



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



RENAN DOS SANTOS FARIA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO
DE GÊNESE MAGNÉTICA UTILIZANDO ROTA DE PRODUÇÃO BASEADA NA
UTILIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL VERSUS COQUE DE PETRÓLEO,
BUSCANDO META DE BASICIDADE PRIMÁRIA DE 1,8**

VOLTA REDONDA

2022

RENAN DOS SANTOS FARIA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO
DE GÊNESE MAGNÉTICA UTILIZANDO ROTA DE PRODUÇÃO BASEADA NA
UTILIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL VERSUS COQUE DE PETRÓLEO,
BUSCANDO META DE BASICIDADE PRIMÁRIA DE 1,8**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais Processamento e caracterização de materiais reciclados compósitos nanomateriais e biomateriais e linha de pesquisa em materiais metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

VOLTA REDONDA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

F224s Faria, Renan dos Santos

Síntese e caracterização de sínter de finos de minério de ferro de gênese magnética utilizando rota de produção baseada na utilização de carvão vegetal versus coque de petróleo, buscando meta de basicidade primária de 1,8. / Renan dos Santos Faria. - Volta Redonda: UniFOA, 2022. 117 p. II

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2022

1. Materiais - dissertação. 2. Sinterização. 3. Carvão vegetal. 4. Coque de petróleo. I. Habibe, Alexandre Fernandes. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



RENAN DOS SANTOS FARIA

Síntese e caracterização de sinter de finos de minério de ferro com base magnética utilizando rota de produção baseada em carvão vegetal versus coque de petróleo, buscando meta de basicidade primária de 1,8

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
"MESTRE EM MATERIAIS"**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

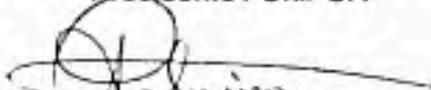


Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

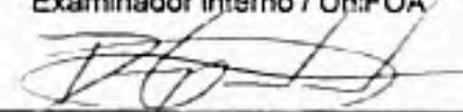
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe
Presidente / UniFOA



Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira
Examinador interno / UniFOA



Prof. Dr. Diego Orlando
Examinador externo / UERJ

Julho de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por conceder essa rica oportunidade, aos meus pais e a minha namorada Larissa por me ajudar. Ao meu Orientador Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe, pela paciência e pelos ensinamentos que foram de suma importância à concretização desse trabalho. Ao coordenador do curso o Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago e a secretária Ana Maria pela atenção e disposição em me ajudar.

FARIA, R. S. Síntese e caracterização de sinter de finos de minério de ferro com base magnetítica utilizando rota de produção baseada em carvão vegetal versus coque de petróleo, buscando meta de basicidade primária de 1,8. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2022.

RESUMO

Na busca de alternativas para substituição de minério de ferro, mostram-se possíveis as tentativas de utilização de minérios menos qualificados como os de base magnetítica, dessa forma o trabalho trata do estudo e experimentação, na busca de torna-los compatíveis com o processo de sinterização, visando estruturar uma rota alternativa de construção de substituição de minério granulado convencional, para carga metálica de altos Fornos. Este trabalho encontra foco na elaboração de um sinter de minério de ferro de base magnetítica, visando atingir uma basicidade primária da ordem de 1,8, considerando possibilidades de síntese baseadas na utilização de combustíveis como o coque de petróleo e a moinha de carvão vegetal. A rota alternativa em questão se estrutura com a mistura de minério de ferro de matriz magnetítica, sinter feed disponível em pátio de usina siderúrgica e os componentes tradicionais da mistura para a fabricação do sinteres, tais como: moinha de carvão, coque de petróleo, pó de cal, finos de retorno e pó de balão (pó de coletor). O conjunto de objetivos do trabalho repousa sobre o estabelecimento de misturas ponderadas destes materiais de forma a balancear um sinter com características mecânicas adequadas, que atendam às normas e propiciem a síntese de um sinter qualitativamente favorável. Foram sinterizadas duas misturas ponderadas, avaliadas quanto a resistência a queda (Shatter Test) e avaliados também a basicidade binária de 1,8 dos sinteres. Baseando-se no interesse da sustentabilidade, mantendo a qualidade e o custo para apoiar a utilização de matérias primas menos nobres e resíduos, criando assim como um produto de boa alternativa. Cabe tornar evidente que o trabalho busca comparar característica de produto quando da utilização de dois tipos de combustível, ou seja, coque de petróleo e moinha de carvão. Os resultados e as tendências determinados pelos testes nos produtos obtido, apresentaram uma

clara tendência de apontar como combustível mais ajustado a produção deste sinter, o coque de petróleo quando comparado a moinha de carvão vegetal.

Com relação a produtividade e tempo de sinterização a utilização do coque de petróleo aponta um ganho de 15% com relação ao sinter processado com moinha de carvão vegetal. Analisando o rendimento e geração de finos/retorno da mistura, o sinter processado com coque de petróleo apresentou um ganho de 9% quando comparado ao sinter processado com moinha de carvão vegetal. Em relação ao consumo específico de combustível os experimentos assinalaram um consumo de 7,5% de coque de petróleo contra 12,5% de moinha de carvão vegetal.

A parte experimental do trabalho foi desenvolvida em conjunto com outra dissertação de mestrado. Nosso trabalho versa especificamente sobre a síntese de um sinter com o objetivo da obtenção de um índice de basicidade de 1,8, enquanto a outra dissertação busca um índice de basicidade de 1,4. Dessa forma as misturas encaminham diferentes proporções de constituintes e diferentes resultados comparativos para os sinteres gerados.

Palavras-chave: sinter de finos de minério de ferro, combustíveis, base magnética.

FARIA, R. S. **SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MAGNETITE-BASED IRON ORE FINES SINTER USING CHARCOAL VERSUS PETROLEUM COKE-BASED PRODUCTION ROUTE, SEEKING A PRIMARY BASICITY TARGET OF 1.8.** 2021. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2022.

ABSTRACT

In the search for alternatives to replace iron ore, attempts to use less qualified ores such as magnetitic base are possible, thus the work deals with the study and experimentation, in the search to make them compatible with the process of sintering, aiming to structure an alternative route of construction to replace conventional granulated ore, for metallic load of blast furnaces. This work focuses on the elaboration of a magnetitic-based iron ore sinter, aiming to reach a primary basicity of the order of 1.8, considering possibilities of synthesis based on the use of fuels such as petroleum coke and charcoal mill. The alternative route in question is structured with the mixture of iron ore with a magnetitic matrix, sinter feed available in a steel mill yard and the traditional components of the mixture for the manufacture of sinters, such as: coal mill, petroleum coke, powder lime, return fines and flask dust (collector dust). The set of objectives of the work rests on the establishment of weighted mixtures of these materials in order to balance a sinter with adequate mechanical characteristics, which meet the standards and provide the synthesis of a qualitatively favorable sinter. Two weighted mixtures were sintered, evaluated for resistance to drop (Shatter Test) and also evaluated for the binary basicity of 1.8 of the sinters. Based on the interest of sustainability, maintaining quality and cost to support the use of less noble raw materials and waste, thus creating a good alternative product. It should be made evident that the work seeks to compare product characteristics when using two types of fuel, that is, petroleum coke and coal mill. The results and trends determined by the tests on the products obtained showed a clear tendency to point out petroleum coke as the most adjusted fuel for the production of this sinter, when compared to charcoal mill.

Regarding productivity and sintering time, the use of petroleum coke points to a gain of 15% in relation to sinter processed with charcoal mills. Analyzing the yield and generation of fines/return of the mixture, the sinter processed with petroleum coke showed a gain of 9% when compared to the sinter processed with charcoal mill. Regarding the specific consumption of fuel, the experiments showed a consumption of 7.5% of petroleum coke against 12.5% of charcoal mill.

The experimental part of the work was developed in conjunction with another master's dissertation. Our work deals specifically with the synthesis of a sinter with the objective of obtaining a basicity index of 1.8, while the other dissertation seeks a basicity index of 1.4. In this way, the mixtures provide different proportions of constituents and different comparative results for the sinters generated.

Keywords: iron ore fines sinter, fuels, magnetite base.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema e matérias-primas (Alto Forno).....	3
Figura 2. Coqueria.....	7
Figura 3. Hematita.....	8
Figura 4. Magnetita.....	9
Figura 5. Goethita.....	9
Figura 6. Pirita.....	10
Figura 7. Siderita.....	11
Figura 8. Carvão Vegetal.....	13
Figura 9. Turfa.....	14
Figura 10. Linhito.....	14
Figura 11. Hulha.....	15
Figura 12. Antracito.....	15
Figura 13. Coque de Petróleo.....	16
Figura 14. Fluxograma típico da unidade de coqueamento retardado, geração do coque verde de petróleo.....	19
Figura 15. Unidade de calcinação de coque verde de petróleo, geração do coque calcinado.....	20
Figura 16. Principais contaminantes do coque de petróleo e suas faixas de concentração.....	21
Figura 17. Esquema da Sinterização.....	22
Figura 18. Esquema de retração versus tempo de sinterização, na sinterização por fase líquida.....	27
Figura 19. Shatter Test.....	28
Figura 20. Tumbler Test.....	29
Figura 21. Redutibilidade em função do teor de FeO para sinteres com diferentes basicidades.....	31
Figura 22. Etapas de um processo siderúrgico.....	33
Figura 23. Etapas da produção de sinter.....	38
Figura 24. Fluxograma de pelletização.....	40
Figura 25. Pelotas pronta para ser carregada no alto-forno.....	41
Figura 26. Painel.....	43

Figura 27. Fluxograma Geral da Metodologia.....	45
Figura 28. Recebimento de materiais de partida.....	49
Figura 29. Peneira.....	49
Figura 30. Granulometria do minério Baratinha.....	51
Figura 31. Vista da planta onde apresenta a conexão do exaustor e a panela de sinterização.....	52
Figura 32. Plataforma com rampa para descarga da mistura sinterizada.....	53
Figura 33. Exaustor de Processos.....	54
Figura 34. Panela de Sinterização.....	55
Figura 35. Panela e sistema de basculamento.....	56
Figura 36. Misturador e decarga para o micropelotizador.....	56
Figura 37. Vista em Perspectiva do exaustor com descarga para o micropelotizador.....	57
Figura 38. Fotos do material em processo dentro do misturador.....	58
Figura 39. Mesa para peneiramento das amostras.....	58
Figura 40. Peneira de Amostra.....	59
Figura 41. Peneira sendo utilizada.....	59
Figura 42. Características do aparelho utilizado no Shatter Test.....	61
Figura 43. Equipamento de Shatter Test utilizado na planta piloto de Santa Luzia, MG.....	62
Figura 44. Caixa de Amostra.....	63
Figura 45. Esquema para a realização do Shatter Test.....	64
Figura 46. Coque de Petróleo, sínter obtido após a queima.....	69
Figura 47. Carvão Vegetal, sínter obtido após a queima.....	69
Figura 48. Sinter produzido após a britagem.....	71
Figura 49. Produtividade (ton./m ² /Dia).....	71
Figura 50. Barra de Erros - N#4: Produtividade (ton./m ² /Dia).....	72
Figura 51. Barra de Erros - N#3: Produtividade (ton./m ² /Dia).....	72
Figura 52. Tempo Sinterização (Minutos).....	73
Figura 53. Barra de Erros - N#4: Tempo Sinterização (Minutos).....	73
Figura 54. Barra de Erros - N#3: Tempo Sinterização (Minutos).....	74
Figura 55. Temperatura / Depressão.....	75
Figura 56. Barra de Erros - N#4: Temperatura / Depressão.....	75

Figura 57. Barra de Erros - N#3: Temperatura / Depressão.....	76
Figura 58. Rendimentos (%).....	77
Figura 59. Barra de Erros - N#4: Rendimentos (%).....	77
Figura 60. Barra de Erros - N#3: Rendimentos (%).....	78
Figura 61. <5 mm (%).....	79
Figura 62. Barra de Erros - N#4: <5 mm (%).....	79
Figura 63. Barra de Erros - N#3: <5 mm (%).....	80
Figura 64. Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanço (%).....	81
Figura 65. Barra de Erros - N#4: Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanço (%)...	81
Figura 66. Barra de Erros - N#3: Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanço (%)...	82
Figura 67. Consumo Específico (Kg/ton/Sinter).....	83
Figura 68. Barra de Erros - N#4: Consumo Específico (Kg/ton/Sinter).....	83
Figura 69. Barra de Erros - N#3: Consumo Específico (Kg/ton/Sinter).....	84
Figura 70. Tendência do consumo de coque de petróleo com relação a moinha de carvão vegetal.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mecanismos de transporte de matéria no estágio inicial desinterização por reações em estado sólido.....	25
Tabela 2. Diferenças fundamentais entre os processos de sinterização e pelotização.....	41
Tabela 3. Composição Química (Qualidade Química dos Materiais Utilizados).....	50
Tabela 4. Granulometria do minério Baratinha.....	50
Tabela 5. características do sistema de Exaustão de Processo.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Identificação dos materiais/misturas utilizados para cada tipo de queima (sinterização).....	66
Quadro 2. Total de queimas realizadas.....	66
Quadro 3. Mistura total do Coque de Petróleo.....	66
Quadro 4. Mistura total do Carvão Vegetal.....	67
Quadro 5. Queimas e parâmetros de Processo.....	68
Quadro 6. Teste de Queda.....	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 Objetivos Gerais.....	1
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Conceitos básicos aplicados à siderurgia.....	3
2.2 Minério de Ferro.....	8
2.3 Carvões.....	11
2.3.1 Carvão Vegetal.....	12
2.3.2 Categorias do Graus de evolução do carvão vegetal.....	13
2.4 Coque de Petróleo.....	15
2.5 História da Sinterização na Siderurgia.....	21
2.6 Sinterização.....	23
2.6.1 Sinterização por reação em estado sólido.....	24
2.6.2 Sinterização por fase líquida.....	26
2.7 Propriedades do Sínter.....	27
2.7.1 Resistencia mecânica.....	27
2.7.2 Redutibilidade (RI).....	29
2.7.3 Degradação sob redução (RDI).....	31
2.8 Descrição dos principais equipamentos e sistemas.....	32
2.8.1 Equipamento de processo de sinterização real continua.....	32
2.8.2 Peneiramento antes da dosagem.....	32
2.8.3 Sistema de Mistura e Aglomeração.....	32
2.9 Principais Parâmetros do Processo de Sinterização.....	32
2.9.1 Controle de Processo produtivo da Sinterização.....	32
2.9.2 Causas da variação da composição química do sínter.....	37
2.10 Coqueificação.....	38
2.11 Pelotização.....	40

2.12 Granulometria.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Considerações Gerais.....	46
3.2 MATERIAIS	48
3.3 MÉTODOS.....	51
3.3.1 Planta Piloto de Sinterização.....	51
3.3.2 Função do Misturador.....	56
3.3.3 Peneiramento.....	58
3.3.4 Definição do Leito de Fusão.....	60
3.3.5 Caracterização Mecânica do Sínter Produzido.....	60
3.3.5.1 Shatter Test.....	60
3.3.6 Determinação da Mistura padrão % de Carvão.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
6. SUGESTÕES FUTURAS PARA TRABALHO.....	89
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
ANEXO.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A sinterização de minério de ferro tem por objetivo principal a transformação de finos de minério, através da aglomeração a quente em conjunto com outras matérias primas, em um produto denominado sinter. Cabe ressaltar que em função da escassez de minério bitolado com bom teor de ferro e pelos custos elevadíssimos do minério de ferro que guarda prioridade para a vertente exportação, cabe aos fabricantes de gusa buscar novas fontes de matéria prima para substituir as fontes tradicionais para composição de carga metálica para os altos Fornos.

Assim sendo este trabalho, acompanha essas demandas e analisa a utilização de um fino de minério de reduzida sinterabilidade, com vistas a encontrar vertentes para utilização em condições ajustadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

O trabalho tem como foco a avaliação da sinterabilidade de finos de minérios de ferro de base magnetítica, apontando para a obtenção da mistura de finos mais adequada com relação a um processo que busca melhor produtividade. Assume-se como objetivos secundários a quantificação e qualificação dos indicadores operacionais e de performance química/resistência mecânica, utilizando apenas um tipo de fino de minério de ferro na mistura a ser processada. Para tal, busca-se estabelecer, rotas de sinterização, utilizando-se como combustível coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal para a síntese de um sinter com 1,8 de basicidade.

1.2.2 Objetivos específicos

O sinter será produzido em planta piloto localizada em Santa Luzia, MG, de propriedade da THI Metalurgia Ltda. Tomando-se como base de síntese a utilização de percentuais em massa de moinha de carvão vegetal e de coque de petróleo. Também serão testadas, misturas que encaminhem basicidade primária com patamar de 1,8. As partes serão misturadas em misturador intensivo, micro-pelotizadas em tambor e processadas (queima) em panela basculante. A partir do sinter obtido em cada mistura, serão processadas análises químicas e testes mecânicos para avaliação de composição e resistência mecânica.

1.3 JUSTIFICATIVA

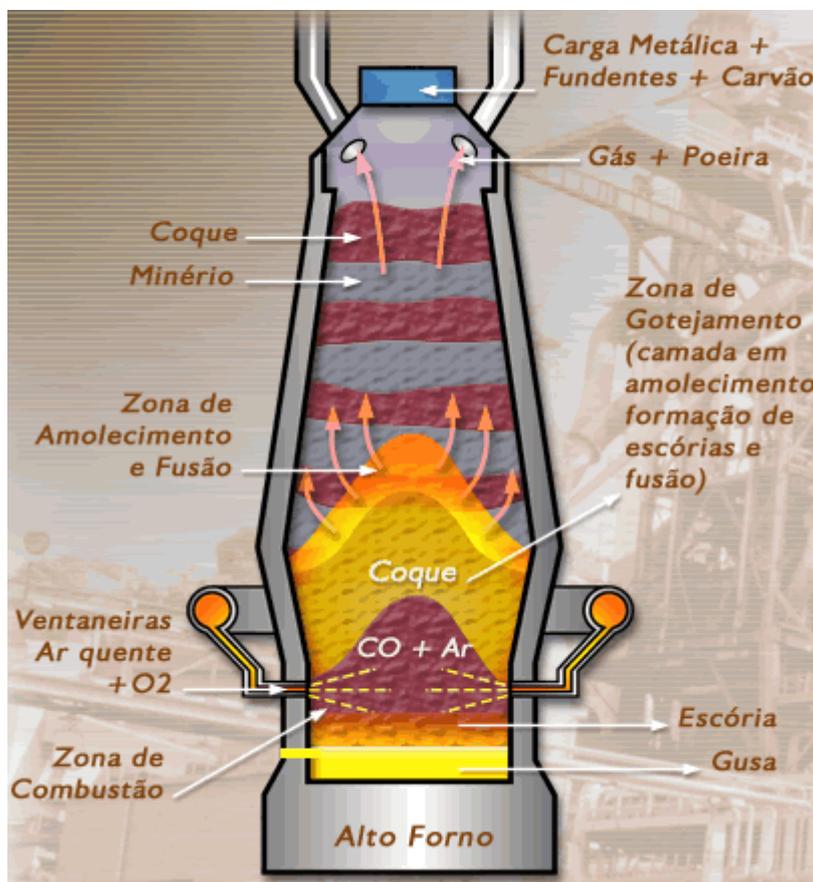
Devido à crescente escassez de minérios de ferro de boa concentração, bitolado de alto teor, e com sílica e fosforo limitados às demandas dos altos fornos, cabe buscar novas fontes de finos com qualidade superior para encaminhar o processamento destas matérias primas com características químicas adequadas a redução que, como no caso dos finos de ferro de origem magnetítica, a princípio se mostram particularmente de dificultada sinterabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Básicos Aplicados à Siderurgia

A metalurgia do ferro compreende, em suma, busca diminuir seus óxidos mediante a um redutor que, comumente, é um combustível carbonoso. Entre outras variedades de matérias-primas necessárias temos a produção do aço, sendo o mais importante o minério de ferro, pela quantidade e, quanto em desembolso. O Brasil tem uma reserva grande em questão ao minério de ferro, sendo uma das maiores do mundo: destacando em 49 bilhões de toneladas; sendo que apenas a Índia e a Rússia tende-se a igualar ao nosso país. O ferro tem sua ocorrência na natureza, sob diversas maneiras de minerais. Os Minerais são formados em múltiplos de óxidos de ferro, ao qual retratam uma grandeza nas fontes de ferro para a indústria siderúrgica. De acordo com a figura 1, eles são:

Figura 1: Esquema e matérias-primas (Alto Forno)



Fonte: Aço - Processos de Fabricação, Infomet, 2019

- Magnetita (Fe_3O_4) – condiz em 28% de oxigênio e 72% de ferro, com uma coloração cinza escura proxima a preta, com uma densidade de 5,16 g/cm³. Contudo magnéticamente alta e, tende-se a exclusão facilmente dos resíduos indesejáveis do minério conhecido com canga.
- Hematita (Fe_2O_3) – condiz em 30% de oxigênio e 70% de ferro, com uma cor cinzenta à avermelhada, com uma densidade de 5,26 g/cm³. Temos o óxido de ferro cúbico, de cor preta, forte e magnético, considerado opaco, sendo um dos três principais minerais-minério de ferro; coulsonita, ferro-ferrita, pedra-ímã, silfberguita, sendo a magnetita o minério que gera maior empregabilidade na siderurgia. As jazidas são depósitos naturais. Em muitas jazidas, contem certas proporções de materiais friáveis que se separa facilmente, produzido por finos que não podem ser utilizados diretamente no alto-forno ou nos processos de redução.

Por sua vez os finos tende-se a aglomerar, passando-se por processos de sintetização e pelotização, gerando material de granulometria controlada e que apresenta um ótimo ganho nos altos fornos. A Ganga é formada de alguns tipos de óxidos que estão presentes no minério e, no decorrer do processo de redução se funde, formando assim a escória, que é o resultado do ajuntamento do material inerte do minério conhecido como ganga, sendo dos fundentes e das cinzas do coque ou carvão que, consideravelmente em altas temperaturas, ao qual reagem entre si formando silicatos (CaO.SiO_2 ; FeO.SiO_2 ; $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) ou aluminatos ($\text{MgO.Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$; etc.).

De acordo com (RIZZO, 2009), nos processos metalúrgicos a escória desempenha funções importantes como:

- Separação no metal das maiores partes das impurezas.
- Proteção do metal do superaquecimento, por apresentar baixa condutibilidade térmica.

- Conservação do calor e do metal, tendo fusão em suas as operações redutoras de fundimento e, faz-se necessária a presença de um fundente. Muitas impurezas apresentam ponto de fusão superior à temperatura de operação do forno. Sua existencia no estado sólido não possibilita a sua saída do forno, o que torna impossível a separação do metal. O fundente torna as impurezas mais facilmente fusíveis ao se combinar quimicamente com elas, originando um ponto fusão de composto inferior aos da escória. Sendo desoxidante em todos os processos que a fase de refino ocorre a oxidação das impurezas. No fim do estágio de oxidação, com isso surgindo uma série de óxidos: FeO, Al₂O₃, SiO₂, MnO, MgO, P₂O₅. O oxigênio permanece em parte de forma livre, parte em forma de óxidos. Grande quantidade de óxidos pode ficar presa, perante o ato de resfriamento no metal feito na lingoteira, tornando o aço frágil. A fim de evitar isso, realiza-se a desoxidação, processo que consiste em adicionar um tipo de elemento que possa ter afinidade com o oxigênio ao aço líquido. Material refratário que, é uma substância infusível com as temperaturas mais elevadas para que atinja um serviço esperado. De fato essa definição é complexa, pois para compreender são exigidas outras propriedades de um refratário, além da ifusibilidade, porém esta é a mais importante. O ideal material refratário apresenta uma resistência ao calor, combinação química mudanças de temperaturas, pressão, ao mesmo tempo sendo um ruim condutor de eletricidade e calor. Os refratários são indispensáveis nas operações de processos metalúrgicas, sendo utilizados em todos os fornos e recipientes que envolvem temperaturas elevadas. São classificados em ácidos, básicos e neutros de acordo com o modo de reatividade química que apresentam. Ao ser utilizado para um dado propósito, o refratário pertence a um gênero não reativo quimicamente junto as substâncias que entra em contato, quando há um serviço. Os principais componentes dos refratários são: Al₂O₃, SiO₂, CaO, MgO, nas temperaturas comuns na metalurgia, todos os óxidos são infusíveis, porém, quando juntos uns com outros, tornam-se mais ou menos ativos . Carvão vegetal considerado um redutor e um tipo de combustível sólido, provêm de uma destilação da madeira, matéria orgânica vegetal, isso no caso a ausência de oxigênio.

- O resíduo carbonoso, coque, que é obtido da coqueificação, decomposição por efeito do calor, de certas hulhas. Ocorrido em decorrente de um aquecimento do combustível de forma isolada com o contato do ar, o combustível é mantido isolado e sinuoso em destilação que por fim recebem um calor de fonte externa. É um produto que apresenta solidez, porosidade, e cor cinza. Suas propriedades químicas e físicas apresentam variação de acordo com o carvão empregado. O Ferro-esponja fabricado em um processo que demonstra uma redução direta do ferro e de seus outros minérios, as consideráveis baixas temperaturas de 900°C, por meio do gás H₂ e CO, sem que aconteça uma fusão com a matéria prima, considerável ferro puro, que é utilizado como matéria-prima principal para a fabricação do aço. O coque serve como redutor e combustível para os altos fornos. Sua fabricação é vista da seguinte forma: Perante o início dos primeiros 150°C, ocorre a secagem do carvão, consistindo no desprendimento da água de umidade, chegando a cerca de 300°C, onde acontece o desprendimento da água de desidratação. Visto que o cavão desidratado, vai progressivamente amolecendo, passando por um ciclo de fusão, que é visível no intervalo entre 350 a 550°C, apresentando variação de um carvão para outro.

Nessa fase, acontece intenso desprendimento de matérias voláteis, isso faz com que o volume da massa em fusão aumente consideravelmente, embora alguns carvões apresentem uma redução contínua de expansão. Em decorrência desta concomitante de fusão e do desprendimento gasoso, ao solidificar-se, a massa incube de uma estrutura esponjosa, propriedade do coque. Ao terminar a etapa de fusão pastosa, a massa esponjosa começa a se consolidar progressivamente, ficando endurecido cada vez mais, independentemente do desprendimento de vapores mais pesados continuem. Ocorre então a etapa de coqueificação predominante dita. Em torno de seus 800°C o coque é considerado totalmente solidificado, ficando com uma aparência mais escura e sem brilho; porém ultrapassando determinada temperatura começa existir uma verídica grafitização ou cristalização do carbono do coque e que vai aumentando com a temperatura, conferindo-lhe dureza cada vez mais elevada, a cor acinzentada e um aspecto brilhante. Esta fase é chamada de hiper-coqueificação. Todos os vapores e gases que desprendidos durante a coqueificação são compilados e resfriados, já os gases considerados simples continuam agindo como gases e,

porém os vapores passam a se condensar com um líquido viscoso, chamado de alcatrão, e numa solução aquosa de compostos amoniacais, conhecido com licor amoniacal. O processo de coqueificação é realizado em inensas câmaras de 12 a 13 metros de comprimento e 3,5 a 4,0 m de altura, com paredes feitas de alvenaria, estabelidas paralelamente, de modo que, entre duas sucessivas, tenha-se um sistema vertical de canais de chamas para aquece-las. Dezenas delas são estabelecidas em bateria e o conjunto dessas células é denominado coqueria, como visto na figura 2.

Figura 2: Coqueria



Fonte: A indústria Siderúrgica e sua importância para a Higiene Ocupacional, siryhos, 2018

O coque é derramado incandescente, em uma temperatura que varia entre 1000 a 1100°C, tendo de ser apagado no mesmo instante para evitar que seja consumido por combustão com o ar. Para finalidade, do vagão carregado de coque, assim que termina a descarga da retorta, é puxado para um túnel do tamanho de do vagão, chamado de torre de extinção, e recebendo uma descarga de água.

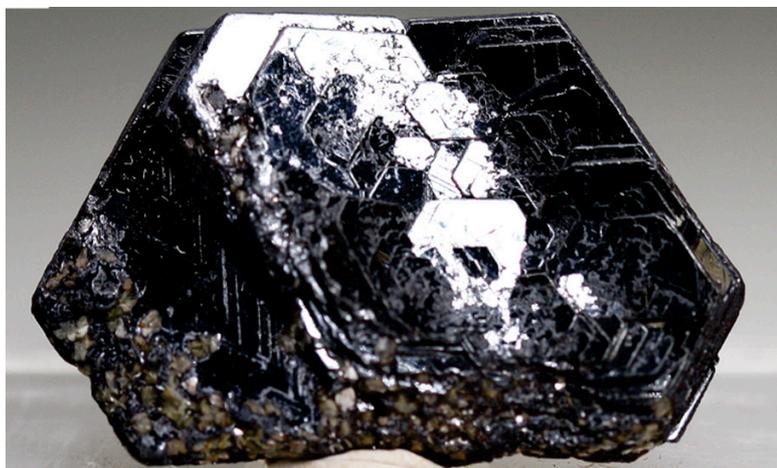
2.2 Minério de Ferro

O ferro de fato é o quarto elemento com mais abundância na crosta terrestre. Os principais minerais que contêm ferro são a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), a magnetita (Fe_3O_4) e a goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$). O minério de ferro por sua vez denomina-se itabirito, composto assim de hematita e sílica. (ARAUJO, 2004)

Hematitas: são feições ferríferas constituída por hematita, goethita e magnetita, com uma formação maciça, de forma bandada ou foliada com teores de ferro variando entre 60 a 69 %. Quanto a gênese pode ser dividida em dois tipos:

- ✓ corpos de alto teor - podem ser encontrados em grandes profundidades e tem sua procedência relacionada com o enriquecimento hidrotermal e metassomático dos itabiritos.
- ✓ corpos formados por intensa lixiviação - formados de itabiritos (carbonáticos ou silicosos), concentrado de óxidos e hidróxidos de ferro e próximo a superfície.

Figura 3: Hematita



Fonte: Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2018

Magnetita: Sua fórmula (Fe_3O_4). Apresenta uma cor preta, brilho metálico, dodecaédrico, hábito octaédrico, maciço, granular e cúbico, sem clivagem distinta, com uma dureza de 5 a 6, e uma densidade relativamente de $5,1 \text{ g/cm}^3$. As suas principais características para a sua identificação é o magnetismo e também o traço preto. Tem 72% de ferro, sendo que composta por 69% de Fe_2O_3 e 31% de FeO .

Figura 4: Magnetita



Fonte: Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2018

Goethita: Sua formula ($\text{FeO}(\text{OH})$). É conhecida com um óxido de ferro hidratado, com 10% de H_2O e 90% de Fe_2O_3 , onde por sua vez apresenta textura porosa, um brilho opaco a adamantino. Apresenta forma prismático, fibroso, maciço, radial, botrioidal ou estalactítico, trazendo uma dureza de 5 a 5,5 e uma densidade de 3,3 a 4,3 g/cm³. Formando assim, condições oxidantes e intemperismo dos óxidos de ferro.

Figura 5: Goethita



Fonte: Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2018

Pirita: Sua fórmula (FeS_2) é sulfeto de ferro. A pirita apresenta uma cor amarelada com de um latão e um brilho metálico, forma cúbica, octaédrica e dodecaédrica pentagonal, com uma dureza de 6,0 a 6,5, com uma densidade relativa de 4,95 a 5,10 g/cm^3 , com 53,4% de S e 46,6% de Fe. A oxidação superficial da pirita pode constituir depósitos de ferro secundários, concebendo assim uma limonita ($\text{Fe(OH)}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que por sua vez preserva a forma original da Pirita.

Figura 6: Pirita



Fonte: Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2018

Siderita: Sua fórmula (FeCO_3). É um carbonato de ferro com 62,1% de FeO e 37,9% de CO_2 , com uma cor castanha clara a escura, transparente, brilho vítreo, com uma dureza de 3,5 a 4, e com uma densidade relativa de 3,7 a 3,9 g/cm^3 . O ferro da siderita pura pode-se chegar em cerca de 48%, porém na maioria das sideritas o ferro pode ser substituído parcialmente por manganês, magnésio ou até mesmo cálcio.

Figura 7: Siderita



Fonte: Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2018

2.3 CARVÕES

O carvão é considerado um gênero destilado da madeira, denominado também como lenha e combustão parcial, a qual uma substancia negra, porosa, de um determinado peso específico baixo devido uma grande quantidade de ar em seus poros (ARAUJO, 2004).

Antigamente no Egito, usavam os sub produtos do carvão em seus processos (alcatrão e ácido acético), dava-se em aplicação de fonte de energia, carvões ativos, onde suas aplicações é de extrema importância na metalurgia, onde há obtenção de metais como (Fe, Zn, Cu, etc).

O óxido de metal com o carvão é aquecido, onde gera o desprendimento do CO e CO₂ do metal livre. Como podemos observar:



O uso de combustível com relação ao coque é simplesmente diferenciado do carvão de coque por ter um maior conteúdo de oxigênio e hidrogênio combinados, alegado ao seu menor poder calorífico de aproximadamente 7000 kcal/Kg.

Algumas características do carvão vegetal é por ser um bom redutor metalúrgico, um ótimo combustível, uma grande pureza e apresentando um teor

acinzentado com variáveis de 2 a 6%, definidos como carbonatos (cálcio, sódio, potássio), fosfatos (cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês).

Em sua obtenção, a pirólise é efetuada como o fim da geração do carvão, conhecido também como carbonização. A pirólise de madeira em sua propriedade, gera três fases:

1. Carvão, definido como resíduo sólido.
2. Água, alcatrão, ácido acético, álcool metílico, definido como fase líquida.
3. CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, definido como fase gasosa.

2.3.1 Carvão Vegetal

O carvão vegetal é definido como um subproduto, ao qual é resultante do processo de pirólise da madeira, que também conhecida como carbonização da madeira seca. A madeira neste processo é aquecida em ambiente fechado, tendo a falta ou presença controlada de oxigênio. As temperaturas superiores à 300 °C, desprendem o vapor d'água, alcatrão e gases não condensáveis, porém mantendo assim como resíduo o carvão. Para definir assim um comportamento durante a combustão, ocorre alguns tipos de análise elementar, dadas os nomes como, análise imediata, análise elementar, termogravimetria e poder calorífico.

Carvão vegetal e finos de minério são comumente utilizados na sinterização, com tudo, a granulometria destes materiais devem ser examinadas, e caso haja uma necessidade em fazer um processo de micropelotização deve ser utilizado para evitar a falta de permeabilidade no leito de sinterização (JANUZZI, 2008).

O carvão vegetal por sua vez é obtido a partir de queimas ou carbonização de madeira, após o seu processo de transformação se resulta em uma substância negra.

O carvão vegetal (figura 8) por sua vez é originado pelo processo de decomposição térmica de biomassa, apresentando assim um produto rico em carbono fixo. De acordo com Rosa (2012), os tipos de biomassa podem-se ser

empregado no processo de transformação, apesar que o uso de madeira como materia prima tem-se uma qualidade de alta densidade basica.

Figura 8: Carvão Vegetal



Fonte: Equipe Brasil Escola, 2020

Na produção de carvão vegetal deve-se ocorrer a degradação parcial da madeira através da aplicação do calor em quantidades controladas, isso também quanto na ausência ou em baixas proporções do oxigênio (ROSA, 2010; SCREMIN, 2012; BRITO et al., 2012). O processo é conhecido como pirólise lenta da madeira, em outra forma de se dizer em carbonização, onde tem como o objetivo de expandir o teor de carbono fixo na massa resultante, ou seja, carvão vegetal, tanto por meio de da volatilização ou remoção de outros componentes presentes na matéria prima (SOARES, 2011).

2.3.2 Categorias do Graus de evolução do carvão vegetal

1. Turfa

Estado inicial de sua transformação com aparência de material lenhoso.

Figura 9: Turfa



Fonte: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2017

2. Linhito

Intermediário entre o carvão me forma de pedra e a turfa.

Figura 10: Linhito



Fonte: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2017

3. Hulha ou carvão de pedra.

Em forma de massa compacta, com uma cor preta e brilho vítreo.

Figura 11: Hulha



Fonte: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2017

4. Antracito

Massa compacta de cor preta e possui um brilho próximo ao metálico.

Figura 12: Antracito



Fonte: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2017

2.4 Coque de Petróleo

O Coque Verde de Petróleo (figura 13) por sua vez é um produto sólido, destinado por craqueamento de óleos residuais pesados. Coque de petróleo também é definido como um sólido escuro composto de carbono, produzindo assim a partir de

decomposição termica e de polimerização de hidrocarbonetos líquidos pesados do óleo cru. Há dois tipos de subprodutos do petróleo, sendo os resíduos virgens e os craqueados. Os resíduos virgens é derivado da destilação do óleo cru, constituído assim de hidrocarbonetos que algumas das vezes são empregados diretamente a matéria prima. Já os resíduos craqueados consistem de hidrocarbonetos policíclicos. Quando esses materiais são aquecidos, ocorre um processo de condensação, produzindo então assim grandes lâminas de hidrocarbonetos. Essas lâminas podem atingir um certo tamanho, tendendo a cristalização, formando mesofase líquida sob pressão e temperatura própria, reduzindo então a pressão e formando uma massa dura de coque. A natureza do coque reflete em um ponto da mesofase ao final do processo de coqueamento, resultando assim no craqueamento do petróleo ou da deslição do alcatrao mineral (PARISOT, 1981).

Figura 13: Coque de Petróleo



Fonte: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2017

E suas unidades de conversão de resíduos são consideradas Unidades de Coqueamento Retardado (UCR). Por vez são nesses ambientes que são feita a destruição desses resíduos da destilação de petróleo, essencialmente o Resíduo de

Vácuo. Ele tem como objetivo em obter derivados claros, como co-produto, e é obtido o Coque Verde de Petróleo (CVP).

Há dois tipos de CVP, chamados de esponja e agulha. O CVP esponja é obtido através de óleos residuais de destilação a vácuo, na qual a carga da unidade pode ser convertida em óleos combustíveis e asfalto. O CVP agulha é obtido a partir de óleos aromáticos pesados, geralmente originados através do processo de conversão térmica, chamado de alcatrão de craqueamento térmico ou conhecido como catalítico, a qual chamado de óleo decantado de FCC. O tipo esponjoso por sua vez sendo comum em todo o planeta, atingindo então, cerca de 90% da produção mundial. O CVP é aplicado de acordo com cada segmento industrial, onde é tem-se a combinação de suas características, e por isso, o mercado do Coque Verde de Petróleo tem aplicação é muito forte de maior potencial de utilização industrial.

CVP e seus segmentos industriais:

- Abrasivos (carbeto de silício)
- Calcinação
- Carboníferas
- Cerâmica
- Cimenteira
- Ferro-gusa
- Ferro-ligas
- Fundição
- Gaseificação
- Indústria Química
- Secagem de grãos
- Siderurgia (sinterização, alto-forno, pelletização, PCI, fabricação de coque metalúrgico)
- Termelétricas a carvão

CVP - suas características básicas (dados provenientes BR Distribuidora):

- Carbono fixo: mínimo 87%; típico 89% (base seca).
- Enxofre: máximo 1%; típico 0,7% (base seca).

- Matéria volátil: máximo 12%; típico 10% (base seca).
- Poder calorífico: entre 8.200 e 8.600 kcal/kg.

O termo mais utilizado em uma análise do coque se refere a sua morfologia, que significa o estudo da forma da aparência externa do material. A morfologia é o conjunto de características anisotrópicas que podem ser observadas através de imagens planas. Na microfotografia do coque os parâmetros possíveis de serem observados são, por exemplo, a porosidade, a sua distribuição, as texturas isotrópicas, as texturas anisotrópicas, o tamanho, a forma das texturas ópticas, assim entre outros.

Basicamente o coque é constituído por uma fase ligante e fase de enchimento. Na fase ligante, denominada de aglutinante, é formada de materiais reativos e sua microtextura tem variações entre isotrópica a mosaica, denominado por anisotrópicos variados. Já na fase de enchimento contem cargas isotrópicas de matérias inertes.

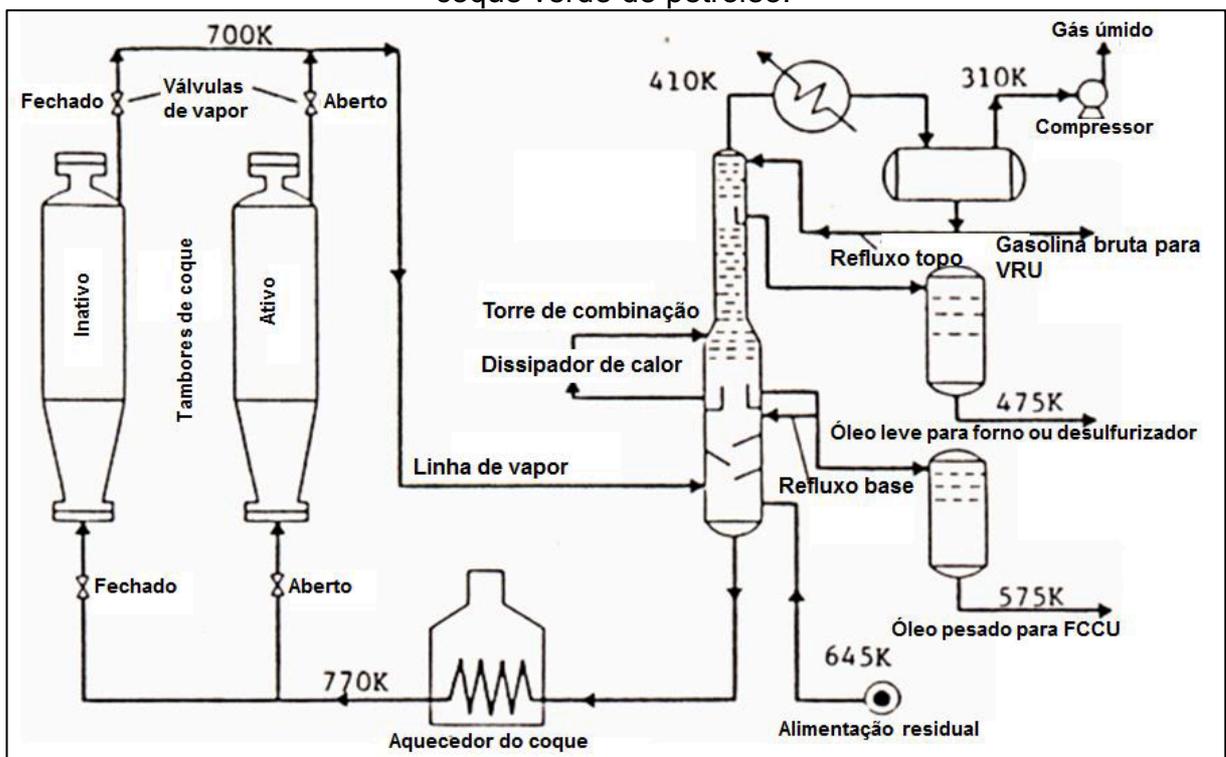
Quanto as dimensões das unidades do mosaico, os carvões dependem de suas propriedades, onde quanto maior a posição do carvão, assim maiores e mais alongadas serão as áreas isocromáticas do coque.

O coque de petróleo é encontrado nas seguintes formas:

- Coque verde é um produto que vem de um processo semicontínuo do coqueamento, também conhecido como coqueamento de um processo retardado, onde possui um teor hidrocarbonetos residuais.
- Coque calcinado é um produto derivado do coque verde, onde os hidrocarbonetos são removidos por certo aquecimento que em condições redutoras, a temperatura é superior a 1200°C, pois neste processo que é retirado todo o óleo residual, transformando assim em um produto constituído por carbono, com teores residuais de enxofre e metais.

- Coque de processo fluido é um processo contínuo de coqueamento em assento fluidificado. Constituídos assim por grãos esféricos, com um tamanho determinado e inferior a 6 mm.
- Flexicoque com sua semelhança ao coque de processo fluido, com um teor volátil inferior e grãos mais finos.

Figura 14: Fluxograma típico da unidade de coqueamento retardado, geração do coque verde de petróleo.

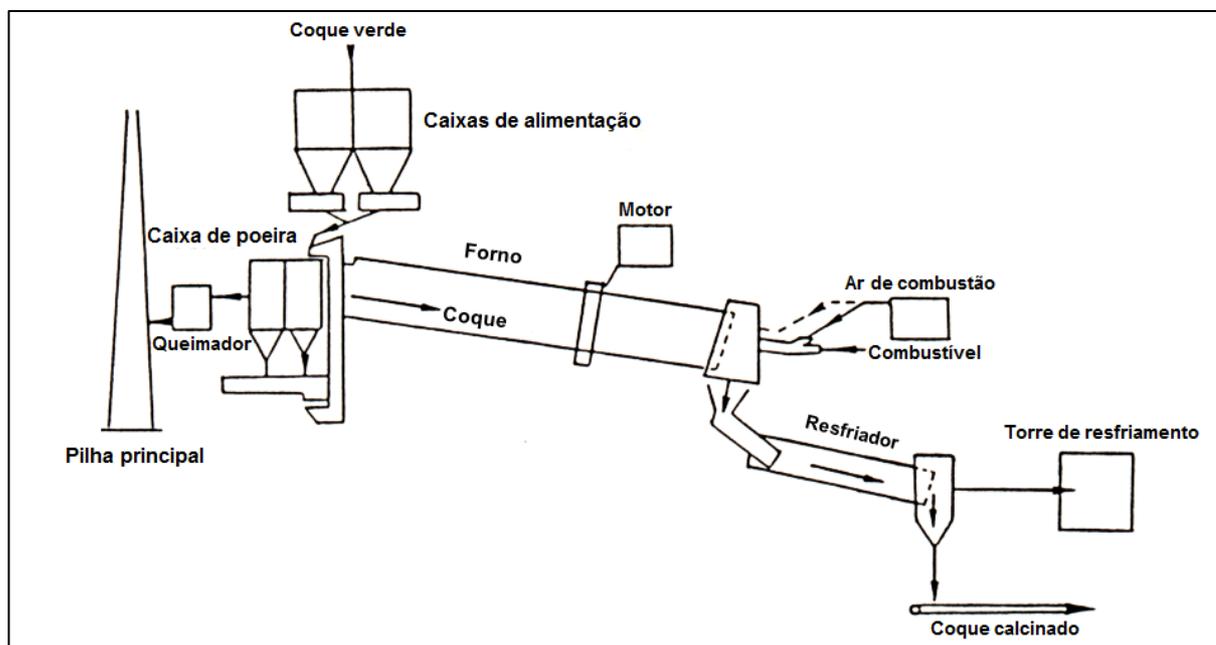


Fonte: UFMG, 2018

O coque de petróleo por sua vez tem suas características diretamente relacionadas às fontes de óleo bruto da matéria-prima.

Segundo Dietel et al, o coque de petróleo apresenta um baixo custo devido ao elevado teor de enxofre, obrigando assim o usuário a utilização de equipamentos e técnicas que são preparados para capturar os óxidos formados na combustão, chamados de SO_x, que causam efeitos nocivos ao ambiente, como por exemplo a chuva ácida. Na figura a seguir são apresentadas as principais impurezas do coque de petróleo.

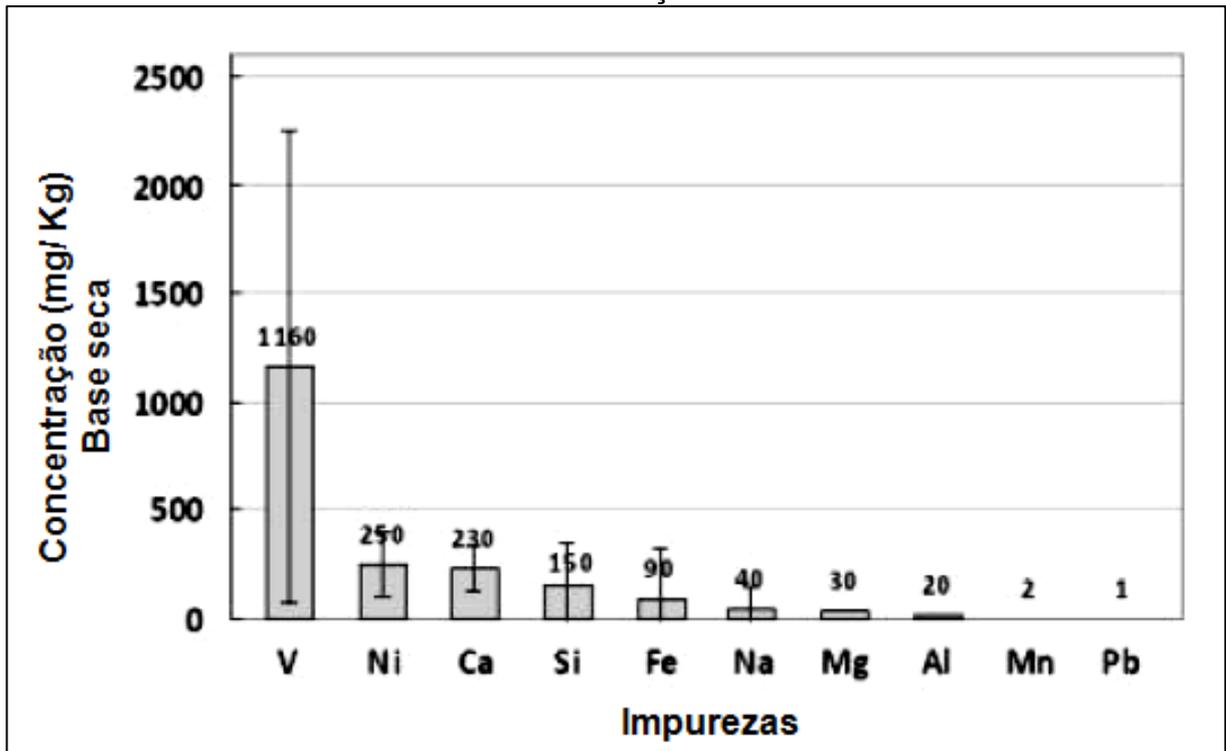
Figura 15: Unidade de calcinação de coque verde de petróleo, geração do coque calcinado.



Fonte: UFMG, 2018

O vanádio aponta como uma impureza e com uma grande concentração, apresentando valores médios de 1160 mg/ Kg, com variações de 350 mg/ Kg a 2500 mg/ Kg.

Figura 16: Principais contaminantes do coque de petróleo e suas faixas de concentração.



Fonte: UFMG, 2018

2.5 História da Sinterização na Siderurgia

Sinterização de acordo com Cappel e Lungen (1999), foi descoberta através de um processo de ustulação de minérios de chumbo sulfetado, onde esse processo ficou conhecido como sopro descontínuo, a unidade era vista como um vaso descrito como uma panela de sinterização ou conversor de forma de uma grelha no fundo.

Ao iniciar a operação, a grelha era carregada com carvão vegetal, onde a mistura a ser sinterizada era misturada manualmente através de pás. Já o processo de combustão era mantido através do sopro de ar ascendente, para que o material seja sinterizado.

Em 1902 foi desenvolvido um método por Carl Richard Wolfgang Job para aglomerar finos de minério de ferro e pirita calcinada, usando o carvão de forma de combustível, assim denominando como sinterização de minério de ferro. Em 1904 a

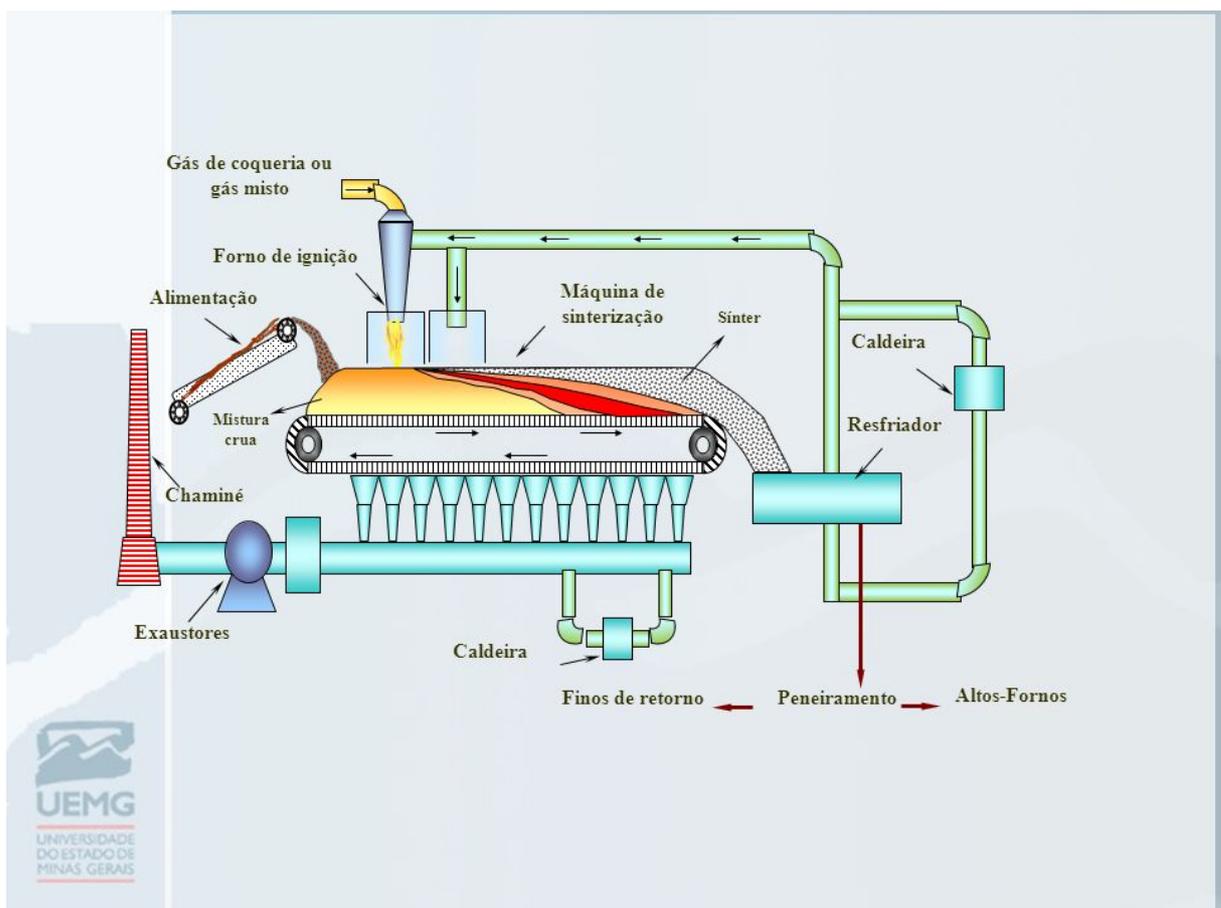
primeira planta entrou em operação em Cockrill, na Liège, para o processamento de pó de alto forno.

A.S. Dwight e R.L. Lloyd, desenvolveu o processo de sinterização com sucção de ar descendente e a máquina de esteira de sinterização contínua Dwight- Lloyd.

E. J. Savelberg em 1905 foi o primeiro a usar as placas de sinterização de Huntington- Heberlein para fazer a sinterização de minério de ferro.

A primeira planta entrou em operação em 1914, em Bochumer Verein, conforme esquema apresentado na figura 17.

Figura 17: Esquema da Sinterização



Fonte: Aglomeração de Minérios Sinterização e Pelotização, UEMG, 2018

2.6 Sinterização

A sinterização é o ciclo mais considerável no processo de materiais metálicos. Quando submetida a sinterização tem-se ganho de resistência mecânica. Com um processo termodinâmico, se torna um sistema de partículas agregada de pó ou compacta, se transforma em uma estrutura sólida coerente.

Em um processo de sinterização há dois tipos de sinterização: por reações no estado sólido e sinterização por fase líquida.

A definição de Sinterização é o processo físico, termicamente ativo, ao qual faz com aglomerações de partículas de um determinado material em forma de contato mútuo pode-se adquirir resistência mecânica. É durante a sinterização que a porosidade da estrutura é fechada, com isso o material deve ser deslocado de forma a encher os recintos vazios, determinando assim a maneira onde ocorre o processo que identifica-se com os mecanismos de aceleração da sinterização, onde são estabelecidos como: sinterização por fase sólida, líquida, ativa e reativa.

Em classificação geral, a lavra, como manuseio e transporte do minério de ferro pode gerar uma quantidade grande de partículas finas e ultrafinas. Os processos de aglomeração possibilita que os finos de minério de ferro passem a ter um valor econômico quando agregado a essas partículas com o tamanho e qualidade a sua aplicação de forma concreta nos fornos siderúrgicos em forma de sinter e pelotas. No alto forno a carga exige uniformidade e ausência de finos, definindo então uma faixa granulométrica estreita de forma suficiente a resistência mecânica assegurando-se uma boa permeabilidade à coluna de carga. Os minérios por sua vez tem sido preparados antes do uso nos altos fornos, devido as modernidades, com as técnicas de redução. Como por exemplo o minério de hematita (Fe_2O_3) é retirado da mina, pois apresenta pedaços grandes, ao qual necessita ser britados para serem utilizados no alto forno. Quando o minério passa pela britagem gera assim partículas finas, assim aumentando a complexidade no processo de redução para ter o ferro gusa. Estes finos por sua vez são separados e aglomerados em massa maior, isso através da sinterização ou pelletização, onde por sua vez tem por finalidade a melhoria da permeabilidade da

carga metálica no alto forno, de forma a fazer com que o gás redutor (CO) seja o mais eficaz no processo e também consiga baixar o consumo do coke rate, para que aumente a velocidade da redução de carga. Para que se tenha um bom produto, o sinter, e ele deve ter mais de 60% de ferro com um mínimo de enxofre e fósforo e uma boa resistência mecânica, resistindo a altas temperaturas e aos esforços no fundo do forno sem amolecer. No processo da sinterização os finos de minério, considerados coque abaixo de 3mm, o calcário e os finos são separadamente ao silos de mistura, onde são descarregados por meio de uma de mesas dosadoras ou até mesmo de esteiras alimentadoras, ao quais são chamadas de balanças automáticas sobre uma correia transportadora que são levadas aos tambores de mistura.

Vários tipos de materiais são misturados com os finos de retorno para sinterizar, assim adicionados à umidade, rojados em tambor para nucleação e para a homogeneização, por fim dando a finalidade de dar a permeabilidade adequada para a operação de queima, onde a mistura é distribuída de forma uniforme sobre a grelha através de uma calha vibratória de um rolo giratório. Assim, para uma proteção melhor, é colocada sobre uma mistura e uma camada de sinter já produzida em dimensões de 15 a 25 mm. Com isso gera vantagens em utilizar a falsa grelha, que são:

- A poeira é arrastada pelos gases queimados, onde a mostra-se uma eficácia dos coletores de pó, assim prolongando a vida útil do ventilador.
- As barras da grelha não são expostas a temperaturas elevadas.
- A carga é colocada sobre uma camada de 300 a 700 mm de espessura uniforme sobre a falsa grelha submetida a uma coifa de ignição.

2.6.1 Sinterização por reação em estado sólido

É a fase em que matéria é transportada de forma em que não haja líquido na estrutura. Caso se houver líquido, seu volume será insuficiente para o processo de sinterização.

Com diversas formas de transporte da matéria, como por difusão atômica, através dos contornos, em volume ou superfície. Outra forma de transporte é por vapor, com materiais de alta pressão de vapor.

A sinterização tem modelos em seu estado sólido, subdividido em três estágios:

- I. Estágio inicial, caracterizado pela formação de contatos interpartículas, desde a compactação, seguido pela formação e crescimento de pescoços, até o ponto onde eles começam a interferir;
- II. Estágio intermediário, caracterizado pela eliminação de poros e consequente densificação do compacto, e pelo decréscimo dos diâmetros dos poros interligados;
- III. Estágio final, caracterizado pelo crescimento dos grãos e isolamento e possível eliminação gradual da porosidade.

A tabela 1 apresenta a forma de transporte do estágio inicial.

TABELA 1 - Mecanismos de transporte de matéria no estágio inicial de sinterização por reações em estado sólido.

Transporte	Origem	Destino	Densificação
Difusão Superficial	Superfície	Pescoço	Não
Difusão Volumétrica	Superfície	Pescoço	Não
Evaporação-condensação	Superfície	Pescoço	Não
Difusão Volumétrica	Contorno de grão	Pescoço	Sim
Difusão Volumétrica	Discordância	Pescoço	Sim
Difusão no contorno do grão	Contorno de grão	Pescoço	Sim

Fonte: USP, 2018

No estagio intermediario observamos que a maior parte da porosidade é eliminada e os poros são ainda mais interconectados, mas nessa fase já se inicia o crescimento dos grãos.

Já no estagio final é caracterizado pelo crescimento dos grãos, onde os poros resntantes ficam presos no interior dos grãos com uma eliminação difícil e lenta.

2.6.2 Sinterização por fase líquida

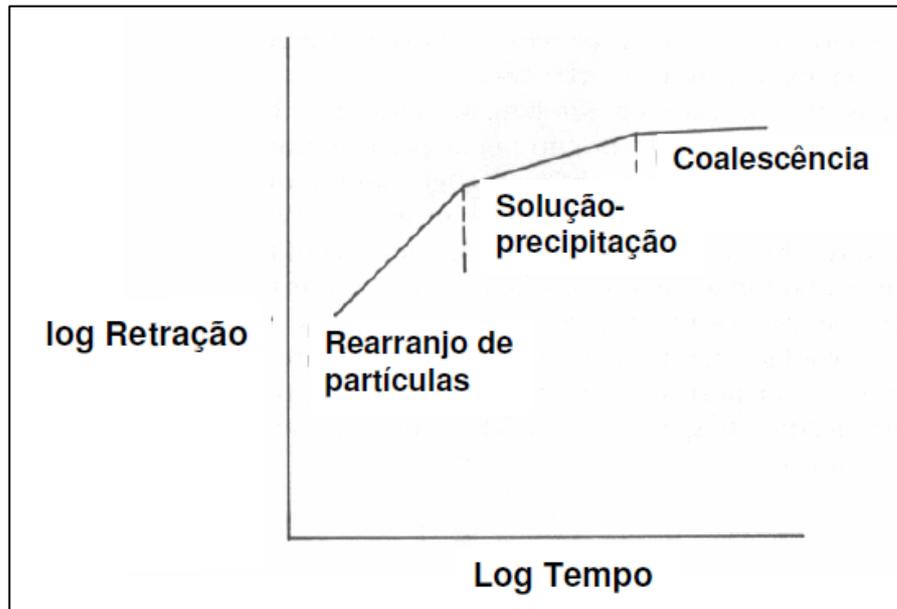
A sinterização ocorre devido a formação de líquido presente na estrutura, em uma determinada temperatura de sinterização. O líquido pode ser uma forma de fusão de um dos componentes ou por ser o resultado entre as reações, onde ocorre em pelo menos em dois componentes do sistema. O líquido tem seu devido papel na resolução dos mecanismos de sinterização e também nos aspectos finais da estrutura.

A sinterização no ciclo líquida acontece em três estágios:

- I. Processo de rearranjo: é o processo subsequente à formação da fase líquida, responsável pelo rearranjo das partículas sólidas devido à força capilar exercida pelo líquido. Durante este estágio, o compacto comporta-se como um sólido viscoso por causa da ação capilar, e a fração de densificação é dependente da quantidade de líquido formado.
- II. Processo de solução/precipitação: é a etapa onde a fase sólida (grãos menores) é dissolvida; difunde no líquido e precipita-se na região de contato, com os grãos maiores que estão sujeitos a menores pressões.
- III. Processo final (coalescência): é o ciclo controlado pela sinterização por reação em estado sólido, já que o processo de solução/ precipitação foi exaurido. Ocorre a união das partículas sólidas formando um esqueleto rígido, diminuição da densidade de contornos de grão. A densificação é lenta devido à existência do esqueleto sólido, o qual inibe rearranjos adicionais.

Na figura 18 mostra o comportamento de retração com o tempo de Sinterização.

FIGURA 18: Esquema de retração versus tempo de sinterização, na sinterização por fase líquida.



Fonte: USP, 2018

2.7 Propriedades do Sínter

2.7.1 Resistencia mecânica

A resistência mecânica do sínter está vinculada a toda resistência individual dos minerais, formação de fase líquida, índice de vazios, composição química e superfície específica do sínter.

De acordo com estudos levantados, entre as principais fases do sínter, destaca-se que a hematita primária possui maior resistência a fraturas, em seguida a sua fase secundária, magnetita, ferro de cálcio e alumínio e fase vítrea.

Com estudos levantados por vários autores sobre o efeito da basicidade da resistência mecânica do sínter de minério de ferro, mostram-se que encontra um ponto mínimo de resistência, a qual tem sua basicidade próxima de 1,8.

Com os principais teste para determinar uma resistência a frio do sínter foram com os testes de impacto, chamado de Shatter Test, e de tamboreamento, chamado de Tumbler Test.

O teste de impacto (figura 19) analisa quando lançado de uma determinada altura a sua resistência. Esses finos produzidos com o impacto do sínter na carga, assim podendo prejudicar no processamento de redução, sendo que diminuem a percolação dos gases no interior dos altos fornos.

Figura 19: Shatter Test



Fonte: Shatter Test, insmartsystems

Com os testes de tamboreamento (figura 20) chega-se a veracidade de uma geração de finos decorrentes da abrasão, isto porque ocorre o contato do sínter com a carga e com as paredes dos altos fornos.

Figura 20: Tumbler Test



Fonte: Estudo do comportamento de redução de torrões de minério de ferro, Ref. Padrão-IS: 6495-199, precision-robotics

2.7.2 Redutibilidade (RI)

A redutibilidade é definida como a propriedade onde determina a facilidade que o sínter gera, assim para remover todo oxigênio quando entra em contato com o redutor.

Uma das principais condições que é utilizado para controlar a redutibilidade do sínter é a porosidade. Com os poros macros e micros denominados no sínter, podem-se auxiliar na reação de redução no aumento do contato da superfície entre o sólido e o gás.

Na sinterização, a magnetita e a hematita chegam-se a incidir para a wustita (FeO), com um tempo bem curto, porém, a cinética reação de redução da wustita para o ferro metálico diante da magnetita podendo ser mais lenta, devido ao caráter topo químico da reação, assim os grãos de wustita são cercados por ferro metálico,

podendo assim dificultar as reações de redução do ciclo denominante no fundo da estrutura. A hematita primaria tem uma redutibilidade maior que a hematita secundaria, devido a uma porosidade intrínseca.

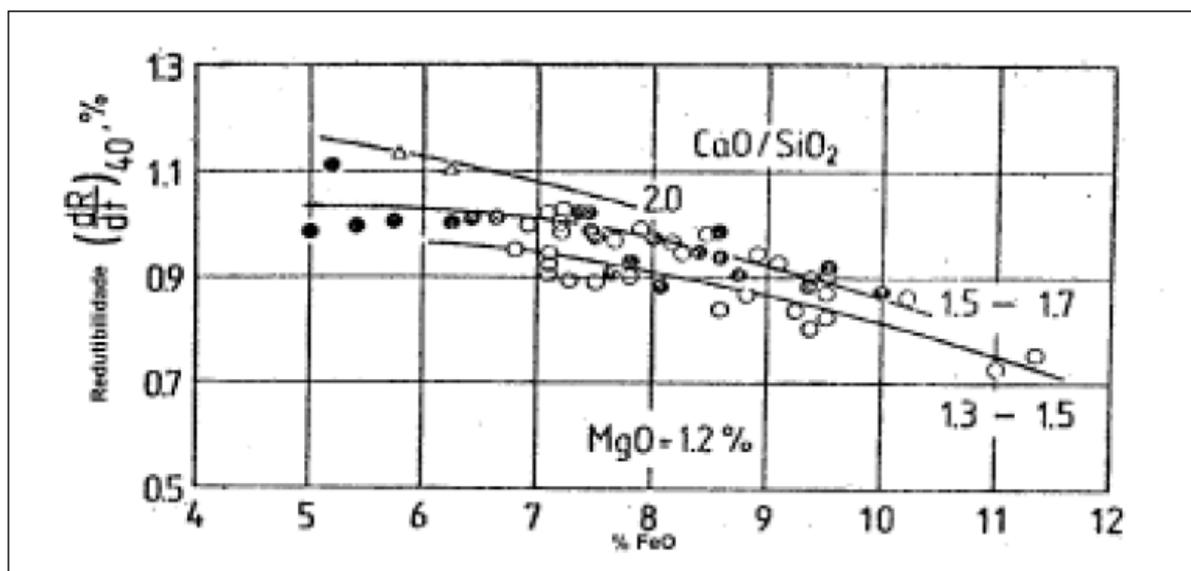
A basicidade possui também uma grande influencia na redutibilidade, porem a redutibilidade do sínter geralmente é maior em faixas de basicidade com aproximadamente 1,5 e 2,3.

O teor de ferro silicatos de cálcio e alumínio (SFCA) influenciam na redutibilidade de varias formas, sendo a temperatura na qual é formada por um determinado tipo de estrutura cristalina, assim formando uma fase com maior ou menor suscetibilidade a redução. Com a temperatura de sinterização abaixo de 110°C a SFCA possuem uma redutibilidade maior em estruturas formadas com temperaturas superiores.

A grande quantidade de FeO também presente no sínter pode-se atuar como indicador de redutibilidade.

Na figura 21, observa-se a redutibilidade do sínter em função do teor de FeO com varias basicidades.

Figura 21: Redutibilidade em função do teor de FeO para sinteres com diferentes basicidades.



Fonte: Estudo da Influência da Sinterização de Minérios de Ferro na Redução por Hidrogênio, Victor Bridi Telles, 2015

Observa-se a redutibilidade do sinter de minério de ferro no aumento da basicidade, apesar que, o aumento no teor de FeO diminui-se com a redutibilidade.

2.7.3 Degradação sob redução (RDI)

O RDI analisa a susceptibilidade do sinter quando forma finos durante a redução. O fator principal é a quantidade de hematita dentro do sinter, visto que na fase é reduzida em temperaturas baixas entre as outras fases.

A porosidade do sinter favorece de forma a diminuição do RDI, de forma que os poros diminuem a ampliação de trincas durante a redução, assim do mesmo jeito, o MgO atuando na redução do RDI, por favorecer uma origem de magnetita no sinter, de forma que possua uma temperatura de limitação maior que a hematita, onde corre o menor nível de tensões durante a diminuição.

Com a formação de fases podem aumentar o RDI, como por exemplo a hematita secundária romboédrica esqueliforme. A relação Al₂O₃/SiO₂ podem atuar de forma similar. Com a presença de Al₂O₃ na hematita, pode-se gerar um aumento

de tensões a ampliação de trincas, podendo tornar o sinter mais frágil durante a redução.

2.8 Descrição dos principais equipamentos e sistemas

2.8.1 Equipamento de processo de sinterização real continua

Equipamento para processo de sinterização real continua, tem por sua vez um controle do avanço da velocidade na frente de quima ferada no forno de ignição, sendo através de camada da mistura na esteira.

2.8.2 Peneiramento antes da dosagem

Para realizar o peneiramento com uma finalidade de remover as partes de contaminações e, também adequar a granulometria dos contutuintes de materia prima, com isso prevenindo acidentes pessoais e também falha no equipamento de sinterização.

2.8.3 Sistema de Mistura e Aglomeração

Para que se obtenha uma aglomeração do residuos solidos, é adicionado de 6 a 8% de agua no misturador tambor, com isso é obtido uma mistura homogenea.

2.9 Principais Parâmetros do Processo de Sinterização

2.9.1 Controle de Processo produtivo da Sinterização

O controle de processos produtivos, tem se tornado uma exigência cada vez maior no atual ambiente competitivo.

O ciclo produtivo tem apresentado uma busca constante para a obtenção de produtos que apresentem menor variabilidade e maior previsibilidade de desempenho no cliente.

Em indústrias de processo como a que será tratada nesse trabalho a própria variação inerente da matéria prima, como é retirada da natureza, proporciona o aumento da complexidade e a dificuldade de controle.

Fazem-se necessárias várias transformações até se obter o produto final, dentro de uma usina siderúrgica integrada.

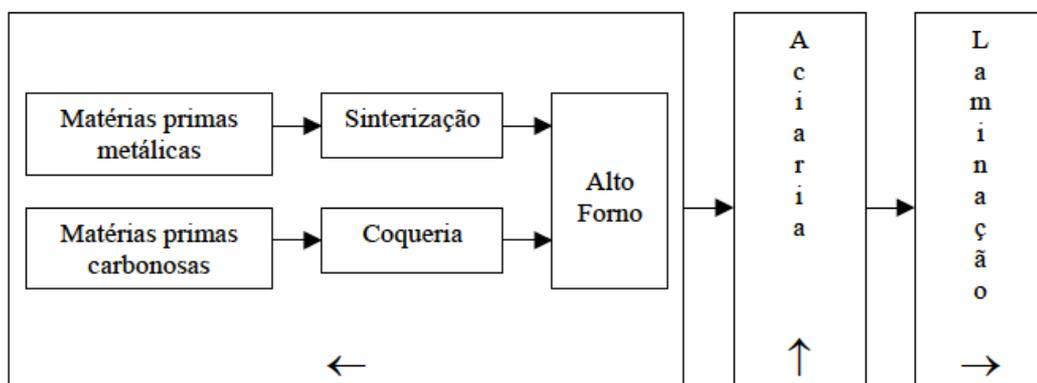
O produto final da siderúrgica integrada de planos, a chapa de aço, será obtida a partir do minério de ferro, carvão e fundentes obtidos nas reservas minerais, depois de várias etapas no processo de produção.

Divide-se o fluxo de produção em um processo siderúrgico pode em três etapas principais:

1. Redução
2. Refino
3. Metalurgia de Transformação

A Figura 22 apresenta um fluxo simplificado das principais etapas do processo siderúrgico.

Figura 22: Etapas de um processo siderúrgico.



Fonte: Sistema de Controle dos Componentes Químicos do Sinter de Minério de Ferro Baseado e Controle Automático e Controle Estatístico do Processo, Ulisses Tetti, 2004

A etapa de metalurgia de Redução tem uma grande importância devido:

A- Ao início do processo onde há transferência de propriedades do seu produto, o gusa, para a Aciaria (qualidade, quantidade, custo, etc.)

B- Por ser o contato com os fornecedores de matérias primas necessitando administrar desde o planejamento das misturas de matérias primas até o controle do desempenho efetivo de cada um dos fornecedores.

C- É a etapa onde ocorre a maior transformação no processo produtivo. Desta forma, partindo de minérios de ferro, carvões e aditivos, depois dos processos de Sinterização, Coqueria e Altos Fornos, gera o gusa líquido (liga Fe – C), este será a matéria prima da Aciaria.

D- Causa de praticamente 70 % do custo final do aço.

E- Compõe a principal causa pelo controle ambiental da siderurgia. Chamado então de “Coração da Usina Siderúrgica” o Alto Forno deve operar de forma mais estável o possível.

Correspondendo a 75 % da carga metálica, o sinter tem o papel eminente na marcha estável do Alto Forno 1, 2.

O sinter é resultante da formação de aglomeração de uma mistura de finos de minério de ferro, calcário, recirculados gerados na própria Usina e finos de coque.

Utilizam-se esses materiais com tamanhos de grãos inferiores à 6 mm.

A mistura citada acima é alimentada de forma continua a uma esteira metálica, originando uma camada de aproximadamente 400 mm de altura, que passa abaixo de um forno de ignição.

Abaixo desta esteira, localiza-se um sistema de dutos, que ligados à um potente exaustor, forçam o ar a atravessar a camada, o que causa a combustão dos finos de coque e geração de calor.

A geração do calor ocasionará a aglomeração dos finos que formam a mistura, que no fim do processo se torna um bloco compacto, as cinzas dessa combustão.

Sendo assim, esse bloco é quebrado, resfriado, gerando um produto granulado com tamanhos de grãos superiores à 5 mm chamado sinter que é adequado para uso nos Altos Fornos.

Para a boa operação dos Altos Fornos, são necessárias uma série de propriedades do sinter 2, 3, destacando-se:

- Propriedades químicas: % de vários compostos químicos tais como: FeO, MgO, MnO, relação CaO / SiO₂ entre outros.
- Propriedades físicas: distribuição granulométrica, resistência à queda, etc.
- Propriedades metalúrgicas: índice de redutibilidade.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método de controle da composição química do sinter, que apresente maior eficácia que o até então utilizado, objetivando a consecução de maior estabilidade de seus compostos químicos em torno dos valores pretendidos.

Variações na composição do sinter acarreta:

- Aumento no volume de escória no Alto Forno, pois requer que haja adição de quartzito, aumentando a necessidade de combustível e diminuindo a produtividade do equipamento.
- Diminuição do poder de dessulfuração da escória formada, o que resulta em piora na qualidade do gusa.

- Modificação nas propriedades químicas e metalúrgicas do sinter, o que influencia o ritmo operacional do Alto Forno.

Desta forma, é importante garantir que a variação seja mínima, de maneira a assegurar a previsibilidade da qualidade do sinter, garantindo um desempenho otimizado do Alto Forno.

O controle dos componentes químicos do sinter apresenta relativa complexidade, o que decorre principalmente dos seguintes fatores:

- São utilizadas diversas matérias primas no processo produtivo, cada uma destas possui uma variação inerente.

Dosadores são utilizados para composição da mistura a ser sintetizada. Os dosadores possibilitam certa variação no fluxo das matérias primas, o que influi na variação do produto.

- As matérias primas são colocadas em silos que ocasionam segregação granulométrica dos materiais, aumentando a variação.
- O produto sinter é um material particulado e todo sistema de medição desde a coleta de amostras até a análise química pode acarretar em acentuada variabilidade observada no produto.

Aborda-se-á a influência do sistema de medição em utilização, antes de desenvolver um Método de Controle para a planta industrial da COSIPA.

Para o desenvolvimento de um método de controle, após revisar a literatura sobre as causas da variação da composição química do sinter no tempo, serão revistos os métodos de controle disponíveis usados em plantas industriais.

Será abordado após a visão em maior detalhe, o controle pelo uso da previsão com a Média Móvel Exponencialmente Ponderada – EWMA, este método é escolhido para utilização em decorrência de sua simplicidade e sua capacidade de absorver

variações como aquelas oriundas das matérias primas, conforme constatado na literatura.

Desenvolvido o sistema, descreve-se a implantação do método seguido pelos resultados obtidos nas plantas industriais da COSIPA.

Tratando-se de processo essencial para a produção da siderúrgica, a implantação se realizou em etapas, tomando-se todas as precauções necessárias a fim de evitar um possível distúrbio na rotina de produção.

Sendo assim, apresentam-se os principais resultados obtidos, as conclusões e sugestões para o prosseguimento do trabalho.

2.9.2 Causas da variação da composição química do sinter

As etapas da produção de sinter do recebimento das matérias primas, até o envio do produto sinter para o Alto Forno.

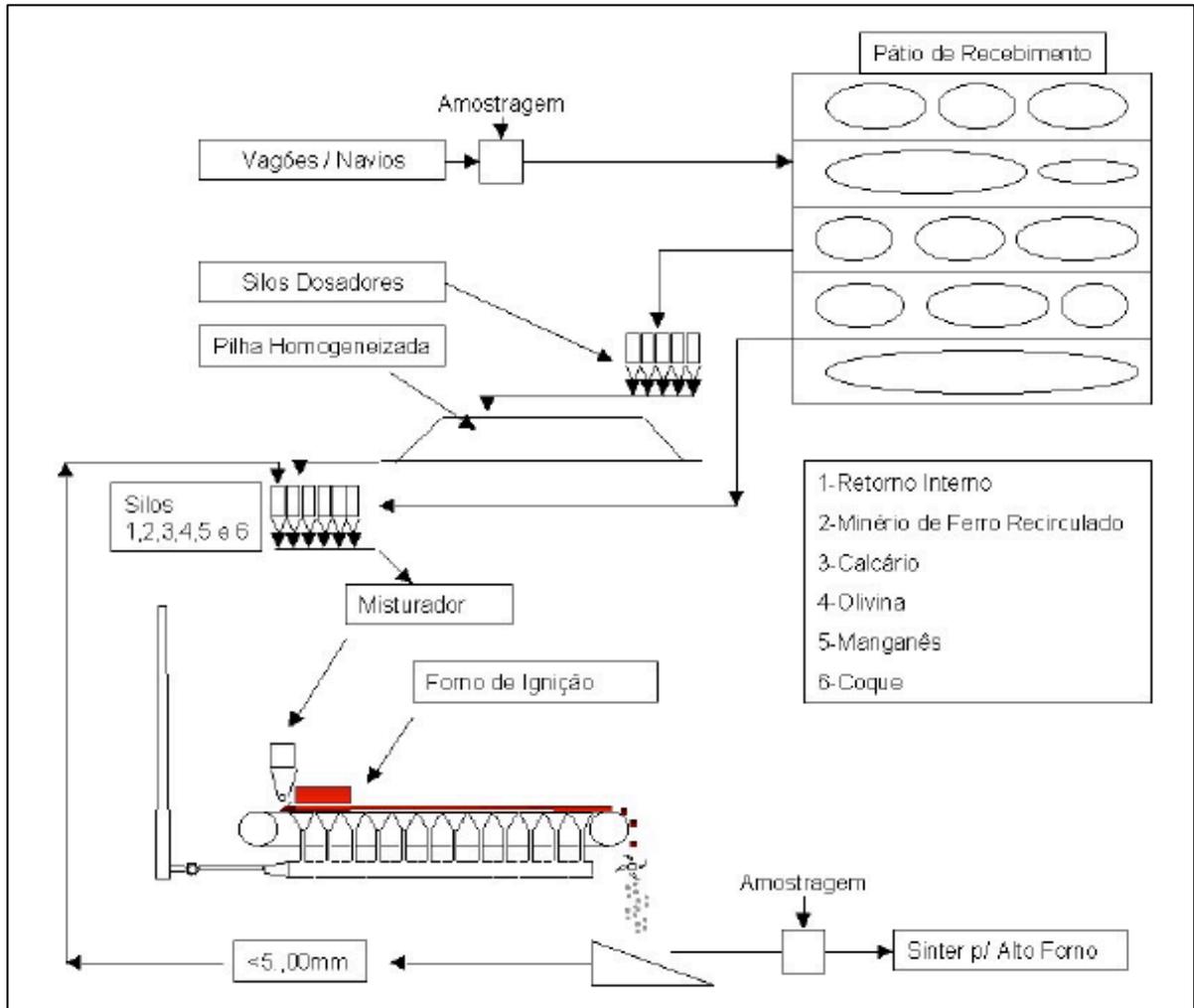
As matérias primas são provenientes de vagões e ou navios e cada lote (composição de vagões ou um navio) é armazenado, após amostragem, de forma isolada no Pátio de Recebimento.

Mediante à necessidade de utilização de diversos tipos de minérios, aditivos e recirculados (questões estratégicas, custo, propriedades dos minérios), essas matérias primas, conforme um planejamento prévio, serão misturadas e homogeneizadas em um outro pátio, chamado de Pátio de Mistura, que além desta, apresenta algumas outras funções:

- Garantir um estoque “pulmão” para o processo de Sinterização.
- Adquirir uma composição média que se adeque aos requisitos necessários. Isso é obtido através do cálculo da ponderação das características apresentadas pelas matérias primas e das quantidades que são utilizadas.
- Ganhar maior grau de homogeneização com a pilha “blindada” em decorrência do método de empilhamento em que as camadas são sobrepostas

longitudinalmente e o método de recuperação em camadas transversais, adaptada de Ferretti 4.

Figura 23: Etapas da produção de sinter



Fonte: Sistema de Controle dos Componentes Químicos do Sinter de Minério de Ferro Baseado e Controle Automático e Controle Estatístico do Processo, Ulisses Tetti, 2004

2.10 Coqueificação

O coque por sua vez é empregado como combustível e redutor nos altos fornos. A fabricação do coque:

- ✓ durante os primeiros 150°C, é feito a secagem do carvão, onde desprende da água de umidade;

- ✓ em cerca de 300°C é realizado o desprendimento da água de desidratação, onde, por sua vez, o carvão é desidratado e começa a amolecer progressivamente, passando assim por uma fase de fusão, com intervalo de 350 a 550°C, podendo variar de um carvão para outro.

Na fase é dado o desprendimento de materias volateis, onde a massa em fusão apresenta aumento considerável no seu volume, apesar que alguns carvões começam a sofrer uma contração de expansão. De uma forma simultanea, a fusão e o desprendimento gasoso e a massa, solidificam-se tornando uma estrutura esponjosa, assim caracterizando-a como coque. Chegando ao final da fase de fusão pastosa, a massa esponjosa por sua vez vai se consolidando progressivamente e endurecendo cada vez mais. Com isso obtém-se a fase de coqueificação, onde em torno de 800°C o coque por sua vez já está solidificado, assumindo assim então um aspecto escuro e sem brilho.

Mas acima de uma determinada temperatura começa haver então uma verdadeira grafitização ou cristalização do carbono de coque, apresentando cor cinzenta e um aspecto brilhante e uma grande dureza, conhecida assim como hiper-coqueificação.

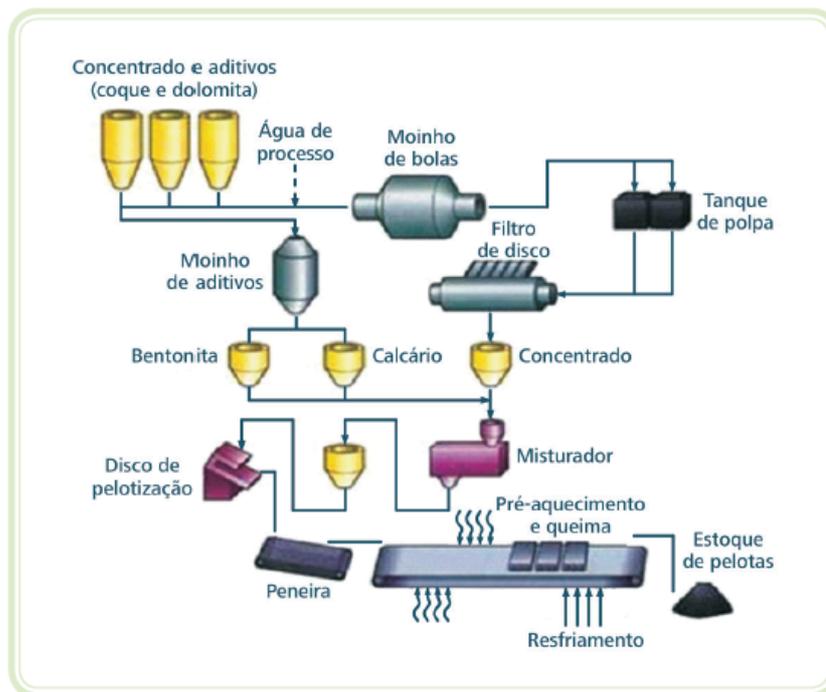
Os gases e vapores que são desprendidos durante a coqueificação são resfriados e recolhidos. Os vapores são condensados em líquido viscoso (alcatrão) e em uma solução aquosa que é composta por amoniacas. As câmeras da coqueificação tem suas respectivas medidas de 12 a 13 metros comprimento e 3,5 a 4,0 metros de altura, feitas em paredes de alvenaria de forma paralelamente, onde se forma um sistema vertical de canais de chamas onde se aquecem, muitas delas são dispostas em bateria e também ao conjunto de células, dando assim o nome de coqueria.

O coque por sua vez é descarregado em uma temperatura 1000 a 1100°C e de certa forma deve ser apagado para evitar que se consuma como combustão com o ar, onde o vagão de coque é puxado para o túnel chamado torre de extinção e recebe uma descarga de água.

2.11 Pelotização

Definido como o processo de aglomeração em forma esférica chamada de pelotas, obtidas pelo rolamento, como em tambores, discos, cones das partículas moídas e umedecidas e logo após submetidas à queima, com uma temperatura entre 1250 e 1320°C, isso quando a pelota é de forma consolidada pelo intercrescimento dos grãos e também reforçada pela escoria, o que resulta em impurezas do minério e dos aglomerados bentonita ou cal adicionados, como mostrado no fluxograma (figura 24).

Figura 24: Fluxograma de pelotização



Fonte: Dema PUC, 2017

O material quando for sintetizado, tem apenas 10% abaixo de 170 mesh, onde a pelotização com mais de 75% abaixo de 250 mesh. A pelotização é feita em três partes:

- ✓ Uma Obtenção de granulometria adequada;
- ✓ Elaboração de pelota crua;
- ✓ Enrijecimento da pelota.

Definida por tamanho de partículas que vão de 180 mesh a 85% menor que 325 mesh, como apresentado na figura 25.

Figura 25: Pelotas pronta para ser carregada no alto-forno



Fonte: Dema PUC, 2017

Podemos observar as diferenças entre os processos de sinterização e pelletização na tabela 2.

Tabela 2: Diferenças fundamentais entre os processos de sinterização e pelletização

Sinter	Pelotas
Aproveitamento de finos de mineração abaixo de 8 a 0,25mm	Aproveitamento de finos de mineração abaixo de 0,5mm
Pouca resistência mecânica	Elevada resistência
Fácil degradação durante o transporte	Baixa degradação no transporte
Tamanho do sinter: 5 a 100mm em pedaços irregulares	Tamanho da pelota: 10 a 12mm de formato esférico
25 a 50% de finos de retorno	5 a 10% de finos de retorno
Queima do combustível em contato com o minério	Aquecimento pelos gases quentes produzidos fora do leito de pelletização

Fonte: Araújo, 2007

2.12 Granulometria

Estudos têm sido realizados com o objetivo de conhecer o comportamento de diferentes granulometrias de minérios durante o processo de sinterização, observando-se que a distribuição granulométrica da curva de Astier da fração sinter feed poderia ser ampliada, passando a ser uma faixa granulométrica, sem que prejudicasse o rendimento da planta de sinterização. BENTES et al. (1994) observaram que o aumento na quantidade de superfinos aumentou a produtividade no processo de sinterização.

A ampliação para uma faixa granulométrica permite maior e melhor aproveitamento dos minérios, visto que a separação do minério de ferro, em diferentes distribuições granulométricas, é feita na própria mineração. A granulometria é uma particularidade física importante para todos os componentes da mistura, visto que a quantidade de determinadas frações granulométricas das partículas primárias presentes influencia no PAF da mistura. Apesar de não haver um ensaio padronizado para a determinação do PAF, a faixa granulométrica do minério pode ser dividida de acordo com os tamanhos das partículas primárias.

A análise do PAF avalia a capacidade de aglomeração do minério metalúrgico e dos outros componentes presentes na mistura. O tamanho das partículas primárias separadas numa faixa de distribuição e sob certa umidade, propicia a geração de micropelotas (figura 26).

Figura 26: Painela



Fonte: THI Metalurgia

A eficiência do PAF influi diretamente na permeabilidade do leito, que é o fator de maior importância no processo de sinterização, dado que sua eficiência possibilita um melhor desempenho da frente de combustão que, por conseguinte, propicia o aumento da produção, e assegura melhora de qualidade do produto.

A proporção de partículas primárias ideal é variável e depende dos tipos de matérias-primas utilizadas, mas deve ser de tal forma que permita a maior geração de micropelotas possível que, conseqüentemente, propicia maior permeabilidade do leito de sinterização. Geralmente, isto ocorre quando a mistura contém maior quantidade de partículas primárias aderentes e nucleantes e o mínimo de partículas primárias intermediárias (CARNEIRO et al., 1985; ARAÚJO FILHO et al., 1986).

Observa-se a correlação das partículas primárias nucleantes e aderentes no processo de microaglomeração. É esperado que os finos de coque fiquem na camada externa destes microaglomerados que, quando submetidos ao calor da ignição, provocam uma semifusão da parte externa, deixando o núcleo, parcialmente inalterado, produzindo assim um sinter heterogêneo. As vantagens deste tipo de sinter são: o menor consumo de combustível e sua maior resistência mecânica (VIEIRA et al., 1998).

Alguns estudos têm demonstrado que a elevação da quantidade de finos de minério de ferro na mistura torna as reações de sinterização mais eficientes. Esta elevação não prejudicaria o rendimento e produtividade do processo, apesar de causar dificuldades a condutividade térmica dos núcleos, que comprometem a resistência do sinter, sendo, às vezes, preferível menor participação destas partículas primárias na mistura, quando observado o aspecto de resistência do sinter (BENTES et al., 1994).

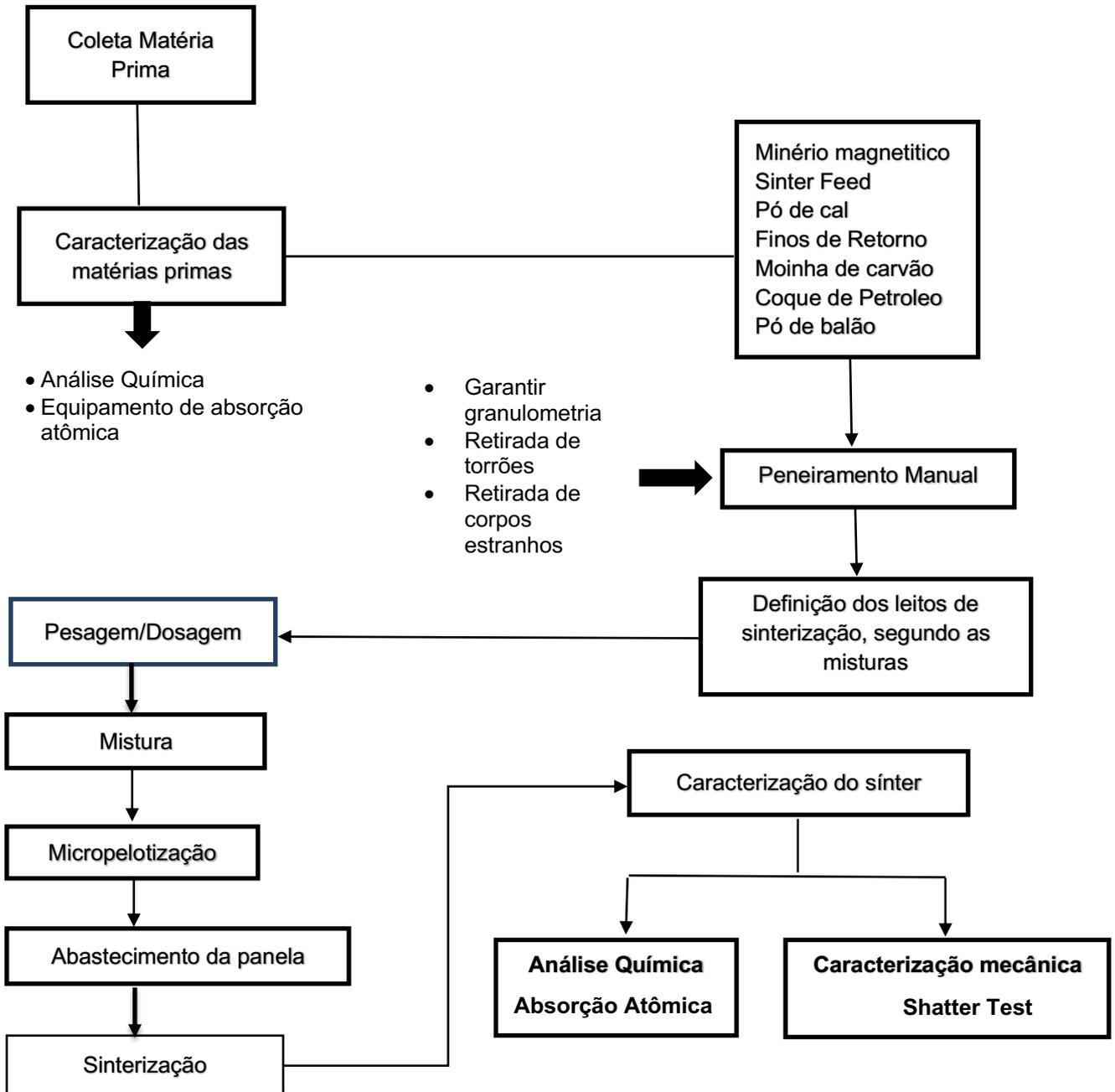
O comportamento das partículas primárias nucleantes é fundamental no processo de sinterização pela produção de sinter heterogêneo. Essas partículas, quando submetidas a altas temperaturas, permanecerão intactas por estarem associadas à resistência do sinter, portanto, deverão apresentar alta resistência.

A presença das partículas primárias intermediárias é prejudicial ao processo de sinterização, pois não apresentam comportamento nem de nucleantes nem de aderentes, penetrando nos interstícios das micropelotas, reduzindo assim a permeabilidade do leito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho a metodologia baseou-se no planejamento e execução de etapas para a obtenção de materiais de partida, seu processamento em planta piloto de sinterização e a caracterização química e mecânica dos produtos obtidos, variando-se as misturas de materiais com vistas a síntese de sinter a partir de minério de ferro, com características morfológicas Lateríticas, sinter feed e insumos disponíveis para o processo com vistas a obtenção do produto (sinter). Conforme esquema representado abaixo na Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma Geral da Metodologia



3.1 Considerações Gerais

Atualmente, o minério de ferro utilizado pelas usinas siderúrgicas é denominado minério de ferro metalúrgico, que é uma mistura de diversos tipos de minérios geológicos. Cada usina opera com um ou mais tipos de minério metalúrgico, com características químicas, físicas e metalúrgicas adequadas ao seu processo. As características geológicas de cada minério encontram-se obliteradas pela mistura de vários tipos de minérios, ainda que as características do minério que compõe a maior parte da mistura prevaleçam.

Pode-se estratificar o minério como base e minério de adição (LEMOS et al., 1978). O primeiro é utilizado em maior proporção, devido às suas características físicas e químicas; e o segundo é utilizado em menor proporção, para correção do minério base, pois este minério apresenta características físicas e químicas específicas.

Essa distinção é devida às especificações de minérios com as propriedades químicas e físicas exigidas pelo processo de sinterização. O minério é testado e classificado de acordo com as necessidades do processo, onde são observados: o índice de granulação, a distribuição granulométrica e/ou de teores químicos, associados ao parâmetro de disponibilidade e/ou custo, definindo qual (is) será (ão) o(s) minério(s) base(s) e de adição (ões). A partir desse patamar, os minérios são divididos nos tipos acima citados.

As características químicas ideais, que o minério de ferro deve apresentar, variam de um processo para outro; como já enfatizado. Isso porque a definição de sua composição química apresenta uma faixa bastante ampla, que depende, principalmente, do balanço de carga do alto-forno utilizado. Para essa definição, é observada a participação do sinter na carga metálica e, principalmente, a sua qualidade, a natureza e o volume de escória produzida para obter o ferro-gusa.

De uma maneira geral, espera-se que o minério deva conter um alto teor de ferro; baixo grau de impurezas, como: P, Al, S, Ti, Si e álcalis e perda ao fogo (PPC). Temos alguns dos compostos contaminantes predominantes e suas principais

características e influências no desempenho do processo de sinterização (CARNEIRO et al., 1985; VIEIRA et al., 1998).

O fator mais importante na caracterização química de um minério é a homogeneidade de sua composição, pois sua constância é primordial para o controle efetivo da qualidade do sinter. Os minérios de ferro, utilizados nas usinas siderúrgicas, normalmente, são de várias minas, onde a homogeneidade da composição do minério é atenuada, por meio de um eficaz sistema de estocagem e preparação de carga para a sinterização.

As principais características físicas dos minérios de ferro para sinterização são a granulometria e o poder de aglomeração a frio (PAF), sendo dada pouca importância a outras características físicas, como densidade, porosidade, forma do grão, presença de água combinada, etc., mais devido à falta de informação e métodos eficazes de avaliação, do que pela falta de importância (AZEVEDO, 1991).

A distribuição granulométrica ideal dos minérios de ferro para sinterização obedece à curva de Astier. Essa curva estabelece que os minérios devem ter sua granulometria limitada pelas malhas de 6,35 mm e 150 mesh (0,105 mm) e, aproximadamente, 50% do minério deve estar acima de 1mm (CARNEIRO et al., 1984). A partir disso, as produtoras de minério de ferro procuraram adequar sua produção para que atendessem essas exigências operacionais.

As amostras das matérias primas utilizadas no desenvolvimento dos testes foram obtidas a partir da coleta em pilhas de estoque de matérias primas e de rejeitos em uma usina siderúrgica na região de Matozinho – MG. Com objetivo de buscar uma mistura mais equilibrada de insumos, foram propostas cinco misturas de materiais e realizados três testes de sinterização com cada tipo de mistura, sendo que foram assumidos os valores médios de composições de partida e resultados para os testes de cada mistura.

Utilizaram-se componentes secos, desagregados e sem contaminação de óleo na composição ponderada de cada mistura. Os componentes abaixo foram adicionados nas misturas escolhidas, como matéria-prima complementar, juntando-se ao minério de ferro laterítico e ao pellet feed.

Componentes Complementares:

- Moinha de carvão;
- Pó de coletor (Pó de Balão);
- Finos de Retorno (Finos Degradados);
- Pó de Cal.

Realizou-se ensaio com digestão em ácidos fortes com leitura em equipamento de absorção atômica. Para a retirada das amostras representativas da matéria-prima, foram selecionadas dez amostras parciais de cada componente, removendo duas partes diagonais, incluindo o material fino.

3.2 Materiais

Serão apresentados abaixo os principais parâmetros que encaminham as características básicas dos materiais de partida, bem como suas especificidades, na composição das misturas utilizadas para síntese do sinter produto. O objetivo da composição das misturas a serem sinterizadas aponta para um estudo comparativo de possibilidades de formação de misturas adequadas ao processo utilizando dois tipos de combustível, ou seja, coque de petróleo e moinha de carvão vegetal.

Figura 28: Recebimento de materiais de partida



Fonte: THI Metalurgia

Figura 29: Peneira



Fonte: THI Metalurgia

Tabela 3 – Composição Química (Qualidade Química dos Materiais Utilizados)

Materia Prima	Fet	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	Mn	P	S	K2O	Na2O	PPC	H2O	C
S / Feed Baratinha	65,21	4,09	0,84	0,47	0,81	0,190	0,0870				0,54	4,41	
FSD	57,56	5,37	1,26	7,48	1,36	0,193	0,0950				0,60		
Dolomita	6,84	5,76	0,21	26,71	17,01	0,460					41,38	4,15	
Calcario	0,05	1,00	0,22	54,48	0,40	0,000	0,0590				43,16	4,73	
Coque de Petroleo	0,46	6,70	3,67	0,55	0,14		0,0236	0,076	0,131	0,067	98,65	8,57	89,30
Moinha/Carvão	0,46	4,90	2,79	0,31	0,07		0,0380				83,92	10,63	62,88
Retorno	57,56	5,37	1,26	7,48	1,36	0,193	0,0950				0,60		

Fonte: Renan Faria, 2020

A análise química realizada nos materiais de partida aponta para um quadro em que o sinter feed apresenta bom teor de ferro e fica demonstrado também a discrepância entre o percentual de carbono fixo entre o coque carvão de petróleo e a moinha de carvão vegetal.

A análise química dos sinter feed presentes nessa amostra onde compõe o sinter feed baratinha demonstra boa concentração de ferro e e baixa de sílica.

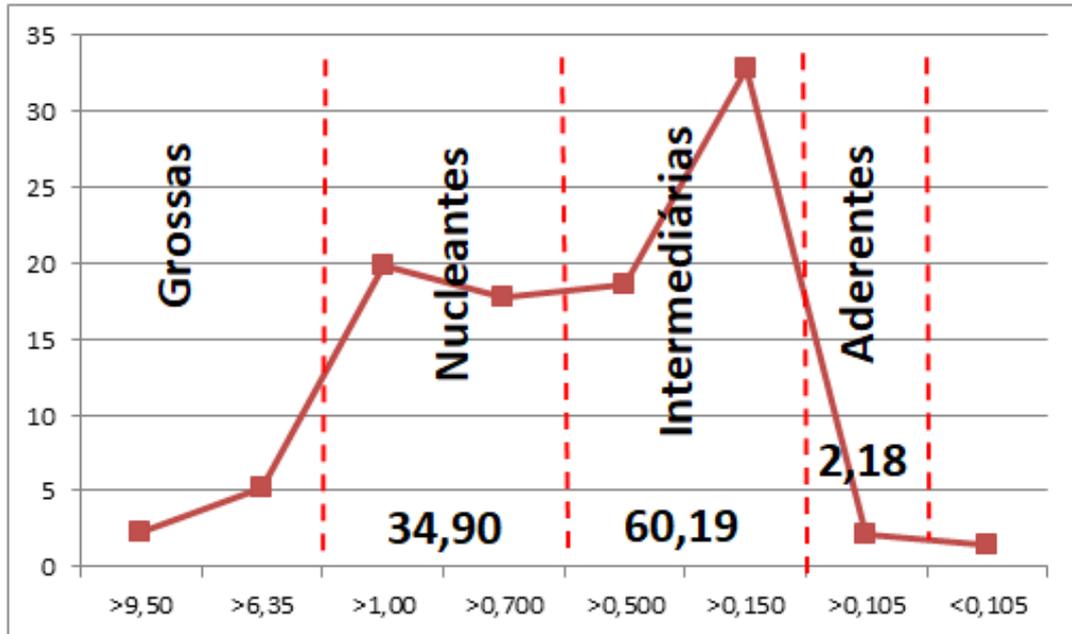
Tabela 4: Granulometria do minerio Baratinha

Malha	% Retido	%	Classificação
>9,50	0	1,09	Super Grossas
>6,35	1,09		
>1,00	17,45	34,9	Nuclenates
>0,700	17,45		
>0,500	17,64	60,19	Intermediárias
>0,150	42,55		
>0,105	2,18	2,18	Aderentes
<0,105	1,64	1,64	Super Finas

Fonte: Renan Faria, 2020

A granulometria do sinter fiid se mostra adequada ao processo de sinterização 96% entre 6,35 e 0,150mm.

Figura 30: Granulometria do minerio Baratinha



Fonte: Renan Faria, 2020

3.3 Métodos

3.3.1 Planta Piloto de Sinterização

A planta piloto de sinterização da THI Metalurgia Ltda, fica localizada no município de Santa Luzia - MG. A pequena sinterização para testes compreende um misturador tipo tambor rotativo, um o micropelotizador tipo tambor rotativo (figura 31), uma panela de sinterização e sistema de exaustão de processo acoplado a panela.

Figura 31: Vista da planta onde apresenta a conexão do exaustor e a panela de sinterização



Fonte: THI Metalurgia

O misturador (figura 32) cumpre a função de homogeneizar a mistura e é composto de tambor rotativo de 2000 mm x 350 mm. O tambor é apoiado em roletes e acionado por motoredutor que utiliza como transmissão roletes de atrito. Pode-se variar velocidade de giro bem como inclinação do tambor, modificando-se, portanto, o tempo de permanência da mistura no equipamento e a intensidade da mistura.

Figura 32: Plataforma com rampa para descarga da mistura sinterizada



Fonte: THI Metalurgia

Tabela 5: características do sistema de Exaustão de Processo

Dados da Sinter Piloto

Panela	
Área útil	0,2352m ²
Volume da Panela	0,0487m ³
Capacidade	120kg
Exaustor	
Motor	
	1870rpm
	45kw
	CV
Vazão	
	15,588m ³ /h
	0,259m ³ /minuto
Depressão	
Entrada	-200mmCa
Saída	800mmCa

Fonte: Renan Faria, 2020

O micropelotizador (figura 33) tem como função promover uma microaglomeração de partículas para ajustar a morfologia do material antes do carregamento da panela de sinterização. Assim como o misturador, constitui-se num tambor rotativo de 2000mm x 450mm. Possui o mesmo sistema de acionamento e possibilidade de inclinação do tambor para ajustar o tempo de residência, possibilitando ajustar o diâmetro da micropelotas. Adicionalmente possui a instalação de um sistema simples de atomização da água para facilitar a aglomeração das micropartículas.

Figura 33: Exaustor de Processos



Fonte: THI Metalurgia

A panela de sinterização (figura 34) é o equipamento onde é processada a queima da mistura, em nosso conjunto de testes, o tempo médio de sinterização foi fixado em 25 minutos e para atingir esse patamar regulamos o exaustor em faixa intermediária de vazão via Danpem. A panela tem seção quadrada de 600mm x 600mm e profundidade útil de 400mm.

Figura 34: Painel de Sinterização



Fonte: THI, 2020

Para cada teste foram carregados 100kg de mistura na panela. Todos utilizando os parâmetros de processo ajustados ao planejamento de obtenção do produto para análise.

Após cada queima o produto resultante foi retirado da panela (figura 35) utilizando o mecanismo de basculamento e o produto acondicionado em tambor específico para resfriamento e coleta de amostras para análise química e caracterização mecânica.

Figura 35: Painela e sistema de basculamento



Fonte: THI, 2020

3.3.2 Função do Misturador

O misturador (figura 36), além de ser o equipamento responsável pelo misturamento, homogeneização e micropelotização da mistura, promove também a adição de água, objetivando controlar a umidade deste material.

Figura 36: Misturador e decarga para o micropelotizador



Fonte: THI Metalurgia

A influência e o controle do misturamento na formação das micropelotas: No caso específico da micropelotização, esta pode ser traduzida pela união de partículas por meio de tensões superficiais, onde grãos grossos (nucleantes) servem como base para aderência de grãos finos (aderentes).

A micropelotização da mistura necessita da distribuição granulométrica, da composição mineralógica, da umidade e da adição de aglomerantes. A formação das micropelotas precisa do movimento das partículas dentro do misturador, o qual é regido pelas características do equipamento, assim como do fator de ocupação e do tempo de retenção do material dentro do misturador, conforme apresentado na figura 37.

Figura 37: Vista em Perspectiva do exaustor com descarga para o micropelotizador



Fonte: THI Metalurgia

Figura 38: Fotos do material em processo dentro do misturador



Fonte: THI Metalurgia

3.3.3 Peneiramento

É realizado o peneiramento com objetivo de remover grande parte da contaminação, assim como buscar adequar a faixa granulométrica dos componentes da matéria prima, retirando também partículas de sucata, madeira e plástico entre outros corpos estranhos.

Figura 39: Mesa para peneiramento das amostras



Fonte: THI Metalurgia

Figura 40: Peneira de Amostra



Fonte: THI Metalurgia

Figura 41: Peneira sendo utilizada



Fonte: THI Metalurgia

3.3.4 Definição do Leito de Fusão

O leito de fusão considerado para as cinco misturas a serem sinterizadas na planta piloto, buscar de forma ampla simular a performance de esquema de distribuição ponderados dos componentes, comparando as proporções, com os resultados a serem obtidos nos ensaios de caracterização pós sinterização.

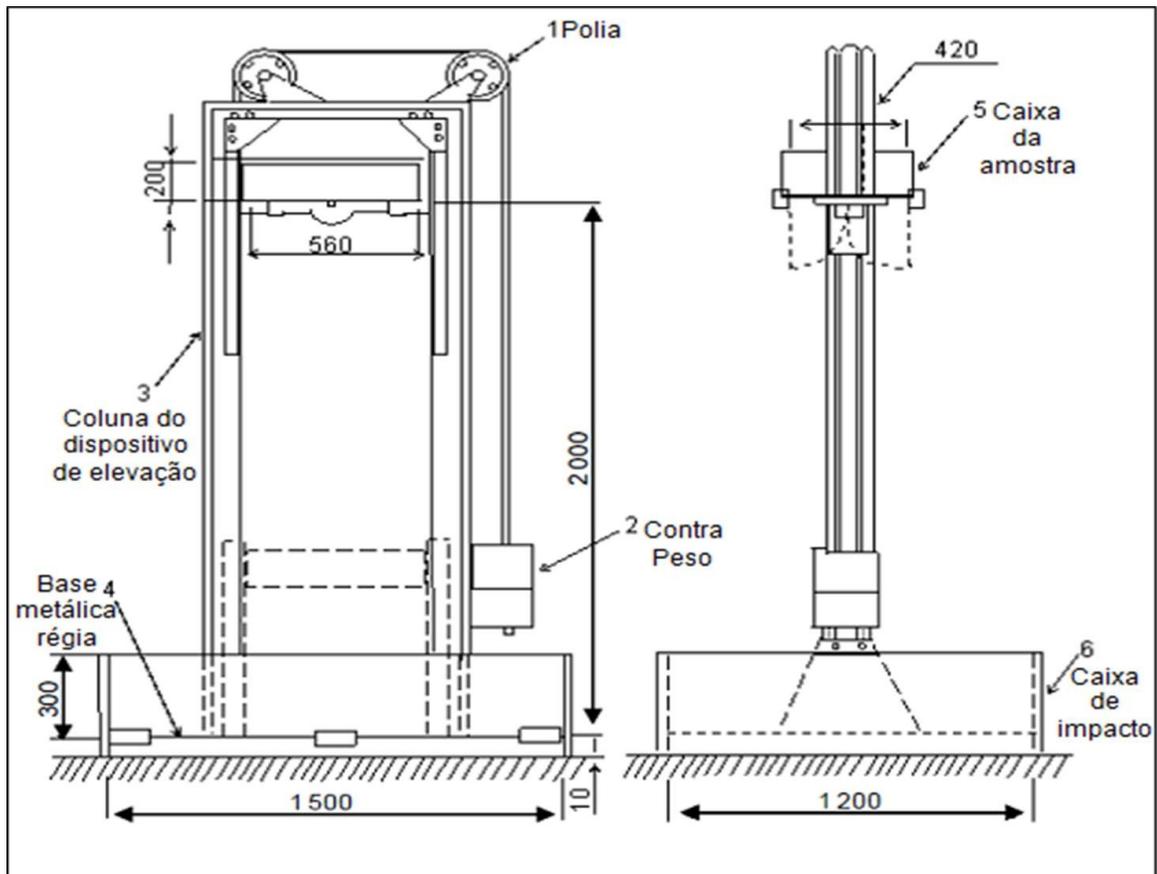
3.3.5 Caracterização Mecânica do Sínter Produzido

3.3.5.1 Shatter Test

Realizou-se o teste nas dependências da empresa Minas Logística localizada na cidade de Prudente de Morais – MG. O teste avaliou a resistência mecânica do sínter produzido. Uma vez que o sínter se degrada durante a sua movimentação, o teste é de suma importância, pois sua finalidade é medir a susceptibilidade do material em produzir finos.

A realização do teste seguiu a norma ABNT NBR 10633 - Sínter de minério de ferro - Determinação da resistência à queda. Cujo objetivo é englobar um dos vários métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para medir diversos parâmetros físicos. Desse modo, a norma especifica um método para a determinação da resistência à queda de sínters.

Figura 42: Características do aparelho utilizado no Shatter Test.



Fonte: Desenho esquemático padronizado pela ABNT NBR 10633

Na Figura 42 observa-se as características do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. Em seguida foram descritos os procedimentos, materiais e aparelhagem utilizados na realização do mesmo, tais como:

Figura 43: Equipamento de Shatter Test utilizado na planta piloto de Santa Luzia, MG



Fonte: THI Metalurgia

- **Caixa da amostra:** Na figura 43 a caixa de amostra possui 560 mm de comprimento, 420 mm de largura e 2 m de altura, confeccionada em chapa de aço resistente à abrasão. Seu fundo é constituído de uma porta longitudinal, com duas bandas, construída de forma que impede a perda de amostra por qualquer de seus lados quando fechada. Essa porta é provida de dispositivo externo para permitir sua abertura instantaneamente;

Figura 44: Caixa de Amostra



Fonte: THI Metalurgia

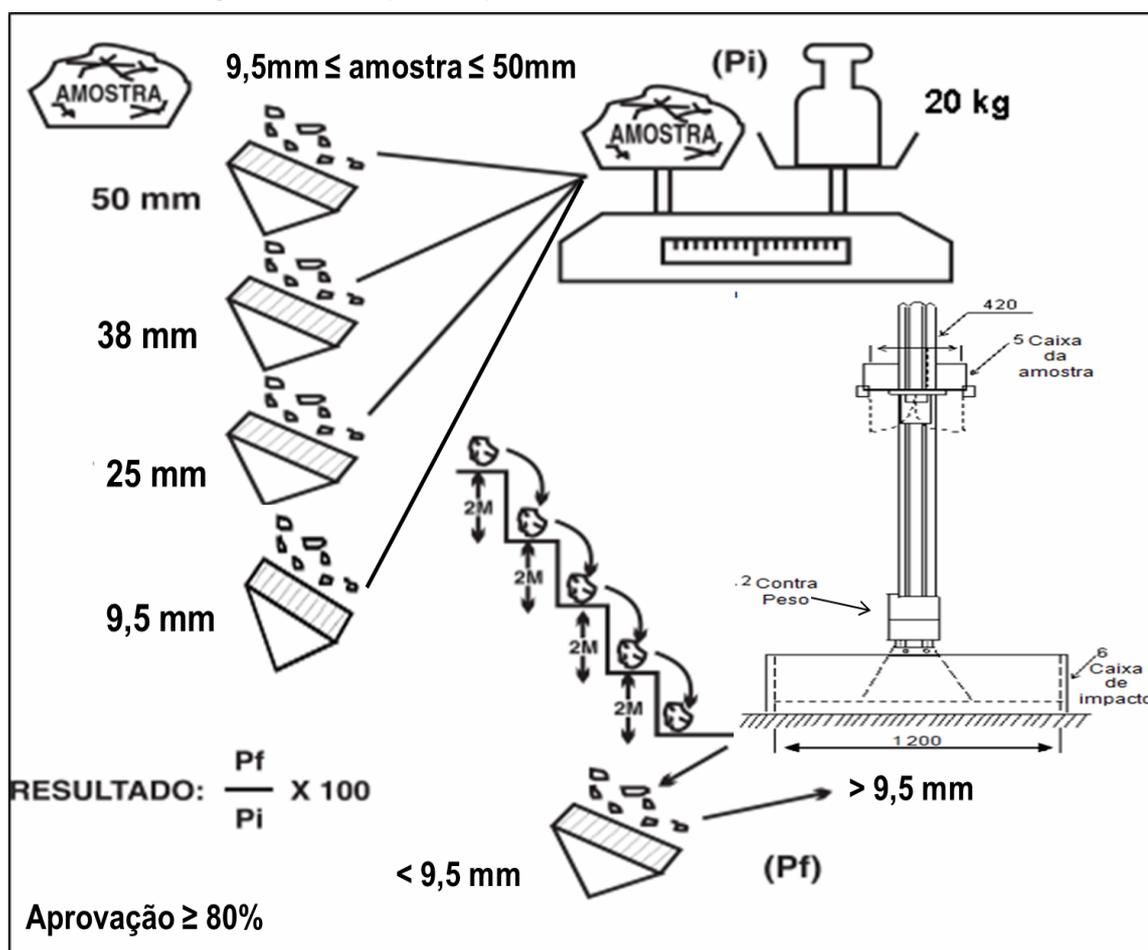
- **Caixa de impacto:** Na figura 44 a caixa de impacto possui 1500 mm de comprimento, 1200 mm de largura e 300 mm de altura, confeccionada em chapa metálica rígida, com espessura mínima de 10 mm. Uma das laterais é articulada para possibilitar a retirada de material após cada queda. A base da caixa é substituída quando sua espessura é reduzida em 3 mm, em qualquer ponto de impacto na queda da porção de ensaio;
- **Dispositivo de elevação:** constituído de coluna, polias e contrapeso, para a elevação e o abaixamento da caixa de amostra a uma altura mínima de 2 m, medida entre o fundo da caixa da amostra e a caixa de impacto;
- **Dispositivo de pesagem:** Tem capacidade de pesar a massa a ser determinada com uma sensibilidade de 1/1000;
- **Peneiras:** com aberturas quadradas de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm, de acordo com ABNT NBR ISO 3310-1.

Na Figura 42, temos a representação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. Suas principais características foram descritas acima.

Na Figura 45, observa-se a descrição das principais etapas para a realização do shatter test, tais como: Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio e procedimentos operacionais realizados, tais como:

- Realizou-se a separação das amostras como base na norma ABNT NBR ISO 3082, Minérios de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostras, onde se compôs uma amostra de 80kg de sínter;
- Secou-se a amostra até a massa constante a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resfriada até a temperatura ambiente, antes da preparação das porções de ensaio. Importante lembrar que a massa constante é alcançada quando a diferença de massa entre duas medidas subsequentes for menor do que 0,05 % da massa inicial da amostra de ensaio.

Figura 45: Esquema para a realização do Shatter Test



Fonte: Duarte, 2016

- Determinou-se a distribuição granulométrica do material conforme a norma ABNT NBR ISO 4701. Para tal foi realizado o peneiramento da amostra de ensaio seca nas peneiras de abertura 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm e foram desprezados o material acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm;
- Pesou-se cada fração e foram compostas quatro porções de ensaio, de 20 kg
- $\pm 0,2$ kg cada, na faixa granulométrica de 9,5 mm a 50 mm, proporcionalmente à distribuição granulométrica encontrada;
- Tomou-se uma das porções de ensaio de 20 kg preparadas anteriormente em amostras e anotou-se sua massa (P_i);
- Colocou-se a porção de ensaio na caixa de amostra, nivelando sua superfície;
- A elevação da caixa foi até a altura de 2 000 mm;
- Abriu-se rapidamente o fundo da caixa para que toda a porção de ensaio caísse de uma só vez sobre a caixa de impacto;
- Recolheu-se todo o material;
- Repetiu-se os passos anteriores por mais três vezes e a porção de ensaio recolhida foi peneirada na peneira de abertura de 9,5 mm, segundo a norma ABNT NBR ISO 4701;
- Expressou-se o Índice de resistência à queda (IQ) como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm denominada peso final (P_f) e a massa inicial da porção de ensaio (P_i).
- O resultado do Shatter test será adequado quando for obtido percentual maior ou igual a 80%, ou seja, deve apresentar um índice de resistência a queda $\geq 80\%$;
- Quando o índice de resistência a queda é $\geq 80\%$, deve-se repetir somente duas vezes. Se o índice for $< 80\%$ são necessárias 3 repetições.

Quadro 1: Identificação dos materiais/misturas utilizados para cada tipo de queima (sinterização)

Identificação dos Níveis de Queima		
Item	N - 3	N - 4
Teste Minério Baratinha	Basicidade 1,8 com Carvão Vegetal	Basicidade 1,8 com Coque de Petróleo

Fonte: Renan Faria, 2020

Quadro 2: Total de queimas realizadas

Total De Queimas Realizadas				
Nível	Total	Gerar Retorno	Não Validadas	Validadas
N-3	8	1	5	3
N-4	4	1	1	2
	12			

Fonte: Renan Faria, 2020

Este quadro contém a tabulação das queimas realizadas com cada tipo de amostra e considera aquelas onde foram assumidas com validadas.

Para as queimas N/4 que utiliza coque de petróleo utilizamos a seguinte mistura conforme mostrado no quadro 3.

Quadro 3: Mistura total do Coque de Petróleo

		Coque Petróleo - IB=1,80 Queimas - N / 4		
Mistura Total		Q-2	Q-3	Média
S / Feed Baratinha	%	46,00	46,00	46,00
FSD		7,60	7,60	7,60
Dolomita		1,90	1,90	1,90
Calcario		7,00	7,00	7,00
Coque de Petróleo		5,50	5,50	5,50
Moinha/Carvão				
Retorno			32,00	32,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00

Fonte: Renan Faria, 2020

Para as queimas N/3 que utiliza moinha de carvão utilizamos a seguinte mistura conforme mostrado no quadro 4.

Quadro 4: Mistura total do Carvão Vegetal

		Carvão Vegetal - IB=1,80			
		Queimas - N / 3			
Mistura Total		Q-5	Q-6	Q-7	Média
S / Feed Baratinha		37,71	37,71	37,71	37,71
FSD		6,40	6,40	6,40	6,40
Dolomita		1,64	1,64	1,64	1,64
Calcario	%	6,35	6,35	6,35	6,35
Coque de Petroleo					
Moinha/Carvão		11,90	11,90	11,90	11,90
Retorno		36,00	36,00	36,00	36,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Renan Faria, 2020

Quadro 5: Queimas e parâmetros de Processo

		Coque Petroleo - IB=1,80			Carvão Vegetal - IB=1,80				Média Geral
		Queimas - N / 4			Queimas - N / 3				
		N-4/Q-2	N-4/Q-3	Média	N-3/Q-5	N-3/Q-6	N-3/Q-7	Média	
Sinter Produto	Kg	55,650	55,590	111,240	48,360	51,080	54,350	153,790	146,40
Produtividade	ton./m²/Dia	6,05	11,65	8,85	9,50	8,89	11,41	9,93	9,76
Mistura Seca Carregada	Kg	101,120	100,210	201,33	102,705	100,153	103,917	306,78	277,54
Rendimento SP/M.Total	%	55,03	55,47	55,25	47,09	51,00	52,30	50,13	52,91
Tempo de Ignição	segundos	1,65	1,78	1,72	1,83	1,83	1,83	1,83	1,70
Tempo Sinterização	Minutos	56,33	29,22	42,78	31,17	35,16	29,17	31,83	35,44
Temperatura-Pico	°C	195	321	258	307	310	329	315	291
Depressão-Pico	mmCa	588	500	544	600	580	560	580	575,42
Camada de Mistura	mm	220	230	225	340	340	340	340	275
Camada de Bedding	Kg	10	10	10	10	10	10	10	10
Densidade de Carga	ton/m³	1,19	1,18	1,19	1,24	1,22	1,24	1,23	1,20
Umidade	%	7,14	7,21	7,18	12,48	13,4	11,56	12,48	9,84
Misturamento	minutos	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	6,33
Micropelotização	minutos	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,33
Granulometria	%	Q-2	Q-3	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média	
>50 mm		23,70	14,60	19,15	9,10	13,68	13,57	12,12	12,79
>25 mm		17,50	15,05	16,28	15,22	15,13	13,88	14,74	16,58
>12 mm		18,55	25,30	21,93	25,21	22,37	25,81	24,46	23,66
>5 mm		10,75	15,15	12,95	18,31	19,69	19,71	19,24	17,37
<5 mm	27,50	25,55	26,53	32,16	29,13	27,03	29,44	28,81	
Rendimentos:	%	Q-2	Q-3	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média	
SP/SP+Retorno		63,24	64,91	64,08	58,91	60,67	64,43	61,34	62,06
SP/M.total		55,03	55,47	55,25	47,08	51,00	52,30	50,13	52,91
SP/M.Parcial		80,93	81,59	81,26	73,57	79,69	81,72	78,33	78,22
Retorno Carregado	%	32,00	32,00	32,00	36,00	36,00	36,00	36,00	32,50
Retorno Gerado	%	28,06	26,71	27,39	31,46	29,88	27,03	29,46	29,03
Balanco Retorno	%	100,94	94,84	103	96,00	93,20	85,83	103	102,78
Consumo Especifico	Kh/t/Sinter	Q-2	Q-3	Total	Q-5	Q-6	Q-7	Total	
S / Feed Baratinha		835,85	829,22	832,54	800,87	739,38	721,01	753,76	834,82
FSD		138,10	137,00	137,55	135,92	125,49	122,37	127,92	132,09
Dolomita		34,52	34,25	34,39	34,83	32,16	31,36	32,78	34,30
Calcario		127,19	126,19	126,69	134,86	124,51	121,41	126,93	111,85
Coque de Petroleo		99,94	99,15	99,54					89,39
Moinha/Carvão					252,73	233,32	227,53	237,86	253,88
Retorno		581,46	576,85	579,16	764,55	705,86	688,32	719,58	639,77
TOTAL		1817,07	1802,66	1809,87	2123,76	1960,71	1912,00	1998,82	1924,47
Mistura Total	%	Q-2	Q-3	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média	
S / Feed Baratinha		46,00	46,00	46,00	37,71	37,71	37,71	37,71	44,25
FSD		7,60	7,60	7,60	6,40	6,40	6,40	6,40	6,94
Dolomita		1,90	1,90	1,90	1,64	1,64	1,64	1,64	1,81
Calcario		7,00	7,00	7,00	6,35	6,35	6,35	6,35	5,87
Coque de Petroleo		5,50	5,50	5,50					5,22
Moinha/Carvão					11,90	11,90	11,90	11,90	11,86
Retorno		32,00	32,00	32,00	36,00	36,00	36,00	36,00	32,58
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 46: Coque de Petróleo, sínter obtido após a queima



Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 47: Carvão Vegetal, sínter obtido após a queima



Fonte: Renan Faria, 2020

3.3.6 Determinação da Mistura padrão % de Carvão

A metodologia proposta neste trabalho visa a produção e caracterização de sinter de finos de minério de ferro com base magnetítica utilizando percentuais em massa de moinha de carvão vegetal e coque de petróleo na mistura com perspectiva da obtenção de basicidades para o sinter no patamar de 1,8 homogeneizada em misturador intensivo (foi utilizada em substituição ao misturador inicial usado, uma betoneira comum de construção civil), foi necessária esta substituição em função de necessidade de garantir a homogeneidade da mistura, visto que o fino de minério magnetítico apresentou sinterabilidade dificultada nas queimas preliminares não validada) e micro pelletizadas, para garantir a permeabilidade adequada na panela de sinterização por queima.

Serão avaliados neste trabalho os parâmetros das queimas N#2, N#4 considerando a influencia de alguns parâmetros na mistura padrão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir apresentamos o conjunto de resultados e também os gráficos que apontam as curvas de tendencia e a síntese comparativa, considerando os parâmetros de processo, bem como a estratificação qualitativa, de composição química e de caracterização mecânica dos sinteres produzidos na planta piloto a partir das utilizações das misturas resultantes da introdução de coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal como combustíveis.

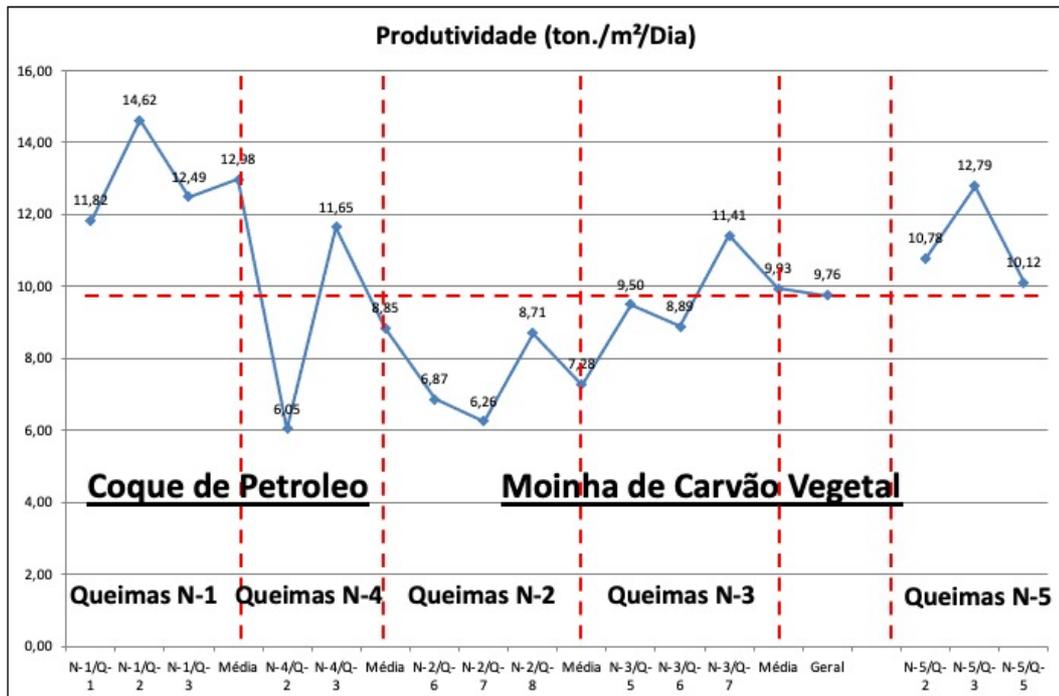
Figura 48: Sinter produzido após a britagem



Fonte: THI Metalurgia

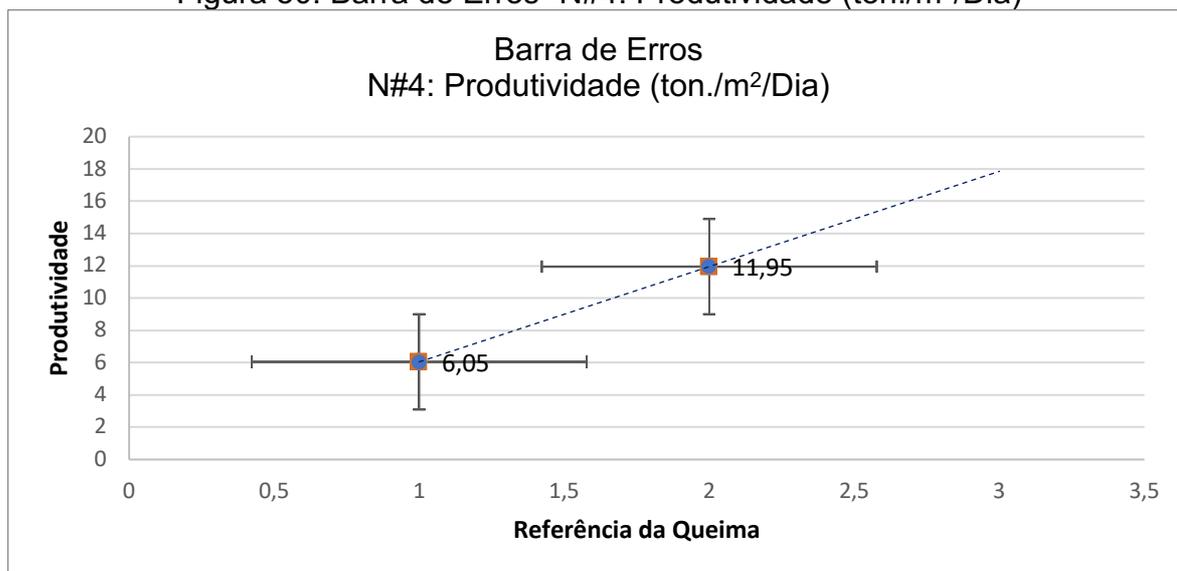
Dados fornecidos pela mineração BEMISA, dos minérios a serem testados/avaliados.

Figura 49: Produtividade (ton./m²/Dia)



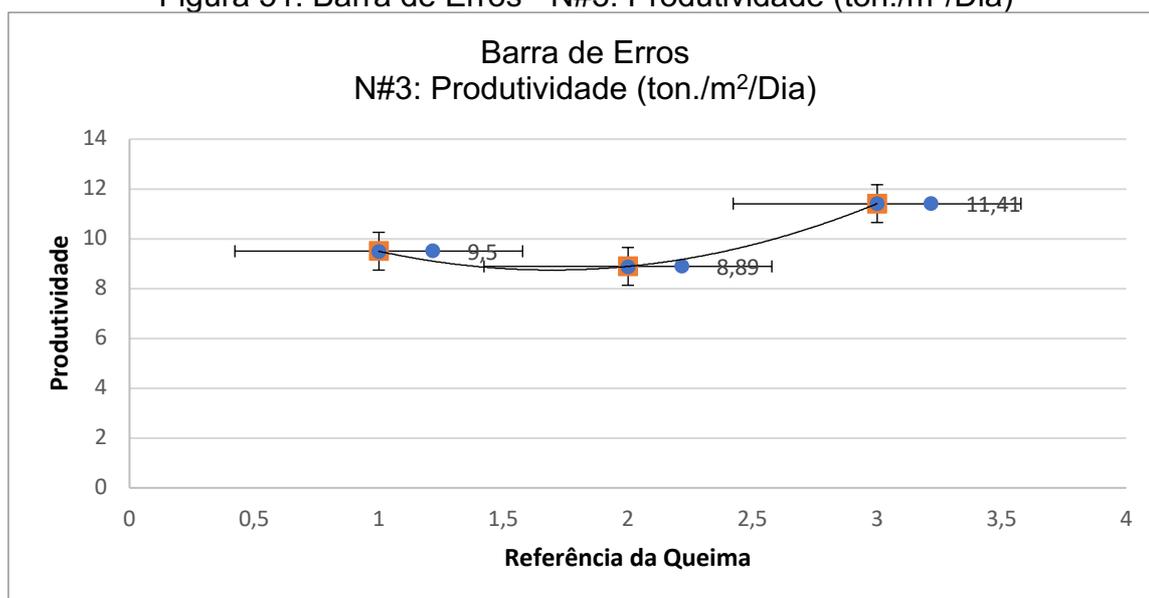
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 50: Barra de Erros- N#4: Produtividade (ton./m²/Dia)



Fonte: Renan Faria, 2020

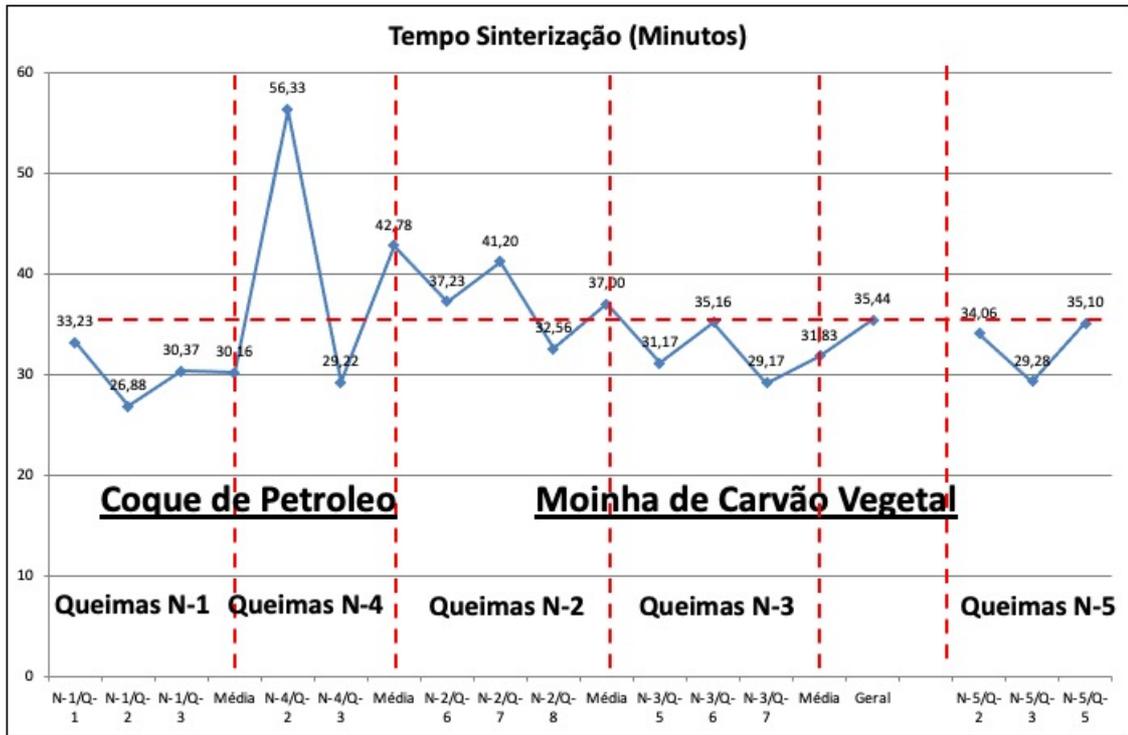
Figura 51: Barra de Erros - N#3: Produtividade (ton./m²/Dia)



Fonte: Renan Faria, 2020

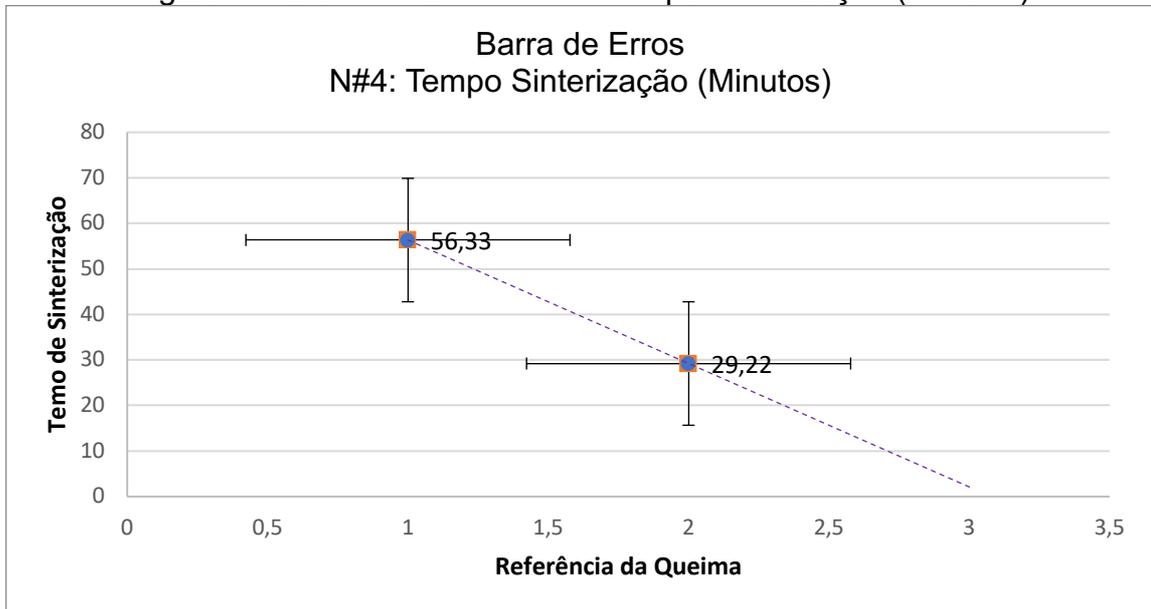
A partir das queimas realizadas na planta piloto, e obtidos os resultados registrados nas planilhas específicas em anexo. Pode-se observar que a produtividade obtida com coque de petróleo utilizado como combustível em N#3 foi maior que em N#4 que utilizou moinha de carvão vegetal (figura 49). Cabe observar que em função de uma das queimas em N#4 ter apresentado um resultado discrepante, a tendência de registro na produtividade segue coerente com a melhor qualidade do combustível.

Figura 52: Tempo Sinterização (Minutos)



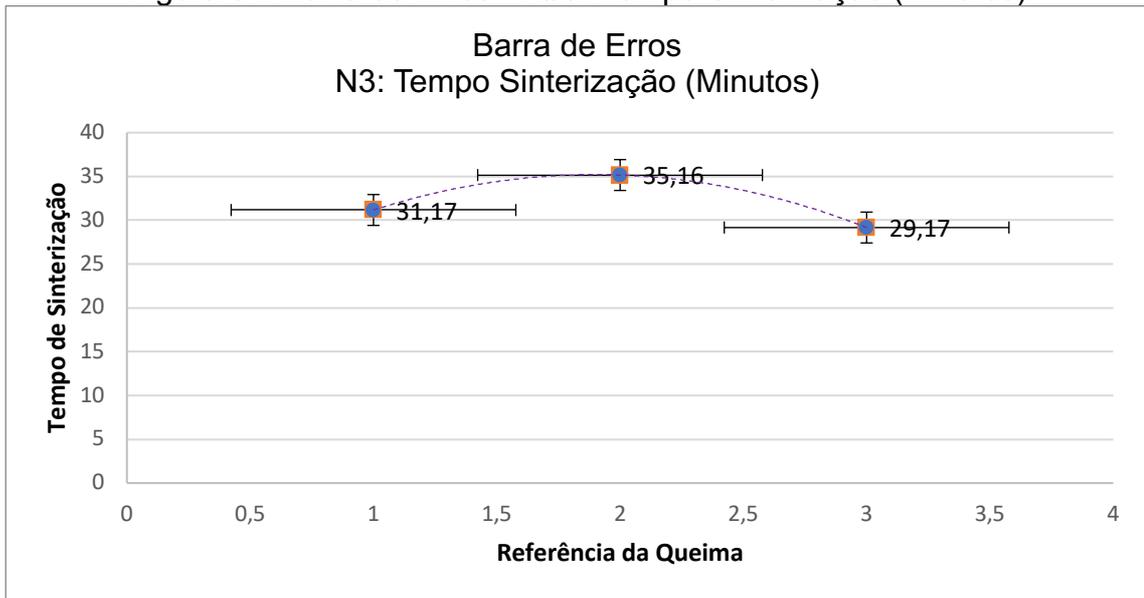
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 53: Barra de Erros - N#4: Tempo Sinterização (Minutos)



Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 54: Barra de Erros - N#3: Tempo Sinterização (Minutos)

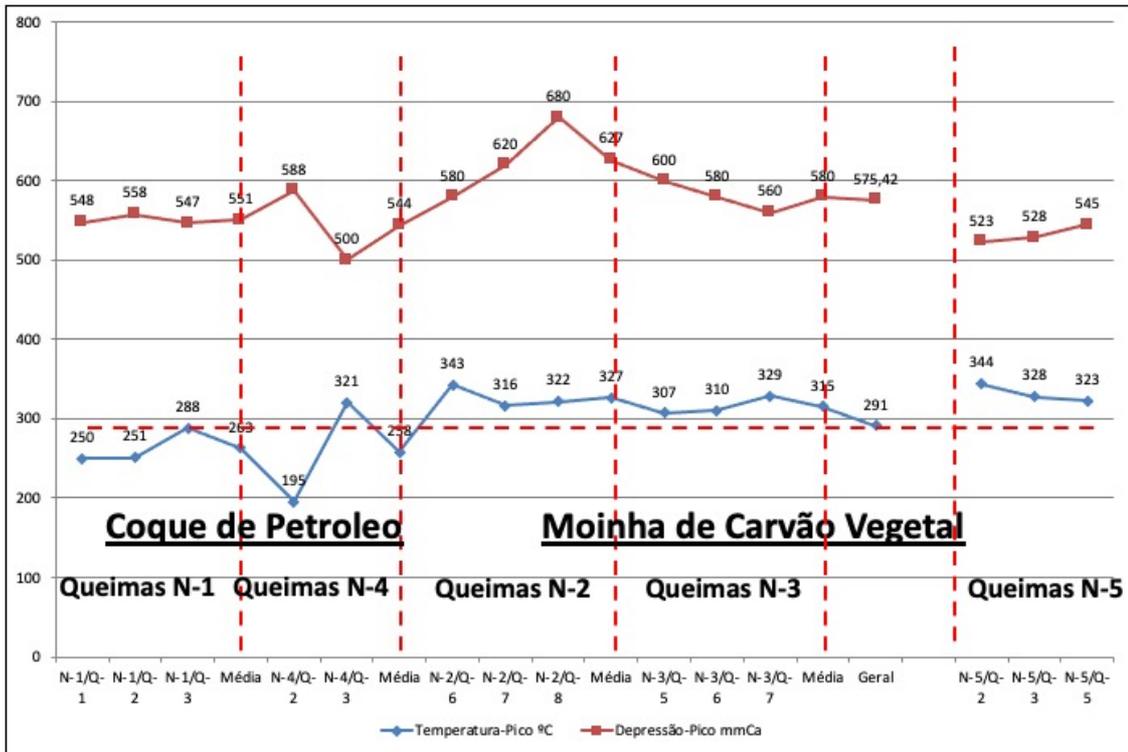


Fonte: Renan Faria, 2020

Com relação ao tempo de sinterização (figura 52) os resultados apontados nas planilhas e condensados nos gráficos apresentam uma estreita relação entre a qualidade do combustível e o tempo de sinterização.

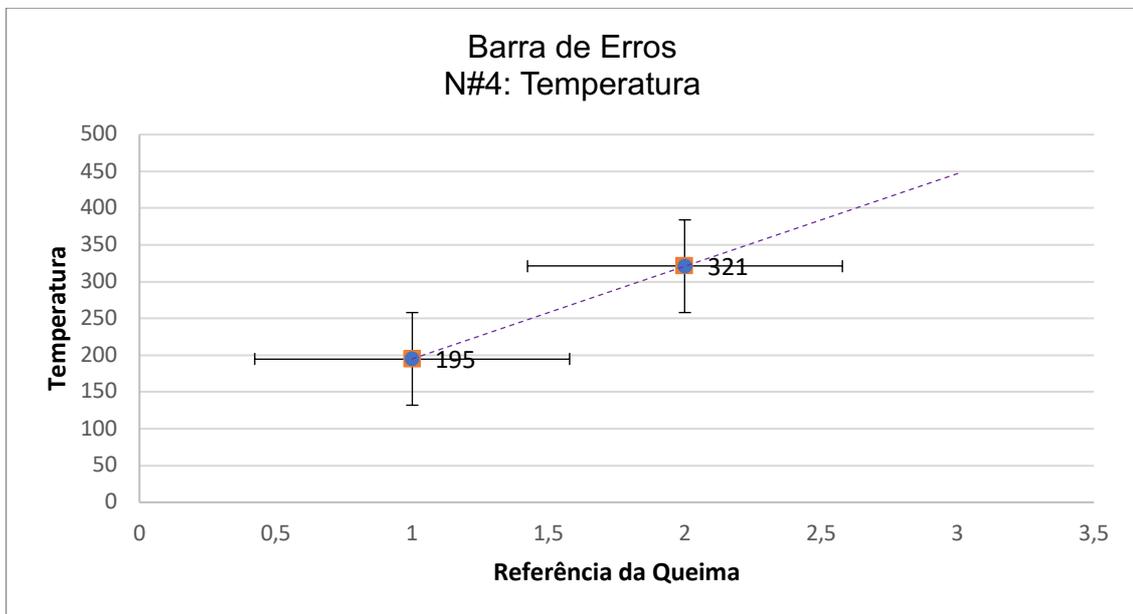
Note-se que o tempo médio de sinterização em N#4 mostra-se inferior ao tempo de sinterização em N#3. Cabe ressaltar que a morfologia do coque de petróleo e a homogeneidade de distribuição granulométrica garante uma queima de melhor qualidade e com resultados para o sinter melhor distribuídos. Como uma forma de comparação, a dispersão na granulometria da moinha de carvão vegetal e sua forma lamelar impõe uma distribuição de calor na mistura irregular. Mostra-se importante acrescentar que embora exista desnível entre os resultados das queimas em N#4, após o ajuste dos parâmetros de processo para segunda queima em N#4, obteve-se resultado esperado de menor tempo de sinterização do que o registrado em N#3.

Figura 55: Temperatura / Depressão



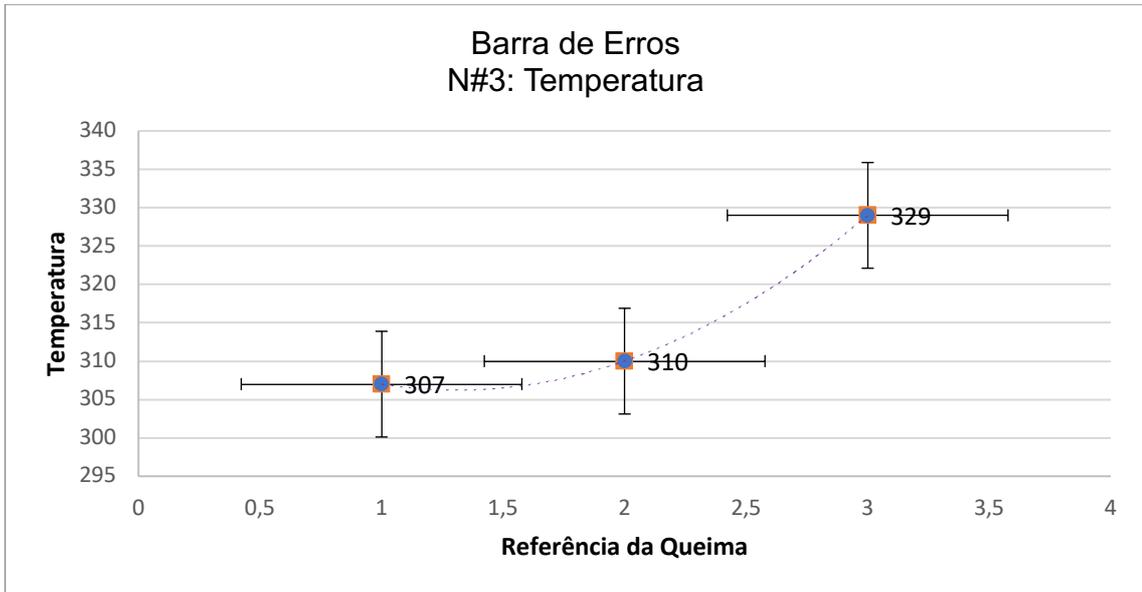
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 56: Barra de Erros - N#4: Temperatura



Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 57: Barra de Erros - N#3: Temperatura

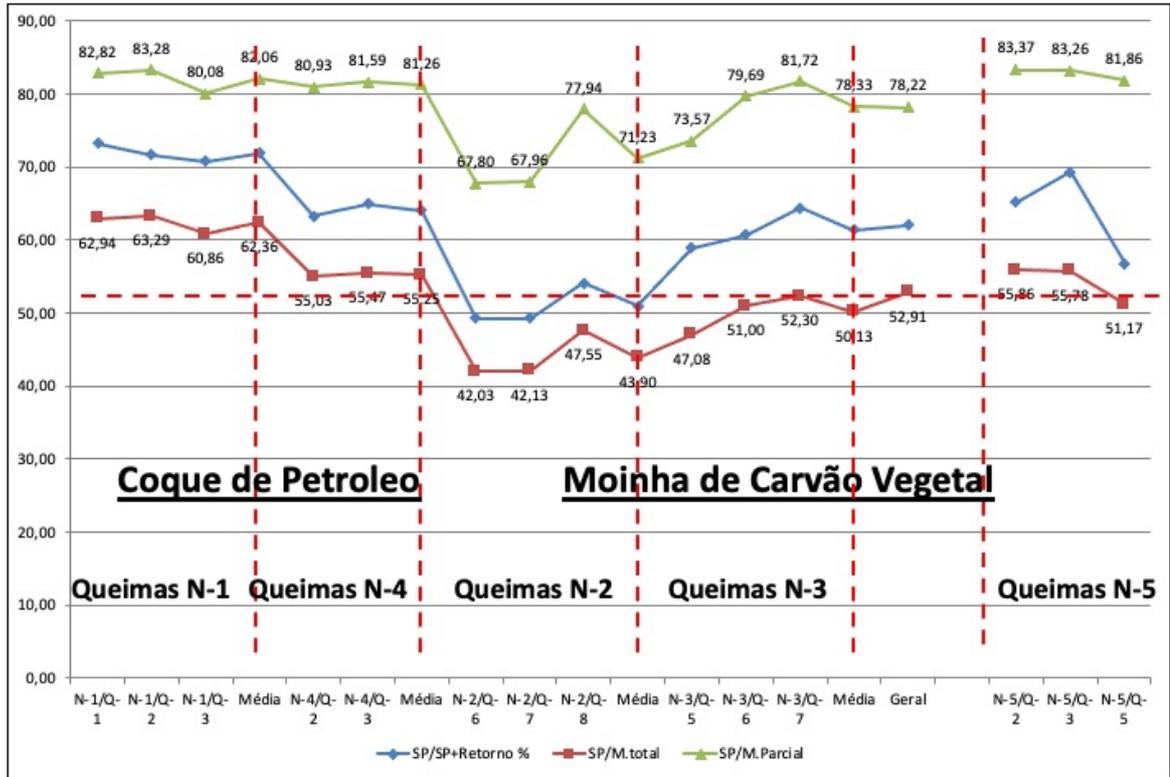


Fonte: Renan Faria, 2020

A faixa de depressão (figura 55) obtida nas várias queimas realizadas se mostra muito estável indicando uma permeabilidade média de carga previsível e relativamente homogênea. Para todas as queimas realizadas, considerando a basicidade da mistura, onde 1,8 obteve-se faixas de depressão com no máximo de 100mmca de diferença.

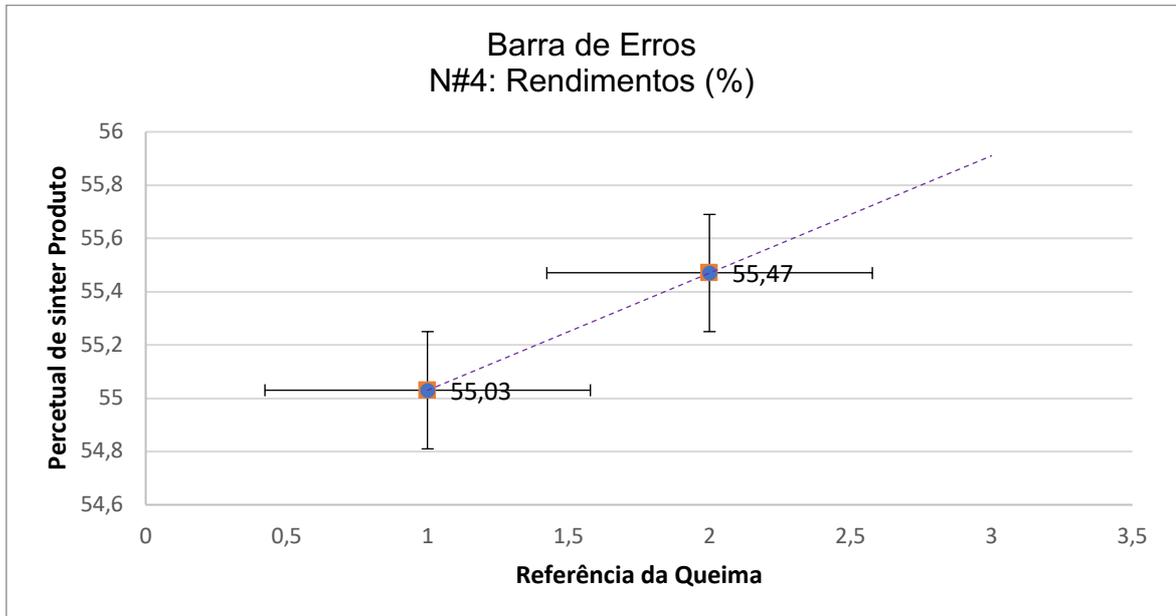
Com relação a temperatura a única discrepância relevante se apresenta na primeira queima em N#4, realizada em condições em que os parâmetros de processo ainda sem calibragem como na segunda queima N#4.

Figura 58: Rendimentos (%)



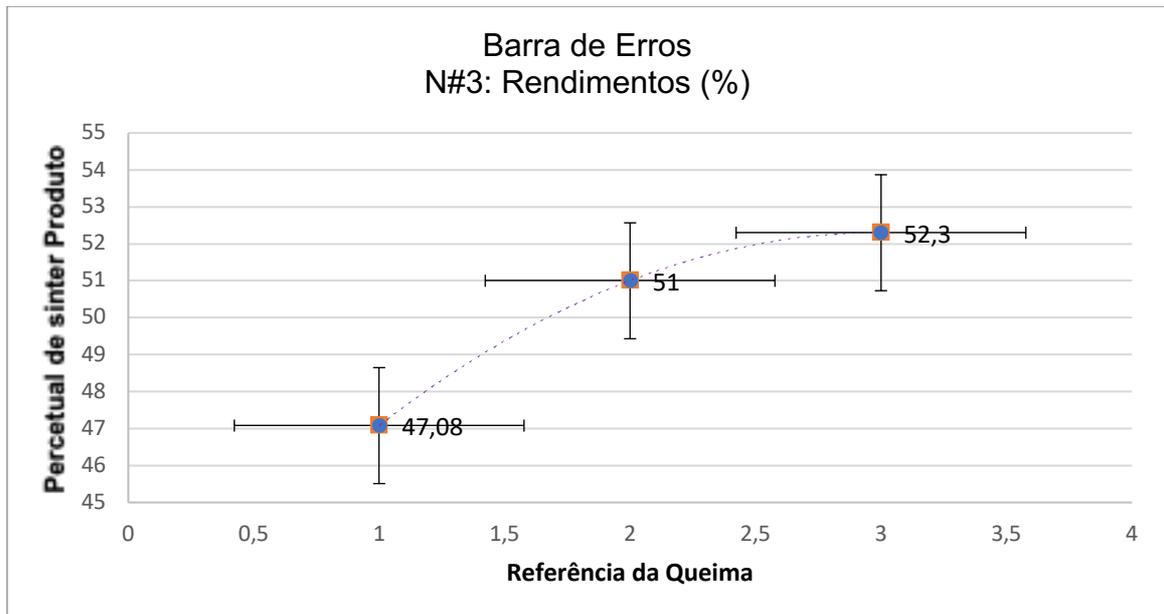
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 59: Barra de Erros - N#4: Rendimentos (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

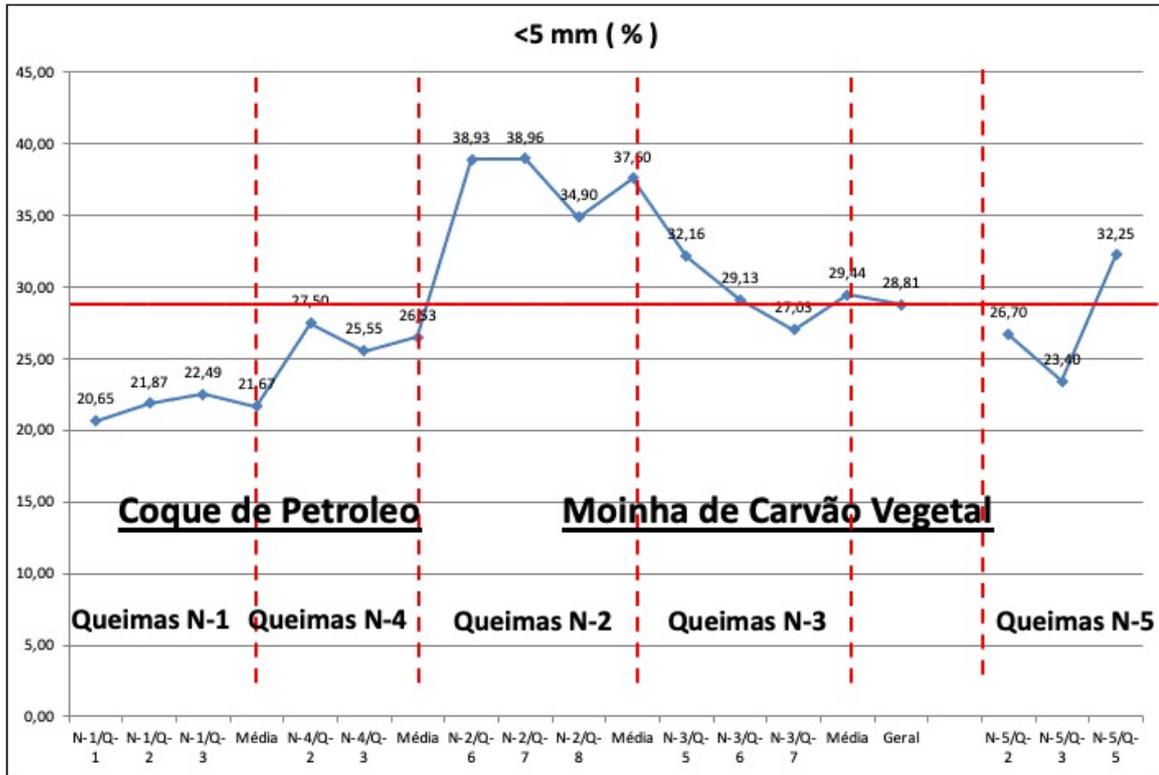
Figura 60: Barra de Erros - N#3: Rendimentos (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

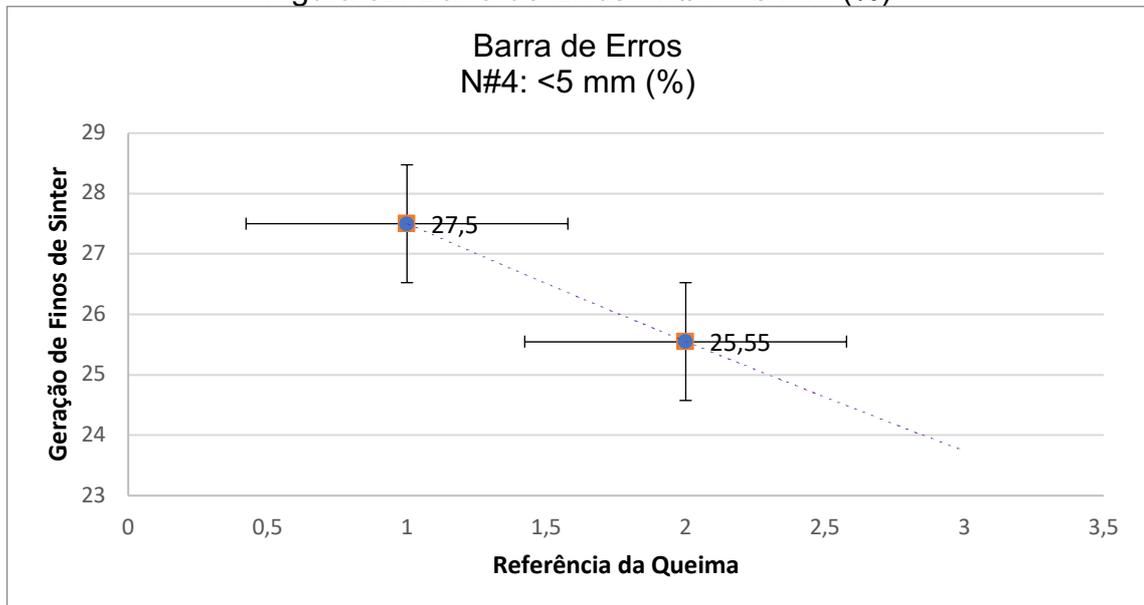
O rendimento (figura 58) utilizando-se coque de petróleo segue a tendência de garantir melhor homogeneidade de queima e melhor distribuição na carga, proporcionando um produto com melhor rendimento de massa e portanto uma produtividade melhor.

Figura 61: <5 mm (%)



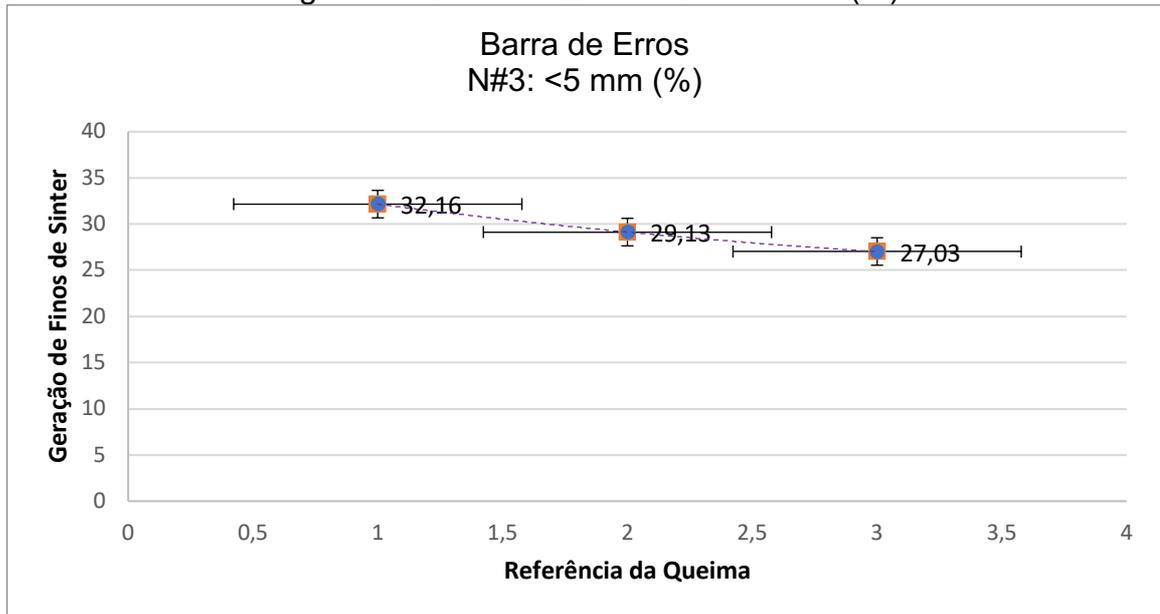
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 62: Barra de Erros - N#4: <5 mm (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

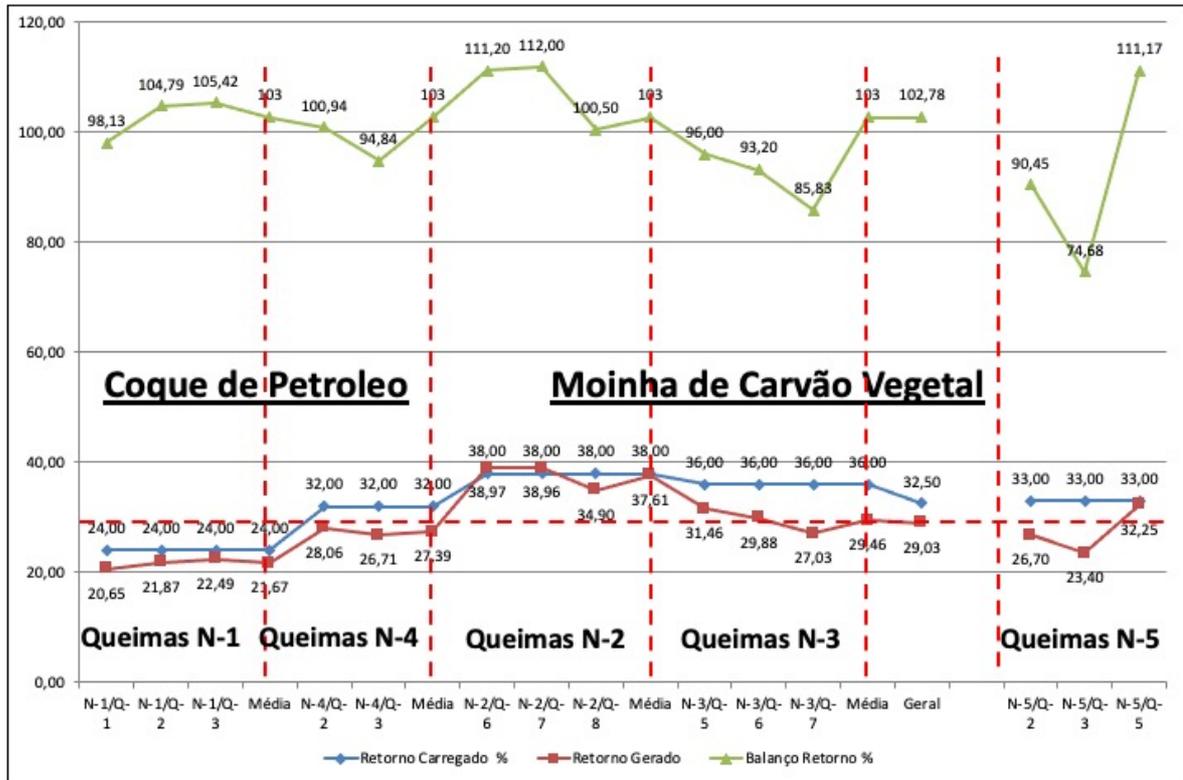
Figura 63: Barra de Erros - N#3: <5 mm (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

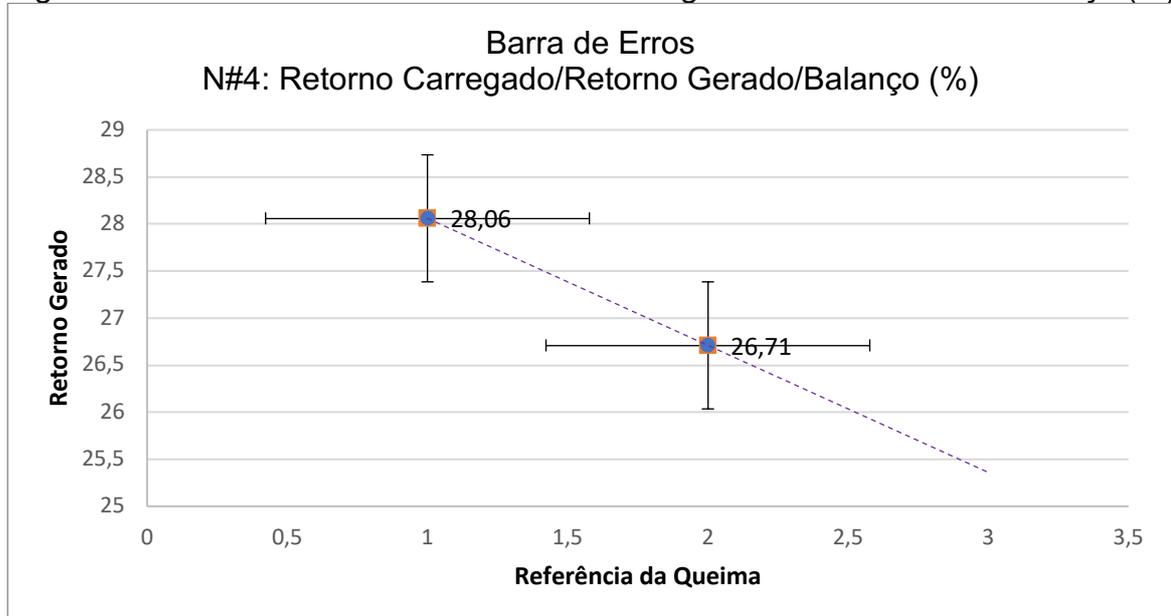
Este gráfico (figura 61) apresenta o percentual de finos gerados a baixo de 5mm e corrobora os resultados do gráfico anterior, reforçando a tendência de melhor rendimento com utilização de coque de petróleo versus moinha de carvão vegetal.

Figura 64: Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanco (%)



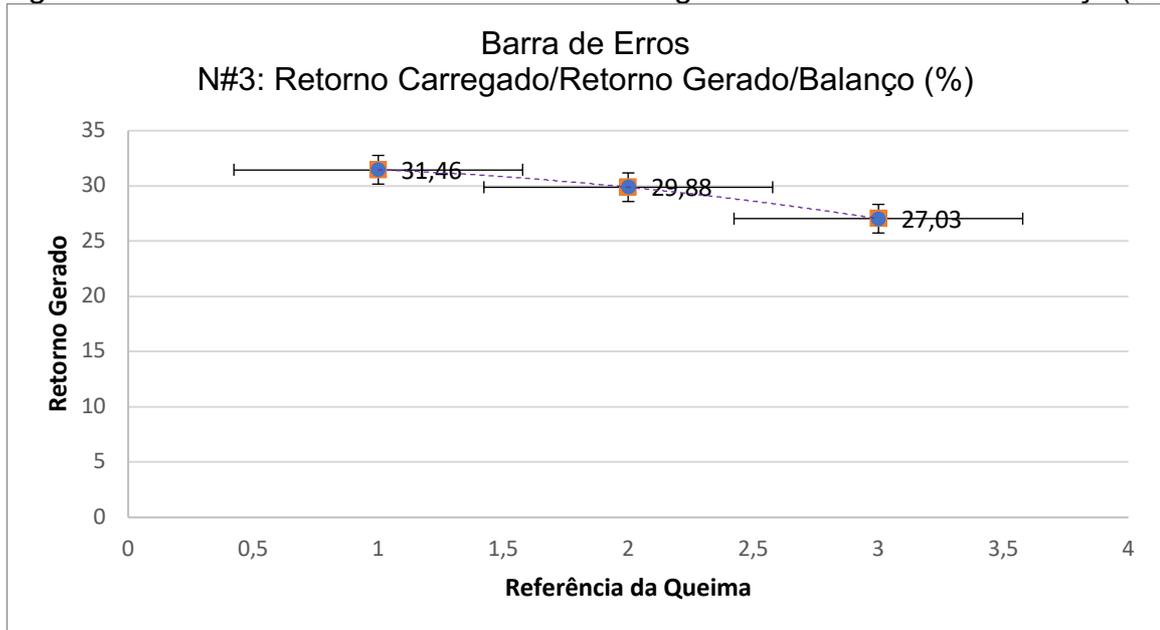
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 65: Barra de Erros - N#4: Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanco (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

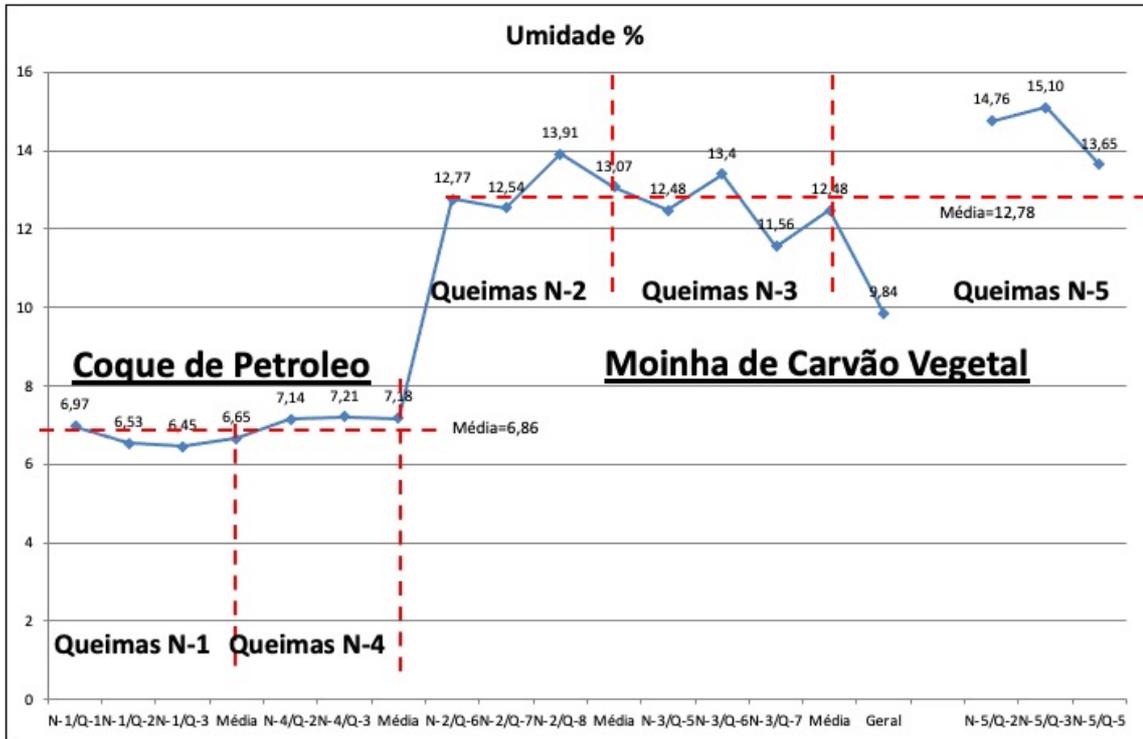
Figura 66: Barra de Erros - N#4: Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanço (%)



Fonte: Renan Faria, 2020

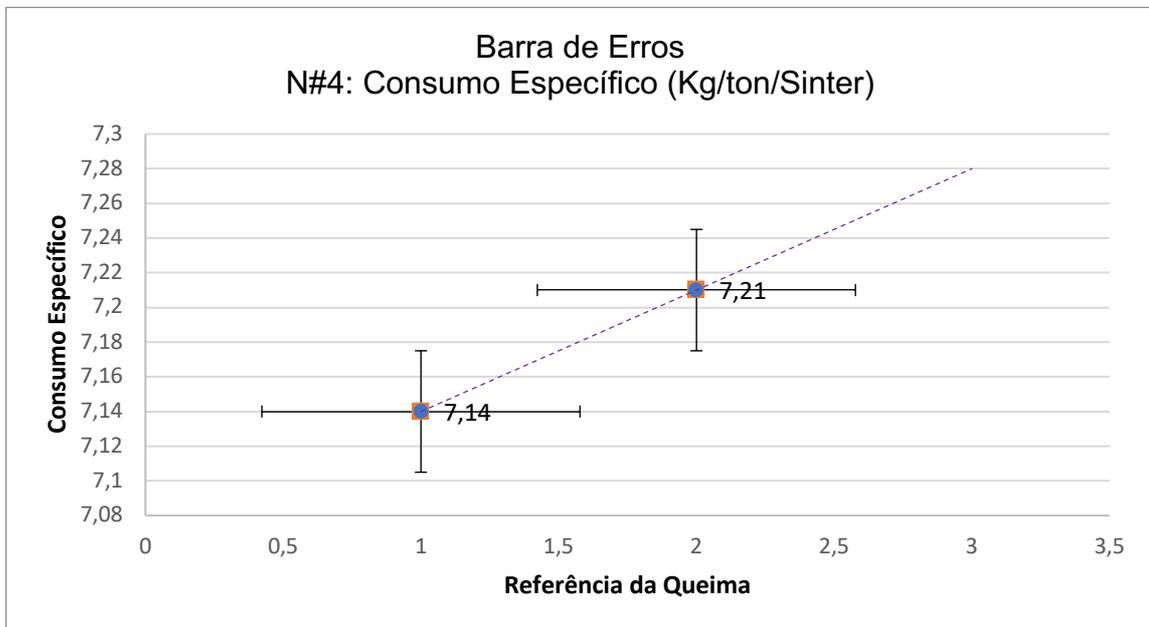
Em geral, o balanço relativo (figura 64) à utilização de finos de retorno gerados no processo, na carga, apresenta razoável estabilidade, mesmo considerando ajustes de parâmetros e experimentações realizadas a cada queima, desta forma com relação a esse quesito a utilização de coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal não apresentou vantagens comparativas.

Figura 67: Consumo Específico (Kg/ton/Sinter)



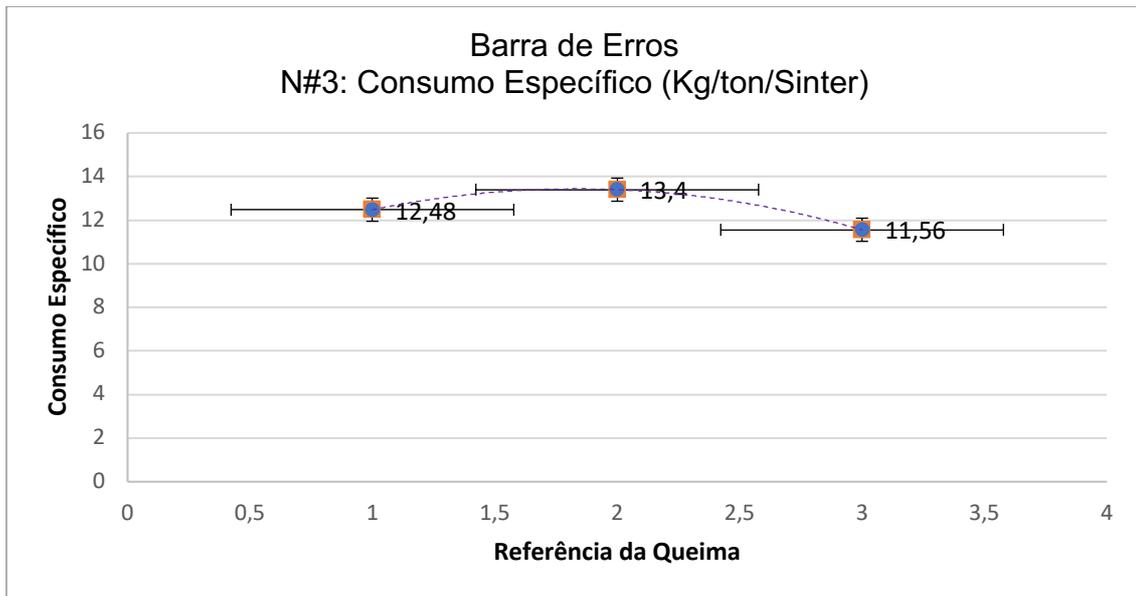
Fonte: Renan Faria, 2020

Figura 68: Barra de Erros - N#4: Consumo Específico (Kg/ton/Sinter)



Fonte: Renan Faria, 2020

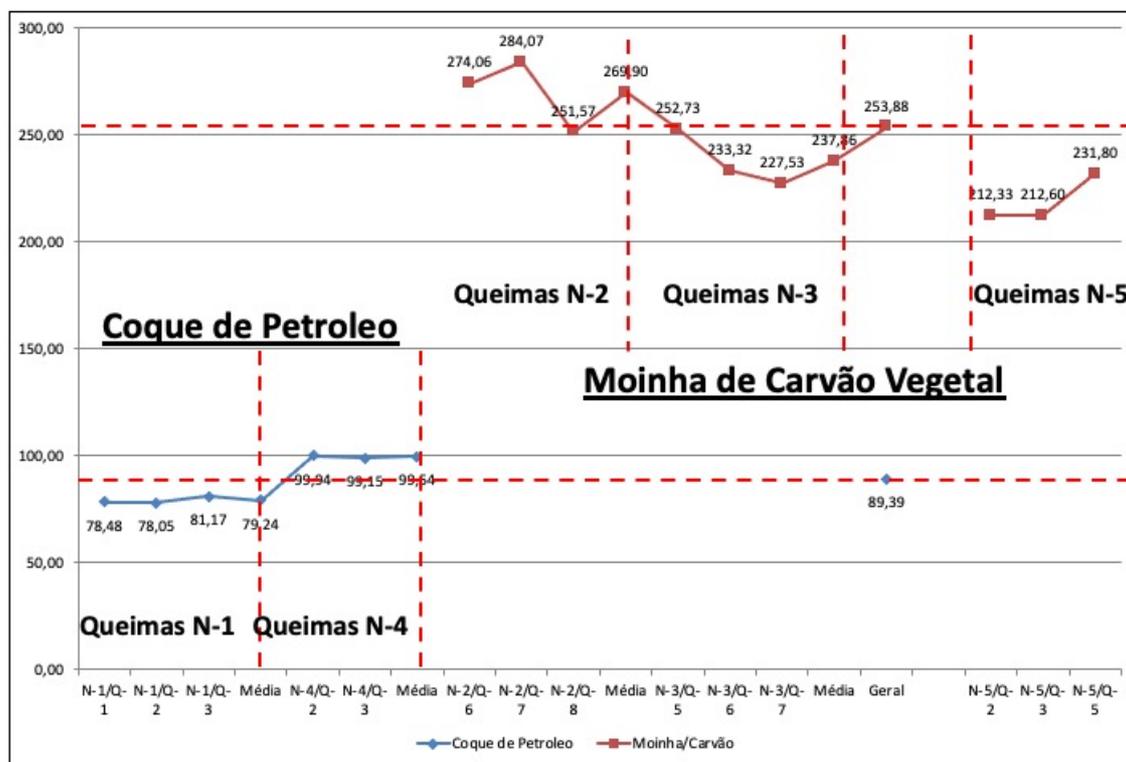
Figura 69: Barra de Erros - N#3: Consumo Específico (Kg/ton/Sinter)



Fonte: Renan Faria, 2020

Outra vantagem do coque de petróleo sobre a moinha de carvão vegetal se baseia na menor taxa de umidade que combustível agrega a mistura a ser sinterizada, ou seja, nesse quesito se mostra uma tendência ao consumo de menor quantidade de carbono fixo para garantir o atingimento das temperaturas necessárias ao processo, conforme mostrado na figura 67.

Figura 70: Tendência do consumo de coque de petróleo com relação a moinha de carvão vegetal



Fonte: Renan Faria, 2020

Este gráfico (figura 70) apresenta uma tendência esperada de menor consumo de coque de petróleo com relação a moinha de carvão vegetal, visto que, poder calorífico do coque de petróleo é superior ao da moinha de carvão vegetal, isto decorrente do maior carbono fixo do coque de petróleo. Outras vantagens decorrentes da homogeneidade da granulometria do coque e sua morfologia mais adequada, favorecem também um melhor rendimento na queima que favorece a utilização de quantidade de coque na mistura.

Foi realizado Teste de Queda:

Quadro 6: Teste de Queda

Coque Petróleo - IB=1,80	
Queimas - N/4	55,84
Carvão Vegetal - IB=1,80	
Queimas - N/3	62,22

Fonte: Renan Faria, 2020

Os testes realizados no dispositivo de shatter test para avaliação da resistência mecânica do sínter indicaram para a basicidade 1,8 uma performance superior do sínter que utilizou como combustível a moinha de carvão vegetal. Note-se que este resultado está fortemente influenciado pela primeira queima de N#4, está ainda não parametrizada e corrigida como a segunda queima de N#4. Este resultado destoa dos resultados apresentados em gráficos anteriores em que rendimentos e geração de finos apontam uma tendência de maior resistência mecânica para os sínteres produzidos utilizando como combustível o coque de petróleo. Dessa forma, entendemos que utilizando-se apenas o sínter gerado na segunda queima N#4 teríamos uma performance de resistência mecânica utilizando-se coque de petróleo em relação a moinha de carvão vegetal.

Nesta segunda sequência de testes realizados no dia 21/08/2019, foram realizados três (03) testes/queima de um leito específico calculado partir das análises fornecidas.

5. Conclusão e Considerações finais

- ✓ Considerando o conjunto de queimas desenvolvidas na planta piloto de Santa Luiza, MG, e a partir dos resultados obtidos e registrados nas planilhas específicas em anexo, pode-se concluir que a produtividade obtida com coque de petróleo quando utilizado como combustível em N#3 foi maior que em N#4 que utilizou como combustível a moinha de carvão vegetal. Cabe considerar que em função de uma das queimas em N#4 ter apontado para um resultado discrepante, a tendência no registro da produtividade segue coerente com a melhor qualidade do combustível.

- ✓ Quando se observa o quesito relativos aos tempos de sinterização registrados, os resultados registrados nas planilhas e dispostos nos gráficos, apresentam uma estreita relação entre a qualidade do combustível e o tempo de sinterização, visto que, o tempo médio de sinterização em N#4 (42,78 min) mostra-se inferior ao tempo de sinterização em N#3 (31,83 min). Cabe destacar que a morfologia existente no coque de petróleo e sua homogeneidade de distribuição granulométrica, garante uma queima qualitativamente melhor e com melhores resultados para o sinter. Como uma forma de exemplificação, a dispersão na granulometria da moinha de carvão vegetal e sua forma lamelar apontam para uma distribuição de calor na mistura irregular. Destaca-se aqui que embora exista desnível entre os resultados das queimas em N#4, após o ajuste dos parâmetros de processo para segunda queima em N#4, obteve-se resultado esperado de menor tempo de sinterização do que o registrado em N#3.

- ✓ A faixa de variação da depressão registrada nas várias queimas realizadas se mostra estável indicando uma permeabilidade média de carga, previsível e relativamente homogênea. Para todas as queimas realizadas, considerando a basicidade da mistura de 1,8, obteve-se faixas de depressão com no máximo de 100mmca de diferença.

- ✓ Com relação a variação de temperatura a discrepância relevante ficou registrada na primeira queima em N#4 (195°C/mmCa), esta queima foi realizada em condições em que os parâmetros de processo ainda se mostravam sem calibragem como na segunda queima N#4 (321°C/mmCa). Dessa forma, a utilização dos dois tipos de combustível não ocasionaram variações relevantes na queima, visto que as quantidades de cada combustível foram equilibradas de forma a garantir uma quantidade de carbono fixo equitativa para os dois casos.

- ✓ O rendimento obtido no processo de sinterização, quando da utilização do coque de petróleo segue a tendência de garantir melhor homogeneidade de queima e melhor distribuição na mistura, proporcionando um produto com melhor rendimento de massa e portanto uma produtividade melhor.

- ✓ O percentual de finos gerados após a sinterização, abaixo de 5mm, converge para os resultados apresentados para o rendimento, dessa forma, reforça-se a tendência de melhor geração de produto bitolado (sinter agregado), com utilização de coque de petróleo versus moinha de carvão vegetal.

- ✓ A partir da tendência geral, o balanço relativo à utilização de finos de retorno gerados no processo, na mistura, apresenta estabilidade, mesmo quando considera-se que foram realizados ajustes de parâmetros e experimentações no transcorrer das queima, assim sendo, com relação a esse quesito, a utilização de coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal não apresentou vantagens comparativas.

- ✓ Outra vantagem na utilização do coque de petróleo sobre a moinha de carvão vegetal, reside na menor quantidade de umidade que este combustível agrega a mistura a ser sinterizada, ou seja, mostra-se presente, uma tendência ao consumo de menor quantidade de carbono fixo para garantir a meta dos patamares de temperaturas necessárias ao processo.

- ✓ A extratificação do consumo em massa do combustível para cada mistura apresenta a tendência esperada de menor consumo de coque de petróleo com relação a moinha de carvão vegetal, visto que, o poder calorífico do coque de petróleo é superior ao da moinha de carvão vegetal, isto decorre do maior carbono fixo do coque de petróleo. Outros pontos ponteciais decorrentes da homogeneidade da granulometria do coque e sua morfologia mais adequada, favorecem também um melhor rendimento da queima que reduzem a utilização da quantidade de coque na mistura.

- ✓ Os testes realizados para cada queima no dispositivo de shatter test (teste de queda) para avaliação da resistência mecânica do sínter indicaram para a basicidade 1,8 uma performance superior do sínter que utilizou como combustível a moinha de carvão vegetal. Note-se que este resultado está fortemente influenciado pela primeira queima de N#4, esta, ainda não parametrizada e corrigida como a segunda queima de N#4. Este resultado destoa dos resultados apresentados em gráficos anteriores em que rendimentos e geração de finos apontam uma tendência de maior resistência mecânica para os sínteres produzidos utilizando como combustível o coque de petróleo. Dessa forma, entendemos que utilizando-se apenas o sínter gerado na segunda queima N#4 teríamos uma melhor performance de resistência mecânica utilizando-se coque de petróleo em relação a moinha de carvão vegetal.

6. Sugestões Futuras para trabalho

Um estudo futuro pode ser desenvolvido utilizando uma mistura de combustíveis (coque de petróleo e moinha de carvão vegetal) em proporções 60/40%, 50/50% e 40/60%. O objetivo do trabalho é buscar um ponto de equilíbrio na geração do calor necessário a sinterização na frente de queima e ajusta-lo ao um custo economicamente viável.

7. Referencias Bibliográficas

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos.** 2005.

ARAUJO, A. C., VIANA, P. R. M. **Minérios de ferro e seus métodos de concentração.** Apostila curso ABM, 2004.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro Gusa em Alto Forno.** Editora ABM, 2009.

ALMEIDA, Marys Lene Braga; MELO, Gilberto Caldeira Bandeira de. **Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Trabalhos Técnicos, 2001. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/brasil/iii-094.pdf>>. Acesso em: 04 abril 2018.

AMARAL, S.C. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento.** Tese de D.Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6215 - **Terminologia - Produtos Siderúrgicos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004 - **Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSUNÇÃO, F. C. R. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Gestão de coprodutos.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A; MUKHERJEE, T. – **Possibility of Dunite** Reisner W. & Rothe M.V. Eisenhart. **Bins and bunkers for handling bulk materials.** Trans Tech Publications, 1978, Cap 8, Treatment of Bulk Materials, pp 207 - 226.

HIGUCHI, K. et al. **Quality Improvement of Sintered Ore in Relation to Blast Furnace Operation.** Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. [S.l.], p. 41. 2006.

HONORATO, E.P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.F.S.) para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos.** Belo Horizonte. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão para sustentabilidade na mineração: 20 anos de história.** Brasil: IBRAM, 2012.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; et al. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002.

JANUZZI, Aécio. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas**. São Paulo. 2008.

JOHN, Vanderley M.; Ângulo; Sérgio Cirelli. **Metologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. Porto Alegre: ANTAC, 2009.

LEMOS, Leandro Rocha. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos. / Leandro Rocha Lemos** – Belo Horizonte: UFMG: 2015.

OLIVEIRA, D.; PINHEIRO, P.; NAPOLEÃO, A. **Metodologia para avaliar minérios para sinterização com leitos intensamente segregados**. XXXIII Seminário de Redução de Minério de Ferro, ABM, Ouro Preto, M.G, Brasil. 2003.

M, Winge. **Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos**. 2017

OLIVEIRA, Eduardo Reis de; MARTINS, Jader. **Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed minipelotizados na sinterização de minério de ferro**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto. out/dez 2003.

ROCHA, S. H. F. S. **Agglomeration of Steelmaking Residues and the Implication of its Use in Blast Furnace and Direct Reduction Processes**. In: METEC InSteelCon International Steel Conference on New Developments in Metallurgical Process Technologies. Düsseldorf, Germany, 2007.

LEMOS, Leandro Rocha. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos./ Leandro Rocha Lemos** – Belo Horizonte: UFMG: 2015.

LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transportes**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). **Introdução à siderurgia**. São Paulo, ABM, 2011.

OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, T. – **Development of Coating Granulation Sintering Process for Improving Productivity and Reducibility**. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm – Swiden – Second Volumew, Tu 9: 1 16, june 2005.

Brasil, **Ministério de Minas e Energia**, Plano Nacional de Mineração 2030 - Brasília: MME, 2010

Curso de Mineração Básico – Vale, 2009

FERNANDES, F. R. C; SOUZA, V, L, E, S; FREITAS, T, P, R, **Centro de Tecnologia Mineral -Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral** - Rio de Janeiro, 2007

GUIMARÃES, M. L. V; TOLEDO, J. P; FARIA, C. A - **Estimativa e Monitoramento das Reservas de Minério de Ferro do Sistema Sul – CVRD - Quadrilátero Ferrífero – MG – Brasil Miningsite**, 2008

MOURÃO, J, M; **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico** - NT Minério de Ferro e Pelotas - Situação Atual e Tendências 2025, 2008

SAMPAIO, J. A; JULIANELLI, K. M; PENNA, M, T, M – **Ferro – Mina N5 – Carajás/CVRD – Rio de Janeiro**, 2002

QUARESMA, L. F - **Ferro e Aço**. Sumário Mineral. (Ed.) DNPM – Departamento Nacional de Pesquisas Mineraias. 22ª Ed. 64-67, 2002.

Edson Luiz M. Harano, **Brazilian Iron Ores Sintering: Present Status and Challenges for the Future**, no 43º Seminário de Redução da ABM em 2013.

Ludivine Piezanowski, **Vertical intensive mixing for processing finer iron ore in sinter plant**, apresentado no no 44º Seminário de Redução da ABM em 2014.

Fabiana Fonseca de Moraes, **Produção de sinter a partir de resíduos siderúrgicos**, apresentado no 44º Seminário de Redução da ABM em 2014.

Lucy Tahehara, Tese de Doutorado, **Caracterização Geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – Fração Sinter feed**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004

Ana Rita de Almeida Ribeiro Starling, dissertação de mestrado, **Avaliação de metodologia de simulação física do processo de sinterização**, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012

ÇAMCI, L.; AYDIM, S.; ARSLAN, C. Reduction of iron oxides in solid wastes generated by steel works. **Turkish Journal of engineering and environment science**. 2002. p.37-44.

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os Altos-Fornos**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), MG, 2010.

PEREIRA, H. C. **Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellet feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em**

uma mistura de sinterização. Dissertação (mestrado) apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2004.

REIS, W. L. C. **Otimização da reciclagem de resíduos siderúrgicos por redução carbotérmica.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, SP, 2008.

PIMENTA, H. P; CAMILO, G; MAGALHÃES, J. R.– **Otimização das Propriedades do Sínter a Altas Temperaturas.** Relatório Interno do Centro de Pesquisa da USIMINAS (RPPR1348), dezembro 2002, Ipatinga, M.G

DUARTE, Adailson da Silva. **Síntese e Caracterização de Sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica.** UniFOA. Volta Redonda, 2016.

LEMOS, Leandro Rocha. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos.** – Belo Horizonte: UFMG: 2015.

LOBATO, Natália Cristina Candian. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica.** Belo Horizonte: Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas a Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <<http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2182M.PDF>>.

ANEXOS

QUEIMAS N-3 (Moinha de Carvão Vegetal)=IB-1,80



ACOMPANHAMENTO DE TESTE NA SINTERIZAÇÃO PILOTO

VALIDADA

CLIENTE: BEMISA

DATA: 03/12/2019

MATERIAL: Sinter Feed Baratinha / Moinha de Carvão IB= 1,80

N - 3

Queima - 5

Alimentação Total(Kg)	100				
Matérias Primas	M.Total %	M. Parcial %	Peso seco Kg	Umidade %	Peso umido Kg
S / Feed Baratinha	37,71	58,92	37,71	4,41	39,450
FSD	6,40	10,00	6,40	0,00	6,400
Dolomita	1,64	2,56	1,64	4,15	1,711
Calcario	6,35	9,92	6,35	4,73	6,665
Coque de Petroleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
Moinha/Carvão	11,90	18,59	11,90	10,63	13,315
Retorno	36,00	0,00	36,00	0,00	36,000
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
TOTAL	100,00	100,00	100,00	Média 3,99	103,541

0,9601 104,152

Umidade Visada (%)	14,90
Umidade Real (%)	12,48

Então: 0,8510
Mistura Total Úmida 117,509

Água a ser adicionada	13,967
	0,200 =>Perda na Betoneira
	14,167
	17,71 ==>% de água na MT.

Retorno + FSD	42,400	
>5mm=15%	6,360	
<5mm=85%	36,040	

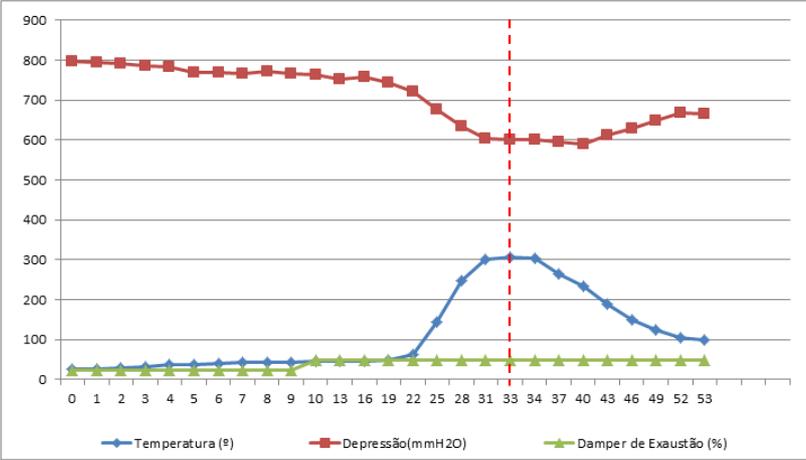
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	segundos	1,83

Mistura Úmida Total Carregada (Kg)	117,350
------------------------------------	---------

Produtividade	ton./m²/Dia	11,38
---------------	-------------	-------

Alimentação Total(Kg)	100
-----------------------	-----

Evolução (Minuto)	Damper de Exaustão (%)	Temperatura a (°)	Depressão(mmH2O)
0	25	26	796
1	25	26	795
2	25	30	793
3	25	33	786
4	25	37	782
5	25	39	769
6	25	40	770
7	25	42	766
8	25	43	772
9	25	44	765
10	50	45	764
13	50	47	752
16	50	47	759
19	50	48	745
22	50	64	722
25	50	145	677
28	50	248	636
31	50	300	604
PICO 33	50	307	600
34	50	303	601
37	50	265	595
40	50	234	591
43	50	189	613
46	50	151	630
49	50	125	650
52	50	104	669
53	50	100	665



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	8.250	8.90
>25	13.800	14.89
>10	22.850	24.66
>5	18.600	20.08
<5	29.150	31.46
	92,650	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno	62,55	
SP/M.total	56,43	
SP/M.Parcial	88,17	

Balanco	96,0
----------------	-------------

Sinter Produto(Kg)	57,954
--------------------	--------



ACOMPANHAMENTO DE TESTE NA SINTERIZAÇÃO PILOTO.

CLIENTE BEMISA

N - 3

DATA 03/12/2019

Queima - 6

VALIDADA

MATERIAL Sinter Feed Baratinha / Moinha de Carvão IB= 1,80

Alimentação Total(Kg)	100				
	M. Total %	M. Parcial %	Peso seco Kg	Umidade %	Peso umido Kg
Matérias Primas					
S / Feed Baratinha	37,71	58,92	37,71	4,41	39,450
FSD	6,40	10,00	6,40	0,00	6,400
Dolomita	1,64	2,56	1,64	4,15	1,711
Calcario	6,35	9,92	6,35	4,73	6,665
Coque de Petroleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
Moinha/Carvão	11,90	18,59	11,90	10,63	13,315
Retorno	36,00	0,00	36,00	0,00	36,000
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
TOTAL	100,00	100,00	100,00	Média 3,99	103,541
				0,9601	104,152

DADOS do PROCESSO

Altura da camada Total	mm	480
Altura da camada de Bedding	mm	40
Altura da camada de Bedding	Kg	10,000
Altura da Borda	mm	100
Altura da camada de Mistura	mm	340
Contração do Bolo	mm	160

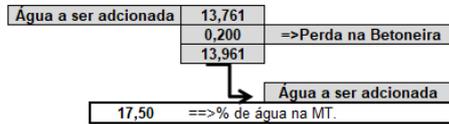
Volume de Água adicionada	Kg	13,961
% Água na M.Total	%	17,50

Tempo de Misturamento	minutos	7,00
Tempo de Micropelotização	minutos	7,00
TOTAL		14,00

Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	segundos	1,83

Mistura Úmida Total Carregada (Kg)		115,650
------------------------------------	--	---------

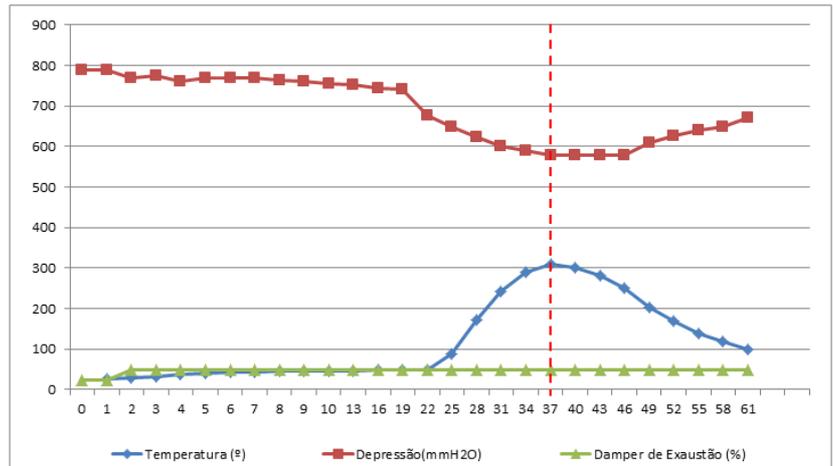
Umidade Visada (%)	14,75
Umidade Real (%)	13,40
Então:	0,8525
Mistura Total Úmida	117,302



Retorno + FSD		
42,400	>5mm=15%	6,360
	<5mm=85%	36,040

Produtividade	ton./m²/Dia	10,56
---------------	-------------	-------

Evolução (Minuto)	Damper de Exaustão (%)	Temperatura (°)	Depressão (mmH2O)
0	25		790
1	25	27	790
2	50	28	770
3	50	33	775
4	50	38	760
5	50	41	770
6	50	42	770
7	50	43	768
8	50	45	763
9	50	45	760
10	50	46	756
13	50	46	751
16	50	48	745
19	50	48	740
22	50	49	678
25	50	89	650
28	50	173	624
31	50	242	600
34	50	291	590
(PICO) 37	50	310	580
40	50	302	580
43	50	281	580
46	50	250	580
49	50	202	610
52	50	169	625
55	50	139	640
58	50	120	650
61	50	100	670



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	12,750	13,54
>25	14,100	14,97
>10	20,850	22,13
>5	18,350	19,48
<5	28,150	29,88
	94,200	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		64,38
SP/M.Total		60,55
SP/M.Parcial		94,61

Balanco	93,2
---------	------

Sinter Produto(Kg)	60,642
--------------------	--------



ACOMPANHAMENTO DE TESTE NA SINTERIZAÇÃO PILOTO

CLIENTE BEMISA

N - 3

VALIDADA

DATA 04/12/2019

Queima - 7

MATERIAL Sinter Feed Baratinha / Moinha de Carvão IB= 1,80

Alimentação Total(Kg)	100				
	M.Total %	M. Parcial %	Peso seco Kg	Umidade %	Peso umido Kg
Matérias Primas					
S / Feed Baratinha	37,71	58,92	37,71	4,41	39,450
FSD	6,40	10,00	6,40	0,00	6,400
Dolomita	1,64	2,56	1,64	4,15	1,711
Calcario	6,35	9,92	6,35	4,73	6,665
Coque de Petroleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
Moinha/Carvão	11,90	18,59	11,90	10,63	13,315
Retorno	36,00	0,00	36,00	0,00	36,000
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
TOTAL	100,00	100,00	100,00	Média 3,99	103,541
				0,9601	104,152

DADOS do PROCESSO

Altura da camada Total	mm	480
Altura da camada de Bedding	mm	40
Altura da camada de Bedding	Kg	10,000
Altura da Borda	mm	100
Altura da camada de Mistura	mm	340
Contração do Bolo	mm	120

Volume de Água adicionada	Kg	13,892
% Água na M.Total	%	17,43

Tempo de Misturamento	minutos	7,00
Tempo de Micropelotização	minutos	7,00
TOTAL		14,00

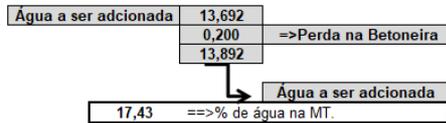
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	segundos	1,83

Mistura Úmida Total Carregada (Kg) 117,500

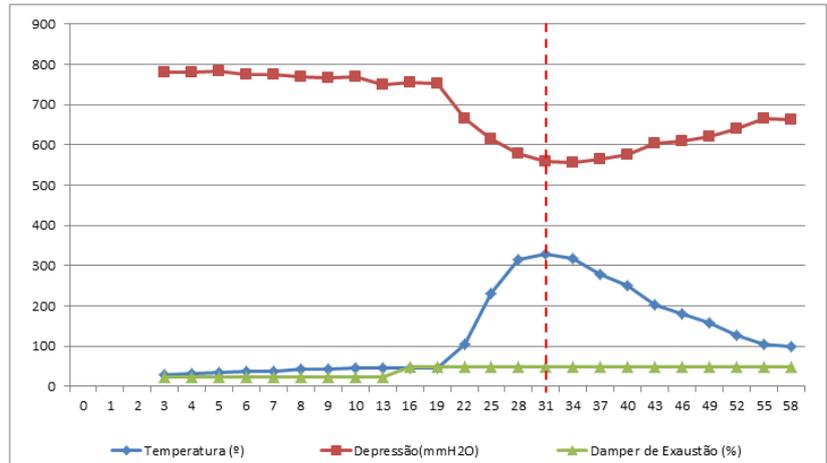
Umidade Visada (%)	14,70
Umidade Real (%)	11,56
Então:	0,8530
Mistura Total Úmida	117,233

Retorno + FSD		
42,400	>5mm=15%	6,360
	<5mm=85%	36,040

Produtividade ton./m²/Dia 13,27



Evolução (Minuto)	Damper de Exaustão (%)	Temperatura (°)	Depressão (mmH2O)
0			
1			
2			
3	25	29	780
4	25	31	780
5	25	35	784
6	25	37	776
7	25	39	776
8	25	42	770
9	25	44	765
10	25	45	768
13	25	46	750
16	50	47	755
19	50	47	752
22	50	105	665
25	50	230	615
28	50	316	579
PICO 31	50	329	560
34	50	319	557
37	50	280	565
40	50	250	577
43	50	202	603
46	50	180	610
49	50	158	620
52	50	126	640
55	50	104	665
58	50	100	664



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	12,800	13,57
>25	13,100	13,88
>10	24,350	25,81
>5	18,600	19,71
<5	25,500	27,03
	94,350	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		67,03
SP/M.total		60,85
SP/M.Parcial		95,09
Balanco		85,83

Sinter Produto(Kg) 63,238

QUEIMAS N-4 (Coque de Petroleo)=IB-1,80



ACOMPANHAMENTO DE TESTE NA SINTERIZAÇÃO PILOTO

CLIENTE BEMISA

N - 4

DATA 05/12/2019

Queima - 2

VALIDADA

MATERIAL Sinter Feed Baratinha /COQUE de PETROLEO IB= 1,80

Alimentação Total(Kg)					
	M.Total %	M. Parcial %	Peso seco Kg	Umidade %	Peso umido Kg
Matérias Primas					
S / Feed Baratinha	46,00	67,65	46,00	4,41	48,12
FSD	7,60	11,18	7,60	0,00	7,60
Dolomita	1,90	2,79	1,90	4,15	1,98
Calcario	7,00	10,29	7,00	4,73	7,35
Coque de Petroleo	5,50	8,09	5,50	8,57	6,02
Moinha/Carvão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Retorno	32,00	0,00	32,00	0,00	32,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	100,00	100,00	100,00	3,12	103,068
				0,9688	103,224

DADOS do PROCESSO

Altura da camada Total	mm	480
Altura da camada de Bedding	mm	40
Altura da camada de Bedding	Kg	10,000
Altura da Borda	mm	220
Altura da camada de Mistura	mm	220
Contração do Bolo	mm	250

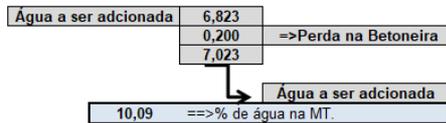
Volume de Água adicionada	Kg	7,023
% Água M.Total	%	10,09

Tempo de Misturamento	minutos	7,00
Tempo de Micropelotização	minutos	7,00
TOTAL		14,00

Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	segundos	1,65

Mistura Úmida Total Carregada (Kg) 108,890

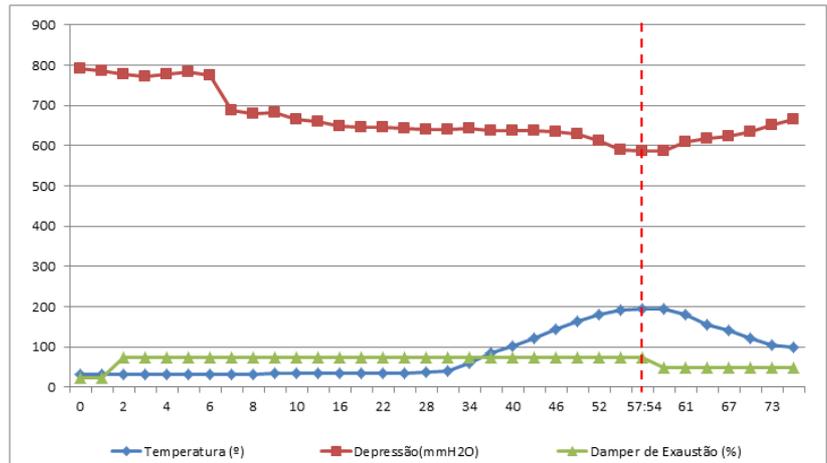
Umidade Visada (%)	9,00
Umidade Real-Estufa (%)	7,14
Então:	0,9100
Mistura Total Umida	109,890



Retorno + FSD	39,600	>5mm=15%	5,940
		<5mm=85%	33,660

Produtividade ton./m²/Dia 7,14

Evolução (Minuto)	Damper de Exaustão (%)	Temperatura (°)	Depressão(mmH2O)
0	25	32	792
1	25	32	787
2	75	31	777
3	75	31	772
4	75	31	778
5	75	31	782
6	75	31	774
7	75	32	689
8	75	33	679
9	75	34	681
10	75	35	665
13	75	35	660
16	75	35	650
19	75	35	645
22	75	35	645
25	75	36	644
28	75	37	639
31	75	41	640
34	75	61	642
37	75	85	638
40	75	102	638
43	75	122	637
46	75	143	635
49	75	163	628
52	75	181	612
55	75	193	589
PICO 57:54	75	195	588
58	50	194	588
61	50	182	610
64	50	155	617
67	50	140	624
70	50	122	635
73	50	105	651
76	50	100	665



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	23,700	24,18
>25	17,500	17,86
>12	18,550	18,93
>5	10,750	10,97
<5	27,500	28,06
	98,000	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		66,99
SP/M.total		64,92
SP/M.Parcial		95,47
Balço		100,94

Sinter Produto(Kg) 65,646



ACOMPANHAMENTO DE TESTE NA SINTERIZAÇÃO PILOTO

CLIENTE **BEMISA**

N - 4

VALIDADA

DATA **05/12/2019**

Queima - 3

MATERIAL **Sinter Feed Baratinha /COQUE de PETROLEO** **IB= 1,80**

Alimentação Total(Kg)	100				
	M.Total %	M. Parcial %	Peso seco Kg	Umidade %	Peso umido Kg
Matérias Primas					
S / Feed Baratinha	46,00	67,65	46,00	4,41	48,12
FSD	7,60	11,18	7,60	0,00	7,60
Dolomita	1,90	2,79	1,90	4,15	1,98
Calcario	7,00	10,29	7,00	4,73	7,35
Coque de Petroleo	5,50	8,09	5,50	8,57	6,02
Moinha/Carvão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Retorno	32,00	0,00	32,00	0,00	32,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	100,00	100,00	100,00	Média 3,12	103,068

DADOS do PROCESSO

Altura da camada Total	mm	480
Altura da camada de Bedding	mm	40
Altura da camada de Bedding	Kg	10,000
Altura da Borda	mm	210
Altura da camada de Mistura	mm	230
Contração do Bolo	mm	240

Volume de Água adicionada	Kg	7,023
% Água M.Total	%	10,09

Tempo de Misturamento	minutos	7,00
Tempo de Micropelotização	minutos	7,00
TOTAL		14,00

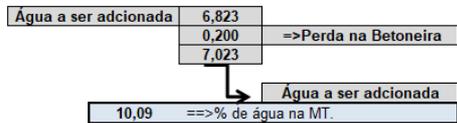
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	segundos	1,78

Mistura Úmida Total Carregada (Kg) **108,000**

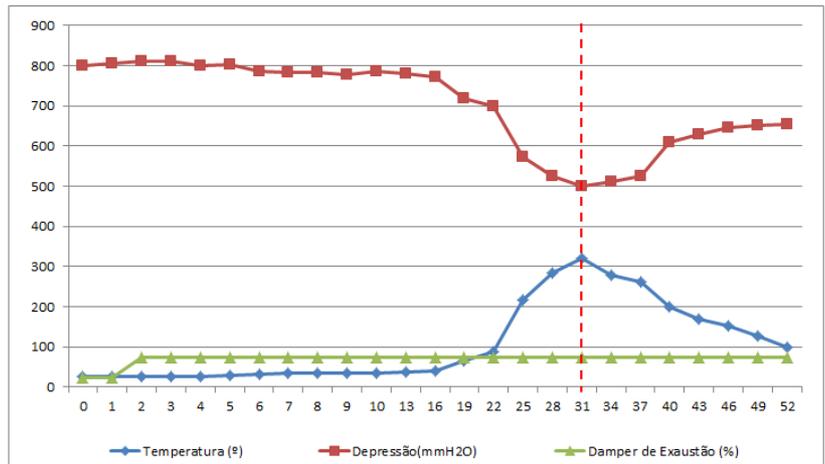
Umidade Visada (%)	9,00
Umidade Real-Estufa (%)	7,21
Então:	0,9100
Mistura Total Úmida	109,890

Retorno + FSD	39,600
>5mm=15%	5,940
<5mm=85%	33,660

Produtividade **ton./m²/Dia 13,68**



Evolução (Minuto)	Damper de Exaustão (%)	Temperatura (°)	Depressão(m mH2O)
0	25	26	800
1	25	26	805
2	75	26	811
3	75	26	810
4	75	27	800
5	75	29	803
6	75	32	786
7	75	34	783
8	75	35	783
9	75	36	778
10	75	36	787
13	75	38	781
16	75	40	772
19	75	65	719
22	75	89	700
25	75	218	574
28	75	284	524
PICO 31	75	321	500
34	75	280	510
37	75	261	525
40	75	200	610
43	75	170	630
46	75	153	645
49	75	128	651
52	75	100	655



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	14.600	15,26
>25	15.050	15,73
>12	25.300	26,45
>5	15.150	15,84
<5	25.550	26,71
TOTAL	95,650	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		68,26
SP/M.total		65,15
SP/M.Parcial		95,81
Balanco		94,84

Sinter Produto(Kg) **65,290**

Relatório de análise

Relatório de Análises												RE-032 VER-00 DATA:26/04/2019	
Informações das Análises													
Tipo	ID Amostra	Fe	Si ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P	Mn	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	PPC	H ₂ O
SMP	AMOSTRA PARA SINTER	64,86	4,28	0,84	0,093	0,15	0,86	0,66	0,04	0,30	0,10	-0,30	2,00
DUP	AMOSTRA PARA SINTER	64,46	4,46	0,82	0,104	0,14	0,86	0,64	0,00	0,30	0,11		
STD	MRC 065	66,31	3,52	0,86	0,066	0,28	0,72	0,12	0,04	0,10	0,11		
		65,21	4,09	0,84	0,087	0,19	0,81	0,47				0,30	
Métodos de Análise													
Elementos Fe, SiO ₃ , Al ₂ O ₃ , P, Mn, MgO, CaO, K ₂ O, Na ₂ O, TiO ₂ - Fusão e Leitura em XRF, PPC - Método Convencional via Forno Mufla, H ₂ O - Secagem em estufa ou chapa.													
Análise Granulométrica													
Tipo	ID Amostra	Resultados											
		9,5	6,35	1	0,7	0,5	0,15	0,106	<0,106				
DRI	AMOSTRA PARA SINTER	0,00	1,09	17,45	17,45	17,64	42,55	2,18	1,64				
Legenda													
SMP	Amostra	Observação											
DUP	Duplicata Química												
REP	Replicata Química												
STD	Padrão de Acompanhamento												
DRI	Geanulometria por Peneiramento												
PPC	Calcinação a 1000C por 1 hora												
H ₂ O	Determinação de Umidade												
Limites de Quantificação													
L.D		Fe	Si ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P	Mn	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂		
		0,01	0,08	0,08	0,08	0,01	0,15	0,01	0,01	0,15	0,01		
Mina Horto Baratinha - Estrada de acesso a São Joaquim da Bocaina s/n - Fazenda Horto Baratinha - Antônio Dias - MG													

Fonte: Renan Faria, 2020

Queimas e parâmetros de Processo

THI METALURGIA		Coque Petroleo - IB=1,40				Coque Petroleo - IB=1,80				Carvão Vegetal - IB=1,40				Carvão Vegetal - IB=1,80				Média Geral	Carvão Vegetal - IB=1,40		
		Queimas - N / 1				Queimas - N / 4				Queimas - N / 2				Queimas - N / 3					Queimas - N / 5		
		N-1/Q-1	N-1/Q-2	N-1/Q-3	Média	N-4/Q-2	N-4/Q-3	Média	N-2/Q-6	N-2/Q-7	N-2/Q-8	Média	N-3/Q-5	N-3/Q-6	N-3/Q-7	Média		N-5/Q-2	N-5/Q-3	N-5/Q-5	
Sinter Produto	Kg	64,130	64,200	61,970	190,300	55,650	55,590	111,240	41,800	42,160	46,310	130,270	48,360	51,080	54,350	153,790	146,40	59,990	61,380	58,010	
Produtividade	ton./m³/Dia	11,82	14,62	12,49	12,98	6,05	11,65	8,85	6,87	6,26	8,71	7,28	9,50	8,89	11,41	9,93	9,76	10,78	12,79	10,12	
Mistura Seca Carregada	Kg	101,886	101,434	101,829	305,15	101,120	100,210	201,33	99,442	100,054	97,411	296,91	102,705	100,153	103,917	306,78	277,54	107,400	110,030	113,378	
Rendimento SP/M.Total	%	62,94	63,29	60,86	62,36	55,03	55,47	55,25	42,03	42,14	47,54	43,88	47,09	51,00	52,30	50,13	52,91	55,86	55,78	51,17	
Tempo de Ignição	segundos	1,50	1,73	1,52	1,58	1,65	1,78	1,72	1,77	1,80	1,43	1,67	1,83	1,83	1,83	1,83	1,70	1,61	1,60	1,50	
Tempo Sinterização	Minutos	33,23	26,88	30,37	30,16	56,33	29,22	42,78	37,23	41,20	32,56	37,00	31,17	35,16	29,17	31,83	35,44	34,06	29,28	35,10	
Temperatura-Pico	°C	250	251	288	263	195	321	258	343	316	322	327	307	310	329	315	291	344	328	323	
Depressão-Pico	mmCa	548	558	547	551	588	500	544	580	620	680	627	600	580	560	580	575,42	523	528	545	
Camada de Mistura	mm	215	210	220	215	220	230	225	325	320	320	322	340	340	340	340	275	410	410	410	
Camada de Bedding	Kg	9	9	9	9	10	10	10	9	9	10	9	10	10	10	10	10	10	10	10	
Densidade de Carga	ton/m³	1,19	1,18	1,18	1,18	1,19	1,18	1,19	1,20	1,21	1,21	1,21	1,24	1,22	1,24	1,23	1,20	1,37	1,34	1,30	
Umidade	%	6,97	6,53	6,45	6,65	7,14	7,21	7,18	12,77	12,54	13,91	13,07	12,48	13,4	11,56	12,48	9,84	14,76	15,10	13,65	
Misturamento	minutos	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00	7,00	7,00	5,00	7,00	7,00	6,33	7,00	7,00	7,00	7,00	6,33	7,00	7,00	7,00	
Micropelotização	minutos	8,00	8,00	8,00	8,00	7,00	7,00	7,00	8,00	7,00	7,00	7,33	7,00	7,00	7,00	7,00	7,33	7,00	7,00	7,00	
Granulometria		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média		N-5/Q-2	N-5/Q-3	N-5/Q-5	
>50 mm	%	20,50	4,41	12,54	12,48	23,70	14,60	19,15	6,08	7,94	8,16	7,39	9,10	13,68	13,57	12,12	12,79	7,94	7,92	3,42	
>25 mm	%	22,88	29,43	20,77	24,36	17,50	15,05	16,28	10,51	12,02	10,26	10,93	15,22	15,13	13,88	14,74	16,58	21,07	22,94	17,47	
>12 mm	%	23,96	29,22	30,62	27,93	18,55	25,30	21,93	18,77	20,96	21,25	20,33	25,21	22,37	25,81	24,46	23,66	25,18	19,14	25,09	
>5 mm	%	12,01	15,07	13,58	13,55	10,75	15,15	12,95	25,71	20,12	25,43	23,75	18,31	19,69	19,71	19,24	17,37	19,11	26,60	21,76	
<5 mm	%	20,65	21,87	22,49	21,67	27,50	25,55	26,53	38,93	38,96	34,90	37,60	32,16	29,13	27,03	29,44	28,81	26,70	23,40	32,25	
Rendimentos:		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média		N-5/Q-2	N-5/Q-3	N-5/Q-5	
SP/SP+Retorno	%	73,21	71,69	70,82	71,91	63,24	64,91	64,08	49,29	49,33	54,14	50,92	58,91	60,67	64,43	61,34	62,06	65,17	69,36	56,74	
SP/M.Total	%	62,94	63,29	60,86	62,36	55,03	55,47	55,25	42,03	42,13	47,55	43,90	47,08	51,00	52,30	50,13	52,91	55,86	55,78	51,17	
SP/M.Parcial	%	82,82	83,28	80,08	82,06	80,93	81,59	81,26	67,80	67,96	77,94	71,23	73,57	79,69	81,72	78,33	78,22	83,37	83,26	81,86	
Retorno Carregado	%	24,00	24,00	24,00	24,00	32,00	32,00	32,00	38,00	38,00	38,00	38,00	36,00	36,00	36,00	36,00	32,50	33,00	33,00	33,00	
Retorno Gerado	%	20,65	21,87	22,49	21,67	28,06	26,71	27,39	38,97	38,96	34,90	37,61	31,46	29,88	27,03	29,46	29,03	26,70	23,40	32,25	
Balanco Retorno	%	98,13	104,79	105,42	103	100,94	94,84	103	111,20	112,00	100,50	103	96,00	93,20	85,83	103	102,78	90,45	74,68	111,17	
Consumo Especifico		Q-1	Q-2	Q-3	Total	Q-2	Q-3	Total	Q-6	Q-7	Q-8	Total	Q-5	Q-6	Q-7	Total		N-5/Q-2	N-5/Q-3	N-5/Q-5	
S / Feed Baratinha	Kh/t/Sinter	885,72	880,83	916,08	894,21	835,85	829,22	832,54	906,40	894,22	775,75	858,79	800,87	739,38	721,01	753,76	834,82	746,73	747,69	815,20	
FSD		120,74	120,08	124,88	121,90	138,10	137,00	137,55	147,50	147,14	128,31	140,98	135,92	125,49	122,37	127,92	132,09	119,95	120,10	130,95	
Dolomita		33,52	33,34	34,67	33,84	34,52	34,25	34,39	38,30	37,50	32,81	36,20	34,83	32,16	31,36	32,78	34,30	30,97	31,01	33,81	
Calcario		88,97	88,48	92,02	89,82	127,19	126,19	126,69	108,72	108,46	94,66	103,94	134,86	124,51	121,41	126,93	111,85	89,51	89,63	97,72	
Coque de Petroleo		78,48	78,05	81,17	79,24	99,94	99,15	99,54									89,39				
Moinha/Carvão									274,06	284,07	251,57	269,90	252,73	233,32	227,53	237,86	253,88	212,33	212,60	231,80	
Retorno		381,30	379,19	394,37	384,95	581,46	576,85	579,16	904,02	901,81	820,35	875,39	764,55	705,86	688,32	719,58	639,77	590,80	591,56	644,97	
TOTAL		1588,74	1579,97	1643,20	1603,97	1817,07	1802,66	1809,87	2379,00	2373,20	2103,45	2285,22	2123,76	1960,71	1912,00	1998,82	1924,47	1790,30	1792,60	1954,46	
Mistura Total		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média		N-5/Q-2	N-5/Q-3	N-5/Q-5	
S / Feed Baratinha	%	55,75	55,75	55,75	55,75	46,00	46,00	46,00	38,10	37,68	36,88	37,55	37,71	37,71	37,71	37,71	44,25	41,71	41,71	41,71	
FSD		7,60	7,60	7,60	7,60	7,60	7,60	7,60	6,20	6,20	6,10	6,17	6,40	6,40	6,40	6,40	6,94	6,70	6,70	6,70	
Dolomita		2,11	2,11	2,11	2,11	1,90	1,90	1,90	1,61	1,58	1,56	1,58	1,64	1,64	1,64	1,64	1,81	1,73	1,73	1,73	
Calcario		5,60	5,60	5,60	5,60	7,00	7,00	7,00	4,57	4,57	4,50	4,55	6,35	6,35	6,35	5,87	5,00	5,00	5,00		
Coque de Petroleo		4,94	4,94	4,94	4,94	5,50	5,50	5,50									5,22				
Moinha/Carvão									11,52	11,97	11,96	11,82	11,90	11,90	11,90	11,86	11,86	11,86	11,86	11,86	
Retorno		24,00	24,00	24,00	24,00	32,00	32,00	32,00	38,00	38,00	39,00	38,33	36,00	36,00	36,00	36,00	32,58	33,00	33,00	33,00	
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Fonte: Renan Faria