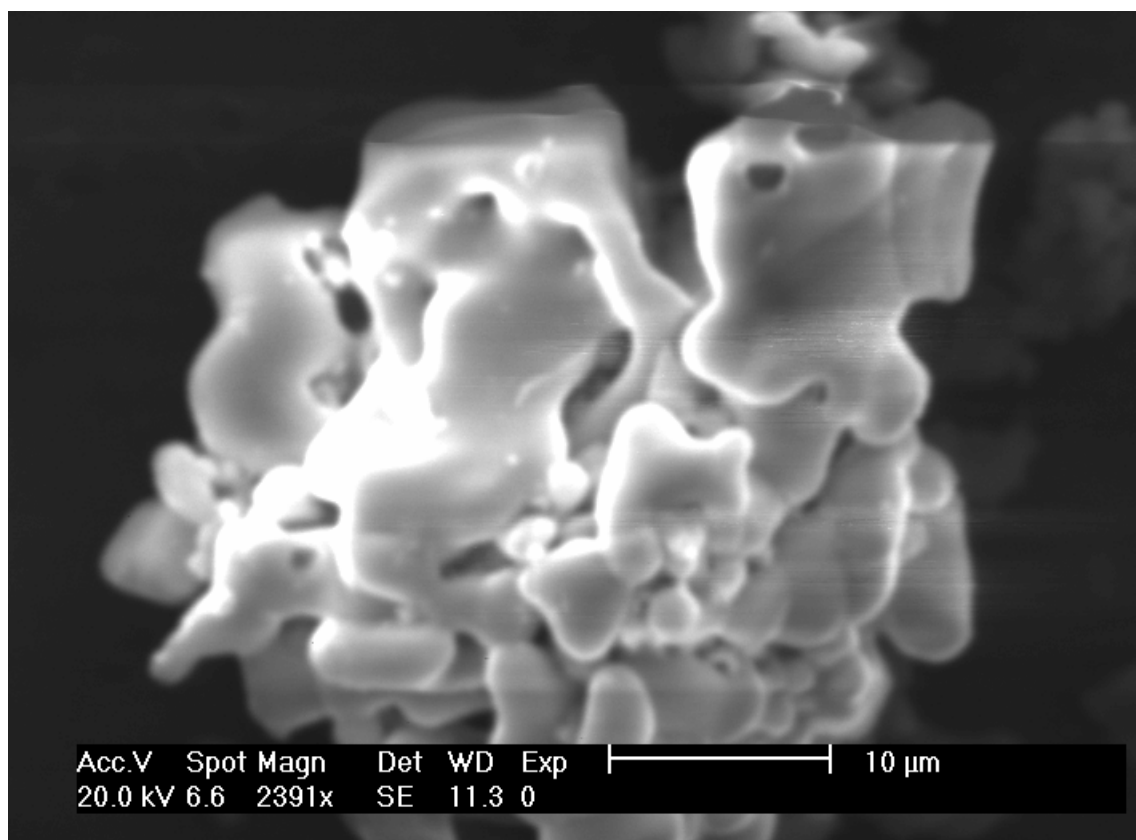


Figura 5.25 – Fotomicrografia obtida em MEV-SE de um fragmento da fração <0,15mm da cal virgem calcítica. Trata-se de uma visão detalhada de um aglomerado de grãos de cal onde se evidencia o aspecto sinterizado da superfície do grão, chegando a adquirir uma superfície de aspecto vítreo. Novamente se pode notar a ausência da porosidade intragranular e a baixa rugosidade do grão individualizado. Aumento 2391X.

A análise das imagens acima permitiu a elaboração da tabela V.4 abaixo com o intuito de resumir as principais características observadas em cada material.

Tabela V.4 – Principais características de forma observadas nas matérias-primas.

Matéria-prima	Fração grossa	Fração intermediária	Fração Fina
sinter-feed	grãos de forma lisa, sem rugosidade, pouca porosidade com foliação marcante, textura lepdoblástica figura 5.11	grãos de forma lisa, sem rugosidade, pouca porosidade figura 5.12	grãos de forma lisa, sem rugosidade, pouca ou nenhuma porosidade, textura lepdoblástica figura 5.13
serpentinó	cristais fibrosos, muita porosidade, grãos com muita rugosidade, aspecto aglomerado figura 5.14	cristais fibrosos, muita porosidade, grãos com muita rugosidade, presença de magnetita figura 5.15	cristais fibrosos, muita porosidade, grãos com muita rugosidade, aspecto aglomerado figura 5.16
calcário	fragmento com superfície micro porosa, micro rugosidade, grãos finos aglomerados figura 5.17	fragmento com superfície micro porosa, micro rugosidade, recoberto por grãos muito finos figura 5.18	grãos irregulares, alguns facetados, micro porosidade, recobertos com material extremamente fino figura 5.19
minério de manganês	grãos de aspecto terroso, porosidade excessiva, bastante corroídos com grãos finos aglomerados na superfície figura 5.20	grãos de aspecto terroso, porosidade excessiva, bastante corroídos figura 5.21	grãos de aspecto terroso, porosidade excessiva, bastante corroídos, com grãos finos aglomerados na superfície figura 5.22
Cal virgem	fragmentos porosos, com muita rugosidade superficial figura 5.23	grãos de aspecto sinterizado devido à calcinação excessiva, porosidade intergranular, baixa ou ausente porosidade intragranular figura 5.24	grãos extremamente calcinados com aspecto vítreo, baixa porosidade, baixa ou nenhuma rugosidade figura 5.25

5.2.3 - OUTROS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REALIZADOS

5.2.3.1 - Análise da distribuição granulométrica das matérias-primas

A distribuição granulométrica das matérias-primas envolvidas no processo HPS foi determinada na fração de 500g obtida da amostra retirada para cada matéria-prima seguindo o fluxograma proposto na figura 4.6.

O ensaio realizado constou da secagem da amostra em uma estufa a 105°C por um tempo de 2 horas. Posteriormente a amostra foi peneirada em uma sequência de peneiras de laboratório, as porções retidas em cada peneira foram pesadas e os pesos anotados e dispostos em tabelas.

As tabelas serviram de base para a elaboração dos gráficos apresentados a seguir.

a) Minério de ferro sinter-feed Andrade

A figura 5.26 abaixo mostra a curva granulométrica do sinter-feed Andrade, onde se pode notar um alto percentual da fração >6,35mm, chegando a aproximadamente 10,40%, influenciada em grande parte pela fração >8,0mm com patamar de 4,8%.

Junte-se a este fato o baixo percentual da fração >1,0mm atingindo patamar de 31,65%, e o alto percentual de material fino < 0,15mm com patamar de 34,12%.

Ressalta-se ainda a fração <0,044mm com percentual de 8,39%, o que diferencia o minério de Andrade daqueles minérios usados pela NKK Co conforme tabela I.1 do capítulo I, ou seja, apesar do minério Andrade ser de natureza fina, aquela fração favorável ao processo de aglomeração (<0,044mm) não predomina.

Outro fato interessante a ser notado é o predomínio da fração <1,0mm e >0,15mm (~ 34%) que no processo convencional de sinterização é tida como fração intermediária, de características ruins ao processo.

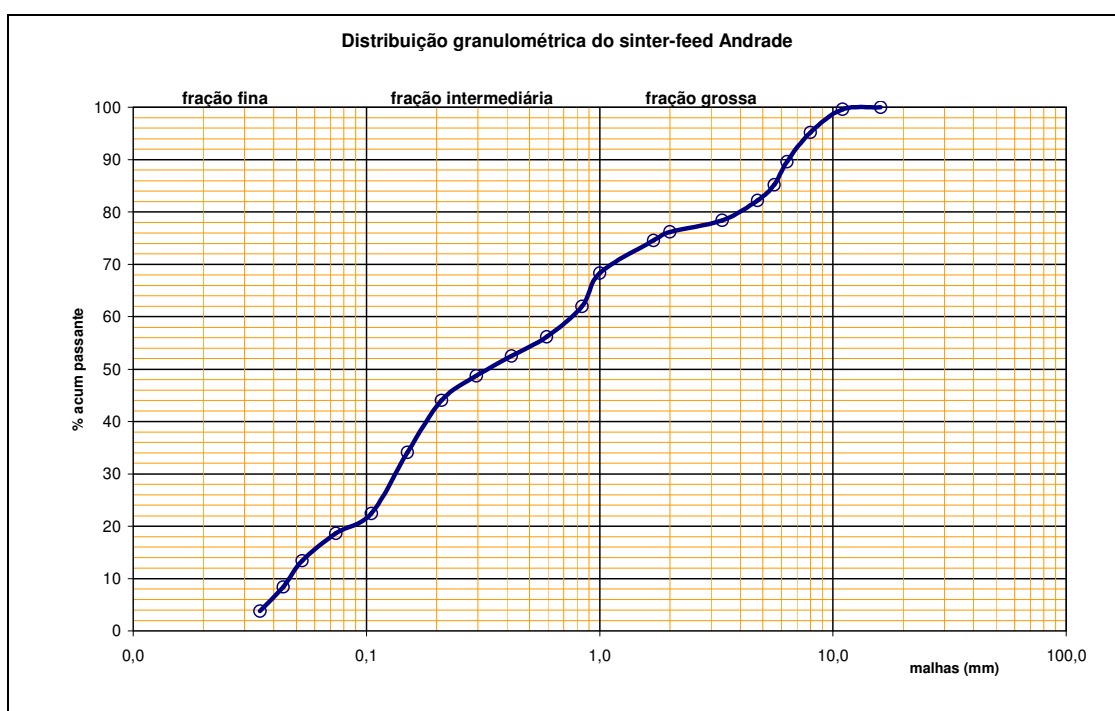


Figura 5.26 - Curva de distribuição granulométrica do sinter-feed Andrade.

b) Serpentinito

A distribuição granulométrica do serpentinito mostrada na figura 5.27 evidencia um material com características muito grosseiras, chegando a apresentar 35,41% na fração >1,0 mm, e 13,47% na fração <0,105mm.

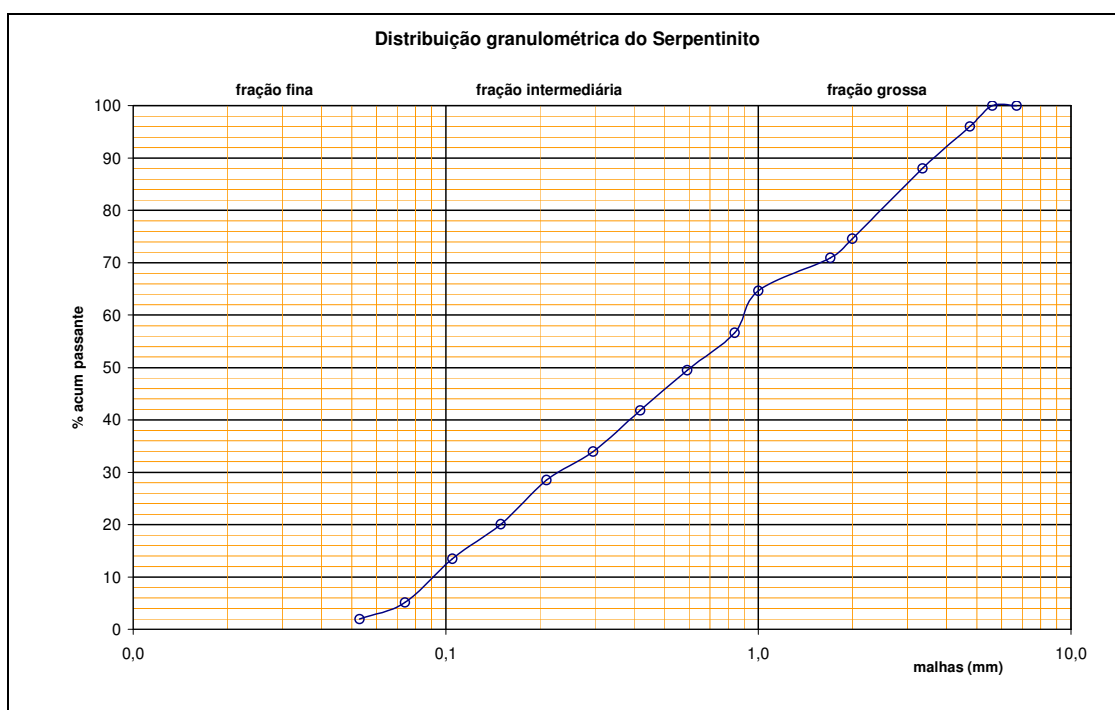


Figura 5.27 - Curva de distribuição granulométrica do Serpentinito.

O serpentinito, apesar de ser considerado um material aditivo ao processo de sinterização, usado como fonte de MgO para facilitar a viscosidade da escória e consequentemente a dessulfuração no alto-forno, se mostra como uma matéria-prima importante na aglomeração a frio devido à alta participação na mistura, e às características da forma, porosidade e rugosidade dos grãos conforme visto anteriormente neste capítulo.

c) Calcário Calcítico

A distribuição granulométrica do calcário calcítico apresentada na figura 5.28 abaixo mostra uma matéria-prima extremamente grosseira, com a fração $>1,0$ mm chegando a atingir o patamar de 61,66%, e a fração $< 0,105$ mm no patamar de 2,53%.

O calcário tem um papel importante no processo de sinterização, pois se trata de corretivo de basicidade, e como vimos nas imagens de MEV, possui características interessantes para a aglomeração a frio, tais como rugosidade e porosidade. Trata-se, portanto de uma matéria-prima cuja distribuição granulométrica precisa estar adequada para a melhoria de performance do tambor de mistura e dos discos de pelotização no processo HPS.

No processo de aglomeração a frio, certamente uma distribuição grosseira como a apresentada nesta amostra não trará muitos benefícios.

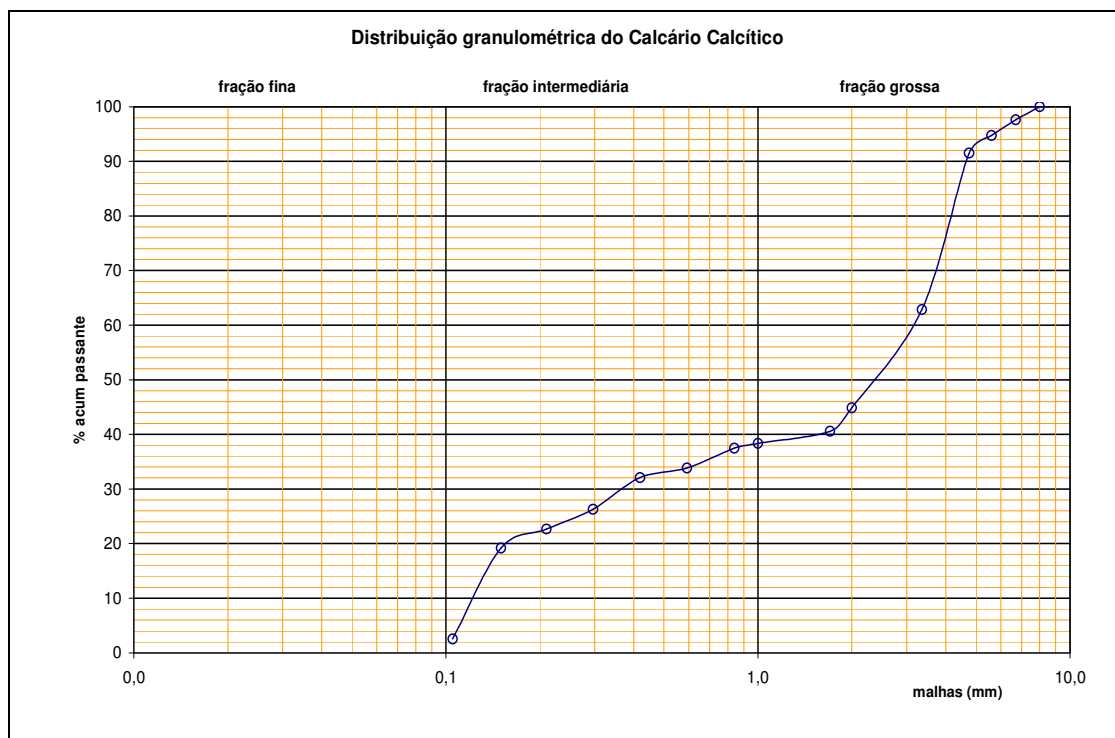


Figura 5.28 - Curva de distribuição granulométrica do Calcário Calcítico.

d) Minério de Manganês

A curva granulométrica do minério de manganês conforme apresentado na figura 5.29 abaixo mostra um minério com aproximadamente 15% acumulado na fração $>6,35\text{mm}$ e 57,15% acumulado na fração $>1,0\text{ mm}$, o que revela ser um material com distribuição grosseira e poucos finos na fração $<0,15\text{ mm}$.

Como foi visto nas imagens de MEV, o minério de manganês é na verdade um aglomerado de minerais de manganês, a grande maioria na forma de óxido onde predomina a pirolusita, de aspecto terroso, que assume o comportamento de fragmentos grosseiros em um ensaio de distribuição granulométrica. Grande parte da fração grossa deste material será degradada (cominuída) quando estiver dentro do misturador ou até mesmo nos discos de pelotização. O que reforça esta afirmativa é o fato do teor de manganês no sinter ser homogêneo, com baixo desvio padrão.

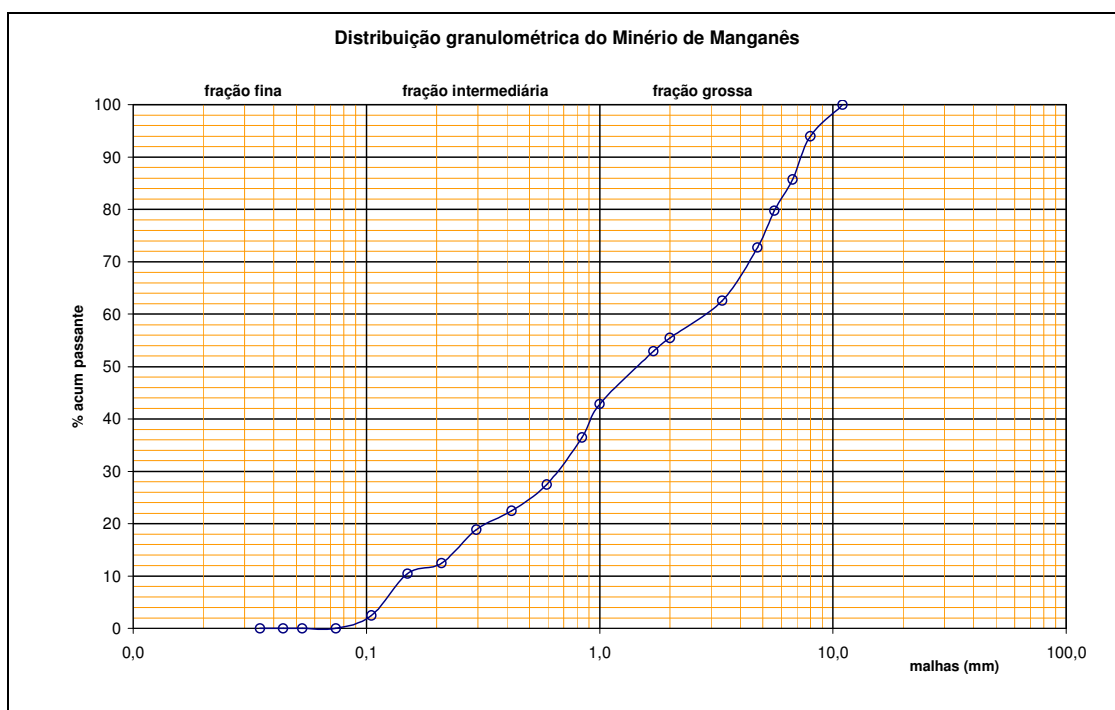


Figura 5.29 - Curva de distribuição granulométrica do Minério de Manganês.

e) Cal calcítica

A cal virgem calcítica apresentou a distribuição granulométrica mostrada na figura 5.30, onde é possível notar que a fração $>1,0\text{mm}$ está na faixa de 11,55% e a fração $<0,105\text{mm}$ na faixa de 48,69%. Esta observação nos leva a concluir que se trata de uma cal virgem com distribuição granulométrica grosseira, já que 60,24% encontram-se na faixa entre $<1,0\text{ mm}$ e $>0,105\text{mm}$.

Importante a ser ressaltado é a presença de material com granulometria de até 3,35mm, chegando a ser da ordem de 5,32%, reforçando a conclusão que se trata de uma cal grosseira.

Conforme já discutido anteriormente, o papel da cal como agente aglomerante é de extrema importância e esta matéria-prima será estudada em todas as suas características, com o objetivo de melhoria de performance. Seguramente grãos grosseiros de cal não contribuem para a aglomeração a frio.

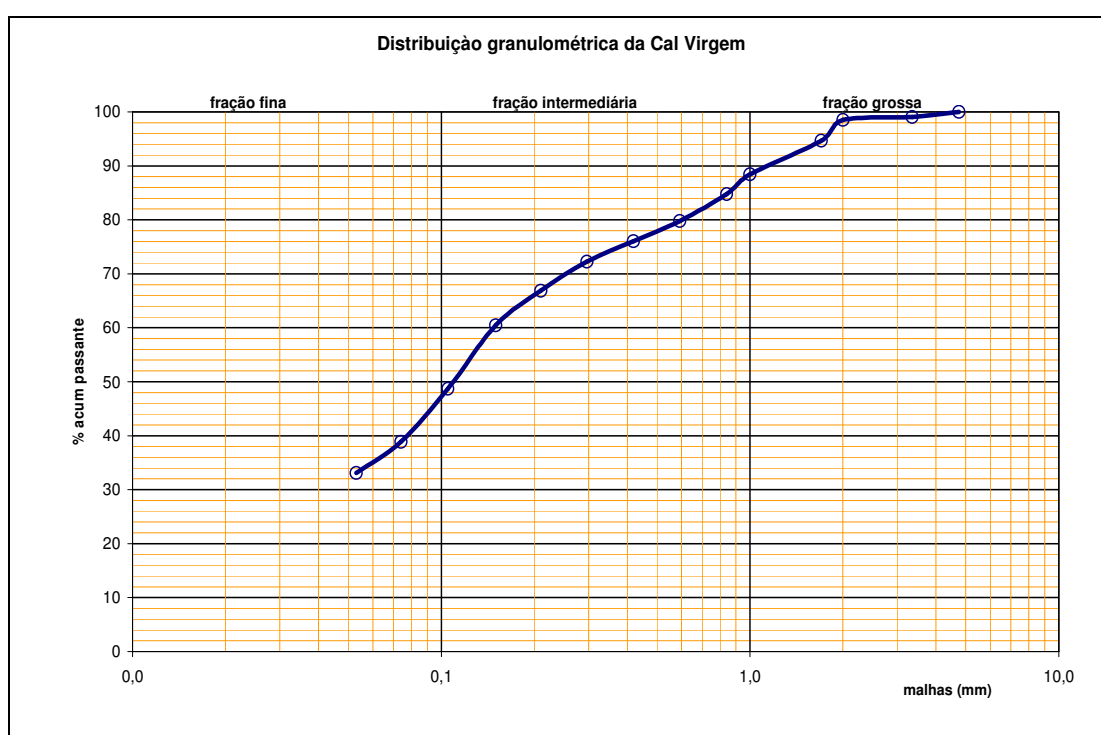


Figura 5.30 - Curva de distribuição granulométrica da Cal Calcítica.

A análise da distribuição granulométrica das matérias-primas conforme apresentado neste capítulo permitiu a elaboração da tabela V.5 abaixo, resumo das observações.

Tabela V.5- Resumo das observações na análise da distribuição granulométrica das matérias-primas.

	Fração grossa	Fração intermediária	Fração fina
Sinter-feed Andrade	alto percentual, chegando a >10%	predomínio	baixo percentual da fração <0,044mm
Serpentinito	alto percentual, chegando a >35%	baixo a médio percentual	baixo percentual
Calcário	alto percentual, chegando a >60%	baixo a médio percentual	praticamente inexistente
Minério de Manganês	alto percentual, chegando a > 15%	predomínio	pouco percentual
Cal virgem calcítica	alto percentual, chegando a valores acima de 11%	predomínio	baixo percentual

5.2.3.2 - Análise da área superficial específica por adsorção gasosa

O estudo de área superficial específica (A.S.E.) foi realizado somente com a cal virgem calcítica visto que se trata do principal agente aglomerante na etapa de aglomeração a frio.

Optou-se pela utilização do método de adsorção gasosa que utiliza a equação de Brunauer, Emmett e Teller, também conhecido como método BET, por se tratar de uma medida mais completa quando comparada com a medida realizada pelo método de Blaine.

Existem alguns fatores de uma partícula que contribuem para uma boa aplicação do método BET, quais sejam: a forma da partícula, a porosidade e a rugosidade da superfície.

Durante a análise pelo método BET cuidados especiais foram tomados buscando garantir um bom resultado:

- uma nova amostra de cal virgem foi coletada buscando evitar a hidratação natural
- a amostra de cal foi analisada na rotina de trabalho do laboratório

O laboratório de análise utilizado foi o do Departamento de Metalurgia da EE-UFMG, que conta com o instrumento QUANTACHROME, modelo NOVA-1200, versão 5.25, com software na versão 2.13, para determinação da A.S.E. por adsorção gasosa.

Tomou-se uma amostra com peso de 0,6425g, com densidade de 2,7g/cc, em um recipiente contendo 0,2380cc de volume de amostra. O adsorvato usado foi o nitrogênio com uma pressão inicial P_0 de 705,12mm Hg e temperatura de 77,4^oK.

O método utilizado foi o de multipontos onde se determinam vários pontos da isoterma conforme figura 5.31 abaixo.

Multi Point BET (Adsorption)	
P/P ₀	BET Transform [1/{W[P ₀ /P - 1]}]
0.049709	153.234377
0.102964	249.226109
0.155412	366.171843
0.256938	626.950994
0.306784	760.283860
Slope = 2395.091314	
Intercept = 13.561843	
Correlation Coefficient = 0.997938	
BET C = 177.605148	
Total Surface Area in Cell = 0.9289 m ²	
Specific Surface Area = 1.4458 m ² /g	

Figura 5.31 – área superficial específica obtida pelo método BET.

Com base nos dados acima, a curva da isoterma foi traçada conforme se mostra na figura 5.32.

O resultado apresentado mostra uma cal com uma área superficial específica de 1,5 m²/g o que demonstra ser uma cal com uma A.S.E. extremamente baixa, corroborando aquilo que foi observado nas análises de MEV onde os grãos de cal virgem se apresentaram com o aspecto vítreo, sinterizado, com pouca ocorrência de poros intragranulares.

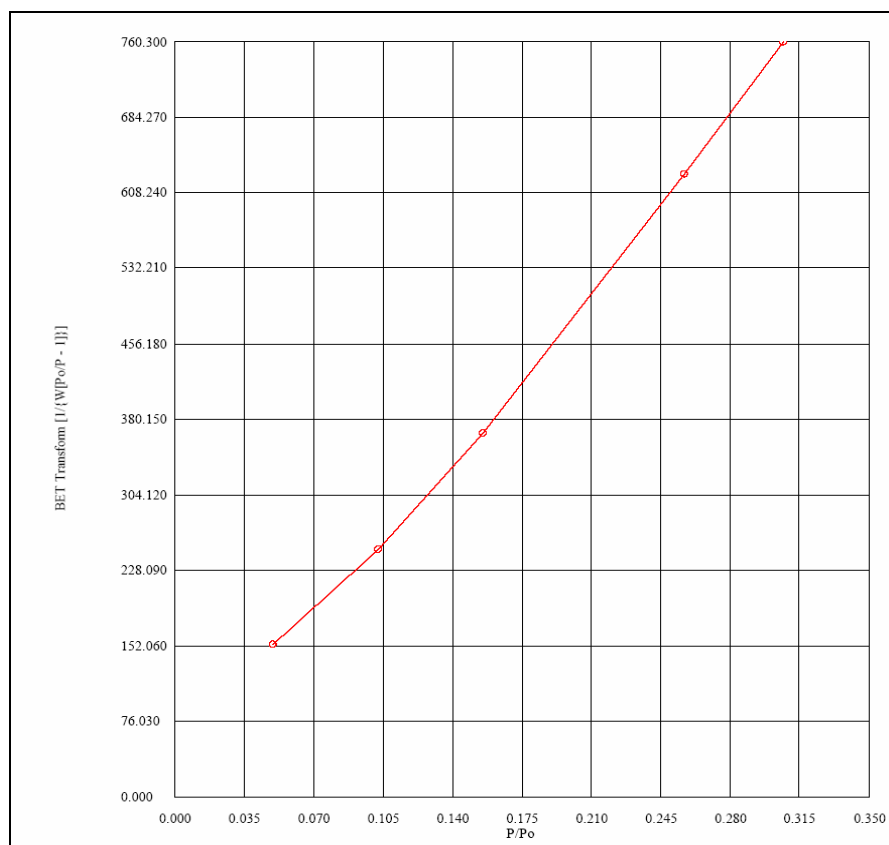


Figura 5.32 - Isoterma de adsorção do nitrogênio para a cal virgem calcítica.

5.2.3.3 - Análise da reatividade da cal pelo método WÜHRER

A reatividade da cal virgem é uma característica muito importante, pois mede o tempo de hidratação da cal quando adicionada uma solução de ácido HCl.

A busca pelo menor tempo de reação se traduz na propriedade da cal absorver o maior volume de ácido no menor tempo possível. No caso da cal virgem para sinterização, optou-se pela fixação do tempo em 3 minutos, logo, a cal mais reativa será aquela que apresentar maior volume de HCl em 3 minutos.

A figura 5.33 apresenta diversas medidas de reatividade que foram executadas em análise de rotina no laboratório da ArcelorMittal Monlevade em amostras de cal coletadas na balança dosadora da sinterização durante a coleta da amostra que serviu de base para este estudo.

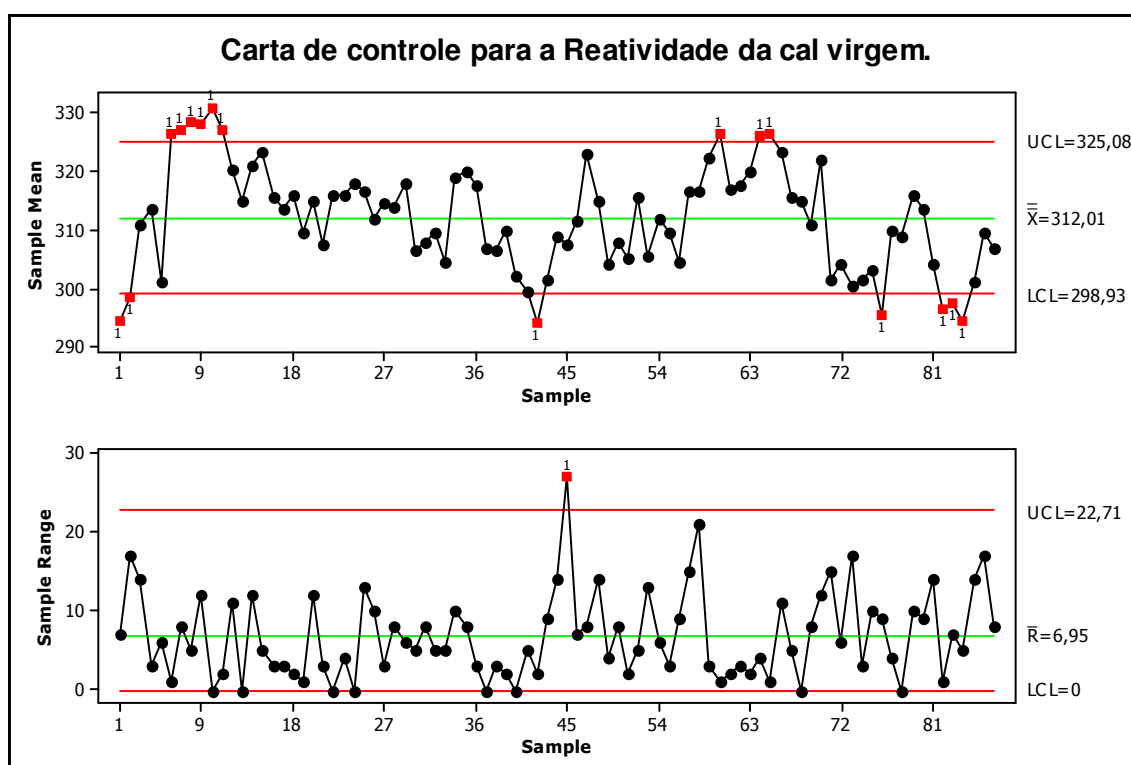


Figura 5.33 – Carta de controle da reatividade da cal virgem.

Nas 86 amostras coletadas foi possível observar uma variabilidade muito alta nas medidas de reatividade, e um valor médio de 312,01ml de HCl em 3 minutos.

Os valores observados traduzem uma cal pouco reativa para um papel tão importante de aglomerante a frio no processo HPS.

5.3- ESTUDO DA AGLOMERAÇÃO A FRIO NO HPS

Esta parte do trabalho é reservada para a discussão do processo HPS desde a etapa de micropelotização no tambor de mistura (primeira etapa de aglomeração) até a formação da quase-partícula nos discos de pelotização como pode ser visto na figura 5.34.

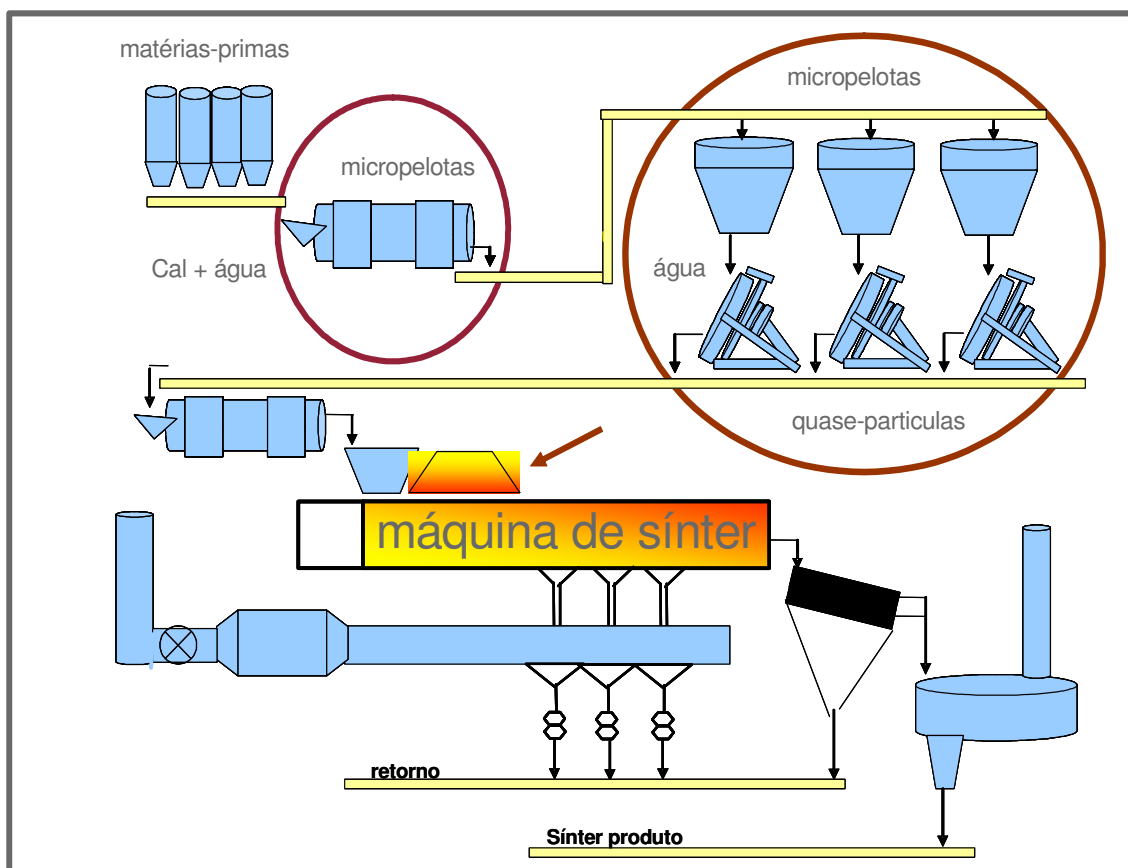


Figura 5.34 - Diagrama esquemático das duas etapas de aglomeração a frio no HPS.

Pretende-se discutir a importância e contribuição de cada etapa no resultado final da aglomeração a frio, e o papel de cada matéria-prima, tendo como base para esta análise os dados apresentados no item 5.2 discutido anteriormente.

5.3.1 - MICROPELOTIZAÇÃO NO TAMBOR DE MISTURA

O tambor de mistura, mais conhecido como misturador (figura 5.35), tem um papel importante no processo convencional de sinterização por se tratar da única etapa de aglomeração a frio. Apesar de existirem algumas instalações de sinterização que possuem dois tambores dispostos em linha, a maioria delas possui somente um tambor.

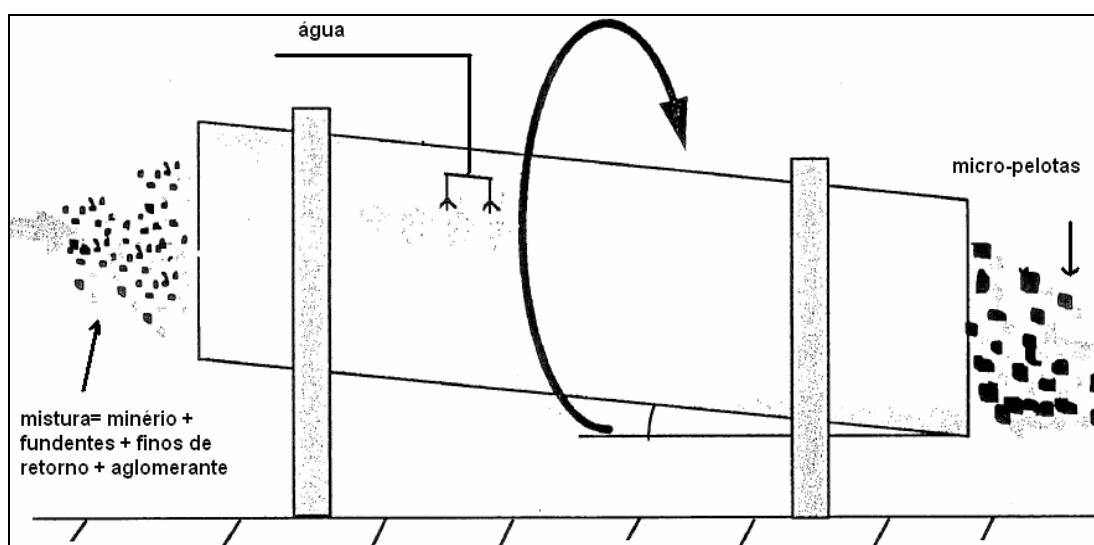


Figura 5.35 – Tambor de aglomeração da mistura na primeira etapa de aglomeração a frio no HPS.

Perez & Serra (1991) ao estudarem o regime de trabalho deste tipo de equipamento concluíram:

- o movimento das partículas dentro do misturador é fundamental para uma boa performance
- o misturador promove o acerto de umidade da mistura, a homogeneização e a micro pelletização
- a micropelletização da mistura depende da distribuição granulométrica, da composição mineralógica, da umidade e da adição de aglomerantes.

5.3.1.1 - Regime de operação do misturador

Ishikawa et al. (1989) correlacionaram a micropelletização com o movimento das partículas dentro do misturador, mostrando os regimes de deslizamento, cascata e catarata de acordo com a velocidade de rotação e o fator de ocupação. O gráfico cartesiano da figura 5.36 mostra esta correlação entre o fator de ocupação dado em percentual (%) e o número de Froude que é adimensional e envolve forças inerciais e forças gravitacionais.

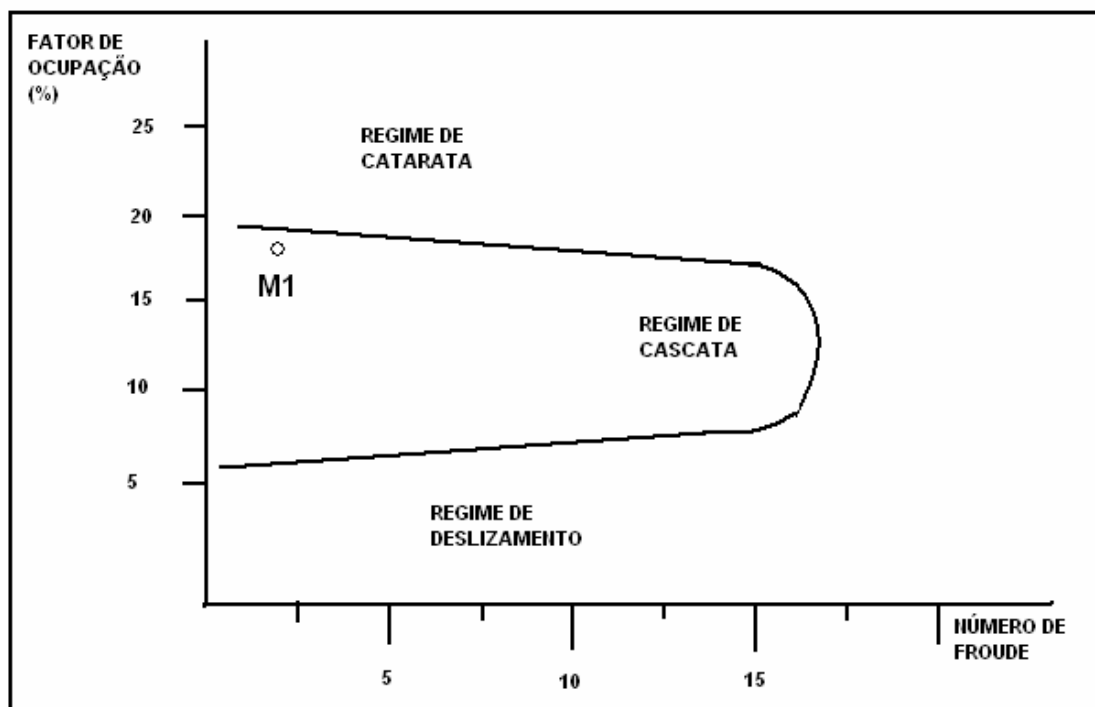


Figura 5.36 – Regime de operação de um misturador (adaptado de Perez&Serra, 1991).

O movimento denominado de “regime de catarata” tem a característica de formar micro-pelotas para posterior destruição das mesmas, sendo mais adequado para homogeneização. O movimento denominado de “regime de deslizamento” não promove um contato efetivo entre grãos aderentes e nucleantes, assemelhando-se mais a um fluxo laminar. O movimento denominado “regime cascata” proporciona um maior “Índice de Granulação (IG)” na mistura.

O fator de ocupação do misturador é dado pela equação V.1 abaixo:

$$f = \frac{\text{volume}M}{\text{volume}T} \quad (\text{equação V.1})$$

Onde: f – fator de ocupação em %,

volume M – volume de material no misturador

volume T – volume total do misturador.

O número de Froude é dado pela equação V.2:

$$Fr = \frac{D \cdot (N / 60)^2}{g} \quad (\text{equação V.2})$$

Onde D é o diâmetro interno do misturador (m),

N é a velocidade de rotação (rpm)

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

A tabela V.6 abaixo apresenta os dados do misturador primário da sinterização de Monlevade, necessários ao cálculo das equações dadas acima.

Tabela V.6 – Dados do misturador primário da sinterização da usina de Monlevade.

Comprimento (metros)	10	
Diâmetro interno (metros)	3,2	
Vazão (m ³ /h)	218	
Capacidade Nominal (t/h)	370	
Tempo de retenção (minutos)	4,2	
Inclinação (graus)	3	
Velocidade de rotação (rpm)	5,1	
Fator de ocupação (%)	18,97	obtido pela equação V.1
Número de Froude ($\times 10^{-3}$)	2,36	obtido pela equação V.2

O ponto M1 do gráfico da figura 5.36 posiciona a condição atual de operação do misturador da sinterização da Usina de Monlevade em relação ao fator de ocupação e ao número de Froude calculados na tabela V.6. Pode-se concluir que o fator de ocupação está adequado e o misturador encontra-se no “regime de cascata”.

5.3.1.2 - Índice de Granulação (IG)

Outro ponto a ser abordado ainda no misturador é o aspecto da micropelotização da mistura, que tem relação direta com a umidade, a distribuição granulométrica, a mineralogia e o aglomerante que está sendo utilizado.

Almeida et al. (1991) ao estudar a micropelotização nos misturadores da COSIPA estabeleceram um método de cálculo para o Índice de Granulação (IG) por meio da equação V.3:

$$IG = \left(\frac{A1 - B1}{A1} + \frac{A2 - B2}{A2} \right) * 100 \quad (\text{equação V.3})$$

Onde: A1 – massa de mistura retida entre as peneiras de 0,5 a 0,25 mm

A2 – massa de mistura passante na peneira de 0,25 mm

B1 – massa de micropelotas retidas entre as peneiras de 0,5 a 0,25 mm

B2 – massa de micropelotas passantes na peneira de 0,25 mm.

O método de cálculo do IG permite avaliar o comportamento de uma mistura comparada com outra, mantidas as mesmas condições de operação do equipamento.

Assim, foi possível comparar o IG de algumas misturas estudadas, que serão apresentadas mais à frente nesta dissertação.

5.3.2 - QUASE-PARTÍCULA NOS DISCOS DE PELOTIZAÇÃO:

Fonseca et al. (2005) estudaram a influência da distribuição granulométrica do pellet-feed na performance da aglomeração a frio dos discos de pelotização da SAMARCO e concluíram que os fatores mais importantes para a formação da pelota verde (green-pellets) são:

- forma do grão
- tamanho médio das partículas do minério
- mineralogia
- distribuição granulométrica do minério e do aditivo
- porosidade das partículas
- molhabilidade das partículas
- umidade da mistura
- tipo e quantidade do agente aglomerante
- regime de operação do equipamento (inclinação, rotação, tempo de retenção).

Por analogia, apesar da distribuição granulométrica da mistura no processo HPS ser diferente daquela utilizada na pelotização, adotou-se como premissa que as mesmas características acima citadas estarão presentes e impactando a performance da aglomeração a frio nos discos de pelotização do HPS.

5.3.2.1 - Regime de operação do disco de pelotização

Os discos de pelotização têm a função básica de formar as quase-partículas, estimulando a aglomeração a frio e alterando a distribuição granulométrica das micropelotas.

Os parâmetros de controle dos discos são a rotação, a inclinação e a injeção de água por meio de bicos aspersores.

Os parâmetros operacionais de controle são: o tempo de residência da mistura no disco, a taxa de alimentação em t/h e o fator de enchimento do disco observado pela altura de material em relação ao fundo (profundidade).

A tabela V.7 correlaciona os parâmetros operacionais com os resultados esperados nos discos.

Tabela V.7 Correlação parâmetros operacionais versus resultados esperados.

PARÂMETROS	TEMPO DE RESIDÊNCIA	TAMANHO DAS QUASE-PARTÍCULAS	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
Profundidade maior	maior	maior	mais homogênea
Taxa de alimentação maior	menor	menor	menos homogênea
Inclinação maior	menor	menor	menos homogênea

5.3.2.2 - Formação da quase-partícula

Entende-se por granulação o processo pelo qual partículas muito finas se aderem entre si para a formação de uma partícula maior conforme mostrado na figura 5.37.

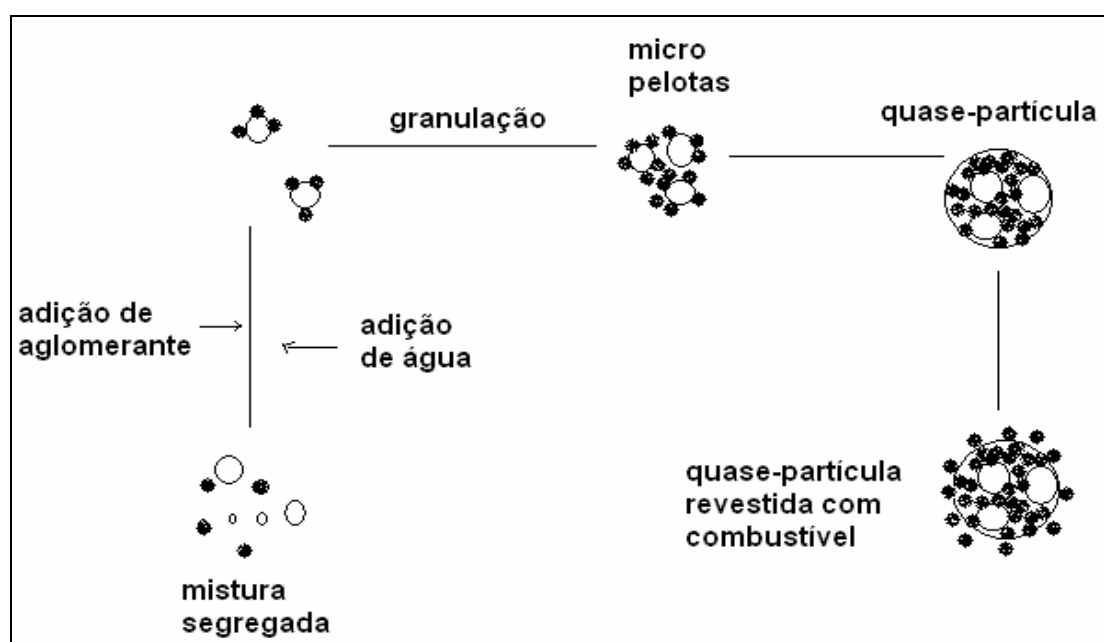


Figura 5.37 – Processo de granulação de uma mistura após a adição de água. Fonte: GranTec Tecnologia.

Meyer (1980) estabelece que a aglomeração a frio de duas partículas está condicionada ao fenômeno que envolve a interface de uma fase sólida (mistura de minério, fundentes e aglomerante) e uma fase líquida (água).

A força existente na interface sólido/líquido tem um efeito coesivo sobre as partículas e consiste em tensões superficiais do líquido e das forças de capilaridade operando nas superfícies côncavas formadas entre as partículas de minério. O efeito da capilaridade é muito importante no mecanismo da aglomeração. A água preenche os interstícios entre as partículas formando um sistema de capilaridade com múltiplas ramificações.

A sucção criada na interface ar/água do tubo capilar causa uma reação de igual intensidade nas partículas mantendo-as unidas.

Bernardes (2006) reconhece cinco mecanismos de ligações na formação de um aglomerado:

- forças de adesão e coesão no filme líquido entre as partículas individuais primárias, reduzindo assim a distância entre as partículas e aumentando a área de contato entre elas, potencializando, portanto a força de atração de Van der Waals;
- forças interfaciais conseguidas quando a mistura atinge um grau de saturação de água onde o filme entre as partículas individuais foi atingido, e as forças capilares começam a se potencializar na interface sólido/líquido e líquido/ar;
- formação de pontes sólidas após a evaporação do líquido, quando então o aglomerante cria ligações por meio de cristalização;
- forças de atração entre as partículas sólidas principalmente as forças eletrostáticas
- entrelaçamento mecânico quando as partículas se aderem por entrelaçamento ou agarramento mecânico.

Cassola & Moraes (2007) afirmam que a adição de água é um fator fundamental na formação e no crescimento das quase-partículas, pois cria uma tensão superficial que mantém os grãos minerais coesos, denominada de tensão neutra. A tensão neutra, porém, não é suficiente para manter a coesão das partículas de minério de ferro devido à elevada densidade. Além disso, soma-se a evaporação da água quando ocorre o aquecimento da quase-partícula provocado pela adição dos finos de sínter quente originados no processo de sinterização, causando assim uma desintegração da quase-partícula.

Aglomerantes precisam ser adicionados à mistura a ser aglomerada, com os objetivos de aumentar a viscosidade da fase líquida dentro dos capilares, manter a

quase-partícula coesa e auxiliar durante a queima na formação de “pontes cerâmicas” ou na formação de cálcio-ferritas, ou ainda na escorificação em pontos discretos, contribuindo para a resistência do sinter após a queima.

O aglomerante aumenta a resistência da quase-partícula de minério de ferro pela ação do material coloidal que diminui as distâncias entre partículas, aumentando a força de Van der Waals. Forma-se uma ligação sólida pelo gel ou colóide endurecido, que gera resistência das partículas nos pontos de contato.

Cassola & Chaves (1998) ao estudarem o efeito da aglomeração da mistura minério de ferro mais aglomerante constataram ser este decorrente de dois mecanismos diferentes que se somam para darem o resultado final, qual seja, aumentar a viscosidade da solução aquosa (fase líquida) e promover a ação dispersante do aditivo sobre as partículas coloidais de limonita presentes na superfície da hematita. O fenômeno da dispersão das limonitas da superfície da hematita é o mecanismo que assegura a viscosidade intersticial dentro da quase-partícula e permite a formação de películas de óxido de ferro intergranulares, que ajudam na formação das cálcio-ferritas durante a queima contribuindo, portanto para a resistência da quase-partícula.

Sportel e Droog (1997) alertam para a necessidade de controle da umidade da mistura como forma de garantir uma boa performance na aglomeração a frio. A determinação do grau de saturação com água nos poros do aglomerado e a influência desta na resistência mecânica levaram os autores citados a definir as seguintes equações:

$$saturação = \frac{volume_água}{volume_água + volume_ar} \quad (\text{equação V.4})$$

$$porosidade = \frac{volume_água + volume_ar}{volume_aglomerado} \quad (\text{equação V.5})$$

$$volume_aglomerado = volume_sólido + volume_água + volume_ar \quad (\text{equação V.6})$$

A boa performance de um processo de aglomeração a frio está ligada diretamente à distribuição granulométrica do aglomerado formado nos discos de pelotização.

Ergun & Orning (1949 in Paquet et al., 2005) mostram a importância da distribuição granulométrica do aglomerado na permeabilidade da camada de mistura. Um aumento no diâmetro das partículas aglomeradas acarretará um aumento na permeabilidade da camada.

5.3.3 - A AGLOMERAÇÃO A FRIO NO HPS DA USINA DE MONLEVADE:

O microscópio óptico estereoscópico nesta etapa do trabalho se mostrou como uma ferramenta fundamental para uma análise mais detalhada dos três estágios de aglomeração a frio na Usina de Monlevade.

O aparelho utilizado foi um microscópio óptico estereoscópico (lupa) para luz refletida (difusa e especular) e transmitida, polarização, da marca Leitz/Leica, modelo MZ6, com uma câmara fotográfica digital Canon Powershot S80 existente na EEUFMG-DEMIN.

As imagens obtidas mostram uma perfeita correlação entre a teoria de formação das quase-partículas conforme mostrada por diversos autores citados nesta dissertação, e a prática da rotina diária de granulação no tambor de mistura, nos discos de pelotização e no tambor de recobrimento de combustíveis.

5.3.3.1 - Formação das micropelotas no tambor de mistura

As imagens de microscópio óptico estereoscópico mostradas nas figuras 5.38 e 5.39 mostram uma micropelota impregnada com resina, conforme procedimento relatado no item IV. 3.2 desta dissertação, coletada na saída do tambor de mistura, após ter sido adicionada água e aglomerante (cal virgem) na mistura de minério e fundentes.

Observa-se a presença de uma partícula de minério de ferro Andrade envolvida por uma película de aproximadamente 1,0 mm de finos de minério, finos de cal e calcário.

É nítida a impregnação da cal na superfície rugosa do minério e a captura de partículas finas de minério que ficaram incorporadas à fina camada envoltória do núcleo semelhante a uma película. O aspecto esbranquiçado e fosco da cal evidencia a hidratação desta matéria-prima, sendo observada a formação de nódulos de cal que de certa forma não é bom para o consumo específico deste material.

Outro ponto interessante a ser observado é o aspecto da rugosidade da superfície da micropelota. Esta propriedade é muito importante para a etapa posterior de aglomeração nos discos de pelotização.

Da observação das imagens abaixo podemos concluir:

- a cal exerce um papel extremamente importante como aglomerante;
- existe uma película de material fino recobrindo o núcleo grosseiro;
- a espessura da película de material fino que recobre o núcleo depende da qualidade e quantidade de aglomerante adicionado.

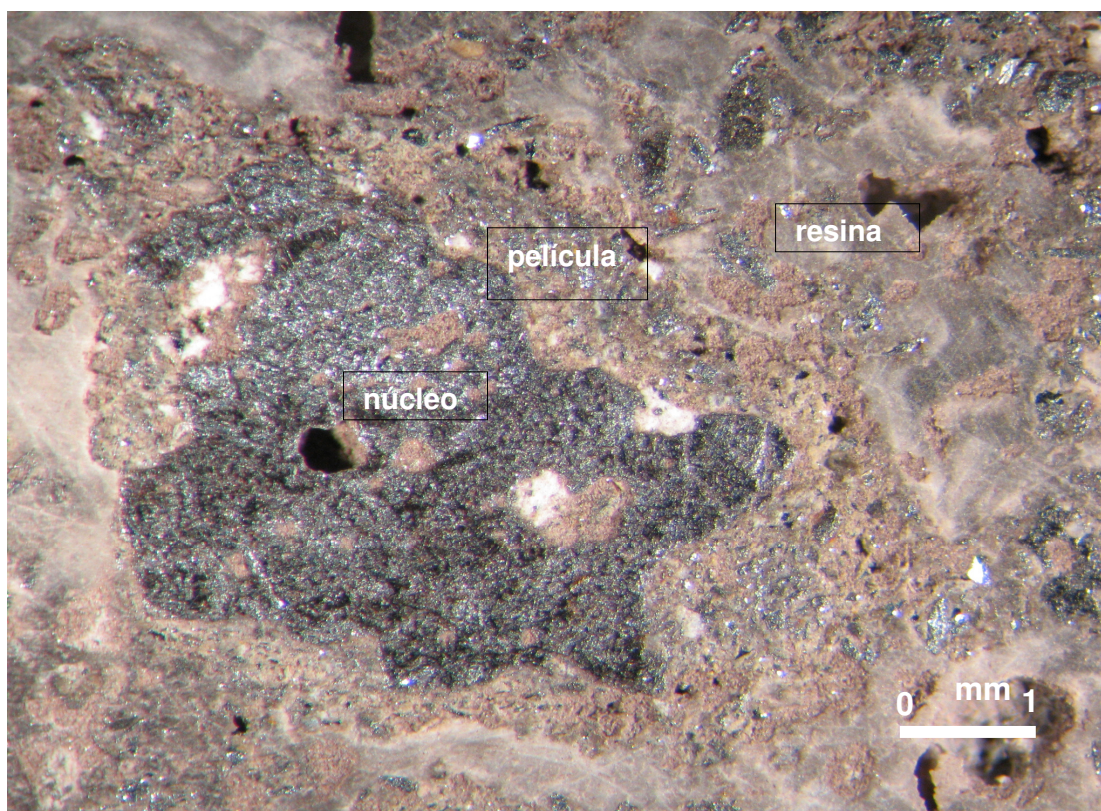


Figura 5.38 Imagem de uma micropelota com aumento de 18X.

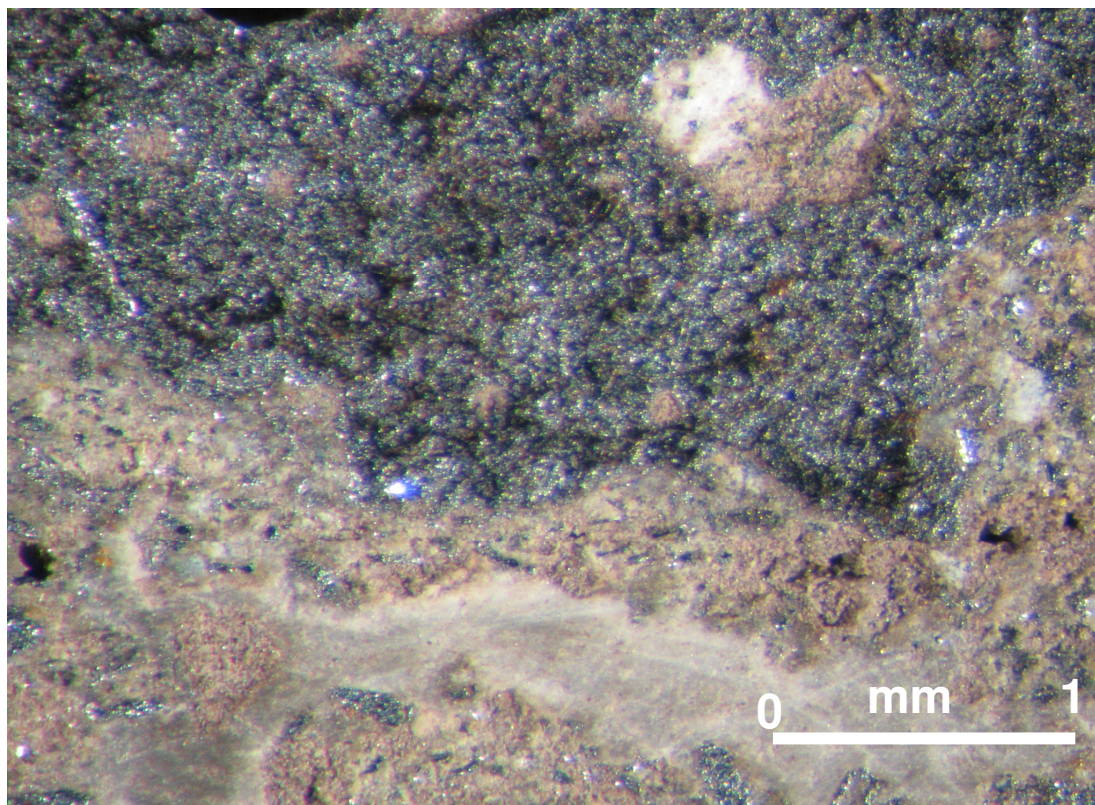


Figura 5.39 Detalhe da imagem anterior com aumento de 40X.

Também importantes são as imagens geradas pelo MEV da marca JEOL JSM-5410, com um microanalisador de raios-X dispersivo em energia (microsonda) marca Noran TN-M3055 instalado no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais da EEUFMG – DEMIN.

Na imagem da figura 5.40, obtida pela exposição ao MEV do material resinado, é possível observar um núcleo de minério de ferro com superfície extremamente lisa, pouca rugosidade, envolto pela película de aglomerados de finos de minério (grãos facetados) e finos de fundentes e aglomerantes (massa mais escura).

Esta imagem mostra claramente o motivo do uso de maior quantidade de cal no minério Andrade para uma boa aglomeração a frio, quando comparado com o minério australiano.

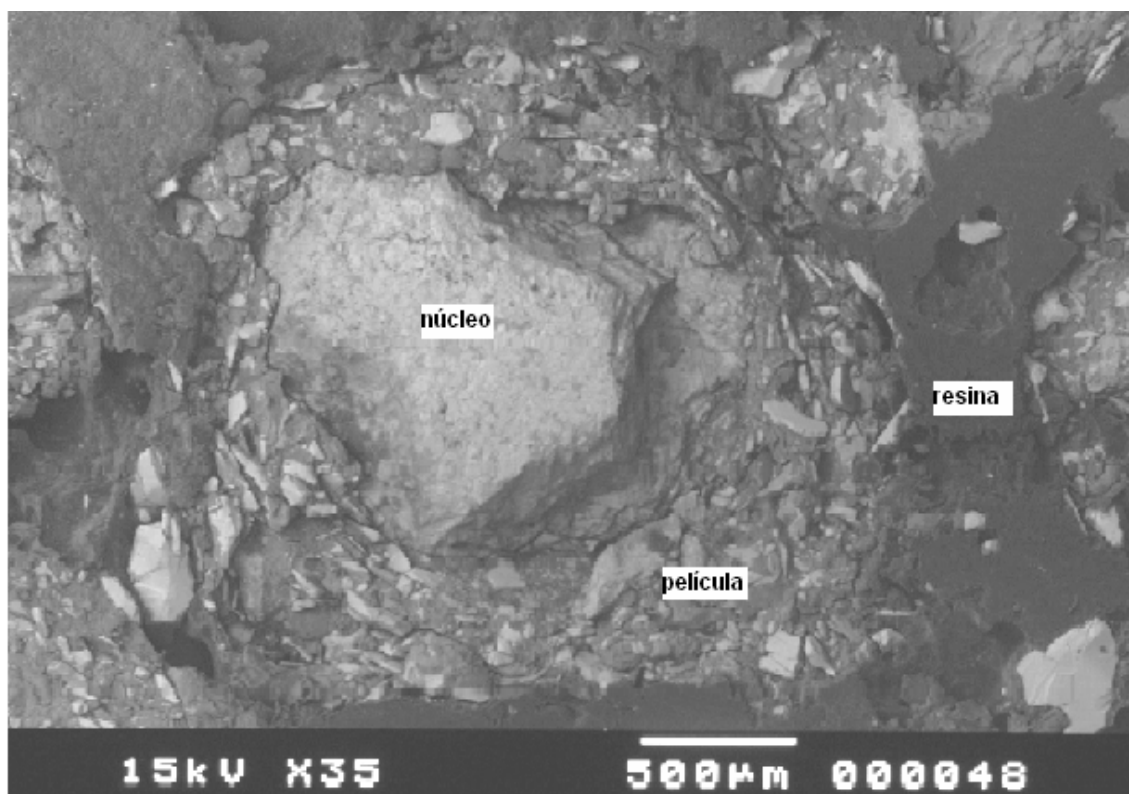


Figura 5.40 - Imagem MEV mostrando a forma facetada e superfície lisa do minério Andrade posicionado no núcleo, e uma película envoltória de material fino aglomerado. Aumento de 35X.

Detalhe da foto anterior, a figura 5.41 mostra a interface da película e do núcleo, evidenciando que a falta de rugosidade do núcleo, ou também a baixa porosidade intragranular, gera uma superfície de descolamento da película. Esta observação mostra o principal problema do minério Andrade e justifica o elevado consumo específico de cal virgem como aglomerante na Usina de Monlevade quando

comparado com o consumo específico da NKK Co, muito mais pela facilidade de aglomeração a frio dos minérios Australianos.



Figura 5.41- Imagem MEV mostrando a superfície de descolamento da película no núcleo devido sobretudo à característica de baixa porosidade intragranular do minério Andrade. Aumento de 150X.

Ainda observando na figura 5.42 , pode-se ver um detalhe da massa de minério de ferro e fundentes, juntamente com o combustível, mostrando uma massa bastante aglomerada, com alguns poros. Os grãos de hematita encontram-se bastante individualizados, com poucos finos aderidos à superfície.

Pode-se concluir portanto que o primeiro estágio de aglomeração no tambor de mistura apesar de gerar uma micropelota bem definida, apresenta ainda deficiências na resistência física desta micropelota, pois existem superfícies de rupturas capazes de serem geradas na interface dos grãos de minério Andrade com as outras matérias-primas devido à falta de porosidade intragranular e superfície extremamente lisa do minério Andrade.

Adicionar mais aglomerante nesta etapa pode ser uma solução para criar uma película mais grosseira envolvendo o núcleo da micropelota porém não é a solução para resolver o problema da resistência desta micropelota pois a superfície de contato estará sujeita à geração de uma superfície de descolamento da película em relação ao núcleo.

O controle de umidade nesta etapa pode ser uma solução criando-se as tensões superficiais necessárias para a manutenção da coesão das partículas.

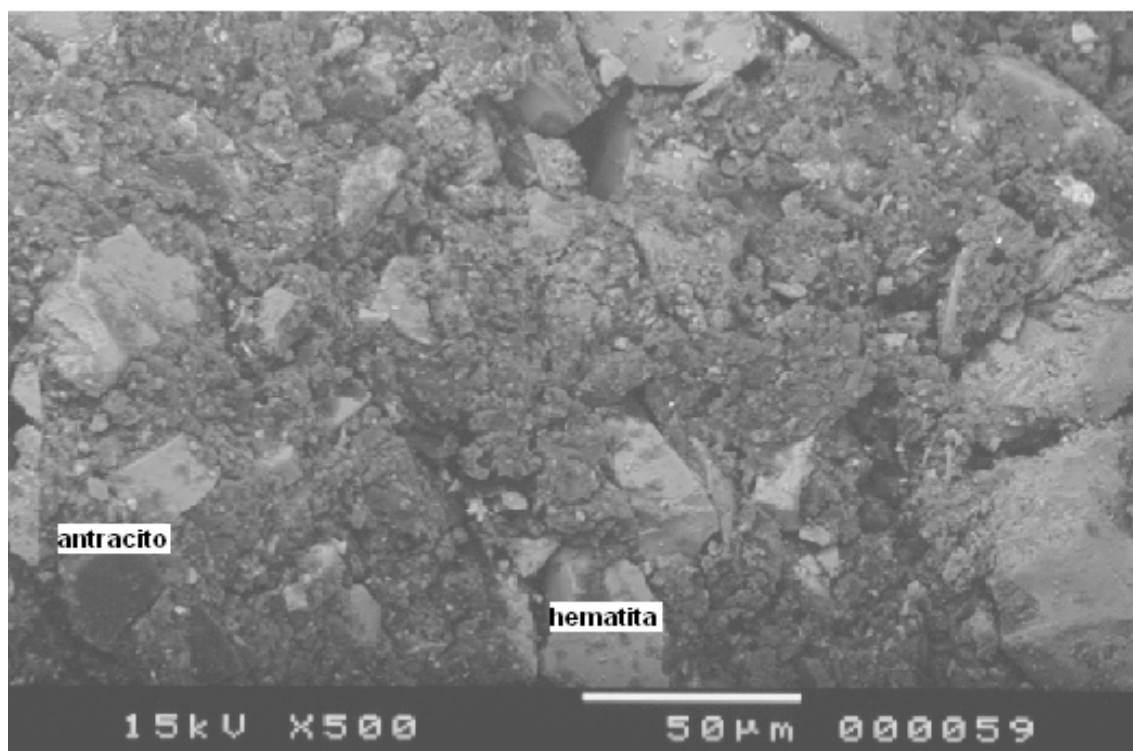


Figura 5.42- Imagem MEV mostrando um detalhe da película que envolve o núcleo . Aumento de 500X.

5.3.3.2 - Formação das quase-partículas nos discos de pelotização

As imagens do microscópio ótico obtidas na amostra de quase-partícula coletada na saída dos discos de pelotização mostram um aspecto muito interessante na formação da quase-partícula. Já é possível observar a aglomeração de mais de uma micropelota formando uma partícula maior.

As figuras 5.43 , 5.44 e 5.45 abaixo mostram uma maior espessura na película que recobre o núcleo composto por minério de ferro, e a presença de micropelotas menores, no caso específico da figura formado por um núcleo de serpentinito e outra micropelota sem núcleo, aglomeradas à maior, formando, portanto uma quase-partícula mais grosseira.

Observa-se também que a película mais externa que recobre a quase-partícula apresenta-se mais fina que a película mais interna, aparentemente a massa de material na película externa é mais homogênea em termos de granulometria.

Outro ponto a ser observado é a presença de uma auréola de reação na superfície do grão maior de minério de ferro, mostrando que uma reação na interface

sólido-sólido já se processa nesta etapa da aglomeração a frio, a temperaturas variando na faixa de 48°C a 70°C.

Também se pode observar na película que recobre o núcleo a presença de poros que certamente ajudarão na permeabilidade dos gases na máquina de sínter.

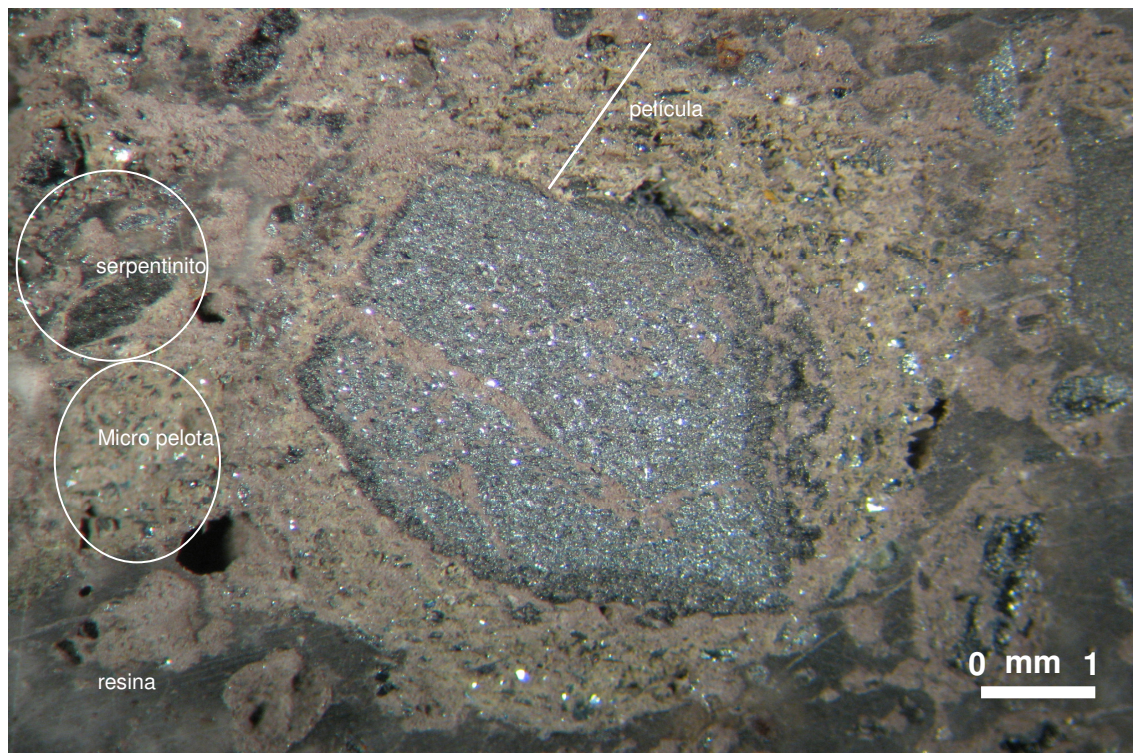


Figura 5.43 – Imagem de uma quase-partícula coletada na saída do disco de pelotização (aumento de 15X).

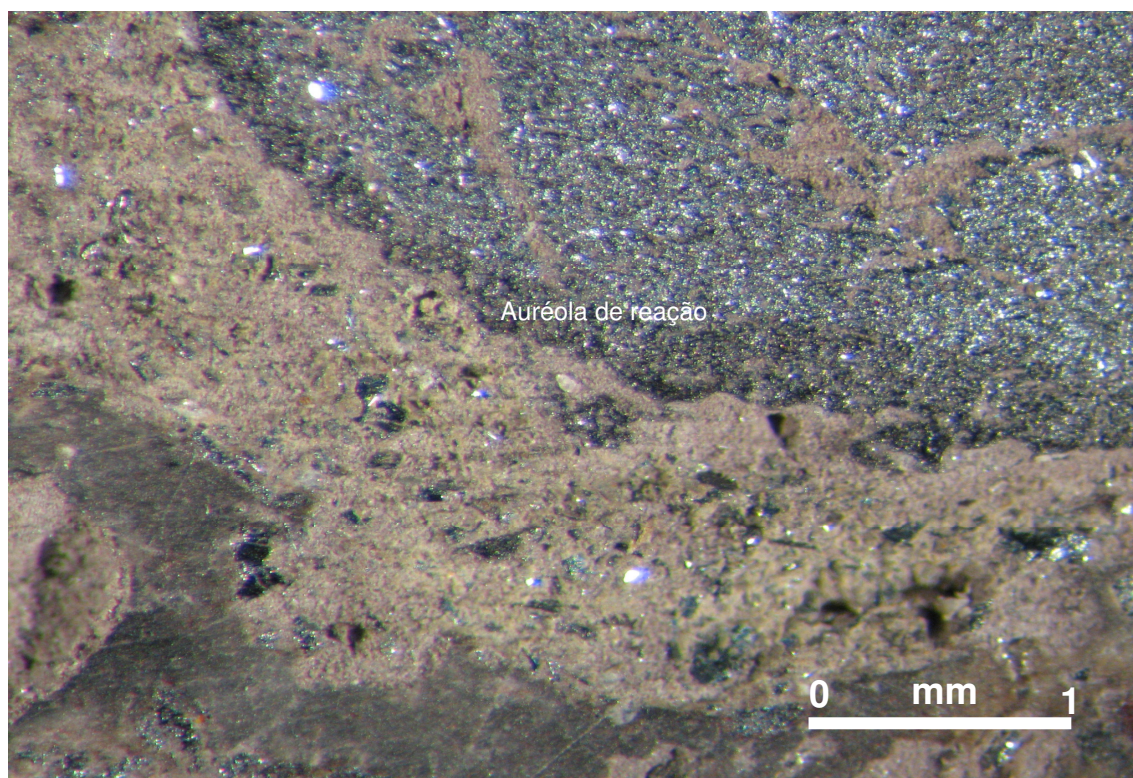


Figura 5.44 – Detalhe da imagem anterior mostrando a auréola de reação existente na interface película-núcleo (aumento 35X).

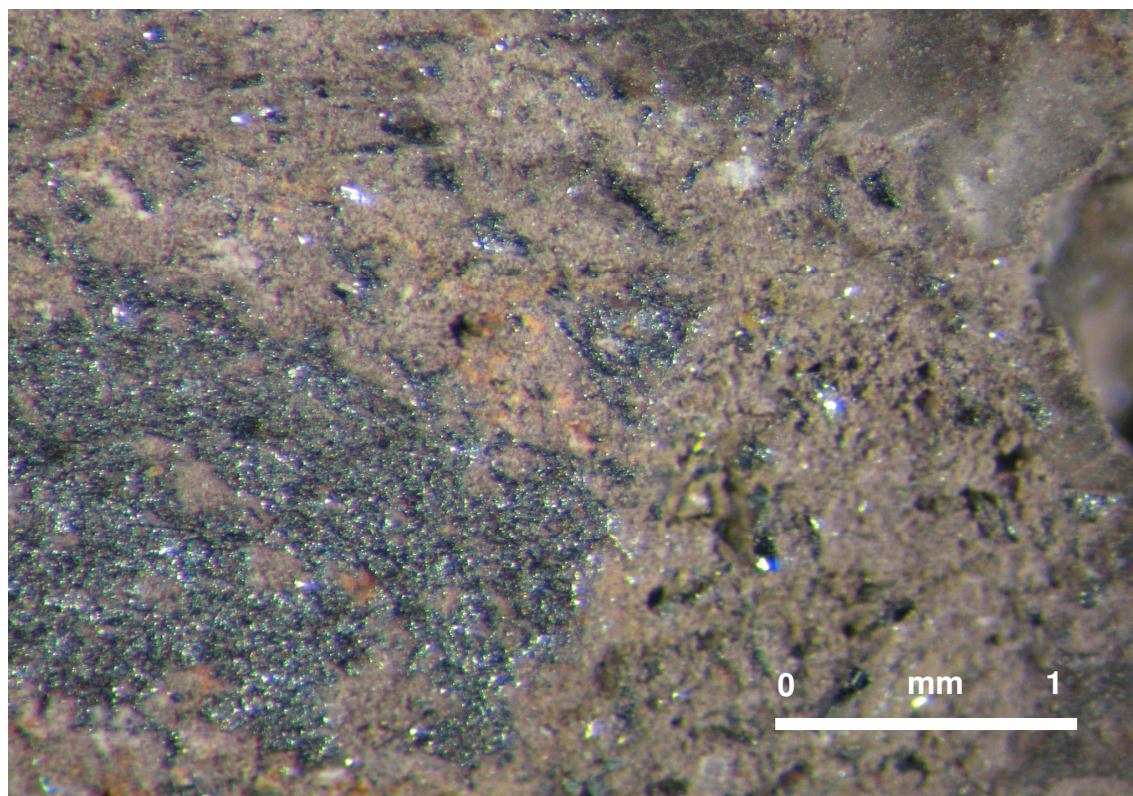


Figura 5.45 – Detalhe da imagem anterior mostrando a presença de poros (aumento 40X).

Na imagem da figura 5.46 obtida pelo MEV em uma amostra resinada de quase-partícula pode-se observar a película de material de granulometria mais fina recobrindo a película de material de granulometria mais grosseira, formando uma estrutura concêntrica em relação ao núcleo.

Este tipo de estrutura demonstra a importância dos discos de pelotização no HPS, como forma de aglomerar o material mais fino tornando-o parte integrante da quase-partícula.

Nesta etapa o controle da umidade e a presença do aglomerante são de fundamental importância para o crescimento da película de material mais fino concêntrica ao núcleo.

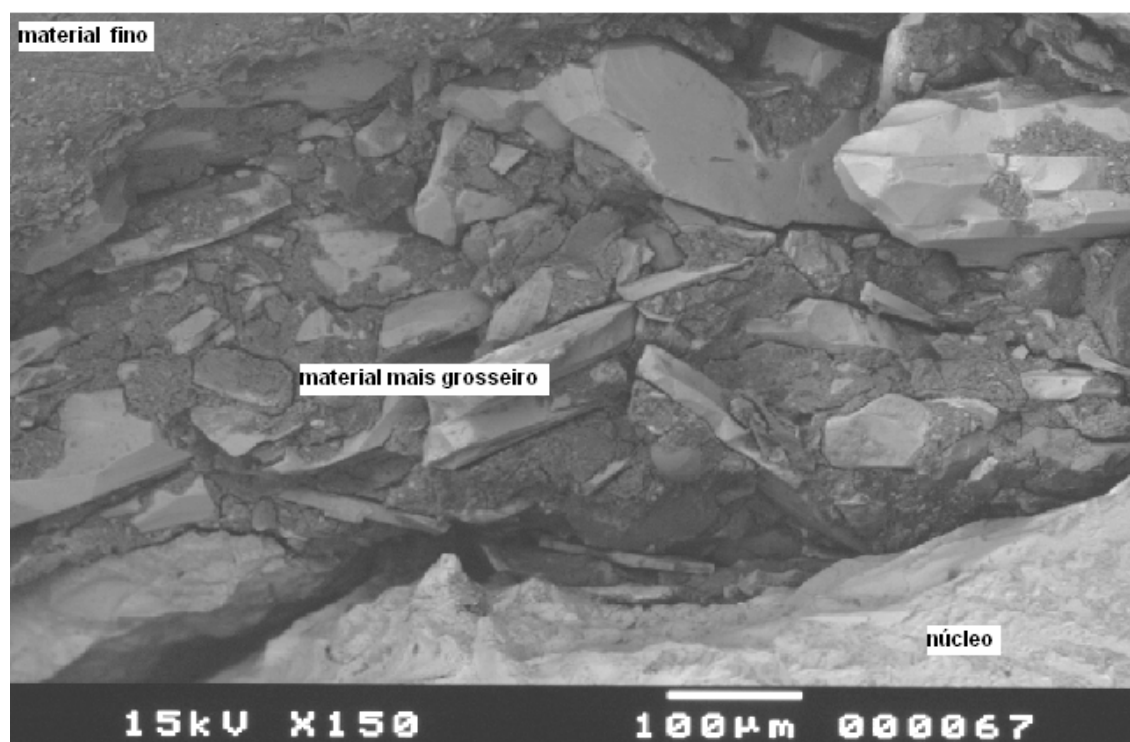


Figura 5.46 – Detalhe das duas películas formadas na quase-partícula após a saída dos discos de pelotização. Aumento de 150X.

5.3.3.3 - Etapa de recobrimento com combustível sólido

Apesar de atualmente não estar implementada a etapa de recobrimento de combustível na Usina de Monlevade, a quase-partícula passa pelo tambor de recobrimento seguindo o fluxo normal do processo.

Desta forma, optou-se por também fazer uma amostragem na saída do tambor de recobrimento visando verificar a condição da quase-partícula nesta etapa.

As figuras 5.47 e 5.48 mostram uma quase-partícula bem formada, com uma película espessa recobrindo o núcleo de minério de ferro, a existência da auréola de reação na partícula de minério de ferro, e a presença de uma micropelota de menor tamanho incorporada à de maior tamanho.

No detalhe pode-se observar que na auréola de reação existe a penetração de cal nos poros da partícula de minério de ferro.

Fato também importante de se notar é a presença de duas camadas de diferentes composições envolvendo a partícula maior. Na primeira camada (b) na figura 5.48 observa-se uma maior concentração de cal e finos de calcário enquanto que na camada mais externa (c) observa-se maior concentração de finos de minério.

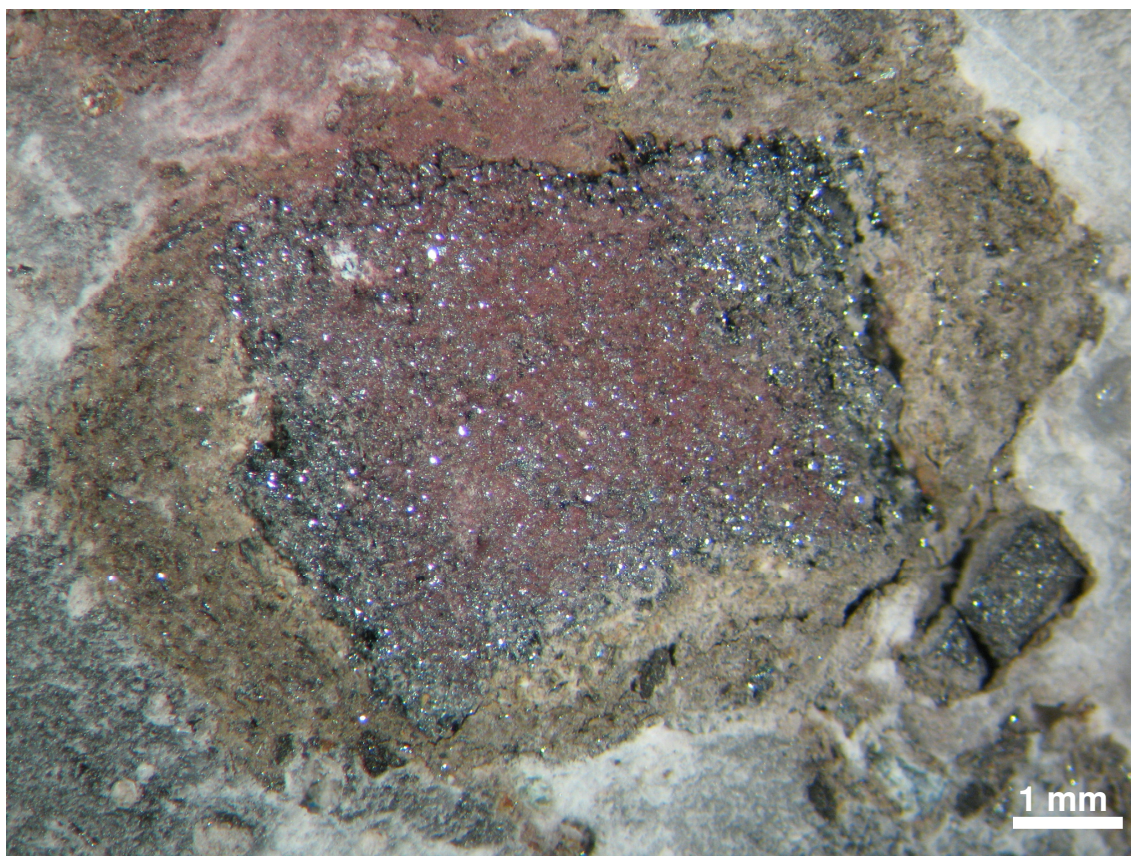


Figura 5.47 – Imagem de uma quase-partícula na saída do tambor de cobertura de combustível (aumento 15X).

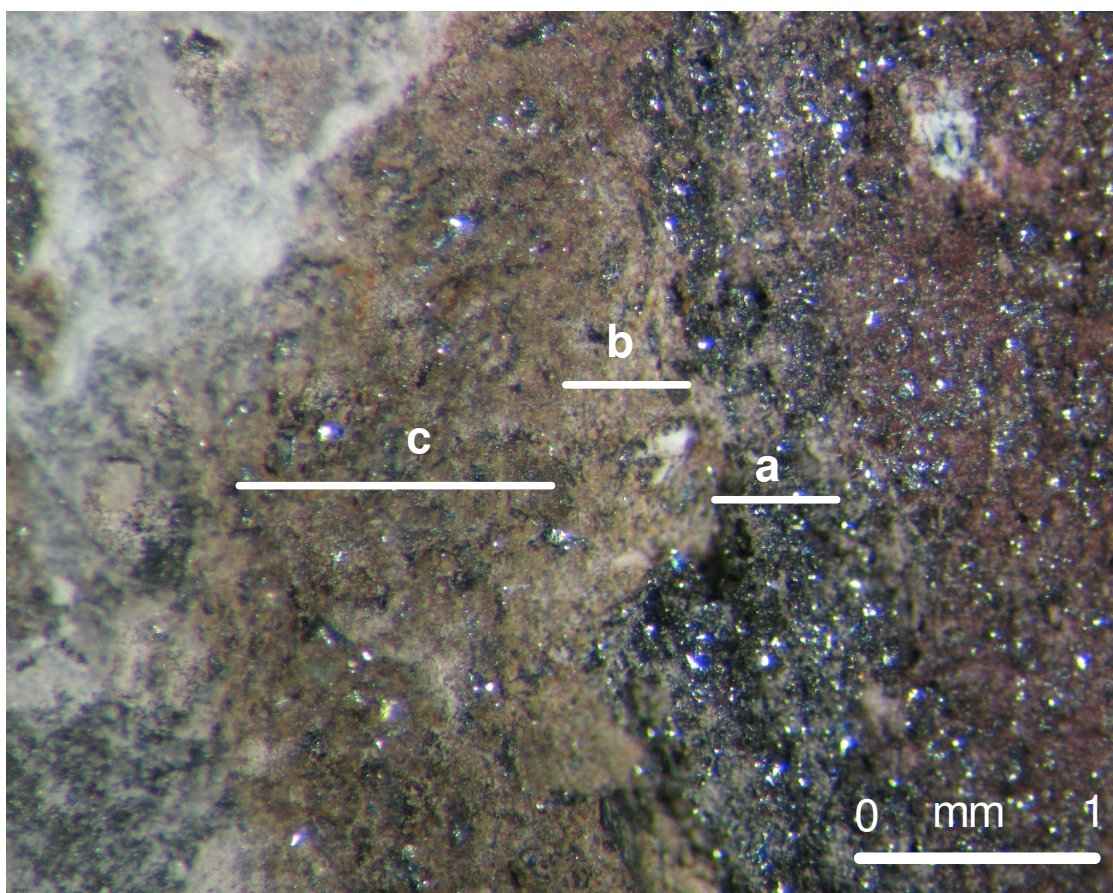


Figura 5.48 – Detalhe da Imagem anterior mostrando a auréola de reação (a) com a penetração de cal nos poros da partícula de minério de ferro, a camada com mais cal (b) e a camada com mais finos de minério (c). Aumento de 32X.

5.4- ADEQUAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Nesta etapa do estudo procederam-se à interpretação dos dados observados durante a caracterização tecnológica descrita nos itens 5.2 e 5.3.

Conforme já relatado anteriormente, o HPS está adequado para trabalhar com matérias-primas com uma larga distribuição granulométrica, e o papel do aglomerante é fundamental na performance do processo.

Partiu-se então para a análise de cada matéria-prima estudada visando o aproveitamento das características de aglomeração observadas e a adequação daquelas características que não atendiam ao HPS.

5.4.1 - SERPENTINITO

A análise química do serpentinito, associado às observações da difração de raios-X (DRX) mostra a presença abundante de clinocrisotila, um filossilicato que apresenta a forma fibrosa conforme demonstraram as imagens obtidas na análise do MEV-BSE.

A forma fibrosa da clinocrisotila é extremamente positiva na aglomeração a frio, pois irá criar um emaranhado de fibras garantindo a resistência da quase-partícula.

Outro aspecto positivo no serpentinito é a rugosidade dos grãos e a porosidade bastante acentuada conforme observado nas imagens de MEV-BSE. Estas propriedades conferem ao serpentinito a característica de aglomerar sozinho, somente em presença de umidade.

Um ponto negativo observado neste material durante o estudo desenvolvido diz respeito à distribuição granulométrica. O serpentinito se mostra com características muito grosseiras, chegando a apresentar 35,41% em massa retida na peneira de 1,0mm.

Diante deste fato, optou-se por realizar uma adequação na distribuição granulométrica desta matéria-prima visando uma redução da fração >2,76mm e um aumento da fração <0,105mm.

A adequação granulométrica desta matéria-prima se desenvolveu em um estudo conjunto com o fornecedor, por meio da troca da malha de peneira no segundo estágio de peneiramento da planta de britagem.

A figura 5.49 mostra a evolução da distribuição granulométrica do serpentinito após as mudanças executadas entre os meses de abril e maio de 2007.

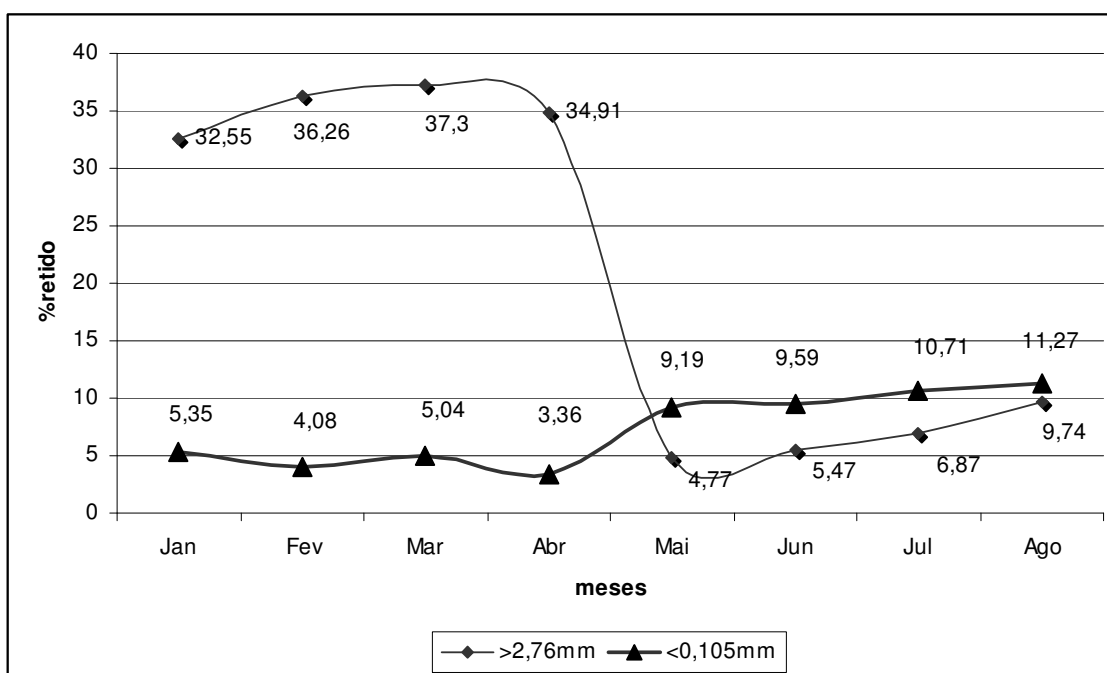


Figura 5.49 - Evolução das frações >2,76mm e <0,105mm no serpentinito no ano de 2007.

5.4.2 - CALCÁRIO CALCÍTICO

A análise por difração de raios-X mostrou no calcário calcítico a presença abundante da calcita, o que sugere o baixo grau de metamorfismo desta rocha.

A análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV-BSE) mostrou fragmentos de calcário com forma irregular, uma microporosidade intensa e rugosidade dos grãos. Foi observada também a aderência dos grãos finos aos grãos mais grosseiros, evidenciando uma facilidade para a aglomeração a frio.

Na faixa granulométrica compreendida entre <1,0mm e >0,15mm foi onde mais se notou a facilidade de aderência das micropartículas às partículas maiores.

Estas são, portanto propriedades do calcário calcítico que favorecem a aglomeração a frio no HPS:

- aderência das partículas menores às maiores,
- microporosidade,
- rugosidade excessiva.

Quanto à distribuição granulométrica do calcário calcítico, foi possível observar uma matéria-prima muito grosseira, com a fração >1,0mm atingindo patamares de 61,6% em massa e a fração <0,15mm muito baixa.

Procedeu-se então à adequação da distribuição granulométrica do calcário calcítico visando a redução da fração $>4,75\text{mm}$.

A atuação junto ao fornecedor se deu na troca da malha de peneira na planta de beneficiamento do calcário calcítico e no ajuste da abertura do britador de impacto instalado no segundo estágio de britagem.

O gráfico da figura 5.50 mostra a cominuição do calcário calcítico ajustando à curva granulométrica mais adequada para o HPS.

Nota-se a partir do mês de abril de 2007 uma redução acentuada no percentual da fração $>4,75\text{mm}$ sem reflexo na fração $>1,0\text{mm}$ e muito menos na fração $<0,105\text{mm}$.

Um caminho a ser perseguido nesta matéria-prima é proceder ao aumento da fração $<0,105\text{mm}$ visando um material mais fino.

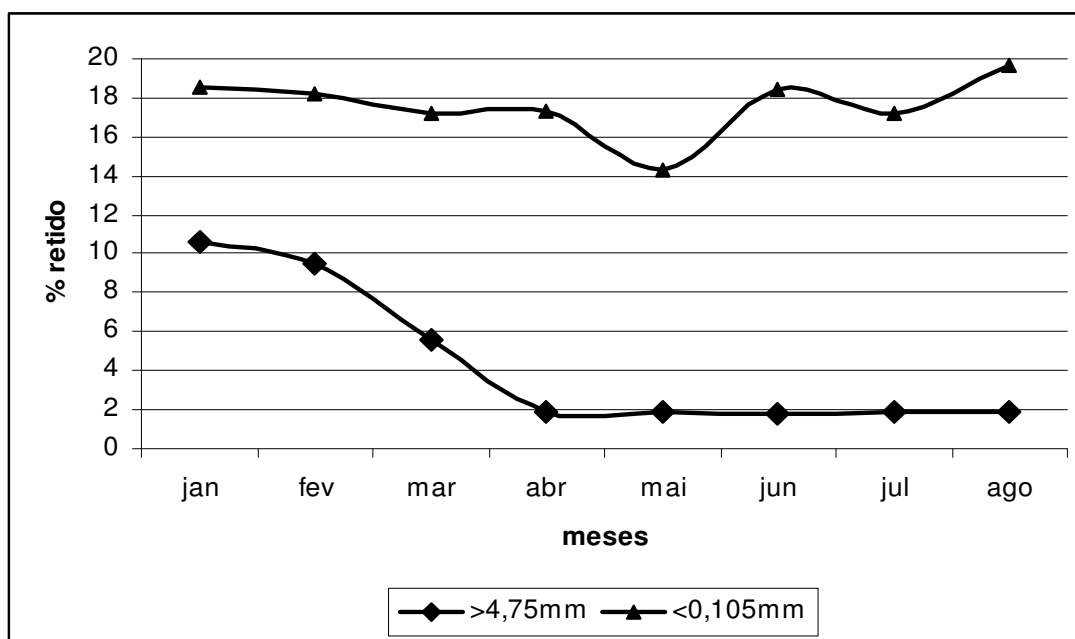


Figura 5.50 - Adequação das frações $>4,75\text{mm}$ e $<0,105\text{mm}$ no calcário calcítico no ano de 2007.

5.4.3 - MINÉRIO DE MANGANÊS

A análise por difração de raios-X do minério de ferro-manganês mostrou a presença de pirolusita na faixa de 19,28% em massa.

As análises do MEV-BSE mostraram tratar-se de um minério que possui o aspecto terroso, com partículas aglomeradas, excessiva porosidade intragranular e excessiva rugosidade.

O aspecto corroído dos grãos leva a interpretar que se trata de um minério com alto grau de intemperismo, o que confere à rocha uma característica de fácil aglomeração a frio quando umedecida, ou seja, a molhabilidade deste material é uma propriedade positiva para a aglomeração.

A análise da distribuição granulométrica desta matéria-prima mostrou ser um minério com 15% acumulado acima da fração >6,35mm, portanto de características grosseiras para o processo HPS.

A figura 5.51 mostra o ajuste da curva granulométrica do minério de manganês após a instalação de um estágio de britagem em britador de rolos do oversize da peneira instalada no segundo estágio de peneiramento.

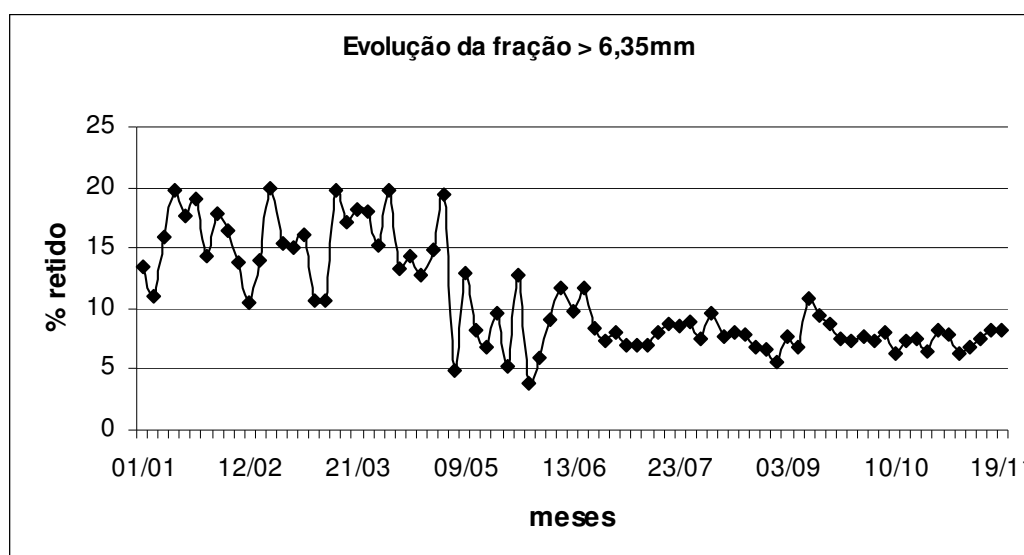


Figura 5.51 - Adequação da fração >6,35mm no minério de manganês no ano de 2007.

5.4.4 - MINÉRIO DE FERRO SINTER-FEED ANDRADE

Conforme visto no item 5.2.1, a presença de óxidos de ferro no sinter-feed Andrade é preponderante, atingindo valores de 92,47% de óxidos.

As análises das imagens de MEV-BSE (item 5.2.2) mostraram a predominância de grãos de hematita especular na forma lamelar, com uma microestrutura foliada e orientação preferencial bem definida, textura lepidoblástica, contendo cristais de talco dispostos nos planos de foliação. A presença de porosidade intergranular e intragranular é baixa ou totalmente ausente. O aspecto liso e facetado dos cristais confere às partículas pouca ou nenhuma rugosidade.

As partículas da fração $<0,15\text{mm}$ além de lisas e pouco rugosas apresentam cristais alongados que aparentemente mostram dificuldades para aglomeração.

A distribuição granulométrica do sinter-feed Andrade se mostra com alto percentual da fração acima de $6,35\text{mm}$, chegando a atingir valores acima de 10% em massa e alto percentual de finos na fração $<0,150\text{mm}$ chegando a valores de até 40% em massa. Em contrapartida, os valores da fração $<0,044\text{mm}$ são muito baixos, o que para a aglomeração a frio seria satisfatório que fossem mais altos, visto o ganho que se obtém com o aumento da área superficial específica.

Fonseca et al. (2005) apontam algumas características básicas para o minério de ferro que garantem uma boa performance na aglomeração a frio para um processo convencional de pelotização:

- forma do grão
- tamanho médio das partículas
- porosidade das partículas
- molhabilidade das partículas.

Apontam ainda os autores supracitados que a quantidade em massa da fração $<0,044\text{mm}$ é muito importante na fabricação das pelotas verdes no processo de pelotização, pois o ganho de performance na aglomeração advém do ganho acentuado de área superficial específica.

Sakamoto (1989) ao estudar as características de aglomeração de diversos tipos de minérios de ferro visando o desenvolvimento do processo HPS construiu a curva de correlação mostrada na figura 5.52, onde se pode notar claramente a influência da fração fina do minério de ferro na performance da aglomeração a frio da quase-partícula.

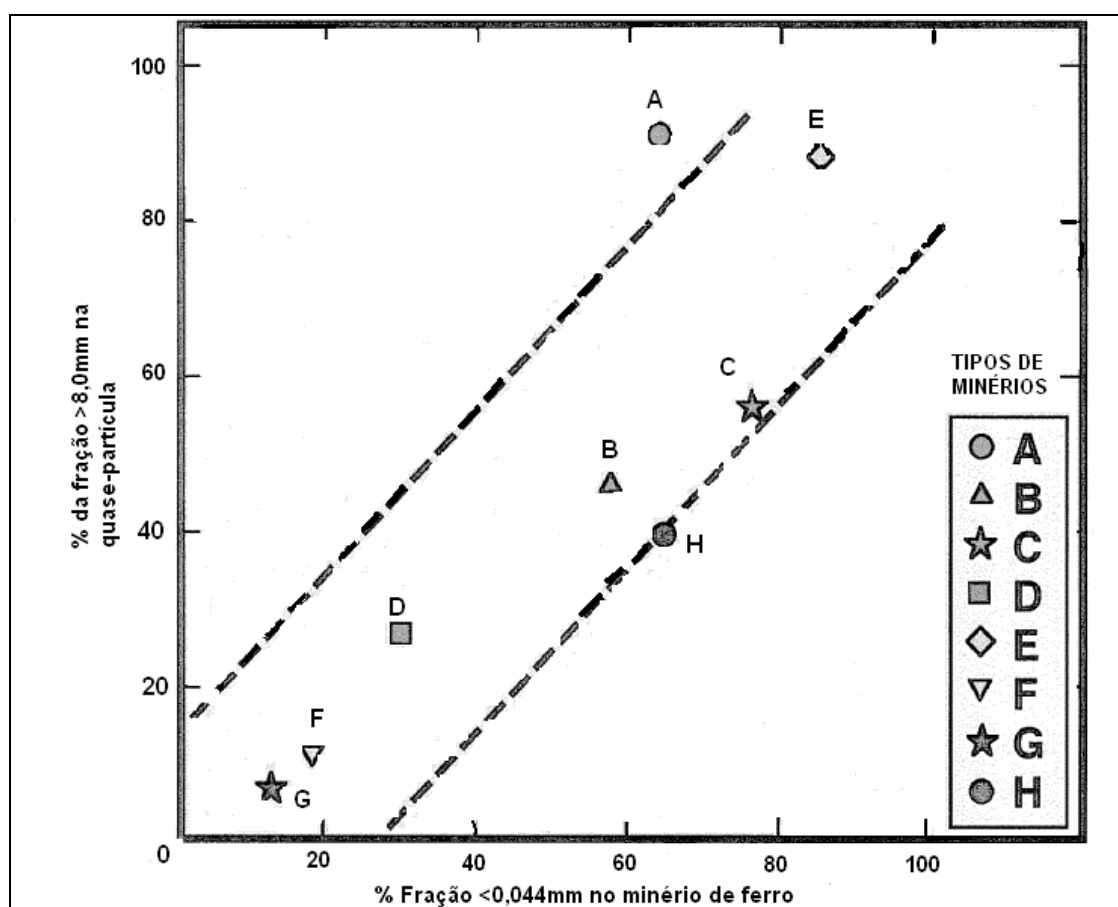


Figura 5.52 - Correlação entre os finos contidos no minério de ferro e a granulação da quase-partícula (adaptado de Sakamoto, 1989).

Cassola & Moraes (2007) mostram a importância da molhabilidade do material na formação da quase-partícula, pois a água cria uma tensão superficial que mantém os grãos coesos.

Cassola & Chaves (1977) ressaltaram a importância do aditivo no mecanismo de aglomeração a frio que busca aumentar a viscosidade da solução aquosa e promover a ação dispersante sobre as partículas coloidais de limonita presentes na superfície da hematita. O fenômeno da dispersão das limonitas é o mecanismo que assegura a viscosidade intersticial dentro da quase-partícula e permite a formação de películas de óxido de ferro intergranulares.

Diante dos dados coletados neste trabalho de dissertação e das observações dos diversos autores acima citados, conclui-se que o sinter-feed Andrade necessita passar por uma adequação granulométrica objetivando a redução da fração >6,35mm e o aumento da fração <0,044mm.

O aumento da fração $<0,044\text{mm}$ poderia se dar pela utilização do equipamento “roller press” que além da fragmentação propriamente dita provoca uma alteração na forma do cristal melhorando a característica da aglomeração a frio.

Ensaio realizado nos laboratórios da Fundação Gorceix, em Ouro Preto, com pellet-feed moído em moinho de bolas de laboratório acrescentado ao sinter-feed Andrade atualmente utilizado na sinterização da Usina de Monlevade demonstraram a perfeita correlação entre a quantidade de pellet-feed moído e a melhora da aglomeração a frio com a redução da fração $<3,0\text{mm}$, conforme demonstrado na figura 5.53.

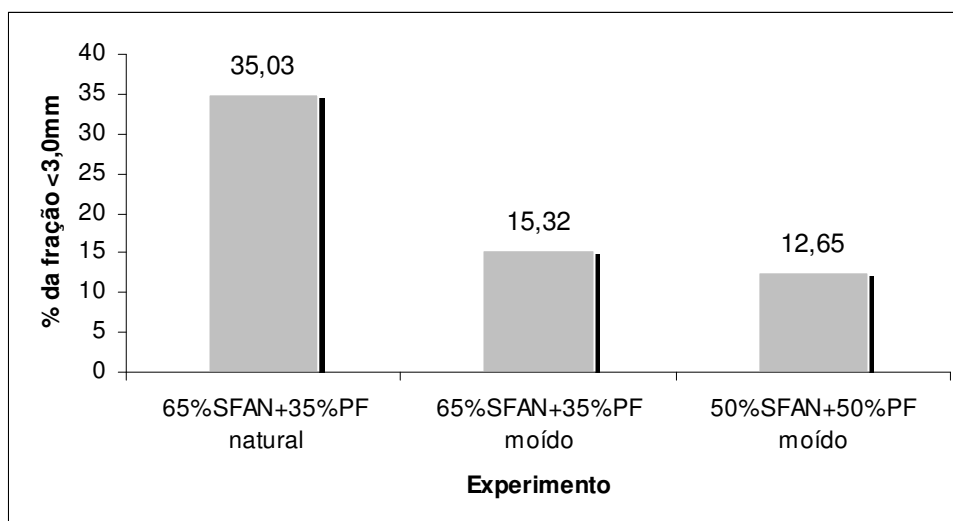


Figura 5.53 – Experimentos com sinter-feed Andrade acrescidos de pellet-feed moído.

Portanto, a adequação granulométrica do sinter-feed Andrade se faz necessária para a melhoria de performance do processo de aglomeração HPS na Usina de Monlevade.

Ressalta-se, porém que as alterações sugeridas para o sinter-feed Andrade não serão ainda implementadas até o encerramento desta dissertação, por se tratarem de alterações que impactam em muito o processo de beneficiamento atual que, como vimos no capítulo 3 é somente a britagem e classificação da hematita, sendo necessários investimentos em uma instalação de concentração e moagem. Este assunto está atualmente em discussão e, no momento certo será implementado.

5.4.5 - CAL VIRGEM CALCÍLICA

A análise das imagens de cal virgem calcítica obtidas por meio do MEV-BSE mostraram uma cal com grãos sinterizados, aspecto vítreo, baixa porosidade intergranular, principalmente na fração mais fina ($<0,105\text{mm}$).

Outra observação é a distribuição granulométrica grosseira deste material, com a fração $>1,0\text{mm}$ no patamar de 11,5% em massa e a fração $<0,105\text{mm}$ no patamar de 48,69% em massa.

Na análise da área superficial específica (A.S.E) realizada pelo método BET constatou-se que a cal virgem utilizada no processo HPS possui uma área superficial específica de $1,45\text{ m}^2/\text{g}$, extremamente baixa para um material que tem como principal função a de servir como aglomerante.

A reatividade medida pelo método Wührer também se apresentou muito baixa, na ordem de 312ml de HCl em 3 minutos.

Uma tentativa de desenvolver uma pesquisa bibliográfica mais aprofundada sobre o aspecto da reatividade da cal virgem e a aplicação desta na sinterização se mostrou frustrada, visto que não existem ou não foram encontrados trabalhos sobre o tema.

Do exposto, foi necessário elaborar uma hipótese de trabalho partindo da seguinte premissa:

- **Se a cal mais reativa é boa para o processo de aglomeração a frio, pois reduz o tempo de granulação, então o que se deve fazer para aumentar a reatividade da cal?**

Sabe-se que uma cal mais reativa será aquela que terá uma excessiva afinidade pela água com o objetivo de hidratação da molécula de CaO por meio da reação $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{calor}$, e sabe-se ainda que esta reação necessita acontecer logo após a entrada da mistura de minério mais fundentes e aglomerante no tambor de mistura, ou seja, nos primeiros 3 minutos de residência da mistura após o contato com a água.

Constatou-se então nesta etapa da dissertação, a necessidade de desenvolvimento da cal virgem de uma forma inovadora buscando a melhoria da performance desta matéria-prima na aglomeração a frio. A pergunta que se buscou responder foi **“Como tornar a cal mais reativa”**?

Sabe-se que a cal virgem é o mais antigo aglomerante químico utilizado pelo homem. Ela é composta por óxidos anidros de cálcio e eventualmente de magnésio,

sendo obtida pela calcinação das rochas carbonáticas sob temperaturas que variam entre 900°C e 1200°C.

A decomposição térmica das rochas calcárias se dá com a formação de dois produtos, a cal (CaO) e o dióxido de carbono (CO₂).

Os fatores que influenciam na calcinação são:

- composição química, mineralógica e distribuição granulométrica do calcário,
- tipo de combustível utilizado na calcinação
- tipo de forno utilizado (vertical ou horizontal)
- resfriamento da cal.

Como as imagens de MEV mostraram que o processo de calcinação utilizado pelo até então fornecedor de cal não estava adequado já que os grãos estavam super calcinados, o que se confirmou posteriormente quando de uma visita ao fornecedor com a constatação do uso excessivo de combustível no forno de calcinação.

A discussão técnica que se abriu então com o fornecedor da cal possibilitou o planejamento e execução de ensaios visando ao aumento da reatividade da cal, e a abertura de estudar e desenvolver outros fornecedores com cales diferentes daquela até então usada.

O primeiro planejamento para a caracterização tecnológica da cal foi elaborado buscando uma comparação entre dois fornecedores distintos visando estudar os métodos de produção utilizados, a qualidade da jazida de calcário e o método de beneficiamento após a calcinação. Para esta etapa seguiu-se a tabela abaixo:

Tabela V.8 - Planejamento para caracterização tecnológica de duas cales de fornecedores distintos.

	Geologia	Contaminantes (SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	Processo Produção	Combustível	Obtenção da cal
Amostra A (atual)	Borda de bacia sedimentar	alto	Forno rotativo	Coque de petróleo	Peneiramento do calcário calcinado
Amostra B (teste)	Meio de bacia sedimentar	baixo		Coque de petróleo mais carvão vegetal	Moagem (0 a 3 mm) do calcário calcinado de 19 a 40 mm

Os resultados apresentados na tabela V.9 abaixo mostraram:

- a cal A apresenta menor reatividade quando comparada com a cal B
- a cal B está em uma posição na bacia sedimentar que favorece a menor presença de contaminantes (SiO₂ e Al₂O₃)

Tabela V.9 – Análise química quantitativa por via úmida de duas cales (reatividade em ml HCl 4N).

Amostra	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	Reat.
A (atual)	94,62	1,68	0,49	0,43	0,098	324,9
B (teste)	94,08	0,81	0,51	1,11	0,030	371,5

A tabela V.10 mostra uma correlação direta entre a granulometria da cal A e a reatividade, evidenciando um bom caminho a ser estudado, qual seja, as frações mais finas são mais reativas.

Tabela V.10 – Análise química quantitativa por via úmida da cal A em faixas granulométricas distintas.

Faixa	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	Reat.
+ 1,0 mm	93,48	1,39	0,34	0,53	0,150	288
-1,0 a +0,105	92,97	2,16	0,29	0,47	0,120	355
-0,105 a +0,044	94,48	1,14	0,04	0,46	0,100	393
- 0,044 mm	96,67	0,18	0,03	0,47	0,110	388

A curva granulométrica comparativa das duas cales mostrada na figura 5.54 confirma a observação de que uma cal mais fina como é o caso da cal B apresenta maior reatividade. A análise desta curva nos mostrou que o percentual da fração fina <0,105 mm pode ser um caminho a ser estudado na busca de uma cal mais reativa.

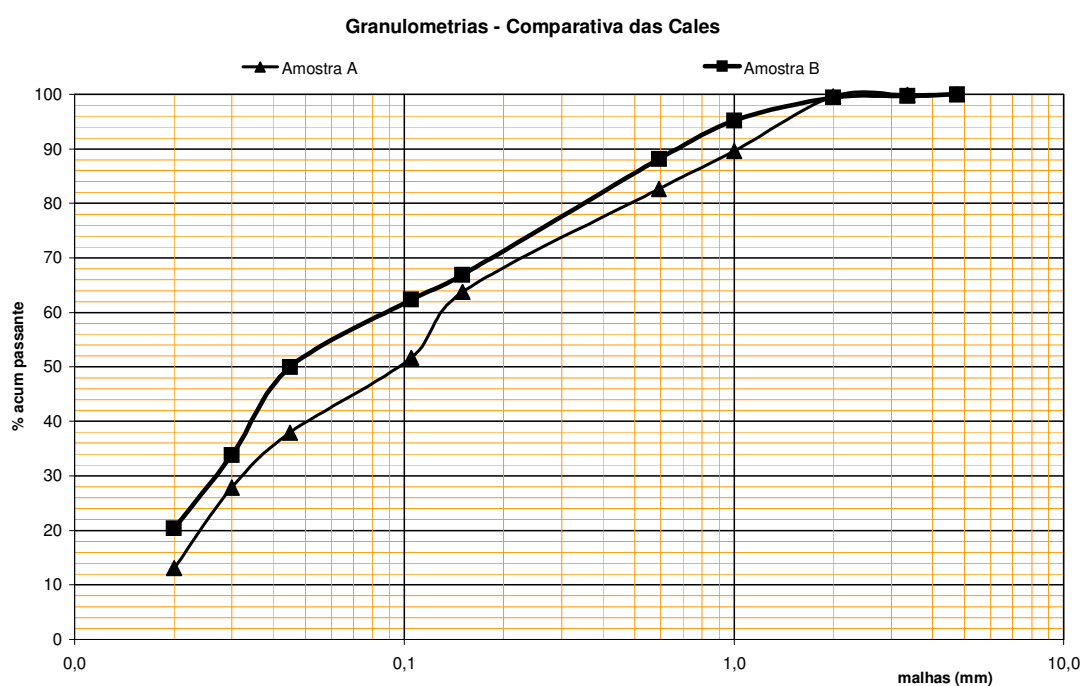


Figura 5.54 – Distribuição granulométrica das cales A e B estudadas e o foco na fração <0,105mm.

Outra observação interessante que se notou durante este estudo comparativo foi que os grãos da cal A se apresentaram de uma forma muito calcinada, de aspecto vítreo, enquanto os grãos da cal B se mostraram facetados e porosos. Tal fato se explica pela diferença do processo de beneficiamento da cal, distinto em cada fornecedor. A cal fina britada após a calcinação apresenta maior reatividade quando comparada com a cal fina produto do peneiramento da cal grossa calcinada.

De posse de todas as informações obtidas com os experimentos realizados neste primeiro planejamento, partiu-se então para o segundo planejamento de experimentos cujo objetivo foi o de estudar a influência dos finos na reatividade da cal.

O segundo planejamento foi realizado em laboratório interno na Usina de Monlevade e constou da coleta de uma amostra de cal na sinterização, logo após o peneiramento desta amostra na malha de 0,105mm, separando-se em oversize e undersize desta malha.

Após o peneiramento procedeu-se à dosagem controlada do percentual da fração <0,105mm na fração >0,105mm nas proporções de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em massa do passante na malha de 0,105mm.

Obtidas as seis amostras, uma fração de cada amostra foi encaminhada ao laboratório da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia para a análise da área superficial específica pelo método BET em um equipamento modelo Quantasorb Jr. equipado com um detector de condutividade térmica, sendo as medidas feitas em sistema dinâmico à temperatura de -196°C (77 K, temperatura de nitrogênio líquido). Antes das medidas de adsorção, as amostras foram pré-tratadas em fluxo de hélio a 150°C (423 K) por um período de aproximadamente 16 horas. A massa utilizada nas análises foi previamente determinada por pesagem em balança analítica.

A outra porção das amostras foi encaminhada para a análise da reatividade pelo método Wührer nos procedimentos de rotina do próprio laboratório da Usina de Monlevade.

O gráfico da figura 5.55 elaborado com os resultados obtidos mostra uma perfeita correlação entre **área superficial específica, reatividade e fração <0,105mm**.

A importância destes resultados se dá na obtenção da resposta para a pergunta anteriormente levantada como hipótese de trabalho. A maior reatividade da cal aparece quando se consegue uma maior área superficial específica fruto de uma moagem da cal grossa calcinada.

Uma análise da figura 5.55 revela que a reatividade medida no tempo de três minutos sofre pouca alteração em função da porcentagem em massa da fração <0,105mm na cal após a concentração de 60% de finos. Portanto, uma cal com 60% de finos ou 100% de finos não terá números de reatividade tão discrepantes. A diferença é muito representativa quando se sai do patamar de 40% para 60% de finos.

Outro ponto interessante é o aumento da área superficial específica quando se utiliza uma cal proveniente da moagem de uma cal mais grossa quando comparada com uma cal fina somente peneirada, saindo de um patamar de $1,45 \text{ m}^2/\text{g}$ (cal peneirada) até o patamar de $7,75 \text{ m}^2/\text{g}$ (cal moída com 60% de finos).

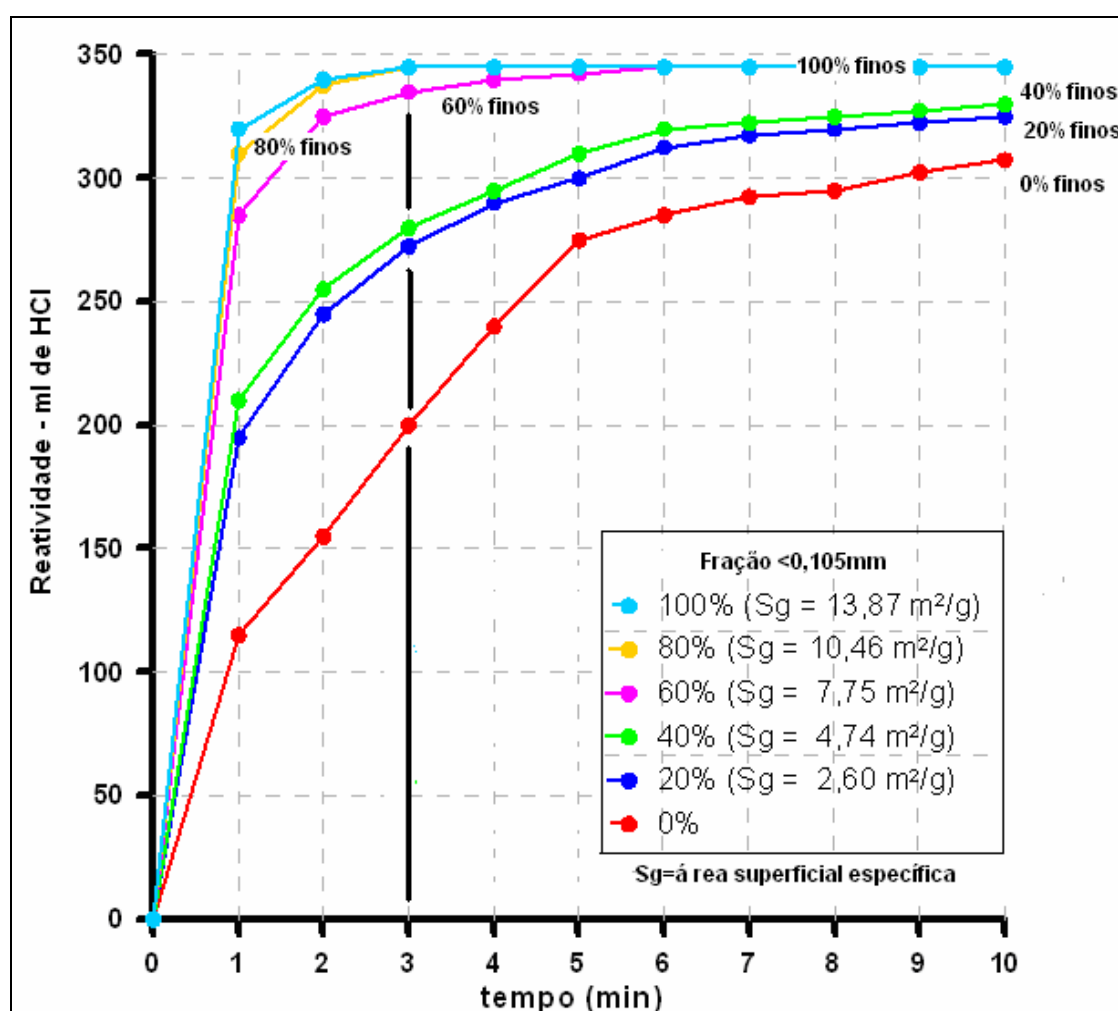


Figura 5.55 - Correlação entre a reatividade, A.S.E e % da fração <0,105mm.

O terceiro planejamento consistiu de um teste industrial comparando três cales com a meta estabelecida em 60% no mínimo abaixo da fração <0,105mm.

O teste se deu em períodos distintos, porém serão apresentados nesta dissertação os dados comparativos das três cales.

Os testes industriais seguiram um planejamento de 15 dias de experimento utilizando somente um tipo de cal. Foram medidos o tamanho médio das quase-partículas, o % da fração $>3,0\text{mm}$ nas quase-partículas e a depressão do exaustor que indica indiretamente a permeabilidade da camada na máquina de sínter.

A figura 5.56 mostra um gráfico comparativo entre as três cales denominadas de A, B e C para efeito de distinção.

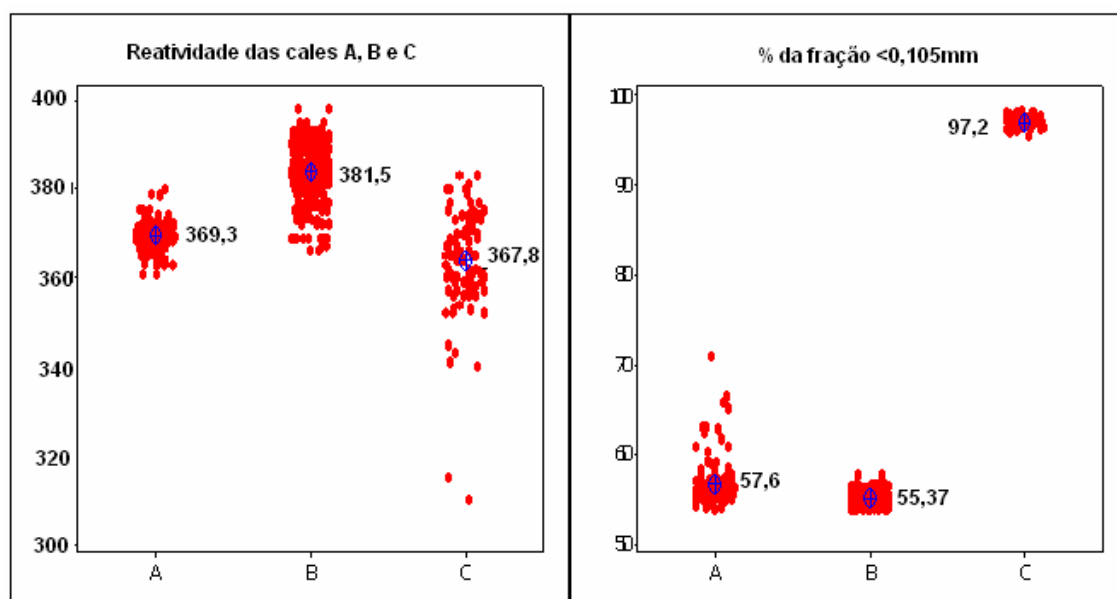


Figura 5.56 – Gráfico comparativo entre as três cales utilizadas nos testes industriais.

A cal C apesar de apresentar uma grande quantidade em massa passante na malha de $0,105\text{mm}$ não mostrou uma diferença grande de reatividade. Uma conversa com o fornecedor desta cal levou à conclusão que a cal C se tratava de uma mistura de cal peneirada com cal moída, o que novamente incide no problema da existência de grãos sinterizados, com baixa porosidade intragranular e consequentemente baixa área superficial específica. De toda forma, o teste industrial foi mantido até para podermos comparar esta situação não prevista anteriormente.

A tabela V.11 abaixo apresenta as médias dos resultados individuais das cales estudadas, obtidos nos testes industriais de 15 dias. Nota-se a performance de cada cal quando comparada com o período considerado como referência que é uma média dos quinze dias anteriores ao teste e dos quinze dias posteriores ao teste, que estabelece assim um patamar de rotina do processo.

Tabela V.11 Comparação da performance das cales com um período de referência.

	Tamanho Médio (mm)	% >3,0mm	Depressão mBar
Referência (15 dias antes e 15 dias depois)	4,48	62,3	164,9
Cal A	4,89	75,8	158,63
Cal B	4,86	72,3	160,12
Cal C	4,58	66,7	162,81

Os resultados das quase-partículas coletadas após os discos de pelotização mostram uma boa performance da cal A e da cal B, sendo estas duas cales provenientes da moagem da cal grossa.

Diante dos resultados industriais obtidos com as cales, a adequação deste agente aglomerante se mostrou necessária e urgente, pois ganhos no processo tornaram-se uma realidade.

O desenvolvimento de dois fornecedores distintos se mostrou necessário, pois a garantia da performance da cal passa também pela necessidade de se manter viva a concorrência comercial entre fornecedores.

Após todos os trabalhos de adequação das matérias-primas desenvolvidos junto aos fornecedores, partiu-se então para um planejamento de experimento industrial tendo como base de referência o ano de 2006, conforme será discutido no item V.5 a seguir.

5.5- VALIDAÇÃO DO PROCESSO

A etapa mais importante de todo este trabalho até aqui desenvolvido foi a etapa de certificação no processo industrial de que as adequações implementadas nas matérias-primas foram válidas e tiveram uma resposta positiva na performance da aglomeração a frio do processo HPS.

Para esta certificação foi elaborado um planejamento de teste industrial com as matérias-primas totalmente adequadas, exceto o sinter-feed Andrade, conforme discutido no item V.4 e os resultados deste teste industrial foram comparados com os dados médios da rotina do ano de 2006 para validação.

O planejamento industrial consistiu de ações voltadas para a garantia da representatividade do experimento e para a coleta de informações capazes de suportar uma análise posterior. As seguintes ações foram executadas:

- garantia de que as matérias-primas, calcário, minério de manganês e serpentinito estavam dentro das especificações sugeridas no item 5.4

- garantia do atendimento da especificação da reatividade da cal junto ao fornecedor (o experimento foi realizado somente com o fornecedor da cal A)
- garantia de que os parâmetros operacionais dos equipamentos de aglomeração estavam dentro dos limites discutidos no item 5.3
- garantia de que a umidade da mistura estava sob controle e dentro de um limite previamente estabelecido.

O teste industrial foi realizado no mês de setembro do ano de 2007 e os resultados serão discutidos separadamente em cada etapa de aglomeração nos itens 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3 abaixo.

5.5.1 - VALIDAÇÃO DO PROCESSO NO TAMBOR DE MISTURA:

Conforme visto no item 5.3.1 a etapa de aglomeração no tambor de mistura, ou também conhecida como primeiro estágio de aglomeração a frio é de extrema importância por dois aspectos:

- é nesta etapa que ocorre, na primeira metade do misturador, a homogeneização da mistura de minério e demais matérias-primas com o aglomerante sem a adição de água,
- é também nesta etapa, após a homogeneização, que ocorre a primeira adição de água formando as micro pelotas.

As imagens de MEV-BSE das micro pelotas obtidas e visualizadas no item 5.3.3.1 mostraram a formação de uma película de material fino envolvendo os grãos mais grosseiros, formando assim um aglomerado bem definido.

O desafio no teste industrial foi o de crescer o tamanho médio destas micro pelotas o que certamente será traduzido pelo crescimento da película envoltória nos grãos mais grosseiros.

As figuras 5.57 e 5.58 mostram que após a adaptação das matérias-primas e o uso de uma cal mais reativa houve um ganho importante no tamanho médio e no percentual da fração acima de 3,0mm. Pode-se concluir, portanto que houve uma mudança sensível na distribuição granulométrica da mistura após a etapa de aglomeração no tambor de mistura, ou primeiro estágio de aglomeração.

Trata-se de uma confirmação da premissa estabelecida de que as matérias-primas mais finas são mais adequadas à aglomeração a frio no HPS.

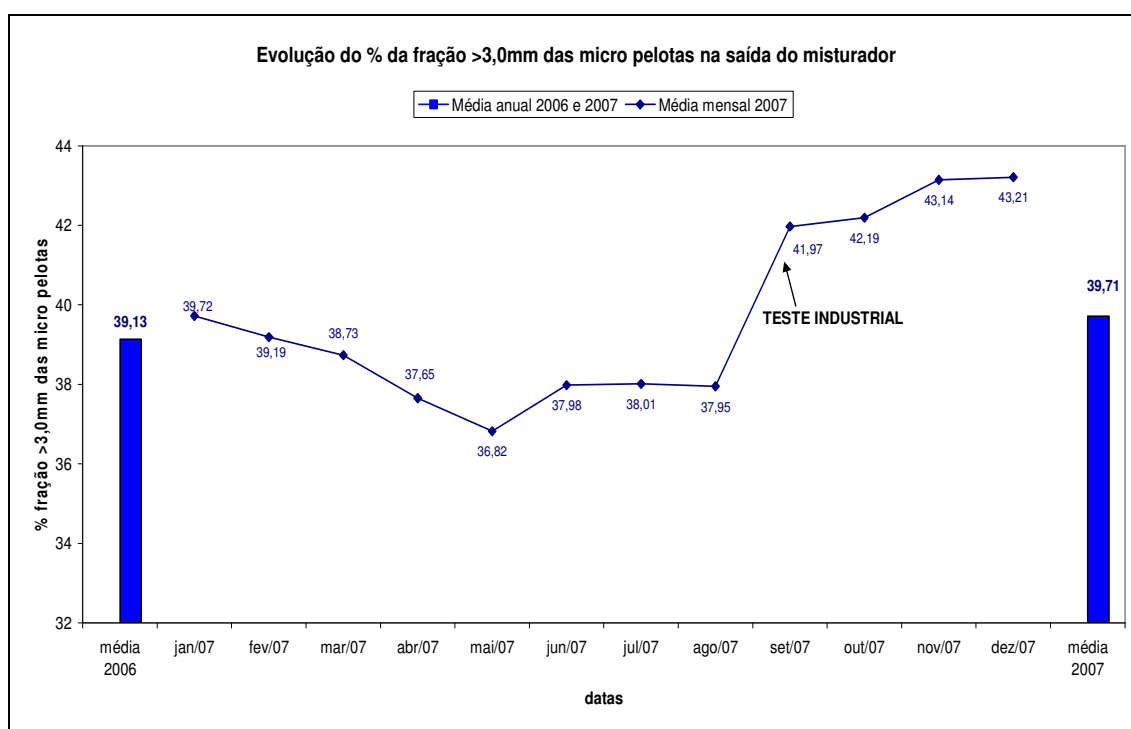


Figura 5.57 – Evolução do percentual da fração >3,0mm na saída do misturador.

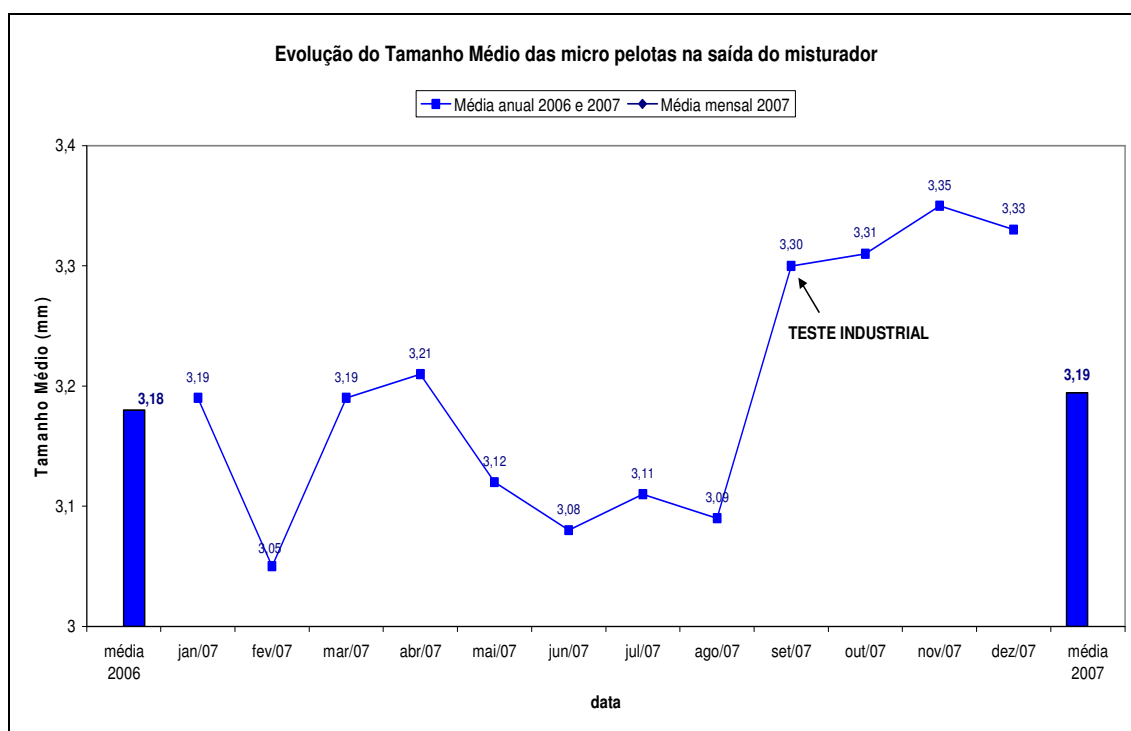


Figura 5.58 – Evolução do tamanho médio das micropelotas na saída do misturador.

Conforme discutido anteriormente, o índice de granulação (IG) serve como um comparativo no processo de aglomeração quando mantidas as mesmas condições de operação do equipamento.

A fórmula abaixo, já discutida no capítulo V.3.1.2 nos permite fazer a comparação entre o IG do ano de 2006 e o IG do teste industrial.

$$IG = \left(\frac{A1 - B1}{A1} + \frac{A2 - B2}{A2} \right) * 100 \quad (\text{equação V.3})$$

Onde: A1 – massa de mistura retida entre as peneiras de 0,5 a 0,25 mm

A2 – massa de mistura passante na peneira de 0,25 mm

B1 – massa de micro pelotas retidas entre as peneiras de 0,5 a 0,25 mm

B2 – massa de micro pelotas passantes na peneira de 0,25 mm.

O IG do ano de 2006 no tambor de mistura foi de 85% enquanto que no teste industrial o IG foi de 96%, evidenciando um ganho de 13%.

5.5.2 - VALIDAÇÃO DO PROCESSO NOS DISCOS DE PELOTIZAÇÃO:

A outra etapa de aglomeração estudada durante o teste industrial foi a etapa de aglomeração nos discos de pelletização, o que representa “em tese” o processo HPS.

Mantidos os parâmetros básicos de rotação, inclinação e umidade da mistura nos discos seguindo os mesmos praticados no ano de 2006 e início de 2007, a variável estudada passou a ser então a granulação das quase-partículas após a adequação das matérias-primas e da cal mais reativa.

Os resultados comparativos são apresentados nas figuras 5.59 e 5.60.

Nota-se um aumento considerável no percentual da fração >3,0mm o que significa que houve uma melhoria na performance da aglomeração nos discos de pelletização. Esta melhoria de performance passa pelo melhor desempenho da cal que nos discos de pelletização exerce um papel fundamental de aglomerante das micro pelotas vindas do tambor de mistura.

Também o tamanho médio apresentou uma evolução crescente denotando certa estabilidade do processo a partir da adequação das matérias-primas.

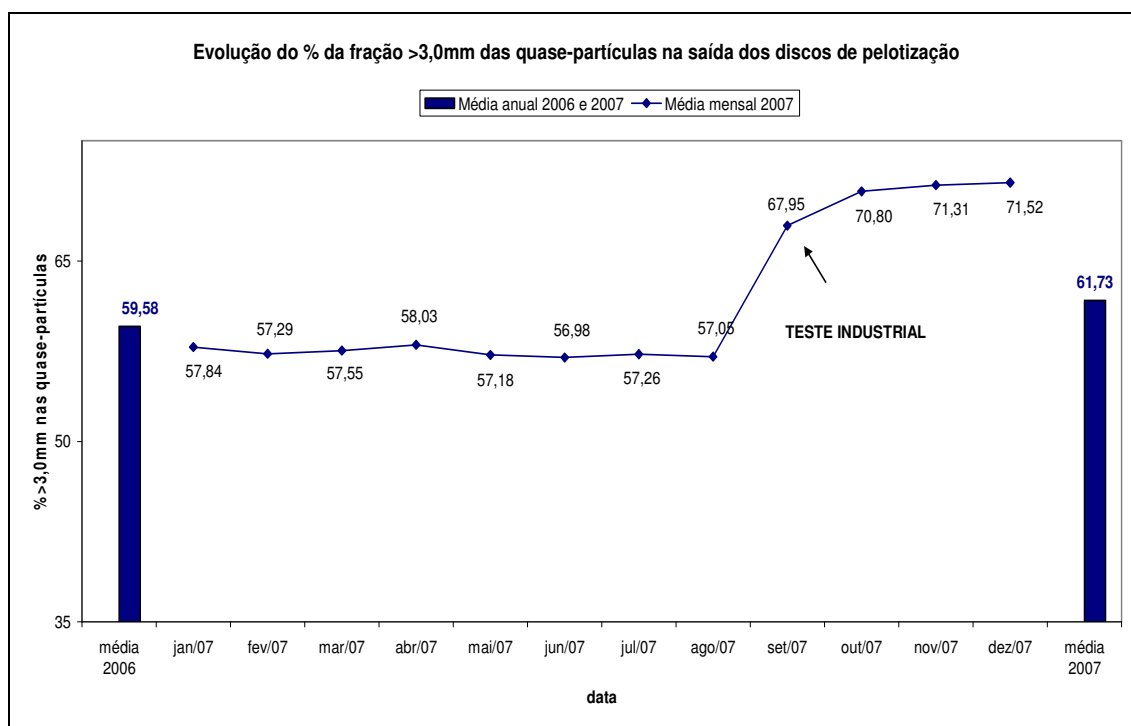


Figura 5.59 – Evolução do percentual da fração >3,0mm das quase-partículas na saída dos discos de pelotização.

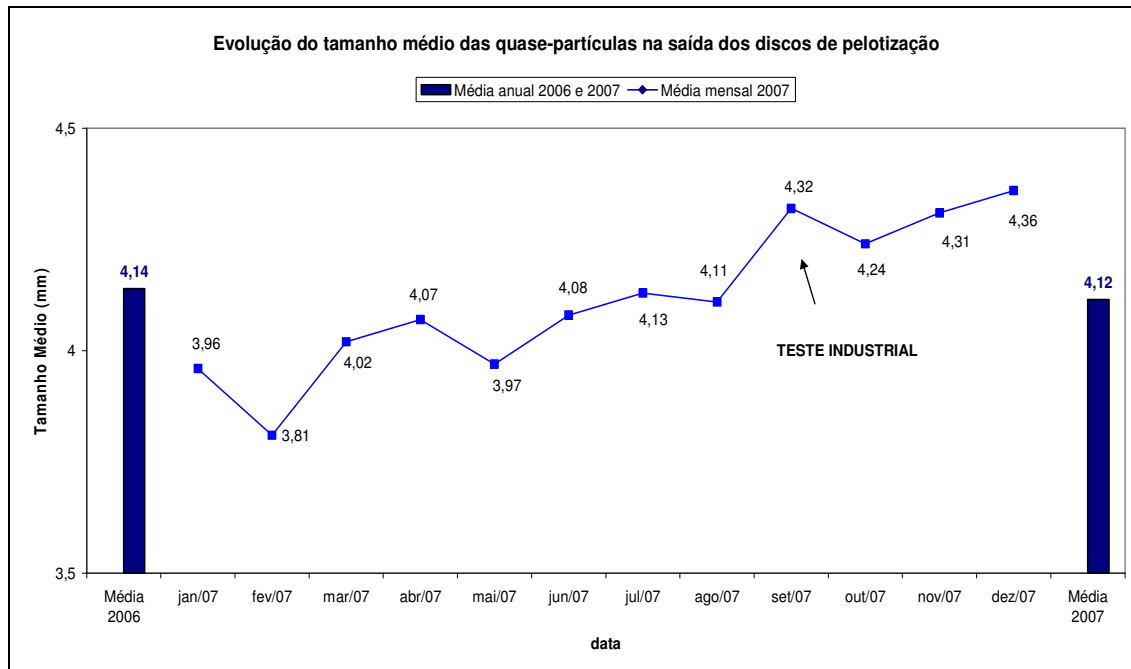


Figura 5.60 – Evolução do tamanho médio das quase-partículas na saída dos discos de pelotização.

5.5.3 - VALIDAÇÃO DO PROCESSO NO TAMBOR DE COBERTURA DE COQUE:

O terceiro estágio de aglomeração estudado foi no tambor de cobertura do coque, que como relatado anteriormente, no caso específico da Usina de Monlevade esta etapa de recobrimento ainda não se encontra implementada devido a muitas dificuldades encontradas durante as diversas tentativas de se fazer funcionar.

O tambor de cobertura de coque existe no circuito atual e exerce a função de mais um estágio de aglomeração.

As figuras 5.61 e 5.62 mostram o aumento da fração >3,0mm após a etapa do tambor de cobertura, assim como a melhora, ainda que pouco expressiva, do tamanho médio das quase-partículas. A interpretação que se dá a pouca expressão da melhora do tamanho médio é pela degradação da quase-partícula exercida nas caídas das bicas de passagem das correias transportadoras, causando uma quebra nas quase-partículas maiores.

Temos, portanto uma mistura de minério e fundentes alimentando a máquina de síter com tamanho médio variando na faixa entre 4,0mm a 5,0mm o que corresponde a uma faixa um pouco mais abaixo do que aquela defendida por Sakamoto et al. (1993) que se encontra entre 5,0mm a 7,0mm.

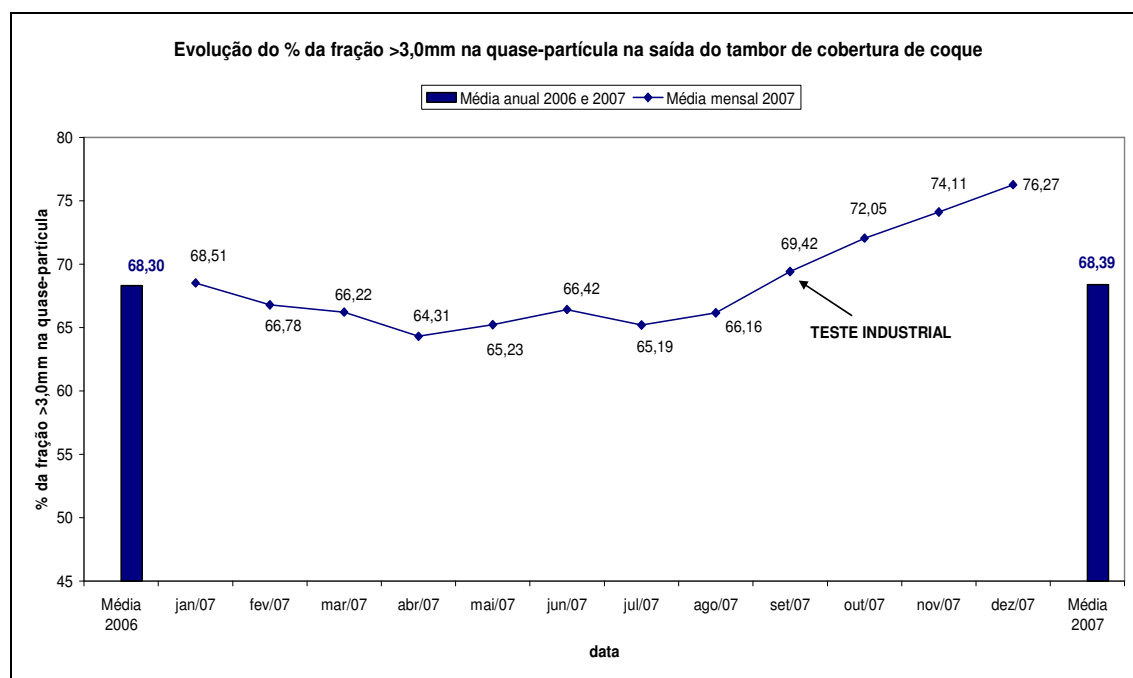


Figura 5.61 – Evolução do percentual >3,0mm na quase-partícula na saída do tambor de cobertura de coque.

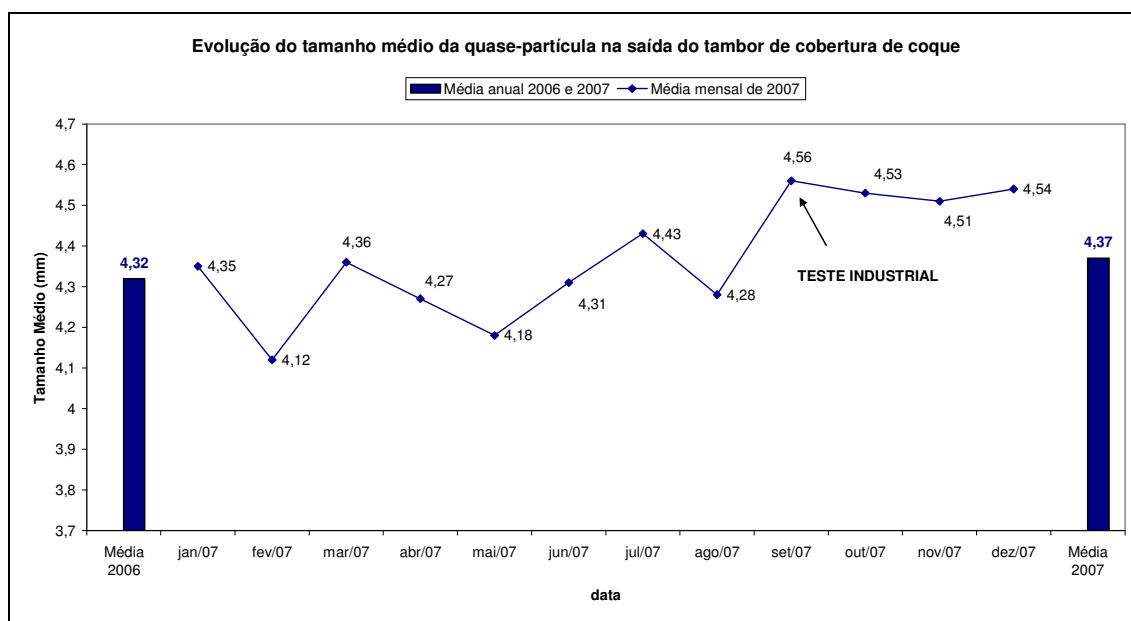


Figura 5.62 – Evolução do tamanho médio das quase-partículas na saída do tambor de cobertura de coque.

5.5.4 - VALIDAÇÃO DO PROCESSO NA MÁQUINA DE SÍNTER:

Durante o teste industrial, outro parâmetro analisado e acompanhado foi a depressão do exaustor, que significa a pressão de sucção exercida para a percolação do ar na camada de mistura dentro da máquina de sinter.

No caso de uma camada com baixa permeabilidade, implicará em uma alta pressão de sucção, enquanto que uma mistura permeável implicará em baixa pressão de sucção.

O que se observou foi um aumento crescente na permeabilidade da camada na medida em que se aumentou o tamanho médio da quase-partícula e uma conseqüente redução nos valores da pressão de sucção (depressão). Este fato permitiu ao aumento da altura de camada em 20 mm, o que significa em aumento dos patamares de produção e produtividade.

A figura 5.63 mostra uma correlação entre a altura de camada e o comportamento da depressão na máquina de sinter.

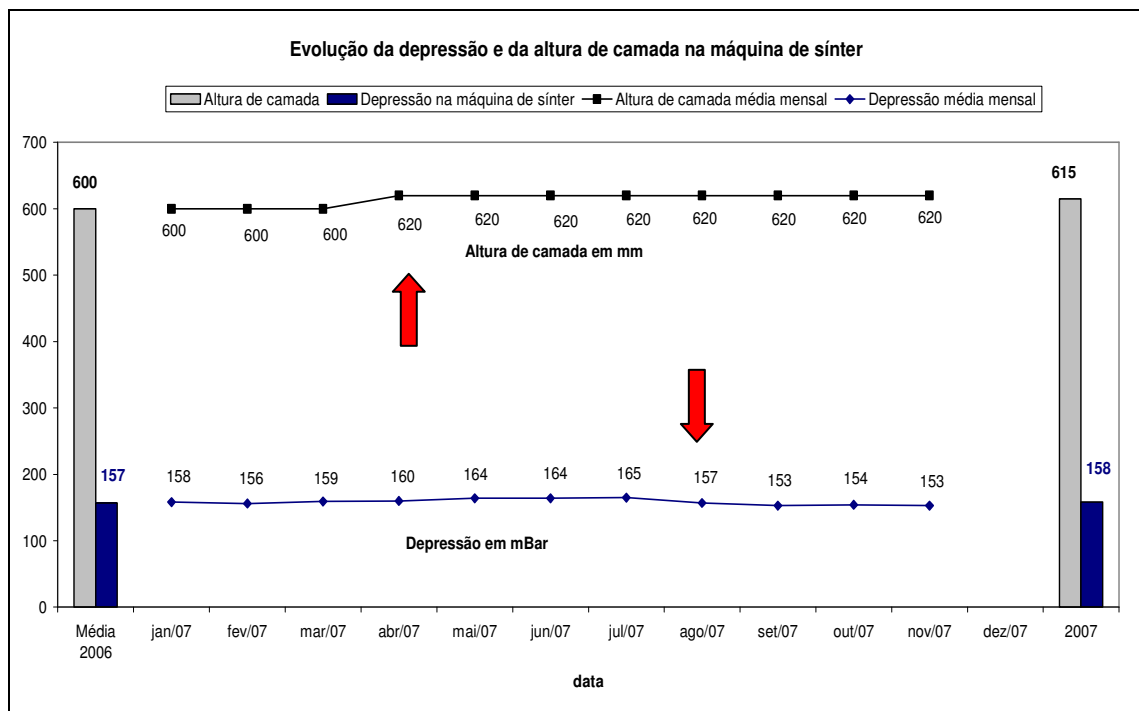


Figura 5.63 – Comportamento da depressão e da altura de camada na máquina de sínter.

6 – CONCLUSÕES

O processo HPS , situado na interface entre a sinterização convencional e a pelletização, privilegia o uso de minério de ferro com uma larga distribuição granulométrica, predominando inclusive a fração fina.

Como todo processo novo, o HPS na Usina de Monlevade apresentou resultados diferentes daqueles preconizados pela NKK Co.

O grande fator divergente nas duas usinas, quando comparadas, é a tipologia do minério de ferro. Enquanto na NKK Co são utilizados minérios australianos do tipo sinter-feed de alto poder de aglomeração a frio, na Usina de Monlevade é utilizado somente um tipo de minério de características bastante diferentes.

A caracterização das principais matérias-primas utilizadas na sinterização da Usina de Monlevade indicou diversas alterações que se faziam necessárias.

Assim, o serpentinito, o calcário calcítico e o minério de manganês foram alterados nas curvas de distribuição granulométrica objetivando um aumento do percentual da fração mais fina.

Outra inovação implementada foi em relação à cal virgem calcítica. Um aglomerante com papel fundamental na aglomeração a frio, pouco estudado pelos pesquisadores, e que pode contribuir muito para a melhoria da aglomeração a frio em minérios do tipo lamelares.

As imagens das micropelotas e quase-partículas obtidas por meio de microscópio ótico estereoscópico a partir da impregnação com resina, além de serem inéditas neste tipo de material, confirmaram a existência de uma fina película de partículas de tamanho pequeno envolvendo os grãos mais grosseiros de minério de ferro e mesmo de outras matérias-primas, dando sinais claros de que a melhora do aglomerante, no caso a cal virgem, era imperativa para o aumento do tamanho médio da quase-partícula.

Após a adequação das matérias-primas ocorrida no segundo trimestre do ano de 2007, um teste industrial foi planejado e executado no terceiro trimestre do ano de 2007 com o objetivo de obter a confirmação das premissas estabelecidas nesta dissertação.

Os resultados do teste mostraram uma melhoria sensível no tamanho médio e no percentual da fração retida na malha de 3,0mm das quase-partículas, o que caracterizou que houve um aumento de 13% no índice de granulação.

Este aumento resultou em uma melhora no tamanho médio das micropelotas e das quase-partículas, o que causou um efeito positivo na pressão de sucção na máquina de sínter permitindo o aumento da altura de camada, ganho na produtividade e na produção de sínter, e espera-se uma redução no consumo específico de energia elétrica em função da redução da depressão.

Finalmente, destaca-se a relevância dos resultados apresentados, mostrando que o desempenho do processo HPS depende não só do minério de ferro e das características nele intrínsecas, mas de uma verdadeira sinergia entre as qualidades de cada matéria-prima e de uma boa performance do aglomerante que está sendo usado.

A necessidade de adequar o processo HPS desenvolvido pela NKK Co no Japão, para a realidade da ArcelorMittal Monlevade, utilizando o sinter-feed Andrade como principal matéria-prima trouxe ganhos que serão traduzidos em melhoria de performance da sinterização e da qualidade do sínter para o alto-forno.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Destacam-se como sugestões para estudos a serem desenvolvidos no futuro com o objetivo de programar melhorias no processo HPS:

- estudar o uso de cal hidratada na aglomeração a frio
- estudar o uso de aglomerantes orgânicos
- estudar a mineralogia do sínter de baixa sílica, objetivando conhecer as ligações que se formam em um ambiente com baixo volume de escória
- estudar as características de formação da cobertura de combustível (coating)
- estudar de uma forma comparativa a aglomeração a frio realizada em tambor de pelotização versus discos de pelotização.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALMEIDA, A.; PINTO, J.R.; ALVES, M.L. - Procedimento de avaliação da micropelotização nos misturadores da sinterização da COSIPA – Seminário da ABM – Fontes alternativas para redução de minério de ferro- 02 a 06 de dezembro, 1991 – p. 291 a 296 – Belo Horizonte – MG.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, Rio de Janeiro, NBR 8652- Grandezas e unidades de medida na sinterização de minério de ferro. Rio de Janeiro, 1984.13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, Rio de Janeiro, NBR 8886 - Grandezas e unidades de medida o Alto-Forno. Rio de Janeiro, 1985.13p.
- AZEVEDO, M.A.; CARNEIRO, M.A. – Matérias-primas para sinterização. In: USIMINAS. Curso Utilização de minérios de ferro na siderurgia. Belo Horizonte: USIMINAS, 1977. P. 1-15.
- BERNARDES, L.J.L. – A granulação de materiais. Revista Cerâmica Industrial, nº 11 (3), maio/junho 2006.
- BORGES,W.; MELO,C.; BRAGA,R.N.B.; SANTOS, E.B.; MARIA, C.; KOJIMA,O.; SATO,H. -Application of HPS (Hybrid Pelletized Sinter) process at Monlevade Works- La Revue de Métallurgie,Paris nº 3,p189-194, March 2004.
- CAPPEL,F.; LUNGEN,H.B. – Historical review of developments in sintering and pelletising techniques- Seminar on Sinter and Pellets, 1999- Brussels, June 1-2 –IISI – International Iron and Steel Institute – Seminar Proceedings – 12-31.
- CARNEIRO, M. A; VIDAL, J.A. N; NAJAR, F.J. - Avaliação de matérias-primas e sua influência na produtividade da sinterização. Metalurgia e Materiais – ABM – Associação Brasileira de Metalurgia-V. 40 n.321, p.429-433, agosto 1994.
- CASSOLA, M.S.; CHAVES, A.P. – Effect of the addition of organic binders on the behavior of iron ore pellets. Kona: Powder and Particle, Osaka, nº 16, p. 136-142, 1998.
- CASSOLA, M.S.; MORAES, S.L. – Aspectos tecnológicos do efeito de aglomerantes na microestrutura de pelotas de concentrados de minério de ferro. Revista Metalurgia & Materiais da ABM, volume 63, setembro 2007, São Paulo, Brasil.
- COELHO, L.E.M. LEMOS M.R. MUNIZ, G.L.F. - Efeito do volume de escória e da basicidade sobre a qualidade do sinter. Revista Metalurgia da ABM, São Paulo, volume 31, nº 216, p. 715-720, julho 1975.

DOMINGUES RAMOS, M.C. – O minério de ferro da Mina do Andrade: Características geológicas, texturais e metalúrgicas. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG, 1996, 165 p. (Dissertação: Mestrado em Geologia).

DOOR, J.V.N. II –Physiographic, Stratigraphic and structural Development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS- U.S. Geological Survey- Professional Paper, Washington, 641-A: 10p – 1969.

FONSECA, M.C.; COSTA, G.M.; FERREIRA, P.; MESCHIATI, A. – The influence of pellet-feed size distribution in the agglomeration process. In: AISTech 2005 Proceedings 2005 – Volume I – p. 147 – 153.

FUAD, J.N.; CRUZ, A.T.; RANGEL, E.N. – 1981 – Carvão Vegetal na sinterização da USIMINAS – In: XXXVI Congresso Anual da ABM-COMIN, Recife-PE, Anais da ABM, 1981, p 112-120.

INTERNATIONAL STANDARD, ISO 3082, 1996, Iron Ores – Sampling and sample preparation procedures-second edition.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 3085, 1996, Iron Ores – Experimental methods for checking the precision of sampling – second edition.

ISHIKAWA, Y.; KASE, M.; SASAKI, M. – Recent Progress in the sintering technology-high reducibility and improvement of fuel consumption – NSC, 1983.

JANUZZI, A. – Caracterização Mineralógica, uma ferramenta de trabalho na Mina do Andrade. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de ferro: caracterização, beneficiamento e aglomeração, 2, 1999, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: Associação Brasileira de Metalurgia (ABM) - p 22-32.

LOWELL, S; SHIELDS, J.E. – Powder Surface Area and Porosity – 3rd edition, Chapman and Hall, London, 1991, 247 p.

MAGALHÃES, M.S. – Minérios de ferro e sínteres industriais: mineralogia, microestruturas, química mineral, comportamento magnético e controle de qualidade. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 355 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MAGALHÃES, M. S; BRANDÃO, P.R.G. – Microstructures of industrial sinters from Quadrilátero Ferrífero's iron ores, Minas Gerais State, Brazil – ELSEVIER – Minerals Engineering, 16 (2003) , páginas 1251 a 1256 – 2003.

MAGALHÃES, M.S.; BRANDÃO, P.R. G; TAVARES, R.P. – Characterization of Quadrilátero Ferrífero's iron ores used in sintering processes. In: International meeting on ironmaking, 2 and International Symposium on iron ore, 1. Vitória-ES, Brazil, Proceedings... São Paulo ABM, 2004.

- MEYER,K. – Pelletizing of Iron Ores . Springer, Verlag, Berlim, 302p, 1980.
- NICOLAS, L.P. – L'agglomeration. Apostila da Sollac Atalntique, 20 fevereiro 2004.
- NISHIDA, R.; IMANISHI, N.; OHTSUKI, K. – Effect of particle size on the balling of iron ores and on physical properties of green pellets – Proceedings ICSTIS, Suppl. Tans. ISIJ, vol 11, section 01, 1971.
- NIWA, Y.; KOMATSU, O.; NODA, H.; SAKAMOTO, N.; OGAWA, S. – Development of Hybrid Pelletized Sinter Process and its commercial operation at Fukuyama n5 sintering plant. Ironmaking Conference Proceedings, 1990 – 683-689.
- OYAMA, N; SATO, H; TAKEDA, K; ARIYAMA, T; MASUMOTO, S; JINNO, T; FUJI, N. -Development of coating granulation process at commercial sintering plant for improving productivity and reducibility. In: ISIJ International, vol.45, n0 6, pp 817- 826, 2005, Japan.
- PACHECO, T. A.; MAGALHÃES, J.R. – Caracterização de fases em sínter por microscopia ótica convencional e microscopia eletrônica de varredura – Seminário da ABM – Fontes alternativas para redução de minério de ferro – 02 a 06 dezembro 19991, p. 417 a 431 – Belo Horizonte, MG.
- PAQUET, G.; GOURDE, S.; GODIN, E. – Physical Tests: their meaning and relevance to iron ore pellets. In: AISTech Proceedings 2005- Volume I- p. 133 – 145.
- PEREZ, F.A; SERRA,A.R. – Determinação do regime de trabalho dos misturadores da COSIPA – Seminário da ABM – Fontes alternativas para redução de minério de ferro – 02 a 06 dezembro, 1991 –p.555 a 561 – Belo Horizonte - MG.
- SAKAMOTO,N.; NIWA, Y.; KOMATSU,O.; NODA,H.; KUMASAKA, A. – Commercial Production of iron ore agglomerates using sinter-feeds containing a large amount of fine ores. ISIJ – The Iron and Steel Institute of Japan; volume 33, nº 04, p. 454 – 461, Janeiro 1993.
- SAITO,G.- Recent developments and future prospects of sintering technology in Nippon Steel - Seminar on Sinter and Pellets, 1999- Brussels, June 1-2 –IISI – International Iron and Steel Institute – Seminar Proceedings – 119-126,june 1-2,1999.
- SATO, H; SAKAI, A; SHIOBARA, M; HASHIMOTO, K; YAMASHITA, K. - Recent progress of Hybrid Pelletized Sínter Process at Fukuyama Works, NKK-1st International Meeting on Ironmaking – In: ABM Anais-September, 24 to 26th, 2001 – Ouro Minas Palace Hotel-Belo Horizonte-MG-Brazil-2001.
- SPORTEL, H.; DROOG, J. – Influence of pore saturation on Compressive strength of green iron ore pellets. Ironmaking and Steelmaking, vol. 24, no 3, p.221-223, 1997.

SCHORSCHER, J.H.D. – Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rios das Velhas, Quadrilátero Ferrífero; MG-Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, 1978 – Resumos... SBG – pp 292-293.

VASCONCELLOS, H. – Analisadores de distribuição de tamanho de partículas, uma avaliação das várias técnicas. Periódico da INSTRUTÉCNICA C.R.S. LTDA – e-mail: hugo@instrutec.com.br – Campinas, São Paulo.