

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Estudo da Relação entre os Custos com Energéticos em um Forno de Grelha Móvel e o
Percentual de Espaços Vazios encontrados no Leito de Pelotas de Minério de Ferro**

Autor: Marcos Vinícios da Silva Cavalcante

Orientador: Prof. Renato Minelli Figueira

Fevereiro – 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Marcos Vinícios da Silva Cavalcante

**Estudo da Relação entre os Custos com Energéticos em um Forno de Grelha Móvel e o
Percentual de Espaços Vazios encontrados no Leito de Pelotas de Minério de Ferro**

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

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Renato Minelli Figueira

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2016

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial ao meu pai João Mendes Cavalcante, a minha mãe Djanira da Silva Cavalcante e aos meus filhos Ágatha Mendes Cavalcante e Marcos Vinícios da Silva Cavalcante Filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os envolvidos neste estudo, aos colaboradores dos departamentos de engenharia de processo, automação e instrumentação, e da produção. Em especial, agradeço ao gerente geral da GGTE, Dr. Denílson Rodrigues de Araujo, ao Gerente da GEU, Thiago Marchezi, ao Gerente da GPU, Alysson Werneck, ao Engenheiro Especialista de produto da GGPK, Dr. Maurício Otaviano, e ao Engenheiro Especialista da GGOP, MSc. Sérgio Nunes que me apoiaram internamente durante as etapas deste estudo. Agradeço ainda ao Diretor da CEMI, Marco Aurélio Soares por apoiar o desenvolvimento tecnológico de medição online dos (P.C.O) na planta. Sou grato também aos professores que lecionaram as disciplinas que fizeram parte do conteúdo acadêmico durante o período de aquisição de créditos, em especial o professor, Ph.D. Renato Minelli Figueira pela orientação e dedicação durante todo este estudo que foi parte integrante da produção acadêmica de mestrado realizado via programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica, materiais e de minas da UFMG. Agradeço, por fim, ao CNPq, a CAPES-PROEX e a FAPEMIG.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: STRAIGHT GRATE (MORALES ET AL., 2011)	16
FIGURA 3.2: DISCO DE PELOTIZAÇÃO (MEYER, 1980).....	18
FIGURA 3.3: FORMAÇÃO DE PELOTAS CRUAS NO DISCO (MANUAL OPERACIONAL DA SAMARCO MINERAÇÃO S.A.)	18
FIGURA 3.4: SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO NA ALIMENTAÇÃO DO FORNO DE ENDURECIMENTO - USINA 03 (MANUAL OPERACIONAL DA SAMARCO MINERAÇÃO S.A.).....	19
FIGURA 3.5: FLUXOGRAMA DO FORNO DE ENDURECIMENTO DO TIPO GRELHA MÓVEL. (MATOS, 2007)	20
FIGURA 3.6: MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO-GÁS EM FUNÇÃO DE TEMPERATURA E DIÂMETRO DE PARTÍCULA. (ADAPTADO DE FLAMANT ET AL. (1992))	20
FIGURA 3.7: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA AO LONGO DO LEITO DE PELOTAS MOSTRANDO O EFEITO DA RADIAÇÃO (THURLBY ET AL., 1979).....	21
FIGURA 3.8: PERFIL DE TEMPERATURA NAS CAMADAS DURANTE O CICLO DE QUEIMA EM POT-GRATE (COTA, 2004).....	22
FIGURA 3.9: DIMENSÕES E ETAPAS DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO DO FORNO 03 DA SAMARCO (COTA ET AL., 2009)	23
FIGURA 3.10: ESQUEMA DA SECAGEM ASCENDENTE (MATOS, 2007).....	23
FIGURA 3.11: DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA DURANTE A SECAGEM DE UM CORPO DE ARGILA (HLAVAC, 1983)	24
FIGURA 3.12: COMPORTAMENTO DE UM CORPO CERÂMICO DURANTE A SECAGEM (HLAVAC, 1983)	25
FIGURA 3.13: DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE DURANTE A SECAGEM DE CORPOS CERÂMICOS (HLAVAC, 1983)	27
FIGURA 3.14: VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NAS CAMADAS DE PELOTAS DURANTE A SECAGEM (MEYER, 1980)	28
FIGURA 3.15: MECANISMO DE CONTROLE DA SECAGEM DA PELOTA (PEREIRA E SESHADRI, 1985).....	29
FIGURA 3.16: INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DAS PELOTAS SOBRE A SECAGEM (PEREIRA E SESHADRI, 1985).....	29
FIGURA 3.17: INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DAS PELOTAS SOBRE A SECAGEM (PEREIRA E SESHADRI, 1985).....	30
FIGURA 3.18: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO GÁS SOBRE A SECAGEM (PEREIRA E SESHADRI, 1985).....	30
FIGURA 3.19: NORMALIZAÇÃO DE MEDIDAS EXPERIMENTAIS ATRAVÉS DE VARIÁVEIS REDUZIDAS E AS DIFERENTES EQUAÇÕES DE QUEDA DE PRESSÃO PARA LEITOS POROSOS (ERGUN, 1952)	33
FIGURA 3.20: RESULTADOS DOS TESTES DE PERMEABILIDADE COM PELOTAS CRUAS (COTA, 2008)	38
FIGURA 3.21: DESENHO ESQUEMÁTICO DA DISPOSIÇÃO DAS PELOTAS NO CARRO DE GRELHA (COTA, 2008).....	38
FIGURA 3.22: INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE VAZIOS E REPARTIÇÕES DO LEITO DE PELOTAS DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO DE PELOTAS	39

FIGURA 3.23: REPRESENTAÇÃO DA EQUAÇÃO (3.12) (RAMO ESQUERDO) E EQUAÇÃO (3.13) (RAMO DIREITO) PARA E_{0D} E E_{0D} IGUAIS A 0.4 (MOTA ET AL. 1999).....	41
FIGURA 3.24: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARRANJO DE PEQUENAS PARTÍCULAS ENTRE PARTÍCULAS GRANDES: (A) PARTÍCULAS PEQUENAS PREENCHEM O ESPAÇO VAZIO ENTRE O ESQUELETO DE PARTÍCULAS MAIORES, (B) PARTÍCULAS PEQUENAS INTROMETEM-SE NO ESQUELETO DE PARTÍCULAS GRANDES.	42
FIGURA 3.25: VALORES DE E PARA DIFERENTES VALORES DE D_{DP}/D_{DP}	42
FIGURA 3.26: REPRESENTAÇÃO DE UM EMPACOTAMENTO BINÁRIO EM $d_{DP}/D_{DP} = 20$ MOSTRANDO OS EFEITOS DE DISTORÇÃO NA FRAÇÃO DE PARTÍCULAS MENORES (A) x_D ABAIXO DA FORMAÇÃO DO ESQUELETO NA MISTURA (B) x_D NA REGIÃO DE POROSIDADE MÍNIMA.	46
FIGURA 4.1: POT-GRATE, DISCO PELOTIZADOR, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.....	50
FIGURA 4.2: POT-GRATE, PENEIRAS PARA PELOTA CRUA, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.....	51
FIGURA 4.3: FLUXO DE PREPARAÇÃO DOS LEITOS PADRÕES UTILIZADOS NO ESTUDO.	53
FIGURA 4.4: PERMEABILITY METER LAB, PML	55
FIGURA 4.5: FLUXO DE MEDIÇÃO INTERNO DO PML E INSTRUMENTAÇÃO.....	56
FIGURA 4.6: FLUXO DE CALIBRAÇÃO ATÉ OS ENSAIOS COM PELOTAS CRUAS PARA MEDIÇÃO DO $\%E$	57
FIGURA 4.7: POT-GRATE, FORNO ESTÁTICO SIMULADOR DO PROCESSO DE QUEIMA DO FORNO DE GRELHA MÓVEL, SAMARCO MINERAÇÃO S.A.....	60
FIGURA 4.8: POT-GRATE, TAMBOR DE ABRASÃO (66TA06), SAMARCO MINERAÇÃO S.A.....	61
FIGURA 4.9: POT-GRATE, PRENSA DE PELOTA QUEIMADA, SAMARCO MINERAÇÃO S.A. ..	62
FIGURA 4.10: VISTA SUPERFICIAL DO LEITO DE PELOTAS CRUAS NA ENTRADA DO FORNO TIPO GRELHA MÓVEL, UTILIZADA PARA CAPTURA DE IMAGENS PELO GRANULÔMETRO, MEDIDOR DE GRANULOMETRIA DAS PELOTAS CRUAS.....	64
FIGURA 4.11: (A) CAPTURA DE IMAGENS; (B) PROCESSAMENTO DAS IMAGENS; (C) FORMAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE P.C.O; FLUXO DE DADOS PARA MEDIÇÃO ONLINE DOS P.C.O, SAMARCO MINERAÇÃO S.A	64
FIGURA 4.12: (A) FORMAÇÃO DOS P.C.O; (B) RECEBIMENTO DOS P.C.O NO MODELO INSERIDO NO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO; (C) GERAÇÃO ONLINE DA PREVISÃO DO $\%E$ EM UMA TELA ORIGINAL DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	65
FIGURA 4.13: SISTEMA CONSTRUÍDO PARA ELABORAÇÃO DO MODELO EMPÍRICO DE CONTROLE DE CUSTOS COM ENERGÉTICOS NA PLANTA INDUSTRIAL	67
FIGURA 5.1: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (DM).....	69
FIGURA 5.2: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (16_8)	70
FIGURA 5.3: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (8_6.3)	71
FIGURA 5.4: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (6.3)	72
FIGURA 5.5: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (16)	73
FIGURA 5.6: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPONENTE DOS LEITOS (REL).....	74
FIGURA 5.7: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA VARIÁVEL RESPOSTA $\%E$ DO PML (EV)	75
FIGURA 5.8: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO P.C.O 16_8 (DM;6.3) ENCONTRADO NOS LEITOS.....	77
FIGURA 5.9: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO P.C.O 8_6.3 (DM;6.3) ENCONTRADO NOS LEITOS	78
FIGURA 5.10: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO P.C.O REL (8_6.3; 6.3) ENCONTRADO NOS LEITOS PADRÕES.....	78
FIGURA 5.11: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO P.C.O 8_6.3 (REL;16_8) ENCONTRADO NOS LEITOS PADRÕES.....	79

FIGURA 5.12: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO %E = EV (REL;16_8) ENCONTRADO NOS LEITOS PADRÕES.....	80
FIGURA 5.13: AVALIAÇÃO EM TRÊS DIMENSÕES DO %E = EV (8_6.3; 6.3) ENCONTRADO NOS LEITOS PADRÕES.....	80
FIGURA 5.14: VISÃO SUPERFICIAL DO ACOPLAMENTO ENTRE ESFERAS DE DIÂMETRO UNITÁRIO COM OUTRAS COM DIÂMETRO DE 0,1548 X DIÂMETRO UNITÁRIO.....	81
FIGURA 5.15: VISÃO SUPERFICIAL DO ACOPLAMENTO ENTRE ESFERAS COM DIÂMETRO UNITÁRIO E COM OUTRAS COM DIÂMETRO DE 0,5774 X DIÂMETRO UNITÁRIO	82
FIGURA 5.16: VISÃO SUPERFICIAL DO ACOPLAMENTO ENTRE ESFERAS COM DIÂMETRO UNITÁRIO COM OUTRAS DE DIÂMETRO DE 0,1548 X DIÂMETRO UNITÁRIO E DE 0,5874 X DIÂMETRO UNITÁRIO.....	82
FIGURA 5.17: DINÂMICA DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA CAMADA DO LEITO DE PELOTAS DURANTE A QUEIMA	85
FIGURA 5.18: DINÂMICA DO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE A TEMPERATURA DA CAMADA SUPERIOR E OS GASES QUE SAEM DO LEITO COM FLUXO DESCENDENTE COM MESMO DELTA P	85
FIGURA 5.19: DINÂMICA DE VARIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA À COMPRESSÃO E DO TAMBORAMENTO	86
FIGURA 5.20: DINÂMICA DA TORTUOSIDADE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DOS % ϵ	87
FIGURA 5.21: CONSUMO DE CARVÃO PULVERIZADO EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E	88
FIGURA 5.22: CONSUMO DE GÁS NATURAL EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E	89
FIGURA 5.23: CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELOS VENTILADORES DE PROCESSO EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E	90
FIGURA 5.24: TEMPERATURA DAS PELOTAS QUEIMADAS NA DESCARGA EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E.....	91
FIGURA 5.25: PERDAS TÉRMICAS NA DESCARGA COM TEMPERATURAS DAS PELOTAS QUEIMADAS ACIMA DA TEMPERATURA AMBIENTE DE 25 ⁰ C EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E.....	92
FIGURA 5.26: PERDAS TÉRMICAS NA DESCARGA COM TEMPERATURAS DAS PELOTAS QUEIMADAS ACIMA DA TEMPERATURA MÉDIA DE REFERÊNCIA DE 130 ⁰ C, CONSIDERADA NORMAL, EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E	93
FIGURA 5.27: PRODUTIVIDADE DO FORNO EM FUNÇÃO DO %E PREVISTO PELO MODELO E.....	94
FIGURA 5.28: VARIAÇÃO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS DOS ENERGÉTICOS E PRODUTIVIDADE.....	96
FIGURA 5.29: MODELO EMPÍRICO DE CONTROLE DE CUSTOS E DE PRODUÇÃO ANUAL TENDO COMO REFERÊNCIA O PLANEJADO ANUAL EM FUNÇÃO DO %E	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: SEQUÊNCIA DE EVENTOS PARA SE ATINGIR O OBJETIVO FINAL DO TRABALHO.	15
TABELA 3.1: PARÂMETROS PARA ANÁLISE DA PERDA DE PRESSÃO NO LEITO (EISFELD E SCHNITZLEIN, 2000).	35
TABELA 3.2: RRMSD PARA MODELAMENTO DA PERDA DE PRESSÃO COM EFEITO DE PAREDE A PARTIR DE EQUAÇÕES DE PERDA DE PRESSÃO (EISFELD E SCHNITZLEIN, 2001). DADOS UTILIZADOS DA TABELA 3.1.	36
TABELA 3.3: COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE REICHEL (1972) E EISFELD E SCHNITZLEIN (2000).	37
TABELA 3.4: COMPARAÇÃO DAS PREVISÕES DO MODELO COM OS DADOS EXPERIMENTAIS DISPONÍVEIS EM TERMOS DE MRD COMO PARÂMETRO ESTATÍSTICO (EISFELD E SCHNITZLEIN, 2001).	44
TABELA 3.5: CORRELAÇÕES DE TORTUOSIDADE DO LEITO (LANFREY ET AL., 2009).	44
TABELA 4.1: COMPRIMENTO E TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA CADA ZONA DO FORNO 03 A SEREM CONSIDERADOS DURANTE AS QUEIMAS NO POT-GRATE.	61
TABELA 5.1: RESULTADOS DE QUALIDADE FÍSICA DA PELOTA QUEIMADA COM A PREVISÃO DE %E VIA PML.	834
TABELA 5.2: SIMULAÇÕES DE CONSUMO ESPECÍFICO DE INSUMOS E PERDAS TÉRMICAS E DE PRODUTIVIDADE.	95
TABELA 5.3: SIMULAÇÕES DE CONSUMO ESPECÍFICO DE INSUMOS E PERDAS TÉRMICAS E DE PRODUTIVIDADE.	97
TABELA 5.4: SIMULAÇÕES DO % DE INCREMENTO SOBRE O CUSTO ANUAL COM INSUMOS, PERDAS TÉRMICAS E PRODUÇÃO.	44
TABELA ANEXO 8.1.1: VARIAÇÕES DE DIÂMETRO MÉDIO CALCULADOS UTILIZADO NA MONTAGEM DOS LEITOS.	108
TABELA ANEXO 8.1.2: VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA 16 A 8 MM CALCULADOS, UTILIZADO NA MONTAGEM DOS LEITOS.	109
TABELA ANEXO 8.1.3: VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA 8 A 6.3 MM CALCULADOS UTILIZADO NA MONTAGEM DOS LEITOS.	110
TABELA ANEXO 8.1.4: VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA -6.3 MM CALCULADOS UTILIZADO NA MONTAGEM DOS LEITOS.	111
TABELA ANEXO 8.1.5: VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA +16 MM CALCULADOS UTILIZADO NA MONTAGEM DOS LEITOS.	112
TABELA ANEXO 8.1.6: VARIAÇÕES DE RELAÇÃO GRANULOMÉTRICA CALCULADOS UTILIZADA NA MONTAGEM DOS LEITOS.	113
TABELA ANEXO 8.2.1: MEDIÇÕES REALIZADAS EM BECKER DO % DE ESPAÇOS VAZIOS.	113
TABELA ANEXO 8.2.2: MEDIÇÕES REALIZADAS NO PML DO % DE ESPAÇOS VAZIOS.	113
TABELA ANEXO 8.2.3: ANÁLISE DE ERRO ENTRE O PADRÃO BECKER E O MEDIDOR PML.	116
TABELA ANEXO 8.3.1: MEDIÇÕES REALIZADAS NO PML DO % DE ESPAÇOS VAZIOS A PARTIR DOS LEITOS PADRÕES.	1137

RESUMO

O forno de endurecimento de pelotas cruas do tipo grelha móvel da Samarco Mineração S.A, também chamado *Straight Grate*, é utilizado na queima de aglomerados de pelotas de minério de ferro inseridas dentro de carros de grelha que se movimentam com certa velocidade através das zonas do forno. Neste tipo de forno, as pelotas são aquecidas predominantemente por convecção (FLAMANT *et al.*, 1992) por gases aquecidos por queimadores instalados nas zonas de pré-queima e queima. A partir da movimentação desses gases quentes realizada por ventiladores de processo, torna-se possível que este fluido passe através do leito de pelotas em condições apropriadas de velocidade e temperatura de modo a garantir a secagem, a sinterização e o resfriamento das pelotas enquanto os carros de grelha se movem dentro do forno. Um dos parâmetros mais importantes nesse processo é a permeabilidade do leito de partículas que, de acordo com Ergun (1952), é uma função direta dos espaços vazios formados pelo empacotamento das partículas, desde que estas partículas estejam distribuídas homogêneas de modo a permitir a formação de canais de escoamento contínuos, uniformes e em paralelo. Durante o estudo realizado na planta avaliada, percebeu-se que quanto maior for a faixa granulométrica entre 8 mm e 16 mm de diâmetro das pelotas cruas na alimentação da grelha, ou seja, quanto mais homogêneo for o leito fixo recém formado maior será percentual de espaços vazios (ϵ) encontrado nele. A partir do controle desta métrica, o processo do forno responderá com maiores ou menores consumos de energia térmica e elétrica e também com maior ou menor produtividade em função da variação da qualidade física. Em função disso, este estudo teve como objetivo mostrar a importância de conhecer todas as faixas granulométricas, entender sua influência no percentual de espaços vazios, mapear a faixa de ocorrência deste indicador de chão de fábrica nos leitos fixos encontrados e praticados na indústria de pelletização de minério de ferro e, finalmente, compreender a relação desta métrica com alguns parâmetros de controle operacional e associá-los à qualidade física, à produtividade e ao custo com energéticos a partir da indicação de um modelo empírico de controle de custos em um forno tipo grelha móvel.

ABSTRACT

The hardening furnace of raw pellets from Samarco SA, type the traveling grate also called Straight Grate, is used in the firing iron ore pellets inserted into the grate cars moving with a certain speed through heating zones. In this type of furnace, the pellets are heated predominantly by convection (FLAMANT *et al.*, 1992) by heated gases by burners installed in the pre-burning and burning zones. The moving of these hot gases is performed by process fans making this fluid pass through the bed of pellets possible with appropriate conditions of speed, temperature press to drying, sintering and cooling of the pellets while they move inside the furnace. One of the most important parameters in this process is the permeability of the particle bed, which according to Ergun (1952), is a direct function of the voids formed by the particle packing, since these particles are homogeneously distributed in order to allow formation flow channels continuous, uniform and parallel. During this study on the evaluated plant, it was realized that how larger for the particle size range between 8 mm and 16 mm diameter of the raw pellets into grate food or more explained how much more homogeneous is the newly formed fixed bed the higher percentage of voids ($\epsilon\%$) found it. Through the control of this metric, the furnace process will respond with higher or lower consumption of thermal and electrical energy and also more or less productivity due to the physical quality change. As a result, this study aimed to show the importance of knowing all particle sizes and understand its influence on the percentage of voids map the occurrence of range of this factory floor indicator found and practiced in fixed beds in the iron ore pelletizing industry and, finally, understand the relationship of this metric with some operational control parameters and associate them with physical quality, productivity and cost of energy from the indication of an empirical model of cost control in an furnace type straight grade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PELLET FEED.	16
3.2. PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE MINÉRIO DE FERRO.	17
3.3. PROCESSO DE ENDURECIMENTO EM FORNO TIPO GRELHA MÓVEL.	19
3.3.1. Processo de secagem.....	23
3.4. LEITO FIXO.	32
3.4.1. Permeabilidade em leito fixo.	32
3.5. CONVECÇÃO FORÇADA EXTERNA PARA UMA ESFERA.....	46
3.6. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS FIXOS.....	47
4. METODOLOGIA E MATERIAIS.....	49
4.1. PREPARAÇÃO DOS LEITOS E MEDIÇÃO DE ESPAÇOS VAZIOS.	50
4.1.1. Pelotamento das pelotas de uso dos experimentos.	50
4.1.2. Leitos padrões.	51
4.1.3. Produção de amostras para os leitos padrões A, B, C, D, E e F.....	52
4.1.4. Construção dos Leitos padrões no Pot-Grate.....	53
4.1.5. Calibração e medição do $\% \epsilon$ dos leitos.....	54
4.1.6. Calibração do PML e medição de $\% \epsilon$	56
4.1.7. Análise de estado do PML.	58
4.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DE PREVISÃO DO $\% E$	58
4.3. ÉTAPA DE QUEIMA DAS PELOTAS CRUAS.	60
4.3.1. Determinação da qualidade física de índice de tamboramento (ISO 3271). ...	61
4.3.2. Determinação da qualidade física de resistência à compressão (ISO 4700). ..	62
4.4. DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA/PROCESSO PARA MEDIÇÃO ONLINE DOS PARÂMETROS DE CONTROLE E ASSOCIAÇÃO AO MODELO DE PREVISIBILIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS, MODELO DE ESPAÇOS VAZIOS, NA ENTRADA DO FORNO DE PELOTIZAÇÃO.....	63
4.5. QUANTIFICAÇÃO, POR MEIO DE TESTES EM ESCALA INDUSTRIAL, DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE OPERACIONAL DO PELOTAMENTO SOBRE O PROCESSO DE QUEIMA NOS QUESITOS CONSUMO DE ENERGÉTICOS, COMBUSTÍVEIS E ENERGIA ELÉTRICA, E QUALIDADE DO PRODUTO FINAL.....	65
4.6. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO QUE AVALIE QUANTITATIVAMENTE E QUALITATIVAMENTE (MAIOR OU MENOR) O IMPACTO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE OPERACIONAIS (P.C.O) DO PELOTAMENTO NO CUSTO COM ENERGÉTICOS E NA TENDÊNCIA DE QUALIDADE DO PRODUTO FINAL.....	68
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS LEITOS PADRÕES UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS E MODELO E.....	69
5.1.1. Diâmetro médio.	69
5.1.2. Faixa granulométrica -16+8 mm.....	70
5.1.3. Faixa granulométrica -8+6.3 mm.....	70

5.1.4. Faixa granulométrica -6.3 mm.....	71
5.1.5. Faixa granulométrica +16 mm.....	72
5.1.6. Relação granulométrica.....	73
5.1.7. Percentual de espaços vazios contidos no leito padrões.....	74
5.1.8. Construção do modelo ϵ	75
5.2. RESTRIÇÕES DO MODELO E.....	76
5.2.1. Análise de restrição do Modelo ϵ	76
5.3. ANÁLISE DE RELACIONAMENTO EM TRÊS DIMENSÕES.....	76
5.3.1. Entre as variáveis de entrada (P.C.O).....	77
5.3.2. Entre as variáveis de entrada (P.C.O) com a variável resposta (% ϵ).....	79
5.4. ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO NA RESULTANTE %E.....	81
5.4.1. Avaliação superficial do acoplamento entre as faixas granulométricas.....	81
5.5. RESULTADOS DA PELOTA QUEIMADA.....	83
5.5.1. Análise de relacionamento do modelo ϵ com a qualidade final da pelota queimada.....	83
5.6. TESTE INDUSTRIAL.....	87
5.6.1. Avaliação estatística dos dados coletados durante o teste industrial.....	87
5.7. MODELO EMPÍRICO DE CONTROLE DE CUSTOS.....	95
6. CONCLUSÃO.....	99
7. PRÓXIMOS PASSOS SUGERIDOS.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS.....	108

1. INTRODUÇÃO

Fornecedora de pelotas de minério de ferro de alta qualidade para a indústria siderúrgica mundial, a Samarco Mineração S.A tem buscado, dentro de sua visão estratégica, ser a empresa de mineração líder em pelotização bem como ser reconhecida como uma organização de classe mundial. Sua capacidade anual instalada atual é de 30 milhões de toneladas de pelotas. É uma empresa de capital fechado, com dois acionistas, a BHP *Billiton* Ltda. e a Vale S/A que dividem igualmente o controle acionário. Possui duas unidades industriais localizadas em Germano (MG) e em Ubu (ES) além de três escritórios de vendas localizados em Belo Horizonte (MG), Amsterdam (Holanda) e Hong Kong (China).

A unidade industrial de Germano é responsável por lavar, britar, moer, reduzir o teor de sílica e tornar o minério de ferro bombeável a partir de uma mistura de finos com água. O produto final dessa etapa do processo é a polpa de minério de ferro com aproximadamente 70% de sólidos e 30% de água com características físicas e químicas bem controladas. As duas unidades industriais, Germano e Ubu, são ligadas por três minerodutos, todos com extensão de aproximadamente 400 quilômetros. Ao longo destes dutos, existem estações de bombas para elevação da polpa nas altitudes mais elevadas e estações de válvulas para redução da pressão de bombeamento nas altitudes mais baixas. A unidade industrial de Ubu é responsável por receber a polpa, separar os sólidos da água, aumentar a superfície específica e granulometria -325#, pelotar, queimar, classificar, estocar e finalmente carregar as pelotas em navios.

O processo de pelotização, também conhecido como processo de aglomeração de finos em forma de esferas segundo Meyer (1980) é realizado através de discos giratórios de 7,5 m de diâmetro. Este processo requer controle da alimentação, do volume útil, da rotação e da inclinação dos discos para assegurar o controle da granulometria das pelotas produzidas denominadas “pelotas cruas”. A granulometria requerida para garantir as atuais necessidades dos clientes finais é a faixa de 8 a 16 milímetros de diâmetro e, desta forma, pode-se dizer que quanto maior for esta faixa em relação às faixas superiores e inferiores, maior será a homogeneidade, e portanto, melhor será o rendimento do processo de pelotização.

Para que ocorra a sinterização dos grãos formadores das pelotas bem como a

formação de fase escória líquida, a Samarco realiza o processamento térmico dos aglomerados em seus fornos de grelha, chamados de grelha móvel. Esta tecnologia é caracterizada por três estágios bem definidos de tratamento, sendo o primeiro o de secagem, seguido de queima e finalmente o de resfriamento. Todos os três estágios do processo são realizados pelo fluxo de gases através do leito de pelotas segundo Meyer (1980) e, desta forma, os aglomerados adquirem a qualidade química e física conforme as especificações do produto.

No processo de pelotização, o custo de produção depende intensamente do consumo de energéticos durante a queima. No caso específico da Samarco, os energéticos dados como combustíveis e energia elétrica correspondem a aproximadamente 18% do custo de transformação desde a extração do minério da natureza até a estocagem das pelotas queimadas no pátio de estocagem e embarque. Por outro lado, industrialmente falando, observa-se que o consumo de energéticos, principalmente o de combustíveis durante a queima, está fortemente relacionado ao nível de homogeneização das pelotas cruas que compõe o leito que é formado durante a etapa de carregamento da grelha do forno. Conseqüentemente, para que se possa reduzir o custo de produção dentro de um nível adequado de qualidade do produto, torna-se necessário encontrar uma relação entre os parâmetros de controle operacional (P.C.O) encontrados no pelotamento, que garante a formação das pelotas, e o consumo de combustíveis e de energia elétrica que representam parte substancial do custo variável de produção.

A métrica indicada por este estudo é denominado percentual de espaços vazios (%ε) como referência de controle de chão de fábrica para o gerenciamento do controle do custo de produção e produtividade da planta industrial.

2. OBJETIVOS

- Relacionar os espaços vazios a algumas informações que podem ser extraídas das pelotas cruas que alimentam o forno e criar um indicador de percentual de espaços vazios;
- Correlacionar os espaços vazios do leito recém-formado na entrada do forno ao consumo de energéticos no forno;
- Correlacionar os espaços vazios do leito recém-formado na entrada do forno à qualidade das pelotas queimadas;
- Indicar um método de controle dos espaços vazios em leitos fixo de pelotas cruas que permita a otimização do custo de produção das pelotas para um nível de qualidade aceitável.

2.1. Objetivos específicos

- Estabelecer a relação entre as faixas de granulometria e diâmetro médio com os espaços vazios resultantes dos leitos montados experimentalmente em laboratório *Pot-Grate*;
- Tratar estatisticamente as informações experimentais e encontrar uma relação entre os parâmetros de controle operacionais tais como faixas granulométricas, diâmetro médio e a variável resposta, espaços vazios;
- A partir da análise de regressão, consolidar o modelo matemático que receberá como entrada os parâmetros de controle operacional (P.C.O), tendo como saída a simulação de espaços vazios contida no leito;
- Inserir as medições *online* de granulometria e diâmetro médio da linha de produção no modelo matemático encontrado e validar o modelo na linha de produção;
- Desenvolver a relação entre os espaços vazios existentes no leito de pelotas cruas e o consumo de energéticos em escala industrial;
- Desenvolver a relação entre os espaços vazios existentes no leito de pelotas cruas e a qualidade da pelota em escala industrial;

- Identificar os parâmetros de controle da granulometria e diâmetro médio das pelotas na planta e
- Indicar um modelo empírico para controle do consumo de energéticos em um forno tipo grelha móvel.

A sequência de eventos para atingir o objetivo final é mostrada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Sequência de eventos para se atingir o objetivo final do trabalho.

FASES	OBJETIVOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ONDE
1	Relacionar os espaços vazios com algumas informações que podem ser extraídas das pelotas cruas que alimentam o forno, e criar um indicador de % de espaços vazios.	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer a relação entre as faixas de granulometria e diâmetro médio com os espaços vazios resultantes dos leitos montados experimentalmente em pot-grate. • Tratar estatisticamente as informações experimentais e encontrar uma relação entre os parâmetros de controle operacionais tais como faixas granulométricas, diâmetro médio e a variável resposta, espaços vazios. • A partir da análise de regressão consolidar modelo matemático que receberá como entrada os parâmetros de controle operacional, definidas mais adiante, e terá como saída à simulação de espaços vazios contida no leito. 	Pot-grate
2	Correlacionar os espaços vazios do leito recém formado na entrada do forno com o consumo de energéticos no forno;	<ul style="list-style-type: none"> • Inserir as medições online de granulometria e diâmetro médio da linha de produção no modelo matemático encontrado e validar o modelo na linha de produção. • Desenvolver a relação entre os espaços vazios existentes no leito de pelotas cruas e o consumo de energéticos em escala industrial. 	Linha de produção
3	Correlacionar os espaços vazios do leito recém formado na entrada do forno com a qualidade das pelotas queimadas;	<ul style="list-style-type: none"> • Inserir as medições online de granulometria e diâmetro médio da linha de produção no modelo matemático encontrado e validar o modelo na linha de produção. • Desenvolver a relação entre os espaços vazios existentes no leito de pelotas cruas e a qualidade da pelota em escala industrial. 	Linha de produção
4	Indicar um método de controle dos espaços vazios em leitos fixo de pelotas cruas que permita a otimização do custo de produção das pelotas para um nível de qualidade aceitável.	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar tendências entre os minérios, e parâmetros de pelotamento que tem relacionamento com o controle da granulometria e diâmetro médio das pelotas na planta. • Indicar um modelo empírico para controle do consumo de energéticos em um forno tipo grelha móvel. 	Linha de produção

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de produção de pelotas na Samarco em Ubu consiste nas seguintes etapas: a produção da matéria prima, o “*pellet feed*” também chamado de finos de minério de ferro, a aglomeração de suas partículas na etapa pelotamento e no endurecimento das pelotas cruas no forno tipo *Straight Grate*, também chamado de grelha móvel como observado na figura 3.1.

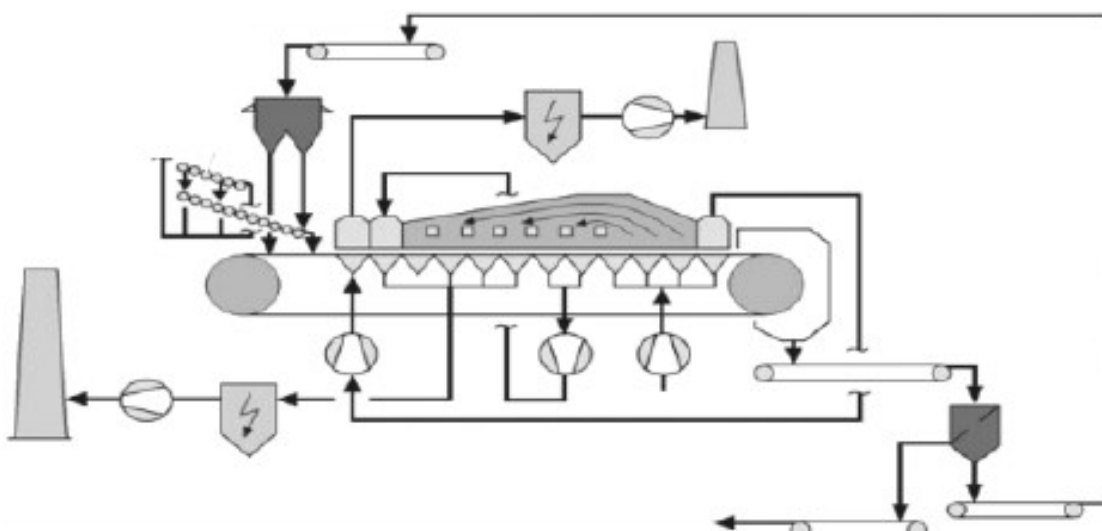


Figura 3.1: *Straight grate* (MORALES *et al.*, 2011).

3.1. Processo de Produção do *Pellet Feed*.

O principal objetivo deste processo é produzir concentrado de minérios de ferro conforme a qualidade e quantidades requeridas, respeitando o orçamento, a segurança e a eficiência da cadeia produtiva.

O itabirito processado precisa ser concentrado, pois se trata de um minério pobre com aproximadamente 45% de teor de ferro. Através dos processos de moagem, britagem, flotação e espessamento com dosagem de produtos químicos, obtêm-se teores de ferro de 68%. Quando a polpa de minério de ferro, nome dado à mistura água + minério de ferro, chega à marca de 70% de sólidos, esta polpa é bombeada via mineroduto da Unidade Germano MG para a Unidade Ubu ES onde ela novamente é espessada e depois homogeneizada, filtrada e recebe o nome de *pellet feed* ou concentrado. O concentrado é

passado pela prensa de rolos, também chamado de *Roller press*, para conferir características físicas adequadas tais como a superfície específica e o -325#. Na mistura, processo seguinte, receberá aditivos tais como calcário, coque ou antracito, bentonita ou aglomerantes orgânicos, conferindo ao *pellet feed* características físicas e químicas adequadas aos processos seguintes, especialmente o de pelotamento e queima.

3.2. Processo de Aglomeração das partículas de minério de ferro.

A composição mineralógica do minério utilizado na pelotização é de suma importância, pois afeta diretamente os parâmetros de processo e a qualidade final das pelotas (COTA, 2004).

Na etapa de aglomeração do minério de ferro denominada de pelotamento, o minério de ferro devidamente preparado com os aditivos necessários é alimentado nos discos pelotizadores onde se inicia a formação das pelotas cruas. É uma das etapas mais importantes do processo de pelotização e a mais influenciada pela ação do *Roller press* (COTA, 2004). As pelotas são produzidas com granulometria apropriada e resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transporte da área de pelotamento até o forno de endurecimento das pelotas (COTA, 2004).

De acordo com Cota (2004), dentre os fatores importantes para a formação das pelotas cruas podemos citar a forma, o tamanho médio, a mineralogia, a distribuição granulométrica do minério e os aditivos, a estrutura de poros, a molhabilidade das partículas, o teor de umidade, as características químicas da mistura, o tipo e a quantidade do aglomerante utilizado, as condições operacionais dos equipamentos utilizados, os parâmetros operacionais tais como inclinação, tempo de residência, rotação, etc.

A produção das pelotas cruas na Samarco é realizada em discos de pelotamento (NUNES, 2007). Estes equipamentos possuem um dispositivo para controle da rotação (5 a 7,6 rpm), inclinação (45 a 48°) e alimentação de 140 a 200 t/h (COTA, 2004). O diâmetro dos discos é de 7,5 m. Os mesmos possuem quatro raspadores alinhados para controle da espessura da camada de minério formada no fundo do disco, de forma a garantir boas condições para o rolamento e aglomeração de minério. A capacidade de produção dos discos é de aproximadamente 150 t/h. O ponto de alimentação no disco também exerce grande influência na formação das pelotas e pode ser modificado (NUNES, 2007).

A disposição e a forma de operação do disco permitem a classificação das pelotas

em função do diâmetro devido à combinação da força centrífuga e do próprio peso das pelotas formadas como pode ser vista na figura 3.2. A carga é alimentada numa determinada posição do disco, que pode ser alterada, e as pelotas sofrem rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, acarretando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas (NUNES, 2007). Os raspadores também funcionam como direcionadores de fluxo que pode ser vista na figura 3.3, orientando a trajetória dos aglomerados de diferentes tamanhos até sua descarga na região oposta à região de alimentação (MEYER, 1980).

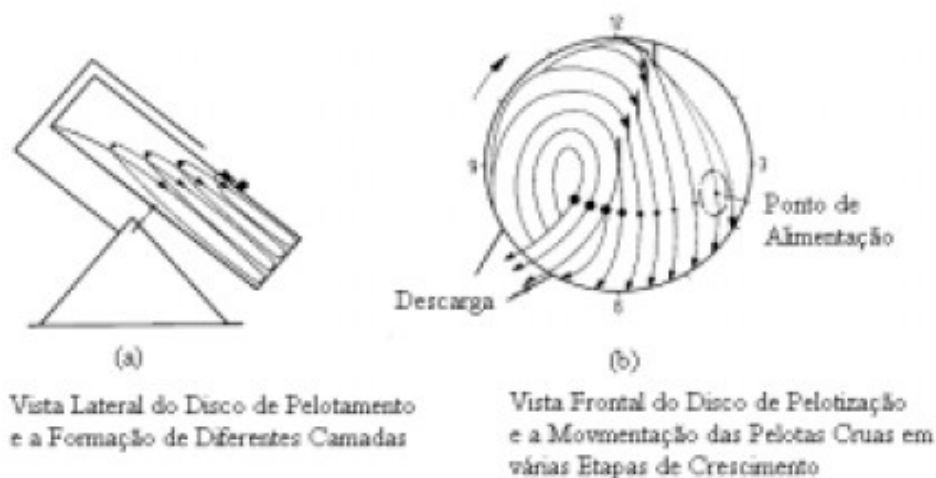


Figura 3.2: Disco de pelotização (MEYER, 1980).

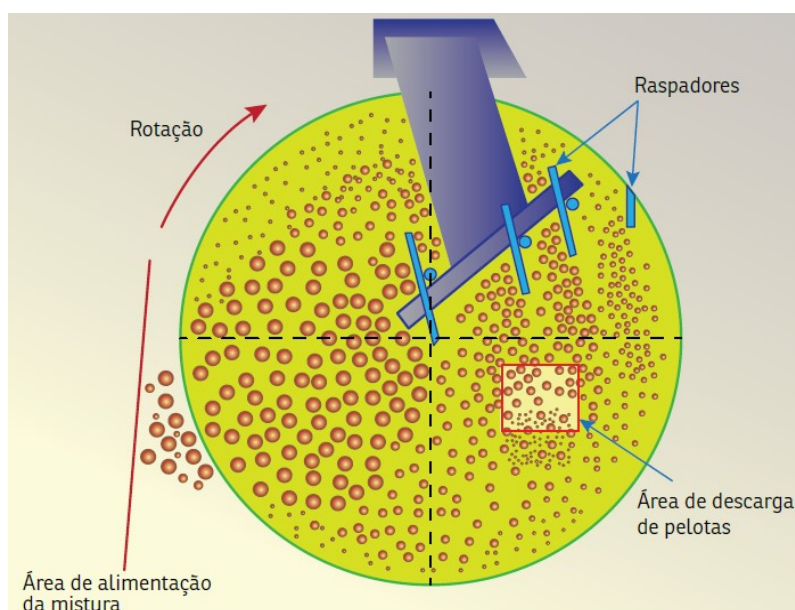


Figura 3.3: Formação de pelotas cruas no disco (Manual operacional da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.).

Após a saída das pelotas cruas dos discos pelletizadores, um sistema de classificação e transporte chamado de mesa de rolos permite a separação granulométrica de diâmetros de 2 a 16 mm. Após a passagem na etapa de rolos e retirada de finos, o material menor que 16 mm é chamado de *on-size* e o material maior que 16 mm é chamado de *over-size* (Manual operacional da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.). O material *on-size* segue para a mesa que alimenta a grelha e passa por mais uma reclassificação para manter a uniformidade e especificações requeridas pelos clientes como pode ser visto na figura 3.4.

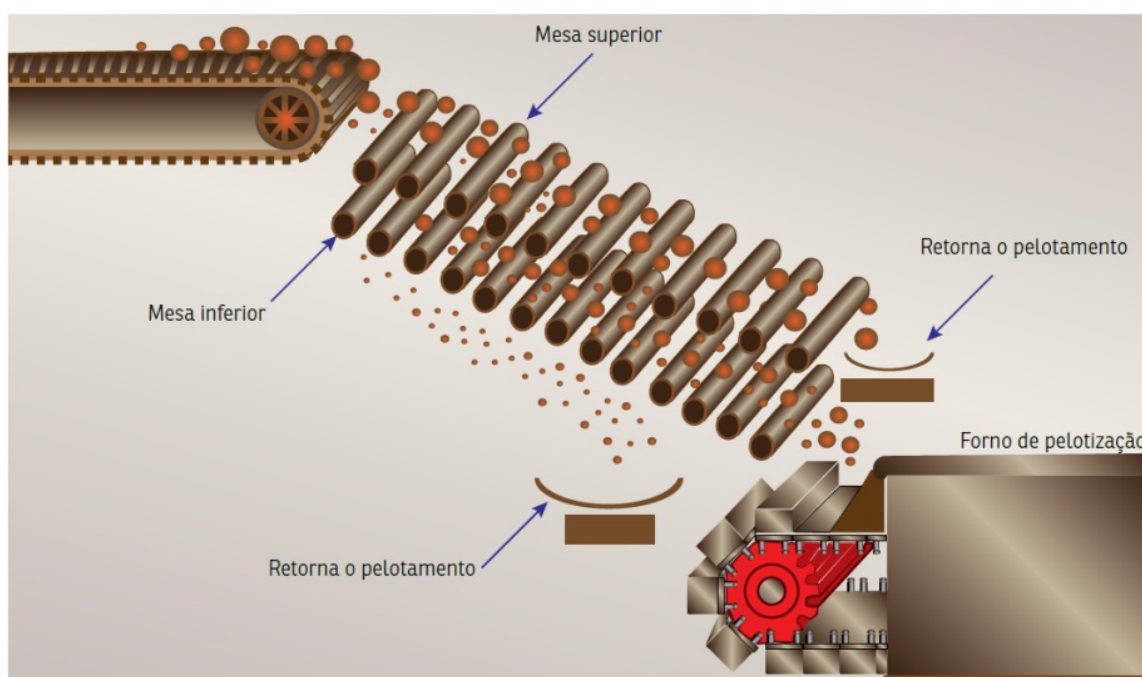


Figura 3.4: Sistema de classificação na alimentação do forno de endurecimento - Usina 03 (Manual operacional da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.).

3.3. Processo de endurecimento em Forno tipo grelha móvel.

No processo de pelotização, uma das etapas mais importantes do processo é o endurecimento das pelotas de minério de ferro (COTA *et al.*, 2009). Após uma etapa de classificação em peneiras de rolos, as pelotas cruas produzidas nos discos de pelotamento são submetidas a um ciclo térmico adequado em um forno de endurecimento comumente também chamado de forno de pelotização.

A Samarco Mineração opera fornos de pelotização do tipo Grelha Móvel. O

equipamento pode ser dividido nas regiões de secagem, de queima e de resfriamento, conforme está ilustrado na figura 3.5 (ATHAYDE, 2013). Objetiva-se, com esta etapa do processo, aumentar a resistência física das pelotas para que as mesmas possam resistir às operações de manuseio e de transporte até o cliente e também para que suportem os esforços mecânicos e os choques térmicos no interior dos fornos de redução (COTA *et al.*, 2009).

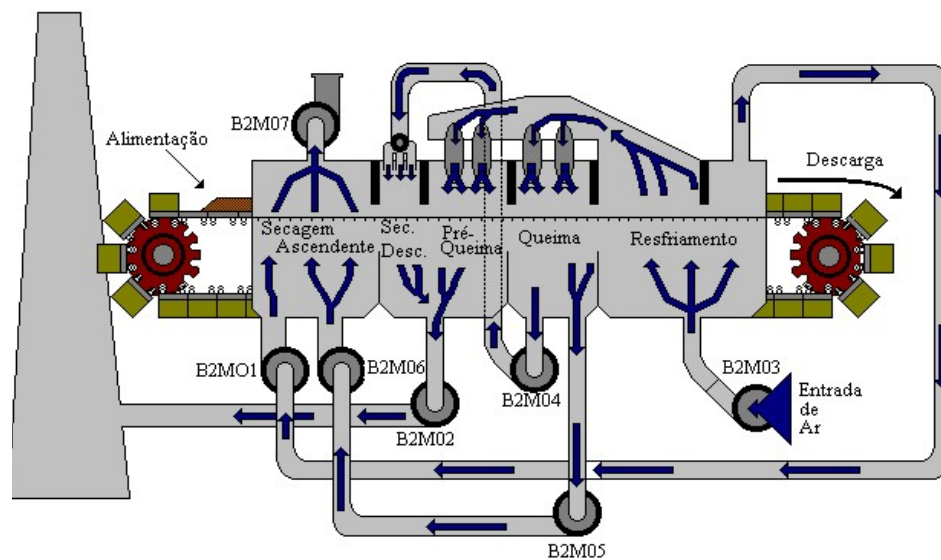


Figura 3.5: Fluxograma do Forno de endurecimento do tipo grelha móvel (MATOS, 2007).

Diferente de outros sistemas de leitos de partículas, nos leitos de pelotas, o mecanismo de transporte de energia predominante é a convecção como pode ser visto na figura 3.6 (ATHAYDE *et al.*, 2013).

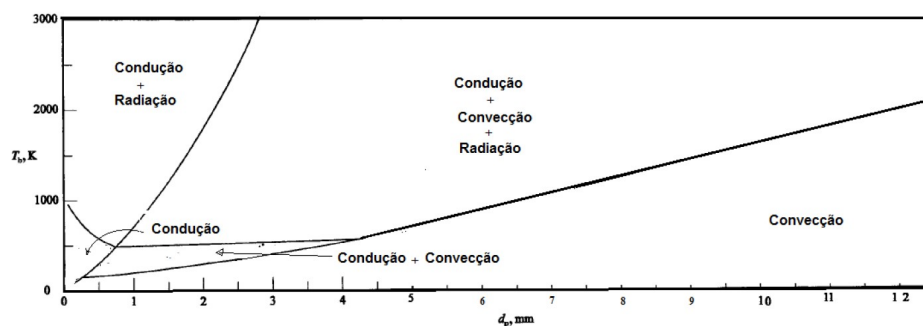


Figura 3.6: Mecanismos de transferência de calor em leito-gás em função de temperatura e diâmetro de partícula. (Adaptado de Flamant *et al.* (1992)).

O modo de transferência de calor em fornos de pelotização é, de maneira geral,

convectiva, tendo a parcela de radiação uma contribuição muito pequena no interior do leito (ATHAYDE *et al.*, 2013). Thurlby *et al.* (1979) avaliaram esta parcela através de um modelo matemático com resultados, como pode ser visto na figura 3.7. Comparando as curvas obtidas com o modelo com radiação e sem radiação, é possível avaliar que os valores de temperatura calculados são semelhantes em diferentes posições do forno mostradas pelo número das caixas de vento (*windbox*). No meio do forno aparece a maior diferença devido ao maior gradiente de temperatura ao longo das camadas de pelotas (ATHAYDE, 2013).

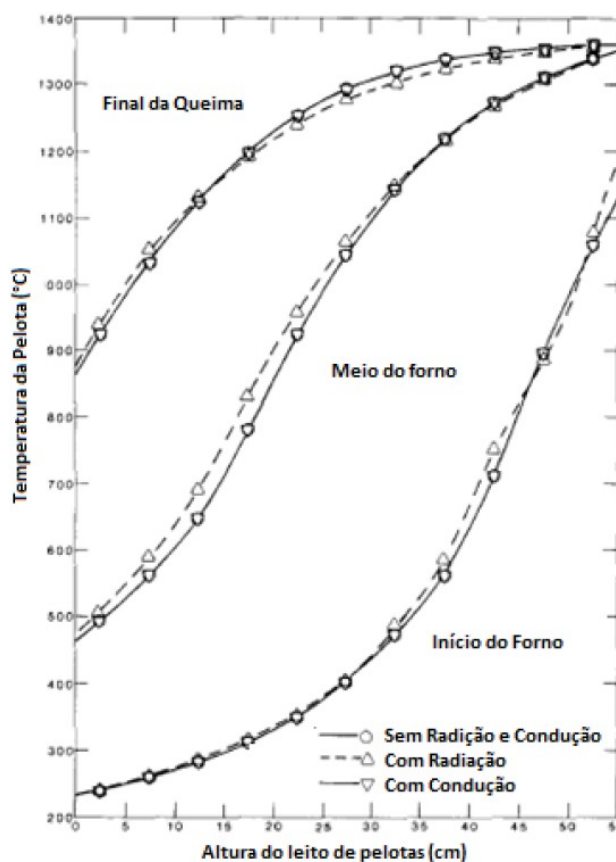


Figura 3.7: Distribuição de temperatura ao longo do leito de pelotas mostrando o efeito da radiação (THURLBY *et al.*, 1979).

O *pot-grate* possui apenas um ventilador soprador, ao contrário da usina que, a exemplo, para fluxos descendentes possui sempre um ventilador soprador para criar uma pressão positiva nas coifas e outro fazendo a exaustão dos gases para criar uma pressão negativa nas caixas de vento. Desta forma, no *pot-grate* trabalhamos com a diferença de pressão entre a caixa de vento e a coifa para controle de processo.

O perfil de temperatura para as camadas superiores (termopar T5), intermediária (termopar T6), inferior (termopar T7) e para a caixa de vento (termopar T8) são monitoradas durante a queima. A figura 3.8 ilustra um gráfico de acompanhamento das temperaturas durante a queima em *pot-grate*.

Segundo Cota (2004), é notável a diferença de temperatura entre as camadas de pelotas da parte superior, intermediária e inferior do leito. Além de apresentar a maior temperatura durante a queima, a parte superior permanece um maior tempo nessa temperatura. Ao final da queima, a parte inferior do leito que apresenta a menor temperatura recebe o ar frio para o resfriamento (COTA, 2004).

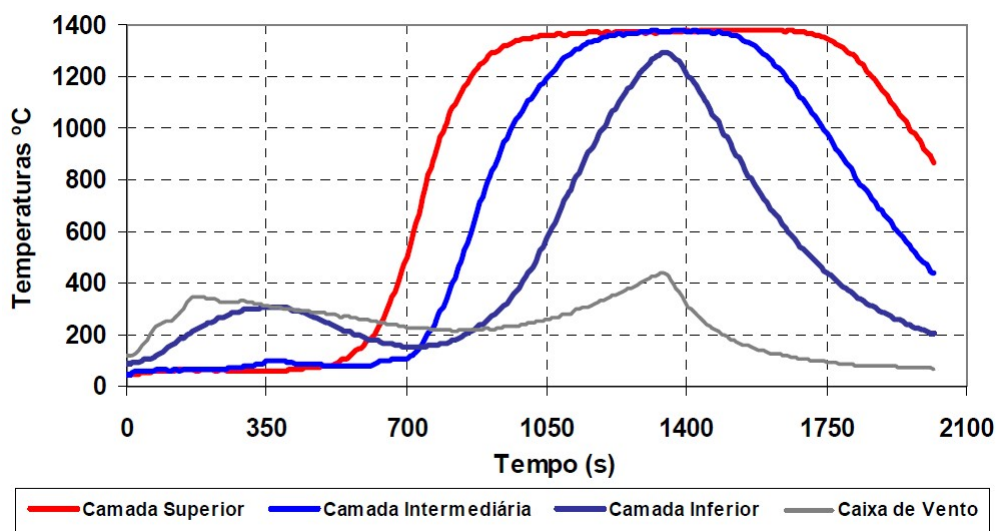


Figura 3.8: Perfil de temperatura nas camadas durante o ciclo de queima em *Pot-grate* (COTA, 2004).

O presente estudo tem por objetivo representar a redução de consumo de combustíveis e de energia elétrica com maximização da permeabilidade do leito a partir de parâmetros de controle ajustados no pelotamento tais como distribuição granulométrica e diâmetro médio das pelotas cruas. Como o processo de secagem é a primeira etapa, analisaremos esta etapa com mais ênfase que as demais.

De acordo com Patisson, Bellot e Ablitzer (1990) citados por Tsukeram, Duchesne, Hodouin (2007), cerca de 25% do total de energia necessária ao processo de endurecimento de pelotas estão associados à etapa de secagem.

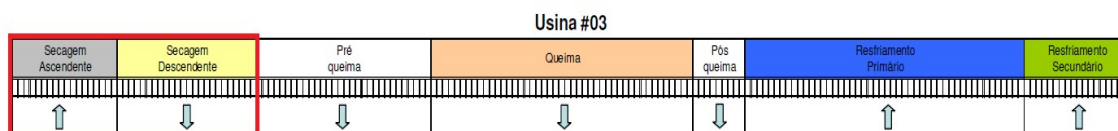


Figura 3.9: Dimensões e etapas do processo de endurecimento do Forno 03 da Samarco (COTA *et al.*, 2009).

3.3.1. Processo de secagem.

A etapa de secagem é a primeira zona do forno a receber as pelotas cruas com umidade na faixa de 10,2 a 11,8% e temperatura próxima do ambiente são expostas a uma temperatura de 320 a 350°C (ATHAYDE, 2013). Nesta etapa, as pelotas devem perder a água não ligada, preservando, entretanto, sua integridade física e resistindo às tensões internas que surgem em função da evaporação da água contida nos poros e às pressões dinâmica e estática dos gases quentes (COTA, 2004).

3.3.1.1. Secagem Ascendente.

Na secagem ascendente, como visto na figura 3.10, o ar quente é proveniente do ventilador de exaustão do resfriamento secundário. A temperatura do gás é de 280°C e a pressão relativa nas caixas de vento, sob os carros de grelha, é da ordem de 500 mmca.

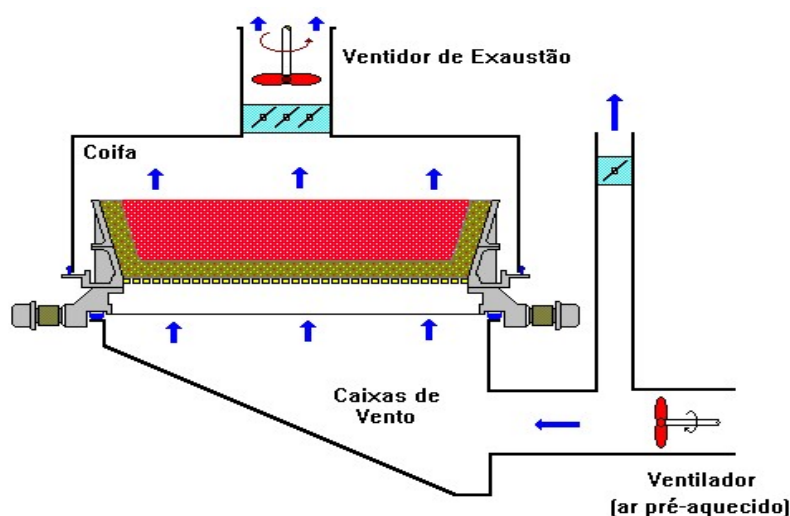
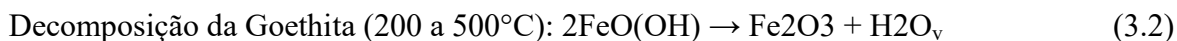
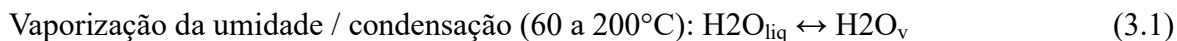


Figura 3.10: Esquema da secagem ascendente (MATOS, 2007).

As principais reações, equações 3.1 e 3.2, que ocorrem nesta zona são a evaporação da umidade contida nas pelotas e o início da transformação da goethita em hematita (250°C), ambas endotérmicas (COTA, 2004).



3.3.1.2. Secagem de corpos aglomerados.

Uma secagem segura requer o conhecimento da distribuição da água nos poros do sistema e a familiaridade com as regras do transporte da água e do vapor através de meios porosos. A secagem reduz gradualmente o índice de água nos aglomerados e, simultaneamente, muda sua distribuição nos mesmos. Neste aspecto, é possível distinguir quatro estágios como pode ser visto na figura 3.11 durante a secagem de um corpo aglomerado (COTA, 2004).

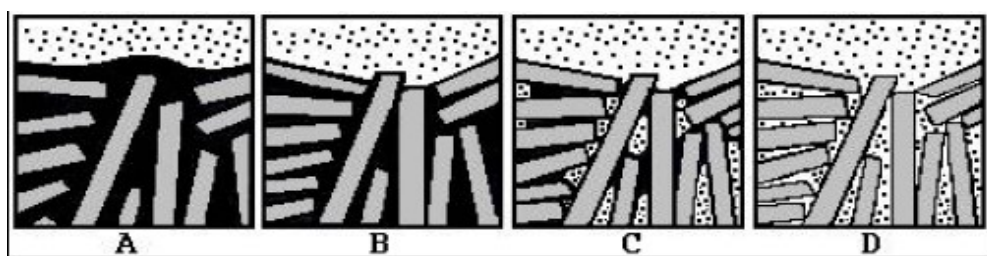


Figura 3.11: Distribuição da água durante a secagem de um corpo de argila (HLAVAC, 1983).

No estágio A, a água forma camadas contínuas que separam as partículas e estas se movem gradualmente ficando mais próximas umas das outras, ocorrendo um encolhimento do aglomerado. No estágio B, as camadas da água contraem tanto que as partículas começam a apresentar contato mútuo nos pontos ou em planos. Permanece apenas a água nos poros entre as mesmas. No estágio C, as películas finas da água restantes no sistema são limitadas à superfície das partículas por forças de adsorção e, assim, são difíceis de serem removidas. Somente no estágio final da secagem a eliminação destas acontece. No estágio D, a pequena quantidade de água é fortemente ligada aos pontos de contato entre as partículas e aos menores poros do sistema.

Desta ideia de distribuição da água, é possível derivar o comportamento de corpos

cerâmicos durante a secagem em temperatura constante, como pode ser visto na figura 3.12. A designação A – C é o mesmo daquele usado na figura 3.11, em três estágios.

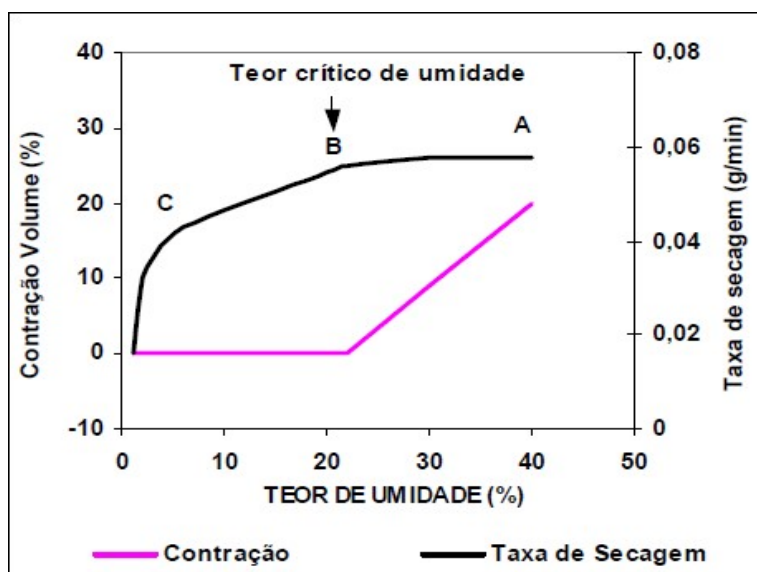


Figura 3.12: Comportamento de um corpo cerâmico durante a secagem (HLAVAC, 1983).

A quantidade de água inicial corresponde a uma massa plástica visto no ponto A. A água forma uma camada superficial contínua e, conseqüentemente, evapora a uma taxa aproximadamente idêntica à taxa da evaporação da água livre na superfície. Esta taxa depende da temperatura, da umidade do ar, da velocidade do ar e, sob circunstâncias constantes, está aproximadamente em queda constante como visto no ponto B. Neste estágio, a contração ocorre em consequência das forças capilares nos poros que agem similarmente como se o objeto estivesse exposto a uma pressão externa. A contração prossegue até que as partículas estejam em contato direto. A taxa de secagem então reduz B-C-0. A taxa de secagem é dada pela quantidade de água evaporada por unidade de superfície por unidade de tempo.

É conveniente distinguir pelo menos dois estágios de secagem a temperatura constante, diferindo em seus mecanismos:

- (A) O período de taxa constante de secagem.
- (B) O período de redução da taxa de secagem.

No primeiro estágio, a secagem segura requer uma taxa de evaporação da superfície de tal maneira que mais água possa ser fornecida pelo fluxo das camadas mais profundas. Sob tais circunstâncias, a contração é uniforme. Se a água não puder ser fornecida na taxa

necessária, a superfície da contração da secagem total e da taxa de secagem. As trincas no material ocorrem quando estas tensões excedem o limite de resistência final. Por isso o processo requer o controle muito cuidadoso neste estágio.

O comportamento de sistemas reais pode diferir das concepções acima nos seguintes pontos:

- (1) A taxa da evaporação da água no primeiro estágio é sempre menor do que aquela de uma superfície livre da água. Este fato é explicado por uma determinada depressão do nível de água.
- (2) O primeiro estágio da secagem que envolve a contração não é sempre separado do estágio subsequente por um índice de umidade crítico definido (ponto B na figura 3.8) e a taxa da remoção da água neste estágio não é completamente constante.
- (3) No primeiro estágio, o movimento da água no sistema capilar não é sempre um mero fluxo do meio líquido. Este pode também envolver o mecanismo da evaporação-condensação se os poros não preenchidos completamente com o líquido estiverem presentes, especialmente quando o gradiente da temperatura no objeto exceder $1^{\circ}\text{C mm}^{-1}$.
- (4) O transporte da água durante a secagem é complicado pela não uniforme e variável distribuição da temperatura em duas maneiras:
 - a. Em consequência da dependência da temperatura da tensão superficial, a água líquida tende a fluir nos capilares no sentido da diminuição da temperatura.
 - b. A viscosidade da água é dependente da temperatura (diminui quando aquecido de 20 a 100°C , 0.01 a 0.0028 dPa/s).

Para um dado objeto, a taxa permissível da secagem pode ser afetada pela viscosidade da água a qual depende da temperatura. A taxa da evaporação superficial, que pode ser controlada amplamente pela umidade, temperatura e velocidade do fluxo do ar, não deve exceder um limite crítico, além do qual a taxa da evaporação excederia a taxa em que a água é fornecida pelas camadas mais profundas. O efeito da temperatura e da umidade do ar na distribuição da água no objeto que está passando por um processo de secagem como pode ser visto na figura 3.13. O diagrama indica que a secagem prosseguirá na maior taxa numa diferença mínima no conteúdo de água (e assim no stress mínimo) no caso de c, que corresponde às condições em secadores de umidade controlada.

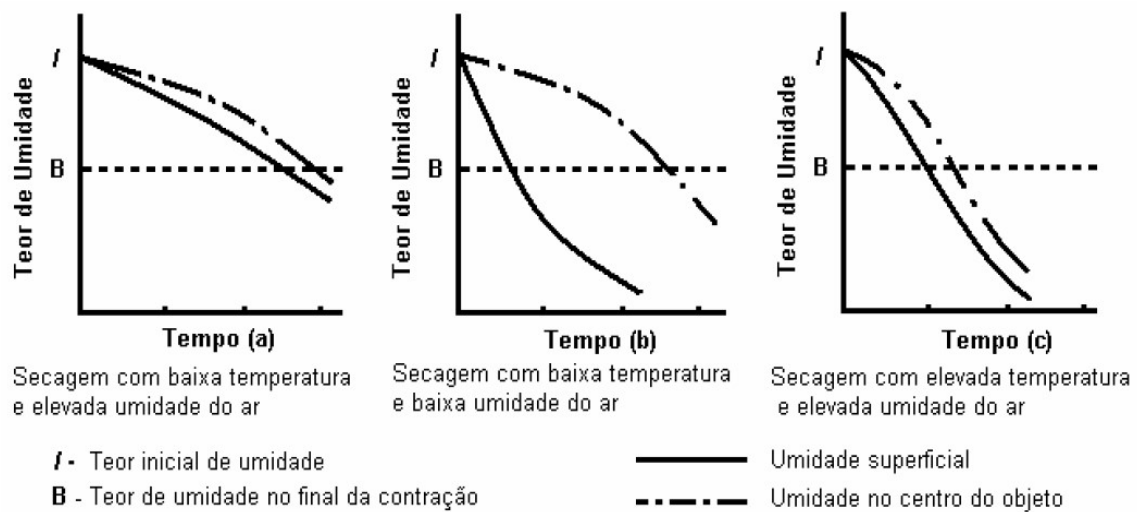


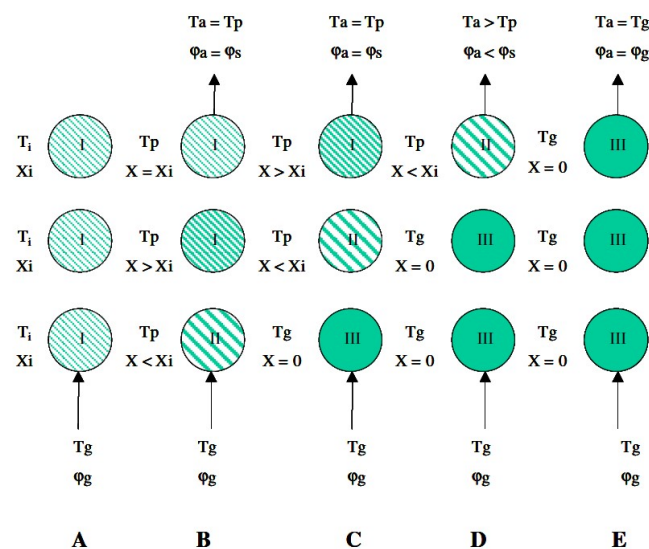
Figura 3.13: Distribuição da umidade durante a secagem de corpos cerâmicos (HLAVAC, 1983).

Um procedimento de secagem incorreto acarretará sérios problemas na operação. Se a eliminação da água e a contração não prosseguirem uniformemente através de toda a massa, as tensões internas na zona seca aumentam e quando estas excedem o limite de resistência, as rachaduras formam na direção do gradiente de umidade, geralmente perpendicular à superfície.

3.3.1.3. Secagem de pelotas de minério de ferro.

Segundo Cota (2004), são dois os tipos de água contidos na pelota. A primeira é proveniente do sistema de filtragem do minério e é fundamental para o processo do pelletamento por ser necessário a formação de um gel que faz a aglomeração dos finos de minério, formando a pelota crua. A segunda é a água de hidratação que vem da estrutura do minério. Esses dois tipos de água saem em temperaturas diferentes durante o processo de secagem no qual é necessário eliminar toda água (ou pelo menos grande parte dela) para que, nos processos de pré-queima e de queima, a pelota não sofra nenhum processo de degradação no momento em que a água sai por evaporação ou da estrutura da pelota crua. Meyer (1980) demonstrou o procedimento de secagem nas três camadas de pelotas do leito como pode ser visto na figura 3.14. No estágio inicial (A), toda a camada está com a umidade (X_i) e temperatura (T_i) uniformes. Na etapa seguinte (B), o gás com a temperatura T_g e uma umidade ϕ_g flui no sentido ascendente do leito. A umidade da parte inferior do

leito é expelida das pelotas e o teor de umidade das pelotas da parte inferior do leito reduz. O ar de secagem fica saturado com vapor e ao entrar em contato com a parte superior do leito (que está na mesma temperatura inicial) condensa, deixando as pelotas muito úmidas. A temperatura da superfície das pelotas aumenta de T_i para T_p pela condensação do vapor e o gás de exaustão fica saturado. Na etapa (C), a camada inferior está seca, a camada do meio está parcialmente seca, a camada superior está muito úmida e o gás de exaustão continua ainda saturado. Nas etapas (D) e (E), o leito tende a ficar completamente seco e a temperatura do gás a igualar-se à temperatura das pelotas. Ao final deste estágio, a temperatura e a umidade do ar de entrada devem ser iguais à temperatura e à umidade do gás de exaustão. Esta seria a condição ideal.



T_i = Temperatura inicial das pelotas cruas
 T_g = Temperatura dos gases de secagem
 X_i = umidade inicial das pelotas cruas
 ϕ_g = Umidade do gás de secagem
 ϕ_s = Umidade do gás saturado

T_a = Temperatura dos gases de saída
 T_p = Temperatura da superfície das pelotas durante secagem
 X = umidade das pelotas durante a secagem
 ϕ_a = Umidade do gás de saída

Figura 3.14: Variação do teor de umidade nas camadas de pelotas durante a secagem (MEYER, 1980).

Pereira e Seshadri (1985) desenvolveram um modelo matemático para a queima das pelotas cruas provenientes de minérios hematíticos em grelha móvel baseado na transferência de massa e calor. Os mecanismos cinéticos que governam a secagem são controversos. No entanto, segundo Pereira e Seshadri (1985), são três etapas que descrevem a cinética da secagem de cada pelota. Inicialmente, a etapa mais lenta é a transferência de massa através da camada limite. Posteriormente, a etapa controladora se torna a difusão do vapor d'água através da pelota e, finalmente, tem-se uma terceira

controlada pela transferência de calor até a frente de vaporização no interior da pelota. A figura 3.15 ilustra bem estes estágios.

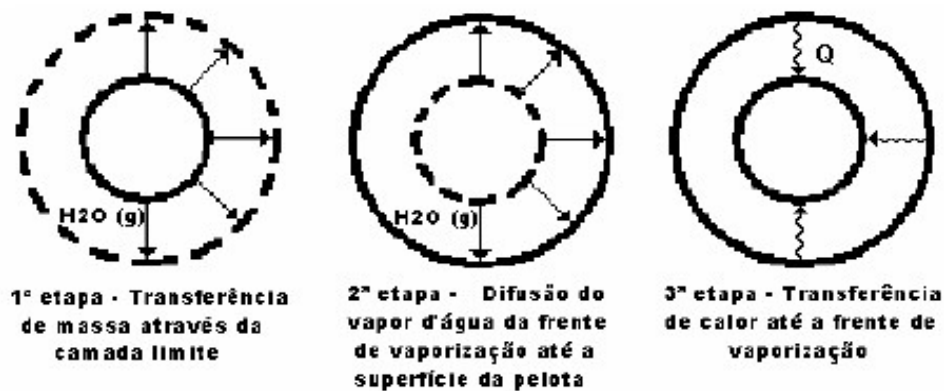


Figura 3.15: Mecanismo de controle da secagem da pelota (PEREIRA e SESHADRI, 1985).

De acordo com o modelo proposto, concluiu-se que:

- Quanto maior o tamanho e a densidade da pelota mais lenta será a secagem. À medida que aumentamos o tamanho das pelotas a taxa de transferência de calor e a difusão de vapor de água das partes mais internas até a superfície é menor como visto na figura 3.16.

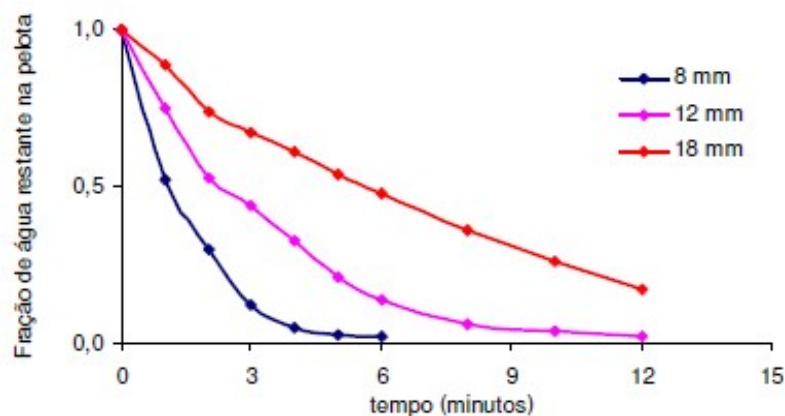


Figura 3.16: Influência do diâmetro das pelotas sobre a secagem (PEREIRA e SESHADRI, 1985).

- Quanto mais densa a pelota mais lento se torna o processo de secagem, pois a difusão do vapor de água da frente de vaporização até a superfície da pelota será menor, da mesma forma, a taxa de transferência de calor até a frente de vaporização como pode ser visto na figura 3.17. A distribuição e o tamanho dos poros são modificados e a permeabilidade do aglomerado para gases e líquidos é reduzida.

Por outro lado, a massa de óxidos, principalmente a hematita, será muito maior para o mesmo volume da pelota e parte do calor será transferido para esta massa antes de chegar à frente de vaporização.

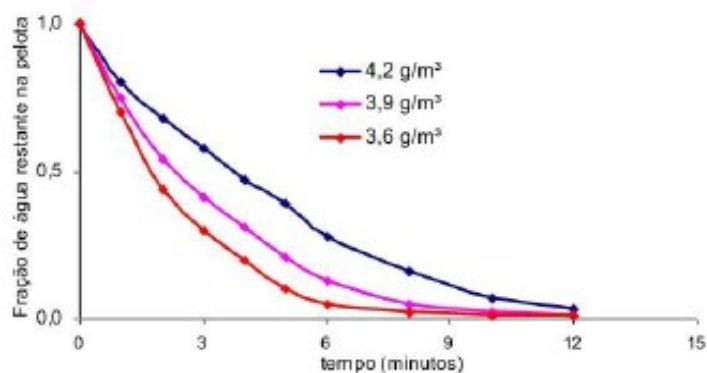


Figura 3.17: Influência da densidade das pelotas sobre a secagem (PEREIRA e SESHADRI, 1985).

- Para maior temperatura do gás a tendência é a secagem se tornar mais rápida como pode ser visto na figura 3.18. Para a mesma vazão de gás, se aumentada à temperatura, a quantidade de calor fornecida ao sistema é maior, o que aumenta a cinética da secagem.

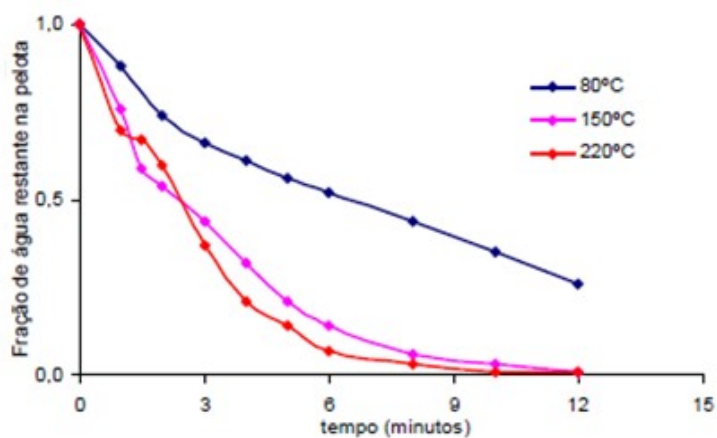


Figura 3.18: Influência da temperatura do gás sobre a secagem (PEREIRA e SESHADRI, 1985).

3.3.1.4. Abordagem Termodinâmica: Energia para remoção de umidade no Processo de Secagem.

Cota (2004) realizou o cálculo de energia necessária para remoção de água por

evaporação durante o processo de secagem através da equação 3.3 (LIMA, 2004).

$$E_v = M_{\text{água}}[H_{fg} + c(100 - T_u) + C_v(T_s - 100)] \quad (3.3)$$

Onde:

E_v = Energia para evaporar a água em kcal.

$M_{\text{água}}$ = Massa de água evaporada.

H_{fg} = Calor latente de vaporização da água = 540 kcal/kg.

c = Calor específico da água = 1 kcal/kg⁰C.

C_v = Calor específico do vapor = 0,45 kcal/kg⁰C.

T_u = Temperatura da pelota úmida.

T_s = Temperatura real na saída da secagem.

Quanto às pelotas, segundo Thurlby (1980) citado por Cota (2004), o calor específico c_p das pelotas para temperaturas abaixo de 950K ou 676,85°C pode ser calculado pela equação 3.4 abaixo:

$$c_p = 0,0816 + 3,163 \times 10^{-4} T_{\text{pelota}} - 9,632 \times 10^{-8} T_{\text{pelota}}^2 \quad (3.4)$$

Substituindo a equação 3.4 na equação 3.5, podemos calcular a quantidade de energia total para aquecimento das pelotas de 25°C a até o início da evaporação da água, ou seja, a 100°C para no nível do mar.

$$Q = m(0,0816 + 3,163 \times 10^{-4} T_{\text{pelota}} - 9,632 \times 10^{-8} T_{\text{pelota}}^2) \Delta T \quad (3.5)$$

3.3.1.5. Influência da velocidade da grelha na etapa de Secagem.

Segundo Athaydes (2013), nos fornos de pelletização, elevadas velocidades da grelha podem levar a valores elevados de umidade na camada superior de pelotas ao final da etapa de secagem ascendente. Ao decorrer a inversão do fluxo de gás, a mesma é deslocada para a parte central do leito, não havendo tempo suficiente para sua total eliminação antes das etapas de pré-queima e queima. A condição ideal seria a eliminação

da umidade livre das pelotas na secagem ascendente e na secagem descendente iniciaria a eliminação da água da estrutura cristalina, principalmente da Goethita, e o aquecimento gradual da camada superior para minimizar o choque térmico ao entrar nas zonas de pré-queima e queima.

3.4. Leito Fixo.

Os reatores de leito fixo pertencem aos reatores mais amplamente aplicados a sua popularidade proveniente de sua eficácia em termos de desempenho bem como os baixos custos operacionais e de capital. Os reagentes fluem através de um reator de leito de enchimento e podem ser tanto na forma gasosa ou na líquida. Em numerosas aplicações, ambas as fases estão presentes (NEMEC e LEVEC, 2005).

3.4.1. Permeabilidade em leito fixo.

Ergun (1952) unificou as expressões de *Blake-Kozeny* e *Burke-Plummer* demonstrando que a queda de pressão em leitos era composta por mais de uma contribuição: uma era associada aos atritos viscosos que predominava na região laminar e outra associada aos efeitos de inércia que predominava no regime turbulento como demonstra a equação 3.6.

$$\frac{(P_o - P_L)}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu V_o}{\varepsilon^3 \phi^2 d^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho V_o^2}{\varepsilon^3 \phi d} \quad (3.6)$$

Por essa equação, observa-se que os parâmetros que favorecem uma diminuição da queda de pressão do gás ao atravessar o leito (tornam o leito mais permeável) são:

- maior fração de vazio, ω ;
- maior diâmetro médio das partículas, d ;
- maior esfericidade, ϕ ;
- menor viscosidade, μ ;
- menor densidade, ρ ;
- menor velocidade do gás, V_o ;

A Figura 3.19 mostra que a equação 3.6 é coerente em todo o campo de velocidades, do laminar ao turbulento, apresentando boa correlação com os dados

experimentais de diferentes autores.

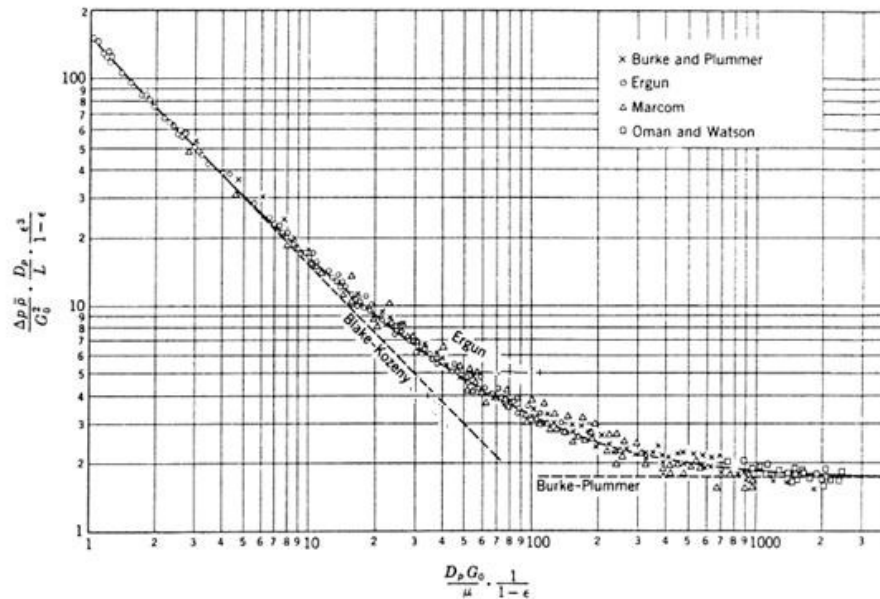


Figura 3.19: Normalização de medidas experimentais através de variáveis reduzidas e as diferentes equações de queda de pressão para leitos porosos (ERGUN, 1952).

Através da equação 3.6 obtêm-se duas constantes de permeabilidade, k_1 e k_2 (ou A e B demonstradas em algumas figuras ao decorrer do trabalho) que estão relacionadas aos diferentes efeitos de interação entre o fluido e o leito. O parâmetro k_1 , permeabilidade Darciana, pode ser associado à perda de energia viscosa durante o escoamento em baixas velocidades. O parâmetro k_2 , permeabilidade não-Darciana, pode ser associado à perda de energia em altas velocidades que é intensificada por fatores como a turbulência do escoamento e a tortuosidade no leito.

Ergun (1952) propôs expressões para a descrição de k_1 e k_2 , equação 3.7, a partir de tais parâmetros para meios porosos granulares não consolidados:

$$K_1 = \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} e K_2 = \frac{\varepsilon^3}{1,75(1-\varepsilon)} \quad (3.7)$$

3.4.1.1. Esfericidade da partícula.

Para comparar o empacotamento de partículas geometricamente diferentes e o equivalente da partícula de diâmetro d_p , deve ser definido transformando a forma de partículas para um tamanho de partícula correspondente (ARIS, 1957). Esta definição não

se elimina completamente a influência da forma da partícula (ARIS, 1957), especialmente para as partículas que contêm orifícios (BRAUER, 1957) de modo que o fator de forma é utilizado na correlação (KAST, 1964). Considerando-se partículas com uma relação de aspecto alta, a queda de pressão depende fortemente da sua orientação em relação à direção principal do fluxo (HAPPEL, 1959; SULLIVAN e HERTEL, 1940). Um efeito correspondente foi encontrado para o arranjo de esferas regulares (MARTIN, McCABE, & MONRAD, 1951).

$$\text{esfericidade} = \varphi = \frac{\text{área da esfera}}{\text{área da partícula}} \quad (3.8)$$

3.4.1.2. Efeito de parede.

Existe uma zona de parede onde a porosidade média é maior do que no centro do leito, uma vez que a distribuição espacial das partículas deve estar em conformidade com a forma da parede. Stanek (1994) afirma que as heterogeneidades introduzidas pelas paredes do recipiente reduzem a queda de pressão, enquanto Mehta e Hawley (1969) relatam um aumento geral da queda de pressão devido ao atrito de parede adicional. Eisfeld e Schnitzlein (2001) realizaram uma comparação de perda de pressão entre diferentes formas de partículas e fontes através da relação de D/d_p , porosidade média do leito e número de Reynolds como ilustra a tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros para análise da perda de pressão no leito (EISFELD e SCHNITZLEIN, 2000).

Source	Particles	Data	D/d_p		$\bar{\epsilon}$		Re_{d_r}	
			min.	max.	min.	max.	min.	max.
Andersson (1963)	Spheres	243	6.53	56.9	0.348	0.410	0.07	1315
Bernard and Wilhelm (1950)	Spheres	95	6.1	56.5	0.386	0.425	2	2324
	Cubes	24		18.25		0.379	8	680
	Cylinders	20		7.84		0.413	85	1871
	Spheres	219	5.379	39.179	0.363	0.421	0.8	1070
Ergun and Orning (1949)	Spheres	53	44.561	51.107	0.330	0.352	0.4	30
Gupte (1970)	Spheres	301	50	250*	0.366	0.640	0.01	184
Jeschar (1964)	Spheres	108	6.3091	51.2821	0.375	0.421	1	16884
Leva et al. (1951)	Spheres	335	1.624	13.466	0.354	0.651	1	17635
	Cylinders	110	2.344	8.726	0.362	0.659	1	9310
	Spheres	338	3.574	22.026	0.355	0.460	16	1445
Morcom (1946)	Spheres	15	3.663	6.607	0.425	0.45	12	268
	Nodules	3		10.569		0.39	239	561
	Tablets	26	5.778	9.11	0.348	0.395	17	588
	Cylinders	28	9.566	29.613	0.356	0.368	9	563
Oman and Watson (1944)	Granules	31	35.059	35.119	0.4250	0.516	251	835
	Spheres	30	18.446	18.642	0.3775	0.469	496	1428
	Cylinders	22	13.801	13.863	0.361	0.461	893	1867
Reichelt (1972)	Spheres	201	1.73	14.32	0.366	0.681	44	14896
	Cylinders	153	2.11	25.60	0.363	0.665	14	10511
Saunders and Ford (1940)	Spheres	21	33.755	34.335	0.375	0.38	58	472
Wentz and Thodos (1963)	Spheres	15		11.38	0.615	0.882	1460	7661
Total:		2391	1.624	250	0.330	0.882	0.01	17635

*Since the exact values are not given for the individual data sets, a general value of $D/d_p = 100$ is assumed.

3.4.1.2.1. Efeito de parede em dimensões finitas.

De acordo com Eisfeld e Schnitzlein (2001), é esperada uma queda de pressão pela influência do tubo sobre a partícula (efeito de parede) proporcional do diâmetro D/d_p .

Carman (1937) citato por Eisfeld e Schnitzlein (2001) concluiu que as fronteiras externas oferecem uma resistência adicional devido ao atrito de parede. Por outro lado, Benenati e Brosilow (1962), Roblee, Baird e Tierncy (1958) citados por Eisfeld e Schnitzlein (2001) concluíram que as fronteiras externas forçam as partículas a se organizarem de tal forma que uma região de aumento da fração de vácuo é formada, estendendo-se aproximadamente metade de um diâmetro de partícula das paredes para o leito. Portanto, as opiniões sobre o efeito de parede resultante são contraditórias.

Eisfeld e Schnitzlein (2001) realizou uma comparação entre vinte e quatro diferentes correlações de perda de pressão a partir da literatura e aplicou a medida estatística *Relative root-mean-square deviation* (RRMSD) como mostra a tabela 3.2.

Tabela 3.2: RRMSD para modelamento da perda de pressão com efeito de parede a partir de equações de perda de pressão (EISFELD e SCHNITZLEIN, 2001). Dados utilizados da Tabela 3.1.

Equation	Wall corr.	Relative root mean square deviation		
		Spheres	Cylinders	All particles
Blake equation (1) Leva (1947); Leva et al. (1951)		0.1893	0.2197	—
Ergun equation (2), $n_{max} = 2$				
Andersson (1963)	•	0.1819	0.2409	0.1943
Avontuur and Geldart (1996) ^a		0.1829	0.2354	0.1928
Avontuur and Geldart (1996) ^b		0.1845	0.3126	0.2122
Comiti and Renaud (1989)	•	0.2922	—	—
Ergun (1952)		0.1905	0.2371	0.1984
Foscolo, Gibilaro, and Waldram (1983)		0.6114	0.5393	0.5962
Foumeny et al. (1993)	•	0.8809	0.8522	0.8667
Handley and Heggs (1968)		0.3654	—	—
Liu, Afacan, and Masliyah (1994)	•	0.2719	0.2208	0.2640
Macdonald et al. (1979) ^c		0.2149	0.2036	0.2123
Mehta and Hawley (1969)	•	0.2754	0.2784	0.2736
Molerus (1977)		0.1870	0.2925	0.2076
O'Neill and Benyahia (1997)	•	0.9974 ^d	0.9884 ^e	—
Paterson, Burns, Griffiths, Kesterton, and Paveley (1986)	•	0.3001	0.2603	0.2952
Reichelt (1972)	•	0.1684	0.1673	—
Zhavoronkov et al. (1949)	•	0.1805	0.3082	0.2141
Carman equation (2), $n_{max} = 1.9$				
Barthels (1972)		0.1645	0.3018	0.1933
Brauer (1960)		0.1693	0.2636	0.1873
Carman (1937)		0.1889	0.3094	0.2123
Kast (1964)		0.1728	—	—
Alternative approaches				
Achenbach (1982)		0.2105	0.2973	0.2253
Molerus and Schweinzer (1989)		0.2890	0.6052	0.3563

^aEquation for minimum absolute deviation.

^bEquation for minimum relative deviation.

^cEquation for smooth particles.

^dComparison only with data in the range of definition of the coefficients, i.e, $5 < D/d_p < 25$.

^eComparison only with data in the range of definition of the coefficients, i.e, $3 < D/d_p < 27$.

A abordagem da Reichelt (1972) de corrigir a equação Ergun (1952) para o efeito de parede é o mais promissor para o número de Reynolds de $0,01 > Re > 17.635$, proporções de razões de diâmetro de $1.624 > D/d_p > 250$ e uma porosidade média $0.330 > \varepsilon > 0,882$. A equação de Reichelt (1972) (Equação 3.9) é dada como:

$$\psi = \frac{K_1 A_w^2 (1 - \varepsilon_{med})^2}{\Re_{dp} \varepsilon_{med}^3} + \frac{A_w (1 - \varepsilon_{med})}{B_w \varepsilon_{med}^3} \quad (3.9)$$

Com as correções do efeito de parede, tem-se:

$$A_w = 1 + \frac{2}{3 \left(\frac{D}{d_p} \right) (1 - \varepsilon_{med})} \quad (3.10)$$

$$B_w = [k_1 \left(\frac{D}{d_p}\right)^2 + k_2]$$

Esta é uma equação Ergun do tipo em que a contribuição das paredes confinantes com o raio hidráulico é responsável analiticamente pelo coeficiente A_w . Além disso, a função B_w foi introduzida descrevendo empiricamente o efeito da porosidade das paredes em números de Reynolds elevado. Esta correlação foi usada como ponto de partida para a melhoria do ajuste dos coeficientes K_1 , k_1 , e k_2 para a base de dados experimentais referenciados na tabela 3.2. Os resultados da otimização destes parâmetros são listados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Coeficientes da Equação de Reichelt (1972) e Einfeld e Schnitzlein (2000).

Particle shape	Coefficients			Accuracy		
	K_1	k_1	k_2	σ	f_{95}	f_{99}
Spheres	154	1.15	0.87	0.1613	0.31	0.48
Cylinders	190	2.00	0.77	0.1586	0.29	0.38
All particles	155	1.42	0.83	0.1773	0.34	0.47

3.4.1.2.2. Efeito de parede aplicado no carro de grelha.

Cota (2008) realizou testes utilizando pelotas da camada de fundo e pelotas cruas da alimentação da grelha coletadas na alimentação das usinas 1 e 2 da Samarco. A figura 3.20 demonstra os resultados obtidos nos testes. Nota-se que a diferença de permeabilidade entre as amostras é muito significativa.

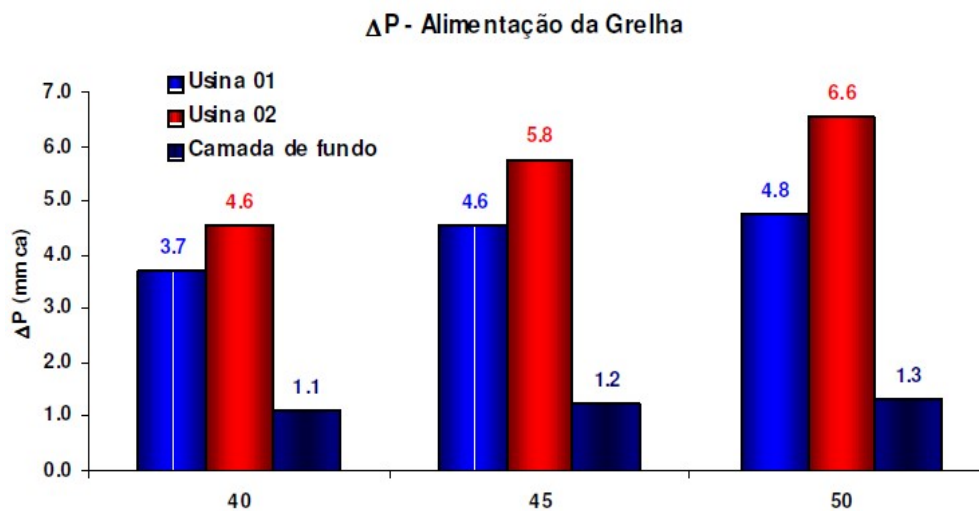


Figura 3.20: Resultados dos testes de permeabilidade com pelotas cruas (COTA, 2008).

Considerando a distribuição das pelotas cruas e queimadas no carro, figura 3.21, é possível, e atualmente ocorre, um fluxo preferencial de gás na camada lateral do carro, como ilustrado na figura 3.21. Este fluxo preferencial pode ser minimizado melhorando a permeabilidade das pelotas cruas com a eliminação das frações mais finas das pelotas através de um peneiramento mais eficiente, com a redução das alturas de quedas nos pontos de transferência e com a melhoria da qualidade das pelotas cruas (COTA, 2008).

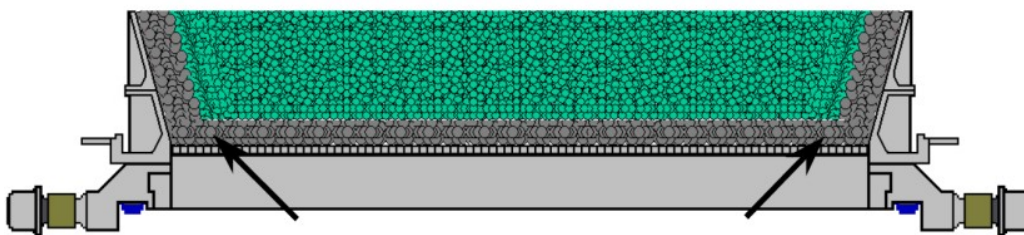


Figura 3.21: Desenho esquemático da disposição das pelotas no carro de grelha (COTA, 2008).

Toda camada de forramento é peneirada (pelotas já queimadas) a fim de permitir satisfatória passagem de ar na camada de fundo do carro. Portanto, um delta de 400 mmca pode ser encontrado entre a camada de forramento da lateral dos carros de grelha e o leito de pelotas cruas, levando o favorecimento da passagem do ar mais próximo a esta região, conforme previsto na figura 3.22.

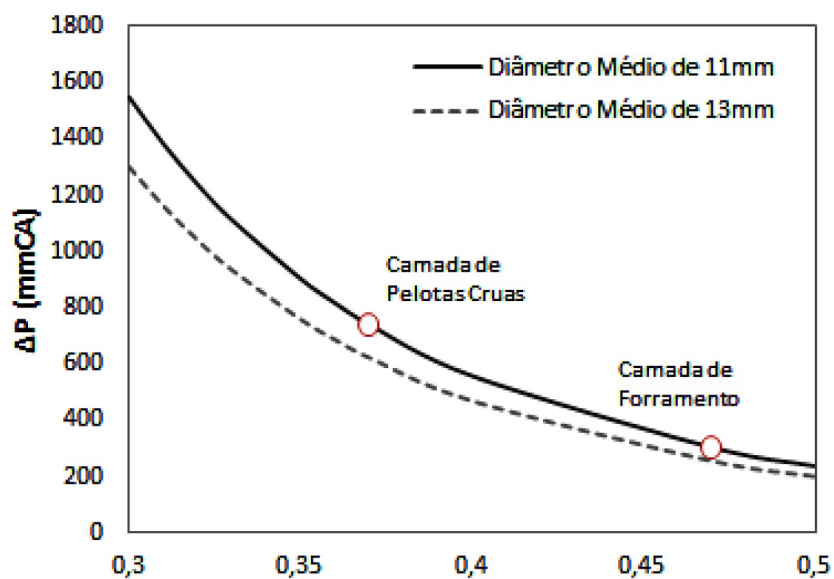


Figura 3.22: Influência da fração de vazios e repartições do leito de pelotas da queda de pressão no leito de pelotas.

A distribuição não uniforme dos fluxos de gases pode levar a heterogeneidade da qualidade física final do aglomerado na região central do forno já que esta pode ser prejudicial e denominada por Batterhan *et al.* (1985) como trajetória isotérmica da pelota.

3.4.1.3. Porosidade em leito binário.

Segundo Koo e Lee (2013), os leitos empacotados muitas vezes contêm partículas com distribuição de tamanho. O efeito do tamanho da distribuição do empacotamento na permeação do fluido pode ser compreendido através da análise do processo de empacotamento binário. O empacotamento binário fornece variáveis de processos adicionais tais como a relação de tamanho e a razão de mistura das espécies de partículas comparada ao empacotamento de tamanho igual. A densidade de empacotamento, ou seja, a fração do volume total das partículas depende do tamanho e da proporção de mistura de duas espécies de partículas. O empacotamento binário aumenta a densidade de empacotamento de partículas, preenchendo dois tipos de vazio. Um deles é o vazio entre as partículas grandes e o outro é o vazio virtual entre as pequenas partículas a ser efetivamente substituída por partículas de grandes dimensões.

Desvios entre dados experimentais e previsões teóricas catalisaram o desenvolvimento de pesquisas de forma a explicar os referidos desvios (DIAS *et al.*, 2004).

A porosidade total (ε) pode ser dada pelo produto de porosidades individuais: $\varepsilon_D = \varepsilon_D(x_D)$ e $\varepsilon_d = \varepsilon_d(x_d)$, onde ε_D é a fração de vazios gerada pelas partículas grandes no volume total da mistura e ε_d é a fração de vazios gerada pelas partículas pequenas no restante volume de vazios da mistura.

$$\varepsilon = \varepsilon_d \cdot \varepsilon_D \quad (3.11)$$

O modelo de mistura linear (DIAS *et al.*, 2004) pode ser aplicado aos empacotamentos binários quando a razão entre os diâmetros das partículas de pequena dimensão (d) e maior dimensão (D) é muito pequena ($d_{dp}/d_{Dp} \rightarrow 0$).

No modelo de mistura linear, para o caso extremo de $d_{dp}/d_{Dp} = 0$ a porosidade de um sistema binário de partículas esféricas pode ser definida por (YU e STANDSIH, 1991; ABE e HIROSUE, 1982):

$$\varepsilon = \frac{(1-x_D)\varepsilon_d^0}{(1-\varepsilon_d^0 x_D)} \quad x_D \in [0, x_{Dmin}] \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1-\varepsilon_D^0}{x_D} x_D \in [x_{Dmin}, 1] \quad (3.13)$$

em que a porosidade mínima absoluta $\varepsilon_{Min} = \varepsilon_D^0 \varepsilon_d^0$ ocorre para uma fração volúmica de partículas de maior dimensão, x_{Dmin} :

$$x_{Dmin} = \frac{1-\varepsilon_D^0}{1-\varepsilon_d^0 \varepsilon_D^0} \quad (3.14)$$

em que ε_{0d} e ε_{0D} são, respectivamente, a porosidade dos leitos monocomponente das partículas de menor e maior dimensão. A porosidade é representada neste modelo por dois ramos, como pode ser visto na figura 3.23. O ramo direito (equação 3.13) encontra-se enriquecido com partículas de maior dimensão, formando um esqueleto com porosidade (ε_{0D}). Este esqueleto mantém-se inalterado com a adição de partículas de menor dimensão até se atingir o ponto (x_{Dmin} , ε_{Min}).

Adições de partículas de menor dimensão para além deste ponto afastam as partículas maiores, destruindo o esqueleto das mesmas. Entra-se, deste modo, no ramo esquerdo do modelo (equação 3.12) rico em partículas menores, encontrando-se estas

agrupadas com porosidade ε_{0d} .

Admitindo ε_{0d} e ε_{0D} igual a 0.4 valor usual (MOTA *et al.*, 1999) utilizando a equação 3.11 temos $\varepsilon_{\text{Min}} = \varepsilon_{0D} \varepsilon_{0d} = 0.16$ e $x_{D\text{min}} = 0.71$. Na figura 3.23, a intersecção dos dois ramos representa o ponto (0.71, 0.16).

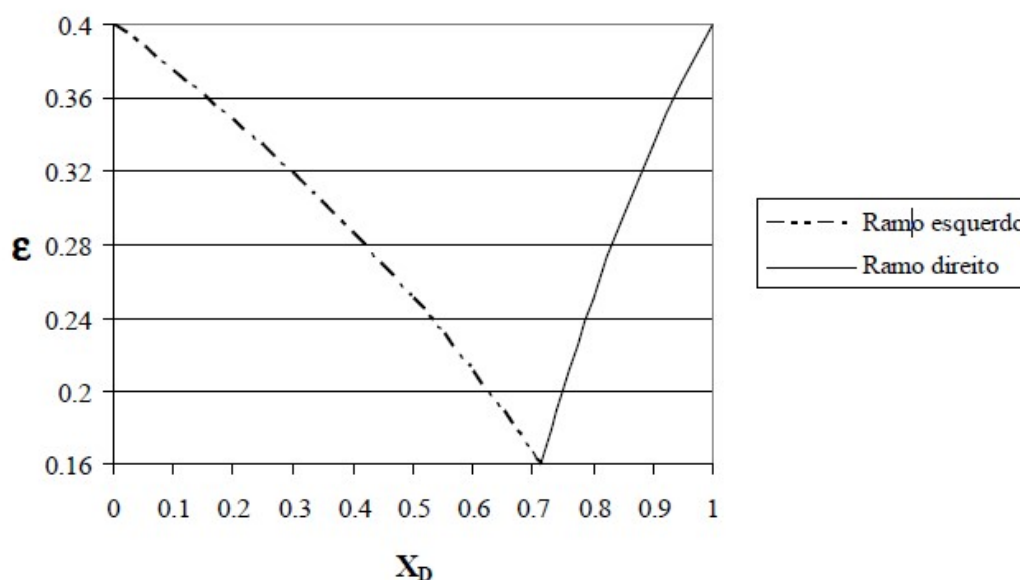


Figura 3.23: Representação da equação (3.12) (ramo esquerdo) e equação (3.13) (ramo direito) para ε_{0d} e ε_{0D} iguais a 0.4 (MOTA *et al.* 1999).

A transição do modelo clássico de misturas lineares $d_{dp}/d_{Dp} = 0$ para o sistema real $d_{dp}/d_{Dp} > 0$ de empacotamento binário requer a introdução de funções de correção nas equações 3.12 e 3.13.

O ponto de intersecção dos dois ramos corresponde a uma mistura onde a quantidade de partículas grandes $x_D = x_{D\text{min}}$ é suficiente para construir um "esqueleto", estando os poros deste esqueleto aproximadamente preenchidos por partículas pequenas, mecanismo de enchimento, como pode ser visto na figura 3.24 (a). No entanto, durante o processo de mistura/empacotamento, as partículas pequenas são capazes de se intrometerem entre os pontos de contato das partículas maiores, quebrando o esqueleto como pode ser visto na figura 3.24 (b), resultando em um aumento da porosidade do leito relativamente à situação $d_{dp}/d_{Dp} \rightarrow 0$.

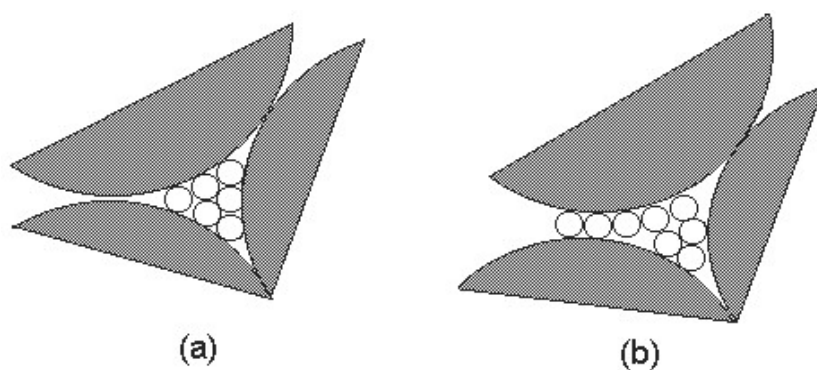


Figura 3.24: Representação esquemática do arranjo de pequenas partículas entre partículas grandes: (a) partículas pequenas preenchem o espaço vazio entre o esqueleto de partículas maiores, (b) partículas pequenas intrometem-se no esqueleto de partículas grandes.

Dias *et al.* (2004) investigaram misturas com uma razão de tamanho de partícula de $d_{Dp}/d_{dp} = 10.22, 13.3, 20$ e 26.7 , $d_{dp}/d_{Dp} = 0.098, 0.075, 0.05$ e 0.0375 , respectivamente. Para valores baixos de d_{dp}/d_{Dp} $0.075, 0.05$ e 0.0375 , a porosidade seguiu o modelo linear, como pode ser visto na figura 3.25, enquanto que para $d_{dp}/d_{Dp}=20060.098$, o comportamento da porosidade na região da porosidade mínima é mais suave, sendo a porosidade bem descrita pelo modelo contínuo de Mota *et al.* (1999).

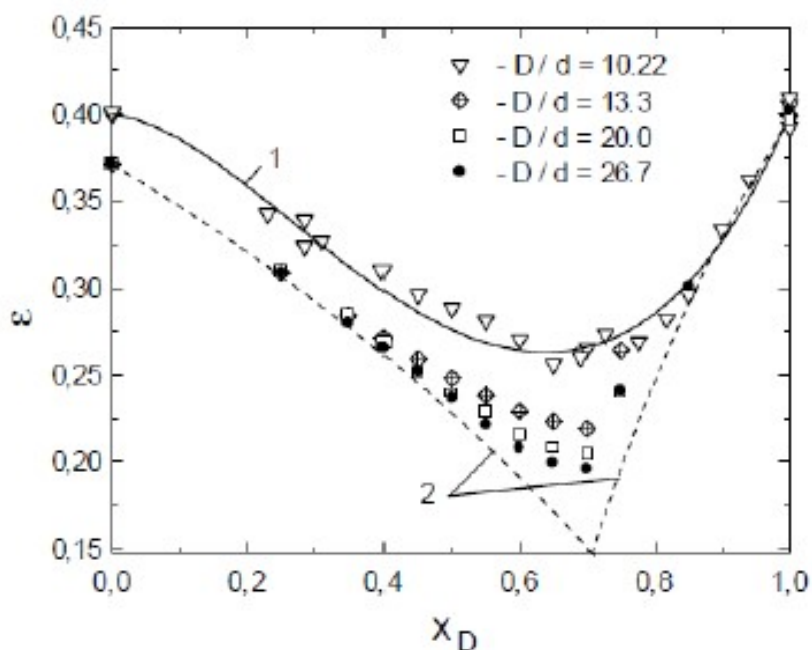


Figura 3.25: Valores de ϵ para diferentes valores de d_{Dp}/d_{dp} .

Para curva $d_{Dp}/d_{dp} = 10.22$, $\epsilon_D^0 = \epsilon_d^0 = 0.4$, e a curva de um modelo contínuo de

Mota *et al.* (2001). A curva 2 é definida pelas condições limite em $d_{dp}/d_{Dp} \rightarrow 0$ Modelo por ramos, equações 3.12 e 3.13 para $\varepsilon_d^0=0.371$ e $\varepsilon_D^0=0.4$ (DIAS *et al.*, 2004).

3.4.1.4. Porosidade de leitos multicomponentes.

A queda de pressão é extremamente sensível às mudanças nos espaços vazios do leito como tem sido observado repetidamente (GUPTE, 1970); (LEVA, 1947); (LEVA *et al.*, 1951); (ROSE, 1945).

A presença de uma maior fração de partículas finas que ocupam os espaços existentes entre as partículas maiores confere as pelotas uma maior compactação e conseqüentemente maior densidade, que são traduzidas em resistência física, especialmente quando se trata de esforços de compressão (COTA, 2004).

Rumpf e Gupte (1971) analisaram o efeito de várias distribuições de partículas esféricas sobre uma gama relativamente ampla de porosidades ($0,35 < \varepsilon < 0,70$) e proporam uma dependência diferente sobre espaços vazios. Para a região de empacotamento ($0,35 < \varepsilon < 0,55$), a função dos espaços vazios proposto (RUMPF e GUPTE, 1971) não é muito diferente do modelo capilar, considerando-se uma diferença média de apenas cerca de 10%.

Os resultados (RUMPF e GUPTE, 1971) foram obtidos a partir de espaços vazios superiores normalmente encontrados em leitos compostos por partículas esféricas e, portanto, poderia levar o leito a um empacotamento não uniformemente. Assim, considerou-se necessário verificar novamente o efeito dos espaços vazios na queda de pressão com as distribuições mais natural das partículas.

Nemec e Levec (2005) obtiveram variedades de espaços vazios do leito a partir de dois procedimentos diferentes de empacotamento e concluíram que a equação de *Ergun* é bem adequada para a descrição do fluxo através de reatores de leito fixo. Em tais casos, a gama de espaços vazios foi bastante estreita ($0,35 < \varepsilon < 0,55$). A abordagem de utilizar a equação *Ergun* com constantes para os termos viscosos e inerciais correspondentes aos diferentes tipos de formas de partículas foi avaliada em termos da sua capacidade para prever os dados experimentais e comparando-o com outras abordagens existentes. As comparações (tabela 3.4) são feitas por meio de desvio médio relativo (MRD, *Mean Relative Deviation*) aos valores como indicadores estatísticos.

Tabela 3.4: Comparação das previsões do modelo com os dados experimentais disponíveis em termos de MRD como parâmetro estatístico (EISFELD e SCHNITZLEIN, 2001).

Shape	d_s (mm)	ε (dimensionless)	Source	No. of data	MRD (%)		
					Upg. EE	Uni. EC	NN
Spheres	1.66–3.50	0.382–0.443	This work	104	4.0	11.1	42.2
Spheres	3.0–6.0	0.382–0.391	Lakota et al. (2002)	75	8.1	16.8	19.9
Cylinders	2.62–4.03	0.368–0.526	This work	162	9.0	16.4	20.6
Cylinders	2.66–3.66	0.323–0.682	Pahl (1975)	407	10.7	18.0	59.9
Cylinders	5.72	0.363	Reichelt (1972)	9	4.9	6.8	97.3
Cylinders	7.27	0.35	England and Gunn (1970)	29	5.3	6.2	104
Hollow cylinders	4.25 ^a	0.474	This work	16	5.6	21.6	78.5
Rings	8.42	0.583	Lakota et al. (2002)	26	2.4	58.2	88.0
Rings	7.27 ^a	0.53	England and Gunn (1970)	28	20.7	18.7	82.0
Trilobes	2.54	0.466–0.511	This work	32	9.1	48.0	55.7
Quadralobes	2.13	0.471–0.502	This work	34	8.5	46.5	59.9

Upg. EE, Upgraded Ergun Equation (This work—Table 4); Uni. EC, Universal Ergun constants (Macdonald et al., 1979); NN, Neural network approach (Iliuta et al., 1998).

^aInner void not taken into account.

3.4.1.5. Tortuosidade.

Outra característica importante para o estudo de permeabilidade de um leito é a tortuosidade que propõe a difusão do fluido em meios porosos. Como mostrada na tabela 3.5, a tortuosidade (T) é prevista como uma função decrescente dos espaços vazios do leito (ε) devido ao aumento do escoamento sinuoso do fluido. Além disso, a tortuosidade não depende do tamanho das partículas (LANFREY *et al.*, 2009).

Tabela 3.5: Correlações de tortuosidade do leito (LANFREY *et al.*, 2009).

Correlation	Reference
$T = \pi / 2$	Bartell and Osterhof (1928)
$T = \sqrt{2}$	Carman (1937)
$T = \sqrt{1 - \ln(\varepsilon^2)}$	Boudreau (1996)
$T = 1 - 0.41 \ln(\varepsilon)$	Comiti and Renaud (1989)

Os valores obtidos são geralmente de um modelo dependente e restrito aos leitos de esferas (MOTA *et al.*, 2001). Dependendo de fatores como o arranjo do leito, a homogeneidade média, a forma do leito, os valores tortuosidade em camadas preenchida uniformemente com esferas podem variar 1,7- 4 (DULLIEN, 1975); (YU *et al.*, 1996). Para um leito de esferas, Mota *et al.* (1998) relataram valores tortuosidade na faixa de 1.47-1.53, enquanto Gunn (1987) recomenda valores tortuosidade de 1,4 para esferas. Outros valores relatados variam de 1,25-1,79 (BEAR, 1972).

3.4.1.6. Tortuosidade em leitos binários.

Pode considerar-se que a tortuosidade de um leito de misturas binárias é resultante da combinação de dois componentes. O primeiro componente representa a tortuosidade gerada nos espaços vazios do leito pelo esqueleto das partículas grandes T_D designada por macro-tortuosidade (MOTA *et al.*, 1999). A segunda componente representa a tortuosidade gerada pelas partículas de menor dimensão T_d denominada por micro-tortuosidade (MOTA *et al.*, 1999) e (DIAS *et al.*, 2006) que calcularam os valores de n para a equação 3.15 a partir da porosidade, o diâmetro médio das partículas presentes nos leitos binários, a tortuosidade usando a equação 3.16.

$$n = \frac{\ln \left\{ \frac{36 K K_0 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_{av}^2} \right\}}{2 \ln (\varepsilon)} \quad (3.15)$$

A tortuosidade segundo Dias *et al.* (2006):

$$T = \frac{1}{\varepsilon^n} \quad (3.16)$$

Ficou demonstrado em Dias *et al.* (2006) que n variava entre 0.5, leitos mono-componente, e aproximadamente 0.4, leitos binários na região da mínima porosidade, isto é, $x_D = 0.7$. A razão para esta variação de n foi explicada (DIAS *et al.*, 2006) pelos efeitos de distorção do arranjo das partículas pequenas no empacotamento, distorções que ocorrem perto da superfície das partículas grandes. Na figura 3.26 é esquematizado um empacotamento binário onde são apresentados diferentes efeitos de distorção. Dois tipos de perturbações ou efeitos de distorção podem ser considerados: quando x_D está abaixo da região de porosidade mínima, como pode ser visto na figura 3.26 (a), a principal perturbação é o conhecido efeito de parede, o que conduz as maiores porosidades perto da superfície das esferas maiores. Quando x_D se aproxima da região de porosidade mínima, como pode ser vista na figura 3.26 (b), as partículas pequenas intrometem-se nos pontos de contato do esqueleto das partículas grandes e podem observar-se também zonas mortas na região dos pontos de contato das partículas maiores, livres de partículas pequenas. As

perturbações são mais severas na região da mínima porosidade em virtude da existencia de várias zonas de *by-pass* para o fluido e, conseqüentemente, são obtidos valores de n baixos com cerca de 0.4 (DIAS *et al.*, 2006).

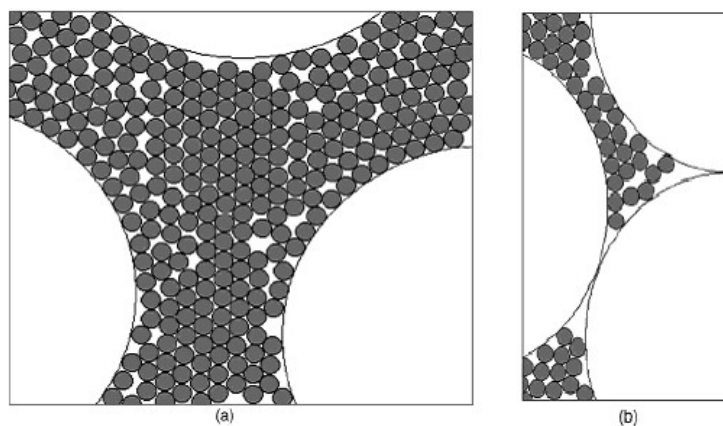


Figura 3.26: Representação de um empacotamento binário em $dD_p/dd_p = 20$ mostrando os efeitos de distorção na fração de partículas menores (a) x_D abaixo da formação do esqueleto na mistura (b) x_D na região de porosidade mínima.

3.5. Convecção forçada externa para uma esfera.

De acordo com Incropera e Dewitt (2003) citado por Seshadri *et al.* (2010), para escoamento em torno de uma esfera, o número de *Nusselt* médio ao longo da superfície pode ser estimado a partir da seguinte correlação vista na equação 3.17.

$$Nu_d = 2 + \left(0,4\Re_d \frac{1}{2} + 0,06\Re_d \frac{2}{3} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.17)$$

O número de *Nusselt* representa o aumento da transferência de calor através da camada do fluido como resultado da convecção em relação da condução do mesmo fluido em toda a camada. Quanto maior for o número de *Nusselt* mais eficaz será a convecção (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Quando o número de Reynolds tende a zero (0) o número de *Nusselt* tende a dois (2). Este valor corresponde a uma situação onde o fluido está completamente estagnado, considerando apenas a transferência de calor por condução em torno de uma esfera (SESHADRI *et al.*, 2010).

A partir da equação 3.17, Seshadri *et al.* (2010) mostrou que o número de *Nusselt* para convecção forçada em torno de uma esfera é uma função do Número de *Reynolds* e o Número de *Prandtl* é da relação entre a viscosidade cinemática do fluido e da superfície da esfera. Como a taxa de transferência de calor é expressa pela lei de Newton:

$$Q = A h \Delta T \quad (3.18)$$

Onde;

A: área da esfera, e

h: coeficiente de transferência de calor por convecção.

e o coeficiente de transferência de calor por convecção é dado por

$$h = \frac{Nuk}{d_p} \quad (3.19)$$

Onde;

k: condutividade térmica do fluido [W/mK], e

d_p : diâmetro da partícula [m].

Portanto, rearranjando as equações 3.17, 3.18 e 3.19, a taxa de transferência de calor por convecção para escoamento em torno de uma esfera também pode ser expressa pela equação 3.20.

$$Q = A \left[2 + \left(0,4 \Re_d \frac{1}{2} + 0,06 \Re_d \frac{2}{3} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \frac{k T}{d_p} \quad (3.20)$$

3.6. Transferência de calor em leitos fixos.

Segundo Manohar e Adeyanju (2009), a transferência de calor em leitos fixos é atualmente utilizada para descrever uma variedade de fenômenos, a saber: a transferência de calor por convecção a partir das paredes do leito para o fluido, a transferência de calor por convecção a partir das partículas para o fluido que flui através do leito, por vezes referido

como o modelo fluído-partícula.

A eficiência da condutividade térmica depende tanto das propriedades térmicas do leito fixo quanto da taxa do fluido que flui no leito e que, nas correlações encontradas experimentalmente, geralmente são expressas em função de *Reynolds* (MANOHAR e ADEYANJU, 2009).

A transferência de calor em um leito fixo com esferas de mesmo tamanho consiste na condução do fluido dentro do leito e da convecção entre o leito e o ar de secagem (MANOHAR e ADEYANJU, 2009).

Segundo Gupta e Thodos (1962) citado por Manohar e Adeyanju (2009), o fator de transferência de calor em leitos fixos com esferas de mesmo tamanho pode ser expresso pela equação empírica 3.21.

$$j_h = \frac{2,06}{\varepsilon \Re_p^{0,58}}, \text{ para } 90 \leq \Re_p \leq 4000 \quad (3.21)$$

Onde j_h é o fator de transferência de calor e \Re_p corresponde ao número de *Reynolds*. Através de correlações descritas por Gupta e Thodos (1964), citados por Perry (2007), foi possível demonstrar a equação 3.21 para transferência de massa e a equação 3.22 para transferência de calor.

$$N_{Sh} = \frac{2,06}{\varepsilon} N_{\Re}^{0,425} N_{Sc} \frac{1}{3} \quad (3.22)$$

Onde N_{Sh} é o número de *Sherwood* e o N_{Sc} é o número de *Schmidt*. Analogamente, para a transferência de calor temos:

$$N_{Nu} = \frac{2,06}{\varepsilon} N_{\Re}^{0,425} N_{Pr} \frac{1}{3} \quad (3.23)$$

Onde N_{Nu} é o número de *Nusselt* e o N_{Pr} é o número de *Prandtl*.

4. METODOLOGIA E MATERIAIS

Tendo em vista que os parâmetros de controle operacionais (P.C.O) da alimentação do forno, parâmetros estes que caracterizam o leito de pelotas cruas entregues pelo pelotamento utilizados na planta são; (a) diâmetro médio das pelotas cruas; (b) % de pelotas cruas entre 16 mm e 8 mm das pelotas cruas; (c) % de pelotas cruas entre 8 mm e 6,3 mm das pelotas cruas; (d) % de pelotas cruas abaixo de 6,3 mm; e adicionalmente (e) % de pelotas cruas acima de 16 mm; e (f) relação granulométrica das pelotas cruas, a metodologia aplicada neste estudo teve como objetivo desenvolver etapas de construção dos leitos com foco na manipulação desses parâmetros para leitura dos espaços vazios encontrados, e ainda, associar aos resultados encontrados ao ambiente fabril. As etapas utilizadas foram:

- Preparação dos leitos e medição de espaços vazios;
- Desenvolvimento de um modelo matemático de previsão de espaços vazios no leito de pelotas em função dos parâmetros de controle de processo (P.C.O) e, ainda, verificação, em *Pot-Grate*, das relações entre o modelo encontrado e a qualidade física da pelota e variáveis de processo da queima para suportar teste industrial;
- Desenvolvimento de uma metodologia/processo de medição *online* dos parâmetros de controle operacionais (P.C.O) e a associação destes ao modelo de previsibilidade de espaços vazios na entrada do forno;
- Quantificação, por meio de testes em escala industrial, do efeito dos parâmetros de controle de controle operacionais (P.C.O) sobre o processo de queima nos quesitos consumo de energéticos, ou seja, sobre os combustíveis e energia elétrica, e qualidade do produto final.
- Desenvolvimento de um modelo que avalie quantitativamente e qualitativamente (maior ou menor) o impacto dos parâmetros de controle operacionais (P.C.O) do pelotamento associados às características do minério de ferro no custo com energéticos e na tendência de qualidade do produto final.

O teste industrial foi realizado no forno 3 da Samarco Mineração S/A construído em 2008 pela empresa Outotec. Este equipamento conta com um comprimento de 192 metros e uma produção de pelotas da ordem de 8 milhões de toneladas por ano.

4.1. Preparação dos leitos e medição de espaços vazios.

4.1.1. Pelotamento das pelotas de uso dos experimentos.

A etapa de pelotamento foi realizada em *Pot-Grate* utilizando-se um disco pelotizador piloto figura 4.1 operado com rotação média de 15 RPM, com inclinação de 45° e alimentação média de 650 kg/hora.



Figura 4.1: *Pot-Grate*, disco pelotizador da Samarco Mineração S.A.

As faixas granulométricas foram separadas por peneiras, conforme a figura 4.2, de forma a ter o retido sequencial de diâmetro de pelotas crua ≥ 16.0 mm, ≥ 12.5 mm, ≥ 8.0 mm, ≥ 6.3 mm, gerando 5 (cinco) amostras de granulometria distinta. Depois de peneirado, o material foi pesado, quarteado para evitar desintegração das pelotas cruas e, por fim, homogeneizado durante a montagem dos Leitos padrões contando 28 quilos de pelota crua cada. Na figura 4.2 percebem-se mais peneiras, pois foi caracterizado em mais faixas ≥ 6.3 mm para avaliação da degradação.



Figura 4.2: *Pot-Grate*, Peneiras para pelota crua da Samarco Mineração S.A.

4.1.2. Leitos padrões.

A metodologia aplicada na preparação dos leitos teve como base a montagem matricial das variações dos P.C.O e do registro da medição de espaços vazios realizado após o leito pronto e medido. A partir destas informações, foi possível encontrar os coeficientes que satisfizeram as 6 (seis) equações encontradas na matriz.

O modelo de espaços vazios para leitos fixos não segregado de pelotas com múltiplos diâmetros teve como base matemática uma matriz 6 x 6 onde os coeficientes a (1,...6), b (1,...6), c (1,...6), d (1,...6), e (1,...6) e f (1,...6) oriundos dos padrões de variação A; B; C; D; E; F dos P.C.O e a solução desta matriz são os espaços vazios $\epsilon(1,...6)$ medidos durante os experimentos, resultante do empacotamento formado pelo padrão de leito adotado no experimento. A partir da manipulação matricial, foi possível encontrar os (x_1, \dots, x_6) que correspondem as incógnitas que satisfazem o modelo ϵ chamado assim a partir de agora.

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 + d_1x_4 + e_1x_5 + f_1x_6 = \epsilon_1 \quad (4.1)$$

$$a_2x_1 + b_2x_2 + c_2x_3 + d_2x_4 + e_2x_5 + f_2x_6 = \epsilon_2 \quad (4.2)$$

$$a_3x_1 + b_3x_2 + c_3x_3 + d_3x_4 + e_3x_5 + f_3x_6 = \epsilon_3 \quad (4.3)$$

$$a_4x_1 + b_4x_2 + c_4x_3 + d_4x_4 + e_4x_5 + f_4x_6 = \epsilon_4 \quad (4.4)$$

$$a_5x_1 + b_5x_2 + c_5x_3 + d_5x_4 + e_5x_5 + f_5x_6 = \epsilon_5 \quad (4.5)$$

$$a_6x_1 + b_6x_2 + c_6x_3 + d_6x_4 + e_6x_5 + f_6x_6 = \epsilon_6 \quad (4.6)$$

Durante os experimentos os padrões (A, B, C, D, E, F) foram replicados mais vinte e nove vezes, ou seja, no final dos experimentos foram analisados trinta leitos padrões.

Como exemplo da montagem dos leitos padrões, segue a configuração do leito A:

$$(DM_A(n) e 16-8_A(n) +8-6.3_A(n) +-6.3_A(n) +16_A(n) com REL_A(n)) = \% \varepsilon A(n) \quad (4.7)$$

(n) = Repetição

Para os outros leitos B, C, D, E, F seguiu-se a mesma configuração de montagem. Para os leitos montados foi adotada uma altura fixa de exatamente 450 mm durante os ensaios. Os padrões de distribuição e de relação granulométrica adotados consideram as informações existentes na pelotização para análise e desenvolvimento do modelo ε e, dessa forma, ocorrer coerência entre as previsões encontradas na linha de produção. A seguir, tem-se a variação dos P.C.O nos experimentos:

- DM: Diâmetro médio - Variações na Tabela Anexo 8.1.1;
- 16_8 ou 16.0 a 8.0 mm - Variações na Tabela Anexo 8.1.2;
- 8_6.3 ou 8.0 a 6.3 mm - Variações na Tabela Anexo 8.1.3;
- 6.3 ou - 6.3 mm - Variações na Tabela Anexo 8.1.4;
- 16 ou + 16 mm - Variações na Tabela Anexo 8.1.5, sendo este fixado em 2.30% com desvio tolerável, por variar pouco na indústria;
- REL ou Relação Granulométrica - Variações na Tabela Anexo 8.1.6.

A relação granulométrica, aqui neste estudo, é dita como a razão entre o percentual da faixa granulométrica de 16.0 a 12.5 mm e o percentual da faixa granulométrica de 12.5 a 8.0 mm é fixado em 1.00 com desvio tolerável +/- 0,10 por variar nesta faixa na indústria.

4.1.3. Produção de amostras para os leitos padrões A, B, C, D, E e F.

Como visto anteriormente, neste estudo será utilizado um considerável número de amostras compreendidos como leitos para análise de espaços vazios em função das réplicas que compõem o estudo para análise de desvio padrão e média das informações

obtidas no período de medição. A fim de garantir uma boa logística e assertividade na composição dos leitos, foi seguido um fluxo com três etapas básicas da preparação dos leitos padrões, o que pode ser conferido na figura 4.3.



Figura 4.3: Fluxo de preparação dos leitos padrões utilizados no estudo.

4.1.4. Construção dos Leitos padrões no *Pot-Grate*.

A construção dos Leitos padrões (A, B, C, D, E, F) e suas vinte e nove réplicas tiveram como configuração o exemplo a seguir feito para o leito A.

$(DM_{A(1)} \text{ e } 16-8_{A(1)} + 8-6.3_{A(1)} + -6.3_{A(1)} + 16_{A(n)} \text{ com } REL_{A(1)}) = \% \varepsilon_{A(1)}$

$(DM_{A(2)} \text{ e } 16-8_{A(2)} + 8-6.3_{A(2)} + -6.3_{A(2)} + 16_{A(2)} \text{ com } REL_{A(2)}) = \% \varepsilon_{A(2)}$

.

.

.

$(DM_{A(30)} \text{ e } 16-8_{A(30)} + 8-6.3_{A(30)} + -6.3_{A(30)} + 16_{A(30)} \text{ com } REL_{A(30)}) = \% \varepsilon_{A(30)}$

Onde: (1) representa o leito oficial e $(2, \dots, 30)$ representam as réplicas do leito (1) .

Para os outros leitos B, C, D, E, F segue-se a mesma configuração de montagem. Para melhor visualização, são expostas as tabelas que segregam os P.C.O por leito A, B, C, D, E e F de tal forma que se consiga perceber suas variações durante a montagem dos leitos utilizados neste estudo. As variações utilizadas podem ser vistas nas tabelas Anexo 8.1.

4.1.5. Calibração e medição do $\% \epsilon$ dos leitos.

4.1.5.1. Medição do $\% \epsilon$ no Permeability Meter Lab (PML).

Para as medições do $\% \epsilon$ *online*, contidos nos Leitos padrões, foi utilizado o equipamento *Permeability Meter Lab* chamado também de PML. O PML é um instrumento de medição de permeabilidade em leito de partículas esféricas. Trata-se de um equipamento de pequeno porte para laboratório. A partir das informações das pressões, temperaturas e velocidade do fluido que influenciam nas equações 4.8; 4.9; 4.10 e, ainda, a partir de pontos distintos de medição calculam-se os diferenciais de pressão na qual o leito está submetido em tempo real. Tais informações são submetidas na equação de *Ergun* e então se encontra o $\% \epsilon$ do leito analisado.

O equipamento ainda compensa o fator de parede sobre o resultado do $\% \epsilon$ final ao relacionar o diâmetro médio das partículas que compõe o leito ao diâmetro do leito a partir da correção das perdas de pressão proporcionada pelas paredes laterais da panela. O equipamento é composto por uma panela que pode chegar a uma profundidade de 500 mm com diâmetro de 200 mm e uma grade com malha de 5 mm que suporta o leito, dois motores de indução gaiola com 0.5 cavalos de potência responsáveis pela injeção do ar, um termo anemômetro com medição de velocidade $0-30 \text{ m.s}^{-1}$ e temperatura $0-50 \text{ }^\circ\text{C}$, dois termo higrômetros com medição de 0 a $95\% \text{ RH}$ e -10 a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ e, ainda, dois manômetros líquidos de escala -500 a $500 \text{ mmH}_2\text{O}$ redundante para calibrações do sistema fazem as medições necessárias.

O PLC localizado no painel coleta os dados do sistema e a partir de comunicação OPC migra as informações para o notebook onde tem um supervisor e ainda são calculados e encontrados os $\% \epsilon$ existentes no leito analisado. Na figura 4.3 é

conferido o equipamento e na figura 4.4 é mostrado o fluxo do fluido que gera os diferenciais de pressão ao passar pelo leito.

$$\rho(T) = \rho_o \frac{T_o}{T} \frac{P_o}{P} \quad (4.8)$$

$$v(T) = v_o \frac{T_o P}{T P_o} \quad (4.9)$$

$$\mu_{ar}(T) = 1,73 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \left(\frac{398}{T + 125} \right) \quad (4.10)$$



Figura 4.4: *Permeability Meter Lab*, PML.

A metodologia de medição aplicada no PML foi adaptada para ter similaridade às publicações já existentes no mundo acadêmico, pois em um forno tipo grelha móvel, a convecção é forçada e, tanto antes quanto depois do leito, existem ventiladores de processo que exercem pressão de forma independente. Sendo assim, foi utilizado a configuração exposta pela figura 4.5 onde a válvula 1 foi mantida aberta 100% e utilizou-se somente o motor 1 com fluxo ascendente, responsável pela injeção do fluido no leito. A válvula 2 manteve-se fechada 100% com o motor 2 desligado. O tempo da

análise foi uma constante para todas as medições e teve como base o tempo de estabilização das medições de pressão. A altura do leito manteve-se constante durante todos os ensaios na marca de 45 cm.

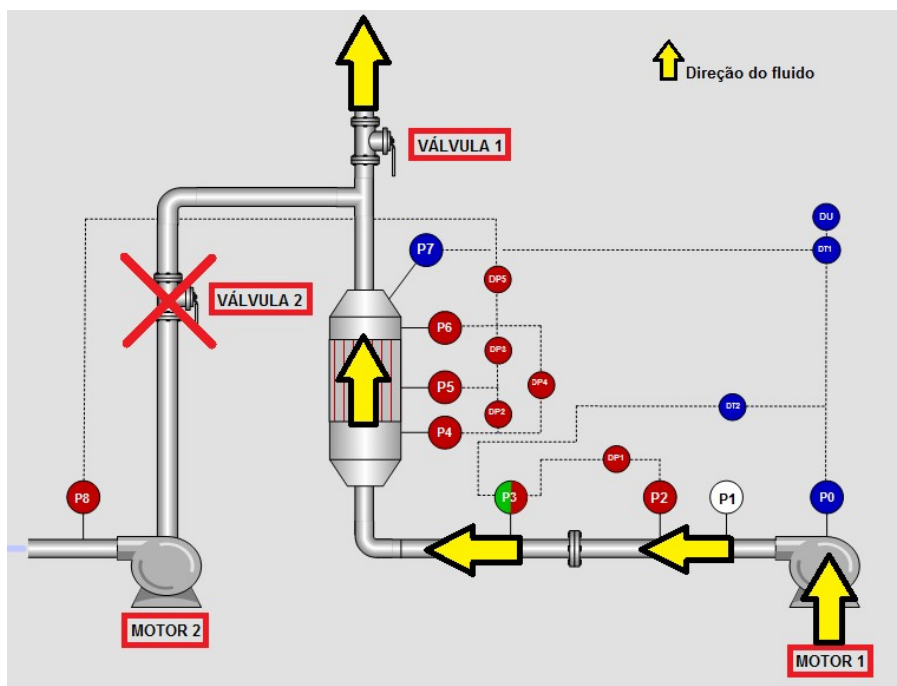


Figura 4.5: Fluxo de medição interno do PML e instrumentação.

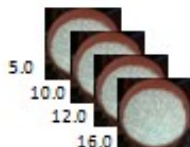
4.1.6. Calibração do PML e medição de $\% \varepsilon$.

O processo de análise do $\% \varepsilon$ de um leito de esferas, a verificação de estado do PML e sua calibração se necessário e posterior utilização do PML para medição do $\% \varepsilon$ em leito de pelotas cruas são etapas mostradas na figura 4.6.

Etapa 1 – Medir o % ϵ a partir do preenchimento com óleo entre as esferas de vidro:



Etapa 2 – Medir o % ϵ a partir do PML utilizando esferas de vidro, e caso ocorra desvios calibrar:



Etapa 3 – Medir o % ϵ a partir do PML utilizando pelotas cruas:

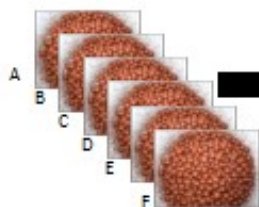


Figura 4.6: Fluxo de calibração até os ensaios com pelotas cruas para medição do % ϵ .

4.1.6.1. Execução das etapas de calibração.

Foram adquiridos quatro lotes de esferas de vidro para criar leitos com um único diâmetro e com quatro diâmetros distintos e servir como parâmetro de referência durante a verificação das medições realizadas pelo PML.

Na primeira etapa foi adotado o procedimento de medição de % ϵ em bancada para conflitar com as medições do PML. Foi montado um leito com esferas de vidro com mesmo diâmetro e com altura constante em um becker sobre uma balança de precisão e realizado a tara. Paralelamente, sobre outra balança de precisão, foi posta uma proveta, também realizou-se a tara e, em seguida, foi preenchida até a marca de 1000 ml (v1) com óleo com densidade conhecida (ρ [kg/l]) e registrado o peso (p_1 [g]). Em seguida, o conteúdo da proveta foi transferido para o becker até sua marca de 1000 ml quando todos os espaços vazios do leito foram preenchidos. Então foi registrado o peso do Becker como (p' [g]) e, posteriormente, foram registrados o volume e o peso do conteúdo residual da proveta como (v2 [ml]) e (p_2 [g]). O % ϵ foi

obtido a partir das equações 4.11, 4.12 e 4.13. Para conclusão desta análise foram realizadas 30 medições de cada diâmetro de 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm e registrados a média e o desvio padrão do %ε encontrado nas tabelas 7, 8 e 10.

$$\varepsilon_{(v)} = \frac{1000 - v^2}{10} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{(p)} = \frac{p_1 - p_2}{10 x \rho} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{(p')} = \frac{p'}{10 x \rho} \quad (4.13)$$

Na tabela Anexo 8.2.7 são mostrados todos os resultados obtidos durante esta etapa 1 da calibração. O resultado do %ε considerado nesta tabela é referente à média aritmética das equações 4.11, 4.12, 4.13 comentadas anteriormente.

Na segunda etapa foi adotado o PML para medição do %ε em leitos com as mesmas características das utilizadas na primeira etapa, ou seja, foram montados leitos com um único diâmetro de esferas de vidros de 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm e, agora, um leito com altura de 450 mm similar ao utilizado na indústria de pelotização. Para a conclusão desta análise foram realizadas 30 medições de cada diâmetro de 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm e registrados a média e o desvio padrão do %ε encontrado. Na tabela Anexo 8.2.2 são mostrados todos os resultados obtidos durante esta etapa 2 da calibração.

4.1.7. Análise de estado do PML.

Esta análise foi realizada comparando-se o desvio padrão e a média das amostras comentadas na etapa 1 e etapa 2 de calibração do PML. Na tabela Anexo 8.2.3 são mostrados todos os resultados obtidos durante a análise de estado do PML.

4.2. Desenvolvimento do modelo matemático de previsão do %ε.

Conforme mostrado no subitem 4.1.2., os leitos padrões foram manipulados de tal forma a fornecer as informações que satisfazem as posições de uma matriz 6x6 e, a

partir da aplicação do conceito matricial e de sua manipulação, os coeficientes $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ puderam ser encontrados. Equações:

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 + d_1x_4 + e_1x_5 + f_1x_6 = \varepsilon_1$$

$$a_2x_1 + b_2x_2 + c_2x_3 + d_2x_4 + e_2x_5 + f_2x_6 = \varepsilon_2$$

$$a_3x_1 + b_3x_2 + c_3x_3 + d_3x_4 + e_3x_5 + f_3x_6 = \varepsilon_3$$

$$a_4x_1 + b_4x_2 + c_4x_3 + d_4x_4 + e_4x_5 + f_4x_6 = \varepsilon_4$$

$$a_5x_1 + b_5x_2 + c_5x_3 + d_5x_4 + e_5x_5 + f_5x_6 = \varepsilon_5$$

$$a_6x_1 + b_6x_2 + c_6x_3 + d_6x_4 + e_6x_5 + f_6x_6 = \varepsilon_6$$

Matriz A (Coeficientes):

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & f_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & f_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & e_3 & f_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & f_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & d_5 & e_5 & f_5 \\ a_6 & b_6 & c_6 & d_6 & e_6 & f_6 \end{pmatrix}$$

Matriz X (Incógnitas):

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix}$$

Matriz Y (Resposta):

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{pmatrix}$$

Segundo Boldrine *et al.* (1986) em seu livro chamado Álgebra Linear, pode-se afirmar que a manipulação matricial;

$$[A].[X] = [Y] , \text{Então } [X] = [Y]. [A]^{-1} , \text{ é possível.}$$

Os valores de $[A]$ a_n, b_n, c_n, d_n, e_n e f_n são os valores médios dos P.C.O dos leitos padrões vistos nas tabelas do Anexo 8.1 e os valores de $[Y]$ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ e ε_6 são os % ε médio encontrados nos leitos padrões mostrados na tabela do Anexo 8.3.1.

4.3. Etapa de queima das pelotas cruas.

Para a etapa da queima foi utilizado o forno piloto mostrado na figura 4.5 e a massa utilizada de pelotas cruas foi de 40 kg para o preenchimento da panela. O perfil padrão utilizado foi o ciclo térmico da usina 03 com velocidade da grelha em 6,74 m/min, totalizando um tempo de residência de 28,49 minutos para cada queima. Foram realizadas três queimas para cada um dos seis leitos descritos na tabela 4.12.



Figura 4.7: *Pot-Grate*, forno estático simulador do processo de queima do forno de grelha móvel da Samarco Mineração S.A.

Tabela 4.1: Comprimento e tempo de residência para cada zona do forno 03 a serem considerados durante as queimas no *Pot-Grate*.

Zonas do Forno 03	Comprimento [m]	Tempo de residência [min]
Secagem Ascendente	18	2,67
Secagem Descendente	24	3,56
Pré-Queima	30	4,45
Queima	45	6,68
Pós-Queima	9	1,34
Resfriamento Primário	48	7,12
Resfriamento Secundário	18	2,67
TOTAL	192	28,49

4.3.1. Determinação da qualidade física de índice de tamboramento (ISO 3271).

Para os testes de tamboramento foi coletado 5 Kg de pelota queimada maior que 6.3 mm e inserido em um tambor que realiza um padrão de 188 rotações em 7 minutos e 30 segundos. Em seguida, as pelotas queimadas passaram por uma peneira de 6.3 mm e o material retido foi pesado para cálculo de % de massa obtida nesta peneira resultando o valor de tamboramento.



Figura 4.8: *Pot-Grate*, Tambor de abrasão (66TA06) da Samarco Mineração S.A.

4.3.2. Determinação da qualidade física de resistência à compressão (ISO 4700).

Para os testes de resistência à compressão foram coletados 20 kg de pelotas queimadas aleatórias dentro da faixa granulométrica de $-16+12.5$ mm e inserida na prensa de pelotas queimadas. Este equipamento possui um pistão acoplado a uma célula de carga que pressiona a pelota contra uma mesa fixa. O valor de compressão é gerado a partir do momento de ruptura da pelota.



Figura 4.9: *Pot-Grate*, Prensa de pelota queimada da Samarco Mineração S.A.

Outras análises foram realizadas com os padrões de leitos criados para a queima como pode ser verificado na tabela 5.1. No entanto, somente o tamboramento e a compressão serão alvos de nossas discussões neste estudo.

4.4. Desenvolvimento de uma metodologia/processo para medição *online* dos parâmetros de controle e associação ao modelo de previsibilidade de espaços vazios, modelo de espaços vazios, na entrada do forno de pelotização.

O modelo ε que foi indicado no item 4.1.7 e criado mais adiante no item 5.1.8 a partir do tratamento estatístico dos dados resultantes dos experimentos e da manipulação matricial foi inserido no sistema de automação embarcado na planta industrial e recebeu de forma *online* as informações das medições de diâmetro médio, granulometria e relação granulométrica gerada pelo granulômetro instalado na planta.

O processo de medição de granulometria das pelotas cruas na entrada do forno baseou-se em retirar uma série de fotografias superficiais do leito logo após o leito ser formado, evitando, assim, a segregação das partículas, tornando a superfície do leito uma amostra bem representativa de todo o leito. O local da captura das imagens pode ser visto na figura 4.10. O processo de migração de dados e formação das informações se fazem da seguinte forma: as imagens são capturadas por câmeras que estão conectadas, por via fibra-óptica, aos computadores de alto desempenho que tem como objetivo processar estas imagens a partir de algoritmo dedicado a esta função. O resultado deste processo é a curva granulométrica, o diâmetro médio e a relação granulométrica das pelotas que alimentam o forno de forma *online*. Na figura 4.11 é mostrado o fluxo de dados até a formação das informações necessárias para alimentar o modelo ε que faz a previsão do % ε . A figura 4.12 mostra a previsão de espaços vazios *online* sendo gerada em uma tela do sistema de automação.



Figura 4.10: Vista superficial do leito de pelotas cruas na entrada do forno tipo grelha móvel utilizada para captura de imagens pelo granulômetro, medidor de granulometria das pelotas cruas.

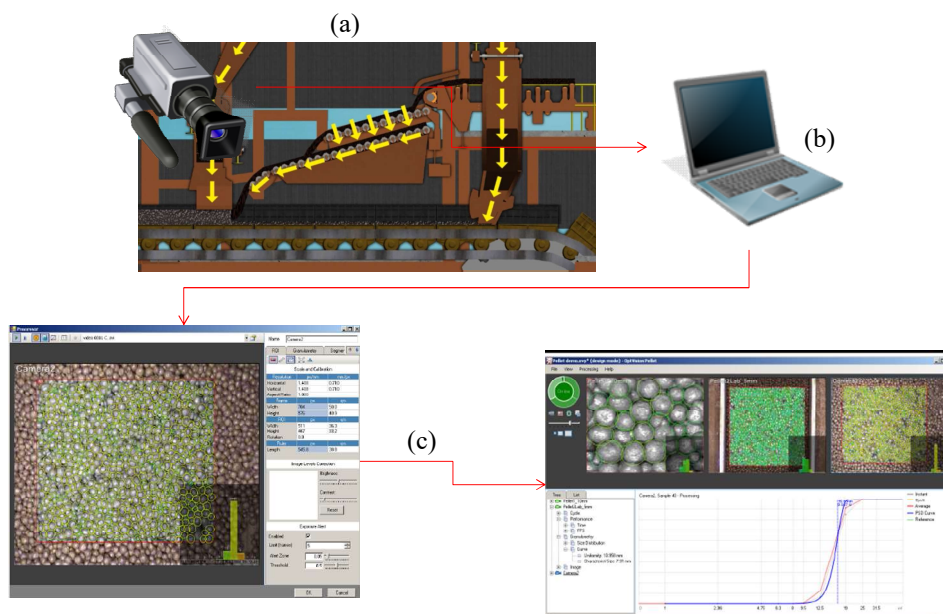


Figura 4.11: (a) Captura de imagens; (b) Processamento das imagens; (c) Formação das informações de P.C.O; Fluxo de dados para medição online dos P.C.O, Samarco Mineração S.A.

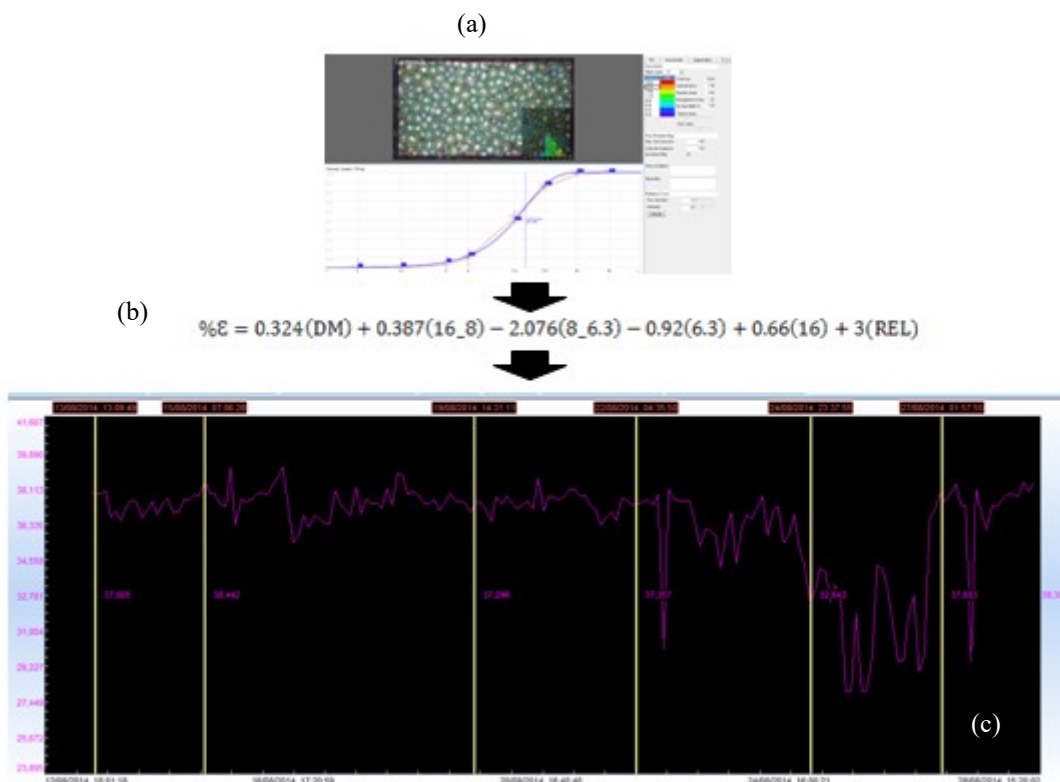


Figura 4.12: (a) Formação dos P.C.O; (b) Recebimento dos P.C.O no modelo inserido no sistema de automação; (c) Geração online da previsão do %ε em uma tela original do sistema de automação.

4.5. Quantificação, por meio de testes em escala industrial, do efeito dos parâmetros de controle operacional do pelotamento sobre o processo de queima nos quesitos consumo de energéticos, combustíveis e energia elétrica, e qualidade do produto final.

Para a quantificação dos resultados a partir do controle do % ε, o teste industrial foi elaborado utilizando um lote de produto chamado PDR-MX que são pelotas com características físico-metalúrgicas bem conhecidas e bem controladas cujo mercado consumidor é o de redução direta. A escolha deste produto se deu em função de que os reatores de redução direta utilizam 100% de pelotas e os resultados deste estudo poderão contemplar inclusive este processo. Desta forma, o estudo abrange desde a fabricação das pelotas até a performance no reator do cliente final no tocante à permeabilidade dos leitos em função do %ε. Os testes em nada influenciaram na

produção, pois ocorreram em paralelo com o planejamento de produção e se deram em períodos descontinuados, ou seja, toda vez que a pelota voltava a ser produzida na linha de produção foi eliminada a interface de mudança e considerada o período de produção estável. A partir das medições dos P.C.O *online* convertidas em %ε através do modelo ε e, ainda, das medições *online* já existentes na planta de consumo específico de carvão (W), gás natural (X), energia elétrica dos ventiladores de processo (Y) bem como a partir da temperatura na descarga das pelotas recém queimadas (Z), foi montado um banco de dados com aproximadamente 1500 médias de 20 minutos de cada uma destas variáveis envolvidas durante o equivalente a 20 dias de produção continuada. O período de amostragem não foi contínuo, conforme dito anteriormente, pois o teste seguiu a orientação do planejamento de produção e o período de coleta de dados foi de aproximadamente 3 (três) meses. A seguir, algumas considerações importantes para tratamento dos dados industriais:

[ton]: produção de pelotas queimadas no período considerado.

- W: Amostras de dados de consumo específico de carvão [kg/ton];
- X: Amostras de dados de consumo específico de gás natural [kNm³/ton];
- Y: Amostras de dados de consumo específico de energia elétrica dos ventiladores de processo [kwh/ton];
- Z: Amostras de dados de temperatura das pelotas na descarga [°c].

Custo variável de (W; X; Y; Z) a partir do custo específico (C.E) performado:

- W: C.E de carvão x Preço do Kg de carvão [R\$/ton];
- X: C.E de gás natural x Preço do m³ de GN [R\$/ton];
- Y: C.E de energia elétrica x Preço do kwh [R\$/ton];
- Z: C.E térmico com perdas na descarga x Custo do kcal/ton [R\$/ton];
- A matriz térmica utilizada no período confere uma razão média de 1,04 para a razão (kcal Carvão / kcal Gás natural consumida) [-];
- Taxa diária de produção de pelotas [ton/dia];
- Work rate: 351 [dias/ano];
- % ε: Previsão de espaços vazios [%].

Durante os testes industriais, a qualidade tamboramento e a resistência à compressão das pelotas queimadas será analisada para verificação de possíveis ruídos

nestes dois índices com o controle do % ϵ . Toda a avaliação estatística dos dados coletados desta etapa foram tratados e analisados pelo *Software* licenciado *Minitab 17 Statistical Software Ink*.

Durante o teste industrial foi criado um sistema chamado de SACQ, visto na figura 4.13 acoplado à medição *online* de granulometria *OPTVISION PELLET*[®]. Este modelo baseia-se na coleta de dados em tempo real, sincronizamento e tratamento dos dados. A partir das informações relevantes geradas pelo tratamento estatístico destes dados finalmente é construído o modelo empírico de controle de custos com energéticos da planta industrial.

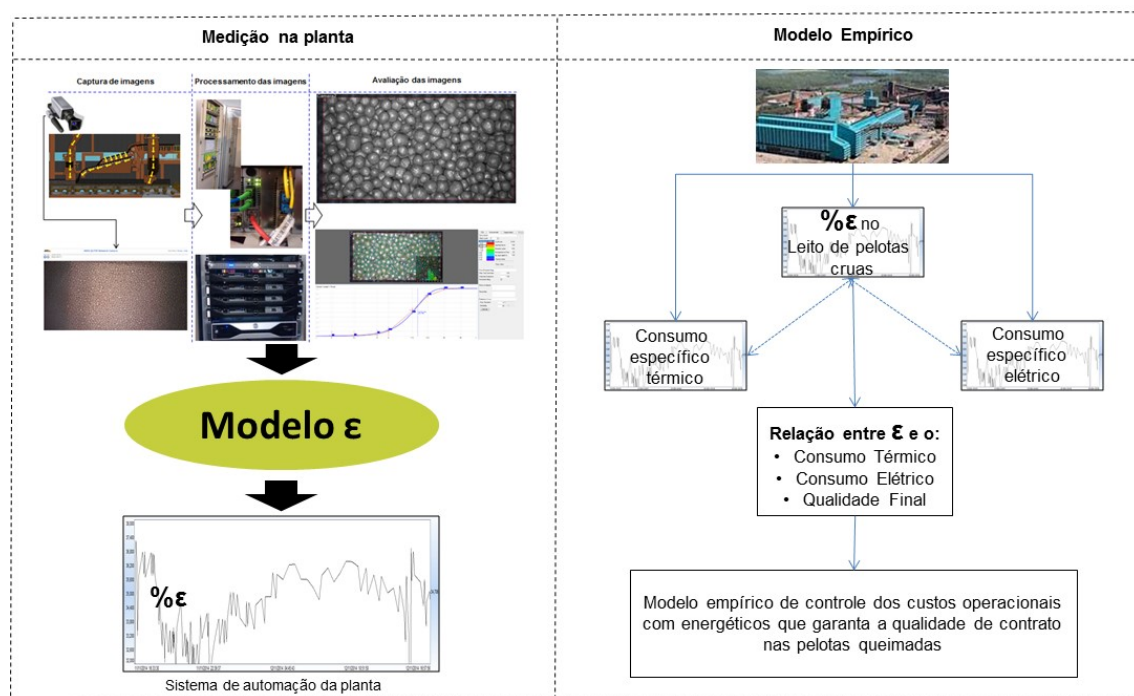


Figura 4.13: Sistema construído para elaboração do modelo empírico de controle de custos com energéticos na planta industrial.

Durante os testes industriais, a qualidade tamboramento e resistência à compressão das pelotas queimadas foi analisada para verificação de possíveis ruídos nestes dois índices com o controle dos espaços vazios.

4.6 Desenvolvimento de um modelo que avalie quantitativamente e qualitativamente (maior ou menor) o impacto dos parâmetros de controle operacionais (P.C.O) do pelotamento no custo com energéticos e na tendência de qualidade do produto final.

O modelo empírico teve como base o SACQ, visto na figura 4.13 onde as informações de relacionamento entre as variáveis são concluídas. As curvas encontradas tem o eixo x em comum de forma que as curvas de X, Y, Z, W e Produtividade podem ficar no mesmo gráfico desde que o eixo y seja compatível. Pontos importantes durante o desenvolvimento do modelo empírico são mostrados logo abaixo:

- As curvas dos consumos específicos dos insumos (X, Y, Z) e da temperatura de fuga das pelotas (W) encontradas na etapa anterior em relação ao % ϵ .
- A curva de produtividade da planta em relação ao % ϵ .
- As curvas dos custos específicos dos insumos X, Y, Z e das perdas térmicas encontradas a partir da temperatura de fuga das pelotas (W) em relação ao % ϵ .
- Encontrar temperatura média na descarga para ser referência dos desvios de perdas térmicas na descarga.
- Encontrar o consumo objetivo do insumo a partir do planejamento anual para encontrar o desvio entre o praticado e o orçado e o simulado. Alguns valores nesta etapa serão omitidos neste trabalho e, em função da política de confidencialidade da empresa, serão mostrados então apenas os incrementos.
- Encontrar a produção objetivo a partir do planejamento anual para encontrar o desvio entre o praticado e o orçado e o simulado. Alguns valores nesta etapa serão omitidos neste trabalho e, em função da política de confidencialidade da empresa, serão mostrados então apenas os incrementos.
- Encontrar pontos de referência no modelo empírico de controle de custo para determinar faixa de trabalho que otimize a produtividade e custo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Avaliação estatística dos Leitos padrões utilizados nos experimentos e modelo ε .

5.1.1. Diâmetro médio.

O diâmetro médio (DM) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtido a partir da soma ponderada do produto do fator percentual existente na dada faixa pela média aritmética dos limites da faixa, com a ressalva de que, para o menor do que 6.3 mm e para o maior do que 16.0 mm não ocorre média aritmética e sim é considerado o próprio número que representa a faixa, tais como 6.3 e 16, como mostrado na equação 5.1.

$$DM = \Sigma((16)x\%16); ((16+8)/2)x\%16_8; ((8+6.3)/2)x\%8_6.3; ((6.3)x\%6.3) \quad (5.1)$$

Os dados de DM apresentaram normalidade adequada, desvio padrão e médias bem definidas como pode ser observado na figura 5.1.

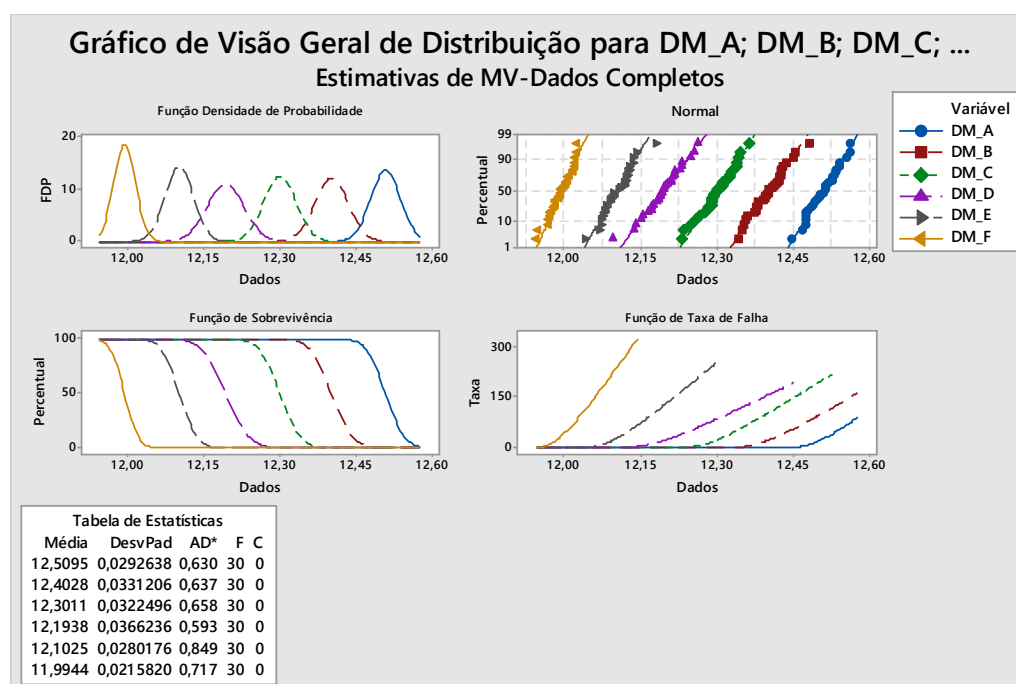


Figura 5.1: Avaliação estatística da componente dos leitos (DM).

5.1.2. Faixa granulométrica -16+8 mm.

A faixa de -16.0 a +8.0 mm (16_8) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtida a partir da preparação da amostra e do peneiramento. Durante o peneiramento, o retido na malha de 8.0 mm e passante na malha de 16.0 mm é chamado de 16_8. Esta faixa é a mais desejada na pelotização, é o principal produto de uma mesa de rolos e última peneira antes de alimentar o forno. Esta faixa geralmente varia nesta planta entre 92,00 % a 95,00 % de toda pelota admitida no forno. Os dados de 16_8 apresentaram normalidade adequada, desvio padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.2.

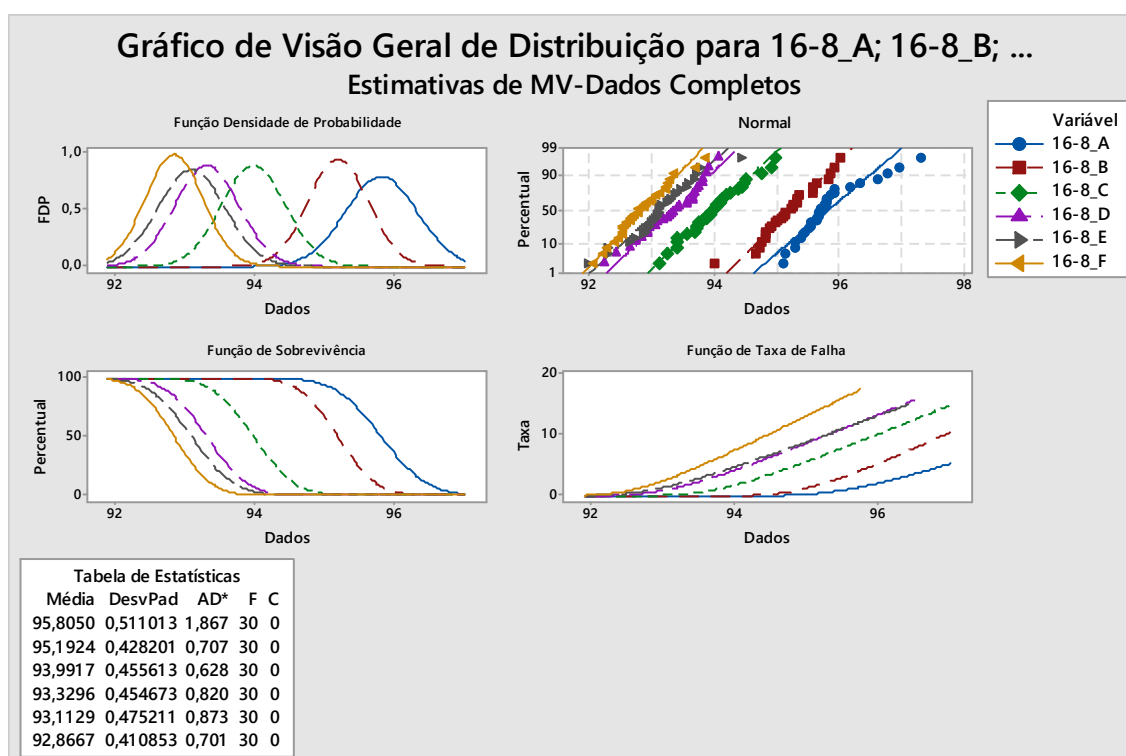


Figura 5.2: Avaliação estatística da componente dos leitos (16_8).

5.1.3. Faixa granulométrica -8+6.3 mm.

A faixa de -8.0 a +6.3 mm (8_6.3) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtida a partir da preparação da amostra e do peneiramento. Durante o

peneiramento, o retido na malha de 6.3 mm e passante na malha de 8.0 mm é chamado de 8_6.3. Esta faixa é indesejada na pelletização e é efeito da baixa performance da mesa de rolos, última peneira antes de alimentar o forno. Esta faixa geralmente varia nesta planta entre 1.00 a 5,00% de toda pelota admitida no forno. Os dados de 8_6.3 apresentaram normalidade adequada, desvio padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.3.

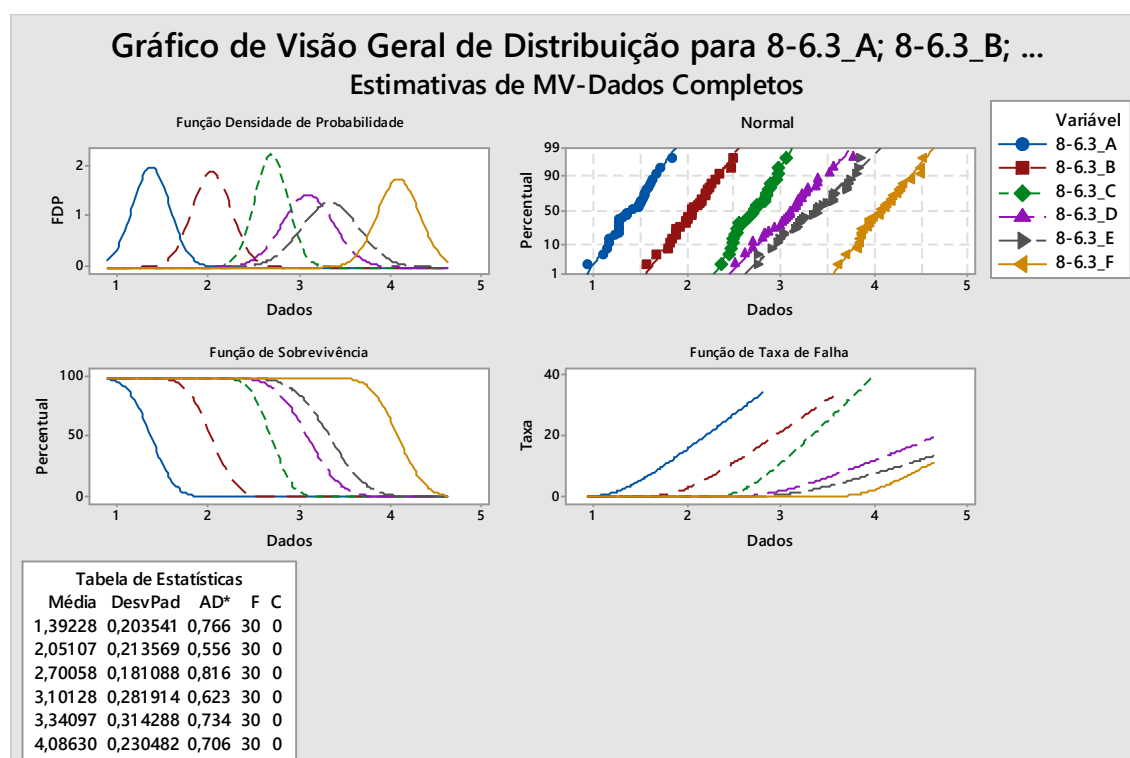


Figura 5.3: Avaliação estatística da componente dos leitos (8_6.3).

5.1.4. Faixa granulométrica -6.3 mm.

A faixa de - 6.3 mm (6.3) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtida a partir da preparação da amostra e peneiramento. Durante o peneiramento, o passante na malha de 6.3 mm é chamado de 6.3. Aqui neste estudo, esta faixa é indesejada na pelletização e é efeito da baixa performance da mesa de rolos, última peneira antes de alimentar o forno. Sua presença também indica descontrole do processo no pelletamento. Esta faixa geralmente varia nesta planta de 0.5.00 a 2.00% de toda pelota admitida no forno. Os dados do 6.3 apresentaram normalidade adequada, desvio

padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.4.

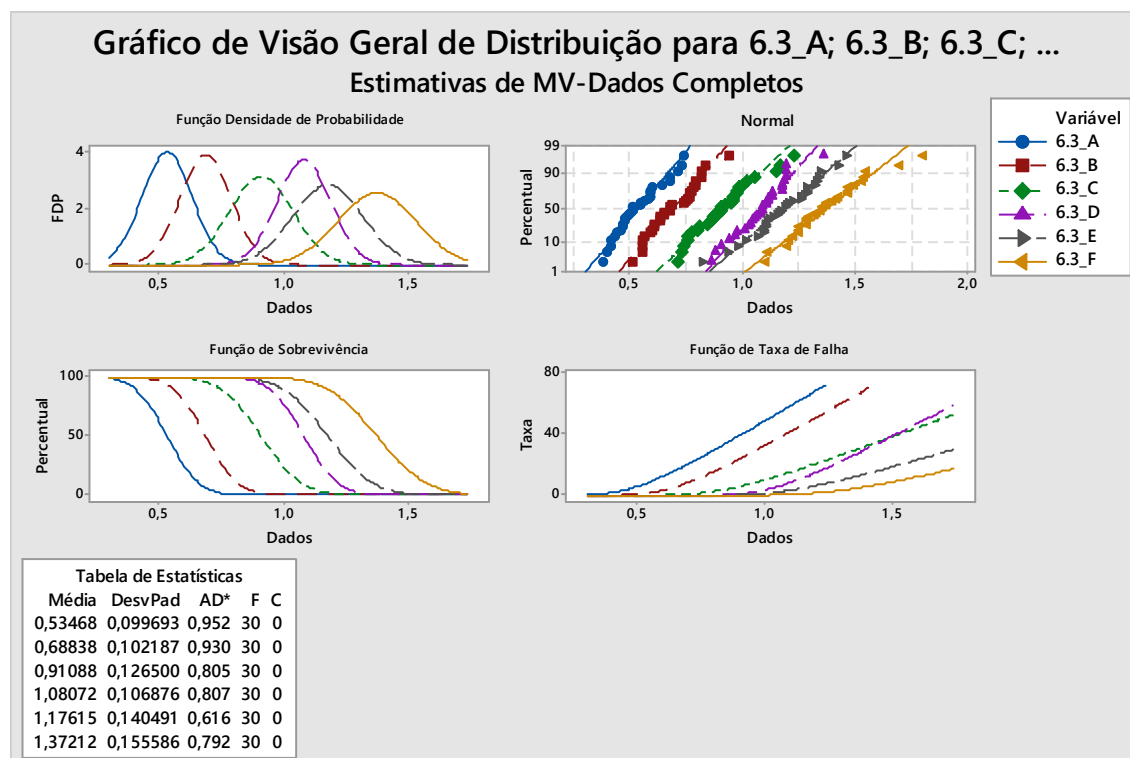


Figura 5.4: Avaliação estatística da componente dos leitos (6.3).

5.1.5. Faixa granulométrica +16 mm.

A faixa de + 16.0 mm (16.0) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtida a partir da preparação da amostra e peneiramento. Durante o peneiramento, o retido pela malha de 16.0 mm é chamado de 16. Aqui neste estudo, esta faixa é indesejada na pelotização e é efeito da baixa performance da mesa de rolos, última peneira antes de alimentar o forno e também descontrole do processo de pelotamento. Esta faixa geralmente varia nesta planta entre 0 a 2.50% de toda pelota admitida no forno, sendo muito comum nesta planta o valor de 2,30%. Os dados do 16 mm apresentaram desvio padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.5. A análise de normalidade para este caso não é apropriada por se tratar de um constante com desvio tolerável.

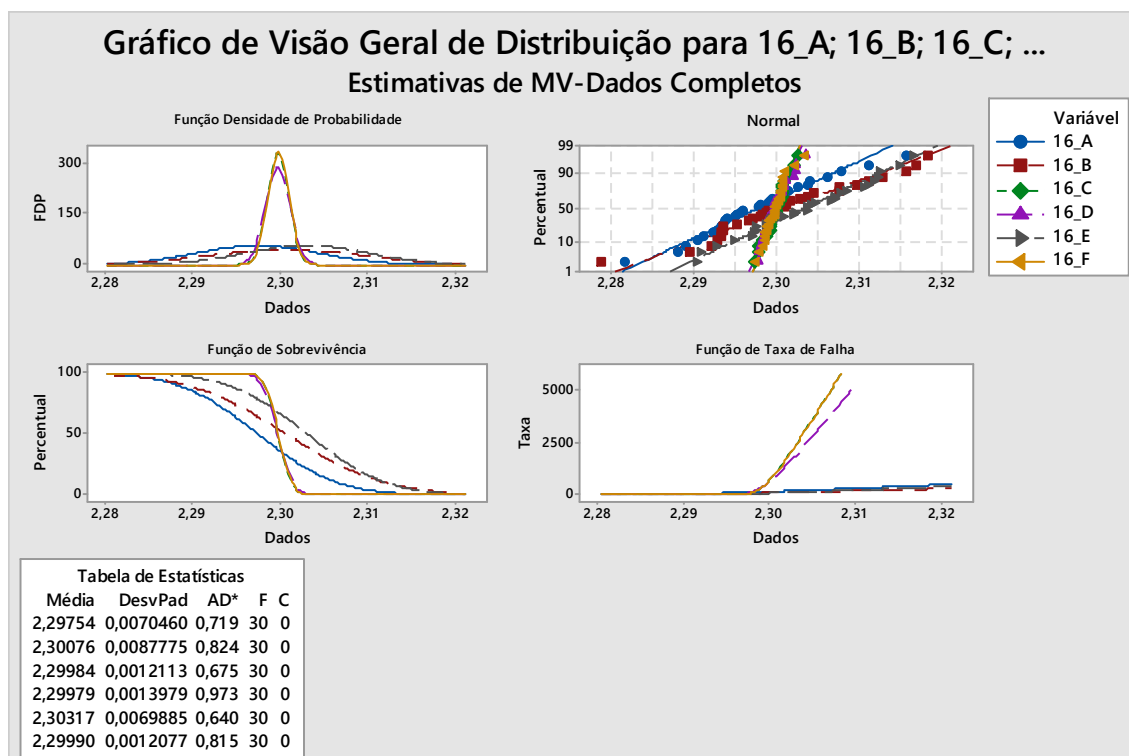


Figura 5.5: Avaliação estatística da componente dos leitos (16).

5.1.6. Relação granulométrica.

A relação granulométrica (REL) de uma população de pelotas com diversos diâmetros é obtida a partir da razão entre a faixa 16_12.5 mm e a 12.5_8.0 mm. Estas duas faixas não foram exploradas aqui neste estudo por que a somatória delas nos dá a faixa de 16_8 mm extremamente explorado aqui neste estudo. Ela é obtida a partir da preparação da amostra e peneiramento. Durante o peneiramento, o passante na malha de 16.0 mm e retido pela malha de 12.5 mm é chamado de 16_12.5 e o passante na malha de 12.5 mm e retido pela malha de 8.0 mm é chamado de 12.5_8.0. Aqui neste estudo, a REL nos dá uma informação interessante, caso e se somente o 16_8 estiver acima de 90.00 % nos permite ver se a pelota está grande ou pequena. Esta faixa geralmente varia nesta planta entre 0.8 e 1.2. Os dados de REL apresentaram normalidade adequada, desvio padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.6.

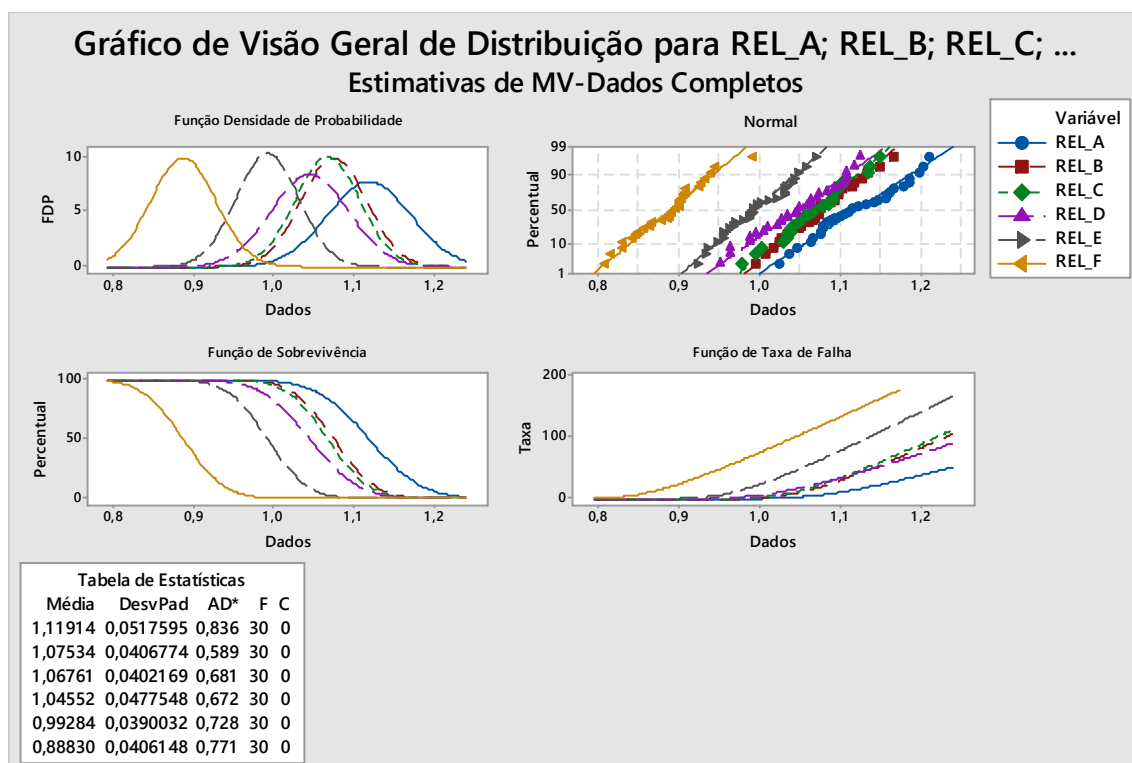


Figura 5.6: Avaliação estatística da componente dos leitos (REL).

5.1.7. Percentual de espaços vazios contidos no leito padrões.

A variável resposta %ε mensurada pelo PML demonstrou uma faixa de variação entre aproximadamente 40% e 32% considerando os leitos padrões A, B, C, D, E, F e apresentaram normalidade adequada, desvio padrão e médias bem definidas, como pode ser observado na figura 5.7.

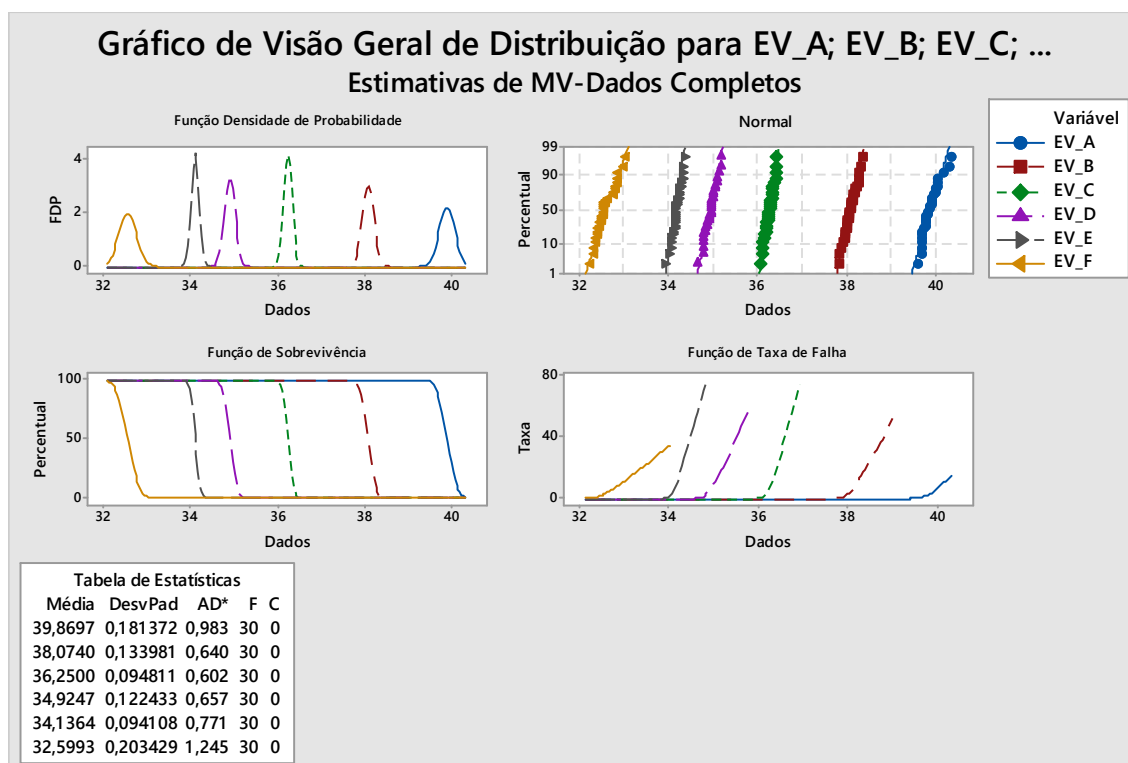


Figura 5.7: Avaliação estatística da variável resposta %ε do PML (EV).

5.1.8. Construção do modelo ε.

A seguir, apresento a manipulação matricial utilizada $[X] = [Y] \cdot [A]^{-1}$ e o resultado.

$$\begin{array}{c|ccc|c|c|c}
 & & & & X & & Y \\
 & & & & & & \\
 \hline
 & & & & 0,324 & & 42,585 \\
 & & & & 0,387 & & 40,695 \\
 & & & & -2,076 & = & 38,591 \\
 & & & & -0,920 & & 37,237 \\
 & & & & 0,660 & & 36,386 \\
 & & & & 3,000 & & 34,257 \\
 \hline
 \end{array}$$

Onde o X, em vermelho, representa os coeficientes do modelo ε representado pela equação:

$$0.324(DM) + 0.387(16_8) - 2.076(8_6.3) - 0.92(6.3) + 0.66(16) + 3(REL) \quad (5.2)$$

5.2. Restrições do modelo ε .

5.2.1. Análise de restrição do Modelo ε .

Durante o período de criação do modelo foi simulado, via *Solve do Excel*, os limites das variáveis que compõem o modelo para evitar tomadas de decisões errôneas durante a utilização deste modelo no teste industrial. Logo abaixo seguem as sugestões dos limites que devem ser respeitados.

Restrições sugeridas para o modelo ε a partir de simulações computacionais:

- DM, Limites: Mín: 11.50 e Máx:12.50 [mm];
- 16_8, Limites: Mín: 90.00 e Máx: 97.00 [%];
- 8_6.3, Limites: Min: 1.50 e Máx: 4.70 [%];
- 6.3, Limites: Min: 0 e Máx: 3.00 [%];
- 16, Limites: Min: 1.00 e Máx: 2.30 [%];
- REL, Limites: Min: 0.60 e Máx: 1.10 [-].

Foi percebido também que, para pelotamentos controlados como o da planta em estudo, os P.C.O 16 e REL podem entrar como constantes no modelo ε a fim de se ter maior controle dos P.C.O DM, 16_8, 8_6.3 e 6.3 e maior estabilidade na avaliação de tendências do % ε para o controle do processo. Os valores médios encontrados na planta e que satisfizeram os critérios acima foram 2,3% para o P.C.O 16 e 0,8 para o P.C.O REL, tornando a equação do Modelo ε da seguinte forma:

$$0.324(DM) + 0.387(16_8) - 2.076(8_6.3) - 0.92(6.3) + 3.98 \quad (5.3)$$

5.3. Análise de relacionamento em três dimensões.

Este tópico é importante para ampliar o senso crítico adicionando a dimensão “análise visual” em relação ao que habitualmente se vê em duas dimensões. Algumas variáveis serão postas a fim de se ter visualmente a validação de tendências e suas interdependências.

5.3.1. Entre as variáveis de entrada (P.C.O).

5.3.1.1. Variável analisada em três dimensões 16_8.

Como pode ser visto na figura 5.8, ao avaliarmos os P.C.O utilizados nos ensaios, foi observado que ocorre uma tendência de quanto maior for DM e menor for o 6.3 maior será o 16_8.

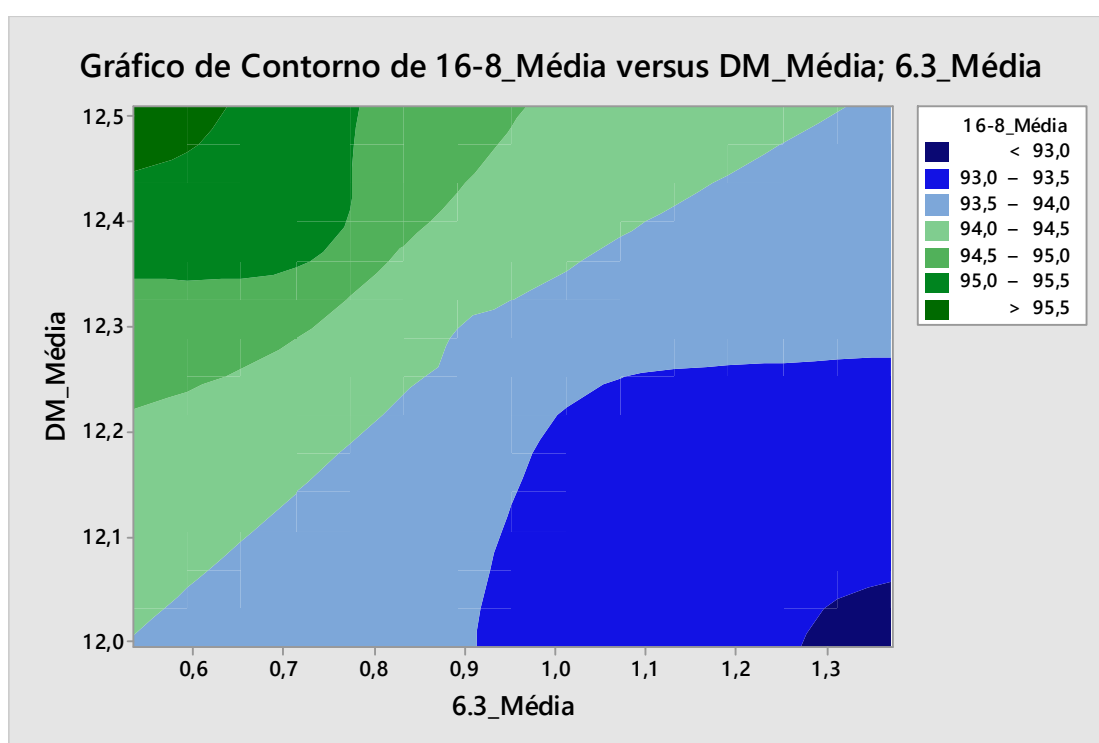


Figura 5.8: Avaliação em três dimensões do P.C.O 16_8 (DM;6.3) encontrado nos leitos.

5.3.1.2. Variável analisada em três dimensões 8_6.3.

Como pode ser visto na figura 5.9, ao avaliarmos os P.C.O utilizados nos ensaios, é observado que ocorre uma tendência de quanto menor for DM e maior for 6.3 maior será o 8_6.3.

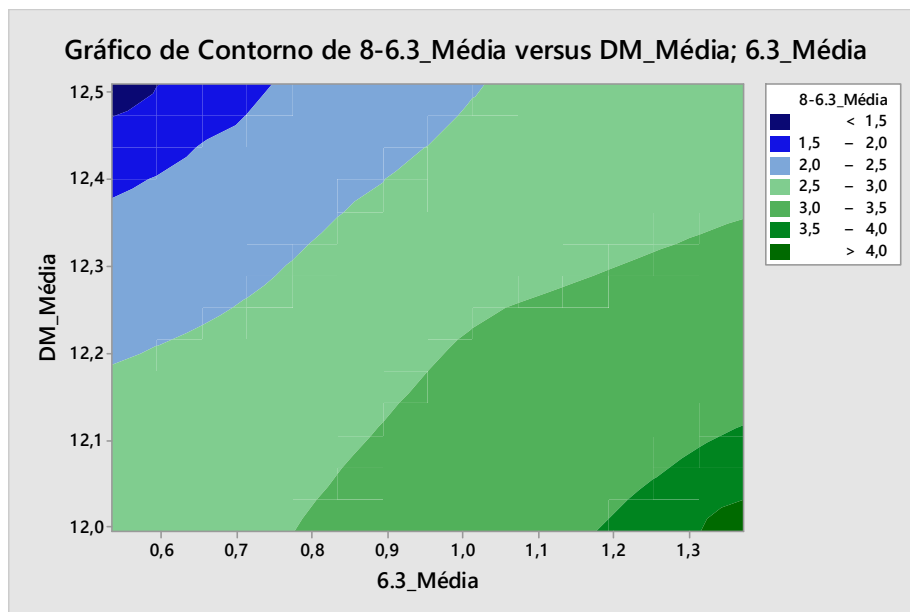


Figura 5.9: Avaliação em três dimensões do P.C.O 8_6.3 (DM;6.3) encontrado nos leitos.

5.3.1.3. Variável analisada em três dimensões REL.

Como pode ser visto na figura 5.10, ao avaliarmos os P.C.O utilizados nos ensaios, foi observado que ocorre uma tendência de quanto menor for 8_6.3 e menor for o 6.3 maior será o REL.

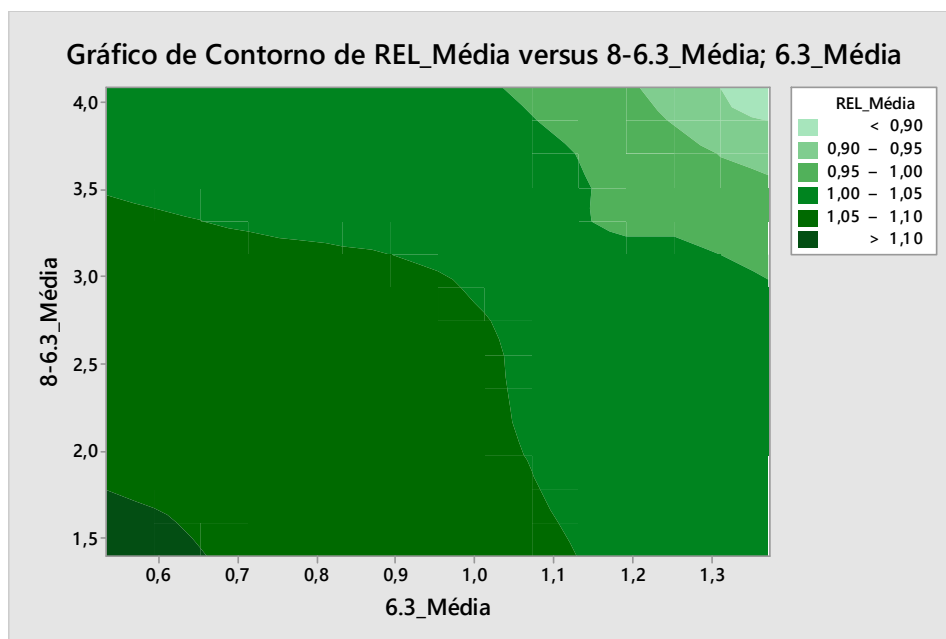


Figura 5.10: Avaliação em três dimensões do P.C.O REL (8_6.3; 6.3) encontrado nos leitos padrões.

5.3.1.4. Variável analisada em três dimensões 8_6.3.

Como pode ser visto na figura 5.11, ao avaliarmos os P.C.O utilizados nos ensaios, foi observado que ocorre uma tendência de quanto menor for REL e menor for o 16_8 maior será o 8_6.3.

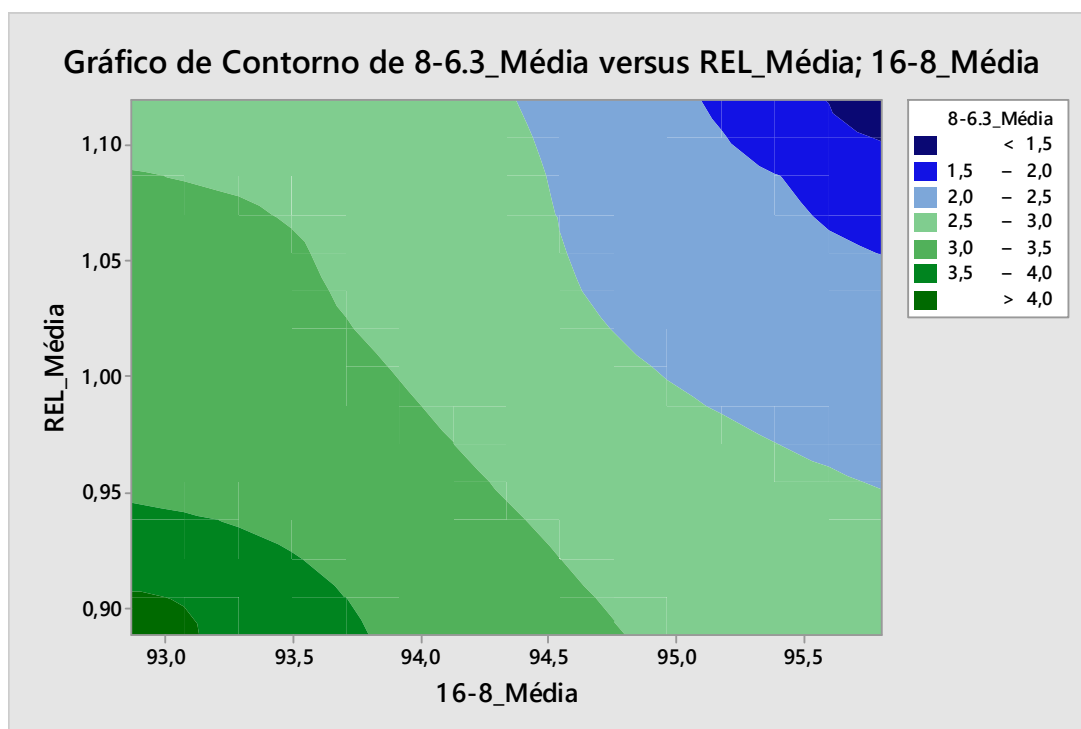


Figura 5.11: Avaliação em três dimensões do P.C.O 8_6.3 (REL;16_8) encontrado nos leitos padrões.

5.3.2. Entre as variáveis de entrada (P.C.O) com a variável resposta (%ε).

Foi utilizado EV para discriminar %ε por limitação de caracteres do software utilizado.

5.3.2.1. Variável analisada na terceira dimensão EV ou %ε.

Como pode ser visto na figura 5.12, ao avaliarmos a relação do %ε com os P.C.O utilizados nos ensaios, foi observado que ocorre uma tendência de quanto maior for a REL e maior for o 16_8 maior será o %ε.

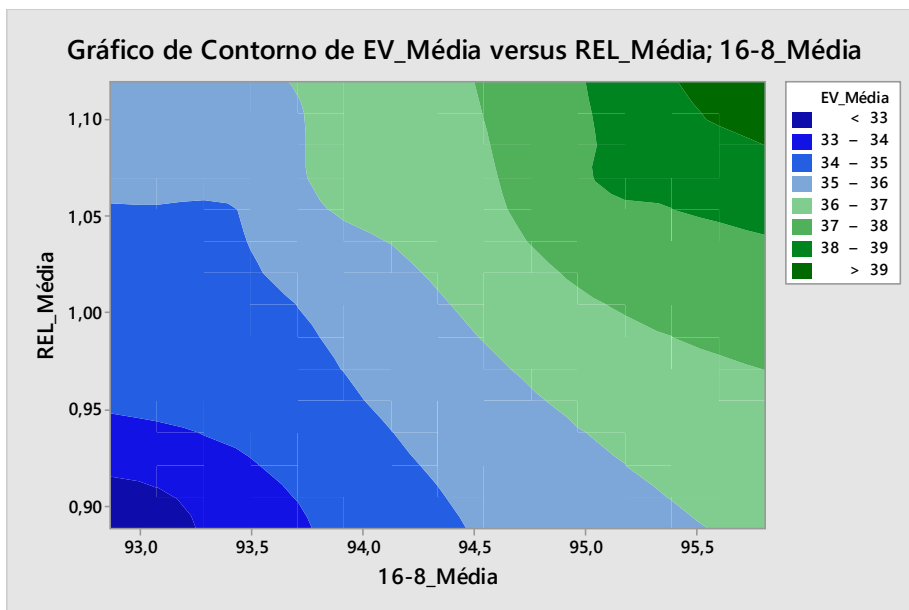


Figura 5.12: Avaliação em três dimensões do $\% \varepsilon = EV(REL; 16_8)$ encontrado nos leitos padrões.

5.3.2.2. Variável analisada em três dimensões EV ou $\% \varepsilon$.

Como pode ser visto na figura 5.13, ao avaliarmos a relação do $\% \varepsilon$ com os P.C.O utilizados nos ensaios, foi observado que ocorre uma tendência de quanto maior for a 8_6.3 e maior for o 6.3 menor será o $\% \varepsilon$.

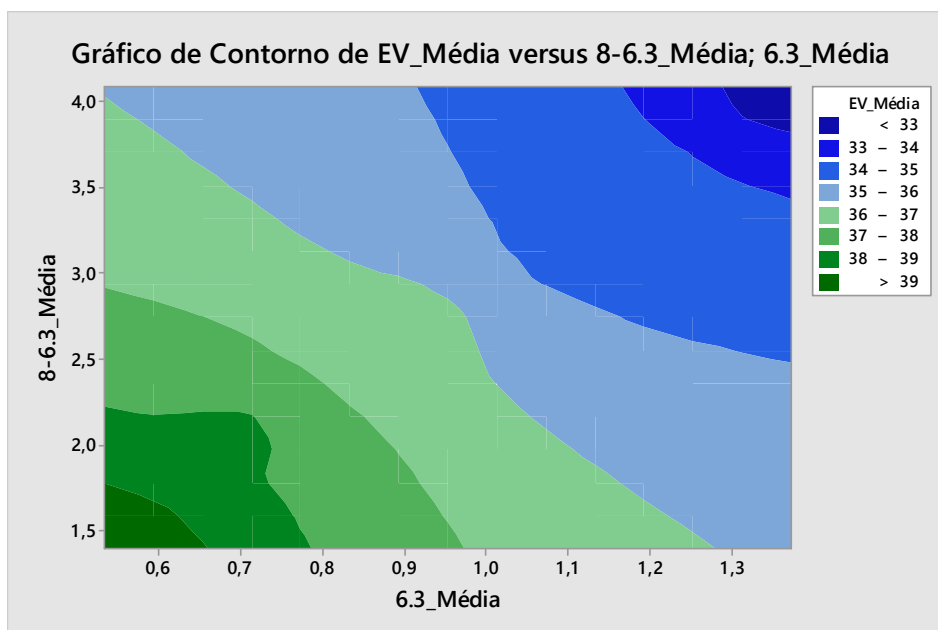


Figura 5.13: Avaliação em três dimensões do $\% \varepsilon = EV(8_6.3; 6.3)$ encontrado nos leitos padrões.

5.4. Análise de contribuição na resultante %ε.

5.4.1. Avaliação superficial do acoplamento entre as faixas granulométricas.

Para melhor visualização do que ocorre em leitos com esferas com diâmetros diferentes, foi feito um desenho em 3D utilizando o *software AutoCAD 2014* para entender os limites de diâmetro que formam acoplamento mecânico perfeito. É fato que esta simulação é apenas uma forma de montagem de leito dentre tantas outras que são possíveis de ocorrer. No entanto, a simulação nos oferece a oportunidade de reconhecer dois pontos importantes sobre a relação do diâmetro predominante, que ocorre em maior quantidade, e outros diâmetros recessivos que ocorrem em menor quantidade na montagem do leito. O primeiro ponto é entender qual o diâmetro recessivo se acopla perfeitamente entre três esferas predominantes, podendo haver vazios entre elas e considerando as esferas predominantes na mesma altura (a). O segundo ponto foi descobrir qual o diâmetro recessivo se encaixa sobre as três esferas predominantes obstruindo completamente todos os espaços vazios, sobre a ótica 2D, e considerando as esferas predominantes na mesma altura (b).

A figura 5.14 nos mostra que para três esferas de diâmetro unitário chamada de diâmetro predominante as esferas vermelhas e o de diâmetro recessivo as esferas verdes, é possível perceber que a esfera verde toca uma vez em cada três esferas vermelhas em duas dimensões. Sendo assim, para uma fração de 0,1548 do diâmetro unitário, as esferas verdes possibilitam a geração de espaços vazios entre as mesmas. (Para um acoplamento hexagonal na mesma base das esferas predominantes em volta de uma esfera recessiva).

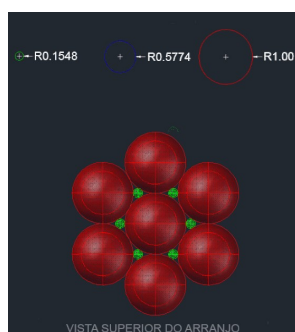


Figura 5.14: Visão superficial do acoplamento entre esferas de diâmetro unitário com outras com diâmetro de 0,1548 x diâmetro unitário.

A figura 5.15 nos mostra que para esferas de diâmetro unitário, a saber, chamada de diâmetro predominante as esferas vermelhas, e o de diâmetro recessivo as esferas azuis, pode ser percebido que as esferas azuis obstruem completamente os espaços vazios em duas dimensões, anulando os vazios entre esferas vermelhas. Então para uma fração de 0,5774 do diâmetro unitário, as esferas azuis não permitem a geração de espaços vazios entre as mesmas. (Para um acoplamento hexagonal na mesma base das esferas predominantes em volta de uma esfera recessiva).

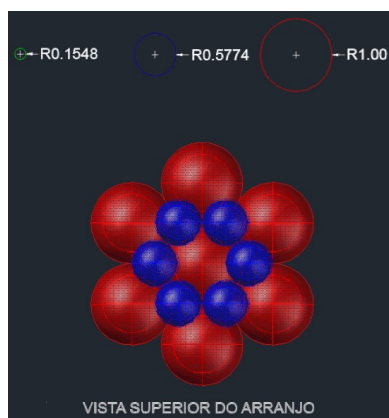


Figura 5.15: Visão superficial do acoplamento entre esferas com diâmetro unitário e com outras com diâmetro de 0,5774 x diâmetro unitário.

No caso de leitos com diversos diâmetros, a pior situação pode ocorrer quando existem os casos (a) e (b), reduzindo, assim, significativamente os vazios e na prática ocorre o aumento da densidade aparente do leito. A figura 5.16 simula a presença dos dois casos, (a) e (b).

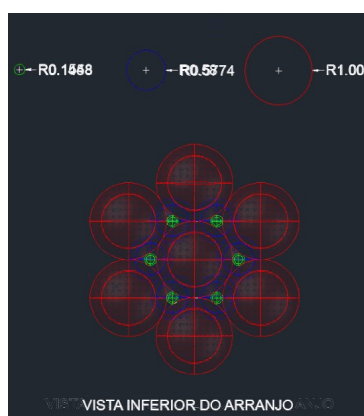


Figura 5.16: Visão superficial do acoplamento entre esferas com diâmetro unitário com outras de diâmetro de 0,1548 x diâmetro unitário e de 0,5874 x diâmetro unitário.

Analogamente, na linha de produção o diâmetro médio pode ser chamado de diâmetro predominante e pode variar entre 11,80 mm a 12,50 mm. Então tendo a faixa de diâmetro predominante da planta, é fácil simular os diâmetros recessivos do caso (a) e do caso (b) e identificar a faixa que contribui, de forma incisiva, na redução de espaços vazios do leito formado por pelotas cruas, conforme tabela 5.1.

Tabela 5.1: Simulação dos diâmetros recessivos em relação aos diâmetros encontrados na planta em estudo.

Diâmetro predominante [mm]	Diâmetro recessivo (b) [mm]	Faixa correspondente	Diâmetro recessivo (a) [mm]	Faixa correspondente
12,5	1,9	6,3	7,3	8_6.3
12,4	1,9	6,3	7,3	8_6.3
12,3	1,9	6,3	7,2	8_6.3
12,2	1,9	6,3	7,2	8_6.3
12,1	1,9	6,3	7,1	8_6.3
12	1,9	6,3	7,0	8_6.3
11,9	1,8	6,3	7,0	8_6.3
11,8	1,8	6,3	6,9	8_6.3

O modelo ε considerou os P.C.O faixas granulométricas de 16; 16_8; 8_6.3; e 6.3, tendo em vista o mostrado até agora, fica simples de entender o porquê a faixa de 8_6.3 e a faixa de 6.3 entram no modelo subtraindo o resulta do $\% \varepsilon$ e, ainda, o porquê que o P.C.O 8_6.3 tem maior peso em relação ao P.C.O 6.3 na resultante $\% \varepsilon$.

5.5. Resultados da pelota queimada.

5.5.1. Análise de relacionamento do modelo ε com a qualidade final da pelota queimada.

Os resultados encontrados na tabela 5.2 dos experimentos realizados em *Pot-Grate* nos mostram o comportamento das variáveis de processo quando submetidas a um perfil de queima e com um leito com sua composição granulométrica conhecida.

Tabela 5.2: Resultados de qualidade física da pelota queimada com a previsão de %ε via PML.

Sol. 227-14 - Mestrado Avaliação de espaços vazios no leito de pelotas cruas						
POTN°	162/14	164/14	165/14	166/14	167/14	163/14
DATA	20/08/2014	21/08/2014	21/08/2014	21/08/2014	21/08/2014	20/08/2014
UMIDADE PF (%)	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
RELAÇÃO	0,46	0,64	0,98	1,21	1,41	1,64
AGLOMERANTE/ DOSAGEM(%)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
RITMO DE PRODUÇÃO (tms/ano)	8,2 tms/ano	8,2 tms/ano	8,2 tms/ano	8,2 tms/ano	8,2 tms/ano	8,2 tms/ano
GRANULOMETRIA						
+ 16,0 mm	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03
- 16,0 + 14,0 mm	0,10	0,10	0,12	0,14	0,17	0,19
- 14,0 + 12,5 mm	0,20	0,27	0,35	0,38	0,39	0,40
- 12,5 + 10 mm	0,50	0,44	0,39	0,36	0,33	0,30
- 10,0+ 8 mm	0,15	0,14	0,09	0,07	0,07	0,06
-8 mm + 6,3 mm	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,02
Relação	0,46	0,64	0,98	1,21	1,41	1,64
DM	11,48	11,73	12,17	12,51	12,67	13,09
TESTES FISICOS						
COMPRESSÃO -16,0 +12,5 mm						
Média (kgf/pel.)	325	345	366	358	347	341
DP	130	136	118	115	131	124
-200 (%)	15	14	9	10	13	14
TAMBORAMENTO (%)						
+ 6.3 mm	92,2	92,8	94,5	93,9	93,3	93,0
-6,3 +0,5 mm	1,6	1,5	1,1	1,3	1,4	1,5
- 0.5 mm	6,2	5,7	4,4	4,8	5,3	5,5
TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA NO LEITO DE PELOTAS DURANTE A QUEIMA (°C)						
CAMADA SUPERIOR	1370	1365	1377	1365	1367	1364
CAMADA INTERMEDIÁRIA	1353	1369	1380	1377	1370	1382
CAMADA INFERIOR	1260	1275	1305	1303	1306	1307
CAIXA DE VENTO	510	512	529	524	552	567
PREVISÃO DE ESPAÇOS VAZIOS NOS LEITOS DE PELOTAS CRUAS (%)						
%ε	31,49	34,84	38,74	39,54	40,18	43,75

Com objetivo de não avaliar casos pouco possíveis de ocorrer na planta industrial, os leitos 1 e 5 foram descartados de nossas análises e os leitos de 2,3,4 e 5 passarão a ser chamados, respectivamente, de pelota 1, 2, 3 e 4, com a exceção das figuras 5.17 e 5.18 que avaliaram todos os leitos, 1,2,3,4,5 e 6, para análise geral.

Analisando a dinâmica de variação da temperatura que é mostrada nas figuras 5.17 e 5.18 é possível perceber que o aumento do %ε traz a maximização da distribuição dos gases quentes para o leito, tornando mais homogênea a troca térmica e elevando a temperatura média no interior do leito. Isso ocorre em função de facilitar o controle efetivo da velocidade do fluido que atravessa o leito e, conseqüentemente, torna-se

possível o controle do número de Reynolds, componente crucial na medição do *número de Nusselt*. É demonstrado na equação por Incropera e Dewitt (2003), visto no subitem 5.3, que quanto maior for o número *Reynolds* maior será o número de *Nusselt* e mais eficaz será a transferência de calor por convecção em volta de um corpo esférico para leitos fixo. Esta referência é limitada pelos limites máximos de velocidade do fluido demonstrada por Kunii e Levenspie (1977) para não movimentar o leito.

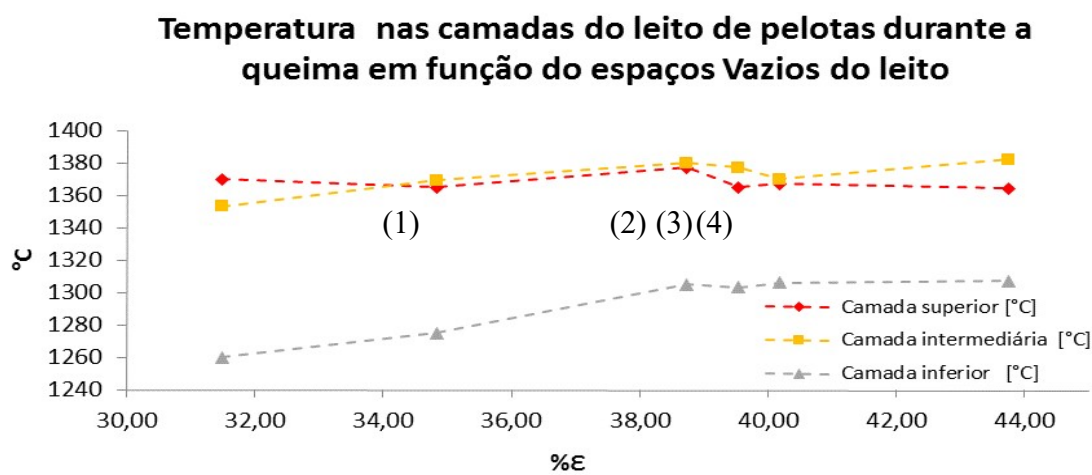


Figura 5.17: Dinâmica da temperatura em função da camada do leito de pelotas durante a queima¹.

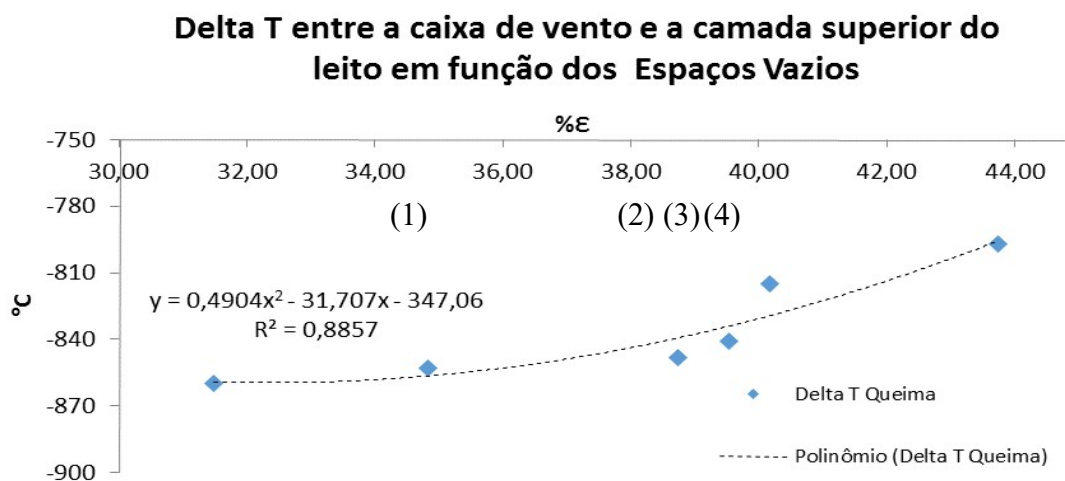


Figura 5.18: Dinâmica do diferencial de temperatura entre a temperatura da camada superior e os gases que saem do leito com fluxo descendente com mesmo delta P.

¹ Pelota (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16_8. Todas as queimas utilizaram o mesmo perfil térmico. Figuras 5.17 e 5.18.

A dinâmica de variação da qualidade física à compressão e ao tamboramento, figura 5.19, nos permite dizer que existe um ponto ótimo de % ϵ . Caso passe deste ponto é possível que o processo de secagem possa ser ineficiente em função da elevação do raio médio das pelotas, mecanismo de controle da secagem da pelota (PEREIRA e SESHADRI, 1985) e, com isso, ocorre a redução da performance da queima das pelotas cruas.

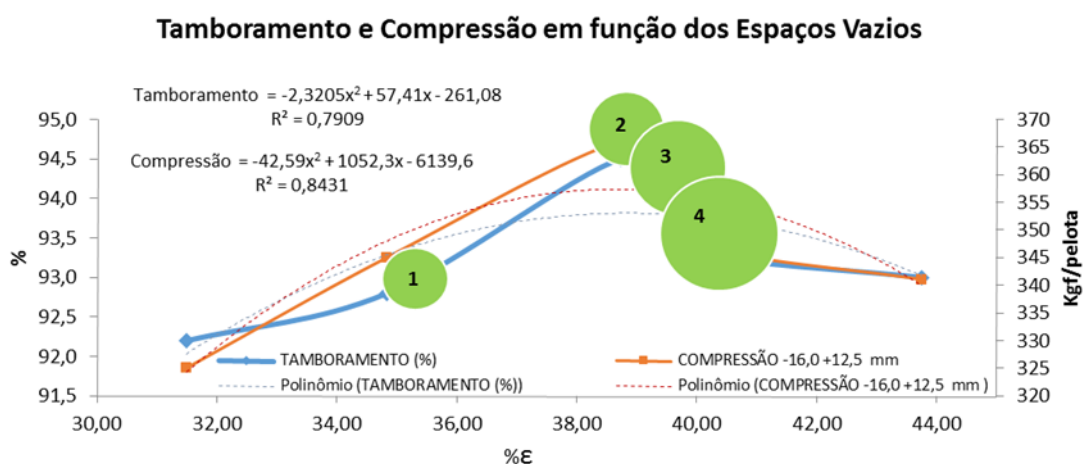


Figura 5.19: Dinâmica de variação da qualidade física à Compressão e do Tamboramento².

Ao analisar o comportamento das variáveis abordadas nas figuras 5.17, 5.18 e 5.19 é perceptível que apesar do % ϵ garantir as condições ideais, fluído dinamicamente falando para a transferência de calor no leito, a produtividade poderá ser restringida em função da cinética da secagem e sinterização das pelotas cruas impostas pelos limites da planta piloto a exemplo o tempo de residência das pelotas nas distintas zonas.

Segundo Comiti and Renaud (1989) e Boudreau (1996), a tortuosidade de um leito é uma função dos espaços vazios. Logo, com a redução da tortuosidade em função do aumento do % ϵ , o fluxo de ar quente passa mais livremente por todo o leito, reduzindo, significativamente, as perdas térmicas em função de altas pressões geradas pela resistência hidráulica muito comum em leitos com alta tortuosidade e baixo % ϵ . Na figura 5.20 pode ser visto a influência do % ϵ na tortuosidade teórica do leito.

² Pelota (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16_8.

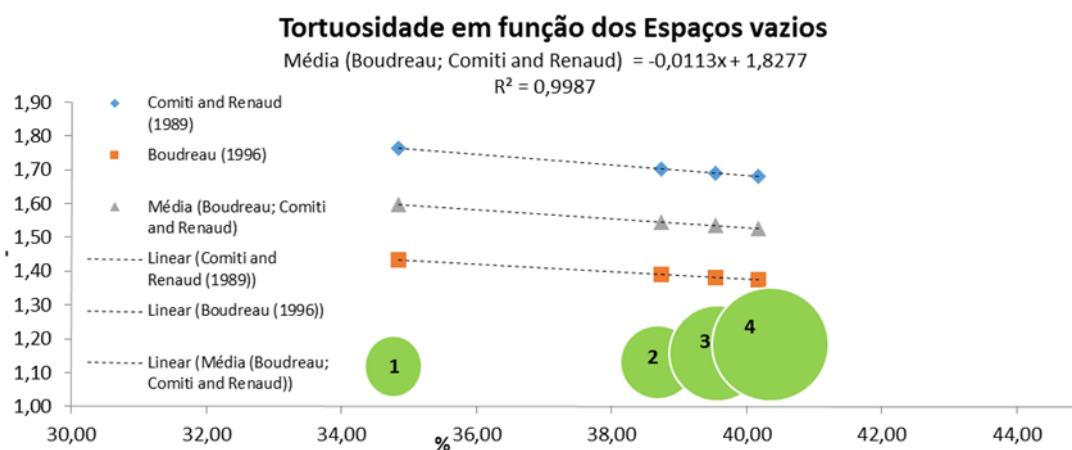


Figura 5.20: Dinâmica da tortuosidade em função da variação dos % ϵ^3 .

5.6. Teste industrial.

O teste industrial ocorreu conforme subitem 4.6.0. Cabe ressaltar as condições do minério e da planta durante o teste:

- (Minério de ferro) Umidade média: 10.65 [%];
- (Minério de ferro) *Blaine* médio: 1973 [g/cm²];
- (Minério de ferro) -325# médio: 89.80 [%];
- (Minério de ferro) Hematita especular média: 38.46 [%];
- (Minério de ferro) PPC médio: 3.19 [%];
- (Planta) Perfil térmico na queima durante todo o teste: 1330 [°C];
- (Planta) Camada de fundo: 0.06 [m];
- (Planta) Camada total do leito: 0.45 [m];
- (Planta) Velocidade da grelha: 7.23 [m/min].

5.6.1. Avaliação estatística dos dados coletados durante o teste industrial.

Como descrito no subitem 4.6.0, as variáveis X, Y, W e Z foram submetidas à análise de relacionamento para compor o modelo empírico de custos na planta de

³ Pelota crua (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota crua (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota crua (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota crua (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16.0 a 8.0 mm, com o aumento do percentual de espaços vazios ocorre uma redução linear da tortuosidade na faixa estudada.

pelotização estudada, visto mais adiante. A partir de agora serão expostos os resultados de análise de regressão polinomial e o nível de relacionamento destas variáveis com o %ε.

5.6.1.1. Análise dos dados referente ao consumo de carvão em função %ε.

Análise de Regressão: CARV versus EV_CARV, figura 5.21. A equação de regressão é:

$$CARV = 26,57 - 0,2858EV_CARV \quad (5.41)$$

$$S = 0,307141 \quad R2 = 52,2\% \quad R2(aj.) = 52,1\%$$

Análise de Variância:

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	154,105	154,105	1633,58	0,000
Erro	1498	141,315	0,094		
Total	1499	295,419			

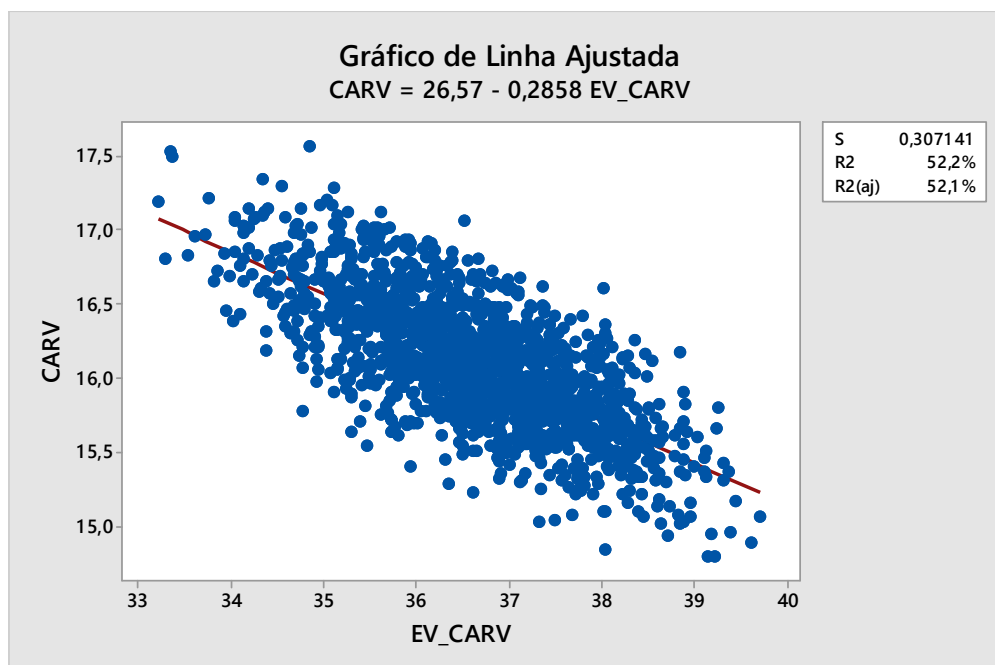


Figura 5.21: Consumo de carvão pulverizado em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.2. Análise dos dados referente ao consumo de gás natural em função do %ε

Análise de Regressão: KNGN versus EV_KNGN, figura 5.22. A equação de regressão é:

$$KNGN = 29,78 - 0,5135 EV_KNGN \quad (5.42)$$

$$S = 0,526929 \quad R^2 = 51,2\% \quad R^2(\text{aj.}) = 51,1\%$$

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	435,926	435,926	1570,04	0,000
Erro	1498	415,925	0,278		
Total	1499	851,852			

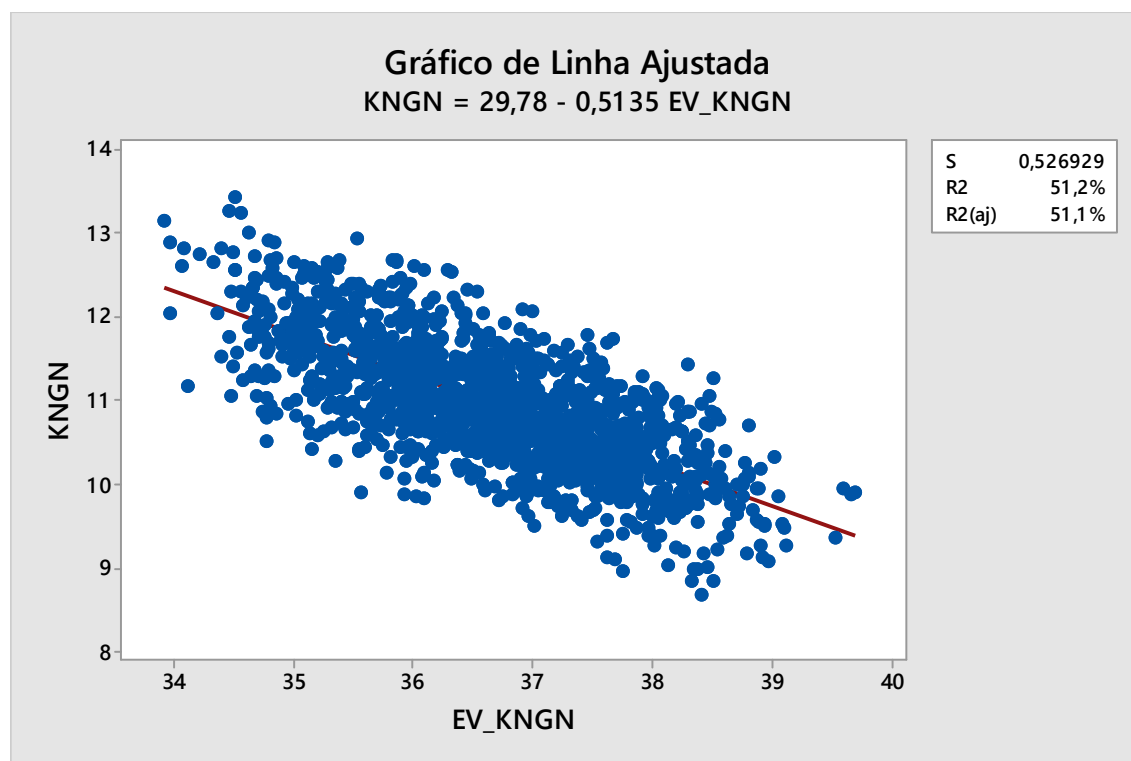


Figura 5.22: Consumo de gás natural em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.3. Análise dos dados referente ao consumo de energia elétrica em função do %ε

Análise de Regressão Polinomial: KWH versus EV_KWH, figura 5.23. A equação de regressão é:

$$KWH = - 280,3 + 17,02 EV_KWH - 0,2420 EV_KWH^2 \quad (5.43)$$

$$S = 0,534069 \quad R2 = 68,9\% \quad R2(aj.) = 68,9\%$$

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	2	932,29	466,145	1634,28	0,000
Erro	1475	420,71	0,285		
Total	1477	1353,00			

Análise de Variância Sequencial

Fonte	GL	SQ	F	P
Linear	1	733,772	1749,02	0,000
Quadrático	1	198,518	695,99	0,000

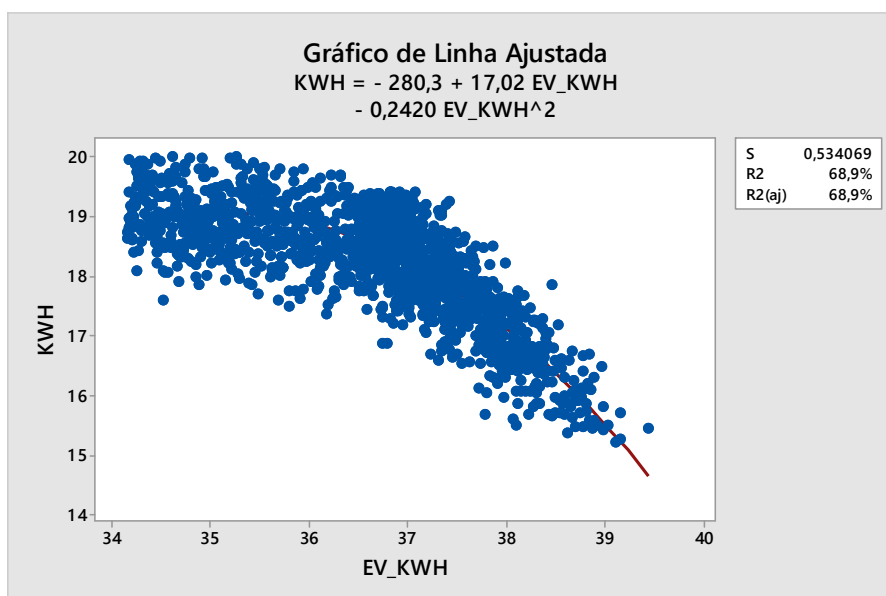


Figura 5.23: Consumo de energia elétrica consumida pelos ventiladores de processo em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.4. Análise dos dados referente à temperatura das pelotas na descarga em função do %ε.

Análise de Regressão: TEM_DESC versus EV_PERDAS, figura 5.24. A equação de regressão é:

$$TEM_DESC = 423,7 - 7,950 EV_PERDAS \quad (5.44)$$

$$S = 6,67476 \quad R^2 = 64,3\% \quad R^2(aj.) = 64,3\%$$

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	120373	120373	2701,82	0,000
Erro	1498	66740	45		
Total	1499	187113			

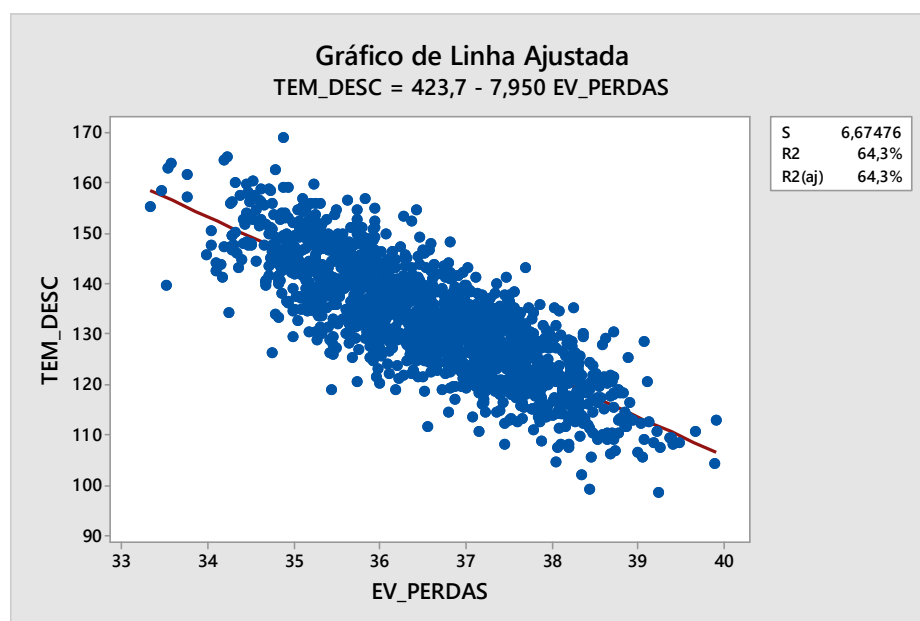


Figura 5.24: Temperatura das pelotas queimadas na descarga em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.5. Análise dos dados referente às perdas térmicas na descarga em função do %ε.

Conforme equação 3.5, pode-se fazer as seguintes considerações:

$$Q/m = C_p \times (t_f - 25) \text{ [kcal/kg/h]}$$

Onde, Q: Calorias em Kcal e m: massa em kg de pelotas queimadas/hora.

Análise de Regressão: PT_DESC versus EV_PDESC, figura 5.25. A equação de regressão é:

$$PT_DESC = 116,6 - 2,325 EV_PDESC \quad (5.45)$$

$$S = 1,95206$$

$$R^2 = 64,3\%$$

$$R^2(\text{aj.}) = 64,3\%$$

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	10295,4	10295,4	2701,82	0,000
Erro	1498	5708,2	3,8		
Total	1499	16003,6			

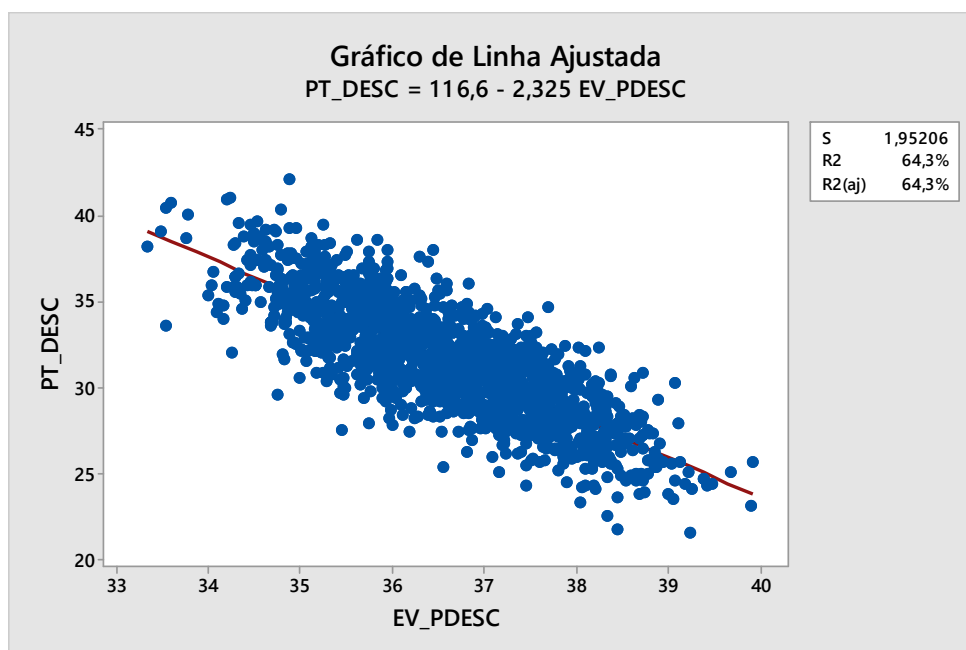


Figura 5.25: Perdas térmicas na descarga com temperaturas das pelotas queimadas acima da temperatura ambiente de 25⁰C em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.6. Análise dos dados referente às perdas térmicas na descarga com referência de temperatura usual no local em função do %ε.

Conforme equação 3.5, pode-se fazer as seguintes considerações:

$$Q/m = C_p \times (t_f - 130) \text{ [kcal/kg/h]}$$

Onde, Q: Calorias em Kcal e m: massa em kg de pelotas queimadas/hora.

Análise de Regressão: PT_DESC_CONT versus EV_PDESC, figura 5.26. A equação de regressão é:

$$PT_DESC_CONT = 67,55 - 1,829 EV_PDESC \quad (5.46)$$

S = 1,53520

R² = 64,3%

R²(aj.) = 64,3%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	6367,73	6367,73	2701,82	0,000
Erro	1498	3530,53	2,36		
Total	1499	9898,26			

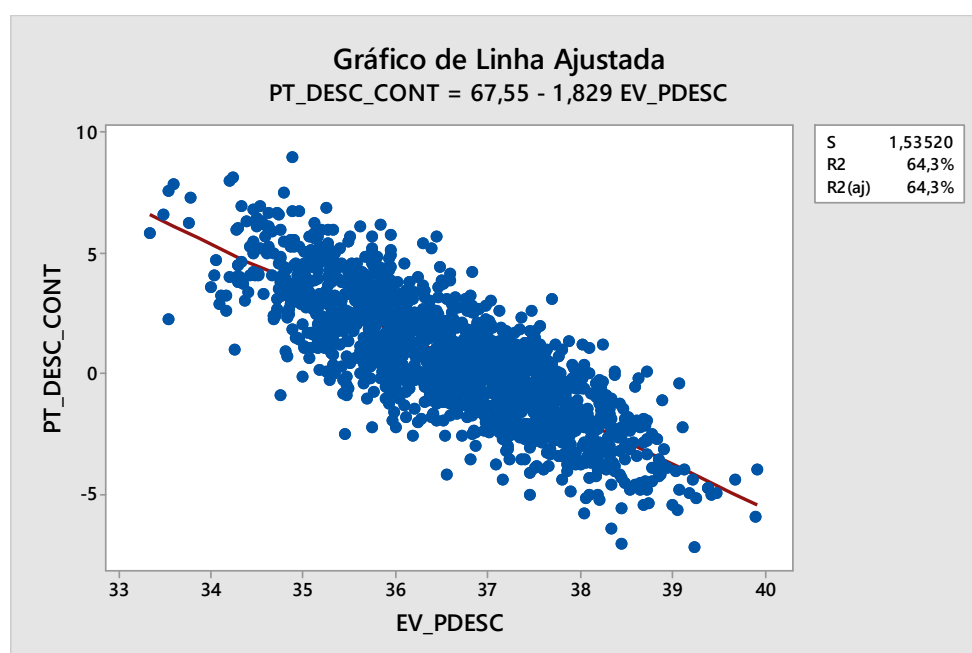


Figura 5.26: Perdas térmicas na descarga com temperaturas das pelotas queimadas acima da temperatura média de referência de 130°C, considerada normal, em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.6.1.7. Análise dos dados referente à produtividade do forno em função do %ε.

Linha Ajustada: PROD versus EV_PROD.

Análise de Regressão Polinomial: PROD versus EV_PROD, figura 5.27.

A equação de regressão é:

$$PROD = - 272,4 + 16,24 EV_PROD - 0,2176 EV_PROD^2 \quad (5.47)$$

$$S = 0,587237 \quad R2 = 57,8\% \quad R2(aj.) = 57,7\%$$

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	2	583,95	291,977	846,68	0,000
Erro	1238	426,92	0,345		
Total	1240	1010,88			

Análise de Variância Sequencial

Fonte	GL	SQ	F	P
Linear	1	245,540	397,50	0,000
Quadrático	1	338,415	981,35	0,000

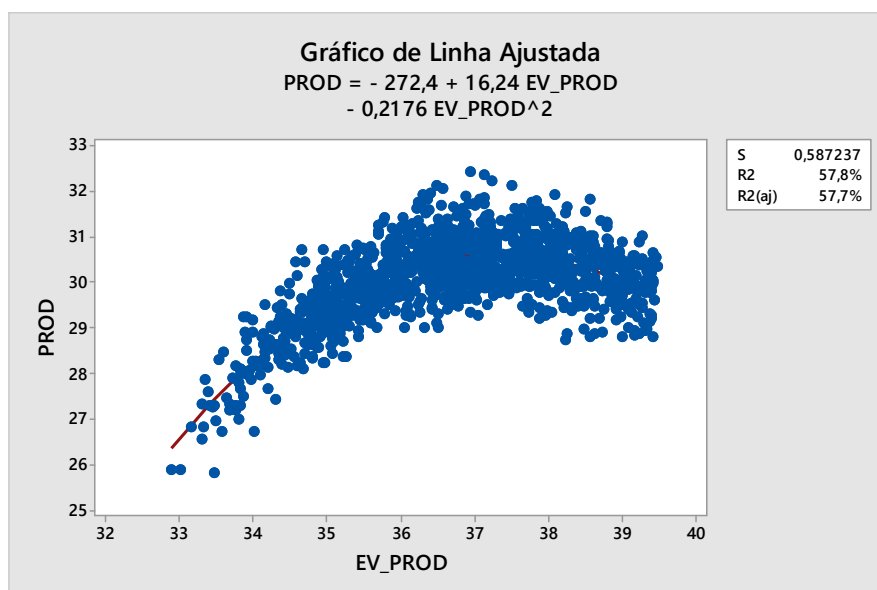


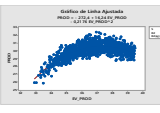
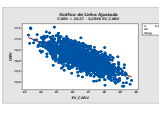
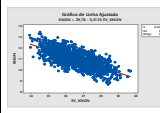
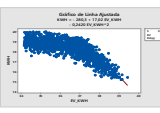
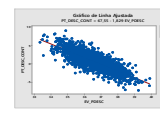
Figura 5.27: Produtividade do forno em função do %ε previsto pelo modelo ε.

5.7. Modelo empírico de controle de custos.

A principal causa de restrição de produção em uma indústria de pelletização é a queda da qualidade física da pelota queimada. Logo, no dia-a-dia destas plantas, é natural que opere com a qualidade física na marginal de contrato com o cliente. Então quando se vê períodos de baixa produção, entende-se que foi um período de perda da qualidade física e de forma compensatória a redução da produção. No subitem 5.6.1, os dados industriais foram tratados estatisticamente e gerado regressões aritméticas polinomiais que nos auxiliarão nas simulações das tabelas 5.3 e 5.4.

5.7.1 Criação de relacionamento entre os custos da planta de pelletização e o %ε.

Tabela 5.3: Simulação de consumo específico de insumos e perdas térmicas e de produtividade.

EV = ε%	Produtividade	Consumo de carvão (X)	Consumo de GN (Y)	Consumo de E.E (Z)	Perdas térmicas (W)
[%]	[t/m ² /dia]	[kg/t/h]	[kNm ³ /t/h]	[kwh/t/h]	[kcal/kg/h]
-					
34	28,21	16,85	12,32	18,93	25,36
34,2	28,49	16,80	12,22	19,03	25,00
34,4	28,76	16,74	12,12	19,11	24,63
34,6	29,00	16,68	12,01	19,18	24,27
34,8	29,23	16,62	11,91	19,22	23,90
35	29,44	16,57	11,81	19,25	23,54
35,2	29,63	16,51	11,70	19,26	23,17
35,4	29,81	16,45	11,60	19,24	22,80
35,6	29,97	16,40	11,50	19,21	22,44
35,8	30,11	16,34	11,40	19,16	22,07
36	30,23	16,28	11,29	19,09	21,71
36,2	30,34	16,22	11,19	19,00	21,34
36,4	30,42	16,17	11,09	18,89	20,97
36,6	30,50	16,11	10,99	18,76	20,61
36,8	30,55	16,05	10,88	18,61	20,24
37	30,59	16,00	10,78	18,44	19,88
37,2	30,60	15,94	10,68	18,25	19,51
37,4	30,61	15,88	10,58	18,05	19,15
37,6	30,59	15,82	10,47	17,82	18,78
37,8	30,56	15,77	10,37	17,58	18,41
38	30,51	15,71	10,27	17,31	18,05
38,2	30,44	15,65	10,16	17,03	17,68
38,4	30,35	15,60	10,06	16,72	17,32
38,6	30,25	15,54	9,96	16,40	16,95
38,8	30,13	15,48	9,86	16,06	16,58
39	29,99	15,42	9,75	15,70	16,22
39,2	29,84	15,37	9,65	15,32	15,85
39,4	29,66	15,31	9,55	14,92	15,49
39,6	29,47	15,25	9,45	14,50	15,12
39,8	29,26	15,20	9,34	14,06	14,76
40	29,04	15,14	9,24	13,60	14,39

Em vermelho, estão os momentos em que as perdas térmicas são negativas em relação ao resultado esperado pela planta.

As informações da tabela 5.3 podem ser resumidas na figura 5.28 que mostra, de forma gráfica, as tendências dos energéticos X, Y, Z e W.

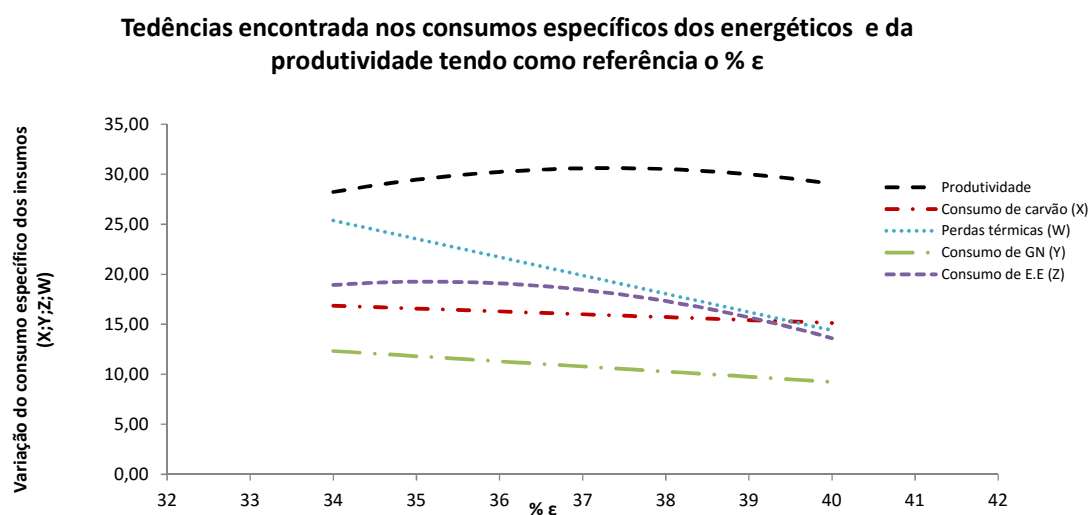
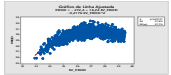
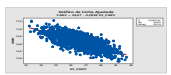
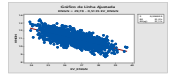
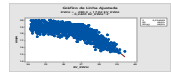
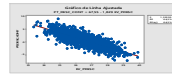


Figura 5.28: Variação dos consumos específicos dos energéticos e produtividade.

A partir do planejamento anual da Samarco Mineração SA de consumo de energéticos (combustíveis e energia elétrica) e de produção para a planta em estudo, foi possível montar o modelo empírico de controle de custos a partir dos desvios entre o planejado e o praticado, chamado aqui de incrementos visto na tabela 5.4. Ainda, de forma gráfica, a figura 5.29 deixa clara a dinâmica de incrementos de custo anual destes itens, em especial, a produção intimamente ligada às restrições de qualidade física das pelotas queimadas. Este modelo entrega para o gestor da planta condições estratégicas que o auxiliarão na definição do melhor cenário imprimido pelo planejamento da empresa vinculado ao mercado consumidor e pelos fornecedores de matéria prima tendo como base de referência um indicador de chão de fábrica o % ϵ .

Tabela 5.4: Simulação do % de incremento sobre o custo anual com insumos, perdas térmicas e produção anual.

EV = €	Produção anual	Incremento % no custo de carvão (X)	Incremento % no custo de GN (Y)	Incremento % no custo de E.E (Z)	Incremento % no custo com perdas térmicas (W)
[%]	[t/ano]	[%/ano]	[%/ano]	[%/ano]	[%/ano]
-					
34	-5,35%	5,36%	14,29%	2,64%	19,51%
34,2	-4,41%	5,00%	13,34%	3,19%	19,23%
34,4	-3,53%	4,65%	12,38%	3,65%	18,95%
34,6	-2,71%	4,29%	11,43%	4,00%	18,67%
34,8	-1,94%	3,93%	10,48%	4,24%	18,39%
35	-1,24%	3,57%	9,53%	4,38%	18,10%
35,2	-0,59%	3,22%	8,57%	4,42%	17,82%
35,4	0,00%	2,86%	7,62%	4,34%	17,54%
35,6	0,53%	2,50%	6,67%	4,17%	17,26%
35,8	1,00%	2,14%	5,72%	3,89%	16,98%
36	1,42%	1,79%	4,76%	3,50%	16,70%
36,2	1,77%	1,43%	3,81%	3,01%	16,42%
36,4	2,07%	1,07%	2,86%	2,42%	16,13%
36,6	2,31%	0,71%	1,91%	1,72%	15,85%
36,8	2,49%	0,36%	0,95%	0,91%	15,57%
37	2,61%	0,00%	0,00%	0,00%	15,29%
37,2	2,67%	-0,36%	-0,95%	-1,02%	15,01%
37,4	2,68%	-0,71%	-1,91%	-2,14%	14,73%
37,6	2,62%	-1,07%	-2,86%	-3,36%	14,45%
37,8	2,51%	-1,43%	-3,81%	-4,69%	14,16%
38	2,34%	-1,79%	-4,76%	-6,13%	13,88%
38,2	2,11%	-2,14%	-5,72%	-7,67%	13,60%
38,4	1,82%	-2,50%	-6,67%	-9,31%	13,32%
38,6	1,48%	-2,86%	-7,62%	-11,06%	13,04%
38,8	1,07%	-3,22%	-8,57%	-12,92%	12,76%
39	0,61%	-3,57%	-9,53%	-14,88%	12,48%
39,2	0,09%	-3,93%	-10,48%	-16,94%	12,19%
39,4	-0,49%	-4,29%	-11,43%	-19,11%	11,91%
39,6	-1,13%	-4,65%	-12,38%	-21,39%	11,63%
39,8	-1,82%	-5,00%	-13,34%	-23,77%	11,35%
40	-2,58%	-5,36%	-14,29%	-26,26%	11,07%

Em vermelho é mostrado em quais momentos o incremento % é negativo. Neste caso, para insumos e perdas térmicas ocorre a redução do custo anual para a produção anual ocorre a redução da produção e, com isso, a redução da receita no período de um ano, *workflow* de 351 dias, ambos tendo como referência o planejado anual.

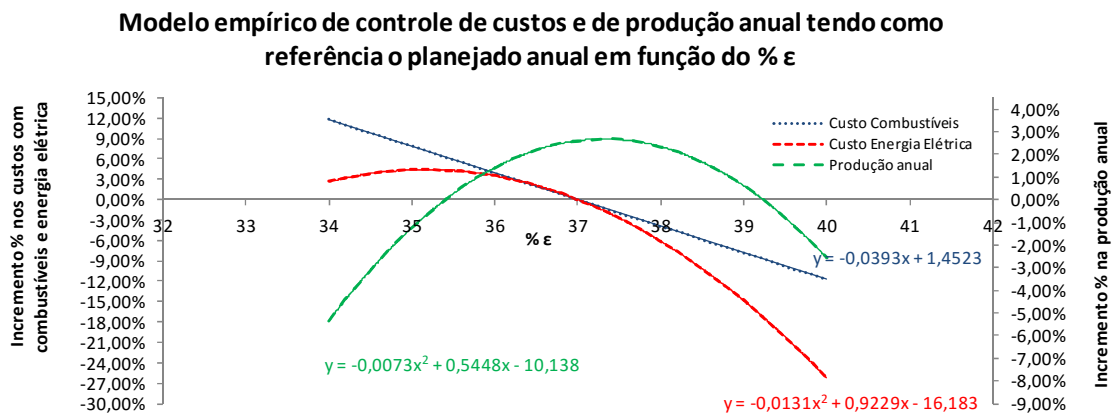


Figura 5.29: Modelo empírico de controle de custos e de produção anual tendo como referência o planejado anual em função do % ϵ .

Usando o Solve do Excel, encontramos os seguintes momentos registrados abaixo:

- Momento em que o incremento de produção é nulo, $\epsilon = 35.40\%$.
- Momento que o incremento de custo com combustível e eletricidade é nulo $\epsilon = 37.00\%$.
- Momento de máxima produção anual, $\epsilon = 37.32\%$.
- Momento em que o incremento de custo é mais positivo com combustíveis, $\epsilon =$ próximo de 40.00% , quanto maior melhor.
- Momento em que o incremento de custo é mais positivo com eletricidade, $\epsilon =$ próximo de 40.00% , quanto maior melhor.
- Momento de maior incremento positivo de produtividade, e que o incremento de custo com combustíveis é negativo, e ainda, o incremento de custo com eletricidade é nulo conforme orçamento anual, $\epsilon = 37.32\%$.

P.C.O médios adotados para esta condição:

- $DM = 11.79$ [mm]; $16_8 = 93,7$ [%]; $8_6.3 = 3,0$ [%]; $6.3 = 1,0$ [%];
 $16 = 2.3$ [%]; $REL = 0,9$ [-]

A faixa encontrada na linha produção de % ϵ foi de 33 a 40%, porém a região onde ocorre a maior frequência desta métrica foi o intervalo $36.00 \leq \% \epsilon \leq 38.00$ %.

Importante citar que ocorreu um desvio significativo entre o visto em *Pot-Grate* e na planta industrial. Em resumo, enquanto os melhores resultados de qualidade física ficaram para as pelotas no intervalo de $38.00 \leq \% \epsilon \leq 39.00$, na planta industrial este

valor caiu para o intervalo de $36.50 \leq \% \epsilon \leq 38.20$ em *Pot-Grate*, provavelmente em função do tempo de residência praticado pela planta industrial ter se mantido abaixo do praticado durante os testes em *Pot-Grate*. Com a maior produção admitida no forno neste período e a queda do tempo de residência, tornou-se necessário, para garantir à cinética de secagem e sinterização das pelotas cruas, produzir pelotas com diâmetros menores deslocando a faixa ótima de $\% \epsilon$ para baixo na qual garantiu a qualidade física e a produção e naturalmente os custos para este novo patamar. É fato que, com este deslocamento, perdeu-se oportunidades de redução no consumo de energéticos. No entanto, garantiram-se melhores volumes de produção potencializando a receita da empresa. Outros itens tais como a média de valores de qualidade do minério de ferro, umidade... etc podem ser vistas no subitem 5.6.0.

Equações otimizadoras do modelo empírico para os incrementos anuais de:

- Combustíveis= $-0,0393\% \epsilon + 1,4523$ (5.5)

- Energia elétrica= $-0,0131\% \epsilon^2 + 0,9229\% \epsilon - 16,183$ (5.6)

- Produção= $-0,0073\% \epsilon^2 + 0,5448\% \epsilon - 10,138$ (5.7)

As equações obtidas acima poderão sofrer alterações em seus coeficientes de acordo com a performance da planta e do material processado. No entanto, o desenho da curva tenderá a se manter com o mesmo formato para fornos tipo grelha móvel.

6. CONCLUSÃO

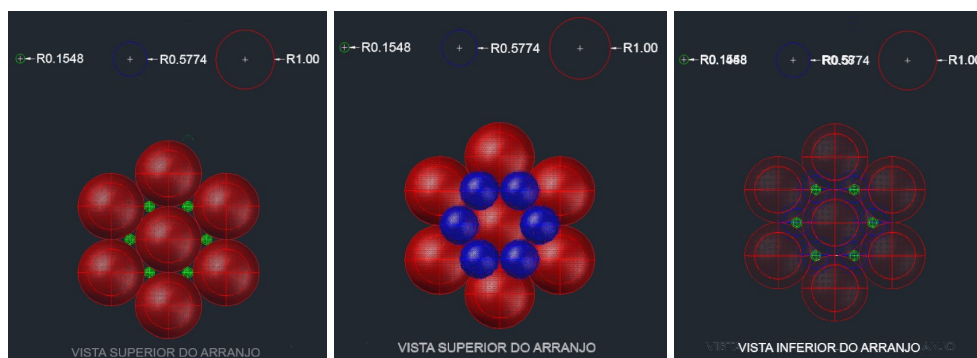
Tendo em vista as informações geradas pelos ensaios realizados em *Pot-Grate* e o teste industrial concluído durante este estudo, registram-se aqui as seguintes conclusões do trabalho.

Quando se fala em leitos de pelotas cruas, em pelotização de minério de ferro em que se tem uma população composta por inúmeros diâmetros, este leito apresenta um percentual de espaços vazios ($\% \epsilon$) que pode ser previsto a partir da medição de alguns parâmetros de controle operacional, ditos como P.C.O tais como diâmetro médio (DM), faixas granulométricas +16 mm (16); -16+8 mm (16_8); -8+6.3 mm (8_6.3); -6.3mm (6.3); e relação granulométrica (REL) e a partir do modelo ϵ se tem a previsibilidade deste índice como visto logo abaixo e na equação 5.2, página 75.

$$0.324(DM) + 0.387(16_8) - 2.076(8_6.3) - 0.92(6.3) + 0.66(16) + 3(REL) \quad (5.2)$$

Existe interdependência entre os P.C.O e a manipulação destes parâmetros resulta em um leito com mais ou menos %ε. A partir de simulações, o modelo ε pode indicar a melhor composição de faixas granulométricas para que o leito tenha o %ε requerido pelo processo de queima das pelotas cruas, como visto na tabela 5.2, página 85. A faixa de % ε encontrada durante o estudo foi de 32,59% a 39,87% para leitos formados com pelotas de vários diâmetros produzidos pelo pelotamento. Para as esferas de vidro com mesmo diâmetro, o % ε encontrado foi de 43,46% em média, ou seja, as variações de %ε encontradas no estudo ficaram abaixo do limite máximo de %ε como esperado.

O modelo ε sugere que as faixas granulométricas +16 mm; -16+8 mm aumentam o %ε do leito enquanto as faixas granulométricas -8+6.3 mm e -6.3 mm reduzem o %ε do leito. Uma boa ressalva sobre estas faixas é que a faixa -8+6.3 tem maior peso na redução do %ε do leito, tornando crucial o seu controle durante a formação do leito, como pode ser visto nas figuras abaixo e no item 5.4, página 81.



Em pelotamentos controlados com baixo nível de variação é sugerida uma pequena modificação no modelo ε em função da interdependência entre os P.C.O comentada no item 2. Deste resumo, é possível tornar as variáveis em faixa granulométrica +16 e a relação granulométrica em constantes, sendo estes valores obtidos a partir das médias destes dois P.C.O praticados na planta e multiplicados pelas respectivas constantes encontradas na equação 5.2. Esta manipulação no modelo ε tem como objetivo torná-lo mais estável e mais sensível às variações voltadas às faixas

granulométricas que predominam na composição de pelotas recém-produzidas pelo pelotamento. O modelo ε ajustado pode ser visto logo abaixo na equação 5.3 e na página 76.

$$0.324(DM) + 0.387(16_8) - 2.076(8_6.3) - 0.92(6.3) + 3.98 \quad (5.3)$$

É perceptível que, durante a queima, *pot-grate*, para o fluxo descendente, ao aumentar o $\% \varepsilon$, as camadas inferiores tiveram suas temperaturas elevadas mostrando a redução da resistência hidráulica exercida pelo leito sobre o fluido em razão da redução da tortuosidade (BOUDREAU, 1996), (COMITI AND RENAUD, 1989), trazendo melhor distribuição dos gases e redução do percurso dos gases internamente no leito e, com isso, uma melhora significativa da troca térmica entre o fluido e as pelotas como pode ser visto nas figuras 5.17, 5.18, e 5.20, páginas 85 a 87.

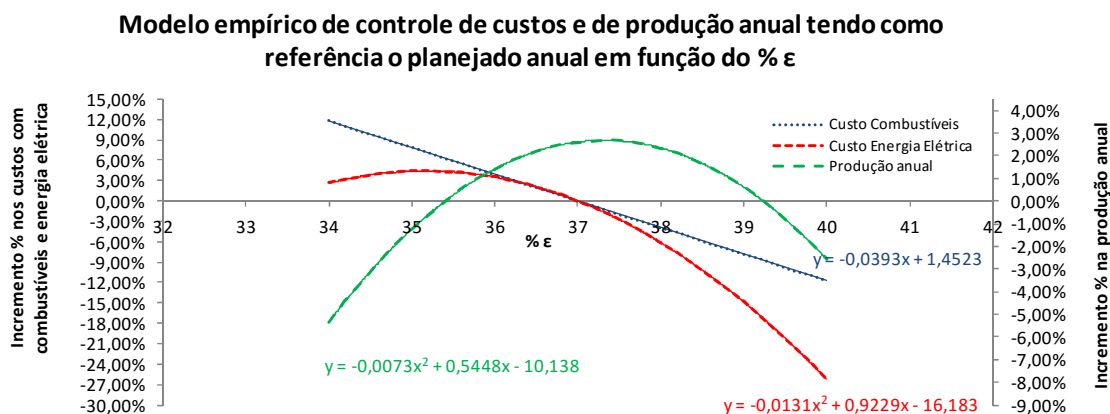
Quanto à avaliação da qualidade física das pelotas queimadas, foi notado que existe um ponto ótimo de $\% \varepsilon$ onde se consegue o pico máximo de qualidade física, pois caso ocorra um aumento do $\% \varepsilon$ a qualidade física tende a cair. Notou-se que, a partir deste ponto ótimo, o leito passasse a usufruir de condições ótimas de fluidodinâmica em função da boa permeabilidade do leito, porém restrita pela cinética de secagem e sinterização das pelotas cruas com maiores diâmetros, como pode ser visto na figura 5.19, página 86. Nesta condição, para uma mesma vazão de fluido sobre o leito, ocorre também a redução da velocidade média dos gases e esta grandeza é uma componente do número de *Reynolds*, informação crucial na medição do número de *Nusselt* (INCROPERA E DEWITT, 2003). A transferência de calor sobre uma esfera é indicada por uma demonstração de um rearranjo mostrada na equação 3.20, página 47.

A partir de uma medição *online* dos P.C.O na linha de produção, o modelo ε pode ser usado para receber estas informações de forma *online*, prever o $\% \varepsilon$ existentes no leito previamente formado pelo pelotamento e gerar uma métrica *online* de chão de fábrica para ser usada como *feedback* para controle dos P.C.O do pelotamento como pode ser visto na figura 4.13, página 67.

Existem relações entre o $\% \varepsilon$ e os consumos específicos de energéticos (combustíveis e energia elétrica) e as perdas térmicas na descarga do forno e ainda com a produção de pelotas queimadas de um forno tipo grelha móvel como pode ser visto no

subitem 5.6.1, página 87.

A partir do modelo empírico de controle de custos encontrado neste estudo, é possível visualizar limites de controle para o %ε na planta de pelotização para que se tenha um controle eficaz dos custos com energéticos e com as perdas de produção em função da queda de qualidade como pode ser visto na figura 5.29, página 98.



Naturalmente, com a otimização do modelo empírico de custos na planta de pelotização, é possível a redução da geração de gases poluentes provenientes da queima em função da redução do consumo de combustíveis. E, ainda, com a redução do consumo de energia elétrica se reduz a interdependência com o consumo de água associado à produção de energia elétrica, já que as hidrelétricas são grandes consumidoras de água no Brasil como pode ser visto na figura 5.28, página 98.

7. PRÓXIMOS PASSOS SUGERIDOS

São sugeridos dois estudos na linha de produção de pelotas queimadas, ambos tendo como premissa a qualidade física. O primeiro estudo sugerido é uma avaliação de perfis diferenciados de temperatura na queima com controle efetivo da temperatura e da pressão das caixas de vento da queima, controlando a vazão de gases quentes que atravessam o leito nesta zona para se garantir otimização de consumo de energéticos. O segundo estudo sugerido é uma análise de degradação das pelotas queimadas, variando o diâmetro médio para se determinar os diâmetros médios limites que permitam o menor nível de degradação das pelotas, visando o bom rendimento dos processos

posteriores ao da queima e peneiramento das pelotas tais como estocagem, transporte e carregamento nos reatores de nossos clientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, E., HIROSUE, H., *Porosity Estimation of a Mixed Cake in Body Filtration*. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 15, 1982, No 6, 490-493.

ADEYANJU, A.A and MANOHAR, K, *Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds* (2009). Research Journal of Applied Sciences.4 (5). Pp.166-167.

ARIS, R. *On shape factors for irregular particles * I. The steady state problem. Diffusion and reaction*. Chemical Engineering Science: 1957. 6, 262}268 (reprint Chemical Engineering Science (1995) 50, 3899}3903).

ATHAYDE, M., *Modelamento Fluidodinâmico da Zona de Queima de Fornos de Grelha Móvel para Pelotização de Minério de Ferro*, Belo Horizonte: UFMG, 2013, 83p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).

BIRD, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*. 2.ed. John Wiley & Sons: 2001.

BOLDRINE, J.L., FIGUEIREDO, V.L., COSTA, I.R., WETZLER, H.G. *Álgebra Linear*. 3º. edição, ampliada e revista, Ed. HARBRA, 1986, p.1-135.

BRAUER, H. *Druckverlust in FuK llkoK rpersaKulen bei EinphasenstroKmung*. Chemie-Ingenieur-Technik, 1957. 29, p.785-790.

BOUDREAU, B.P., *The diffusive tortuosity of fine-grained sediments*. Geochimica et Cosmochimica Acta 60,1996, p. 3139-3142.

CARMAN, P.C., *Fluid flow through packed beds*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 15, 1937, p.150-166.

CARNES, E.J., PRAUSNITZ, J.M. *Velocity profiles in packed and fluidized beds*. Industrial and Engineering Chemistry, V.51, 1959.

CHAIGNEAU, R., THOMPSON, J., HENNESSEY, C., *IOC best practice in upgrading and improving its pellets and concentrate*. Trabalho apresentado METEC InSTEEL Con, Düsseldorf, 2011.

CHENG, N., *Wall effect on pressure drop in packed beds*. Powder Technology, 2011, Vol.210, 261-266.

COMITI, J. RENAUD, J., Chem. Eng. Sci. 44,1989, p.1539.

COTA, M.F. *Influência da Distribuição Granulométrica do Pellet Feed no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta*. Dissertação de Mestrado, UFOP, 2004.

CROSS e BLOT. *Optimizing The Operation Of Straight-Grate Iron-Ore Pellet Induration Systems Using Process Models*; Metallurgical And Materials Transactions B. volume 30b, august 1999—803

ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A.J. *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática*. Tradução 4. ed.Americana: McGraw Hill Brasil, 2012. p. 376.

DIAS, R. P., TEIXEIRA, J. A., MOTA, M.,YELSHIN, A. *Particulate Binary Mixtures: Dependence of Packing Porosity on Particle Size Ratio*. Ind. Eng. Chem. Res. 2004, 43, p.7912-7919.

DIAS, R. P., TEIXEIRA, J. A., MOTA, M.,YELSHIN, A., *Tortuosity variation in a low density binary particulate bed*. Separation and Purification Technology, 2006, Vol. 51, p.180–184.

DIAS, R. P., FERNANDES, C. S., TEIXEIRA, J. A., MOTA, M.,YELSHIN, A., *Permeability analysis in bisized porous media: Wall effect between particles of different size*. Journal of Hydrology, 2008, 349, p.470– 474.

DI FELICE, R., GIBILARO, L. G. *Wall effects for pressure drop in fixed beds*. Chemical Engineering Science, V.59, 2004.

DI FELICE, R., GIBILARO, L.G., *Wall effects for the pressure drop in fixed beds*. Chemical Engineering Science 59, 2004, p.3037–3040.

DULLIEN, F.A.L. *Porous Media*; Fluid Transport and Pore structure. Department of Chemical Engineering, Ontario: Academic Press Inc, 2. ed. 1991.

EISFELD, B., SCHNITZLEIN, K., *The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds*. Chemical Engineering Science, 2001, Vol. 56, p.4321-4329.

ERGUN, S. *Flow Through Packed Columns*; Chemical Engineering Progress. V.48, nº2, 1952, p.89-94.

FANDE, R., THINAKARAN, R., *The influence of the wall on flow through pipes packed with spheres*. Journal of Fluids Engineering 112, 1990, p.84–88.

FLAMANT, G.F., FATAH N., FLITRIS Y., *Wall-to-bed heat transfer in gas-solid fluidized beds: prediction of heat transfer regimes*, *Powder Technology*, Vol 69, Janeiro 1992, p.223-230.

FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT. *Fundamentos de Transferência de Calor*. Tradución 4.ed, Person Educación: Prentice Hall, México, 1999, p.435 - 437.

HLAVAC, J., *The technology of Glass and Ceramic*. Elsevier Scienfic Press,1983 Oxford, p. 247-250.

KAST, W. *Gesetzma Kigkeiten des Druckverlustes in FuK llkoK rpersaKulen*. Chemie-Ingenieur-Technik: 1964. 36, p.464-468.

KUNII AND LEVENSPIEL, *Fluidization Engineering (Melbourne, FL: Robert E. Krieger, Publishing Co. 1977)*. Reprinted with permission of the publishers. Original, Kunii, D., and O. Levenspiel, Ind. Eng. Chem. Process Design Devel: 1968. 7, p.481.

- LANFREY, P.-Y., KAZULJEVIC, Z. V., DUDUKOVIC, M. P., *Tortuosity model fixed beds randomly packed with identical particles*. Chemical Engineering Science 65,2010, p.1891-1896.
- LEE, H., KOO, S., *Liquid permeability of packed bed with binary mixture of particles*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 20, 2014, p.1397-1401.
- LJUNG, A.L. *Drying of iron ore pellets - Analysis with CFD*. Licentiate Thesis Lulea University of Technology, 2008.
- LV, X. et al., *Prediction of size distribution of iron ore granules and permeability of its bed*. J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 47 (2) B, 2011, p.113-123.
- MANDAL, D., SATHIAYAMOORTHY, D., VINJAMUR, M., *Void fraction and effective thermal conductivity of binary particulate bed*. Fusion Engineering and Design 88, 2013, p.216-225.
- MATOS, M.P. *Séries e Equações Diferenciais*. São Paulo: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 2002.
- MATOS, A. P. *Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas*. Dissertação de Mestrado, UFOP, 2007.
- METHA, D., & HAWLEY, M.C. *Wall effect in packed columns*. IE & C Proceedings of Design Development, 8, 1969, p.280-282.
- MEYER, K. *Pelletizing of Iron Ores*; Springer. Verlag Berlin. Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 1980.
- MORALES, B.B., BELING, B., CONTINI, A.C., TRINDADE, L. B., BALTAZAR, A.W.S., RIBEIRO, M.R. *Simulação Numérica da Queima de Pelotas em um Pot Grate*. Redução de minérios de Ferro & Tecnologia Mineral, 2011.
- MOREIRA, E.A. *Escoamento de Fluidos em Meios Cerâmicos Celulares*. Tese de Doutorado, UFSCar. São Carlos, 2003.
- MOTTA, L.O.C., et al. *Análise do Desempenho de Correlações de Queda de Pressão em leito Fixo para Diferentes Tipos de Recheio*. Anais do ENEMP 99, UEM. Maringá, 1999.
- MOTA ,M., TEXEIRA, J. A., YELSHIN, A., *Image analysis of packed beds of spherical particles of different sizes*. Separation and Purification Technology 15,1999, p.59-68.
- MOTA, M., TEXEIRA, J. A., BOWEN, W. R., YELSHIN, A., *Binary spherical mixed beds: Porosity and permeability relationship measurement*. Trans.Filt. Soc.,2001,Vol. 1, No.4.
- MUELLER, G. E., *A simple method for determining sphere packed bed radial porosity*. Powder Technology 229, 2012, p.90-96.
- NODA, H., SAKUMOTO, N. *Investigation of desirable green ball size based on the drying and heat conduction phenomena in New Agglomeration process*. Trans ISIJ, V.27, 1987.
- NUNES S.F., *Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração*, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, p.133 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

OUCHLYAMA, N. et al. *Porosity estimation for random packings of spherical particles*. Ind Eng.Chem Fundam, 1984.

PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: McGraw Hill, Book Company, 1980, p.197.

PATISSON, F.; BELLOT, J.P.; ABLITZER, D. *Study of moisture transfer during the strand sintering process*. Metallurgical Transactions B, 21B, 1990, p. 37-47.

PEREIRA, R.O. S, SESHADRI, V., *Secagem de pelotas de minério de ferro*, Metalurgia – ABM, V. 41, n. 328, 1985, p.141-144.

RESENDERS, J. S. M., *Fenómenos de transporte em leitos constituídos por partículas com diferente diâmetro e forma*, Bragança: IBP, 2009, p.43 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química).

ROSE, H.E. (1945). *An investigation into the laws of flow of fluids through beds of granular materials*. Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, 153, p.141-148.

ROSE, H. E., & RIZK, A. M. A. *Further researches in fluid flow through beds of granular material*. Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, 1949. p.160,493-511.

ROSE, H. E. *An investigation into the laws of flow of fluids through beds of granular materials*. Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, 1945, p.153, 141-148.

RUMPF, H., GUPTE, A.R., *Einflüsse der Porosität und Korngrosenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung*. Chemie Ingenieur Technik, 1971, p.43, 367–375.

SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA, C. A., SILVA, I. A. *Fenômenos de Transporte; Fundamentos e Aplicações na Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010.

SERRENHO, A., MIGUEL, A.F., *Fluid flow and solid/fluid suspensions flow in 3-D packed beds of spheres: the effect of periodicity of fixed beds*. Defect and Diffusion Forum Vols. 312-315, 2011, p. 871-876.

SHAO, J., GUO, Z., TANG, TANG, H., *Influence of temperature on sticking behavior of iron powder in fluidized bed*. ISIJ International, Vol. 51, 2011, No. 8, p.1290-1295.

SOUZA, R. P., MACHADO, A. F. *Balanco Térmico de um forno de pelotização (Lurgi-Dravo) de minério de ferro hematítico*. Relatório interno, CVRD,1975.

STANEK, V. *Fixed bed operations* Flow distribution and efficiency*. London: Ellis Horwood: 1994.

SULLIVAN, R. R., & HERTEL, K. L. (1940). *The flow of air through porous media*. Journal of Applied Physics, 11, p. 761-765.

SUN, Z., TANG, X., CHENG, G., *Numerical simulation for tortuosity of porous media*. Microporous and Mesoporous Material 173, 2013,p. 37-42.

T. EPPINGER, K. SEIDLER, M. KRAUME. *DEM-CFD simulations of fixed bed reactors with small tube to particle diameter ratios*. Chemical Engineering Journal 166, 2011, p.324-331.

THURLBY, J.A., R.J. Batterham, R.E. Turner, *Development and validation of a mathematical model for the moving grate induration of iron ore pellets*, International Journal of Mineral Processing, Vol 6, n° 1, Junho 1979, p 43-64.

TSEKERMAN, T.; DUCHESNE, C.; HODOUIN, D. *On the drying rates of individual iron oxide pellets*. International Journal of Mineral Processing”, 83, 2007, p. 99-115.

REICHELT, W., Chem. Ing. Tech. 44(8) ,1972, p.1068–1071

WINTERBURG, M., TSOTSAS, E., *Impact of tube-to-particle-diameter ratio on the pressure drop in packed beds*. A.I.Ch.E. Journal 46, 2000, p.1084–1088.

YU, A.B., STANDISH, N., *Estimation of the Porosity of Particle Mixtures by a Linear-Mixture Packing Model*. Ind. Eng. Chem. Res., 1991, Vol. 30, No. 6, p.1372-1385.

YANG, C., NAKAYAMA, A., *A synthesis of tortuosity and dispersion in effective thermal conductivity of porous media*. International Journal of Heat and Massa Transfer 53, 2010, p.3222-3230.

ZOU, R.P., YU, A.B. *The packing of spheres in a cylindrical container; the thickness effect*. Chemical Engineering Science V.50, 1995, p. 1504–1507.

ANEXOS

Anexo 8.1 – Resultados encontrados na preparação dos leitos.

Tabela Anexo 8.1.1: Variações de diâmetro médio calculados utilizado na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO						
Variações:	DM_A	DM_B	DM_C	DM_D	DM_E	DM_F
Desvio Padrão:	0,030	0,034	0,033	0,037	0,028	0,022
DM [mm]:	12,509	12,403	12,301	12,194	12,102	11,994
Média DM [mm]:	12,251					
Repetições	DM_A	DM_B	DM_C	DM_D	DM_E	DM_F
1	12,509	12,422	12,249	12,264	12,094	12,026
2	12,475	12,411	12,281	12,185	12,179	12,022
3	12,532	12,393	12,340	12,211	12,038	11,976
4	12,520	12,455	12,231	12,151	12,089	11,973
5	12,528	12,401	12,312	12,184	12,076	12,002
6	12,527	12,377	12,264	12,257	12,116	11,990
7	12,505	12,400	12,329	12,172	12,069	12,021
8	12,543	12,381	12,300	12,215	12,134	11,985
9	12,489	12,396	12,312	12,218	12,141	11,985
10	12,476	12,423	12,346	12,249	12,126	12,003
11	12,540	12,355	12,275	12,177	12,087	11,968
12	12,502	12,411	12,290	12,216	12,122	11,993
13	12,556	12,354	12,295	12,095	12,095	11,998
14	12,514	12,360	12,235	12,199	12,067	12,012
15	12,503	12,420	12,327	12,170	12,109	11,992
16	12,486	12,397	12,325	12,186	12,080	11,995
17	12,476	12,429	12,331	12,136	12,074	11,946
18	12,565	12,350	12,283	12,190	12,072	11,974
19	12,535	12,426	12,339	12,153	12,092	11,946
20	12,479	12,403	12,293	12,229	12,080	12,017
21	12,517	12,428	12,260	12,196	12,106	12,022
22	12,534	12,437	12,309	12,142	12,132	12,026
23	12,493	12,381	12,312	12,203	12,117	12,006
24	12,564	12,374	12,292	12,165	12,125	12,008
25	12,498	12,452	12,343	12,209	12,094	12,005
26	12,467	12,378	12,296	12,231	12,117	11,968
27	12,474	12,428	12,289	12,190	12,121	11,984
28	12,514	12,483	12,290	12,195	12,121	11,980
29	12,448	12,342	12,363	12,233	12,123	11,988
30	12,516	12,415	12,319	12,194	12,079	12,019

Tabela Anexo 8.1.2: Variações de granulometria 16 a 8 mm calculados, utilizado na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO DO 16.0 a 8.0 mm						
Variações:	16-8_A	16-8_B	16-8_C	16-8_D	16-8_E	16-8_F
D.Padrão:	0,520	0,436	0,463	0,462	0,483	0,418
Média de 16_8 [%]:	95,805	95,192	93,992	93,330	93,113	92,867
Média geral de 16_8 [%]:	94,050					
Repetições	16-8_A	16-8_B	16-8_C	16-8_D	16-8_E	16-8_F
1	95,923	94,006	94,267	93,445	93,675	92,935
2	95,680	94,826	93,261	93,820	93,242	92,992
3	96,747	94,920	93,391	93,188	93,021	92,427
4	95,794	95,237	94,040	92,928	92,267	93,092
5	95,530	95,141	94,370	93,912	93,566	92,698
6	95,772	96,020	93,136	93,765	93,101	92,312
7	95,132	95,007	93,884	92,740	92,874	93,310
8	95,659	95,328	93,755	93,556	92,836	92,728
9	96,618	95,854	93,704	93,648	93,209	92,801
10	95,633	95,340	94,980	93,722	93,138	93,149
11	95,384	95,805	94,432	93,291	92,612	92,092
12	95,776	94,767	93,995	93,398	92,900	92,811
13	95,786	95,067	94,124	93,259	91,964	92,506
14	95,664	94,879	93,808	93,689	93,287	92,607
15	96,312	95,903	93,418	93,050	93,046	93,283
16	95,671	94,987	94,109	92,960	93,075	92,548
17	95,769	95,128	94,024	94,051	93,650	93,730
18	95,432	94,735	93,572	92,927	93,536	93,255
19	96,936	95,097	93,726	93,890	94,422	93,236
20	95,279	94,648	94,473	93,669	92,720	92,553
21	95,907	95,565	93,677	92,650	93,087	93,042
22	96,149	95,618	93,403	93,302	93,439	92,243
23	95,618	94,803	94,508	93,355	92,928	93,884
24	95,546	95,570	94,084	92,851	93,744	92,917
25	95,838	95,325	94,905	92,250	93,079	92,679
26	95,100	95,246	94,749	93,819	93,336	92,563
27	95,273	95,318	93,934	92,433	93,000	92,562
28	95,517	95,252	93,889	93,646	92,283	92,763
29	97,304	95,574	94,192	93,098	93,373	92,898
30	95,401	94,807	93,943	93,575	92,978	93,386

Tabela Anexo 8.1.3: Variações de granulometria 8 a 6.3 mm calculados utilizado na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO DO 8.0 a 6.3 mm						
Variações:	8-6.3_A	8-6.3_B	8-6.3_C	8-6.3_D	8-6.3_E	8-6.3_F
D.Padrão:	0,207	0,217	0,184	0,287	0,320	0,234
Média de 8_6.3 [%]:	1,392	2,051	2,701	3,101	3,341	4,086
Média geral de 8_6.3 [%]:	2,779					
Repetições	8-6.3_A	8-6.3_B	8-6.3_C	8-6.3_D	8-6.3_E	8-6.3_F
1	1,618	2,073	2,959	2,982	3,021	4,243
2	1,350	2,186	2,684	3,183	3,368	3,621
3	1,231	2,140	2,958	2,690	3,690	4,134
4	1,587	2,299	2,475	3,102	2,970	3,938
5	1,541	1,995	2,439	3,212	3,193	4,510
6	1,262	1,805	2,726	3,377	3,245	4,054
7	1,273	2,493	2,739	2,615	3,368	3,863
8	1,131	2,135	2,488	3,396	3,563	3,829
9	1,528	2,114	2,739	3,389	3,725	4,503
10	1,415	1,568	2,607	3,048	3,535	4,066
11	1,266	1,883	2,878	3,097	3,477	4,526
12	1,266	2,046	2,825	2,935	3,169	3,953
13	1,598	1,875	2,940	3,216	3,694	3,875
14	0,917	1,994	2,458	2,828	3,705	4,326
15	1,665	2,158	2,554	3,524	3,178	4,156
16	1,561	1,827	2,637	3,281	3,335	4,136
17	1,087	1,662	2,839	3,128	3,133	3,882
18	1,487	2,234	2,691	2,854	2,878	4,210
19	1,264	2,037	2,776	3,158	2,746	4,199
20	1,473	2,470	2,515	3,265	3,221	3,867
21	1,494	1,974	2,871	3,165	2,732	3,966
22	1,821	1,910	2,521	3,561	3,537	4,080
23	1,516	2,034	2,891	3,024	3,431	4,273
24	1,153	2,248	2,828	3,175	3,784	4,186
25	1,344	1,970	2,647	3,006	3,534	3,996
26	1,149	2,214	2,842	2,796	3,007	4,393
27	1,481	2,331	2,557	3,760	3,393	3,705
28	1,707	1,871	2,529	3,069	3,819	4,289
29	1,272	2,187	2,356	2,690	2,955	3,853
30	1,311	1,797	3,048	2,513	3,825	3,956

Tabela Anexo 8.1.4: Variações de granulometria -6.3 mm calculados utilizado na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO MENOR DO QUE 6.3 mm						
Variações:	6.3_A	6.3_B	6.3_C	6.3_D	6.3_E	6.3_F
D.Padrão:	0,101	0,104	0,129	0,109	0,143	0,158
Média de 6.3 [%]:	0,535	0,688	0,911	1,081	1,176	1,372
Média de geral 6.3 [%]:	0,960					
Repetições	6.3_A	6.3_B	6.3_C	6.3_D	6.3_E	6.3_F
1	0,672	0,673	0,997	1,113	1,006	1,467
2	0,638	0,597	0,713	0,973	1,457	1,202
3	0,675	0,566	0,975	1,043	1,336	1,289
4	0,731	0,761	0,770	0,967	1,099	1,288
5	0,454	0,934	0,759	1,176	1,188	1,379
6	0,597	0,605	0,896	1,079	1,061	1,320
7	0,711	0,553	0,948	1,004	1,278	1,249
8	0,470	0,584	0,756	0,856	1,315	1,539
9	0,544	0,635	0,871	0,905	1,104	1,251
10	0,589	0,604	0,856	1,360	1,145	1,352
11	0,559	0,558	0,984	1,084	1,221	1,405
12	0,733	0,769	0,969	1,055	1,154	1,427
13	0,392	0,683	1,047	1,108	1,086	1,251
14	0,382	0,636	0,807	1,131	1,420	1,552
15	0,548	0,787	0,840	1,191	1,185	1,117
16	0,481	0,650	0,800	1,129	1,133	1,284
17	0,444	0,790	1,013	1,082	1,280	1,473
18	0,583	0,673	0,875	1,174	1,320	1,103
19	0,410	0,757	0,740	1,115	1,089	1,529
20	0,418	0,837	0,951	1,037	1,111	1,331
21	0,462	0,653	0,917	1,062	0,972	1,297
22	0,589	0,759	0,900	1,194	1,203	1,806
23	0,498	0,635	0,867	1,105	1,279	1,702
24	0,471	0,778	1,166	1,176	1,250	1,226
25	0,511	0,748	0,952	1,191	1,253	1,417
26	0,428	0,511	0,953	1,026	0,929	1,372
27	0,471	0,736	1,223	1,185	0,813	1,471
28	0,490	0,813	0,905	0,875	1,169	1,206
29	0,506	0,814	0,728	0,941	1,332	1,501
30	0,586	0,555	1,150	1,084	1,096	1,359

Tabela Anexo 8.1.5: Variações de granulometria +16 mm calculados utilizado na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO MAIOR DO QUE 16.0 mm						
Variações:	16_A	16_B	16_C	16_D	16_E	16_F
D.Padrão:	0,007	0,009	0,001	0,001	0,007	0,001
Média de 16 [%]:	2,298	2,301	2,300	2,300	2,303	2,300
Média geral de 16 [%]:	2,300					
Repetições	16_A	16_B	16_C	16_D	16_E	16_F
1	2,282	2,313	2,300	2,300	2,311	2,300
2	2,296	2,316	2,301	2,299	2,292	2,303
3	2,300	2,299	2,299	2,298	2,307	2,300
4	2,295	2,304	2,300	2,299	2,308	2,302
5	2,298	2,301	2,301	2,299	2,310	2,299
6	2,299	2,301	2,299	2,301	2,297	2,299
7	2,303	2,297	2,300	2,300	2,315	2,299
8	2,298	2,293	2,299	2,299	2,312	2,301
9	2,311	2,293	2,300	2,300	2,297	2,300
10	2,301	2,310	2,299	2,301	2,312	2,299
11	2,308	2,295	2,301	2,299	2,303	2,299
12	2,296	2,293	2,302	2,300	2,297	2,301
13	2,299	2,308	2,302	2,299	2,290	2,300
14	2,293	2,317	2,300	2,303	2,300	2,300
15	2,291	2,298	2,297	2,299	2,302	2,298
16	2,294	2,293	2,299	2,300	2,295	2,298
17	2,293	2,301	2,298	2,298	2,312	2,301
18	2,289	2,292	2,302	2,298	2,306	2,300
19	2,304	2,297	2,298	2,302	2,304	2,299
20	2,299	2,304	2,300	2,299	2,298	2,298
21	2,292	2,307	2,299	2,301	2,297	2,300
22	2,295	2,289	2,301	2,300	2,299	2,299
23	2,288	2,293	2,299	2,301	2,302	2,301
24	2,304	2,303	2,298	2,302	2,290	2,301
25	2,294	2,318	2,301	2,300	2,316	2,300
26	2,290	2,299	2,301	2,298	2,304	2,300
27	2,316	2,301	2,300	2,300	2,307	2,301
28	2,301	2,298	2,299	2,298	2,304	2,301
29	2,293	2,279	2,300	2,302	2,307	2,300
30	2,306	2,311	2,301	2,299	2,299	2,299

Tabela Anexo 8.1.6: Variações de relação granulométrica calculados utilizada na montagem dos leitos.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - VARIAÇÃO RELAÇÃO GRANULOMÉTRICA						
Variações:	REL_A	REL_B	REL_C	REL_D	REL_E	REL_F
D.Padrão:	0,053	0,041	0,041	0,049	0,040	0,041
Média de REL [-]:	1,119	1,075	1,068	1,046	0,993	0,888
Média geral de REL [-]:	1,031					
Repetições	REL_A	REL_B	REL_C	REL_D	REL_E	REL_F
1	1,045	1,076	0,979	1,026	0,977	0,902
2	1,122	1,049	1,079	1,107	1,029	0,865
3	1,065	1,018	1,092	1,027	0,996	0,901
4	1,062	1,074	1,056	1,123	0,921	0,992
5	1,142	0,996	1,052	1,009	0,989	0,831
6	1,025	1,060	1,048	1,093	0,987	0,898
7	1,166	1,115	1,033	1,048	0,968	0,889
8	1,184	1,167	1,001	1,107	1,031	0,905
9	1,178	1,103	1,097	0,995	0,954	0,815
10	1,197	1,074	1,039	0,950	1,028	0,880
11	1,075	1,008	1,034	1,082	0,952	0,907
12	1,082	1,067	1,085	0,963	0,966	0,889
13	1,210	1,076	0,994	1,071	1,040	0,843
14	1,087	1,134	1,066	1,106	0,984	0,849
15	1,161	1,097	1,065	1,044	1,046	0,946
16	1,100	1,037	1,061	1,004	0,995	0,858
17	1,146	1,098	1,103	1,073	0,934	0,928
18	1,078	1,024	1,054	1,100	1,029	0,848
19	1,111	1,087	1,135	1,035	1,010	0,925
20	1,114	1,034	1,042	1,060	0,946	0,867
21	1,157	1,028	1,136	1,118	0,952	0,901
22	1,078	1,117	1,028	1,022	1,057	0,893
23	1,037	1,069	1,099	0,986	1,068	0,940
24	1,160	1,093	1,108	0,987	0,989	0,886
25	1,203	1,066	1,091	0,963	1,000	0,831
26	1,092	1,148	1,089	1,064	1,020	0,909
27	1,132	1,092	1,039	1,064	0,986	0,901
28	1,104	1,076	1,087	1,059	1,040	0,934
29	1,185	1,051	1,148	1,046	0,932	0,808
30	1,075	1,127	1,090	1,035	0,960	0,908

Anexo 8.2 – Resultados de espaços vazios com esferas de vidro.

Tabela Anexo 8.2.1: Medições realizadas em Becker do % de espaços vazios.

POT GRATE AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO - TESTE DE BANCADA NO BECKER				
Variações:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPadrão:	0,007	0,009	0,011	0,015
Média de EV[%]::	43,170	43,289	43,363	43,392
Média geral de EV[%]:	43,304			
Repetições	EV - 5mm_BECKER	EV - 10mm_BECKER	EV - 12mm_BECKER	EV - 16mm_BECKER
1	43,167	43,294	43,366	43,394
2	43,174	43,299	43,363	43,405
3	43,170	43,291	43,354	43,378
4	43,168	43,286	43,364	43,394
5	43,181	43,274	43,365	43,393
6	43,182	43,298	43,384	43,415
7	43,165	43,281	43,360	43,395
8	43,159	43,292	43,368	43,381
9	43,172	43,270	43,361	43,388
10	43,173	43,281	43,376	43,352
11	43,184	43,296	43,372	43,408
12	43,182	43,280	43,349	43,401
13	43,170	43,297	43,358	43,362
14	43,174	43,289	43,338	43,401
15	43,176	43,290	43,363	43,389
16	43,164	43,294	43,346	43,373
17	43,162	43,292	43,364	43,417
18	43,162	43,308	43,371	43,394
19	43,174	43,299	43,381	43,395
20	43,175	43,283	43,358	43,421
21	43,169	43,273	43,377	43,387
22	43,166	43,283	43,362	43,398
23	43,167	43,288	43,360	43,388
24	43,166	43,300	43,383	43,412
25	43,165	43,292	43,361	43,393
26	43,178	43,303	43,354	43,393
27	43,161	43,282	43,344	43,369
28	43,157	43,298	43,353	43,377
29	43,177	43,276	43,361	43,392
30	43,169	43,287	43,379	43,384

Tabela Anexo 8.2.2: Medições realizadas no PML do percentual de espaços vazios.

POT GRATE AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO - PML				
Variações:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPadrão:	0,009	0,013	0,014	0,012
Média de EV[%]:	43,122	43,250	43,576	43,890
Média geral de EV[%]:	43,459			
Repetições	EV - 5mm_PML	EV - 10mm_PML	EV - 12mm_PML	EV - 16mm_PML
1	43,118	43,266	43,581	43,913
2	43,121	43,247	43,567	43,892
3	43,138	43,255	43,553	43,895
4	43,105	43,251	43,584	43,880
5	43,121	43,236	43,580	43,871
6	43,134	43,241	43,551	43,879
7	43,122	43,258	43,579	43,906
8	43,122	43,223	43,565	43,873
9	43,114	43,250	43,581	43,904
10	43,103	43,248	43,564	43,873
11	43,121	43,260	43,596	43,890
12	43,129	43,255	43,578	43,880
13	43,133	43,242	43,552	43,896
14	43,118	43,267	43,596	43,907
15	43,129	43,240	43,553	43,889
16	43,117	43,252	43,561	43,894
17	43,114	43,229	43,590	43,903
18	43,124	43,257	43,580	43,900
19	43,123	43,265	43,552	43,872
20	43,122	43,247	43,580	43,886
21	43,115	43,228	43,606	43,899
22	43,112	43,242	43,574	43,905
23	43,119	43,227	43,575	43,880
24	43,117	43,246	43,581	43,884
25	43,122	43,279	43,577	43,895
26	43,139	43,275	43,577	43,898
27	43,138	43,245	43,579	43,871
28	43,122	43,256	43,594	43,880
29	43,124	43,253	43,594	43,891
30	43,122	43,244	43,575	43,888

Tabela Anexo 8.2.3: Análise de erro entre o padrão Becker e o medidor PML.

POT GRATE AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO - PML				
Variações:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPadrão:	0,007	0,009	0,011	0,015
Média de EV[%]:	43,170	43,289	43,363	43,392
Média geral de EV[%]:	43,304			
POT GRATE AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO - PML				
Variações:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPadrão:	0,009	0,013	0,014	0,012
Média de EV[%]:	43,122	43,250	43,576	43,890
Média geral de EV[%]:	43,459			
Delta Dpadrão erro:	-0,002	-0,004	-0,003	0,004
Delta Média erro [%]:	0,11%	0,09%	-0,49%	-1,15%
Delta Média geral erro [%]:	-0,36%			

Observação: Tendo como base as informações dos erros obtidos e registrados na tabela anexo 8.2.3, o PML se mostrou capaz de medir os espaços vazios em leitos formados por esferas com um erro médio de -0,36% e com um desvio padrão de 0.004 em relação aos resultados obtidos em bancada com becker.

Anexo 3 – Resultados dos percentuais de espaços vazios encontrados nos leitos padrões.

Tabela Anexo 8.3.1: Medições realizadas no PML do % de espaços vazios dos Leitos padrões.

POT GRATE AMOSTRAS DE PELOTAS CRUAS - LEITO - RESULTADOS ENCONTRADO DO % E						
Variações:	EV_A	EV_B	EV_C	EV_D	EV_E	EV_F
D.Padrão:	0,184	0,136	0,096	0,125	0,096	0,207
Média de EV [%]:	39,870	38,074	36,250	34,925	34,136	32,599
Média geral de EV [%]:	35,976					
Repetições	EV_A	EV_B	EV_C	EV_D	EV_E	EV_F
1	39,760	37,995	36,221	35,015	34,296	32,545
2	39,595	38,079	36,345	34,816	34,128	32,782
3	39,959	38,021	36,248	34,935	34,126	32,346
4	39,659	37,899	36,188	34,756	34,024	32,612
5	40,004	38,066	36,167	35,026	34,258	32,434
6	39,996	37,955	36,169	34,929	34,112	32,638
7	39,689	38,249	36,341	34,886	34,087	32,770
8	39,659	38,254	36,295	34,950	34,152	32,416
9	40,053	38,288	36,246	34,953	34,183	32,480
10	39,860	38,038	36,281	34,793	34,095	32,850
11	40,154	38,264	36,317	34,793	34,268	32,523
12	39,720	37,958	36,334	34,939	34,128	32,239
13	39,858	37,845	36,160	34,936	34,114	32,420
14	39,701	37,827	36,301	34,764	34,071	33,032
15	39,909	38,059	36,399	35,117	34,151	32,871
16	39,697	38,186	36,110	35,152	34,235	32,535
17	39,914	38,124	36,155	34,858	34,122	32,384
18	39,820	38,002	36,050	34,843	34,107	32,847
19	39,778	38,085	36,217	34,821	34,193	32,880
20	39,832	38,122	36,117	34,975	34,192	32,569
21	39,906	38,119	36,272	34,884	33,899	32,574
22	39,788	37,830	36,390	35,083	34,032	32,555
23	40,304	37,961	36,267	34,915	34,109	32,556
24	40,337	38,224	36,089	34,650	34,038	32,546
25	39,659	38,047	36,413	35,154	34,276	32,474
26	39,782	38,080	36,300	34,775	33,963	32,395
27	39,899	38,356	36,204	34,976	34,180	33,018
28	40,027	38,166	36,394	35,068	34,087	32,355
29	40,012	38,102	36,231	34,940	34,321	32,521
30	39,761	38,020	36,277	35,040	34,145	32,813