

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

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

TESE DE DOUTORADO

**PENEIRAMENTO INDUSTRIAL: METODOLOGIA PARA
DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO**

Autor: Cristiano Geraldo de Sales

Orientador: Prof. Roberto Galéry

Belo Horizonte, Março de 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Cristiano Geraldo de Sales

**PENEIRAMENTO INDUSTRIAL: METODOLOGIA PARA
DIMENSIONAMENTO
E SIMULAÇÃO**

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

Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Prof. Roberto Galéry

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Março de 2020

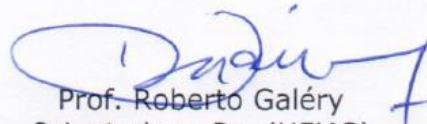
S163p	Sales, Cristiano Geraldo de. Peneiramento industrial [recurso eletrônico] : metodologia para dimensionamento e simulação / Cristiano Geraldo de Sales. - 2020. 1 recurso online (xxii, 217 f. : il., color.) : pdf.
	Orientador: Roberto Galéry.
	Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
	Anexos: f. 209-217.
	Bibliografia: f. 201-208.
	Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.
	1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Peneiramento (Mineração) - Teses. I. Galéry, Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.
	CDU: 622 (043)




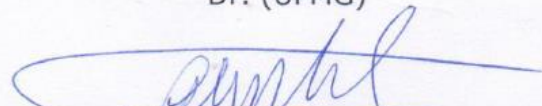
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Metalúrgica, Materiais e de Minas

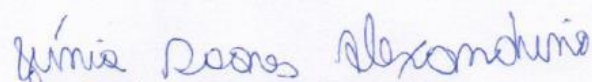


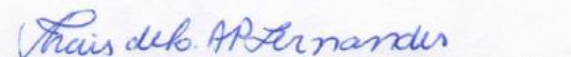
Tese intitulada "**Peneiramento Industrial: Metodologia para Dimensionamento e Simulação**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pelo candidato **Cristiano Geraldo de Sales**, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

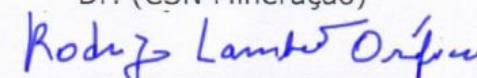

 Prof. Roberto Galéry
 Orientador - Dr. (UFMG)


 Prof. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro
 Dr. (UFMG)


 Prof. George Eduardo Sales Valadão
 Dr. (UFMG)


 Profª Júnia Soares Alexandrino
 Drª (UEMG)


 Thais de Lima Alves Pinheiro Fernandes
 Dr. (CSN Mineração)


 Prof. Rodrigo Lambert Oréfice
 Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 03 de março de 2020

Esta tese de doutorado é dedicada aos meus queridos pais, Ademar e Luzia (*in memoriam*), ao meu filho Davi, pela alegria e motivação que me proporciona. A toda minha família, aos grandes amigos, e aos meus alunos, grandes motivadores do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus antes e acima de tudo, por me fazer valorizar os triunfos e me carregar nos momentos de dificuldades.

À minha mãe, que sempre apoiou incondicionalmente toda minha trajetória acadêmica, e que hoje continua me acompanhando ao lado de Deus.

À empresa Haver & Boecker por ter me oferecido a oportunidade de trabalhar, aprender e a desenvolver o conceito deste trabalho. A todos os colegas com quem lá tive o prazer de trabalhar. Em especial à Lais Andrade, Luis Bastos, Rafael Vaz, Adalberto Andrello e Adolfo Molshansky.

Ao amigo e orientador professor Dr. Roberto Galéry, pelos importantes conselhos, dedicação e ensinamentos.

Aos demais professores que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho: prof. Douglas Batista Mazzinghy, prof. Luiz Claudio Monteiro Montenegro, prof. George Valadão, prof. Antônio Eduardo Clark Peres e prof. Júnia Alexandrino.

Aos colegas da CSN Mineração, em especial a Thais Fernandes, Eduardo Pimenta, Bruno Soares, Mauro Carvalho, André Martins e Henrile Meireles pelo constante apoio, amizade e companheirismo.

Aos alunos Gilssaha Maciel, Wesley Matos, Milena Pedersoli, Josimar da Silva, Wesley Natan, Ane Caroline, Marcos Dias, Rhuan Pablo, Avneer Philippe e ao técnico de laboratório Roni Gomes que apoiaram na execução dos ensaios no decorrer dos projetos de pesquisa na faculdade Kennedy.

À faculdade Kennedy pela disponibilidade dos recursos físicos e do laboratório para execução dos ensaios, e a todas as empresas de mineração que cederam as amostras para este trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. Peneiras industriais.....	7
3.1.1. Grelhas	10
3.1.2. Peneiras vibratórias convencionais	11
3.1.3. Peneiras bananas	14
3.1.4. Peneiras desaguadoras	16
3.1.5. Peneiras de alta frequência	17
3.1.6. Peneiras Rotativas.....	18
3.1.7. Peneiras e grelhas estáticas (fixas).....	19
3.1.8. Tipo de telas.....	20
3.2. Variáveis e indicadores de desempenho do peneiramento.....	26
3.2.1. Comportamento coletivo.....	38
3.2.2. Comportamento individual	40
3.2.3. Indicadores de desempenho do peneiramento	42
3.3. Peneiramento de laboratório	48
3.3.1. Análise granulométrica	49

3.3.2.	Procedimentos e normalização de ensaios de análise granulométrica por peneiramento.....	53
3.3.3.	Equipamentos de laboratório de bancada	68
3.3.4.	Modelos de distribuição granulométrica.....	75
3.4.	Caracterização de sistemas particulados	80
3.4.1.	Massa específica de sólidos	82
3.4.2.	Massa específica aparente.....	84
3.4.3.	Umidade.....	87
3.4.4.	Índice de forma	88
3.5.	Dimensionamento de peneiras industriais.....	91
3.5.1.	Método de Allis-Chalmers (MAC)	94
3.5.2.	Método de Peter King (MPK).....	100
3.5.3.	Método de Karra (MK)	106
3.5.4.	Determinação da largura da peneira	112
4.	METODOLOGIA.....	113
4.1.	Amostragem	114
4.2.	Caracterização das amostras	117
4.2.1.	Massa específica de sólidos	117
4.2.2.	Massa específica aparente.....	118
4.2.3.	Umidade.....	119

4.2.4.	Índice de forma	120
As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram imagens das amostras de calcário (Am32) e hematita (Am18), separadas e fracionadas para a análise do índice de forma.		
4.3.	Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento ..	124
4.4.	Dimensionamento de peneiras e ajustes no método de Peter King.....	128
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	133
5.1.	Caracterização das amostras	133
5.1.1.	Massa específica de sólidos	133
5.1.2.	Massa específica aparente.....	135
5.1.3.	Umidade.....	136
5.1.4.	Índice de forma	137
5.2.	Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento ..	138
5.2.1.	Determinação da cinética de peneiramento	144
5.2.2.	Avaliação da eficiência segundo a classe de peneiramento.....	149
5.2.3.	Efeito das propriedades físicas na cinética de peneiramento.....	152
5.3.	Dimensionamento de peneiras e ajustes no método de Peter King.....	156
5.3.1.	Dimensionamento de peneiras e avaliação comparativa com as condições industriais.....	156
5.3.2.	Ajustes no MPK.....	175
6.	CONCLUSÕES	193

6.1.	Caracterização das amostras	193
6.2.	Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento ..	193
6.3.	Dimensionamento de peneiras e ajustes no MPK	194
7.	CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO	198
8.	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	199
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	200
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	201
11.	ANEXOS	209

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Maior peneira industrial do mundo – Haver & Boecker R-TE4000x11000 (REVISTA MINÉRIOS E MINERALES, 2019).	8
Figura 3.2. Telas de aço e poliuretano aplicadas em peneiras industriais (HAVER & BOECKER TELAS, 2019)	9
Figura 3.3. Ilustração de grelha vibratória. Meio peneirante: Chapas perfuradas na alimentação e barras de aço (<i>fingers</i>) ao longo do deck – (Metso, 2018a).....	11
Figura 3.4. Peneiras vibratórias inclinadas – (a) Três <i>decks</i> (LUZ <i>et al.</i> , 2010) (b) Dois <i>decks</i> (Metso Mineração, 2018b).....	12
Figura 3.5. Representação da trajetória de uma partícula submetida a um movimento vibratório circular (GALÉRY <i>et al.</i> , 2007).....	12
Figura 3.6. Peneira vibratória horizontal (HAVER & BOECKER, 2019).....	13
Figura 3.7. Representação da trajetória de uma partícula submetida a um movimento vibratório retilíneo ou linear (GALÉRY <i>et al.</i> , 2007)	14
Figura 3.8. Peneira banana (DIRECT INDUSTRY, 2018).	14
Figura 3.9. Gráficos comparativos entre as vazões passantes em uma peneira vibratória inclinada convencional e uma peneira banana (TORQUATO, 2007).	16
Figura 3.10. Peneira desaguadora (MILHOMEM, 2013).....	17
Figura 3.11. Exemplo de uma peneira de alta frequência em produção na Votorantim – Vazante (REVISTA MINÉRIOS, 2018).	18
Figura 3.12. Representação esquemática de uma peneira rotativa (TROMMEL SCREEN, 2018).....	19
Figura 3.13. Representação esquemática de uma peneira DSM (LUZ <i>et al.</i> , 2010).	20

Figura 3.14. Chapas de aço perfuradas aparafusadas sobre deck de uma peneira (WILLS, 2006).....	21
Figura 3.15. Tela tensionada de aço inox (CASTECH, 2019).	22
Figura 3.16. Tela tensionada de aço inox com gancho lateral em destaque (HAVER&TYLER, 2012).	23
Figura 3.17. Tela autolimpante Flexmat® tensionada – Forma da abertura: diamante (HAVER & BOECKER, 2005).	24
Figura 3.18. Telas modulares (a) Poliuretano – abertura em <i>zig-zag</i> (b) Borracha – abertura quadrada (c) Poliuretano – abertura quadrada. (Arquivo particular do autor, 2017).	24
Figura 3.19. Telas modulares e um exemplar de <i>channel</i> (a) Telas modulares com destaque ao sistema de fixação <i>snap deck</i> (b). (Arquivo particular do autor, 2017).	25
Figura 3.20. Influência dos diferentes parâmetros na probabilidade de peneiramento para uma determinada camada de partículas (modificado de SZTABA, 1993).	30
Figura 3.21. (a) Projeção da abertura em peneira inclinada, (b) gráfico de Abertura Equivalente x Tamanho de Produto para três inclinações diferentes ($C < B < A$). (Arquivo particular do autor, 2019).	33
Figura 3.22. Modelo de estratificação de partículas sobre um deck de peneiramento (WILLS, 2006).....	36
Figura 3.23. Comportamento coletivo de partículas (CHAVES <i>et al.</i> , 2012).	39
Figura 3.24. Comportamento individual das partículas (CHAVES <i>et al.</i> , 2012).	40
Figura 3.25. Balanço de massas de uma peneira (adaptado de WILLS, 2006).	43
Figura 3.26. Modelo de curva de partição (modificado de WILLS, 2006).	47

Figura 3.27. Curva de distribuição granulométrica - Passante (%) x Abertura (mm) (modificado de SALES <i>et al.</i> , 2011).....	51
Figura 3.28. (a) Série de peneiras instaladas em peneirador vibratório; (b) peneira encaixada em fundo cego para peneiramento manual (SAMPAIO <i>et al.</i> , 2007).....	57
Figura 3.29. Peneiramento a úmido em escala de laboratório (SAMPAIO <i>et al.</i> , 2007).	58
Figura 3.30. Gráfico comparativo – Equação de Gaudin ($\eta =1$, $\eta =2$ e $\eta =3$) x ABNT NBR ISO 4701:2014 (Arquivo pessoal do autor).....	64
Figura 3.31. Conjunto de peneiras em série sobre agitador mecânico com temporizador e controle de vibração (TYLER, 2017).	69
Figura 3.32. Seção transversal de peneira de ensaio (ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).	70
Figura 3.33. Peneira quadrada 500x500mm (DIALMÁTICA, 2018a).	71
Figura 3.34. Representação de uma tela de abertura a e diâmetro de fio \emptyset (ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).	72
Figura 3.35. Peneirador suspenso enclausurado (DIALMÁTICA, 2018b).	74
Figura 3.36. (a) Peneirador de bancada Ro-Tap [®] modelo E, operado a seco (b) Peneirador de bancada Ro-Tap [®] modelo E, operado a úmido (c) Peneirador de bancada – peneiras quadradas modelo UWL 400H, operado a seco (TYLER, 2017).....	75
Figura 3.37. (a) Curva de distribuição granulométrica obtida em peneiramento de laboratório. (b) Regressão linear via modelo Rosin-Rammler (CORREA <i>et al.</i> , 2004). 80	
Figura 3.38. Sistemas particulados de diferentes tamanhos e características de partículas (UFSCAR, 2018).	80
Figura 3.39. Imagem de picnômetros (PROLAB, 2019).	83

Figura 3.40. Em (a), amostra de RCD; em (b), amostra de caulim e, em (c), amostra de minério de fosfato (SAMPAIO, 2007).	85
Figura 3.41. Diâmetros equivalentes para uma mesma partícula (FRANÇA e COUTO, 2007).	89
Figura 3.42. Forma de partícula. Grau de esfericidade x curvatura (Poole <i>et al.</i> , 1998) 90	
Figura 3.43. Forma de partícula. Grau de esfericidade (Poole <i>et al.</i> , 1998).	90
Figura 3.44. Capacidade volumétrica unitária Q_u^F versus abertura da tela (METSO MINERALS, 2005).	96
Figura 3.45. Fator devido à porcentagem de finos na alimentação – k_1 (METSO Minerals, 2005).	97
Figura 3.46. Fator devido à porcentagem de grossos na alimentação – k_2 (METSO Minerals, 2005).	98
Figura 3.47. Diferenças na área efetiva de peneiramento em cada deck da peneira (FILHO, 2017).	98
Figura 4.1. Fluxograma macro do trabalho	114
Figura 4.2. Diagrama ilustrando o procedimento de homogeneização e quarteamento das amostras	116
Figura 4.3. Etapas de preparação da amostra de bauxita Am37 - (a) Lote inicial. (b) Pilha alongada. (c) Pilha cônica.	116
Figura 4.4. Análise de massa específica de sólidos da amostra Am1 via picnometria. 118	
Figura 4.5. Ilustração da análise de determinação de forma de uma partícula lamelar e outra regular.	121

Figura 4.6. Contagem de partículas irregulares na fração $<3,36\text{mm}$ e $>0,149\text{mm}$ por lupa binocular, aumento de 4x.	122
Figura 4.7. Imagem da amostra de calcário (Am32) destinada à análise do índice de forma – (a) Fração $>3,36\text{mm}$ (b) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 2x (c) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 4x.	123
Figura 4.8. Imagem da amostra de hematita (Am18) destinada à análise do índice de forma – (a) Fração $>3,36\text{mm}$ (b) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 2x (c) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 4x.	124
Figura 4.9. Diagrama do ensaio de cinética de peneiramento	127
Figura 4.10. Interface gráfica do simulador S^3 - <i>Smart Screen Simulator</i> – Dados de entrada do processo da amostra Am1 (itabirito).	130
Figura 4.11. Interface gráfica do simulador S^3 - <i>Smart Screen Simulator</i> – Resultados do processo da amostra Am1 (itabirito).	131
Figura 4.12. Códigos VBA do S^3 <i>Smart Screen Simulator</i> – Cálculo das capacidades unitárias dos três modelos.	131
Figura 5.1. Massa específica de sólidos das amostras em ordem crescente	134
Figura 5.2. Massa específica aparente das amostras em ordem crescente	135
Figura 5.3. Umidade das amostras em ordem crescente	137
Figura 5.4. Índice de forma das amostras em ordem crescente	138
Figura 5.5. Distribuições granulométricas dos ensaios de cinética de peneiramento das amostras Am1 a Am21.	140
Figura 5.6. Distribuições granulométricas dos ensaios de cinética de peneiramento das amostras Am22 a Am37.	141

Figura 5.7. Massas retidas nas malhas de 3,36mm e 0,841mm e %passante dos quatro ensaios intermediários e do ensaio padrão da amostra Am4.	142
Figura 5.8. Massas retidas nas malhas de 2,0mm e 0,045mm e %passante dos quatro ensaios intermediários e do ensaio padrão da amostra Am1.	143
Figura 5.9. Cálculo do d_{50} da curva de distribuição granulométrica padrão da amostra Am29.	144
Figura 5.10. Curva de cinética de peneiramento da amostra Am29.	145
Figura 5.11. Curva de cinética de peneiramento da amostra Am13.	145
Figura 5.12. Histograma de distribuição da cinética de peneiramento das 37 amostras e agrupamento de três classes de valores.....	148
Figura 5.13. Agrupamento das amostras segundo a classe e cinética de peneiramento k	148
Figura 5.14. Eficiência média de peneiramento em função da abertura para cada tempo de peneiramento – (a) Classe A; (b) Classe B; (c) Classe C.....	151
Figura 5.15. Eficiência média global de peneiramento em função da malha de peneira nas três classes de peneiramento.....	152
Figura 5.16. <i>Box plot</i> das propriedades físicas nas três classes de cinética de peneiramento.....	153
Figura 5.17. Gráficos de correlação entre as variáveis que mais influenciaram na cinética de peneiramento	155
Figura 5.18. Avaliação comparativa das áreas de peneiramento industriais e simulações.	162

Figura 5.19. Correlações entre os resultados das áreas de peneiramento das 11 condições industriais e das simulações (a) Área MPK x Área Industrial (b) Área MAC x Área Industrial (c) Área MK x Área Industrial.	164
Figura 5.20. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 1.	165
Figura 5.21. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 2.	166
Figura 5.22. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 3.	166
Figura 5.23. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 4.	167
Figura 5.24. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 5.	167
Figura 5.25. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 6.	168
Figura 5.26. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 7.	168
Figura 5.27. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 8.	169
Figura 5.28. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 9.	169
Figura 5.29. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 10.	170

Figura 5.30. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 11.	170
Figura 5.31. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 12.	171
Figura 5.32. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 13.	171
Figura 5.33. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 14.	172
Figura 5.34. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 15.	172
Figura 5.35. Avaliação comparativa da partição de massa para <i>undersize</i> nas condições industriais e simulações com MPK e MK.	173
Figura 5.36. Avaliação comparativa das eficiências globais nas condições industriais e simulações do MK.	174
Figura 5.37. Análise de correlação da diferença das capacidades unitárias (MPK real e MPK ajustado) em função da cinética de peneiramento de cada material.	177
Figura 5.38. Capacidade unitária ajustada do MPK x abertura da tela.....	179
Figura 5.39. Correlação entre as áreas das peneiras industriais reais e simuladas pelo MPK ajustado	180
Figura 5.40. Eficiência de peneiramento x RR.....	181
Figura 5.41. Eficiência de peneiramento x cinética de peneiramento – Valores obtidos nas condições 2 a 11.	183
Figura 5.42. Eficiência de peneiramento x razão de classificação para peneiramento de gnaisse.....	184

Figura 5.43. Eficiência de peneiramento x RR (dados reais e simulados pelo MPK)..	185
Figura 5.44. Diferenças dos valores de eficiência a partir do ponto RR=0,8 em função de RR.	187
Figura 5.45. Curvas de eficiência ajustadas a partir do MPK para peneiramento a umidade natural.....	188
Figura 5.46. Comparação entre condição real (peneiramento a úmido) e simulação (peneiramento a umidade natural) a partir dos dados da Condição 1	189
Figura 5.47. Curvas de eficiência original e ajustadas a partir do MPK para peneiramento a umidade natural e peneiramento a úmido.	190
Figura 5.48. Correlação entre as eficiências globais simuladas e industriais.	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Classificação dos tipos de peneiras e suas principais características.....	10
Tabela 3.2. Probabilidade de passagem de partículas para uma relação entre tamanho de partícula, abertura da tela e número de aberturas ao longo do trajeto (adaptado de WILLS, 2006).....	32
Tabela 3.3. Relação entre frequência, amplitude e tamanho de abertura recomendada por um fabricante de peneiras (CHAVES <i>et al.</i> , 2012).....	37
Tabela 3.4. Exemplo de tabela utilizada em uma análise granulométrica (SALES <i>et al.</i> , 2011).....	51
Tabela 3.5. Série Tyler de peneiras para análise granulométrica (TRANSPORTE DE GRANÉIS, 2017).....	54
Tabela 3.6. Séries Tyler, ASTM / ASA / USS e ABTN-NBR NM-ISO 3310-1:2010 (CHAVES <i>et al.</i> , 2012).....	55
Tabela 3.7. Série R20 para composição granulométrica de amostras de minério de ferro (ABNT NBR NM-ISO 565:1997).	56
Tabela 3.8. Massa mínima por amostra de ensaio (ABNT NBR NM 248:2003).....	59
Tabela 3.9. Massa mínima de amostra para análise granulométrica de solos – Peneiras redondas de 200mm de diâmetro (ABNT NBR 6457:2016).....	60
Tabela 3.10. Massa máxima de minério de ferro a ser retida em uma peneira ao final do peneiramento (ABNT NBR ISO 4701:2014).	63
Tabela 3.11. Tempos de peneiramento indicados para minérios típicos usando métodos de batelada (modificado de ABNT NBR ISO 4701:2014).	65
Tabela 3.12. Formas e medidas recomendadas dos caixilhos (modificado de ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).	70

Tabela 3.13. Diâmetro e altura de peneiras redondas com caixilhos de inox (ABRONZINOX, 2017).	71
Tabela 3.14. Valores ajustados dos modelos de RR e GGS a partir da distribuição granulométrica de um determinado sistema particulado (CORREA <i>et al.</i> , 2004).	79
Tabela 3.15. Fator k_4 versus tamanho de separação (Adaptado de METSO Minerals, 2005).	99
Tabela 3.16. Fator k_5 versus % área aberta (Adaptado de METSO Minerals, 2005).	99
Tabela 3.17. Fator de capacidade k_7 – Umidade das partículas (Adaptado de King, 2001).	103
Tabela 3.18. Fator de capacidade k_8 – formato da abertura da tela (Adaptado de King, 2001).	103
Tabela 4.1. Descrição das 37 amostras utilizadas no trabalho.....	115
Tabela 4.2. Massa mínima para análise de umidade (ISO 3087:2011).	119
Tabela 4.3. Quadro de preenchimento dos dados utilizados para o cálculo do “Índice de forma” (% <i>P.I.</i>)	123
Tabela 4.4. Série de peneiras utilizadas nos ensaios de cinética de peneiramento - adaptado da série Tyler e ABTN-NBR NM-ISO 3310-1:2010*	125
Tabela 4.5. Massa mínima da amostra dos ensaios de análise granulométrica para cada faixa de tamanho	125
Tabela 4.6. Principais parâmetros das peneiras industriais (1).....	129
Tabela 4.7. Principais parâmetros das peneiras industriais (2).....	129
Tabela 5.1. Massa específica de sólidos das 37 amostras.....	134
Tabela 5.2. Massa específica aparente das 37 amostras	135

Tabela 5.3. Umidade das 37 amostras	136
Tabela 5.4. Índice de forma das 37 amostras.....	138
Tabela 5.5. Parâmetros obtidos nos ensaios de cinética de peneiramento das 37 amostras	147
Tabela 5.6. Classificação das amostras segundo a cinética e nível de dificuldade de peneiramento.....	149
Tabela 5.7. Parâmetros de entrada das simulações 1 a 5.	157
Tabela 5.8. Parâmetros de entrada das simulações 6 a 10.	158
Tabela 5.9. Parâmetros de entrada das simulações 11 a 15.	159
Tabela 5.10. Fatores de correção k_i , produtórios $\prod k_i$ e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 1 a 5).	160
Tabela 5.11. Fatores de correção k_i , produtórios $\prod k_i$ e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 6 a 10).	160
Tabela 5.12. Fatores de correção k_i , produtórios $\prod k_i$ e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 11 a 15).	161
Tabela 5.13. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulações 1 a 5).....	161
Tabela 5.14. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulações 6 a 10).....	162
Tabela 5.15. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulação 11).	162

Tabela 5.16. Capacidade unitária real ($W_u^F(_{real})$) a partir da relação entre taxa de alimentação de projeto, área de peneiramento e o produtório dos fatores de correção Ik_i * (obtido a partir do MPK)	176
Tabela 5.17. Diferenças entre as capacidades unitárias real e a do MPK.....	176
Tabela 5.18. Cinética, classe de peneiramento e diferença entre as capacidades unitárias MPK real e MPK ajustado.	177
Tabela 5.19. Área de peneiramento simulada a partir da capacidade unitária ajustada de MPK.....	179
Tabela 5.20. Valores de eficiência dos peneiramentos industriais e cinéticas de peneiramento das amostras de alimentação para as condições 2 a 11.	182
Tabela 5.21. Valores de eficiência e razões de classificação para peneiramento de gnaisse.....	184
Tabela 5.22. Valores de eficiência calculados e diferença obtida a partir do ponto RR=0,8.....	186
Tabela 5.23. Valores simulados e reais de eficiência das condições analisadas e os desvios obtidos.....	191
Tabela 11.1. Valores de P	209
Tabela 11.2. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em milímetros) – Parte 1 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1).....	211
Tabela 11.3. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em milímetros) – Parte 2 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1).....	212
Tabela 11.4. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em micrômetros) – Parte 1 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1).....	213

Tabela 11.5. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em micrômetros) – Parte 2 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1)	214
Tabela 11.6. Dados dos ensaios de cinética de peneiramento – Am1 a Am12	215
Tabela 11.7. Dados dos ensaios de cinética de peneiramento – Am13 a Am24	216
Tabela 11.8. Dados dos ensaios de cinética de peneiramento – Am25 a Am37	217

RESUMO

O peneiramento de minérios ainda é um processo marcado por um escasso volume de informações e pouca pesquisa desenvolvida. A maioria dos modelos e as relações entre as variáveis e parâmetros conhecidos surgiram a partir de testes empíricos de laboratório ou com base na tentativa e erro na experiência industrial. Este trabalho propõe desenvolver e ajustar o modelo tradicional de dimensionamento de peneiras industriais, a partir do parâmetro de cinética de peneiramento do material, determinado em ensaio padrão de laboratório. Para tanto, 37 amostras de diversos materiais (itabirito, hematita, calcário, gnaiss, granito, bauxita, dentre outras), que representam grande parte da produção mineral global, foram cedidas por várias empresas brasileiras de mineração. Inicialmente foram caracterizadas a massa específica de sólidos e aparente, umidade, índice de forma e a distribuição granulométrica. Posteriormente, foi desenvolvido um ensaio padrão de laboratório com o objetivo de se determinar o grau de peneirabilidade das amostras, denominado neste trabalho como “cinética de peneiramento”. Algumas destas amostras foram coletadas na alimentação de peneiras industriais. Dados de dimensões destes equipamentos, variáveis operacionais e do próprio material foram utilizados para os cálculos de dimensionamento utilizando métodos clássicos de peneiramento. Um destes métodos é o de Peter King (MPK), que teve seus resultados comparados com dados reais das peneiras industriais. Aplicando-se os valores de cinética de peneiramento de cada amostra no método de dimensionamento, foi possível se desenvolver ajustes no MPK, minimizando a diferença entre os resultados obtidos no modelo e as condições industriais reais. Aumentou-se, desta forma, a precisão do método de peneiramento e sua confiabilidade na aplicação nos projetos e no controle das operações existentes.

ABSTRACT

Screening of ores is still a process marked by a small volume of information and little research developed. Most of the models and the relationships between known variables and parameters arose from empirical laboratory tests or based on trial and error in industrial experience. Based on this, this work proposes to develop and adjust the traditional model of industrial screen sizing, based on the screening kinetic parameter of the material, determined in a standard laboratory test. To that end, 37 samples of various materials (itabirite, hematite, limestone, gneiss, granite, bauxite, among others), which represent a large part of the global mineral production, were provided by several Brazilian mining companies. Initially, the specific mass of solids and apparent, moisture, shape index and particle size distribution were characterized. Subsequently, a standard laboratory test was developed with the objective of measuring the degree of screenability of the samples, defined in this work as "screening kinetics". Some of these samples were collected in the screen machine feed flow. Data from these equipment, operational variables and the material were used for sizing calculations using classical screening models. One such method is that of Peter King (PKM), which had its results compared to the size of industrial screen machine themselves. By using the screening kinetics values of each sample into sizing method, it was possible to develop adjustments in the PKM, minimizing the difference between the results of the model and the actual industrial conditions. This has increased the accuracy of the screening method and its reliability in application to projects and control of existing operations.

1. INTRODUÇÃO

A prática de peneiramento na mineração sempre teve relevante destaque no processamento de minérios, para praticamente todos os tipos de materiais. A produção e a qualidade dos produtos gerados, muitas vezes, são determinadas diretamente pelas operações unitárias de peneiramento. Alguns exemplos clássicos podem ser citados, como o caso de empresas produtoras de agregados minerais, que necessitam gerar britas, pós e areias dentro de uma restrita margem de especificação. Indústrias de minérios metálicos, que geram seus produtos para o abastecimento de sinterizações (*sinter feed*), pelletizações (*pellet feed*) e altos-fornos (granulado, *pellet* e *sinter*), também possuem rígidos padrões de qualidade granulométrica de suas matérias-primas. Outros minérios metálicos não-ferrosos, tais como o níquel, alumínio, zinco, chumbo, cobre, ouro, prata, etc, também são processados sob criterioso controle granulométrico de forma a atender as especificações de cada cadeia produtiva. O sucesso do empreendimento minerário depende, portanto, da gestão eficiente nos controles de processos e operacionais, os quais estão intimamente ligados ao dimensionamento correto e assertivo dos equipamentos das plantas de beneficiamento, e na correta operação dos mesmos.

De acordo com Chaves *et al.*, (2012), peneiramento é a operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. As partículas que se apresentam à superfície de peneiramento possuem apenas duas possibilidades: passarem ou ficarem retidas. O fluxo de partículas passante se denomina “*undersize*”, enquanto o de partículas retidas, “*oversize*”.

Os meios peneirantes são acessórios imprescindíveis de qualquer peneira, e são denominados como “telas de peneiramento”. Existem vários tipos de telas, distribuídas numa vasta gama de aplicações: chapas perfuradas e “trilhos” de diversas ligas de aço, para peneiramento de partículas grossas (400mm a 40mm), telas de borracha, poliuretano ou arame, para peneiramento de granulometria média a fina (70mm a 0,15mm).

De modo geral, os equipamentos de peneiramento na mineração podem ser utilizados nas duas principais escalas: industrial e laboratorial.

No peneiramento industrial, geralmente, opera-se com elevadas vazões de minério. As capacidades dos equipamentos podem variar desde as menores, próximas de 10t/h, podendo-se ultrapassar até 5.000t/h, como é o caso das grelhas primárias.

Em relação aos tipos de peneiras industriais empregadas no setor mineral, pode-se classificá-las tanto de acordo com sua função quanto a partir de suas características mecânicas. As sete classes a seguir resumem as principais aplicações:

- 1) Peneiras escalpadoras: geralmente aplicadas para escalpe de finos. Peneiram o ROM. Antecedem os britadores primários de mandíbula e podem também ser denominadas de “grelhas”.
- 2) Peneiras “bananas” ou modulares: possuem três ou mais planos de inclinação distintos ao longo do deck. Geralmente são aplicadas em materiais com grande quantidade de finos. São projetadas para fornecer eficiências de peneiramento distintas ao longo do deck.
- 3) Peneiras vibratórias convencionais: são as mais utilizadas na indústria de mineração. Podem ser inclinadas ou horizontais, podendo ter movimento linear, como no caso das peneiras horizontais, ou movimentos circulares ou elipsoidais, como no caso das peneiras vibratórias inclinadas.
- 4) Peneiras desaguadoras: função de desaguamento de polpas de produtos ou rejeitos das plantas de beneficiamento. São horizontais ou levemente inclinadas negativamente. A altura da camada de minério (altura do *cake*) é um parâmetro muito importante para a geração de um produto com baixa umidade.
- 5) Peneiras de alta frequência: aplicadas a peneiramento superfino, granulometria próxima ou menor que 0,15mm. Utilizam telas especiais, consideradas de alto custo.

6) Peneiras rotativas ou “*trommel*”: associadas geralmente com moinhos cilíndricos. Também possuem a forma de um cilindro, no qual a alimentação é direcionada pela parte interna, retendo internamente as partículas *oversize*, ao longo do trajeto, e ao mesmo tempo possibilitando a passagem, por entre as aberturas das telas, das partículas de *undersize*.

7) Peneiras estáticas (fixas): encontradas normalmente como grelhas fixas, antes de britadores primários, sendo utilizadas, neste caso, para proteger os britadores primários contra matacões. Podem ser aplicadas também em projetos mais simples, como no caso do peneiramento de areias de aluvião (MILHOMEM, 2013). Também existem as peneiras do tipo DSM, utilizadas para peneiramento fino.

Na escala de laboratório, tanto o projeto dos equipamentos, quanto os objetivos de sua aplicação, são extremamente distintos. No peneiramento de “bancada” as peneiras são geralmente empregadas em ensaios de análise granulométrica ou fracionamento de amostras em faixas de tamanho pré-determinadas. São operadas em “batelada”, ou seja, não existe um fluxo contínuo de alimentação nestas peneiras. As massas utilizadas por ensaio pode chegar até, aproximadamente, 30kg, dependendo do tipo de ensaio e da dimensão da peneira. Quanto aos tipos de peneiras de laboratório, existem diversas variações, que dependem da aplicação e da tecnologia do fabricante. De modo geral e simplificado, pode-se classificá-las a partir de seu *layout* construtivo: peneiras redondas e peneiras quadradas. As peneiras redondas possuem área de peneiramento circular, com diâmetro padrão de 200mm e altura de 50mm. São utilizadas para ensaios de análise granulométrica, sendo alimentadas por massas na ordem de 500g, podendo-se chegar a 5kg, dependendo do tipo de ensaio e das características da amostra. As peneiras quadradas possuem dimensões maiores, a medida de seu lado padrão é de 500mm, e geralmente são aplicadas para minérios com maiores granulometrias, ou quando há a necessidade de se utilizar maiores volumes de amostras.

Segundo Valadão *et al.* (2012), a análise granulométrica é um estágio básico e obrigatório de qualquer estudo de caracterização mineral. Consiste em um ensaio padrão (dependendo do tipo de material) que utiliza uma série pré-definida de peneiras, em

função de sua abertura. Ao cessar o peneiramento, devem-se medir as massas retidas em cada peneira, calculando-se, em seguida, as respectivas frações em relação à soma das mesmas massas retidas. Um dos fatores determinantes para a representatividade da análise é que a perda de massa (massa de alimentação subtraída da soma das massas retidas nas peneiras no final do teste) não ultrapasse 2%. O resultado é geralmente expresso em um gráfico bidimensional, do tipo % passante x abertura da peneira.

Pode-se também classificar os tipos de peneiramento (tanto industrial, quanto de laboratório), em relação à necessidade de utilização ou não de água. O peneiramento é dito “a seco” quando este é realizado após a secagem da amostra em uma estufa ou forno, e retirada toda a umidade. Desta forma não se utiliza água. Enquanto o peneiramento “a úmido” é realizado na presença de água, formando-se uma polpa de minério e promovendo-se principalmente a lavagem de ultrafinos aderidos às superfícies das partículas maiores.

O peneiramento nas escalas industrial e de bancada possuem nítidas diferenças conforme apresentado, porém observam-se algumas similaridades, quanto aos mecanismos fenomenológicos. De forma abrangente, em ambas as escalas, existem algumas variáveis (operacionais e do próprio minério), que influenciam o processo de separação de maneira similar, tais como: a abertura da tela, a área aberta, a altura de camada, densidade da partícula e do sistema particulado, umidade, forma das partículas, e até mesmo o tempo de peneiramento, que podem influenciar significativamente na probabilidade de peneiramento da fração mais fina (CARVALHO, 2004).

A experiência do peneiramento industrial, em âmbito global, evidencia que para se alcançar resultados de eficiência, produtividade e qualidade, ao mesmo tempo, tem se tornado necessário superar desafios cada vez maiores. A bibliografia sobre o tema é escassa, existindo poucas referências teóricas e científicas a respeito. Muitas vezes as decisões são tomadas com base em referenciais empíricos, experiência prática ou até mesmo com base na “tentativa e erro”. É necessário, portanto, se conhecer mais a fundo os principais mecanismos de peneiramento, as variáveis operacionais e dos equipamentos, e as principais características do sistema particulado que atuam neste tipo

de processo. Finalmente, deve ser possível estimar com maior precisão os efeitos nos resultados de uma operação de peneiramento a partir da variação individual ou combinada destes parâmetros.

King (2001) apresenta um método matemático, baseado na literatura clássica da Allis Minerals System (ALLIS-CHALMERS, 1953), publicada mais recentemente pela Metso (2005), que possibilita o cálculo da área necessária do deck de peneiramento. Esta metodologia se baseia na medida da capacidade, em toneladas por hora, e na área unitária da superfície de peneiramento. Fatores de correção são considerados à medida que se varia algum parâmetro operacional, do equipamento ou do material, em relação à condição padrão.

A prática operacional evidencia que o conhecimento prévio da característica do material a ser peneirado é fator fundamental para o bom controle de processo e maior assertividade nos projetos de peneiras industriais. Materiais com características favoráveis ao peneiramento, geralmente, exigem menor área para uma mesma vazão em relação àqueles considerados de difícil peneiramento. Em virtude desta evidência prática e do embasamento matemático dos métodos clássicos de peneiramento, o presente trabalho propõe investigar o grau de peneirabilidade de diversas amostras, representantes de grande parte da produção mineral global, estabelecendo-se correlações matemáticas e ajustes, que porventura se façam necessários no modelamento matemático de dimensionamento de peneiras de King (2001).

O foco deste trabalho, portanto, é revisitar métodos consagrados de dimensionamento de peneiras (Allis-Chalmers – MAC, Peter King – MPK e Karra – MK), propondo ajustes necessários, a partir da avaliação comparativa com projetos implementados e em execução. Para isto será desenvolvido um procedimento de análise da peneirabilidade de diversos materiais. Isto sendo possível, parâmetros encontrados em laboratório poderão ser inseridos nos modelos, com o intuito de se aumentar a precisão e a assertividade na definição dos principais parâmetros de projeto e operacionais e principalmente, na seleção de peneiras industriais.

2. OBJETIVOS

O presente projeto visa aplicar e ajustar o modelo de dimensionamento de peneiras industriais com base no grau de peneirabilidade do minério determinado em ensaio padrão de laboratório.

Os objetivos específicos podem ser divididos em duas etapas:

1. Desenvolver um método analítico de caracterização que seja capaz de quantificar o grau de peneirabilidade (cinética de peneiramento) de um determinado sistema particulado mineral, validado por ensaios padrão com diversas amostras minerais.
2. Avaliar a aplicabilidade dos modelos de peneiramento existentes.
3. Realizar ajustes nos modelos a partir da utilização do parâmetro “cinética de peneiramento”, visando se alcançar maior precisão na área de peneiramento e na distribuição granulométrica dos produtos gerados, bem como maior assertividade nas tomadas de decisões operacionais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se uma abordagem sucinta dos temas mais relevantes que estão associados aos principais tópicos deste trabalho.

3.1. Peneiras industriais

O peneiramento industrial é uma das operações unitárias mais tradicionais e universalmente aplicadas nas plantas de tratamento de minérios. Tem como objetivo a separação das partículas em diferentes frações granulométricas, divididas a partir de tamanhos pré-determinados, conhecidos também como tamanho de “corte”. Pode-se encontrar aplicações desde tamanhos aproximados a 300mm, até menores, próximos a 45µm, embora haja uma significativa diminuição na eficiência do peneiramento com o afinamento do corte (WILLS, 2006). Possui um vasto campo de aplicação na indústria mineral (minério de ferro, manganês, alumínio, cobre, ouro, calcário, gnaiss, granito, areias, carvão, etc.). Os equipamentos utilizados possuem capacidades bastante variadas, tão pequenas quanto próximas de 10t/h, até capacidades superiores a 5.000t/h, como é o caso das grelhas primárias (WILLS, 2006). Um caso bastante pontual se refere à peneira Haver & Boecker, modelo R-TE4000x11000, cuja capacidade pode alcançar até 15.000t/h, segundo o manual do equipamento. Sua função é a de peneirar areias betuminosas e se encontra instalada em uma empresa canadense. Este equipamento é considerado o de maior capacidade em operação no mundo atualmente (REVISTA MINÉRIOS E MINERALES, 2019). A Figura 3.1 apresenta uma imagem deste equipamento.



Figura 3.1. Maior peneira industrial do mundo – Haver & Boecker R-TE4000x11000 (REVISTA MINÉRIOS E MINERALES, 2019).

Em relação aos meios peneirantes, ou “telas” de peneiramento, alguns tipos são tradicionalmente empregados, tais como: barras de aço e chapas perfuradas (peneiramento grosso – 400mm a 40mm), borracha, poliuretano e aço de diversas ligas (peneiramento médio a fino – 70mm a 0,15mm). As aberturas podem variar seguindo formatos distintos: forma quadrada, retangular, triangular, hexagonal, losangonal, circulares, entre outros. A aplicação de cada tipo de tela, tamanho e forma da abertura depende das características de cada processo (taxa de alimentação, densidade do material, umidade, índice de abrasão, percentual de sólidos, curvas granulométricas, entre outros), bem como do projeto construtivo da peneira (dimensões, frequência, amplitude, aceleração, sistemas de encaixe, entre outros). A Figura 3.2 apresenta alguns exemplos de telas utilizadas no peneiramento industrial de diversos materiais.

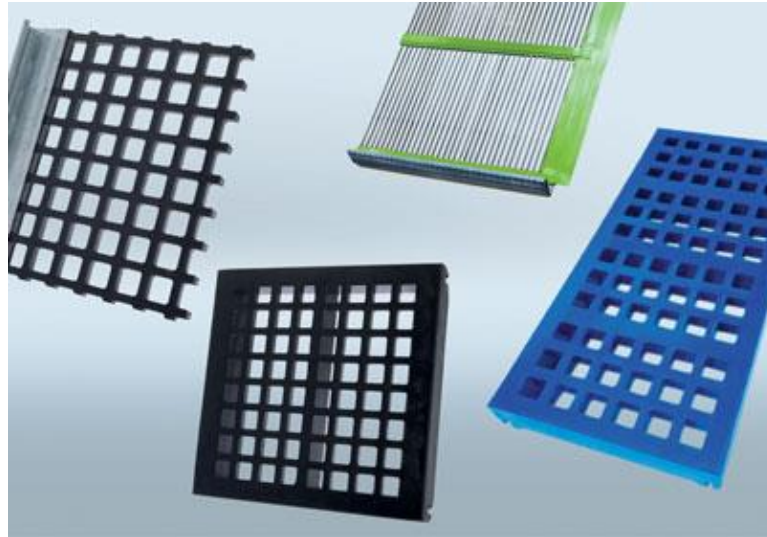


Figura 3.2. Telas de aço e poliuretano aplicadas em peneiras industriais (HAVER & BOECKER TELAS, 2019)

Em relação aos tipos de equipamentos, pode-se encontrar nas bibliografias clássicas, diversas tentativas de classificação. Não existe, portanto, uma regra geral para se definir cada classe. Por exemplo, pode-se levar em consideração a utilização ou não de água: “peneiramento a seco” x “peneiramento a úmido”. A condição mecânica da peneira também pode ser um critério de diferenciação: “peneiramento vibratório” x “peneiramento estático”. Ou até mesmo, a faixas de tamanho de corte: “peneiramento grosso” (escalpe) x “peneiramento médio e fino” (classificação) x “peneiramento desaguador” (desaguamento). Neste trabalho optou-se por empregar uma classificação, partindo-se das características mecânicas do projeto dos equipamentos, associado a sua função no processo, muito semelhante ao que considera Wills (2006) e Valadão *et al.* (2012). Assim, as seguintes características serão inter-relacionadas: o projeto (quantidade de módulos, inclinação, dimensão, quantidade de decks, etc), o tipo de movimento (linear, circular e elipsoidal), a condição dinâmica (frequência, amplitude e aceleração) e a característica dos produtos gerados (grossos, finos, superfinos, etc). A Tabela 3.1 resume os tipos de equipamentos, segundo estes critérios:

Tabela 3.1. Classificação dos tipos de peneiras e suas principais características.

Tipo de peneiramento	Faixa de abertura de tela	Função principal de processo	Descrição resumida
Grelhas	400mm a 70mm	- Escalpe de finos	- Movimento vibratório ou estático - Meios peneirantes: barras de aço ou chapas perfuradas. - Eventualmente utiliza-se borracha - Geralmente possui 1 deck.
Peneiras vibratórias convencionais	70mm a 0,5mm	- Adequar a granulometria de pilhas intermediárias - Gerar produto final. - Atuar como proteção de circuitos subsequentes. (ex.: separadores magnéticos)	- Inclinação ou horizontal. - Movimento circular, elíptico ou linear. - Meios peneirantes: borracha, poliuretano ou aço. - Podem possuir 1 ou mais decks.
Peneiras modulares	100mm a 2,0mm	- Adequar a granulometria de pilhas intermediárias - Gerar produto final - Escalpe de finos	- Mais de uma inclinação (módulos). - Movimento linear - Meios peneirantes: borracha, poliuretano ou aço. - Outra denominação: Peneira banana.
Peneiras desaguadoras	1,0mm a 0,3mm	- Diminuir umidade do produto final. - Reaproveitar água de processo	- Movimento linear - Meios peneirantes: poliuretano ou aço. - Inclinação negativa. - Altura de camada alta sobre o deck.
Peneiras de alta frequência	0,3mm a 0,15mm	- Gerar produto final - Atuar como proteção de circuitos subsequentes. (ex.: Flotação)	- Movimento linear - Meios peneirantes: poliuretano ou aço. - Inclinação negativa. - Altura de camada alta sobre o deck.
Peneiras rotativas	2,0mm a 0,2mm	- Gerar produto final - Proteger circuitos subsequente de partículas grossas.	- Equipamento cilíndrico. - Meio peneirante: Telas de aço. - Movimento rotativo.
Peneiras estáticas	300mm a 1,0mm	- Gerar produto final. - Escalpe de finos. - Atuar como proteção de circuitos subsequentes.	- Design semelhante às peneiras vibratórias convencionais. - Não há nenhum tipo de movimento. - Meios peneirantes: Geralmente barras de aço ou telas de aço.

A seguir, será descrito com maior detalhamento cada uma das classes de peneiras.

3.1.1. Grelhas

No peneiramento primário do ROM (*run of mine*) de uma planta de beneficiamento pode haver matacões, cujas dimensões excedem a capacidade da maioria dos equipamentos empregados no processo industrial. A massa de um matacão pode ultrapassar a ordem de grandeza de toneladas (dependendo da densidade do material), enquanto seu tamanho pode ser superior a um metro em qualquer dimensão. Além disto, as capacidades podem ultrapassar a ordem de 5.000t/h. Esta etapa exige, portanto, equipamentos extremamente robustos, do ponto de vista da capacidade mássica e volumétrica. Por outro lado, a eficiência de peneiramento passa a ter um grau de importância secundário.

A inclinação do deck é geralmente maior do que os demais tipos de peneira, podendo-se ultrapassar a ordem de 20°. Isto facilita o rolamento de grandes blocos ao longo do deck. Os meios peneirantes constituem-se de trilhos ou barras, cujo revestimento é geralmente aplicado em ferro-manganês, conforme pode ser visualizado na Figura 3.3. Todo o equipamento é reforçado e o chassi é obrigatoriamente revestido com material resistente ao desgaste.



Figura 3.3. Ilustração de grelha vibratória. Meio peneirante: Chapas perfuradas na alimentação e barras de aço (*fingers*) ao longo do deck – (Metso, 2018a)

A função da grelha vibratória difere da grande maioria das peneiras vibratórias convencionais uma vez que não se deseja uma separação “tão” eficiente dos finos e dos grossos, mas sim, somente desviar uma quantidade razoável de finos do britador primário. A propósito, estes finos retêm mais umidade que a média do sistema particulado, logo é mais fácil provocarem entupimentos, bem como aumento de desgaste por abrasão. Assim, a eficiência, passa a não ser uma consideração primordial para as grelhas vibratórias, e seus valores se estabelecem em torno de 60 a 70%.

3.1.2. Peneiras vibratórias convencionais

As peneiras vibratórias são constituídas por um chassi robusto, apoiado sobre molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório, contendo um, dois, três e eventualmente até quatro patamares de suportes para as telas, denominados de “*deck*” (CHAVES *et al.*, 2012) A Figura 3.4 apresenta exemplos deste tipo de equipamento.

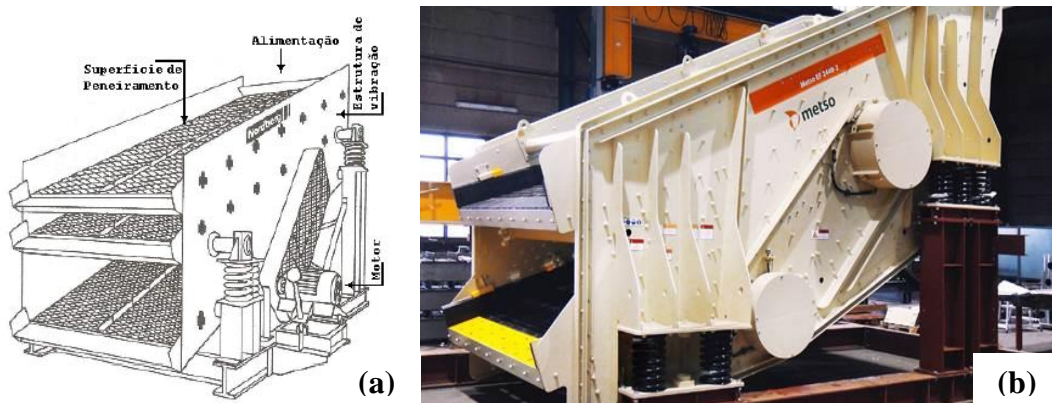


Figura 3.4. Peneiras vibratórias inclinadas – (a) Três *decks* (LUZ *et al.*, 2010) (b) Dois *decks* (Metso Mineração, 2018b)

As peneiras vibratórias inclinadas têm inclinações variando entre 15° e 35° e transportam o material do leito a uma velocidade de 18 a 36m/min, dependendo da inclinação (CHAVES *et al.*, 2012).

O movimento vibratório das peneiras inclinadas é definido como circular ou elíptico (Figura 3.5). Neste movimento as partículas são lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre aberturas sucessivas. Além do transporte do material, a vibração também gera a “estratificação” do conjunto de partículas sobre a tela, formando um leito de partículas maiores sobreposto ao leito de partículas menores.

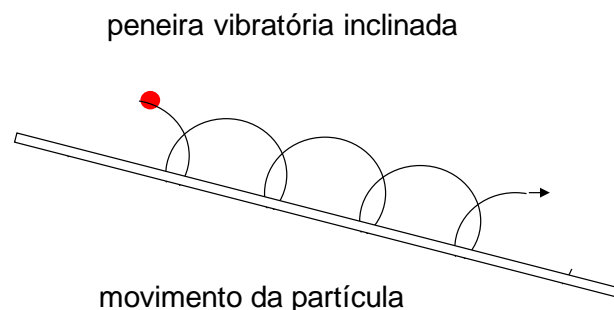


Figura 3.5. Representação da trajetória de uma partícula submetida a um movimento vibratório circular (GALÉRY *et al.*, 2007)

A direção da rotação poderá ser a mesma do leito de partículas, situação referida como rotação “pró-fluxo”. Neste tipo de rotação, o escoamento do *oversize* é facilitado, influenciando positivamente na capacidade do equipamento. Logo, desconsiderando a influência de outras variáveis, a eficiência de peneiramento pode ser comprometida. Uma situação oposta a esta, é a rotação “contra-fluxo”. Neste caso o escoamento do material é retardado, aumentando a probabilidade das partículas atravessarem a tela.

As peneiras vibratórias horizontais (Figura 3.6) têm um movimento vibratório retilíneo (ou linear). A velocidade de transporte do material gira em torno de 12m/min a 18m/min (VALADÃO *et al.*, 2012). A altura de lançamento das partículas é menor que a da peneira inclinada, o que inibe a utilização de aberturas tão grandes quanto. Por tudo isto é necessário um movimento diferente, conforme ilustra a Figura 3.7.

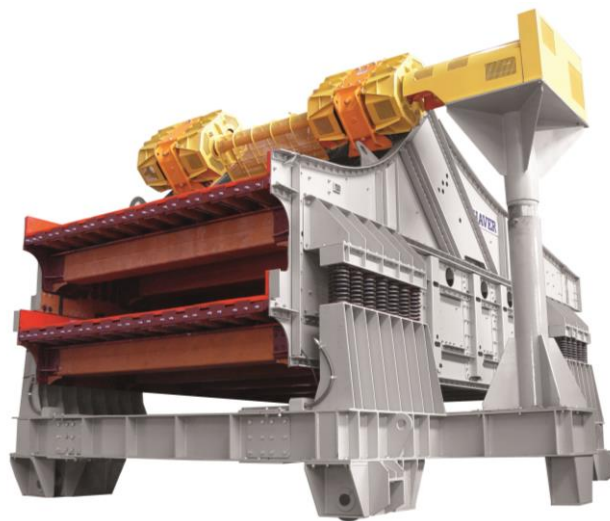
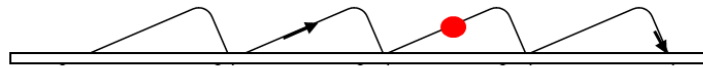


Figura 3.6. Peneira vibratória horizontal (HAVER & BOECKER, 2019)

peneira vibratória horizontal



movimento da partícula

Figura 3.7. Representação da trajetória de uma partícula submetida a um movimento vibratório retilíneo ou linear (GALÉRY *et al.*, 2007)

3.1.3. Peneiras bananas

As peneiras bananas, como são conhecidas popularmente, são projetadas de forma que o *deck* de peneiramento seja repartido em mais de uma região de inclinação. Geralmente possuem três regiões de inclinações distintas, podendo existir casos em que se chegue a até seis regiões (Figura 3.8). O grau de inclinação cresce no sentido do fluxo, ou seja, a região de alimentação é caracterizada por ter uma inclinação maior (entre 30 a 40°), enquanto a descarga possui a menor inclinação (entre 0 a 15°). O movimento de vibração é o linear.



Figura 3.8. Peneira banana (DIRECT INDUSTRY, 2018).

Devido à maior inclinação no início do processo, a altura de camada é diminuída significativamente, acelerando a estratificação granulométrica das partículas, o que aumenta a taxa de passagem das partículas finas. Este fenômeno justifica a aplicação deste tipo de peneira para minérios que contém considerável quantidade de finos. Obviamente, caso esta inclinação seja excessiva, pode-se promover uma velocidade extrema de escoamento, não acontecendo a passagem dos finos pela abertura da tela. Nas regiões seguintes a velocidade de escoamento diminui o que faz aumentar a probabilidade de passagem das partículas finas, aumentando, portanto, a eficiência de peneiramento. Neste momento o peneiramento também é facilitado pela menor altura de camada sobre o deck. A última região (3º módulo, para o caso de peneiras de 3 módulos), é caracterizada pela presença de grande proporção de partículas, cujo tamanho é próximo ao da abertura da tela (também conhecidas como “*nearsized*”). Obviamente também existirá ainda certa quantidade de partículas finas, que também terão maior chance de passar nas aberturas da tela da peneira. Desta forma, pode-se concluir que a combinação de regiões com inclinações decrescentes no deck, ao longo do sentido do escoamento, favorece uma maior eficiência de peneiramento. A figura 3.9 apresenta um comparativo entre peneira vibratória inclinada convencional e peneira banana, onde se podem notar as diferenças nas vazões passantes ao longo do comprimento do *deck* das peneiras.

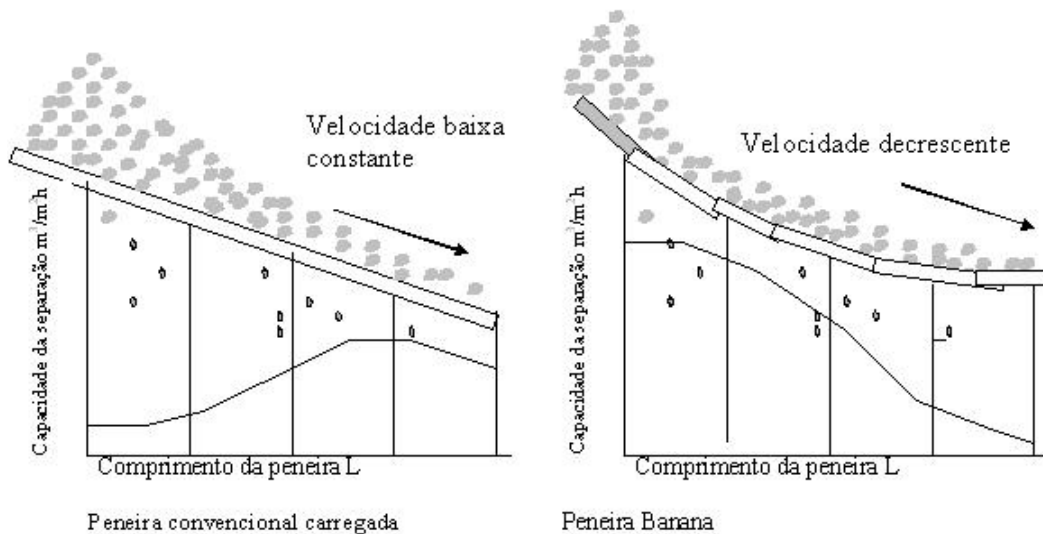


Figura 3.9. Gráficos comparativos entre as vazões passantes em uma peneira vibratória inclinada convencional e uma peneira banana (TORQUATO, 2007).

3.1.4. Peneiras desaguadoras

Peneiras desaguadoras são também peneiras vibratórias, no entanto com a função específica de realizar o desaguamento de uma polpa de minério ou rejeito. Geralmente a polpa que alimenta possui em torno de 40% a 60% de sólidos em massa, devendo-se gerar um volume de água passante, o mais livre possível de sólidos (menor que 5%), e uma massa retida de minério, com a menor umidade possível (menor que 15%). Dependendo do projeto e das variáveis aplicadas na peneira (condição de vibração, tipo de telas, abertura das telas, inclinação, etc), os resultados esperados em ambos os produtos podem variar consideravelmente.

Como a função de uma peneira desaguadora é meramente separar o sólido do líquido, geralmente aplica-se uma malha de tela menor do que o menor tamanho de partícula presente na alimentação (MILHOMEM, 2013), como é o caso de alguns processamentos de *sinter feed* grosso (produto de minério de ferro, compreendido entre 8,0 e 1,0mm). Neste caso, utilizam-se telas variando-se entre 0,8 e 0,15mm. Ademais, o minério que é desaguado sobre o deck deve formar uma altura de camada relativamente maior do que nos peneiramentos convencionais (50 a 150mm). A esta altura de camada também se atribui a denominação: “altura do *cake*” (ou torta). Devido à umidade

presente no minério que está sendo processado, as partículas hidrofílicas, que são a grande maioria no universo dos minerais, se tornam mais coesas, aderindo-se umas às outras, e, portanto, conferindo maior estabilidade à camada de minério que segue “em bloco” sobre o meio peneirante. Devido a este fenômeno, inclusive as partículas mais finas que a abertura da tela, podem seguir diretamente junto ao fluxo de *oversize*, sem ser impostas a elas muita dificuldade (CHAVES *et al.*, 2012).

Para que ocorra um desaguamento eficiente, ou seja, a maior proporção possível de água prossiga ao fluxo passante da peneira, as peneiras desaguadoras devem ser projetadas com inclinação negativa (-2° a -5°). A área total do deck é, de modo geral, menor do que a das peneiras vibratórias convencionais de classificação. A Figura 3.10 apresenta uma imagem de peneira desaguadora, onde se observa em destaque a camada do *cake* sobre o deck.



Figura 3.10. Peneira desaguadora (MILHOMEM, 2013).

3.1.5. Peneiras de alta frequência

As peneiras de alta frequência foram desenvolvidas, principalmente, para solucionar os problemas relacionados a cortes muito finos (abaixo de 0,3mm). Sabe-se que quanto menor o tamanho de corte maior deve ser a frequência de vibração de peneiramento (MANUAL DA FAÇO, 1975 - apud CHAVES *et al.*, 2012).

Do ponto de vista de projeto, este tipo de equipamento geralmente contém motorizadores independentes, que são controlados por inversores de frequência. A inclinação do deck é alta em relação às peneiras vibratórias convencionais, variando-se entre 30 a 40°, amplitude de vibração baixa, oscilando entre 0,5 a 2,5mm e a faixa de frequência podendo-se variar entre 1000rpm a 6000rpm. Podem possuir de 1 a 6 *decks*, de modo que a alimentação total do processo é dividida e distribuída igualmente para cada *deck* (diferentemente das peneiras vibratórias convencionais, nas quais o passante do *deck* de cima alimenta o *deck* de baixo). Por consequência obtém-se um ganho de espaço no *layout* da planta, visto que suas dimensões básicas (comprimento x largura) são bem menores do que os demais tipos de peneiras conhecidas e de mesma capacidade. De acordo com o manual da empresa Derrick (DERRICK, 2018), existem máquinas que variam desde 0,9x2,4m até 1,5x4,3m. Nos processos a seco são normalmente enclausuradas.

A Figura 3.11 apresenta uma das peneiras aplicada na unidade da empresa Votorantim em Vazante, MG.



Figura 3.11. Exemplo de uma peneira de alta frequência em produção na Votorantim – Vazante (REVISTA MINÉRIOS, 2018).

3.1.6. Peneiras Rotativas

As peneiras rotativas, ou *trommels*, são equipamentos largamente empregados em associação com moinhos cilíndricos, presente na descarga destes, e cuja função é garantir que produto não contenha materiais com granulometrias atípicas (*pebbles*), ou

até mesmo contaminações de corpos moedores. As malhas utilizadas são compreendidas entre 5,0mm e 64mm, aproximadamente.

O *layout* construtivo pode ser descrito como um cilindro revestido de tela, com seu eixo ligeiramente inclinado em relação à horizontal. A alimentação é feita na extremidade superior (Figura 3.12). As partículas se direcionam rotacionando ao longo do comprimento, com auxílio de defletores instalados junto às telas. As partículas mais finas que a abertura das telas as atravessam e as mais grossas ficam retidas, sendo descarregadas na extremidade inferior. Geralmente a operação é feita a úmido (CHAVES *et al.*, 2012). As telas de diferentes aberturas (crescentes no sentido da alimentação para a descarga) são colocadas lado a lado, cada produto descarregado num chute próprio.

A rotação recomendada é de 33 a 45% da velocidade crítica (que vai depender do diâmetro do cilindro).

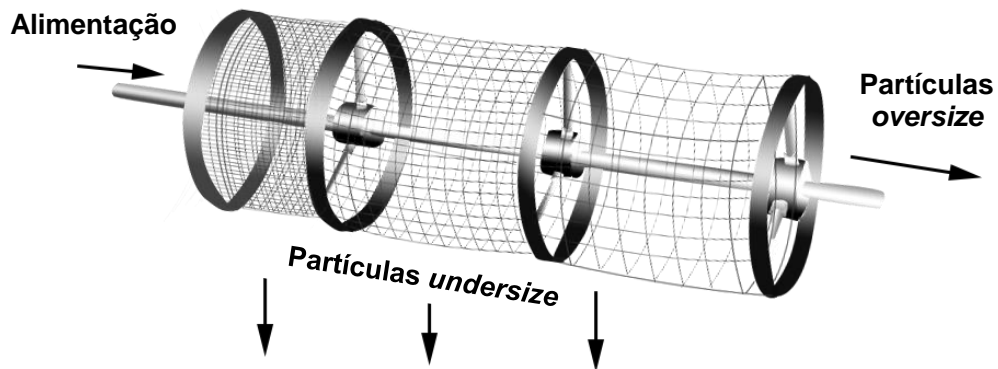


Figura 3.12. Representação esquemática de uma peneira rotativa (TROMMEL SCREEN, 2018).

3.1.7. Peneiras e grelhas estáticas (fixas)

As grelhas fixas não possuem qualquer tipo de mecanismo de vibração, e são constituídas de barras ou trilhos equidistantes apoiados numa estrutura de suporte. Possuem inclinação variando entre 35° a 50° de forma a garantir o transporte do material (WILLS, 2006).

As peneiras fixas têm um deck reto, inclinado, ou de projeto especial (*sieve bends*) como as peneiras DSM (Figura 3.13).

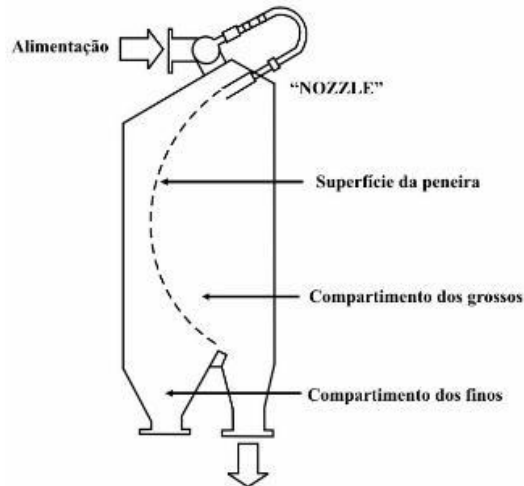


Figura 3.13. Representação esquemática de uma peneira DSM (LUZ *et al.*, 2010).

Segundo CHAVES *et al.*, (2012), as peneiras e grelhas fixas têm uma eficiência muito baixa, inferior a 50%, o que limita a sua aplicação, além de baixa capacidade.

3.1.8. Tipo de telas

Existem muitos tipos de telas disponíveis para o peneiramento vibratório industrial. A escolha da superfície de peneiramento para uma determinada função dependerá do corte exigido e da natureza do processo. O tamanho da abertura e sua forma, a espessura de peneiramento (altura da abertura), a proporção de área aberta, as propriedades do tipo de material e a flexibilidade da tela podem ser fatores críticos para o desempenho do peneiramento.

Telas de peneiramento são normalmente fabricadas em aço, borracha ou poliuretano, e podem ser classificadas em função de seu tipo de encaixe sobre a peneira: aparafusadas, tensionadas, modulares de encaixe rápido, etc. A seguir segue uma breve descrição dos principais tipos de telas:

- ✓ Telas aparafusadas: geralmente utilizadas para peneiramentos de partículas mais grossas, em torno ou superior a 50mm. Consistem, frequentemente, de placas perfuradas

de grande espessura, cortadas a laser ou plasma. Alguns fabricantes utilizam revestimentos de poliuretano ou borracha como forma de aumentar a vida útil, dependendo do material e tipo de aplicação. As aberturas possuem formato cônico no sentido da altura do furo, ficando mais larga com a profundidade. Este fator reduz os riscos de entupimento de partículas ao longo da abertura (Figura 3.14). Ressalta-se que esta característica não é exclusiva deste tipo de tela.



Figura 3.14. Chapas de aço perfuradas aparafusadas sobre deck de uma peneira (WILLS, 2006).

Telas aparafusadas de borracha e poliuretano também podem ser encontradas em algumas aplicações de peneiramento de grossos. Nestes casos, geralmente se busca maiores eficiências de peneiramento, devido à flexibilidade destes polímeros. Ganhos na ergonomia em relação ao manuseio também são evidentes, devido ao menor peso relativo em relação a outros tipos de telas. Haja vista também que praticamente todas as telas construídas em poliuretano ou borracha, independente do tipo de encaixe, possuem uma “alma” de aço, ou seja, fios de aço internos ao material polimérico, de modo a conferir maior resistência física. Outra vantagem, se comparadas às telas de encaixe rápido, é que os projetos de telas aparafusadas podem promover uma área aberta maior, favorável à eficiência do processo.

✓ Telas tensionadas: são telas que possuem dimensões consideravelmente maiores em comparação a outros tipos de telas modulares, assemelhando-se muitas vezes a um tecido esticado sobre o *deck* da peneira (Figura 3.15). Sua espessura de peneiramento

tem a dimensão do próprio fio (espaço entre as aberturas). São instaladas de forma que permaneçam “esticadas” durante a operação. Podem ser dispostas na direção da largura da peneira (*cross tensioned*) ou ao longo do comprimento (*end tensioned*). Muitas telas possuem ganchos de aço em suas laterais, os quais têm a função de se apoiar às “garras” aparafusadas no equipamento (sejam elas laterais ou transversais em relação ao comprimento da peneira) (Figura 3.16). Manter a tensão correta é fundamental para se garantir a eficiência de peneiramento e a vida útil da tela. Ganchos e garras podem, portanto, ser considerados os principais componentes responsáveis por promover o tensionamento das telas. No entanto, há também outros fatores críticos, tais como: posicionamento entre as longarinas, o que promove o “arqueamento” da tela ao ser tensionada sobre o *deck*, pressão controlada dos parafusos das garras e a distância mínima entre os ganchos das telas e a parede lateral da peneira. Estas últimas variáveis são estabelecidas por cada fabricante. Em relação ao material que são fabricadas as telas tensionadas, usualmente utilizam fios de aço (carbono ou inox), mas também podem ser manufaturadas em borracha ou poliuretano, embora sejam menos comuns estes dois últimos materiais. A escolha entre o tipo de material é função da avaliação entre a produtividade, eficiência de peneiramento, vida útil e custo de investimento.



Figura 3.15. Tela tensionada de aço inox (CASTECH, 2019).

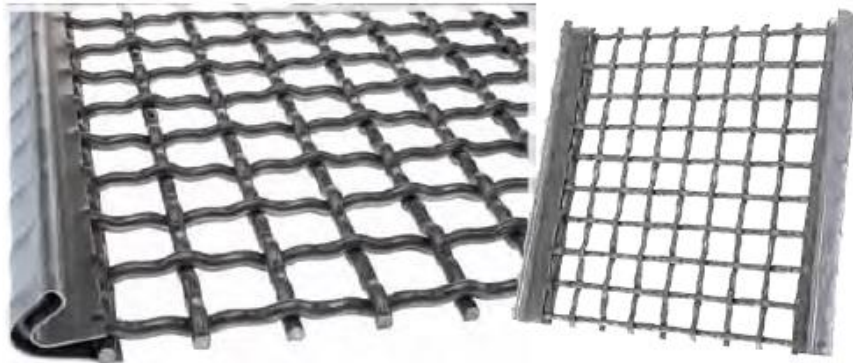


Figura 3.16. Tela tensionada de aço inox com gancho lateral em destaque (HAVER&TYLER, 2012).

✓ As telas de aço convencional são aplicadas vastamente no peneiramento de minérios metálicos e agregados minerais. Usualmente construídas em aço carbono ou aço inox, tem maior área aberta em relação aos outros tipos de telas, o que influencia, em alguns casos, na possibilidade de diminuição da área total de peneiramento. Ao se aumentar o diâmetro do fio, aumenta-se também sua resistência ao desgaste, no entanto se diminui, proporcionalmente, a área aberta, capacidade e eficiência.

As aberturas variam entre o formato quadrado e o retangular. Aberturas retangulares têm maior área aberta do que aberturas quadradas de mesmo *mesh* e diâmetro de fio. O diâmetro do fio escolhido depende da natureza do serviço e da capacidade exigida. De maneira geral, quanto mais fino o diâmetro mais frágil se torna o fio, logo menor a vida útil da tela.

Uma variação importante das telas de aço convencional são as telas auto-limpantes. Tradicionalmente empregadas para solucionar problemas de cegamento, as telas auto-limpantes possuem aberturas, cujo formato tem grande comprimento (aberturas oblongas), podendo-se alcançar toda extensão do comprimento dos fios (dispostos em paralelo) e da tela. Alguns fabricantes denominam este tipo de *piano-wire*, devido à semelhança com cordas de um piano musical. Desta forma, os fios também têm liberdade para vibrar, por vezes, em frequências até maiores do que a própria peneira, e, portanto, se diminui as chances de ocorrer cegamentos e entupimentos. A precisão do corte é próximo ao das telas de arame convencional, e a vida útil pode ser superior em muitos casos, justificando assim o alto custo de investimento. Existem três tipos

principais de telas auto-limpantes, em função do formato da abertura: diamante, triângulo, e zig-zag ou ondular (Figura 3.17).



Figura 3.17. Tela autolimpante Flexmat® tensionada – Forma da abertura: diamante (HAVER & BOECKER, 2005).

✓ Telas modulares de encaixe rápido: as telas mais populares para aplicações em serviços que exigem grandes esforços e grande potencial ao desgaste (principalmente a abrasão) são os módulos fabricados em borracha ou poliuretano (Figura 3.18).

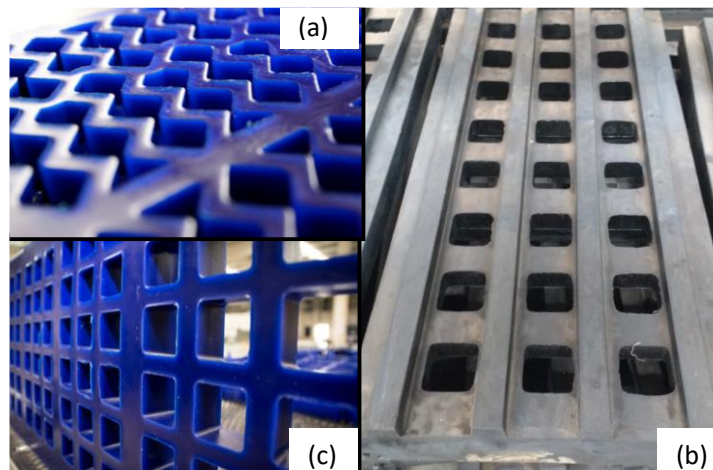


Figura 3.18. Telas modulares (a) Poliuretano – abertura em *zig-zag* (b) Borracha – abertura quadrada (c) Poliuretano – abertura quadrada. (Arquivo particular do autor, 2017).

A fixação é realizada por pressão sobre suportes específicos, geralmente também feitos em poliuretano. Um dos suportes mais tradicionais é conhecido como “*channel*”, e são instalados por parafusos sobre as longarinas das peneiras. Neste tipo de suporte se encaixam telas com sistema de fixação conhecido como *snap deck*, um dos tipos de encaixe rápido mais empregado no Brasil (Figura 3.19).

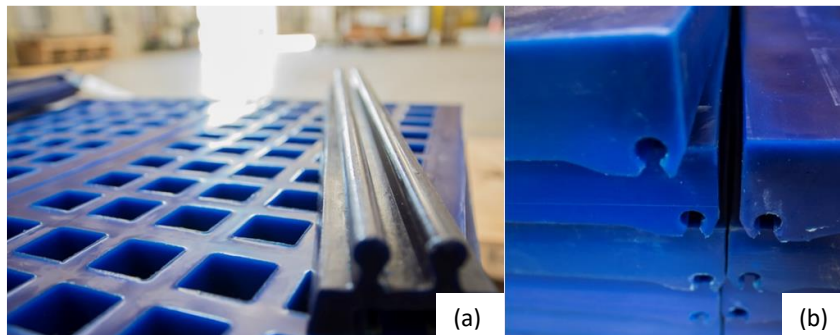


Figura 3.19. Telas modulares e um exemplar de *channel* (a) Telas modulares com destaque ao sistema de fixação *snap deck* (b). (Arquivo particular do autor, 2017).

Ambos os materiais oferecem excelente resistência à abrasão. A borracha também tem boa resistência ao impacto, sendo, portanto utilizada em aplicações nas quais o *top size* do material está acima de 50mm. O poliuretano é normalmente aplicado para tamanhos menores e em processamento a úmido, embora esta tendência tem se modificado com o tempo.

As dimensões aplicadas são tipicamente 1’x1’ (305x305mm) ou 2’x1’ (610x305mm) ou muito próximo a isto. As bordas de uma tela modular contém uma armação rígida de aço para conferir maior resistência à tela. Além da borda, esta armação pode conter outras continuidades de fios de aço, conferindo resistência em linhas específicas da tela. A esta estrutura é dado o nome popular de “alma metálica”.

Em caso de necessidade de troca, a intervenção é consideravelmente mais rápida do que outros tipos de telas. O procedimento é manual, não necessitando de ferramentas sofisticadas e específicas.

Diferentes tipos de módulos, com aberturas variadas podem ser instalados em diferentes posições ao longo da peneira. Muitas vezes intercalando telas com níveis de resistências variados, de modo a reforçar determinadas áreas ou até mesmo para otimizar alguma variável específica do processo, tal como a eficiência de peneiramento.

A maior vantagem do poliuretano é a maior resistência à abrasão em relação à maioria dos demais materiais, principalmente em relação às telas de aço carbono. Outra vantagem deste material, em conjunto com a borracha, é a sua flexibilidade, o que faz reduzir, consideravelmente, o cegamento em relação a algumas telas de aço rígidas.

As aberturas podem ter diversas formas. Quadradas e retangulares (oblongas) continuam sendo as mais comuns, As retangulares podem ser dispostas no sentido do fluxo (aplicações de separação por tamanho), contra-fluxo, usualmente aplicadas em desaguamento, ou diagonais. Aberturas retangulares fornecem maior área aberta, e consequentemente maior capacidade de produção, resistência ao cegamento e entupimento e maior eficiência do que as aberturas quadradas. Entretanto a precisão do corte pode ficar comprometida caso o material apresente grande proporção de partículas lamelares e alongadas. Deve-se, portanto, ser avaliado a eficiência de peneiramento, produtividade e vida útil para cada projeto. Outras formas de abertura incluem: circular, hexagonal, zig-zag e variações entre todas estas últimas formas. As aberturas circulares, por exemplo, podem fornecer um corte mais preciso e exato, mas com maior propensão ao entupimento.

Telas modulares também podem ter sua superfície de peneiramento constituída por fios de aço (carbono ou inox). A principal vantagem de uma tela modular de aço é a maior área aberta, logo maior produtividade, em relação às telas de poliuretano e borracha, e por vezes melhor rendimento ao se processar minérios com alto teor de argila e excesso de umidade. A desvantagem se refere principalmente à vida útil.

3.2. Variáveis e indicadores de desempenho do peneiramento

O processo de peneiramento pode ser entendido como um fenômeno ou conjunto de fenômenos que ocorrem com uma população incontável de partículas, sobre uma

superfície contendo diversas aberturas, com tamanho e formas definidos. As partículas presente nesta população passarão pela abertura da superfície caso sejam menores que seu tamanho ou ficarão retidas caso sejam maiores que esta dimensão.

Segundo Wills (2006) a eficiência e a capacidade do peneiramento são dois parâmetros inter-relacionados, e a “completa” separação das partículas tende a ocorrer à medida que se alcança menores taxas de alimentação sobre a peneira ou maiores tempos de peneiramento. Assim, para qualquer valor de capacidade, existe um grau de probabilidade de haver ou não a passagem de uma dada partícula, a partir do momento que esta alcança a superfície da tela. Esta série de eventos probabilísticos pode ser descrito considerando uma partícula de forma esférica e diâmetro d , passando por uma abertura quadrada de lado a e diâmetro do fio \emptyset , saltando ainda, ortogonalmente à superfície da tela. A Equação 3.1 representa de uma forma simples, a probabilidade de ocorrência da passagem de uma única partícula de tamanho d em um único evento, segundo Gaudin (1939):

$$p = \frac{(a - d)^2}{(a + \emptyset)} \quad \text{Equação 3.1}$$

Considerando o cálculo do percentual da área aberta f_o , para uma espessura de fio \emptyset constante e abertura quadrada de lado a (que será apresentado em momento posterior), então:

$$p = f_o \left(1 - \frac{d}{a}\right)^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

Uma série n de eventos possui a seguinte probabilidade:

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \quad \text{Equação 3.3}$$

Da equação de probabilidade acima, Carvalho (2004) considera que a fração residual de finos da classe i , retida juntamente ao fluxo de *oversize*, poderia ser calculada pela Equação 3.4.

$$\frac{w_i}{w_{oi}} = (1 - p_1)^n \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

- w_i – massa da partícula da classe i sobre a peneira após n tentativas [kg];
- w_{oi} – massa inicial da classe i [kg];

No caso em que a partícula é submetida a um peneiramento considerando um determinado ângulo θ e com malha retangular, a Equação 3.1 pode ser generalizada conforme mostra a Equação 3.5:

$$p_1 = \frac{(a_l x \cos\theta - d)x (a_t - d)}{(a_l x \cos\theta + \emptyset)x (a_t + \emptyset)} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

- a_l : abertura na direção longitudinal [m];
- a_t : abertura na direção transversal [m];
- θ : ângulo de inclinação da peneira plana [°].
- \emptyset : espessura do fio da tela [mm].

Outros conceitos e modelos associados à probabilidade de peneiramento, que também consideram as partículas de forma esférica, foram estudados nos trabalhos de Kelly & Spottiswood (1982) e Mogensen (1965).

Sztaba (1993) considerou a influência da forma de partícula a partir de equações de probabilidade, partindo do princípio que toda partícula tende a assumir posições de estabilidade sobre a superfície de peneiramento. O diâmetro que passa a ser considerado é, portanto, o diâmetro de projeção de partícula (d_p), que também está relacionado ao diâmetro equivalente (d_z). Ambos os diâmetros estão relacionados ao fator forma C_{AN} .

$$d_p = \frac{d_z}{\sqrt{C_{AN}}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Na Equação 3.6, d_p é o diâmetro do círculo que possui a mesma área de superfície de uma partícula projetada perpendicularmente sobre o plano situado mais próximo possível da superfície de peneiramento. Já d_z representa o diâmetro equivalente da esfera de mesmo volume da partícula considerada. Sztaba (1993) ainda considera que o diâmetro equivalente pode ser considerado como a média aritmética das aberturas de passante e retido da fração granulométrica correspondente (d_A) em conjunto com as constantes A e B , as quais podem ser determinadas experimentalmente para cada partícula (Ex. partículas de quartzo: $A = 1,08967$; $B = -0,0003$). A probabilidade de peneiramento, conectada com o tamanho e forma de uma partícula real (p_z), pode ser expressa pela Equação 3.7:

$$p_z = \left(1 - \frac{Ax d_A + B}{\sqrt{C_{AN} x a}} \right)^2 \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde, a é a abertura quadrada da peneira.

A probabilidade associada ao projeto da tela (p_s) pode ser escrita como:

$$p_s = s = \frac{rxl^2}{(rxl + \emptyset_{lb})x(l + \emptyset_{la})} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

- s : também denominado de coeficiente de transparência da tela.
- r : coeficiente de “retangularidade” da abertura da tela. (Razão entre a_t e a_l).
- a_t : Lado da abertura da tela na direção transversal.
- a_l : Lado da abertura da tela na direção longitudinal.
- a : lado da abertura quadrada da tela.

- \varnothing_{lb} : espessura do fio na direção do comprimento das aberturas.
- \varnothing_{la} : espessura do fio na direção da largura das aberturas.

A probabilidade associada com a espessura de camada é dada por p_r (Equação 3.9). Principalmente para peneiramento que envolve altas espessuras (alturas) de camada sobre o deck.

$$p_r = \frac{a}{t_b} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde t_b é a espessura (altura) de camada sobre a superfície de peneiramento.

Finalmente, a expressão geral de probabilidade de peneiramento de partícula pode ser expressa pela Equação 3.10 e representada através da Figura 3.20.

$$p_{\text{peneiramento}} = p_z p_s p_r = \left(1 - \frac{Ax d_A + B}{\sqrt{C_{AN}} x a}\right)^2 \frac{ra^2}{(ra + at)(a + al)} \frac{a}{t_b} \quad \text{Equação 3.10}$$

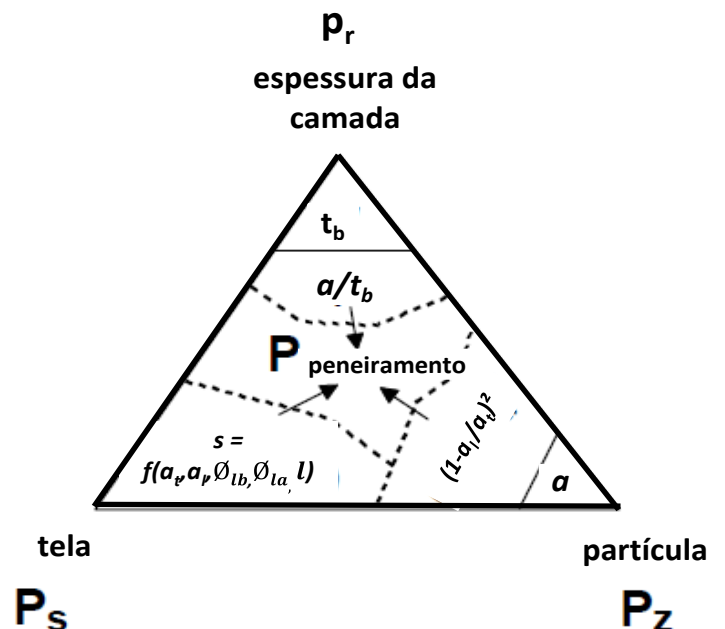


Figura 3.20. Influência dos diferentes parâmetros na probabilidade de peneiramento para uma determinada camada de partículas (modificado de SZTABA, 1993).

De acordo com Sztaba (1993) a equação geral de probabilidade (Equação 3.10) determina a probabilidade mínima do peneiramento da partícula sobre a superfície de peneiramento, e o cálculo é considerado extremamente complexo. Maiores detalhes podem ser encontrados em outros trabalhos do mesmo autor.

Vários outros fatores afetam o desempenho do peneiramento de forma geral. Além dos já relacionados nas equações anteriores, alguns outros são vivenciados cotidianamente nas operações de peneiramento. São eles: tamanho de partícula, taxa de alimentação, ângulo da peneira, área aberta, condição dinâmica da peneira e umidade. Cada um destes é descrito em detalhe a seguir:

✓ **Tamanho de partícula**

Baseado na Equação 3.3, Taggart *apud* Wills (1945) apresenta um levantamento probabilístico de passagem de partículas e aberturas de tamanhos inter-relacionados. A Tabela 3.2 relaciona a provável chance por mil, de passagem irrestrita de partículas esféricas através de uma abertura quadrada, fornecendo também o número provável de aberturas em série necessário para assegurar a passagem destas partículas através da tela ao longo do trajeto.

Tabela 3.2. Probabilidade de passagem de partículas para uma relação entre tamanho de partícula, abertura da tela e número de aberturas ao longo do trajeto (adaptado de WILLS, 2006).

Relação do diâmetro da partícula pelo tamanho da abertura	Chance de passagem por 1000	Número de aberturas ao longo do trajeto
0,001	998	1
0,01	980	2
0,1	810	2
0,2	640	2
0,3	490	2
0,4	360	3
0,5	250	4
0,6	140	7
0,7	82	12
0,8	40	25
0,9	9,8	100
0,95	2	500
0,99	0,1	10000
0,999	0,001	1000000

Observa-se dos resultados acima que as chances de passagem de partículas diminuem rapidamente à medida que seu diâmetro se aproxima da abertura da tela. Assim também a quantidade necessária de aberturas para garantir a passagem destas partículas ao longo do percurso aumenta significativamente. Este efeito pode ser observado na prática em algumas situações, nas quais a população de partículas apresenta grande proporção de tamanhos muito próximos aos da abertura (*nearsized*), fator crítico e causador de entupimentos nas telas, diminuindo progressivamente a eficiência de peneiramento.

✓ **Taxa de alimentação**

Segundo Wills (2006), no peneiramento em laboratório as massas utilizadas devem ser pequenas, mas por outro lado o tempo de peneiramento deve ser alto o suficiente para que ocorra uma “quase completa” separação das partículas. Estes são os princípios básicos de uma análise granulométrica. Já no peneiramento industrial o ditado econômico é assegurar que a taxa de alimentação seja a maior possível ou pelo menos

muito próxima da capacidade da peneira. Esta condição está geralmente associada com uma elevada altura de camada sobre o deck de peneiramento. Como observado nas análises probabilísticas, caso a população de partículas finas não tenha tempo ou oportunidade suficiente para atingir o fundo da camada e ter contato com a tela para passar por suas aberturas, o efeito direto é a redução de eficiência de passagem de finos para o fluxo de *undersize*.

Altas capacidades e altas eficiências seguem, frequentemente, direções opostas nos processos de peneiramento. Os projetos de peneiras devem, portanto, garantir o equilíbrio entre estes dois parâmetros visando-se atingir o resultado ótimo esperado.

✓ Inclinação da peneira

O modelo probabilístico de Gaudin supõem que as partículas saltam sobre a tela de maneira perpendicular. Portanto, na condição da partícula atingir a abertura formando um ângulo raso com a sua direção, uma nova dimensão “efetiva”, baseada na projeção da abertura com o ângulo formado, passa a ser considerada (Figura 3.21). Evidentemente esta nova dimensão da abertura será sempre menor que a dimensão quando da peneira na posição horizontal.

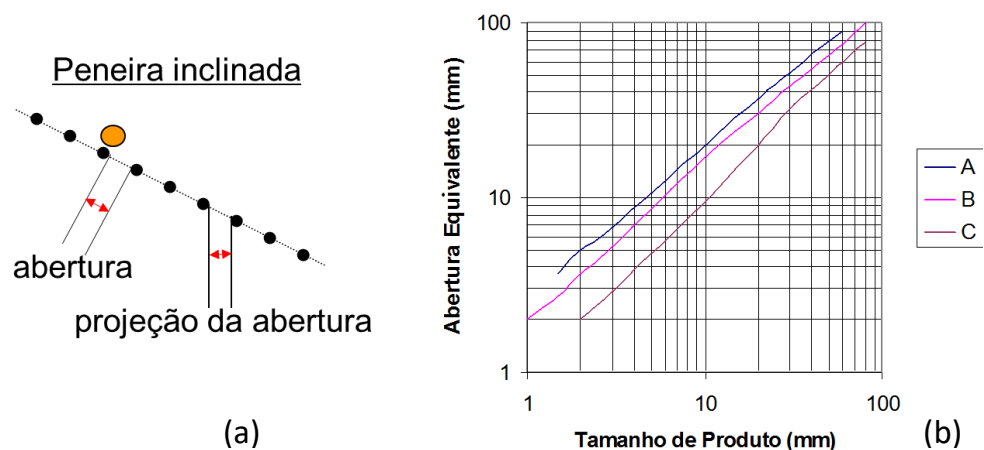


Figura 3.21. (a) Projeção da abertura em peneira inclinada, (b) gráfico de Abertura Equivalente x Tamanho de Produto para três inclinações diferentes ($C < B < A$).

(Arquivo particular do autor, 2019).

Nesta situação, conseqüentemente, diminui-se as chances de passagem das partículas, e esta chance será cada vez menor, quanto mais próximo for o tamanho da partícula do tamanho da abertura real. Assim, também, quanto mais inclinada estiver a peneira, gradativamente menores são as chances de passagem das partículas. Logo, pode-se concluir que o tamanho de corte afasta-se do tamanho da abertura na medida em que se aumenta sua inclinação.

A inclinação também afeta a velocidade do fluxo de material, e desta maneira, o tempo e as oportunidades de passagem de partículas finas também podem ser reduzidos. Quanto maior a inclinação da peneira maior sua capacidade, mas também menor a altura do leito. Isto traz alguns efeitos positivos e outros negativos para os indicadores de processo. Se a altura do leito diminui, há um menor desgaste relativo das telas, aumentando, portanto sua vida útil. Por outro lado, o aumento da inclinação traz efeito similar ao aumento da amplitude, ou seja, as partículas passam a ser lançadas muito à frente, diminuindo as chances de atravessarem as aberturas das telas.

✓ **Forma da partícula**

A maior parte dos materiais processados em peneiras industriais são “não-esféricos”. Enquanto as partículas esféricas passam com igual probabilidade em qualquer orientação, conforme premissa dos modelos apresentados anteriormente, partículas irregulares podem se apresentar de diversas maneiras sobre a tela e se auto-orientando até que seja possível sua passagem pelas aberturas. Partículas lamelares e alongadas são bons exemplos disto, pois possuem uma dimensão muito menor em uma determinada direção em relação às demais direções de orientação.

Algumas partículas com formas especiais, tais como alguns minerais placóides (ex.: micas), possuem eficiência de peneiramento muito baixa. Este tipo de partícula tende a ser “arrastada” sobre as aberturas, interrompendo a passagem de outras partículas, e migrando ao fluxo de *oversize*, mesmo tendo eventualmente alguma de suas dimensões menores do que a própria abertura.

✓ **Área aberta**

A chance de passagem através da abertura é diretamente proporcional à área aberta da tela instalada na peneira. A medida de área aberta é dada em percentual, e esta relação é definida como o somatório da área de todas as aberturas pela área total da superfície de peneiramento. Portanto, quanto menor a área ocupada pelos fios, bordas e estrutura da tela, maiores são as chances de passagem de partículas. No entanto, esta tendência deve ser limitada pela resistência mínima do material e *layout* da tela, conferindo a vida útil mínima necessária.

Devido à relação geométrica entre o diâmetro do fio e os lados das aberturas, a área aberta diminui com o afinamento da abertura. Para minimizar esta tendência, geralmente são utilizados fios cada vez mais finos, o que muitas vezes deixa a tela mais frágil. Esta fragilidade e a baixa capacidade associada a este tipo de serviço faz com que outros equipamentos de classificação (ciclones, classificadores em espiral, etc), substituam as peneiras quando há necessidade de separação muito fina, ou próxima da ordem de 0,15mm.

✓ **Condição dinâmica da peneira**

Mecanismos de vibração estão presentes na maioria dos projetos de peneiras. Sua principal função é de lançar as partículas através da superfície de peneiramento, fazendo com que cada partícula tenha a chance de se apresentar várias vezes à tela, e ao mesmo tempo, serem transportadas ao longo do deck. Outra função importante é a estratificação da camada de partículas sobre o deck (Figura 3.22), pela qual se permite formar um leito de partículas finas na parte inferior da camada de minério, em contato com a tela, e um leito superior de partículas grossas no topo da camada. A estratificação tende a aumentar a taxa de passagem de finos até o meio do deck da peneira (SOLDINGER, 1999 *apud* WILLS, 2006).

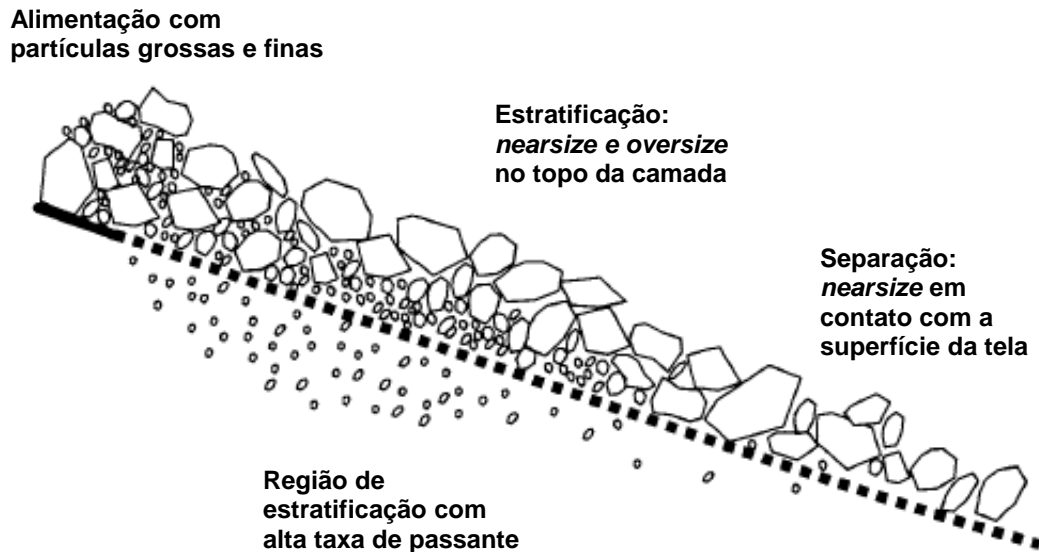


Figura 3.22. Modelo de estratificação de partículas sobre um deck de peneiramento (WILLS, 2006).

A vibração do equipamento também deve ser suficiente para prevenir entupimento e cegamento das malhas. No entanto, vibração com intensidade excessiva pode causar sobre lançamento de partículas dentro do próprio deck, e até saltos para fora do equipamento, em casos mais raros. Em ambos os casos, a eficiência é comprometida. Além disto, pode causar também danos à tela e esforços mecânicos excessivos. Nos casos de alta taxa de alimentação o peso e altura da camada sobre o deck pode gerar um efeito de “amortecimento”, inibindo grandes saltos de partículas (METSO MINERALS, 2005).

Intensidade de vibração baixa pode não ser suficiente para o transporte e segregação de todo o material, dependendo da carga sobre a peneira e características do material.

A condição dinâmica da peneira pode ser descrita pela frequência de vibração f dada em ciclos por segundo ou minuto, e amplitude α , geralmente em milímetros.

Mecanicamente existe uma combinação entre estes dois parâmetros, de forma que quanto maior a amplitude menor a frequência. Para peneiramento com maiores aberturas, maiores também tendem a serem os valores de amplitudes e vice e versa. As “peneiras de alta frequência” podem exemplificar este caso. As frequências

dimensionadas para este tipo de peneiramento são altas, em relação aos demais tipos (1000 a 6000rpm), o que traduz em menores amplitudes (0,5 a 2,5mm), para menores faixas de corte (<0,15mm).

A Tabela 3.3 apresenta uma relação entre frequências e amplitudes sugeridas para cada faixa de tamanho.

Tabela 3.3. Relação entre frequência, amplitude e tamanho de abertura recomendada por um fabricante de peneiras (CHAVES *et al.*, 2012).

Malha	101,6	76,2	50,8	25,4	12,7	6,35	2	1,41
Rotação (rpm)	800	850	900	950	1000	1400	1500	1600
Amplitude (mm)	6,5	5,5	4,5	3,5	3	2	1,5	1

Segundo Wills (2006) a intensidade de vibração pode ser definida pela força de vibração Γ :

$$\Gamma = \frac{\alpha(2\pi f)^2}{9,81} \quad \text{Equação 3.11}$$

Peneiras vibratórias geralmente operam com uma força Γ entre 3 a 7 vezes a força de aceleração gravitacional. A vibração é gerada a partir de excitadores mecânicos conduzidos por motores elétricos ou solenoides no caso de peneiras de alta frequência. A energia consumida é relativamente pequena em comparação a outros equipamentos de tratamento de minérios, e é também proporcional à carga sobre o equipamento.

✓ **Umidade**

A umidade na alimentação tem efeito marcante na eficiência do peneiramento. Materiais com alto teor de umidade, em peneiramento a umidade natural, tende a aglomerar partículas muito finas nos grãos maiores e ao mesmo tempo cegar as aberturas das telas, como no caso de argilas e outros materiais muito coesos.

Peneiramento em aberturas menores que 5mm, ou em torno disto, deve ser executado em estado “perfeitamente seco” ou na forma de polpa. A partir deste tamanho, o peneiramento a umidade natural pode ser realizado a menos que medidas especiais

sejam tomadas de forma a prevenir cegamento das telas. Estas medidas podem incluir: aplicação de secadores em etapa anterior às peneiras, tendo a função de quebrar a tensão superficial da água entre os fios da tela e as partículas; aplicação de “bolas batedoras”, que consiste numa caixa feita de fios de aço contendo diversas bolas de borracha, disposta logo abaixo da superfície de peneiramento. Com a vibração da peneira estas bolas são arremessadas para cima, impactando a parte debaixo do *deck* e desprendendo aquelas partículas responsáveis pelo cegamento das aberturas. Por último, aplicação de telas auto-limpantes também podem ser propostas para sanar problemas relacionados ao excesso de umidade.

Na impossibilidade de qualquer uma das medidas acima ou persistindo a baixa eficiência, o peneiramento a úmido seria a próxima possibilidade. O material em forma de polpa e com adição de água de *sprays* de alta pressão permite o peneiramento abaixo de 5,0mm de forma eficiente, lavando partículas ultrafinas que estão aderidas às partículas maiores, e aumentando a eficiência de passagem para o fluxo de *undersize*.

Chaves *et al.*, (2012) define o comportamento das partículas no processo de peneiramento sob dois pontos de vista: comportamento coletivo e comportamento individual. Alguns conceitos específicos de cada variável descrita acima podem ser complementados dentro destas duas definições. Os tópicos a seguir descrevem resumidamente estes dois comportamentos:

3.2.1. Comportamento coletivo

Os conceitos associados ao comportamento coletivo são presenciados nos processos de fluxo contínuo. Desta forma, são observadas três ações distintas e independentes da população de partículas submetidas ao peneiramento:

- 1) Transporte: a peneira deve oferecer a condição de transporte das partículas da região de alimentação até à descarga. Nas peneiras vibratórias, as partículas devem sofrer um impulso ao tocar as telas, de maneira que sejam arremessadas para frente de maneira “controlada”. Ou seja, deve-se evitar que as partículas sobrevoem várias telas ao mesmo tempo, para que não percam a chance de as atravessarem.

2) Estratificação: a peneira deve ter vibração e área suficiente para promover a estratificação entre partículas grossas e finas. Ou seja, é formado um leito de partículas grossas na parte superior e um leito de partículas finas na parte inferior, ficando mais próximas ou em contato direto com a superfície peneirante.

3) Peneiramento propriamente dito: consiste na passagem de partículas pelas aberturas da tela da peneira.

Para que as três condições acima sejam atendidas, tanto o equipamento quanto as características do sistema particulado devem ser igualmente capazes de: (a) garantir que toda a população de partículas flua sobre as telas instaladas no deck da peneira, a partir da região de alimentação do equipamento; (b) espaço suficiente para que o leito se acomode sobre o deck e (c) tempo suficiente para que as todas as partículas finas se apresentem às telas e tenham chance de serem peneiradas. A Figura 3.23 ilustra um modelo ideal dos fenômenos descritos.

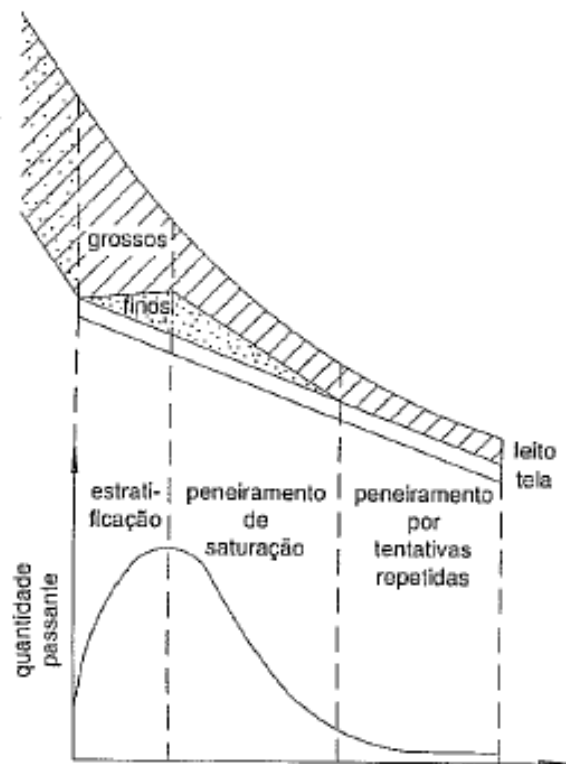


Figura 3.23. Comportamento coletivo de partículas (CHAVES *et al.*, 2012).

Observa-se também que o leito de finos formado logo abaixo do de grossos forma-se preponderantemente na primeira metade do deck. Logo que se finaliza a etapa da estratificação a altura deste leito diminui gradativamente até restar apenas partículas grossas (*oversize*) juntamente com aquelas partículas finas que não tiveram a chance de passar. Dentre estas partículas finas, existem aquelas que possuem tamanho muito próximo ao da abertura, conhecidas como *nearsized* (explicado com maior detalhe no tópico seguinte). As três situações podem ser encontradas: a primeira onde está ocorrendo a estratificação, a segunda, peneiramento de saturação, no qual todas as partículas já foram estratificadas e possuem grande chance de serem peneiradas e a terceira, peneiramento de baixa probabilidade, onde mesmo com o leito reduzido, parte das partículas finas, e principalmente as partículas *nearsized*, continuam à buscar chances de atravessarem as aberturas.

3.2.2. Comportamento individual

Os conceitos empregados do ponto de vista do tamanho individual de cada partícula se baseiam na comparação entre o tamanho da partícula, definido a partir de seu diâmetro equivalente d e a abertura a da tela. Os comportamentos abaixo podem ser descritos a partir destes conceitos e observados na Figura 3.24.

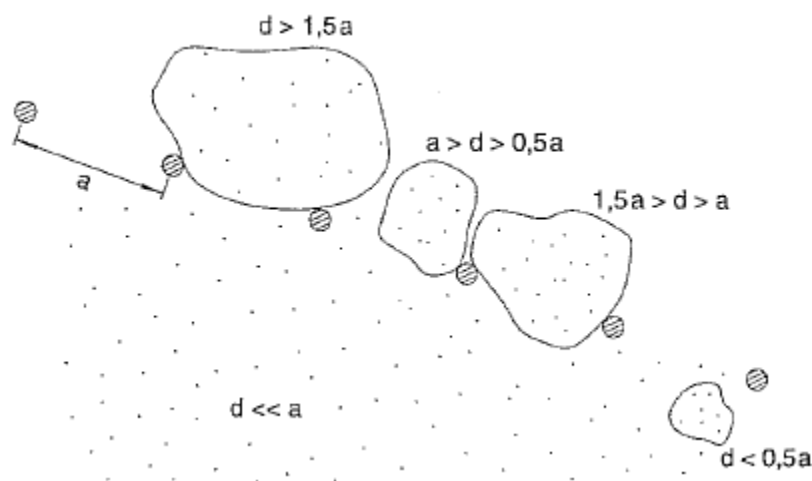


Figura 3.24. Comportamento individual das partículas (CHAVES *et al.*, 2012).

✓ $d > 1,5a$ (tamanho da partícula é maior do que a abertura): Partículas que não acarretam nenhum tipo de problema para o desempenho do peneiramento. No entanto podem causar problemas operacionais se há grande proporção desta faixa na população que alimenta a peneira. Devido ao seu peso, as telas podem não suportar a carga total, podendo se abaular ou até se romper. Caso isto ocorra, podem-se desenvolver telas mais reforçadas ou até mesmo se instalar deck de alívio na peneira.

✓ $1,5a > d > a$ (tamanho da partícula “ligeiramente” maior do que a abertura): Partículas que possuem tamanho muito próximo da abertura podem atingir várias vezes as telas e assim haver consecutivas tentativas de passagem pelas aberturas. Como possuem diâmetro médio maior do que a abertura, dependendo de como se dispõem, podem entupir as aberturas da tela, acarretando desta forma perda de eficiência e produtividade da peneira. As maneiras de se coibir este efeito são as telas auto-limpantes, alternância do formato das aberturas ou ainda alteração da condição dinâmica da peneira (amplitude, frequência e aceleração).

✓ $a > d > 0,5a$ (tamanho da partícula “ligeiramente” menor do que a abertura): Partículas abaixo e muito próximas do tamanho da abertura são consideradas críticas ao processo de peneiramento. Conforme citado no tópico anterior, estas partículas são chamadas *nearsized*. Para que haja a passagem de partículas *nearsized* através das aberturas é necessário que o processo ofereça várias chances para que isto ocorra, e mesmo que aconteça ainda há o risco das partículas se prenderem nas próprias aberturas, impactando, na eficiência e na capacidade do peneiramento. Os meios de mitigação podem ser considerados os mesmos que os da faixa anterior.

✓ $d < 0,5a$ (tamanho da partícula menor do que a abertura): Faixa de tamanho de partícula que atravessam com facilidade a abertura da tela sem impactar no desempenho do processo.

✓ $d \ll 0,5a$ (tamanho da partícula muito menor do que a abertura): Partículas muito finas, por vezes, denominadas de “ultrafinos”, podem aderir à superfície de partículas maiores devido à elevada área superficial, maior umidade aderida, e maior efeito da

atração eletrostática. Este tipo de partícula, caso não seja tomada nenhuma ação de mitigação, pode se dividir igualmente entre os fluxos de *oversize* e *undersize*. Quando sua proporção atinge níveis consideráveis, a ponto de interferir na qualidade do processo, se faz necessário utilizar água no peneiramento, para que as partículas mais grossas sejam lavadas e os ultrafinos se desprendam e passem através das aberturas.

3.2.3. Indicadores de desempenho do peneiramento

A eficiência de peneiramento é determinada pelo “grau de perfeição” de separação do material em relação à fração granulométrica acima ou abaixo do tamanho da abertura (WILLS, 2006).

Não há um único método aplicado universalmente para se medir o desempenho de processos de peneiramento. Independente do método, o critério mais comum é aquele que define a eficiência de peneiramento baseado na recuperação do material em uma determinada faixa de tamanho, ou na quantificação de material que se dirigiu para algum produto fora de sua faixa de tamanho. Tal situação é mais comumente encontrada na migração de finos para o fluxo de *oversize* da peneira, em segundo plano, grossos no fluxo de *undersize*, ou até mesmo a combinação destas duas situações.

Wills (2006) calcula a eficiência de peneiramento com base no fechamento de balanço de massas, considerando a partição de massa em um deck, conforme modelo esquemático apresentado na Figura 3.25.

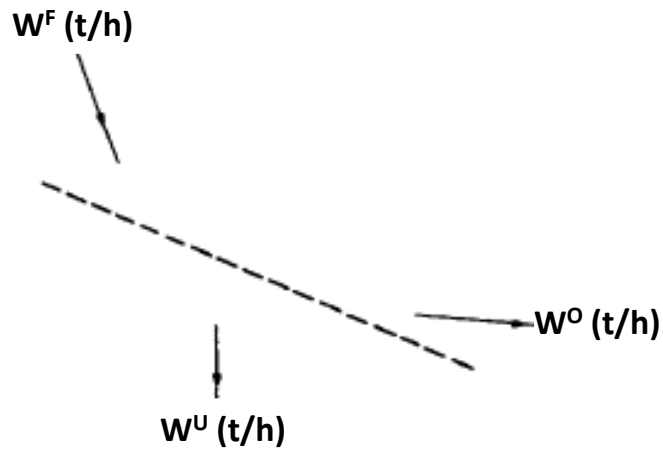


Figura 3.25. Balanço de massas de uma peneira (adaptado de WILLS, 2006).

Onde:

- ✓ W^F = Vazão mássica de alimentação (t/h).
- ✓ W^O = Vazão mássica de *oversize* (t/h).
- ✓ W^U = Vazão mássica de *undersize* (t/h).

Desta forma o balanço de massas torna-se o seguinte:

$$W^F = W^O + W^U \quad \text{Equação 3.12}$$

Considerando as frações granulométricas específicas para cada fluxo:

- ✓ $\dot{p}^F(a)$ = Fração do material acima do tamanho de corte a na alimentação (%).
- ✓ $\dot{p}^O(a)$ = Fração do material acima do tamanho de corte a no *oversize* (%).
- ✓ $\dot{p}^U(a)$ = Fração do material acima do tamanho de corte a no *undersize* (%).

O balanço de massa das frações acima do tamanho de corte é:

$$W^F \dot{p}^F(a) = W^O \dot{p}^O(a) + W^U \dot{p}^U(a) \quad \text{Equação 3.13}$$

O balanço de massa para as frações abaixo do tamanho de corte é:

$$W^F(1 - \dot{p}^F(a)) = W^O(1 - \dot{p}^O(a)) + W^U(1 - \dot{p}^U(a)) \quad \text{Equação 3.14}$$

Assim, combinando as Equações 3.12 e 3.13, a partição de massa para o fluxo de *oversize* pode ser dada pela seguinte equação:

$$\frac{W^O}{W^F} = \frac{\dot{p}^F(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a})}{\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a})} \quad \text{Equação 3.15}$$

E para o *undersize*, combinando as Equações 3.13 e 3.14, pode-se calcular a partição de massa para este fluxo da seguinte maneira:

$$\frac{W^U}{W^F} = \frac{\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^F(\mathbf{a})}{\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a})} \quad \text{Equação 3.16}$$

A recuperação no fluxo de *oversize*:

$$\frac{W^O \dot{p}^O(\mathbf{a})}{W^F \dot{p}^F(\mathbf{a})} = \frac{\dot{p}^O(\mathbf{a})x(\dot{p}^F(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a}))}{\dot{p}^F(\mathbf{a})x(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a}))} \quad \text{Equação 3.17}$$

A recuperação de material passante no fluxo de *undersize*:

$$\frac{W^U \dot{p}^U(\mathbf{a})}{W^F \dot{p}^F(\mathbf{a})} = \frac{W^U x(1 - \dot{p}^U(\mathbf{a}))}{W^F x(1 - \dot{p}^F(\mathbf{a}))} = \frac{(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^F(\mathbf{a}))x(1 - \dot{p}^U(\mathbf{a}))}{(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a}))x(1 - \dot{p}^F(\mathbf{a}))} \quad \text{Equação 3.18}$$

Estas duas últimas relações (Equações 3.17 e Equações 3.18) quantificam, portanto, a eficiência da peneira na separação dos grossos para o fluxo de *oversize* e finos para o fluxo de *undersize*.

Uma combinação entre elas resulta na equação de “eficiência global”:

$$E = \frac{\dot{p}^O(\mathbf{a})x(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^F(\mathbf{a}))x(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^F(\mathbf{a}))x(1 - \dot{p}^U(\mathbf{a}))}{\dot{p}^F(\mathbf{a})x(\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^U(\mathbf{a}))^2x(1 - \dot{p}^F(\mathbf{a}))} \quad \text{Equação 3.19}$$

A experiência prática indica que nas condições em que o tamanho da abertura é próximo ao tamanho de corte, e quando nenhuma tela apresenta grandes deformações ou ruptura, a quantidade de partículas grossas no fluxo de *undersize* é normalmente muito baixa.

Desta maneira, a Equação 3.19 pode ser simplificada considerando $\dot{p}^U=0$. A fórmula passa então a considerar recuperação de finos a partir da equação de eficiência global:

$$E = \frac{\dot{p}^O(\mathbf{a}) - \dot{p}^F(\mathbf{a})}{\dot{p}^O(\mathbf{a})x(1 - \dot{p}^F(\mathbf{a}))} \quad \text{Equação 3.20}$$

Esta relação considera também 100% de recuperação de partículas grossas para o fluxo de *oversize*.

Outra relação que carrega a mesma consideração anterior e é vastamente utilizada no controle da eficiência de peneiramento nas rotinas operacionais, devido à sua simplicidade e praticidade, foi descrita por Valadão *et al.*, (2012):

$$E^U = \frac{W^U_{(real)}}{W^U_{(teórico)}} \quad \text{Equação 3.21}$$

Onde:

- E^U : Eficiência de peneiramento passante (%).
- $W^U_{(real)}$: Vazão mássica de passante real (t/h).
- $W^U_{(teórico)}$: Vazão mássica passante teórico (t/h) – Calculada a partir da massa de alimentação e fração passante na abertura da tela, presente na alimentação ($W^U_{(teórico)} = W^F \times p^F$).

A Equação 3.21 calcula a eficiência de peneiramento de material passante (E^U), levando em consideração, portanto, apenas a distribuição das partículas finas entre os fluxos retido e passante. Uma alternativa para se calcular a eficiência de peneiramento com vistas à fração de grossos, também é apresentado por Valadão *et al.*, (2012) na Equação 3.22.

$$E^O = \frac{W^O_{(teórico)}}{W^O_{(real)}} \quad \text{Equação 3.22}$$

Onde:

- E^O (%): Eficiência de peneiramento retido.
- $W^O_{(teórico)}$: Vazão mássica de retido teórico (t/h) – Calculada a partir da massa de alimentação e fração retida na abertura da tela, presente na alimentação ($W^O_{(teórico)} = W^F \times \dot{p}^F$).
- $W^O_{(real)}$: Vazão mássica de retida real (t/h).

Segundo Luz *et al.*, (2010), industrialmente, a eficiência de peneiramento situa-se entre 80% a 90%, atingindo-se em alguns casos 95% (calculada neste caso conforme Equação 3.21). No entanto, vale ressaltar, que valores de eficiência podem variar drasticamente em função das interferências de uma ou mais variáveis descritas no tópico anterior: tamanho de partícula, taxa de alimentação, ângulo da peneira, forma da partícula, área aberta, condição dinâmica da peneira, umidade, dentre outras.

A curva de partição é outra maneira de se avaliar o resultado da eficiência de um peneiramento, ou de qualquer outro processo de classificação. É definida como a relação entre partículas grossas, e o percentual destas mesmas partículas na alimentação, que migram para o fluxo de *oversize*. Geralmente representada por um gráfico cujas variáveis são: coeficiente de partição (eixo das ordenadas) e tamanho médio geométrico de partícula (eixo das abcissas). A Figura 3.26 apresenta um exemplo de curva de partição.

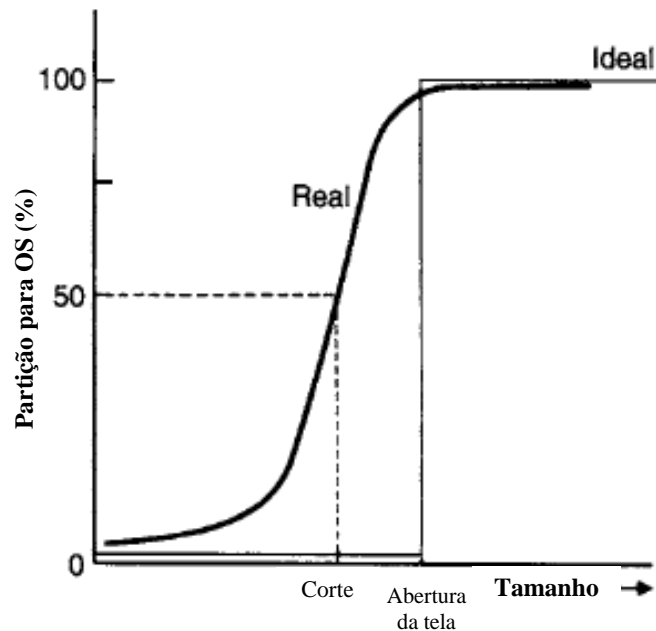


Figura 3.26. Modelo de curva de partição (modificado de WILLS, 2006).

Algumas definições podem ser retiradas da curva de partição. Observa-se duas curvas: ideal e real. A curva ideal é aquela que representa uma separação perfeita entre a faixa de tamanho das partículas, ou seja, 100% das partículas que estão acima do tamanho da abertura da tela migram para *oversize*, enquanto 100% das partículas abaixo do corte migram para *undersize*. A curva real, como o próprio nome sugere, descreve uma situação mais “factível”, uma vez que nenhum processo, por mais otimizado que seja, atinge 100% de eficiência. Desta forma, observa-se que certa proporção de partículas grossas presente na alimentação migra para o fluxo *undersize*, enquanto razoável proporção de partículas finas na alimentação migra para *oversize*. Por consequência, o tamanho de corte (*cut point*), ou d_{50} , pode ser definido como o tamanho médio de partícula que possui 50% de chances de ser direcionada tanto ao fluxo *undersize* quanto ao fluxo de *oversize* e é sempre menor que o tamanho real da abertura da tela. Esta análise de eficiência pode ser baseada na inclinação da curva e medida a partir das equações propostas por Kelsall (1953) e Flintoff *et al.*, (1987), principalmente no dimensionamento de equipamentos de classificação. Sua aplicação também está associada a diversos modelos de dimensionamento e simuladores de peneiras (FERRARA e PRETI, 1975; LYNCH and NARAYANAN, 1986; NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

3.3. Peneiramento de laboratório

A diferença fundamental entre o peneiramento industrial e o de laboratório está na finalidade, e conseqüentemente na escala dos equipamentos. Peneiramento industrial é uma operação unitária de beneficiamento de minérios associado diretamente à produção e posterior comercialização de produtos minerais. Portanto, realizado normalmente em grande escala, em relação ao peneiramento de laboratório. Peneiramento de laboratório tem como principal finalidade fornecer informações capazes de auxiliar no controle e nas tomadas de decisão do processo industrial. Vale ressaltar que o peneiramento de laboratório pode ainda ser separado e definido em duas escalas distintas: bancada e piloto. O peneiramento de bancada é o de menor escala (em relação ao volume de amostras e dimensão dos equipamentos, por exemplo), e é normalmente operado em batelada, ou seja, a amostra é quantificada de forma discreta e deve ser bem definida antes de cada ensaio. O peneiramento piloto pode ser considerado como uma escala reduzida do processo industrial, tanto do ponto de vista do volume de material processado, quanto em relação à dimensão dos equipamentos, e operado em fluxos contínuos. Por se tratar de um processo que representa de forma reduzida, porém mais fiel, a escala industrial, é geralmente preferido no dimensionamento de peneiras industriais e nas etapas conceituais dos projetos de plantas de beneficiamento. Vale notar, no entanto, que para execução de testes na escala piloto é necessário, normalmente, um grande volume de amostra, muitas vezes superior à ordem de toneladas. Por conseguinte, isto também representa um maior esforço na etapa de coleta, manuseio e preparação das amostras.

O controle de granulometria na indústria mineral é desde o início realizado através de ensaios de peneiramento em bancada. Atualmente, praticamente toda empresa produtora de bens minerais possui laboratórios para a realização destes ensaios. O método mais tradicional e conhecido globalmente é a “análise granulométrica”.

Nos tópicos seguintes estão descritos alguns conceitos clássicos aplicados aos ensaios de análise granulométrica, principais referências normativas, bem como os principais tipos de equipamentos utilizados.

3.3.1. Análise granulométrica

Segundo Valadão *et al.*, (2012), a análise granulométrica é um estágio “básico e obrigatório” de qualquer estudo de caracterização mineral. Consiste no peneiramento de massa conhecida, através de uma série de peneiras instaladas segundo certo padrão. As massas retidas em cada peneira são pesadas e seus valores registrados em tabela juntamente com as malhas de peneiramento. O resultado pode ser expresso através de curvas de distribuição granulométrica, que será detalhada adiante.

Dentre as finalidades e importância da análise granulométrica, pode-se citar algumas aplicações:

- ✓ Controle de produção de finos nos processos de cominuição.
- ✓ Etapa preliminar para estabelecimento do grau de liberação em intervalos de tamanhos bem definidos.
- ✓ Controle de especificações de mercado.
- ✓ Distribuição de elementos (química e mineralogia) por faixa granulométrica.
- ✓ Avaliação da eficiência (desempenho) de equipamentos ou processos de separação por tamanho, ou de outras operações unitárias de beneficiamento.

Além do peneiramento outros dois métodos também são eventualmente utilizados: (1) Centrifugação: Utilizada para separação de partículas menores que as aplicadas no peneiramento. Emprega-se principalmente a força centrífuga, a partir de um conjunto de cinco ciclones de laboratório, ao que se denomina de *cyclosizer*. É considerada uma técnica de sub-peneiramento. (2) Sedimentação: Baseia-se na relação da velocidade de sedimentação e o tamanho da partícula. Relações entre estas variáveis podem ser definidas pela lei de *Stokes*.

O fundamento do processo de peneiramento na análise granulométrica é muito semelhante a qualquer outro tipo de peneiramento em maiores escalas. A partir da

vibração do peneirador (onde é instalada a série de peneiras), a camada de partículas passa pelo processo de estratificação do leito, quando ocorre a separação dos finos na parte de baixo da camada e a de grossos na parte de cima. Em seguida ocorre a passagem das partículas finas gradativamente pelas aberturas das peneiras, ficando retidas à medida que se tornam maiores que as aberturas.

Embora fatores como forma e densidade das partículas sejam muito significativos nos resultados do processo, o tamanho da partícula é o fator predominante na separação por tamanho. Em geral o peneiramento, nas operações de laboratório, de material fino, pode chegar até 10 μ m (VALIRE e WENNEN, 1980), embora a maioria dos fabricantes ainda trabalhe com a abertura mínima de 37 μ m.

Assim como ocorre nos processos industriais, o peneiramento de laboratório pode ser executado tanto a seco quanto a úmido. Geralmente quanto mais fino e mais “coeso” (característica que pode ser intensificada pela presença de lamas e argilas) é o material a ser peneirado, mais indicado é o peneiramento a úmido. Desta forma, as partículas grossas com finos agregados em sua superfície são literalmente lavadas, de maneira que as partículas menores do que a abertura da tela sejam transportadas pelo fluido tornando-se material passante na peneira.

O resultado de uma análise granulométrica geralmente é expresso a partir do percentual passante ou percentual retido acumulado. São utilizadas tabelas, como a do modelo apresentado na Tabela 3.4, que apresenta a distribuição granulométrica de uma amostra típica de minério de ferro (SALES *et al.*, 2011).

Tabela 3.4. Exemplo de tabela utilizada em uma análise granulométrica (SALES *et al.*, 2011).

Abertura (mm)	Peso (g)	Retido Simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
8,0	0,0	0,0	0,0	100,0
6,3	17,6	1,8	1,8	98,2
4,0	56,6	5,8	7,6	92,4
2,0	78,1	8,0	15,6	84,4
1,0	47,8	4,9	20,5	79,5
0,5	51,7	5,3	25,8	74,2
0,25	91,7	9,4	35,2	64,8
0,15	117,1	12	47,2	52,8
-0,15	515,3	52,8	100,0	0,0
TOTAL	976,02	100,0		

Para facilitar a análise de uma distribuição granulométrica normalmente os valores obtidos são plotados em um gráfico de dispersão. A Figura 3.27 apresenta a curva gerada: Passante (%) x Abertura (mm).

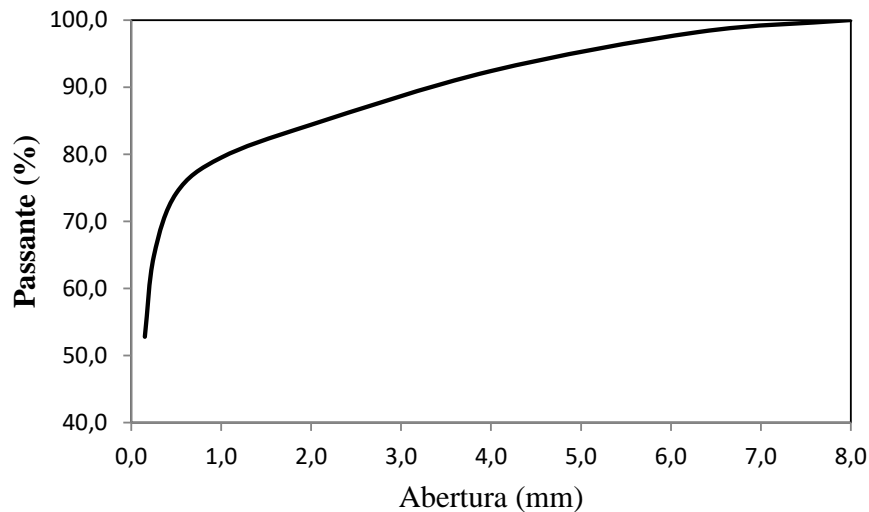


Figura 3.27. Curva de distribuição granulométrica - Passante (%) x Abertura (mm) (modificado de SALES *et al.*, 2011).

Muitas informações podem ser retiradas da análise de uma curva de distribuição granulométrica. Isto vai depender do objetivo de cada análise, das normas e especificações de cada material ou da especificação dos controles nas usinas de beneficiamento.

Numa curva de distribuição granulométrica a abertura a corresponde ao “diâmetro médio equivalente” da partícula d , que é a abertura da malha da tela de referência, e permite passar determinada quantidade de massa de material representada em percentual.

É comum se observar em algumas análises de processo, notações e definições sobre o tamanho de partícula aplicado para casos específicos. Por exemplo, as notações d_{95} e d_{80} se referem, respectivamente, às aberturas em que se passa 95% e 80% da amostra analisada. Por definição estes são considerados os “maiores” tamanhos de um determinado material, ou o seu *top size*. Estes parâmetros são largamente utilizados nos controles e análises de operações de peneiramento, britagem, moagem, etc. Existe ainda acadêmicos e profissionais que preferem atribuir ao *top size* do material a notação “ d_{100} ”, ou seja, a menor abertura na qual o material é 100% passante.

Outra definição bastante empregada no contexto de peneiramento e classificação é o d_{50} . Conforme descrito no tópico “Indicadores de desempenho de peneiramento”, a notação d_{50} é na maioria dos casos utilizada para se designar o tamanho de corte (*cut point*) de uma operação de separação. Portanto, pode ser extraído de uma *curva de partição* e não da curva de distribuição granulométrica. São conceitos absolutamente distintos. Em outros casos o d_{50} pode ser tratado como o “tamanho médio” de uma determinada distribuição granulométrica de partículas, no qual 50% da amostra está abaixo e 50% acima deste tamanho. Neste último caso este parâmetro deve ser extraído necessariamente de uma curva de distribuição granulométrica. Deve-se, portanto, ter bastante atenção na aplicação desta notação, uma vez que se podem tomar decisões diferentes dependendo do contexto proposto.

Em Chaves *et al.*, (2012), também se pode encontrar outras aplicações. No dimensionamento de bombas de polpa, por exemplo, se faz necessário considerar a distribuição granulométrica do material, que pode influenciar a eficiência de bombeamento. Para tanto, Caputo (1988) estabeleceu o critério para definir se um material possui distribuição granulométrica “uniforme” ou “não uniforme”. Este critério é representado pelo coeficiente de uniformidade C_u , definido conforme equação:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Equação 3.23}$$

Onde:

- d_{60} = diâmetro médio equivalente em que se passa 60% da amostra analisada (Passante = 60%).
- d_{10} = diâmetro médio equivalente que se passa 10% da amostra analisada (Passante = 10%).

Os intervalos dos valores obtidos neste caso são interpretados como:

- Se $C_u < 5$, a amostra é muito uniforme.
- Se $5 \leq C_u < 15$, a amostra é uniforme.
- Se $C_u \geq 15$, a amostra é não uniforme.

3.3.2. Procedimentos e normalização de ensaios de análise granulométrica por peneiramento

Os métodos de análise de tamanho de partículas devem ser exatos e confiáveis, uma vez que alterações significativas nos resultados de plantas de beneficiamento são investigadas a partir de procedimentos de laboratório, conforme descreve Wills (2006). Este mesmo raciocínio vale para o desenvolvimento de novos projetos.

Existem diversos procedimentos normativos que são utilizados na padronização de análises granulométrica aplicadas a diversos materiais. Toda norma e procedimento tem como fundamento principal a definição da “série” de peneiras a ser utilizada.

Séries de peneiras estabelecem configurações nas quais as aberturas ficam dispostas numa ordem lógica e padronizada.

A principal e a mais conhecida é a série *Tyler*. Foi o primeiro padrão utilizado para se definir uma sequência de peneiras em análise de materiais particulados. Ela foi criada pelos matemáticos von P.R. e pelo professor alemão von Rittinger's em 1867. Os

primeiros testes usando esta série datam de 1910. Em 1913 foi adotado pela *American Society for Testing Materials*, e desde então é a série mais aceita pelos fabricantes de peneiras (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Nesta configuração a tela padrão possui abertura de 74 μ m, correspondente a 200 malhas (ou 200 *mesh*). Malhas ou *mesh* é a quantidade de aberturas por polegada linear na direção paralela a um dos fios da tela. A série é obtida com o uso do fator $\sqrt{2}$ aplicado à abertura padrão, segundo uma progressão geométrica. A Tabela 3.5 apresenta a tabela padrão *Tyler*, com as respectivas malhas e disposição das aberturas de cada tela, bem como apresentação das unidades em polegadas, milímetros e *mesh*.

Tabela 3.5. Série *Tyler* de peneiras para análise granulométrica (TRANSPORTE DE GRANÉIS, 2017).

Abertura (mesh)	Abertura (pol)	Abertura (mm)	Abertura (mesh)	Abertura (pol)	Abertura (mm)
1	1,00	25,40	18	0,0394	1,000
0,875	0,875	22,60	20	0,0331	0,841
0,750	0,750	19,00	25	0,0278	0,707
0,625	0,625	16,00	30	0,0234	0,595
0,530	0,530	13,50	35	0,0197	0,500
0,500	0,500	12,70	40	0,0165	0,420
0,438	0,438	11,20	45	0,0139	0,354
0,375	0,375	9,51	50	0,0117	0,297
0,313	0,312	8,00	60	0,0098	0,250
0,265	0,265	6,73	70	0,0083	0,210
0,250	0,250	6,35	80	0,0070	0,177
3,500	0,223	5,66	100	0,0059	0,149
4	0,187	4,76	120	0,0049	0,125
5	0,157	4,00	140	0,0041	0,105
6	0,132	3,36	170	0,0035	0,088
7	0,111	2,83	200	0,0029	0,074
8	0,0937	2,38	230	0,0025	0,063
10	0,0787	2,00	270	0,0021	0,053
12	0,0661	1,68	325	0,0017	0,044
14	0,0555	1,41	400	0,0015	0,037
16	0,0469	1,19			

Na prática também se encontram outras séries, difundidas em função do contexto e período em que se aplicam. A Tabela 3.6 apresenta um quadro comparativo das séries americanas ASTM / ASA / USS e da norma brasileira ABTN-NBR NM-ISO 3310-1:2010, juntamente à série *Tyler*.

Tabela 3.6. Séries *Tyler*, ASTM / ASA / USS e ABNT-NBR NM-ISO 3310-1:2010
(CHAVES *et al.*, 2012).

Malha (mm)	Tyler (mesh)	ASTM/ASA/USS (Pol)	ABNT-NBR NM-ISSO 3310-1:2010 (mm)
101,6		4	
88,9		3 1/2	
76,2		3	76,0
63,5		2 1/2	
50,8		2	50,0
44,4		1 3/4	
38,1		1 1/2	38,0
31,7		1 1/4	
25,4		1	25,0
19,1		3/4	19,0
15,9		5/8	
12,7		1/2	
9,52		3/8	9,50
7,93		1/3	
6,35		1/4	
5,66	3,5	3 1/2	
4,76	4	4	4,80
4,00	5	5	
3,36	6	6	
2,83	7	7	
2,38	8	8	2,40
2,00	9	10	2,00
1,68	10	12	
1,41	12	14	
1,19	14	16	1,20
1,00	16	18	
0,84	20	20	
0,71	24	25	
0,59	28	30	0,60
0,50	32	35	
0,42	35	40	0,42
0,350	42	45	
0,297	48	50	0,300
0,250	60	60	
0,210	65	70	
0,177	80	80	
0,149	100	100	0,150
0,125	115	120	
0,105	150	140	
0,088	170	170	
0,074	200	200	0,075
0,062	250	230	
0,053	270	270	
0,044	325	325	
0,037	400	400	

A Tabela 3.7 apresenta a série R20, da norma técnica ABNT NBR NM-ISO 565:1997, aplicada principalmente para minério de ferro.

Tabela 3.7. Série R20 para composição granulométrica de amostras de minério de ferro (ABNT NBR NM-ISO 565:1997).

Malha (mm)		Malha (μm)	
125,0	8,00	900	56
112,0	7,10	800	50
100,0	6,30	710	45
90,0	5,80	630	40
80,0	5,00	560	36
71,0	4,50	500	
63,0	4,00	450	
56,0	3,55	400	
50,0	3,15	355	
45,0	2,80	315	
40,0	2,50	280	
35,0	2,24	250	
31,5	2,00	224	
28,0	1,80	200	
25,0	1,60	180	
22,4	1,40	160	
20,0	1,25	150	
18,0	1,12	125	
16,0	1,00	112	
14,0		100	
12,5		90	
11,2		80	
10,0		71	
9,0		63	

Além da série de peneiras, alguns outros aspectos devem ser considerados em qualquer procedimento de peneiramento. Dentre os diversos parâmetros que afetam a confiabilidade da análise, pode-se citar principalmente: massa de amostra do ensaio, o tempo de peneiramento e a precisão requerida do ensaio. Além destes, a forma como será conduzido o ensaio também influencia fortemente nos resultados esperados: peneiramento a seco, a úmido ou a combinação entre estas duas formas (úmido / seco).

Seguem alguns pontos mais relevantes que envolvem estes aspectos.

➤ **Tipos de ensaio – a seco, a úmido e combinado**

A rigor, ensaios a seco se aplicam principalmente a minérios de granulometria grossa e com pouca presença de finos. A umidade é um dos fatores que mais podem influenciar na qualidade e precisão deste tipo de ensaio, uma vez que partículas finas e úmidas tendem a se aglomerar e aderir à superfície das partículas mais grossas, dificultando a passagem individual pelas aberturas das peneiras. Portanto, antes do teste, é bastante recomendado secar a amostra em estufa ou chapa térmica. Este tipo de ensaio pode ser realizado tanto de forma manual quanto em peneiradores vibratórios, dispondo-se toda a série de peneiras de uma única vez, como ilustrado na Figura 3.28.



(a)



(b)

Figura 3.28. (a) Série de peneiras instaladas em peneirador vibratório; (b) peneira encaixada em fundo cego para peneiramento manual (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Caso a amostra apresente características que impossibilitem o procedimento via ensaio a seco, opta-se pelo ensaio a úmido. Neste ensaio, utiliza-se normalmente um peneirador vibratório com as peneiras instaladas em série, cujo fundo possui uma abertura para a passagem da fração passante mais fina, que é o fluxo que possui a maior quantidade de água, conforme exemplificado pela Figura 3.29.



Figura 3.29. Peneiramento a úmido em escala de laboratório (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Em alguns casos específicos, quando a quantidade de argilominerais é crítica, ou até mesmo em minérios como o caulim, antes de se realizar a alimentação da amostra no peneirador, o material é disperso, seguindo procedimentos padrões de dispersão, triturando a polpa e eventualmente utilizando-se dispersantes, como o silicato de sódio Na_2SiO_3 ou o hexametasilicato de sódio $\text{Na}_2(\text{Na}_2\text{SiO}_3)_6$.

Um aspecto de avaliação característico do ensaio a úmido é a condição de encerramento do peneiramento. Independente do tempo de peneiramento avalia-se o aspecto visual da água coletada na saída, e quando esta está tão limpa quanto à água nova adicionada na alimentação, e ao mesmo tempo, quando não se nota mais a presença de partículas de minério na fração passante, o ensaio pode ser encerrado.

Outra característica exclusiva do ensaio a úmido é que todas as frações retidas, após o término do peneiramento, devem ser secas em chapa térmica ou em estufa com temperaturas entre 105°C a 150°C . No caso da fração mais fina, em forma de polpa, é necessário promover a filtragem e na sequência a secagem. Com as amostras completamente secas é realizada a pesagem de cada fração para o cálculo da distribuição granulométrica.

A terceira forma de se conduzir ensaios de análise granulométrica é através da combinação entre os dois ensaios citados, seco e úmido. Quando se nota a presença de grande quantidade de partículas aglomeradas, devido à tensão superficial resultante da umidade ou da atração eletrostática, uma alternativa é iniciar o peneiramento (com ou sem dispersão prévia), lavando toda a amostra disposta sobre uma peneira de abertura de 37 μ m. Caso seja necessário, podem-se utilizar peneiras de alívio para proteger a peneira de 37 μ m de possíveis danos devido ao excesso de carga. Finalmente, o material passante é filtrado, secado e por último, pesado. Quanto à fração retida é realizada a secagem e posteriormente o peneiramento a seco, conforme a metodologia clássica.

➤ **Massa mínima de amostra de ensaios de peneiramento**

A massa utilizada no ensaio deve ser a mínima capaz de garantir a representatividade da análise e grande o suficiente para não comprometer a eficiência do peneiramento. A definição da massa ótima de trabalho está diretamente associada à capacidade do equipamento, granulometria, composição mineralógica, umidade, densidade, forma das partículas, etc. De forma genérica, para frações finas (naturais ou moídas), a quantidade varia até no máximo 1,0kg (LUZ *et al.*, 2010). Para frações grossas a massa mínima de ensaio ultrapassa a massa de 1,0kg. A norma brasileira ABNT NBR NM 248:2003 – Determinação granulométrica de agregados – estabelece a massa mínima para seu ensaio padrão, utilizando-se peneiras redondas de 200mm de diâmetro (Tabela 3.8):

Tabela 3.8. Massa mínima por amostra de ensaio (ABNT NBR NM 248:2003).

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
<4,8	0,5
6,3	3
>9,5 e <25	5
> 32 e <38	10
50	20
> 64 e < 76	30

A definição da massa mínima pode variar para cada material em função de suas características. Observa-se, por exemplo, na norma ABNT NBR 6457:2016, para

análise granulométrica de solos, diferenças em relação à norma de agregados, tanto nas faixas de referência, quanto nos valores das massas (Tabela 3.9).

Tabela 3.9. Massa mínima de amostra para análise granulométrica de solos – Peneiras redondas de 200mm de diâmetro (ABNT NBR 6457:2016).

Dimensões dos grãos maiores contidos na amostra, determinada por observação visual (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
<5	1
5 a 25	4
>25	8

Outro exemplo normativo bastante aplicado em laboratórios de empresas de mineração brasileiras é a ABNT NBR ISO 4701:2014 – Distribuição granulométrica por peneiramento de minério de ferro. Nesta norma a definição da massa mínima é calculada pela Equação 3.24, que depende de outros parâmetros relacionados às características da amostra, tratamento estatístico e à precisão requerida, apresentados no Anexo A deste trabalho.

$$w_{min}^{lab} = \frac{\mathcal{E}}{\beta_{PM^2}} \times \frac{\rho_B}{5000} \quad \text{Equação 3.24}$$

Onde,

- w_{min}^{lab} : massa mínima a ser peneirada (kg).
- β_{PM^2} : precisão requerida da preparação da amostra e medida (%).
- ρ_B : massa específica aparente das partículas de minério de ferro (kg/m³).
- \mathcal{E} : constante relacionada a características do minério.

De forma geral, independente do método ou da norma, deve-se sempre controlar a quantidade de massa em cada análise, de modo a evitar que partículas finas fiquem retidas sobre partículas grossas comprometendo a eficiência do peneiramento. A metodologia adequada e a experiência do técnico responsável são fundamentais para se garantir uma análise confiável.

➤ **Massa máxima de amostra de ensaios de peneiramento**

Assim como há diversos critérios para definição das massas mínimas utilizadas nos ensaios de análise granulométrica, Gaudin (1939) também propôs um critério para definição das massas máximas que devem ficar retidas em cada peneira no final dos ensaios (Equação 3.25).

$$W_{max}^{lab} = \frac{(a_i^{lab} + a_s^{lab})}{2} \chi A^{lab} \chi \eta \chi \rho_B \quad \text{Equação 3.25}$$

Onde,

- W_{max}^{lab} : massa de material que poderia ficar retida em uma peneira, cessando o peneiramento [g].
- a_i^{lab} : abertura da peneira inferior [cm].
- a_s^{lab} : abertura da peneira superior. No caso da série Tyler: $a_i^{lab} \times \sqrt{2}$ [cm].
- ρ_B : densidade aparente do minério [g/cm³].
- A^{lab} : área da peneira [cm²].
- η : número de camadas de partículas [de 1 a 3].

Nota-se que o resultado expresso nesta equação é o valor da massa sobre a peneira de área A^{lab} , de densidade aparente ρ_B , cuja altura de camada final t_B do material deve estar compreendida dentro do intervalo equivalente de 1 a 3 vezes o diâmetro médio das partículas presente em cada fração granulométrica.

A norma para minério de ferro ABNT NBR ISO 4701:2014 também estabelece a massa máxima que deve ficar retida em cada peneira no final do ensaio. Para aberturas maiores do que 22,4mm a Equação 3.26 deve ser utilizada:

$$w_{max}^{lab} = (0,005 + 0,0004a) \rho_B A^{lab} \quad \text{Equação 3.26}$$

Onde:

- w_{max}^{lab} : massa máxima a ser retida na peneira [kg];
- a : abertura da peneira [mm];
- ρ_B : massa específica aparente do minério de ferro [kg/m³];
- A^{lab} : área da peneira [m²].

Enquanto que para aberturas menores do que 22,4mm e maiores ou iguais a 500µm utiliza-se a Equação 3.27:

$$w_{max}^{lab} = 0,0007a\rho_B A^{lab} \quad \text{Equação 3.27}$$

Esta equação somente é aplicável se a área aberta da peneira for maior do que 40%. Para áreas abertas menores do que 40%, os valores de w_{max}^{lab} devem ser reduzidos proporcionalmente.

De forma prática e alternativa às equações anteriores, o seguinte critério visual pode ser aplicado: “ao término do peneiramento, as partículas espalhadas em uma camada única devem cobrir não mais do que três quartos da área de fundo da peneira”.

Para aberturas menores do que 500µm, a massa máxima a ser alimentada em uma peneira não deve exceder duas vezes o máximo permitido para a massa no término do peneiramento, segundo valores apresentados na Tabela 3.10. Nesta mesma tabela também são apresentadas referências alternativas para quatro tamanhos de peneiras (redondas: Ø200mm; Ø300mm; Ø450mm e a quadrada 600x600mm). A densidade de referência é igual a 2,3g/cm³. Para outras densidades deve-se ajustar os valores da tabela proporcionalmente.

Tabela 3.10. Massa máxima de minério de ferro a ser retida em uma peneira ao final do peneiramento (ABNT NBR ISO 4701:2014).

Abertura da peneira (mm)	Massa máxima de minério de <i>Fe</i> a ser retida em uma peneira ao final do peneiramento			
	diâmetro 200mm (kg)	diâmetro 300mm (kg)	diâmetro 450mm (kg)	Peneiras quadradas 600mm x 600mm (kg)
100				38
90				34
80				31
63			11	25
50			9,1	20,7
45			8,4	19
40			7,7	17,4
31,5		2,9	6,4	14,6
25		2,4	5,5	12,4
22,4		2,3	5,1	11,6
20		2,3	5	11,5
16		1,8	4	9
12,5		1,4	3,2	7
	g	g		
11,2	600	1300	2,9	6,5
10	500	1100	2,6	6
8	400	900	2	4,5
6,3	350	700	1,6	3,5
5,6	300	650	1,4	3,2
4	200	450	1	2,3
2,8	180	400		
2	180	400		
1,4	140	300		
1	140	300		
µm				
710	140	300		
500	110	250		
355	90	200		
250	80	180		
180	70	160		
125	60	130		
90	45	100		
63	40	90		
45	35	80		
36	30	70		

Para fins comparativos a Figura 3.30 apresenta valores das massas máximas limites calculados a partir da equação de Gaudin, juntamente com valores gerados pela norma

ABNT NBR ISO 4701:2014. Foram considerados os seguintes parâmetros: $\rho_B=2,3\text{g/cm}^3$; $\eta=1$, $\eta=2$ e $\eta=3$, diâmetro de peneira de 200mm e série Tyler.

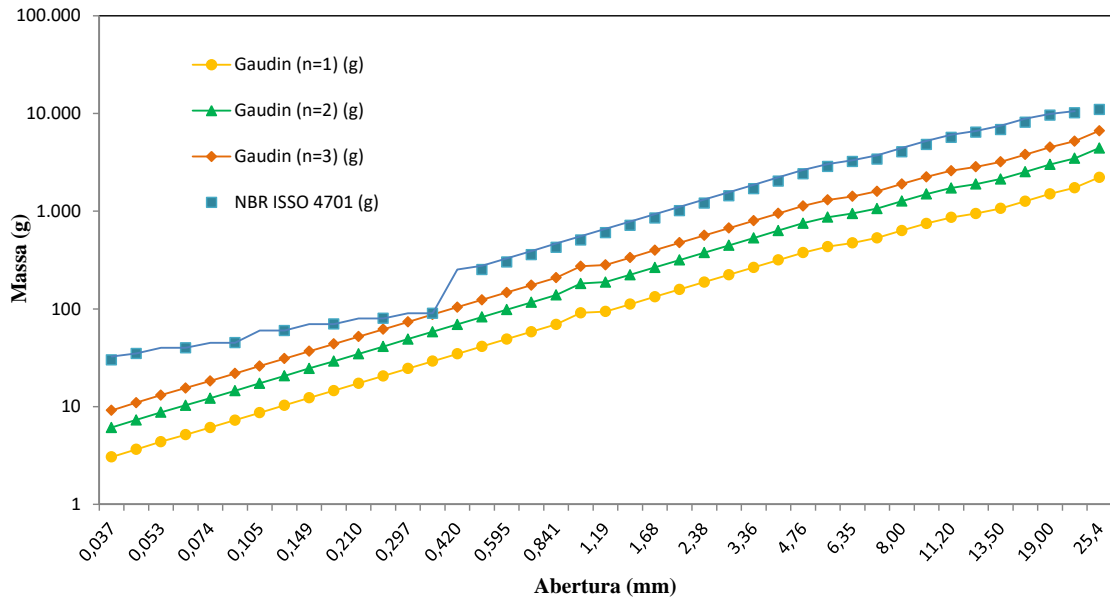


Figura 3.30. Gráfico comparativo – Equação de Gaudin ($\eta=1$, $\eta=2$ e $\eta=3$) x ABNT NBR ISO 4701:2014 (Arquivo pessoal do autor).

Observa-se que os valores das massas máximas limites obtidos a partir da norma ABNT NBR ISO 4701:2014 são superiores em todas as malhas, seguidos sequencialmente pelos valores calculados a partir da equação de Gaudin, na ordem decrescente de número de camadas η .

➤ Tempo de peneiramento

O tempo de peneiramento é aquele em que as partículas estão em contínua atividade sobre o meio peneirante, até que sejam descarregadas através do fluxo de *oversize* ou até que o ensaio se cesse. É uma das variáveis mais importantes em qualquer peneiramento, seja industrial ou de laboratório. Segundo Sampaio *et al.*, (2007), alguns fatores estão inter-relacionados com o tempo de peneiramento, tais como: natureza e granulometria do minério, precisão e finalidade do ensaio. Partículas grossas requerem menor tempo de peneiramento, enquanto para as mais finas, torna-se essencial a operação com tempos mais longos, de modo a se garantir a exposição das partículas às aberturas de cada peneira.

A norma técnica ABNT NBR ISO 4701:2014 apresenta as seguintes condições e fatores que influenciam no tempo de peneiramento:

- a) características do minério.
- b) volume da carga inicial.
- c) intensidade do peneiramento.
- d) tamanho nominal de abertura da peneira.
- e) limites aceitáveis de acurácia.

De acordo com a norma citada, não existe um único método para se definir o tempo de peneiramento. Uma primeira alternativa, e mais prática, é a de se empregar os tempos indicados na Tabela 3.11, utilizada para o peneiramento a seco de minério de ferro típico e em batelada.

Tabela 3.11. Tempos de peneiramento indicados para minérios típicos usando métodos de batelada (modificado de ABNT NBR ISO 4701:2014).

Tamanho de abertura da peneira (a) (mm)	Tempo para peneiramento manual (min)	Tempo para peneiramento mecânico (min)
$a \geq 4$	3	3
$1 \leq a < 4$	Variável	5
$a < 1$	Variável	20

Outro procedimento normativo para o estabelecimento do tempo de peneiramento pode ser encontrado na norma ISO 2591-1:1988, conhecido como “regra do ponto final”. Este critério tem como objetivo a determinação do tempo ideal de peneiramento para diversas substâncias. As etapas do procedimento se resumem a:

- a. Determinar uma peneira de especificação dentro de uma sequência de peneiras, ou considerar a peneira de menor abertura como a referência do teste.
- b. Peneirar durante 1 minuto a amostra inicialmente inserida na abertura de peneira maior.

- c. Remover e pesar a massa passante na peneira de especificação (ou peneira de abertura menor). No caso de peneiramento a úmido, desaguar e secar o produto antes da pesagem.
- d. Continuar a operação com o mesmo tempo de 1 minuto e repetir o procedimento de pesagem do passante na peneira de especificação.
- e. Verificar a quantidade de material passante pela peneira de especificação, em cada ensaio de 1 minuto, até que esta seja menor do que 0,1% da massa da carga inicial do peneiramento, ou até que o tempo total de peneiramento atinja 30 min.

Obs.: Este procedimento também pode ser realizado utilizando uma peneira por vez. Ou seja, o passante da tela de abertura maior, alimenta a peneira de abertura imediatamente menor. Segue-se esta sequência até se chegar à peneira de especificação, pesando-se os passantes de 1 em 1 minuto, conforme procedimento descrito.

➤ **Propriedades físicas e químicas dos materiais que afetam o peneiramento de laboratório**

A norma ISO 2591-1:1988 descreve algumas propriedades físicas e químicas dos minérios, que também influenciam no peneiramento. São elas:

- ✓ Densidade: a densidade de sólidos pode influenciar no tempo de peneiramento. Enquanto a densidade aparente, no volume de material sobre cada peneira.
- ✓ Natureza friável: alguns materiais podem sofrer processo de degradação durante os processos de peneiramento e amostragem. Este fator pode influenciar diretamente na avaliação do tempo de peneiramento ideal, uma vez que quanto mais tempo as partículas estão susceptíveis às diversas forças provenientes do movimento da peneira, maior degradação elas sofrem, e mais finos são gerados.
- ✓ Abrasividade: alguns materiais têm alto índice de abrasividade, como por exemplo, o pó de esmeril, ou até mesmo partículas de quartzo. Isto causa grande desgaste aos fios de aço das peneiras, podendo modificar o tamanho e o formato das aberturas ao longo

de prolongados ensaios. É, portanto, desejável que se avalie a abrasividade de materiais em casos extremos, antes da realização dos ensaios, e ao mesmo tempo, que se cheque em intervalos determinados, a conformidade das aberturas com as tolerâncias estabelecidas.

✓ Umidade superficial: tem sua importância associada à fluidez do material sobre a peneira. Determinados valores de umidade provocam forte adesão entre as partículas minerais, principalmente de ultrafinos sobre a superfície de partículas mais grossas, inibindo o movimento independente de parte dos finos sobre a peneira.

✓ Propriedades higroscópicas: alguns materiais podem rapidamente absorver umidade, característica que os inibe de entrar em equilíbrio com ar atmosférico do laboratório. Em alguns casos todo procedimento do ensaio deve ser executado de maneira a se reduzir ao máximo o contato com o ar.

✓ Mudanças de propriedades devido à secagem: é importante conhecer se existem características que serão alteradas em função de aquecimento durante o processo de secagem. Exemplos: formação de cake (“torrões”), trincas, deformações, etc.

✓ Forma das partículas: a duração e os resultados de um peneiramento podem ser consideravelmente afetados devido à forma das partículas. Como acontece quando existe grande quantidade de partículas lamelares ou alongadas, que podem passar ou ficar retidas dependendo da posição em que se apresentam à superfície da peneira.

✓ Distribuição de tamanho: fundamental nas definições do procedimento de peneiramento a ser utilizado, principalmente quanto à série e ao tamanho das peneiras. Afeta diretamente a massa a ser ensaiada e o tempo de peneiramento. Materiais contendo grande quantidade de partículas na faixa denominada “*near size*” podem influenciar na eficiência do peneiramento, logo no resultado final do ensaio.

✓ Coesão: a acomodação do leito de partículas sobre a superfície peneirante depende, entre outros fatores, da natureza coesiva do material, que por sua vez, depende das forças de interação eletrostáticas entre elas. A princípio, quanto mais fino o material,

maiores as forças de coesão. É fator determinante para a decisão entre se realizar o peneiramento a seco ou a úmido.

- ✓ Propriedades magnéticas: podem afetar os resultados devido à interação magnética entre partículas. Partículas com alta susceptibilidade magnética (ferromagnéticas) podem se aglomerar ou até mesmo se aderir aos fios de aço da peneira.
- ✓ Propriedades eletrostáticas: alguns materiais superfinos (pós), podem se tornar carregados com cargas elétricas estáticas em suas superfícies e assim, aos materiais metálicos da peneira.
- ✓ Reatividade química: certos materiais, ao serem peneirados, podem reagir com a atmosfera, com outros materiais (partículas de naturezas distintas) ou mesmo com o material da peneira. Conseqüentemente torna-se necessário que todos componentes dos equipamentos do teste sejam inertes. Além do mais, nestes casos os testes devem ser conduzidos sob atmosfera também inerte.

Além de todas variáveis descritas, relacionadas à amostra e às propriedades físicas e químicas das partículas, vale ressaltar a importante influência da condição dinâmica do equipamento vibratório, definida pelos três parâmetros principais: aceleração, amplitude e frequência. O movimento oscilatório deve ser o bastante para que todas as partículas tenham chance de tocar os fios de cada peneira, dentro do intervalo de tempo aceitável, e não tão intensa que modifique as características fundamentais das partículas ou comprometa a integridade física do equipamento.

3.3.3. Equipamentos de laboratório de bancada

Embora as principais normas de ensaio de peneiramento não impeçam a utilização do peneiramento manual, este quase nunca é empregado nos laboratórios por ser considerado longo, tedioso, e sua acurácia e precisão depender largamente da experiência e técnica individual do operador (WILLS, 2006). Desta forma, peneiramento de laboratório é universalmente realizado através de equipamentos vibratórios, contendo ou não um temporizador automático e controle de frequência e

amplitude da vibração, onde a série de peneiras é definida e instalada para cada ensaio (Figura 3.31).



Figura 3.31. Conjunto de peneiras em série sobre agitador mecânico com temporizador e controle de vibração (TYLER, 2017).

As peneiras escolhidas são dispostas umas sobre as outras, de modo que peneiras de aberturas maiores ficam ajustadas sobre peneiras de aberturas menores em ordem consecutiva segundo a série utilizada. Um fundo cego é encaixado na parte inferior para conter o material mais fino (*undersize*), passante na última peneira, quando o ensaio é realizado a seco. Em ensaios a úmido, se dispõe geralmente de um balde para receber a polpa, contendo o material mais fino. Na parte superior do conjunto, uma tampa é encaixada sobre a peneira de maior abertura para evitar transbordo ou fuga de partículas. Nesta mesma peneira se acomoda toda a massa do ensaio.

➤ Dimensões das peneiras

Quanto às dimensões de peneiras de laboratório, existem algumas variações importantes, que dependem exclusivamente do tipo de aplicação e do fornecedor. De forma simplificada, pode-se classificá-las em: peneiras “redondas” e peneiras “quadradas”. Praticamente todas as peneiras são fabricadas em aço inox. As peneiras redondas possuem área de peneiramento circular. Peneiras de diâmetro igual a 200mm

são geralmente recomendadas pelas principais normas. A norma técnica ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010 apresenta os principais critérios que devem ser seguidos pelos fabricantes para garantir que os ensaios cumpram as exigências de mercado. Esta norma se aplica às peneiras de tamanhos de abertura variando entre 125mm e 20 μ m, enquanto o caixilho recomendado é o circular de 200mm de diâmetro, principalmente para telas com abertura nominal superior a 1,0mm. Para aberturas mais finas e pequenas quantidades de massa podem ser utilizados caixilhos menores, enquanto para aberturas muito grandes podem ser utilizadas peneiras circulares ou quadradas de 300mm de diâmetro ou lado, ou superiores, conforme cada necessidade. Fato é que a forma e a dimensão dos caixilhos têm pouca influência nos resultados do peneiramento. A Tabela 3.12 apresenta valores de dimensões nominais e limites dos caixilhos, enquanto a Figura 3.32 exibe uma representação esquemática de peneira de laboratório.

Tabela 3.12. Formas e medidas recomendadas dos caixilhos (modificado de ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).

Peneira de ensaio		Diâmetro ou comprimento da superfície efetiva de peneiramento (mm)		Profundidade aproximada (mm)
Forma	Tamanho nominal (mm) (D_1 , D_2)	min	max	H_1
Circular	200	185	200	50
Circular	300	275	300	75
Quadrada	300	275	300	75

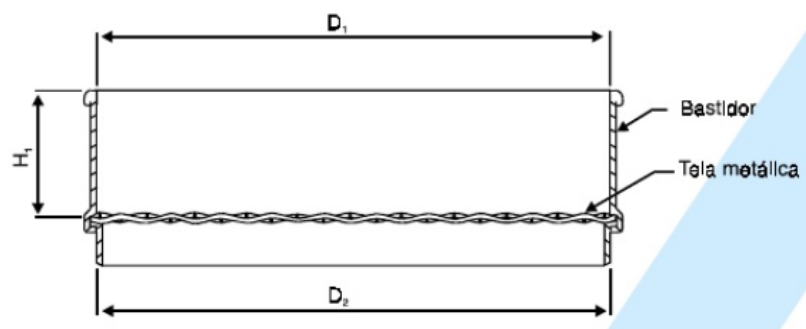


Figura 3.32. Seção transversal de peneira de ensaio (ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).

A Tabela 3.13 apresenta alguns diâmetros e respectivas alturas de peneiras redondas disponibilizadas pelo fabricante abronzinox[®].

Tabela 3.13. Diâmetro e altura de peneiras redondas com caixilhos de inox (ABRONZINOX, 2017).

Diâmetro	Altura
3",5" e 8"	1" ou 2"
200 mm	50 mm
300 mm	50 mm, 75 mm e 100 mm
15"	2", 5" e 8"
490 mm	75 mm

As peneiras quadradas geralmente são aplicadas para materiais com maiores granulometrias, ou mesmo quando há a necessidade de se utilizar maiores massas de amostra para ensaios de análise granulométrica. As dimensões mais empregadas podem variar entre 300mm, 400mm e 500mm, e altura padrão de 75mm. A Figura 3.33 apresenta ilustração de uma peneira quadrada de dimensão 500x500x75mm.



Figura 3.33. Peneira quadrada 500x500mm (DIALMÁTICA, 2018a).

As peneiras são identificadas através de uma etiqueta de metal fixada nos caixilhos contendo as seguintes informações (ABNT NBR NM ISSO 3310-1:2010):

- a) tamanho nominal das aberturas;
- b) referência à(s) norma(s) a que corresponde(m) a peneira de ensaio;
- c) material do caixilho e da tela metálica;
- d) nome do fabricante responsável pela peneira;

e) número de identificação do fabricante.

- Aberturas, diâmetro dos fios e tolerâncias – norma ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010

A precisão de um ensaio de peneiramento está intimamente relacionada com a precisão das aberturas da peneira. Portanto, manter a tolerância tão estreita quanto possível é requisito fundamental para os fabricantes de peneiras. Demais parâmetros, tal como o diâmetro de fio, tem importância secundária, e a exigência quanto à tolerância não necessita ser tão rigorosa quanto às aberturas. Deste modo pretende-se evitar excesso de complexidade e preciosismo nos processos de fabricação.

Peneiras de laboratório são designadas pela dimensão nominal de abertura a da tela metálica. Podem existir mais de um diâmetro ϕ para uma mesma abertura (Figura 3.34).

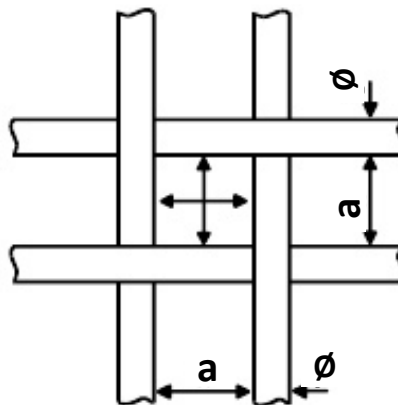


Figura 3.34. Representação de uma tela de abertura a e diâmetro de fio ϕ (ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010).

As tolerâncias foram, portanto, estabelecidas a partir da abertura nominal de cada peneira, a partir dos parâmetros X, Y e Z, respectivamente calculados pelas Equações 3.28, 3.29 e 3.30, cujos valores estão apresentados nas tabelas do Anexo B deste trabalho.

$$X = \frac{2a^{0,75}}{3} + 4a^{0,25} \quad \text{Equação 3.28}$$

Onde:

- X e a são expressos em μm .

Nenhuma das aberturas deve exceder o tamanho nominal em valor superior a X .

$$Y = \frac{a^{0,98}}{27} + 1,6 \quad \text{Equação 3.29}$$

Onde:

- Y e a são expressos em μm .

A dimensão média das aberturas não deve desviar-se da dimensão nominal em valor superior $a \pm Y$.

$$Z = \frac{X+Y}{2} \quad \text{Equação 3.30}$$

Não mais de 6% da totalidade das aberturas deve ter dimensões entre “ $a+X$ ” e “ $a+Z$ ”. Deste modo, quando a peneira possuir menos de 50 aberturas, no máximo três aberturas poderão estar dentro dos limites de “ $a+X$ ” e “ $a+Z$ ”.

Quanto ao diâmetro dos fios, os valores nominais devem ser similares nas direções da urdidura e da trama (ABNT NBR NM ISO 2395:1997). A faixa de variação pode ser definida pelos limites ϕ_{Max} e ϕ_{Min} , em relação aos valores nominais, sendo de aproximadamente 15%. As tabelas do Anexo B apresentam estes valores.

Para se inspecionar tais parâmetros, todas as aberturas das telas devem ter a mesma probabilidade de serem medidas.

No caso das peneiras com 20 aberturas ou menos, deve-se medir todas as aberturas. Para peneiras que contenham 20 ou mais aberturas, deve-se inspecionar as condições gerais da tela, observar periodicamente as aberturas individuais e finalmente medir as dimensões das aberturas de acordo com as tolerâncias pré-estabelecidas na norma ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010.

- Agitadores de peneiras

Os equipamentos responsáveis pela agitação das peneiras podem ser projetados tanto “suspensos” quanto sob “bancada”, isto é, sob uma base agitadora. Os peneiradores suspensos possuem o acionamento localizado na parte de cima do equipamento. Podem ser enclausurados, como se observa no peneirador suspenso da Figura 3.35, de modo a se evitar propagação excessiva de ruídos. Tem a desvantagem de demandar maior espaço que o peneirador sobre bancada.



Figura 3.35. Peneirador suspenso enclausurado (DIALMÁTICA, 2018b).

O agitador de bancada tem ao mesmo tempo a função de suportar e agitar o conjunto de peneiras. A maioria dos modelos possui temporizador para controle do tempo de peneiramento e controlador de frequência de vibração. Vários fabricantes recomendam apoiar o peneirador sobre um plano (bancada) rígido e livre de vibração, que não contenha revestimento de borracha, de modo a evitar a transmissão do movimento oscilatório para a base. A Figura 3.36 apresenta três modelos de peneiradores da empresa Haver & Boecker®: (a) peneirador para peneiras redondas, operado a seco (b) para peneiras redondas, operado a úmido e (c) peneirador para peneiras quadradas operado a seco.

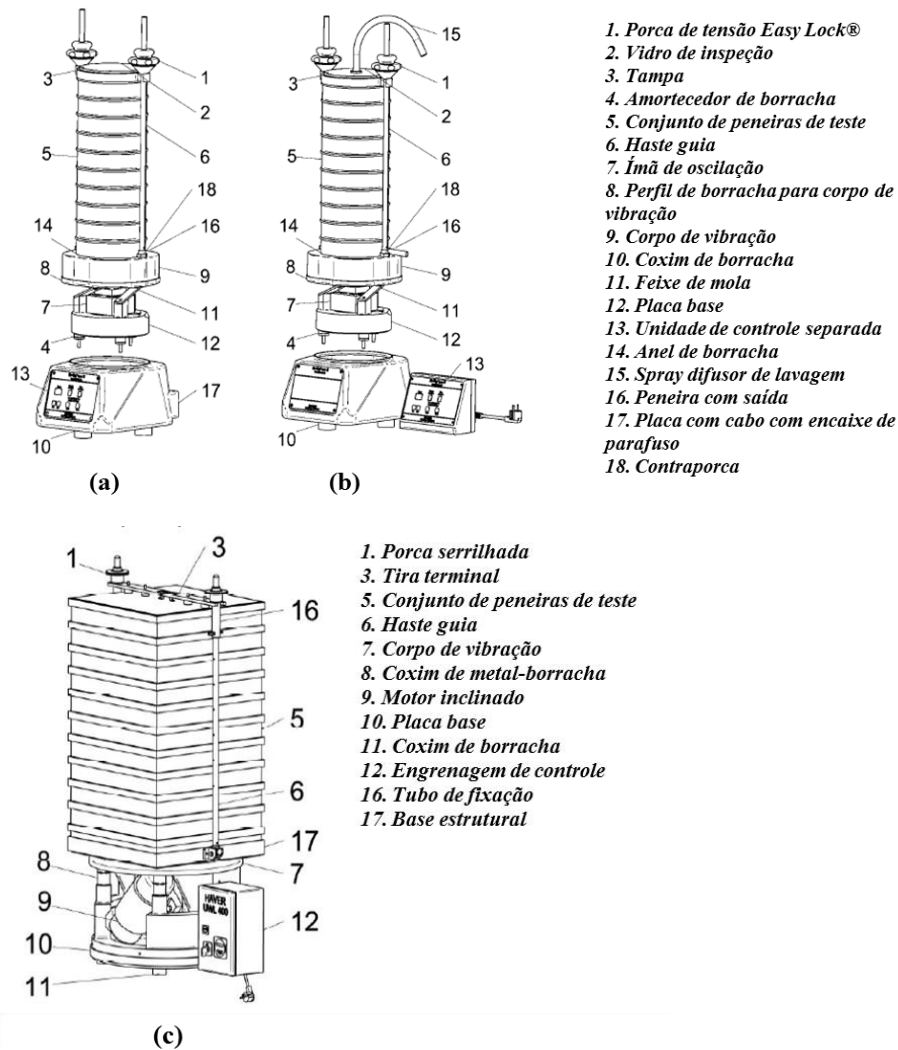


Figura 3.36. (a) Peneirador de bancada Ro-Tap® modelo E, operado a seco (b) Peneirador de bancada Ro-Tap® modelo E, operado a úmido (c) Peneirador de bancada – peneiras quadradas modelo UWL 400H, operado a seco (TYLER, 2017).

3.3.4. Modelos de distribuição granulométrica

Segundo King (2001), funções de distribuição, de maneira geral, podem definir quantitativamente a maneira com que valores desta propriedade se distribuem em torno de uma população de partículas. Uma das funções mais aceitas e utilizadas é a função de distribuição de tamanho de partículas $P(d)$ definida como a fração da população cujas partículas sejam de tamanho menor ou igual ao tamanho d , sendo que o símbolo d representa o tamanho de uma partícula.

A definição e o entendimento do tamanho d são ambíguos e já foram tratados nos tópicos anteriores, assim como a medição experimental do valor P .

A função $P(d)$ tem algumas propriedades gerais e fundamentais:

(a) $P(0) = 0$

(b) $P(\infty) = 1$

(c) $P(d)$ aumenta monotonicamente de 0 até 1, a medida que d aumenta de 0 a ∞ .

As propriedades (a) e (b) podem ser facilmente entendidas uma vez que nenhuma partícula na população pode ter tamanho menor ou igual a 0 (a) nem tamanho maior do que infinito (b). Já a propriedade (c) reflete o fato de que a fração da população que tem tamanho menor ou igual a d_1 deve conter, ao menos, todas aquelas partículas de tamanho d_2 ou menor do que este valor, se $d_2 \leq d_1$.

Ainda segundo King (2001), uma função de densidade discreta de tamanho de partículas $p_i(d)$ (Equação 3.31) deve ser definida, para que seja mais aplicável e útil no modelamento das operações unitárias de tratamento de minérios.

$$p_i(d) = \int_{D_i}^{D_{i-1}} dP(d) = P(D_{i-1}) - P(D_i) = \Delta P_i \quad \text{Equação 3.31}$$

Onde:

- $p_i(d)$ = função de densidade discreta fracionada, que consiste na fração mássica da população de partículas cujos os tamanhos estão compreendidos entre D_i e D_{i-1} .

$d = D_{i-1} - D_i$ passa a ser, portanto, conhecido como uma “classe” de tamanho. Varia de tamanho para tamanho, incluindo todas aquelas partículas, provenientes de uma determinada população, que tem tamanho compreendido entre D_i e $D_i + d$. Em algumas situações é usual se designar a classe de tamanho pela média de seus limites, e para que seja bem distinto cada classe, será utilizado sempre o símbolo D_i , o qual indica o limite

inferior da classe de tamanho i . A maior classe de tamanho possui apenas um limite D_I , a qual, por sua vez, inclui todas as partículas superiores que D_i .

O conceito estabelecido permite se formular diversos modelos e definições para sistemas de processamento mineral. O tamanho representativo de cada classe é associado a todas as partículas ali presentes, como se todas estas partículas tivessem um tamanho igual ao tamanho representativo. Desta maneira, naturalmente espera-se que a classe de tamanho seja suficientemente estreita, embora este termo não seja precisamente possível de se definir. Geralmente, assume-se que o fator $\sqrt{2}$, extraído da série de peneiras mais tradicional *Tyler*, seja a maior relação geométrica aceita com segurança. De qualquer maneira, a utilização deste fator gera um número muito grande de classes e peneiras, o que deve ser levado em conta quanto a sua viabilidade prática.

Várias funções matemáticas foram desenvolvidas com o objetivo de representar a distribuição granulométrica de partículas, e normalmente têm bastante precisão e exatidão. As duas funções de distribuição mais comuns, que são frequentemente aplicadas a estudos de cominuição, são os modelos de Gates-Gaudin-Schumann (SCHUMANN, 1940 *apud* WILLS, 2006) e Rosin-Rammler (ROSIN AND RAMMLER, 1933-34 *apud* WILLS, 2006). Ambos os modelos foram desenvolvidos a partir de tentativas de se representar curvas de distribuição de tamanho de partículas por meio de equações. Eventualmente podem ainda ser plotados, em função do tamanho D_i , em escala log-log. Tal como acontece com a maioria dos gráficos que utilizam escala log-log, frequentemente gera uma linha reta, em um grande intervalo de tamanho, principalmente sobre os mais finos. A interpolação torna-se mais fácil a partir de uma linha reta do que a partir de uma curva (WILLS, 2006).

➤ **Rosin-Rammler**

A função de distribuição de Rosin-Rammler é frequentemente utilizada para representar resultados de análises granulométricas provenientes da descarga de britadores e moinhos. A expressão geral pode ser dada pela Equação 3.32:

$$P(d) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^\mu\right]} \quad \text{Equação 3.32}$$

Onde,

- $P(d)$: função de distribuição Rosin-Rammler - % passante no tamanho d ;
- d : tamanho de partícula (mm)
- μ : módulo de distribuição;
- λ : módulo de tamanho.

Os parâmetros μ e λ são parâmetros ajustáveis aos dados medidos. O parâmetro μ altera o raio ou o grau de concavidade da curva, enquanto o parâmetro λ está diretamente associado à ordem de tamanho das partículas. Calculando o logaritmo neperiano nos dois termos da Equação 3.30, tem-se:

$$\ln\{-\ln[1 - P(d)]\} = \mu \ln d - \mu \ln \lambda \quad \text{Equação 3.33}$$

A plotagem desta última equação resultará em uma linha reta de inclinação μ , caso o comportamento do material se ajuste com um bom grau de precisão ao modelo de Rosin-Rammler.

Para Correa *et al.* (2004), o ajuste da função dentro de uma curva de distribuição granulométrica específica é frequentemente realizado por regras de regressão linear dos dados experimentais.

➤ **Gates-Gaudin-Schumann**

Outro método relativamente mais simples, e que encontra diversas aplicações na modelagem de processo mineral desde o ano de 1940 é o modelo conhecido como Gates-Gaudin-Schumann, definido pela seguinte equação:

$$P(d) = \left[\frac{d}{\lambda} \right]^\mu \quad \text{Equação 3.34}$$

Onde:

- d , μ e λ possuem o mesmo significado que a Equação 3.32.
- $P(d)$: função de distribuição Gates-Gaudin-Schumann, % passante no tamanho d ;

A Equação 3.35 é a linearização da função de GGS com aplicação de logaritmo em ambos os lados da função.

$$\log P(d) = \mu \log d - \mu \log \lambda \quad \text{Equação 3.35}$$

A Tabela 3.14 apresenta um exemplo de valores de distribuição granulométrica medidos em laboratório, juntamente com valores e parâmetros ajustados das funções RR e GGS, considerando uma determinada série de peneiras.

Tabela 3.14. Valores ajustados dos modelos de RR e GGS a partir da distribuição granulométrica de um determinado sistema particulado (CORREA *et al.*, 2004).

Retido acumulado (%)	$P(d)$	d (mm)	$p(d)$	$\log P(d)$	$\text{Log}(d)$	$\ln\{-\ln[1-P(d)]\}$	$\ln(d)$
1,39	0,014	0,71	0,020	-1,857	-0,15	-4,269	-0,34
3,75	0,038	1	0,038	-1,426	0,00	-3,264	0,0
15,69	0,157	1,4	0,112	-0,804	0,15	-1,768	0,34
25,69	0,257	2	0,128	-0,590	0,30	-1,214	0,69
50,27	0,503	2,8	0,180	-0,299	0,45	-0,359	1,03
78,74	0,787	4	0,197	-0,104	0,60	0,437	1,39
94,57	0,946	5,6	0,169	-0,024	0,75	1,069	1,72
97,76	0,978	5,68	0,122	-0,010	0,75	1,335	1,74
100	1	11,2	0,089	0,0	1,05		2,42

A Figura 3.37 apresenta as curvas de distribuição granulométrica deste mesmo exemplo, em conjunto com um gráfico de regressão linear via modelo de RR, que neste caso apresentou uma melhor correlação do que o modelo de Gates-Gaudin-Schumann (CORREA *et al.*, 2004).

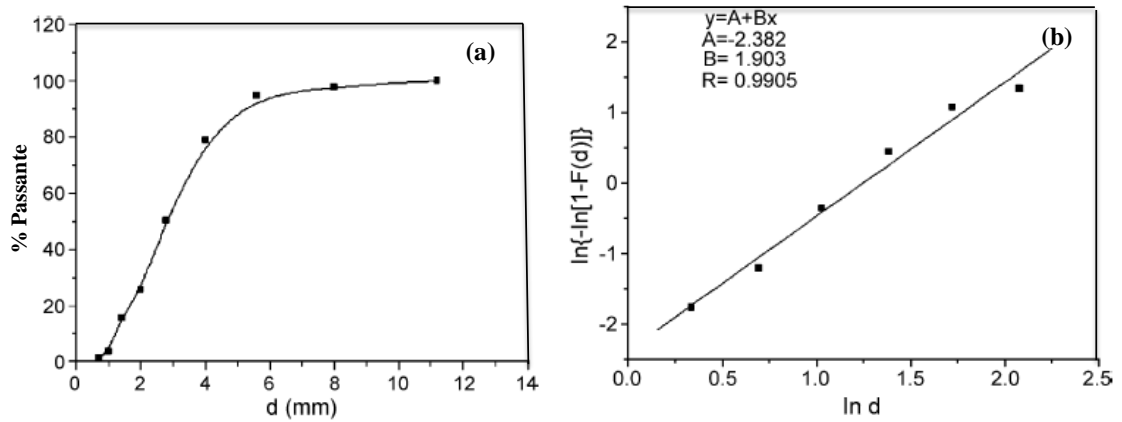


Figura 3.37. (a) Curva de distribuição granulométrica obtida em peneiramento de laboratório. (b) Regressão linear via modelo Rosin-Rammler (CORREA *et al.*, 2004).

3.4. Caracterização de sistemas particulados

Materiais particulados são todos aqueles formados, na maioria das vezes, por partículas de ordem macroscópica, como pode ser observado na Figura 3.38, o que inclui desde materiais granulares (sementes, cereais, areias e grandes volumes de rochas), pós (alimentícios, farmacêuticos, minérios), poeiras (poluentes, contaminantes), até nanopartículas. Cerca de 60% dos produtos na indústria química são fabricados na forma particulada, e as aplicações industriais envolvendo estes produtos são muitas, e em setores muito diversos, como petroquímica, alimentício e farmacêutico, entre outros. A pesquisa na área de sistemas particulados envolve principalmente: a caracterização e a determinação de propriedades úteis para o dimensionamento de equipamentos e processos que envolvam algum tipo de material particulado (UFSCAR, 2018).



Figura 3.38. Sistemas particulados de diferentes tamanhos e características de partículas (UFSCAR, 2018).

As propriedades dos sólidos particulados dependem ao mesmo tempo da natureza das partículas individuais e do sistema de partículas como um todo (leito poroso). Em relação às propriedades individuais pode-se citar: a forma, a dureza, a densidade de sólidos (ou peso específico), o calor específico, a condutividade, dentre outros. Com relação às propriedades do sistema de partículas (leito poroso), cita-se: a densidade aparente, a área específica, a permeabilidade, o ângulo de repouso, granulometria, entre outras. Neste caso, a propriedade passa a ser uma característica do conjunto de partículas e não mais da partícula individual.

López *et al.*, (2008) afirmam que a complexidade no entendimento do sistema particulado pode ser atribuída à sua metaestabilidade, deixando-o no limiar entre as características de sólidos e dos fluidos (líquidos e gases). Ainda segundo esses autores, as interações entre as partículas são configuradas como repulsivas e dissipativas (inelásticas). A complexidade apresentada pelos graneis pode ser ainda aumentada no caso do processamento mineral, principalmente em se tratando de polpas minerais (mistura entre água e sólidos finamente cominuídos) que apresentam características híbridas entre o sólido e o fluido e exibem comportamento reológico não-newtoniano (LUZ *et al.*, 2010).

O entendimento dos sistemas particulados no processamento mineral baseia-se no conhecimento das propriedades das partículas minerais e nas operações unitárias de tratamento de minérios, tais como: cominuição, peneiramento, classificação, concentração, separação sólido-líquido e manuseio (bombeamento, estocagem, etc.). Nas operações de peneiramento predomina como a variável mais importante a distribuição granulométrica do sistema. De qualquer forma, a densidade de sólido e aparente, umidade, forma das partículas, dentre algumas outras propriedades, possuem também grande influência neste processo.

Segundo Milhomem (2013), quanto ao grau de granulação (dimensão do sistema disperso em um meio contínuo) os sistemas particulados classificam-se em: solução verdadeira, dispersão coloidal, (as maiores partículas apresentam-se com pelo menos

uma dimensão superior a um micrômetro), ou suspensão (as partículas possuem dimensão maior que o limite coloidal).

A seguir, segue um descritivo de propriedades de sistemas de partículas minerais que serão considerados neste trabalho.

3.4.1. Massa específica de sólidos

Massa específica de sólidos, ou densidade de sólidos, é uma propriedade classificada como intensiva, isto é, não depende do tamanho da amostra. Isto difere das propriedades extensivas que são dependentes do tamanho da amostra. A massa específica de sólidos pode ser obtida pela razão entre duas propriedades extensivas: a massa de uma determinada substância, que, no processamento mineral, pode ser uma amostra de rocha, minério ou mineral, e o seu volume (ATKINS e JONES, 2001). Do ponto de vista químico a densidade depende do raio atômico das substâncias e íons que a constituem. Para os minerais, isto significa que depende de sua estrutura cristalina. Um exemplo dado por Sampaio *et al.*, (2007), é a comparação entre os elementos sódio (Na) e potássio (K). O peso atômico do potássio é 1,7 vezes maior que o do sódio, e a densidade do KCl (1,98) é menor que a do NaCl (2,17). A diferença dos raios atômicos entre o K⁺ (1,33) e Na⁺ (0,98) justifica essa diferença e explica o pronunciado efeito sobre o volume dessas substâncias cristalinas. Os autores também afirmam que as variações periódicas da densidade com o número atômico não se repetem igualmente com a periodicidade dos números atômicos. Essa discrepância pode esclarecer porque a faixa de valores da densidade dos minerais varia desde pouco mais de 1,0 até 23,0, valores que são encontrados em alguns minerais, como aqueles do grupo do ósmio.

Matematicamente e de maneira geral, pode-se definir a massa específica de sólidos como:

$$\rho_s = \frac{w}{V} \quad \text{Equação 3.36}$$

Onde:

- ρ_s : massa específica de sólidos (g/cm^3).
- w : massa de sólido seco (g).
- V : volume de sólido seco (cm^3).

Muitas vezes, observa-se o emprego do termo “densidade relativa”. Este termo se refere à razão entre a densidade da substância analisada e a densidade de uma substância definida como padrão (ANDRADE *et al.*, 2006 apud SAMPAIO, 2007). Esta substância padrão é a água, e seu valor de densidade é de $1.000\text{g}/\text{cm}^3$ a 4°C . Logo, um mineral com densidade de 2,6, como é o caso do quartzo, é 2,6 vezes mais denso que a água.

A massa específica de sólidos é tradicionalmente medida por “picnometria”, de vidro. Este método consiste basicamente na utilização de um instrumento denominado “picnômetro”, que se trata de um balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar, conforme ilustra a Figura 3.39.



Figura 3.39. Imagem de picnômetros (PROLAB, 2019).

Ainda segundo ANDRADE *et al.*, (2006) apud SAMPAIO, (2007), a determinação da densidade de um mineral por meio do método de picnometria demanda também uma balança de precisão, com, no mínimo, duas casas decimais. Para assegurar que o

procedimento foi utilizado corretamente, recomenda-se a determinação da densidade em duplicata e, para se obter boa reprodutibilidade, deve-se:

(i) molhar, com água ou outro líquido utilizado no experimento, as partículas dos sólidos que constituem a amostra.

(ii) verificar se não há bolhas de ar aderidas às partículas ou à superfície interna do picnômetro;

(iii) agitar o picnômetro com água e amostra.

A equação utilizada para se calcular a densidade de sólido, a partir do método da picnometria é a seguinte:

$$\rho_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad \text{Equação 3.37}$$

Onde:

- ρ_s : massa específica de sólido (g/cm³).
- A_1 : massa do picnômetro (obtida no procedimento “i”).
- A_2 : massa do picnômetro + amostra.
- A_3 : massa do picnômetro + amostra + água.
- A_4 : massa do picnômetro + água.

3.4.2. Massa específica aparente

A massa específica aparente, assim como a massa específica de sólidos, é também definida como a relação entre as unidades de massa de um determinado material (amostra de minério, por exemplo) e a de volume. O que difere estas duas propriedades, é que a densidade aparente está relacionada não somente ao volume específico da partícula, mas sim também ao volume ocupado pelo sistema de partículas, incluindo os interstícios entre elas, ou seja, o volume de vazios que é gerado por consequência da

acomodação natural das partículas em um determinado espaço (recipiente, pilha, silos, etc).

Portanto, o método de medida é diferente do da massa específica de sólidos. Em determinados procedimentos laboratoriais pode-se utilizar provetas, baldes ou qualquer recipiente graduado. Para a medição da massa, utilizam-se balanças digitais com a precisão requerida para a informação. Na escala industrial, existem diversas maneiras de se calcular, dependendo de como o material se encontra disposto. Por exemplo, em pilhas de produto de minério, a partir de um levantamento topográfico é possível se medir o volume. Logo, sabendo-se que este volume medido inclui tanto o volume de partículas dispostas umas sobre as outras, quanto o volume de interstícios entre elas, basta se conhecer a massa desta pilha. Esta última informação pode ser levantada a partir da medição de balanças integradoras instaladas nas correias transportadoras que deram origem à pilha. Assim, basta se relacionar os valores medidos.

Andrade *et al.*, (2006) apud Sampaio, (2007) exemplificam a determinação da massa específica aparente ρ_B de três amostras de materiais diferentes, como apresentado pela Figura 3.40:

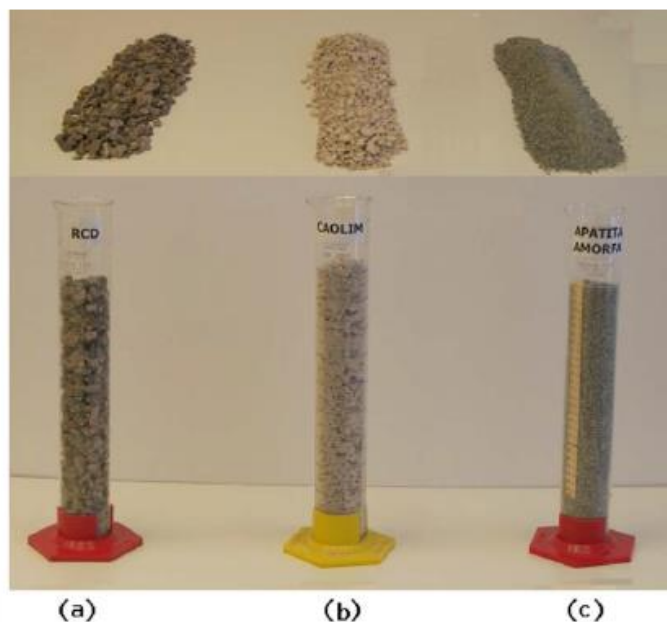


Figura 3.40. Em (a), amostra de RCD; em (b), amostra de caulim e, em (c), amostra de minério de fosfato (SAMPAIO, 2007).

- (a) RCD – Resíduo da Construção e Demolição;
- (b) caulim;
- (c) minério de fosfato.

Inicialmente foram medidas as massas e os volumes de cada amostra. Foi tomado o volume de 1.000cm^3 para todas as amostras, cujos valores encontram-se a seguir:

(a) Amostra de RCD

- ✓ Granulometria entre 12 e 5mm.
- ✓ Volume de preenchimento no recipiente = 1.000cm^3 .
- ✓ Massa = 1.366,17g
- ✓ $\rho_B = w/V = 1366,17/1000 = 1,37\text{g/cm}^3$.

(b) Amostra de minério de fosfato

- ✓ Granulometria abaixo de 3,5mm.
- ✓ Volume de preenchimento no recipiente = 1.000cm^3 .
- ✓ Massa = 1.526,85g.
- ✓ $\rho_B = w/V = 1.526,85/1000 = 1,53\text{g/cm}^3$.

(c) Amostra de caulim

- ✓ Granulometria abaixo de 9mm.
- ✓ Volume de preenchimento no recipiente = 1.000cm^3 .
- ✓ Massa 1.169,06g.
- ✓ $\rho_B = w/V = 1169,06/1000 = 1,17\text{g/cm}^3$.

A norma ABNT NBR NM 45:2006 propõe para a determinação da massa específica aparente do agregado o uso de um recipiente metálico em forma de paralelepípedo, de volume (V) conhecido. A amostra seca é nele colocada sem qualquer adensamento, procurando-se desse modo reproduzir a situação industrial.

Alguns valores de massa específica aparente de agregados são baseados na norma ABNT NBR NM 45:2006. Seguem alguns exemplos:

- ✓ areia fina: 1.520kg/m^3
- ✓ areia média: 1.500kg/m^3
- ✓ areia grossa: 1.480kg/m^3
- ✓ brita 1: 1.450kg/m^3
- ✓ brita 2: 1.420kg/m^3
- ✓ brita 3: 1.400kg/m^3
- ✓ seixo rolado: 1.500kg/m^3

3.4.3. Umidade

Os sistemas particulados, via de regra, carregam entre as partículas que os constituem, determinada quantidade de água de “forma natural”. A inclusão desta água juntos às partículas minerais, pode ocorrer devido a diversos fatores: águas do nível freático e subterrânea, água das chuvas, a própria água presente na atmosfera (umidade do ar), etc. Os minerais têm diferentes níveis de afinidade com a água, que em propriedade das interfaces, define-se como hidrofobicidade ou hidrofiliabilidade. A esta quantidade de água adquirida de fenômenos naturais denominamos como “umidade natural”, uma vez que não ocorreu a adição “proposital” de água ao material. O processamento de minérios a umidade natural é geralmente denominado de “processamento a seco”, embora o material não tenha passado pelo processo de secagem. Processos em plantas de mineração, tais como, a britagem, alguns peneiramentos, estocagem em silos, caçambas de caminhões e vagões tem como regra geral ser em processo a seco. Aos processos que se utiliza água, de forma controlada denomina-se tradicionalmente de “processamento a úmido”. Neste caso é adicionada quantidade substancial de água, e a esta mistura (sólido + água), denomina-se “polpa”. O processamento a úmido pode ser exemplificado a partir das operações de peneiramento (granulometrias finas de modo geral), moagem, classificação, concentração, e também pelas principais operações de separação sólido-líquido (espessadores e filtração).

Desconsiderando, portanto, o caso das polpas, a umidade pode fazer parte da caracterização dos minérios ou qualquer material. Pode ser definida matematicamente como a massa de água existente no material em relação à massa total do sistema (considerando inclusive a água presente). A Equação 3.38 apresenta esta relação:

$$m = \frac{w_a}{w_m} \quad \text{Equação 3.38}$$

Onde:

- m : Umidade
- w_a = Massa da água.
- w_m = Massa total do material.

3.4.4. Índice de forma

A forma das partículas influencia diretamente diversas operações de tratamento de minérios, principalmente as operações de peneiramento, nas quais se almeja a separação a partir do tamanho das partículas. Segundo Allen (1997), a forma das partículas influencia propriedades como fluidez, empacotamento, interação com fluidos, porosidade, comportamento da torta e poder de cobertura de pigmentos.

A dificuldade em se caracterizar a forma das partículas inicia-se no fato de a natureza das partículas minerais não apresentar formas bem definidas e que sejam fáceis de determinar. É impossível se descrever qualquer partícula mineral dentro da noção que se tem das formas geométricas básicas conhecidas, exemplo: cubo, esfera, paralelepípedo, etc. Dentro de um mesmo lote de minério, com características bem semelhantes entre suas partículas minerais, pode-se encontrar uma gama de diferentes formas geométricas de partículas. Algumas “mais arredondadas”, outras “mais cúbicas” ou completamente irregulares (diferenças significativas entre as dimensões tridimensionais).

Alguns autores sugerem maneiras de se tentar medir a forma de partículas. Dana (1974), agrupa as partículas minerais dentro das seguintes classes: acicular, angular, cristalina,

dentrítica, etc. O que pode auxiliar na identificação de determinados minerais. No entanto, para Gotoh e Finney (1975), estes termos são inadequados para uma análise quantitativa. Segundo os autores, a dificuldade em realizar a análise da forma das partículas consiste no fato de que tamanho e forma são matemática e logicamente inseparáveis. A Figura 3.41 evidencia que na medição do tamanho da partícula por meio do diâmetro equivalente da esfera, podem ser usados diâmetros equivalentes baseados em diferentes dimensões, como o diâmetro de esfera com mesmo volume, área superficial ou mesmo a área projetada da partícula irregular a ser medida.



Figura 3.41. Diâmetros equivalentes para uma mesma partícula (FRANÇA e COUTO, 2007).

Quanto mais as partículas forem irregulares, mais divergentes serão os valores de diâmetro adotados. Foram então criadas várias relações numéricas, com a finalidade de se realizar uma medição quantitativa das características das partículas. Segundo Allen (1997), a quantificação das partículas pode ser feita de forma macroscópica, através de coeficientes de forma (relação entre tamanhos medidos e o volume ou a superfície da partícula) e de forma microscópica, através de fractais ou por transformada de Fourier.

Poole *et al.*, (1998) descrevem a forma de partículas de agregado a partir do uso de dois parâmetros: “esfericidade” e “curvatura”. Esfericidade pode ser definida como a relação entre o diâmetro equivalente da partícula e sua máxima dimensão, enquanto curvatura é

a relação entre o raio médio dos cantos e limites pelo raio de circunferência máxima. As Figuras 3.42 e 3.43 apresentam exemplos da classificação destes dois parâmetros.

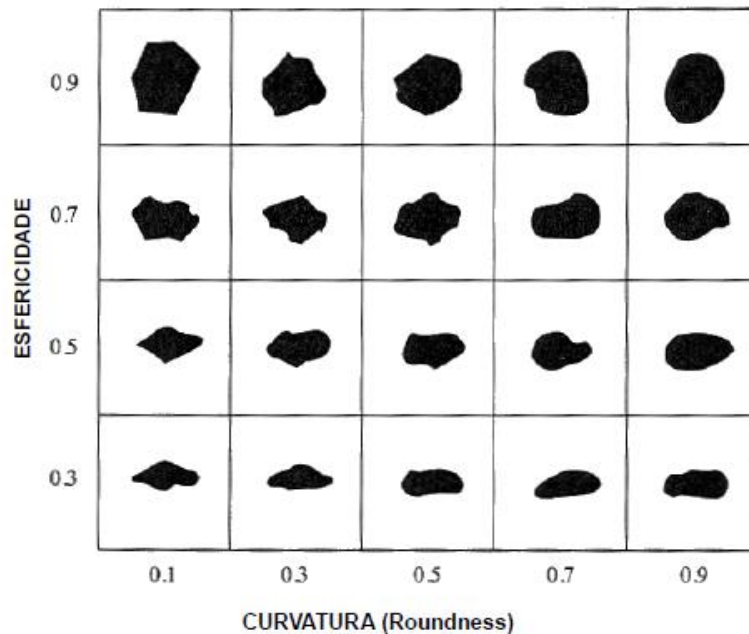


Figura 3.42. Forma de partícula. Grau de esfericidade x curvatura (Poole *et al.*, 1998)

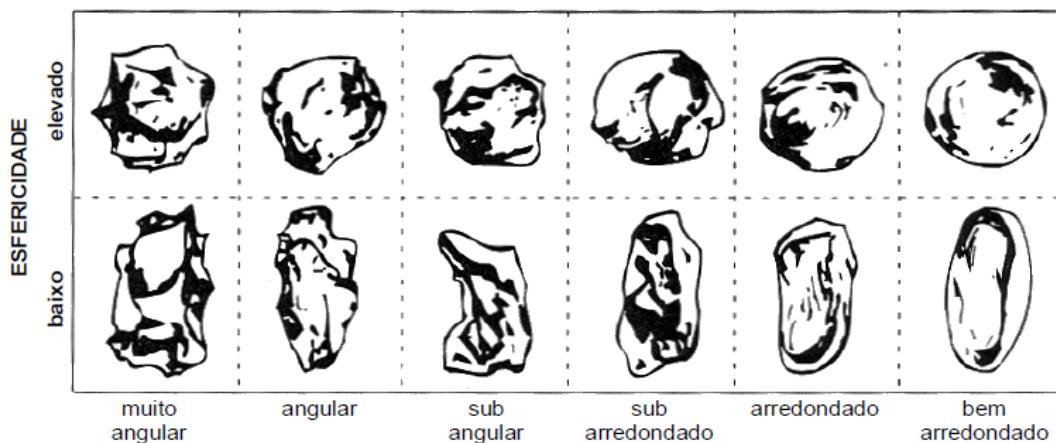


Figura 3.43. Forma de partícula. Grau de esfericidade (Poole *et al.*, 1998).

Uma versão simplificada desta classificação é considerar as partículas de baixa esfericidade diferenciadas em “partículas lamelares ou achatadas” (relação entre espessura pelas outras dimensões, menor do que dado valor) e “partículas alongadas ou aciculadas” (relação entre comprimento e outras dimensões, superior a dado valor).

O índice de forma, segundo Poole *et al.*, (1998) pode ser definido pela relação entre comprimento (maior lado) e largura (menor lado). Deste modo, uma partícula “não-cúbica” pode ser considerada aquela cuja razão entre o seu comprimento e largura seja superior a 3. O índice corresponde ao quociente da massa das partículas não-cúbicas pela massa da amostra.

A norma técnica ASTM D 4791 – Partículas lamelares, alongadas ou planas em agregados grossos – também define partículas lamelares e alongadas como aquelas que possuem relação entre comprimento (maior lado) e espessura (menor lado) acima de um determinado valor. A norma estabelece que inicialmente deve-se secar a amostra, e em seguida peneira-la em peneira de malha 9,5mm. As partículas de cada fração são, portanto, medidas em um dispositivo específico. A quantidade de partículas lamelares e alongadas pode ser contada ou pesada e quantificado sua proporção em relação ao total. No final é realizada a ponderação entre o percentual de partículas lamelares e alongadas pela massa de cada fração.

3.5. Dimensionamento de peneiras industriais

O dimensionamento de uma peneira industrial se baseia no cálculo da área de peneiramento, ou seja, a área do deck onde estão instalados os meios peneirantes (telas de peneiramento). Esta área deve ser suficiente para atender três requisitos básicos:

1 – Ter capacidade de processar a vazão de minério que será alimentada no equipamento. O material que alimenta a peneira deve-se distribuir uniformemente ao longo de sua largura, de forma a atender os mecanismos de processo no decorrer de seu comprimento. Estes mecanismos podem ser entendidos como a variação da altura da camada, desde a região de alimentação até a sua descarga, velocidade de escoamento, estratificação das partículas em função de seus tamanhos, entre outros.

2 – Garantir a eficiência de peneiramento desejada. Partículas com tamanhos menores do que a abertura da tela da peneira presentes na alimentação devem atravessar a tela e seguir o fluxo *undersize*, enquanto partículas com tamanhos maiores devem seguir o fluxo *oversize*, ou seja, devem ficar retidas sobre a tela. Esta premissa é regra geral do

peneiramento, no entanto, dificuldades operacionais, do equipamento e do próprio material, que foram elucidadas nos tópicos anteriores, evidenciam o grau de dificuldade em se garantir uma eficiência de separação em certos processos dentro de padrões mínimos. Na prática, nenhum peneiramento industrial é capaz de atingir eficiência absoluta, portanto se faz necessário que a dimensão do equipamento e todos os parâmetros estabelecidos sejam suficientes para se garantir a eficiência mínima desejada.

3 – Assegurar que as qualidades granulométricas dos produtos fiquem compreendidas dentro das especificações exigidas. Assim como exposto no requisito anterior, sempre haverá a ocorrência de partículas “finas” no *oversize* das peneiras. Pode-se ainda encontrar partículas grossas no fluxo de *undersize*, dependendo de alguns fatores associados a: tipo e condição física das telas, tamanho e forma da abertura da tela e de propriedades das partículas, principalmente relacionado a minérios que contenham grandes proporções de partículas lamelares. A confirmação de que a eficiência de separação absoluta não faz parte da realidade industrial, gera por consequência a necessidade de se estabelecer limites de especificação para as distribuições granulométrica dos produtos (retido e passante). Situação típica é se definir o percentual máximo de finos permitido no *oversize* da operação de peneiramento.

Chaves *et al.*, (2012) descrevem dois requisitos principais para o dimensionamento de uma peneira:

1 – A área necessária para a passagem do *undersize* deve ser provida.

2 – Para haver uma estratificação satisfatória do leito é necessário assegurar que, na descarga, a altura do leito seja no máximo quatro vezes a abertura da tela (por sua vez a altura do leito varia em função da densidade do minério).

Nota-se, portanto, que a primeira concepção trata da área total de peneiramento enquanto a segunda corresponde à “altura de camada” na descarga do *oversize*, parâmetro diretamente relacionado à eficiência e à qualidade granulométrica dos

produtos *undersize* e *oversize*. Estas duas condições são independentes a princípio, porém as duas devem ser atendidas ao mesmo tempo.

Segundo Filho (2017), a boa prática da seleção de peneiras recomenda que a razão entre o comprimento e a largura seja de no mínimo 2:1. Sendo assim, uma peneira de 1.220mm de largura, por exemplo, deverá ter no mínimo 2.440mm de comprimento.

A maioria dos modelos de dimensionamento de peneiras existentes e utilizados globalmente tem como ponto comum a determinação da “área de peneiramento”. Segundo King (2001), a hipótese mais importante neste tipo de abordagem é que a capacidade da peneira seja diretamente proporcional à sua superfície de peneiramento. Neste trabalho, esta grandeza será definida como “capacidade unitária”, e será representada por W_u^F , dado em toneladas por hora por metro quadrado, ou Q_u^F , quando a capacidade for volumétrica, representado pela unidade metros cúbicos por hora por metro quadrado. A capacidade unitária de uma peneira é determinada dentro de uma condição operacional padrão, inclusive quanto à característica da substância alimentada. Portanto, se os valores das variáveis relacionadas com as condições de operação ou com o material se alteram, a capacidade unitária também se altera, aumentando para condições mais árduas e diminuindo para condições mais brandas. Estas modificações podem ser expressas por fatores de correção, aplicados de maneira distinta e específica em cada método de dimensionamento de peneiras.

Em regra geral, a capacidade unitária também está diretamente relacionada com a abertura da tela de peneiramento, ou seja, quanto maior a abertura da tela, maior a capacidade unitária, independente do método proposto.

A seguir serão apresentados três métodos de dimensionamento que são tradicionalmente empregados nos projetos de fabricação de peneiras. O primeiro deles foi desenvolvido há décadas e desde então foi e ainda é bastante aplicado em projetos em todo o mundo. O método denominado “Allis-Chalmers” (MAC), encontra-se originalmente na literatura clássica da Allis Minerals System (ALLIS-CHALMERS, 1953), podendo ser encontrado também em Metso (2005), Chaves *et al.*, (2012) ou em Hilden (2008). O

segundo método proposto por Peter King (MPK) (KING, 2001), é baseado num conceito muito parecido ao de Allis-Chalmers, que apresenta uma metodologia para o cálculo das distribuições granulométricas dos fluxos de *oversize* e *undersize*. O terceiro e último método que será avaliado foi desenvolvido por Karra (MK) (KARRA, 1979). Neste método a referência de capacidade unitária é definida pela vazão mássica do fluxo *undersize* da peneira (vazão mássica que atravessa a superfície de peneiramento) pela área de peneiramento, também expresso em tonelada por hora por metro quadrado. O autor também sugere equações para simulação das distribuições granulométricas dos fluxos *oversize* e *undersize* do deck de peneiramento dimensionado.

Neste trabalho os fatores de correção foram normalizados através das variáveis k_i . Portanto, apesar de nenhum método utilizar todos os fatores apresentados, eles podem ser definidos da mesma maneira:

- k_1 : fator que depende da quantidade de finos na alimentação.
- k_2 : fator que depende da quantidade de grossos na alimentação.
- k_3 : fator relativo à posição do deck da peneira.
- k_4 : fator relativo à utilização de água no peneiramento.
- k_5 : fator relativo ao percentual de área aberta da tela.
- k_6 : fator relativo à forma das partículas.
- k_7 : fator relativo à umidade superficial do minério.
- k_8 : fator relativo ao formato da abertura da tela.
- k_9 : fator relativo à inclinação da peneira.
- k_{10} : fator relativo à densidade aparente do material.
- k_{11} : fator relativo à quantidade de *near size* na alimentação (exclusivo do MK).

3.5.1. Método de Allis-Chalmers (MAC)

A fórmula para o cálculo da área da peneira empregada neste método considera como alimentação a vazão “volumétrica” de material, portanto, utiliza-se a unidade em metro cúbico por hora. A área da peneira pode ser, portanto, calculada a partir da seguinte expressão:

$$A = \frac{Q^F \times k_P}{Q_u^F \times \prod k_i} \quad \text{Equação 3.39}$$

Onde:

- A : área necessária da superfície da peneira [m²].
- Q^F : vazão volumétrica da alimentação [m³/h].
- k_P : fator de projeto [-].
- Q_u^F : capacidade unitária do peneiramento (m³/h)/m².
- $\prod k_i$ = Produtório dos fatores de correção [i variando de 1 a 8].

Naturalmente, é necessário possuir a distribuição granulométrica da alimentação ou os parâmetros da distribuição estatística que a descreva.

A capacidade volumétrica unitária Q_u^F é determinada a partir de ensaios de laboratório sob condições operacionais controladas. Sendo assim, podem existir diferenças nos valores encontrados em cada método. No caso de MAC, a Figura 3.44 apresenta a curva de Q_u^F versus abertura da tela.

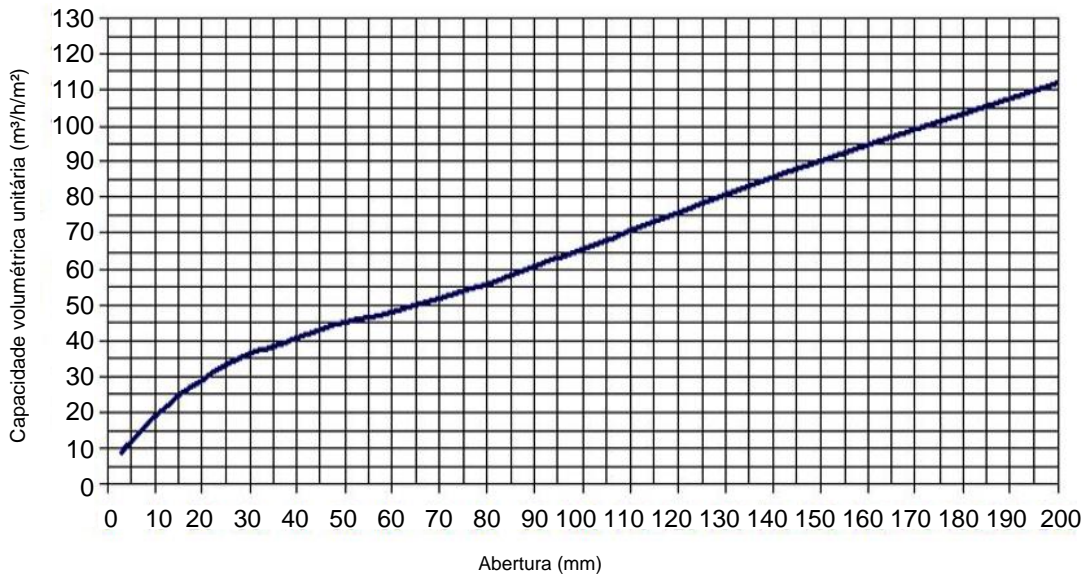


Figura 3.44. Capacidade volumétrica unitária Q_u^F versus abertura da tela (METSO MINERALS, 2005).

Observando a característica da curva apresentada na Figura 3.44, nota-se que os valores acima da abertura de 30mm crescem praticamente de forma linear, enquanto abaixo deste tamanho uma inflexão mais acentuada na curva indica que o peneiramento se torna significativamente mais difícil. De acordo com Allis-Chalmers (1953), não é sugerido se aplicar diretamente o método para aberturas menores do que 1,0mm, devido à grande perda de eficiência a partir desta abertura.

O fator k_I representa a porcentagem de finos na alimentação da peneira, menor que metade do tamanho da abertura da tela. Desta forma, segundo MAC, quanto maior a quantidade de finos, dentro desta faixa de tamanho, menor será a exigência de área de peneiramento. Vale notar, no entanto, que o método não considera os efeitos da maior área superficial associada ao aumento de finos no material, o que implicaria numa maior absorção de umidade e aderência destas partículas entre elas próprias e na abertura da tela, potencializando os riscos de cegamento.

A Figura 3.45 apresenta a curva empregada na definição do fator k_I .

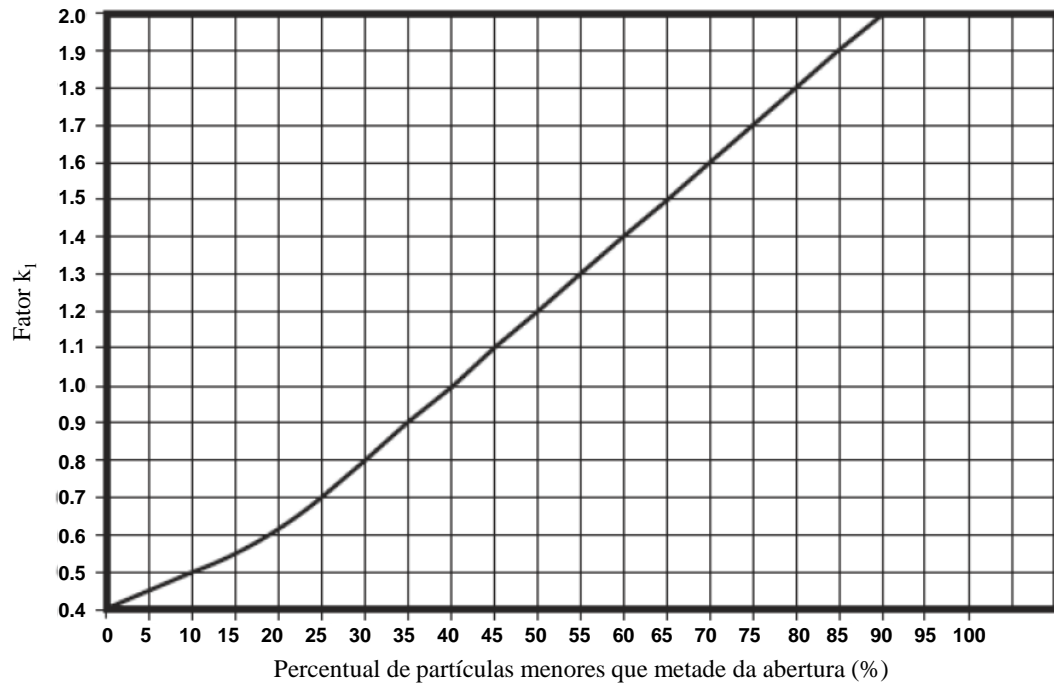


Figura 3.45. Fator devido à porcentagem de finos na alimentação – k_1 (METSO Minerals, 2005).

O fator k_2 , pelo contrário, varia em função da porcentagem de grossos presentes na alimentação. A interpretação deste fator sugere que quanto maior a porcentagem de grossos, mais fácil se torna o peneiramento, representado conseqüentemente por uma peneira de área menor. A maior quantidade de partículas grossas pode significar também numa maior quantidade de interstícios na camada de minério, favorecendo o escoamento e estratificação de partículas finas. A Figura 3.46 apresenta a curva do fator k_2 em função da porcentagem de grossos (*oversize*) na alimentação.

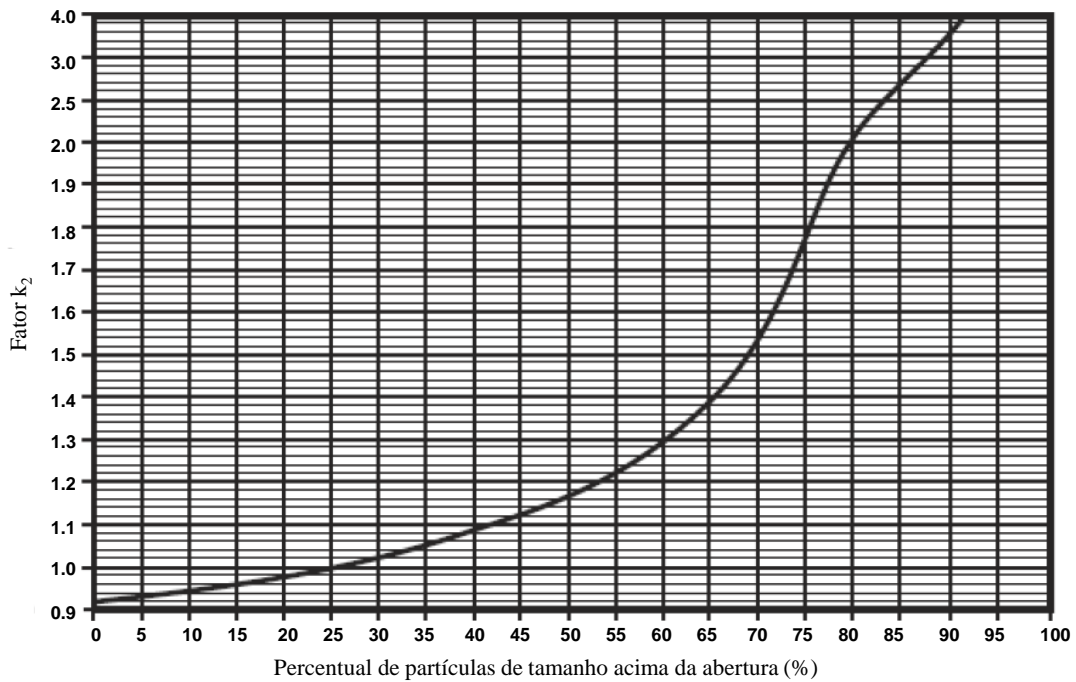


Figura 3.46. Fator devido à porcentagem de grossos na alimentação – k_2 (METSO Minerals, 2005).

O fator de correção k_3 é relativo à posição do deck da peneira. Quando o cálculo é relativo ao primeiro deck, o fator assume simplesmente o valor 1. Para o segundo deck, o valor de 0,9, e para o terceiro deck, 0,8, e assim sucessivamente. A consideração destes valores se deve às diferenças efetivas na área de peneiramento, uma vez que a partir do segundo deck, a alimentação não é realizada a partir do início do comprimento, como ilustra a Figura 3.47.

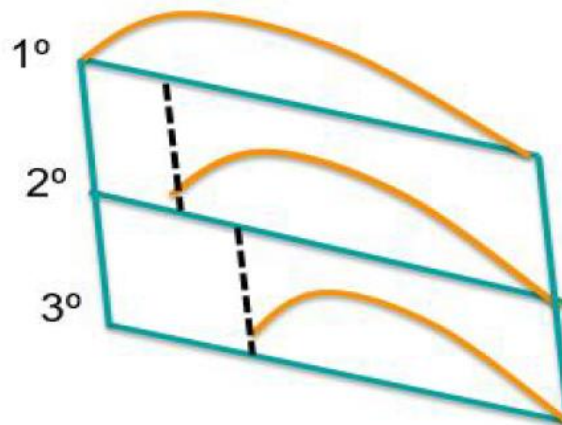


Figura 3.47. Diferenças na área efetiva de peneiramento em cada deck da peneira (FILHO, 2017).

O fator k_4 é utilizado no caso de peneiramento a úmido. A utilização da água no peneiramento auxilia na lavagem de partículas finas e ultrafinas, facilitando o peneiramento. A Tabela 3.15 apresenta os valores utilizados no método, e que estão diretamente relacionados ao tamanho de separação.

Tabela 3.15. Fator k_4 versus tamanho de separação (Adaptado de METSO Minerals, 2005).

Tamanho de separação (mm)	1 - 6,0	6 - 12,0	12 - 25,0	26 - 40,0	41 - 50,0	51 - 75,0	+75,0
k_4	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1,15	1

O fator k_5 está relacionado com o percentual da área aberta da superfície de peneiramento. A rigor, quanto maior a área aberta da tela, menor a dificuldade de peneiramento e menor a área da peneira. A Tabela 3.16 apresenta os valores normalmente utilizados para as correções.

Tabela 3.16. Fator k_5 versus % área aberta (Adaptado de METSO Minerals, 2005).

% Área aberta	10	15	25	30	40	50	60	70
k_5	0,78	0,83	0,9	0,93	0,97	1	1,03	1,05

O fator k_6 é relativo à forma das partículas. Quando se predomina formas mais regulares (cúbicas ou esféricas), é considerado o valor 1. Para formatos irregulares (lamelares, alongadas), o fator assume o valor 0,9. Evidentemente, quanto mais irregulares são as partículas, maior a área de peneiramento.

O fator k_7 varia conforme a umidade do material alimentado no caso de peneiramento a seco. Para valores de umidade menor que 3%, o valor utilizado é igual a 1. Materiais com umidade entre 3% e 5%, k_7 assume o valor de 0,85. Acima de 5% e até 8%, adota-se o valor de 0,7. O método não é recomendado para materiais com umidade superior a 8%.

Peneiramento a seco ou peneiramento “a umidade natural”, como tem sido comumente tratado na atualidade, é sabidamente conhecido por ser fortemente influenciado pelos efeitos das variações da umidade. Valores altos de umidade (acima de 8%) se tornam um grande problema para o peneiramento, devido à maior adesão de finos na superfície

das partículas grossas, gerando grande cegamento nas aberturas das telas e menor habilidade na estratificação. Na prática, observa-se também que quanto menor a abertura, ou o tamanho de separação, maior a dificuldade de peneiramento (FILHO, 2017).

O fator k_8 varia conforme o formato da abertura e tipo predominante das telas, da seguinte forma:

- ✓ Telas de aço quadrada: $k_8=1$ e retangular = 1,05.
- ✓ Placa de aço perfurada quadrada: $k_8=0,75$ e retangular = 0,9.
- ✓ Telas em poliuretano ou borracha quadrada: $k_8=0,8$ e retangular = 0,9.
- ✓ Borracha flexível – abertura quadrada: $k_8=0,9$ e retangular = 1.

O fator k_9 se refere à inclinação da peneira. No caso exclusivo de MAC, o fator também está relacionado ao tipo de movimento da peneira. Peneiras inclinadas convencionais com movimento circular adota-se k_9 igual a 1. Para peneiras horizontais de movimento linear ou peneiras bananas, o fator assume o valor igual a 1,1.

3.5.2. Método de Peter King (MPK)

Diferentemente do método anterior, MPK considera a aplicação de praticamente todos os parâmetros e fatores na forma algébrica. Inicialmente a expressão da capacidade unitária, definida pela variável W_u^F , em toneladas por hora por metro quadrado é dada pela Equação 3.40 e Equação 3.41.

$$W_u^F = 0,783a + 37 \quad \text{se } a \geq 25\text{mm} \quad \text{Equação 3.40}$$

$$W_u^F = 20,0a^{0,33} - 1,28 \quad \text{se } a < 25\text{mm} \quad \text{Equação 3.41}$$

Onde:

- a : abertura da tela da peneira [mm].

Nota-se que o tamanho de abertura de 25mm separa uma tendência linear de crescimento, para valores acima deste tamanho, e um decréscimo mais acentuado, expresso por uma curva potencial, para valores menores que o valor de referência de 25mm, similarmente ao MAC.

O fator de correção k_i também é utilizado para representar modificações em relação à situação padrão. Desta forma a capacidade unitária é multiplicada pelo produto de k_i – $\prod k_i$ – onde i varia de 1 a 10. A capacidade unitária corrigida pode ser expressa, portanto, pela Equação 3.42.

$$W_{u^F}^{F(\text{corrig})} = WuF \times \prod k_i \quad \text{Equação 3.42}$$

O fator k_1 varia conforme ao percentual de finos presentes na alimentação. Isto é, percentual de finos menor que a metade da abertura predominante das telas instaladas na peneira. A Equação 3.43 exhibe esta relação.

$$k_1 = 2P^F(0,5a) + 0,2 \quad \text{Equação 3.43}$$

Onde:

- $P^F(0,5a)$: percentual de finos menor que a metade da abertura da tela da peneira (%).

O fator k_2 representa o percentual de grossos (*oversize*) presente na alimentação da peneira, dado pela Equação 3.44.

$$k_2 = 0,914e^{(4,22\dot{P}^F(a)-3,50)} \quad \text{Equação 3.44}$$

- $\dot{P}^F(a)$: percentual de grossos (*oversize*) presente na alimentação da peneira.

As interpretações práticas dos fatores k_1 e k_2 são as mesmas discutidas para o MAC.

O fator de posição do deck k_3 pode ser corrigido pela Equação 3.45.

$$k_3 = 1,1 - 0,1S \quad \text{Equação 3.45}$$

Onde:

- S : representa a posição do deck; 1 para o primeiro deck, 2 para o segundo deck e assim por diante.

O fator k_4 corrige a capacidade unitária quando a operação é a úmido. De acordo com a Equação 3.46 e Equação 3.47 observa-se que a partir da abertura de 25mm, ocorre perda de capacidade proporcional à diminuição da abertura.

$$k_4 = 1,0 + 2,4 \times 10^{-4} (25 - a)^{2,5} \quad \text{se } a \leq 25\text{mm} \quad \text{Equação 3.46}$$

$$k_4 = 1,0 \quad \text{se } a > 25\text{mm} \quad \text{Equação 3.47}$$

O fator de correção k_5 está relacionado com o percentual da área aberta da superfície de peneiramento f_o . Como observado na Equação 3.48, o valor padrão de área aberta é igual a 50%, portanto, qualquer área aberta diferente desta o fator assumirá valores diferentes de 1.

$$k_5 = \frac{f_o}{50} \quad \text{Equação 3.48}$$

Outra particularidade a ser considerada tem relação com a densidade do material. Para materiais com densidade aparente menor do que 800kg/m³ a área aberta padrão a considerar é de 60% ao invés de 50% para outras densidades. A equação, portanto, deve ser modificada proporcionalmente.

O fator k_6 está associado à forma das partículas. Partículas lamelares e alongadas tem maior dificuldade de atravessar as telas da peneira do que partículas mais regulares. Portanto, se a alimentação chegar a aproximadamente 15% de partículas irregulares k_6 deve ser ajustado em 0,9. Quantidades maiores deste tipo de partícula podem trazer problemas mais significativos e devem ser investigadas especialmente.

O fator de umidade k_7 representa a condição das partículas em relação à sua umidade natural. A Tabela 3.17 apresenta estas condições e valores dos fatores associados.

Tabela 3.17. Fator de capacidade k_7 – Umidade das partículas (Adaptado de King, 2001).

Condição da alimentação	k_7
Material muito úmido, argiloso ou pegajoso	0,75
Material com superfície úmida e materiais empilhados com umidade de até 15% (v/v)	0,85
Material britado seco	1
Material secado artificial ou naturalmente	1,25

O fator k_8 expressa a correção em decorrência do formato predominante da abertura da tela. A Tabela 3.18 apresenta estes valores.

Tabela 3.18. Fator de capacidade k_8 – formato da abertura da tela (Adaptado de King, 2001).

Formato da abertura da tela	k_8
Circular	0,8
Quadrado	1
Retangular (2 x 1)	1,15
Retangular (3 x 1)	1,2
Retangular (4 x 1)	1,25

O fator k_9 tem a função de corrigir a capacidade da peneira em função da inclinação θ da peneira no sentido do escoamento.

$$k_9 = 1,0 - 0,01 (\theta - 15) \quad \text{Equação 3.49}$$

O fator k_{10} tem a função de corrigir as variações de densidade aparente da alimentação. A densidade padrão é igual a 1.600kg/m³. Quanto menor a densidade, maior o volume ou vazão volumétrica ocupada pelo material sobre o deck da peneira, conseqüentemente maior a dificuldade do peneiramento. Esta situação é expressa pela Equação 3.50.

$$k_{10} = \frac{\rho_B}{1.600} \quad \text{Equação 3.50}$$

Onde:

- ρ_B : densidade aparente do material da alimentação.

➤ **Eficiência de peneiramento e distribuição granulométrica dos produtos utilizadas no MPK.**

Toda peneira deveria idealmente deixar passar todo fino presente na alimentação (material menor do que a abertura da tela) para o fluxo de *undersize*. No entanto, não é isto que se observa na prática. Por isto a necessidade de se avaliar a eficiência de peneiramento ou de transmissão, conforme denominado por King (2001). Inicialmente a eficiência está diretamente relacionada à carga de material sobre a superfície da peneira. Quando a taxa de alimentação ultrapassa o valor de 80% da capacidade unitária corrigida ocorre diminuição na eficiência. Isto se deve ao acesso de partículas individuais à superfície da tela ser dificultado em maior ou menor grau. A eficiência também diminui à medida que a taxa de alimentação se torna menor do que 80% da capacidade nominal. Neste caso entende-se que as partículas tendem a saltar sobre a tela quando há pouca vazão sobre a peneira, diminuindo o número de contato com a superfície da tela. Portanto, para se encontrar a eficiência de peneiramento, segundo King (2001), deve-se calcular inicialmente a relação de classificação **RR**, conforme Equação 3.51.

$$RR = \frac{W^F}{W_v^F (corrig) \times A} \quad \text{Equação 3.51}$$

Onde:

- **RR**: Relação de classificação [-].
- W^F : taxa de alimentação sobre a peneira [t/h].
- **A**: Área da peneira selecionada [m²].

A eficiência de peneiramento (transmissão) E pode ser expressa pelas Equações 3.52 e 3.53.

$$E = 0,95 - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 \quad \text{se } RR \geq 0,8 \quad \text{Equação 3.52}$$

$$E = 0,95 - 1,67(0,8 - RR)^2 \quad \text{se } RR < 0,8 \quad \text{Equação 3.53}$$

De posse da eficiência de peneiramento é possível se calcular a vazão mássica passante (*undersize*) através da superfície de peneiramento (Equação 3.54).

$$W^U = EP^F(\alpha)W^F \quad \text{Equação 3.54}$$

Onde:

- W^U : vazão mássica passante através da superfície de peneiramento - *undersize* [t/h].

Para o cálculo da distribuição granulométrica dos fluxos de *undersize* e *oversize* assume-se a premissa que toda faixa discreta de tamanho menor do que a abertura possui a mesma eficiência de peneiramento. Desta forma é possível calcular a distribuição de tamanho discreta do fluxo de *undersize* através das Equações 3.55 e 3.56.

$$p_i^U = \frac{Ep_i^F W^F}{EP^F(\alpha)W^F} = \frac{p_i^F}{P^F(\alpha)} \quad \text{se } d_i < \alpha \quad \text{Equação 3.55}$$

$$p_i^U = \frac{Ep_i^F W^F}{EP^F(\alpha)W^F} = \frac{p_i^F}{P^F(\alpha)} \quad \text{se } d_i < \alpha \quad \text{Equação 3.56}$$

Onde:

- p_i^U : faixa de tamanho na classe i (ou percentual da massa retida simples) no fluxo de *undersize* [%].
- p_i^F : faixa de tamanho na classe i (ou percentual da massa retida simples) no fluxo da alimentação [%].

- d_i = faixa de tamanho i [mm].

Da mesma forma é possível calcular a vazão mássica retida e transmitida na descarga do *deck* da peneira (*oversize*) (Equações 3.57 e 3.58).

$$W^O = (1 - PF(a))W^F + (1 - E)PF(a)W^F \quad \text{Equação 3.57}$$

$$W^O = (1 - EPF(a))W^F \quad \text{Equação 3.58}$$

Onde:

- W^O : vazão mássica retida no *deck* da peneira – *oversize* [t/h].

Com base nesta última equação também é possível calcular a distribuição de tamanho discreta do fluxo de *oversize* da seguinte maneira (Equações 3.59 e 3.60).

$$p_i^O = \frac{(1-E)p_i^F}{(1-EPF(a))} \quad \text{se } d_i < a \quad \text{Equação 3.59}$$

$$p_i^O = \frac{p_i^F}{(1-EPF(a))} \quad \text{se } d_i \geq a \quad \text{Equação 3.60}$$

Onde:

- p_i^O : faixa de tamanho na classe i (ou percentual da massa retida simples) no fluxo de *oversize* [%].

3.5.3. Método de Karra (MK)

A abordagem descrita nos dois métodos anteriores é tradicionalmente utilizada no dimensionamento de peneiras, e em ambas o cálculo envolve a quantidade de material alimentado sobre a peneira. No entanto, segundo Karra (1979), a abordagem mais lógica seria considerar a capacidade unitária como a quantidade de material passante pela peneira (*undersize*) pela área de peneiramento.

De qualquer modo, a aplicação do método é bastante similar aos demais. A capacidade unitária (agora considerada como a capacidade mássica passante pela área de peneiramento) deve ser corrigida por um número de fatores de correção, quando as características do material ou qualquer outro parâmetro de processo ou do equipamento não são os mesmos da condição padrão.

A expressão que resume, portanto, o MK, calcula diretamente a vazão mássica passante na peneira (*undersize*), considerando a “nova” capacidade unitária, a área de peneiramento e os devidos fatores de correção (Equação 3.61).

$$W^U = W_U^U \times \prod k_i \times A \quad \text{Equação 3.61}$$

Onde:

- W^U : vazão mássica passante através da superfície de peneiramento - *undersize* [t/h].
- W_U^U : capacidade unitária passante na superfície de peneiramento [t/h/m²].
- $\prod k_i$: Produtório dos fatores de correção k_i [i variando de 1 a 5, 10 e 11].
- A : Área da peneira selecionada [m²].

Todas as equações propostas por Karra consideram a abertura efetiva da tela da peneira a_p como a sua projeção horizontal, calculada pela Equação 3.62.

$$a_p = (a + \emptyset) \times \cos \theta - \emptyset \quad \text{Equação 3.62}$$

Onde:

- a_p : abertura efetiva da peneira (projeção horizontal) [mm].
- \emptyset : espessura do fio da tela [mm].
- θ : ângulo de inclinação da tela da peneira no sentido do fluxo [°].

A capacidade unitária é determinada em função da abertura projetada da tela da peneira segundo o conjunto de Equações 3.63 e 3.64.

$$W_u^U = 12,13a_p^{0,32} - 10,3 \quad \text{se } a < 51\text{mm} \quad \text{Equação 3.63}$$

$$W_u^U = 12,13a_p^{0,32} - 10,3 \quad \text{se } a < 51\text{mm} \quad \text{Equação 3.64}$$

Matematicamente, há restrições na aplicação de MK para aberturas projetadas menores do que 0,6mm, pois a resultante W_u^U assume valores negativos nesta faixa.

O fator de finos menor que a metade da abertura efetiva da peneira k_1 pode ser expresso pelas Equações 3.65 a 3.68.

$$k_1 = 0,7 + 1,2PF(0,5a_p) \quad \text{para } P^F(a_p) \leq 0,3 \quad \text{Equação 3.65}$$

$$k_1 = 2,053P^F(0,5a_p)^{0,564} \quad \text{para } 0,3 < P^F(a_p) \leq 0,55 \quad \text{Equação 3.66}$$

$$k_1 = 3,35P^F(0,5a_p)^{1,37} \quad \text{para } 0,55 < P^F(a_p) \leq 0,8 \quad \text{Equação 3.67}$$

$$k_1 = 5,0P^F(0,5a_p) - 1,5 \quad \text{para } P^F(a_p) > 0,8 \quad \text{Equação 3.68}$$

O fator de grossos k_2 é dado pelas Equações 3.69 e 3.70

$$k_2 = 1,6 - 1,2\dot{P}^F(a_p) \quad \text{se } \dot{P}^F(a_p) \leq 0,87 \quad \text{Equação 3.69}$$

$$k_2 = 4,275 - 4,25\dot{P}^F(a_p) \quad \text{se } \dot{P}^F(a_p) > 0,87 \quad \text{Equação 3.70}$$

O fator de posição do *deck* de peneiramento k_3 no MK é calculado tal qual a Equação 3.44 do MPK, utilizando também os mesmos critérios.

Para se determinar o fator de correção para o tipo de operação (a úmido ou a seco) k_4 , inicialmente deve ser determinado o parâmetro T , dado em mm (Equação 3.71).

$$T = 1,26a_p \quad \text{Equação 3.71}$$

As Equações 3.72 a 3.81 expressam k_4 para cada condição de T .

$$k_4 = 1,0 \quad \text{para } T < 1 \quad \text{Equação 3.72}$$

$$k_4 = T \quad \text{para } 1 \geq T < 2 \quad \text{Equação 3.73}$$

$$k_4 = 1,5 + 0,25T \quad \text{para } 2 \geq T < 4 \quad \text{Equação 3.74}$$

$$k_4 = 2,5 \quad \text{para } 4 \geq T < 6 \quad \text{Equação 3.75}$$

$$k_4 = 3,25 - 0,125T \quad \text{para } 6 \geq T < 10 \quad \text{Equação 3.76}$$

$$k_4 = 4,5 - 0,25T \quad \text{para } 10 \geq T < 12 \quad \text{Equação 3.77}$$

$$k_4 = 2,1 - 0,05T \quad \text{para } 12 \geq T < 16 \quad \text{Equação 3.78}$$

$$k_4 = 1,5 - 0,0125T \quad \text{para } 16 \geq T < 24 \quad \text{Equação 3.79}$$

$$k_4 = 1,35 - 0,00625T \quad \text{para } 24 \geq T < 32 \quad \text{Equação 3.80}$$

$$k_4 = 1,15 \quad \text{para } T \geq 32 \quad \text{Equação 3.81}$$

A capacidade unitária também está relacionada ao percentual de área aberta da superfície de peneiramento, tanto que foi gerada dentro de uma condição padrão utilizando telas com fios de aço carbono. O cálculo da área aberta f_o para esta condição pode ser expressa pela Equação 3.82.

$$f_o(aço) = 21,5 \times \log_{10} a + 37 \quad \text{Equação 3.82}$$

Caso seja utilizado outro tipo de tela, ou área aberta diferente desta expressão, a capacidade unitária W_U^U deve ser ajustada pelo fator k_5 segundo a Equação 3.83.

$$k_5 = \frac{f_o}{f_o(a\phi o)} \quad \text{Equação 3.83}$$

O fator de correção k_{10} corrige as variações de densidade aparente, e é aplicado de maneira idêntica à Equação 3.50 apresentada no MPK.

MK é um dos poucos métodos que trata sobre os efeitos da quantidade de partículas *near size* na alimentação. Neste caso o tamanho *near size* é aqui representado por partículas cujo tamanho seja compreendido entre o intervalo de $0,75a_p$ e $1,25a_p$. Matematicamente se recomenda a Equação 3.84, através do fator k_{11} , para correção da influencia de *nearsized* na alimentação da peneira.

$$k_{11} = 0,975 (1 - P^F(1,25a_p) + P^F(0,75a_p))^{0,511} \quad \text{Equação 3.84}$$

➤ **Eficiência de peneiramento e distribuição granulométrica dos produtos utilizados no MK.**

O cálculo de eficiência de peneiramento utilizado no MK se origina do modelo de partição de *Rosin-Rammler* dado pela Equação 3.85.

$$c(d) = 1 - e^{\left[-0,693 \left(\frac{d}{d_{50}}\right)^{5,9}\right]} \quad \text{Equação 3.85}$$

Onde:

- $c(d)$: função de partição de partículas de tamanho d para o fluxo de *oversize* [%].
- d : faixa de tamanho presente na alimentação [mm].
- d_{50} : tamanho médio de separação [mm].

A rigor é o tamanho médio d_{50} que determinará a eficiência de separação. Valores maiores que o tamanho da abertura geram altas eficiências e *vice-versa*.

O tamanho médio d_{50} atingido dependerá primeiramente da abertura efetiva a_p , que é função do coeficiente de carga K dado pela Equação 3.86 e pelo fator de correção de *nearsizes* dado pela Equação 3.87.

$$K = \frac{W^F P(a_p) / A}{W_U^U k_1 k_2 k_3 k_5 k_{10}} \quad \text{Equação 3.86}$$

$$\frac{d_{50}}{a_p} = \frac{k_{11}}{K^{0,148}} \quad \text{Equação 3.87}$$

Utilizando as equações anteriores, pode-se desenvolver equações de distribuição granulométrica dos produtos *undersize* e *oversize*, dados respectivamente pelas Equações 3.88 e 3.89.

$$p_i^U = \frac{[1 - c(d)] p_i^F}{\sum_i [1 - c(d)] p_i^F} \quad \text{Equação 3.88}$$

$$p_i^O = \frac{c(d) p_i^F}{\sum_i c(d) p_i^F} \quad \text{Equação 3.89}$$

As Equações 3.90 e 3.91 determinam a eficiência de peneiramento com base neste método.

$$E^U = \frac{\sum_i [1 - c(d)] p_i^F}{P^F(a)} \quad \text{Equação 3.90}$$

Outro indicador de efetividade operacional utilizado no MK é o AUF (*area utilization factor* ou fator de utilização de área). A Equação 3.91 apresenta este cálculo.

$$AUF = \frac{W^F P^F(a) E^U}{W_U^U k_1 k_2 k_3 k_5 k_{10} k_{11} A} \quad \text{Equação 3.91}$$

No qual se estabelecem as seguintes considerações:

- ✓ Se $AUF = 1 \Rightarrow$ capacidade da peneira exatamente equilibrada para a operação.
- ✓ SE $AUF > 1 \Rightarrow$ capacidade da peneira sobrecarregada.
- ✓ Se $AUF < 1 \Rightarrow$ capacidade da peneira ociosa.

3.5.4. Determinação da largura da peneira

De posse da definição da área da peneira, o próximo passo é se definir seu comprimento e largura. De modo geral, todos os métodos determinam a largura da peneira considerando a altura limite da camada de material na descarga da peneira. Conforme recomendado pela maioria dos fabricantes de peneiras, a altura de camada de material na descarga deve ser equivalente a no máximo quatro vezes o tamanho da abertura da tela. A Equação 3.92 apresenta o cálculo da altura desta camada, em função, principalmente da largura da peneira.

$$t_B = \frac{W^o}{Du\rho_B} \quad \text{Equação 3.92}$$

Onde:

- W^o : vazão mássica na descarga da peneira (*oversize*) [t/h].
- D : Largura da peneira [m].
- u : velocidade de transporte das partículas sobre a superfície de peneiramento [m/h].
- ρ_B : densidade aparente [t/m³].

Com base na experiência prática de usuários e fabricantes, é recomendado que a razão comprimento *versus* largura seja de, no mínimo, 2:1 (FILHO, 2017).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho pode ser organizado em quatro etapas principais: 1) amostragem, 2) caracterização das amostras 3) avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento e 4) dimensionamento de peneiras e ajustes no método de Peter King. Na etapa de amostragem foram coletadas 37 amostras de diversos materiais produzidos na indústria mineral nacional, tais como minério de ferro e de alumínio, agregados para a construção civil, como gnaiss, granito e calcário. Na etapa de caracterização todas as amostras foram submetidas a cinco análises principais: massa específica aparente, massa específica de sólidos, umidade, índice de forma e análise granulométrica. Na terceira etapa foi proposto um ensaio padrão de análise granulométrica com variação do tempo de peneiramento. Parâmetros gerados neste ensaio indicaram o grau de peneirabilidade de cada amostra, que foi definido como “cinética de peneiramento”, com o intuito de se medir a dificuldade de cada material quando submetido ao processo de peneiramento. Na quarta e última etapa foram selecionadas apenas amostras coletadas dos fluxos de alimentação das peneiras industriais. Em paralelo foram levantados todos os dados operacionais, dos equipamentos, assim como do próprio material. Estes dados foram utilizados nos cálculos de dimensionamento dos três métodos apresentados neste trabalho: MAC, MPK e MK. Em seguida, foram comparados os resultados destes modelos com a dimensão real da peneira, e por fim, ajustes foram realizados nas equações de capacidade unitária do MPK, através da aplicação do parâmetro de cinética de peneiramento estabelecido na etapa anterior. No final pretende-se alcançar maior assertividade e confiabilidade na seleção de peneiras para novos projetos, bem como nas tomadas de decisão das operações existentes.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma macro de todo o trabalho:

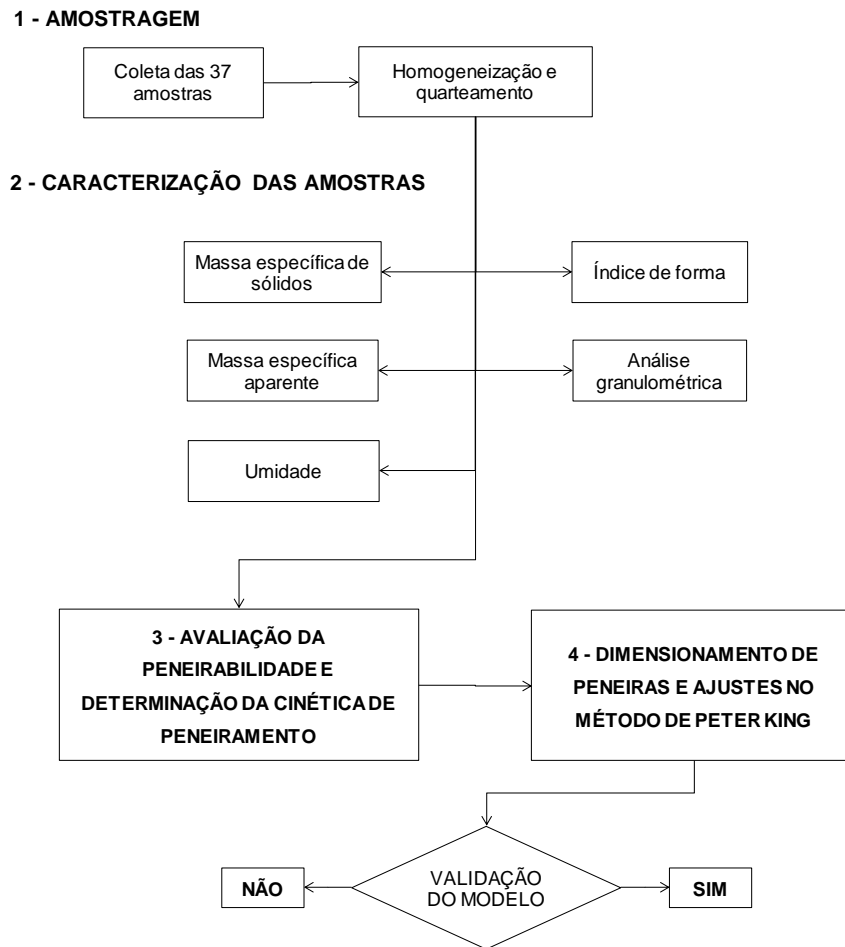


Figura 4.1. Fluxograma macro do trabalho

4.1. Amostragem

O conjunto amostral foi definido de modo a contemplar materiais que fossem abundantes no território brasileiro e comumente encontradas nos processos de peneiramento da indústria mineral. Desta maneira, foram coletadas amostras de: itabirito e hematita (minério de ferro), sulfeto de ouro (minério de ouro), bauxita (minério de alumínio), gnaíse, calcário e granito (britas, areias industriais e agregados em geral) e quartzo (areia de aluvião). Totalizou-se 37 amostras, provenientes de diversas plantas de beneficiamento, distribuídas desde as alimentações dos processos até aos produtos finais. A Tabela 4.1 apresenta um resumo descritivo de todas as amostras, contendo o material, massa da amostra e faixa granulométrica estimada (conforme informações prévias do processo as quais foram coletadas), além do tipo de processo (umidade natural ou a úmido).

Tabela 4.1. Descrição das 37 amostras utilizadas no trabalho

ID amostra	Material	Faixa granulométrica (mm)	Tipo de peneiramento	Massa da amostra inicial (kg)
Am1	Itabirito	<18	A úmido	10,4
Am2	Itabirito	18 - 8	A úmido	14,1
Am3	Sulfeto de ouro	<1,0	A úmido	4,7
Am4	Gnaíse / Areia Industrial	<20	Umidade natural	12,1
Am5	Gnaíse / Areia Industrial	<25	Umidade natural	11,7
Am6	Gnaíse	70 - 20	Umidade natural	59,6
Am7	Gnaíse	35 - 20	Umidade natural	59,9
Am8	Gnaíse	50 - 20	Umidade natural	62,3
Am9	Gnaíse	40 - 20	Umidade natural	73,4
Am10	Gnaíse	25 - 20	Umidade natural	54,2
Am11	Gnaíse	25 - 15	Umidade natural	49,3
Am12	Gnaíse	15 - 5	Umidade natural	53,2
Am13	Gnaíse	10 - 5	Umidade natural	45,2
Am14	Gnaíse	<5	Umidade natural	35,6
Am15	Gnaíse	<5	Umidade natural	39,2
Am16	Itabirito	1,4 - 0,15	A úmido	5,2
Am17	Itabirito	1,4 - 0,15	A úmido	7,2
Am18	Hematita	<15	Umidade natural	68,3
Am19	Hematita	100 - 35	Umidade natural	75,9
Am20	Hematita	<15	Umidade natural	48,9
Am21	Bauxita	110 - 25	A úmido	63,2
Am22	Bauxita	8 - 0,5	A úmido	48,2
Am23	Quartzo / Areia de aluvião	<1	A úmido	8,2
Am24	Quartzo / Areia de aluvião	<0,5	A úmido	9,5
Am25	Granito	<10	Umidade natural	23,2
Am26	Granito	40 - 20	Umidade natural	53,2
Am27	Granito	20 - 5	Umidade natural	43,1
Am28	Granito	<5	Umidade natural	15,0
Am29	Calcário / Areia Industrial	<1	Umidade natural	12,3
Am30	Gnaíse / Areia Industrial	<2	Umidade natural	9,4
Am31	Gnaíse / Areia Industrial	<2	Umidade natural	11,0
Am32	Calcário	<8	Umidade natural	26,2
Am33	Calcário	8 - 2	Umidade natural	29,4
Am34	Gnaíse	<6	Umidade natural	16,2
Am35	Gnaíse	<2	Umidade natural	9,0
Am36	Gnaíse	6 - 2	Umidade natural	18,3
Am37	Bauxita	<0,5	A úmido	5,6

Cada uma das 37 amostras foi inicialmente homogeneizada e quarteada em pilha alongada, seguido de quarteamento em pilha cônica, de modo a se garantir a representatividade do lote inicial e massa suficiente para cada análise seguinte. A Figura

4.2 apresenta um diagrama ilustrando as etapas de amostragem e a Figura 4.3 apresenta imagens da preparação da amostra de bauxita Am37:

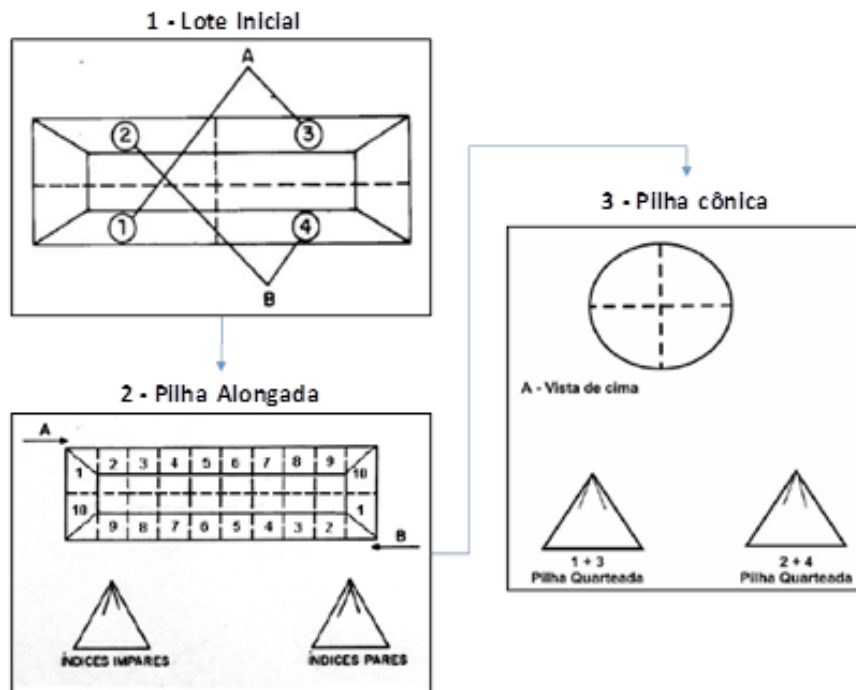


Figura 4.2. Diagrama ilustrando o procedimento de homogeneização e quartejamento das amostras



Figura 4.3. Etapas de preparação da amostra de bauxita Am37 - (a) Lote inicial. (b) Pilha alongada. (c) Pilha cônica.

No final do quartejamento, foram separados quantidades e pesos adequados de alíquotas para atendimento a todas as seguintes análises e ensaios. As quantidades utilizadas serão descritas nos respectivos tópicos correspondentes neste capítulo.

As amostras Am1, Am4, Am5, Am6, Am7, Am18, Am23, Am25, Am29, Am32 e Am34 foram coletadas em fluxos de alimentação das peneiras, cujos respectivos processos foram avaliados especialmente na quarta etapa deste trabalho.

4.2. Caracterização das amostras

A etapa de caracterização das amostras teve como objetivo medir cinco propriedades importantes no processo de peneiramento, seja em laboratório ou industrial. São elas: massa específica de sólidos, massa específica aparente, umidade, índice de forma e distribuição granulométrica (que será melhor descrita no próximo tópico). A seguir são apresentados os equipamentos e instrumentações, normas técnicas e referências bibliográficas utilizados para cada análise:

4.2.1. Massa específica de sólidos

A massa específica de sólidos foi determinada em duplicata a partir do método de picnometria, conforme citado no capítulo 3 deste trabalho. A Equação 3.37 deste mesmo capítulo foi utilizada para o cálculo da massa específica de sólidos de cada material. A Figura 4.4 apresenta um exemplo de medida realizada com a amostra Am1 (itabirito).

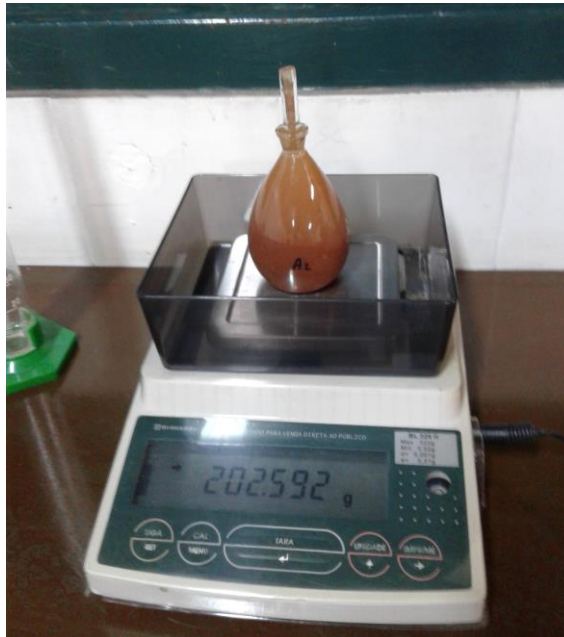


Figura 4.4. Análise de massa específica de sólidos da amostra Am1 via picnometria.

Para esta análise foram utilizados os seguintes equipamentos e normas técnicas:

- Equipamentos e instrumentação: Picnômetro de vidro de 100ml, balança de precisão, água destilada e pissite.
- Normas e referencias bibliográficas: ABNT NBR 6458:2016 e Sampaio *et al.*, (2007).

4.2.2. Massa específica aparente

Para a análise de massa específica aparente foram utilizados os seguintes equipamentos e método:

- Equipamentos e instrumentação: Proveta de 1000ml e balança de precisão.
- Normas e referencias bibliográficas: ABNT NBR NM 52:2003, ISO 15968:2016, ISO 3852:2007 e Sampaio *et al.*, (2007).

O procedimento proposto foi realizado em duplicata e seguiu a seguinte ordem:

- 1) Pesou-se a proveta graduada vazia (P_p – massa em “g”).

- 2) Em seguida foi adicionada a amostra até o nível de 1000ml. Em seguida foi medido o peso total (proveta + amostra) (P_t – massa em “g”).
- 3) Utilizou-se a Equação 4.1 para se calcular a massa específica aparente ρ_B em g/cm³:

$$\rho_B = \frac{P_t - P_p}{1000} \quad \text{Equação 4.1}$$

4.2.3. Umidade

A análise de umidade foi executada em duplicata a partir dos seguintes equipamentos e através do método tradicional:

- Equipamentos e instrumentação: Estufa e balança de precisão.
- Normas e referencias: ISO 2596:2006, ISO 3087:2011, ABNT NBR 9939:2011 e ABNT NBR 9775:2011 e Sampaio *et al.*, (2007).

A ordem do procedimento foi a seguinte:

- 1) Retirou-se uma alíquota de acordo com os dados apresentados na Tabela 4.2 (ISO 3087:2011) para realização do ensaio.

Tabela 4.2. Massa mínima para análise de umidade (ISO 3087:2011).

Faixa granulométrica (mm)		Massa mínima (kg)
De	Até (inclusive)	
22,4	31,5	10
10	22,4	5
-	10	1

- 2) Pesou-se a alíquota úmida numa balança eletrônica com precisão mínima de 1g e registrou-se o valor (P_1).
- 3) A alíquota foi inserida na estufa para secagem com temperatura regulada a 105°C durante 8 horas.
- 4) Após a secagem, a amostra foi pesada e o valor registrado (P_2).

5) Determinou-se a umidade m conforme a Equação 3.42:

$$m = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad \text{Equação 4.2}$$

4.2.4. Índice de forma

Para atender o objetivo desta análise serão considerados os seguintes critérios para classificação da forma das partículas:

✓ Partículas irregulares – P.I. (forma lamelar ou alongada): $d_1 \geq 3d_2$. Partículas alongadas e lamelares foram definidas tanto por Wills (2006) quanto por Drzymala (2007) como partículas “irregulares”, por apresentarem uma ou mais direção de orientação assimétrica em relação às demais. Para os fins deste trabalho considerou-se como lamelar ou alongada toda a partícula cuja razão entre comprimento e largura fosse maior ou igual a 3.

✓ Partículas regulares (forma esférica ou cúbica): $d_1 < 3d_2$ ($d_1 \approx d_2$)

Sendo que, d_1 é a medida estimada do maior lado da partícula (comprimento) e d_2 é a medida estimada do menor lado (da largura). A figura 4.5 ilustra estas duas formas:

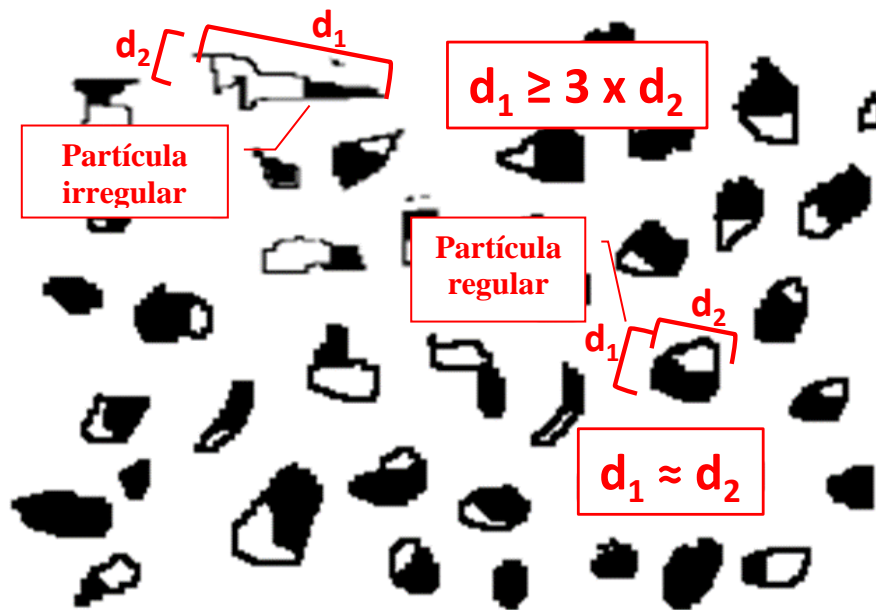


Figura 4.5. Ilustração da análise de determinação de forma de uma partícula lamelar e outra regular.

A quantificação do índice de forma foi determinada através do método tradicional a partir dos seguintes equipamentos:

- Equipamentos e instrumentação: Lupa binocular, peneiras de abertura 3,36mm e 0,149mm.
- Normas e referencias: ABNT NBR 7809:2019 e ASTM D4791-10.

A análise consiste em uma estimativa baseada na avaliação visual a olho nu e lupa binocular, com foco exclusivo aos objetivos deste trabalho. Desta forma, a alíquota destinada foi separada em três frações granulométricas: $>3,36\text{mm}$; $<3,36$ e $>0,149\text{mm}$ e $<0,149\text{mm}$. A fração $>3,36\text{mm}$ foi quantificada a olho nu, enquanto a fração $<3,36$ e $>0,149\text{mm}$ por lupa binocular com aumento de até 4 vezes (Figura 4.6). A fração mais fina, $<0,149\text{mm}$ foi descartada.



Figura 4.6. Contagem de partículas irregulares na fração $<3,36\text{mm}$ e $>0,149\text{mm}$ por lupa binocular, aumento de 4x.

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1) A alíquota separada de cada amostra foi inicialmente seca em estufa a 105°C .
- 2) Em seguida foi realizado o fracionamento utilizando-se as peneiras de $3,36\text{mm}$ e $0,149\text{mm}$ e registrada as massas de cada fração.
- 3) As frações $>3,36\text{mm}$ e $<3,36\text{mm}$ e $>0,149\text{mm}$ foram destinadas para as análises, enquanto a fração $<0,149\text{mm}$ foi descartada.
- 4) Cada fração destinada às análises foi quarteada e reduzida até se atingir uma quantidade aproximada de 100 partículas.
- 5) A quantidade total de partículas (*P.T.*) e irregulares - %*P.I.* (lamelares e alongadas) foi contabilizada e registrada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Quadro de preenchimento dos dados utilizados para o cálculo do “Índice de forma” (%*P.I.*)

Fração (mm)	Massa (%)	Partículas Total	Partículas Irregulares	% <i>P.I.</i>
>3,36				
<3,36 >0,149				
<0,149				
TOTAL				
TOTAL (>0,149mm)				

6) O percentual de partículas irregulares (%*P.I.*) em cada fração foi calculado conforme Equação 4.3.

$$\%P.I. = \frac{n^{\circ} P.I.}{n^{\circ} P.T} \quad \text{Equação 4.3}$$

7) O índice de forma foi calculado a partir da ponderação entre o percentual de partículas irregulares e o percentual da massa retida em cada fração (Equação 4.4).

$$\text{Índice de Forma} = \frac{\%P.I.(> 3,36mm) \times \%Massa > 3,36mm + \%P.I.(> 0,149mm) \times \%Massa > 0,149mm}{\%Massa > 3,36mm + \%Massa > 0,149mm} \quad \text{Equação 4.4}$$

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram imagens das amostras de calcário (Am32) e hematita (Am18), separadas e fracionadas para a análise do índice de forma.

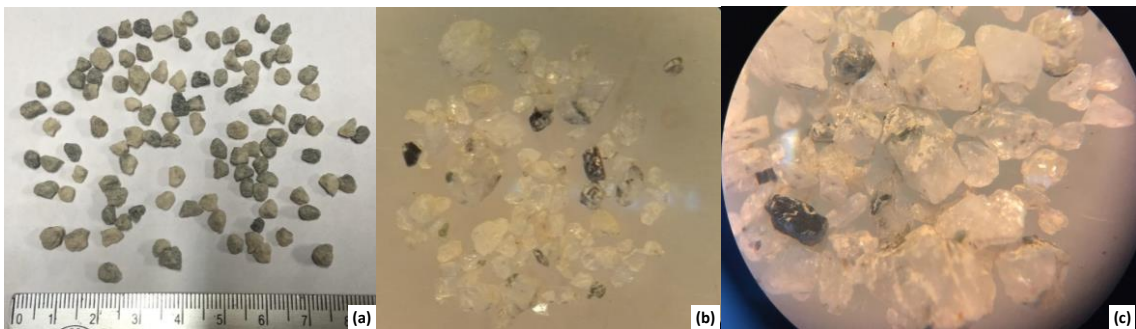


Figura 4.7. Imagem da amostra de calcário (Am32) destinada à análise do índice de forma – (a) Fração >3,36mm (b) Fração <3,36>0,149mm, aumento de 2x (c) Fração <3,36>0,149mm, aumento de 4x.



Figura 4.8. Imagem da amostra de hematita (Am18) destinada à análise do índice de forma – (a) Fração $>3,36\text{mm}$ (b) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 2x (c) Fração $<3,36>0,149\text{mm}$, aumento de 4x.

4.3. Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento

Nesta etapa se propõe investigar as características de um sistema particulado mineral em relação ao seu grau de peneirabilidade, ou nível de dificuldade de peneiramento. Características estas já estudadas por Chaves (2012) e Filho (2017). Devido à inexistência de parâmetro que possa quantificar este atributo do sistema de partículas, foi desenvolvido um ensaio padrão, baseado numa sequência de ensaios de análise granulométrica, no qual o principal parâmetro foi o tempo de peneiramento. Desta forma, cada análise granulométrica foi realizada dentro de um tempo pré-estabelecido. Os tempos utilizados nas quatro análises denominadas de análises “intermediárias” foram os seguintes: 20s, 40s, 60s e 80s. Para a análise padrão utilizou-se o tempo de 20min ou 1220s. A série de peneiras definida neste estudo se originou da série clássica *Tyler* (todas as peneiras abaixo de 25,4mm), enquanto as malhas acima de 25,4mm foram baseadas na norma ABTN-NBR NM-ISO 3310-1:2010. A Tabela 4.4 apresenta a relação das peneiras principais e as que foram utilizadas somente como alívio conforme a necessidade de cada ensaio.

Tabela 4.4. Série de peneiras utilizadas nos ensaios de cinética de peneiramento - adaptado da série Tyler e ABTN-NBR NM-ISO 3310-1:2010*

Peneiras principais		Peneiras de alívio		Peneiras principais		Peneiras de alívio	
Abertura(mesh)	Abertura (mm)	Abertura (mesh)	Abertura (mm)	Abertura(mesh)	Abertura (mm)	Abertura (mesh)	Abertura (mm)
	76,0 *					14	1,4
	50,0 *					16	1,2
	38,0 *			18	1,0		
1	25,4			20	0,841		
		7/8	22,60			25	0,71
3/4	19,0					30	0,60
		5/8	16,00			35	0,50
		1/2	13,50			40	0,42
1/2	12,7					45	0,35
		4/9	11,20	50	0,297		
3/8	9,5					60,00	0,25
		1/3	8,00			70,00	0,21
		1/4	6,73			80,00	0,18
		1/4	6,35	100	0,149		
		3 1/2	5,66	120	0,125		
4	4,8					140	0,105
		5	4,00			170	0,088
6	3,4					200	0,074
		7	2,83			230	0,063
		8	2,38			270	0,053
10	2,0			325	0,044		
		12	1,68	400	0,037		

Para a execução do procedimento foram utilizados ainda: um cronômetro, uma balança de precisão e outros acessórios auxiliares (bandejas, trinchas, espátulas, etc).

A massa mínima permitida por análise foi definida em relação ao maior tamanho de partícula, sendo suficiente em relação às normas técnicas adotadas para cada material (Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Massa mínima da amostra dos ensaios de análise granulométrica para cada faixa de tamanho

Dimensão máxima característica dos grãos (mm)	Massa mínima da amostra para o ensaio (kg)
>50	20
<50>25	10
>5<25	5
<5	2

O ensaio deve iniciar pela definição do maior tamanho de partícula encontrado na amostra. A partir desta primeira avaliação é definida a maior malha de peneira conforme a série representada na Tabela 4.2. Estimando-se o maior tamanho de partícula, define-se a massa mínima que será utilizada no ensaio. Realizam-se em seguida homogeneização e quarteamento das amostras gerando-se alíquotas representativas para as cinco análises. A tolerância admitida entre os valores das massas destas alíquotas foi estabelecida em +/-5%. Além disto, todas as características e principais propriedades da substância do lote inicial devem ser maximamente mantidas, principalmente a umidade, o grau de coesão e aderência de finos nas amostras. A análise granulométrica padrão foi fundamentada nos procedimentos normativos clássicos, e visou garantir a maior eficiência possível de peneiramento em todas as malhas. Para tanto, após homogeneização e quarteamento, a amostra destinada a esta análise foi seca para retirada da umidade e desagregada, visando à eliminação de finos aderidos nas malhas superiores, o que seria considerado um entrave para a eficiência deste processo. O tempo de análise foi de 20min. Os resultados foram validados utilizando o método de Gaudin – estimativa da massa máxima teórica por peneira, i.e., as massas restantes em cada peneira ao final do ensaio devem ser menores do que as massas calculadas pela Equação 3.25 (Capítulo 3). Em caso de não conformidade com o método, uma peneira de “alívio”, extraída da mesma série apresentada, foi inserida logo acima da malha não conforme, e a análise é repetida consecutivamente até que todas as malhas fossem validadas. Os resultados finais obtidos passam, portanto, a representar a curva real de distribuição granulométrica da amostra.

As análises intermediárias se diferenciaram por processar amostras à umidade natural, de maneira que fossem preservadas suas características físicas originais. O tempo de peneiramento foi a principal variável desta análise, tendo sido empregados os seguintes: 20s, 40s, 60s e 80s. A série de peneiras foi a mesma determinada na análise padrão de cada amostra (após a validação de todas as malhas). Nesta etapa, portanto, não foi necessária a validação pela equação de Gaudin, uma vez que já não seria esperada eficiência máxima de peneiramento em nenhuma das malhas. Ao final de cada análise granulométrica (padrão ou intermediária), uma curva da distribuição granulométrica

(%passante x abertura – mm) foi gerada. A Figura 4.9 resume todas as etapas do ensaio sugerido

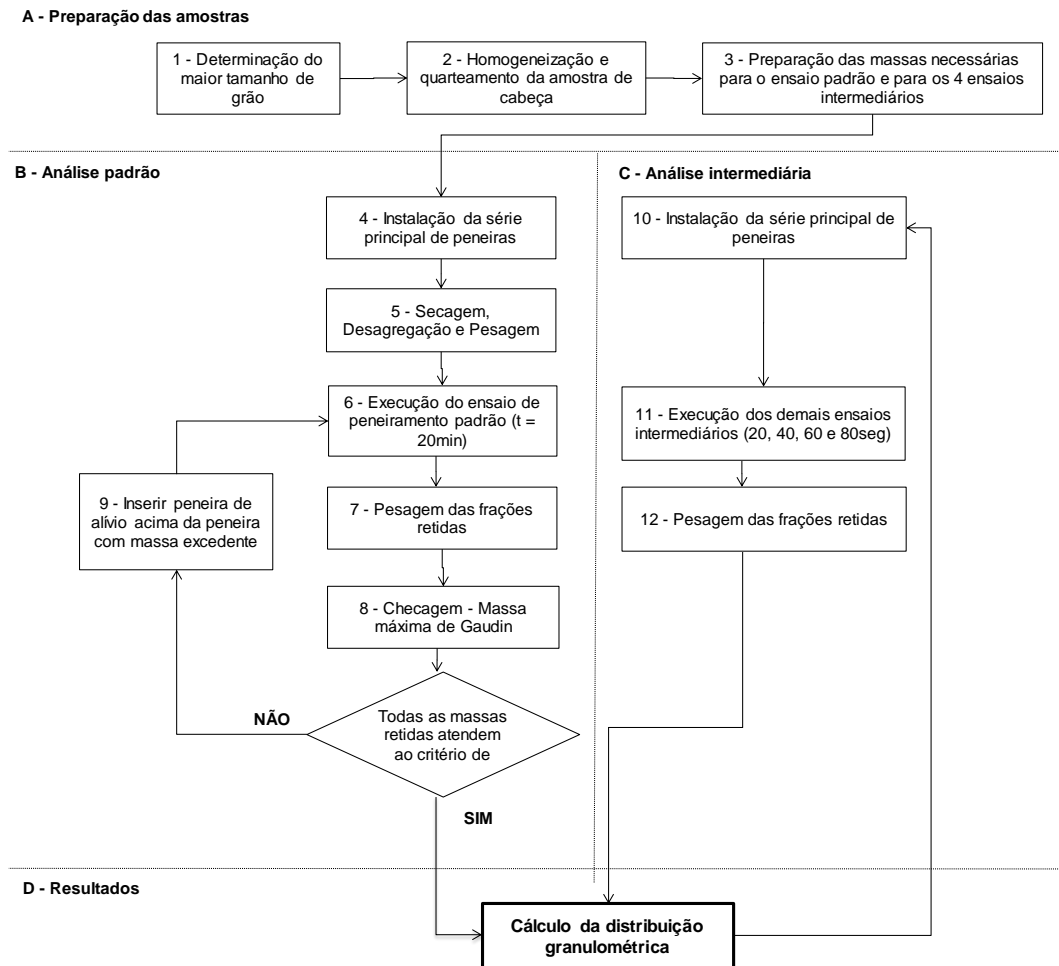


Figura 4.9. Diagrama do ensaio de cinética de peneiramento

Parte-se do princípio, que quanto maior o tempo de peneiramento, maior a massa passante nas peneiras, logo mais “fino” será o formato da curva granulométrica. Amostras que apresentem características mais favoráveis ao peneiramento deverão gerar curvas granulométricas semelhantes (menor dependência do tempo), enquanto para as demais amostras, quanto maior o grau de dificuldade de peneiramento, maior a dependência do tempo, e maior a diferença entre as distribuições granulométricas geradas.

O parâmetro utilizado para fins de avaliação comparativa entre as curvas foi o tamanho médio d_{50} (WILLS, 2006). A curva de cinética pode, portanto, ser obtida a partir da correlação entre o d_{50} de cada distribuição granulométrica e o tempo de peneiramento. A avaliação dos resultados será baseada nos parâmetros obtidos em cada função de correlação. Serão também avaliadas as principais propriedades físicas das amostras e como estas podem influenciar nos resultados.

4.4. Dimensionamento de peneiras e ajustes no método de Peter King

A experiência prática industrial da operação de peneiramento demonstra que são muitos os desafios enfrentados no dia a dia. Muitas vezes este fato é decorrente da má operação e utilização dos equipamentos (sobrecargas, faltas de manutenção nos equipamentos, telas furadas e aberturas mal dimensionadas, etc), mas também de dimensionamentos e seleções de equipamentos mal sucedidos, resultando em áreas de peneiras super ou subdimensionadas em relação à real capacidade nominal. De fato, são vários os modelos que se propõe auxiliar na seleção de peneiras. Muitos deles utilizados há vários anos na indústria de mineração, como os que foram citados no Capítulo 3 deste trabalho e que serão aqui investigados. No entanto, cada um destes modelos trazem, por vezes, diferenças substanciais entre eles, dificultando a tomada de decisão dos engenheiros de processos e projetistas. Mediante estas incertezas, serão avaliadas onze operações de peneiramento, cujas amostras: Am1, Am4, Am5, Am6, Am7, Am18, Am23, Am25, Am29, Am32 e Am34 foram coletadas, respectivamente, dos fluxos de alimentação de cada peneira das respectivas operações. Estas operações foram selecionadas devido ao rigoroso controle operacional, e principalmente por serem considerados projetos de referência, do ponto de vista de dimensionamento, capacidade de alimentação e qualidade dos produtos.

Paralelamente foram levantados os principais dados destas operações, dos equipamentos e principalmente do próprio material, suficientes para serem aplicados nos três métodos preditivos que serão aqui investigados: 1) Allis-Chalmers (MAC) 2) Peter King (MPK) e 3) Karra (MK). As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os principais parâmetros de cada uma destas operações, relacionados com suas respectivas amostras e ordenadas em 15

diferentes condições. Vale ressaltar que os processos dos quais foram extraídas as amostras Am4, Am5, Am6 e Am7 foram executados em duas condições distintas quanto à taxa de alimentação aplicada. Além da própria taxa de projeto da peneira, uma taxa menor, definida aleatoriamente, foi empregada, de forma a se investigar seu efeito na eficiência de peneiramento.

Tabela 4.6. Principais parâmetros das peneiras industriais (1)

Condição	ID Amostra	Material	Taxa de alimentação (t/h) *	Dimensão da peneira (mm)	Quantidade de módulos e decks	Área total de peneiramento (m ²)
1	Am1	Itabirito	450	2440 x 6100	Módulos: 1 / Decks: 2	14,88
2	Am4	Gnaisse / Areia industrial	350	2000 x 4900	Módulos: 1 / Decks: 3	10,00
3	Am5	Gnaisse / Areia industrial	400	2000 x 4900	Módulos: 2 / Decks: 3	20,00
4	Am6	Gnaisse	600	2440 x 6100	Módulos: 1 / Decks: 3	14,90
5	Am7	Gnaisse	650	2440 x 6100	Módulos: 1 / Decks: 3	14,90
6	Am18	Hematita	600	1525 x 6100	Módulos: 2 / Decks: 3	18,61
7	Am23	Quartzo / areia de aluvião	50	1220 x 2440	Módulos: 1 / Decks: 1	2,98
8	Am25	Granito	100	1200 x 3000	Módulos: 1 / Decks: 4	3,60
9	Am29	Calcário / Areia industrial	60	1400 x 7500	Módulos: 1 / Decks: 1	10,50
10	Am32	Calcário	80	1800 x 5500	Módulos: 1 / Decks: 1	9,90
11	Am34	Gnaisse	80	1525 x 4270	Módulos: 1 / Decks: 1	6,51
12	Am4	Gnaisse / Areia industrial	169		Idem Condição 2	
13	Am5	Gnaisse / Areia industrial	144		Idem Condição 3	
14	Am6	Gnaisse	180		Idem Condição 4	
15	Am7	Gnaisse	350		Idem Condição 5	

* As taxas de alimentação das condições 1 a 11 foram as mesmas utilizadas nos projetos das respectivas peneiras, enquanto que nas condições 12 a 15 foram empregadas taxas de alimentação menores que as de projeto.

Tabela 4.7. Principais parâmetros das peneiras industriais (2)



Condição	Tipo de processo	Condição dinâmica	Velocidade de escoamento de partículas (m/min)	Abertura da tela (mm)	Tipo de peneira	Área aberta (%)
1	A úmido	Vibratório linear	16,6	8,0	Poliuretano	21%
2	Umidade natural	Vibratório circular	20,0	4,8	Metálica	53%
3	Umidade natural	Vibratório circular	20,0	12,7	Metálica	65%
4	Umidade natural	Vibratório circular	20,0	12,7	Metálica	63%
5	Umidade natural	Vibratório circular	25,0	19,0	Metálica	65%
6	Umidade natural	Vibratório circular	27,0	10,0	Metálica	62%
7	A úmido	Estático	26,0	0,300	Metálica	24%
8	Umidade natural	Vibratório circular	28,0	4,76	Metálica	53%
9	Umidade natural	Vibratório circular	15,0	0,60	Metálica	24%
10	Umidade natural	Vibratório circular	18,0	1,0	Metálica	28%
11	Umidade natural	Vibratório circular	18,0	2,0	Metálica	44%
12			Idem Condição 2			
13			Idem Condição 3			
14			Idem Condição 4			
15			Idem Condição 5			

Além da área de peneiramento, foram também simuladas as distribuições granulométricas de cada produto (*oversize* e *undersize*) (com exceção do MAC que não

emprega metodologia para isto). Em seguida os resultados simulados de cada método serão comparados entre si e entre os valores do cenário industrial real.

Para facilitar este procedimento foi desenvolvido em Excel[®], utilizando linguagem VBA, um simulador capaz de calcular os resultados dos três métodos, assim como o modelo ajustado a partir do MPK. O simulador foi denominado de “*S³ - Smart Screen Simulator*”. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a interface gráfica do simulador, exemplificando a simulação do processo referente à amostra de alimentação Am1.

S³ - Smart Screen Simulator - Simulador de peneiras industriais

DADOS DO MATERIAL E DO EQUIPAMENTO

Taxa de alimentação de sólidos (t/h)	450
Abertura da tela (mm)	8,00
Diâmetro do fio (mm)	
Abertura projetada da tela (mm)	8,00
Densidade aparente (t/m ³)	2,07
d50	0,13
Área Aberta (%)	29,0
Passante na metade da abertura (%)	87,6%
Passante na abertura (%)	91,0%
Retido acumulado na abertura (%)	9,0%
Passante na metade da abertura projetada (%)	87,6%
Passante na abertura projetada (%)	91,0%
Retido acumulado na abertura projetada (%)	9,0%
Passante no tamanho 1,25h	100,0%
Passante no tamanho 0,75h	68,3%
Posição do deck (1, 2 ou 3)	1
Inclinação da peneira (graus)	0,00
Velocidade do fluxo sobre o deck (m/min)	16,6
Número de camadas	2
Altura de camada na descarga (mm)	16,0
Umidade (%)	9,00%
Fator Projeto	1,20
Tipo de peneiramento (seco ou úmido)	Wet
Forma da abertura	Square
Teor de partículas alongadas > 15%?	Yes
Condição da superfície do minério	Wet, muddy or sticky material
Tipo de tela	Poliuretano
Tipo de Peneira	Horizontal
k	-0,234

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (mm)	Alimentação		Undersize		Oversize	
	Retido Simples	Pass. Acum	Retido Simples	Pass. Acum	Retido Simples	Pass. Acum
25,4		100,0%		100,0%		100,0%
19		100,0%		100,0%		100,0%
12,7		95,0%		100,0%		70,6%
9,51		92,5%		100,0%		56,3%
8		91,0%		99,9%		47,8%
4,76		88,1%		98,0%		40,2%
3,36		87,0%		96,9%		38,7%
2		84,7%		94,4%		37,3%
1		83,2%		92,8%		36,6%
0,841		81,6%		90,9%		35,9%
0,297		75,8%		84,5%		33,3%
0,149		62,9%		70,1%		27,7%
0,045		18,0%		20,1%		7,9%
0,037		14,0%		15,6%		6,2%
-0,037		0,0%		0,0%		0,0%
Total	0,0%		0,0%		0,0%	

SIMULAR

FIT_PART

IMPRIMIR

Figura 4.10. Interface gráfica do simulador *S³ - Smart Screen Simulator* – Dados de entrada do processo da amostra Am1 (itabirito).

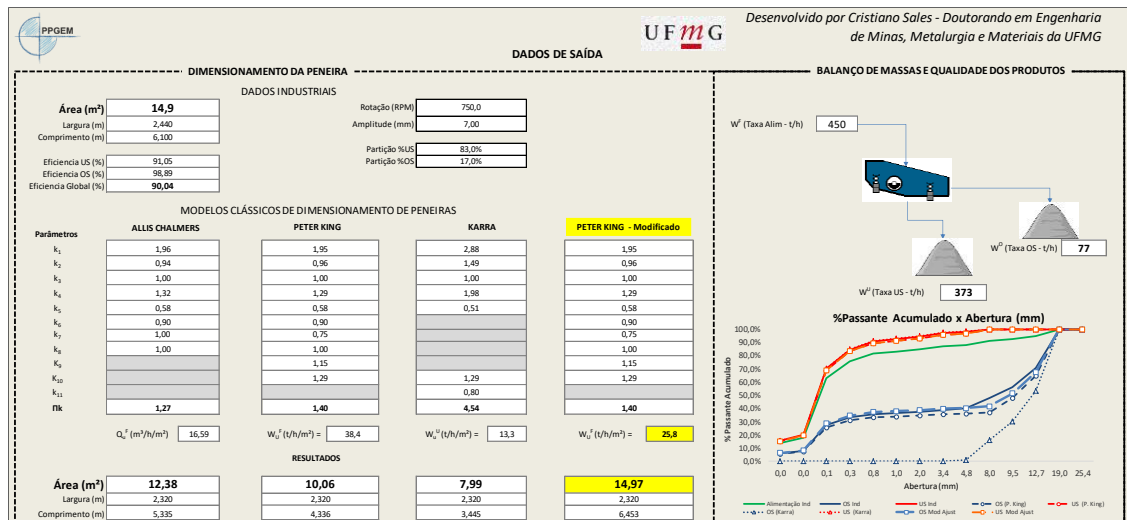


Figura 4.11. Interface gráfica do simulador S^3 - *Smart Screen Simulator* – Resultados do processo da amostra Am1 (itabirito).

A Figura 4.12 apresenta parte do código VBA utilizado, exemplificando as funções de cálculo das capacidades unitárias dos três métodos.

'Q_U^F – Método de Allis Chalmers

```
Range("O28").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0.36423*SQRT(R[-13]C[-8]^2+251.28*R[-13]C[-8])"
Range("O28").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
```

'W_U^F – Método de P. King

```
Range("R28").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R[-13]C[-11]<25,20*R[-13]C[-11]^0.33-1.28,0.783*R[-13]C[-11]+37)"
Range("R28").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
```

'W_U^U – Método de Karra

```
Range("R28").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R[-13]C[-11]<25,20*R[-13]C[-11]^0.33-1.28,0.783*R[-13]C[-11]+37)"
Range("R28").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
```

Figura 4.12. Códigos VBA do S^3 *Smart Screen Simulator* – Cálculo das capacidades unitárias dos três modelos.

Os coeficientes de cinética de peneiramento de cada amostra, obtidos nos ensaios experimentais, serão correlacionados com os dados das condições reais e com os resultados das simulações do método de Peter King. Serão avaliadas principalmente as capacidades unitárias do método e das condições reais, com o objetivo de se comparar o nível de dificuldade de peneiramento em cada processo em função da cinética de peneiramento de cada amostra de alimentação. A partir desta análise, ajustes poderão ser propostos com a finalidade de se aumentar a assertividade e a aproximação do MPK, com as dimensões e condições reais das peneiras industriais avaliadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os principais resultados das etapas descritas no capítulo anterior. Para tanto, serão organizados nos três tópicos seguintes:

5.1. Caracterização das amostras: serão apresentados de forma sintética, os resultados das análises realizadas com as 37 amostras estudadas, e discutida as principais particularidades e diferenças obtidas entre as amostras.

5.2. Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento: serão apresentados os resultados obtidos das 37 amostras, expressos em forma gráfica através de curvas de distribuição granulométrica, e a classificação do “grau de peneirabilidade” das amostras em função dos intervalos de cinética de peneiramento.

5.3. Dimensionamento de peneiras e ajustes do MPK: Será apresentado o simulador desenvolvido em linguagem VBA na plataforma Excel[®], incluindo os três métodos de dimensionamento de peneiras apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho. Também serão apresentadas as dimensões das peneiras obtidas a partir de cada método, bem como as distribuições granulométricas de cada produto (*oversize* e *undersize*) de forma comparativa. Os ajustes da equação de capacidade unitária e eficiência de peneiramento do MPK serão também discutidos.

5.1. Caracterização das amostras

Os tópicos a seguir apresentam os valores de massa específica de sólidos, massa específica aparente, umidade e índice de forma das 37 amostras, bem como as principais observações levantadas para cada propriedade.

5.1.1. Massa específica de sólidos

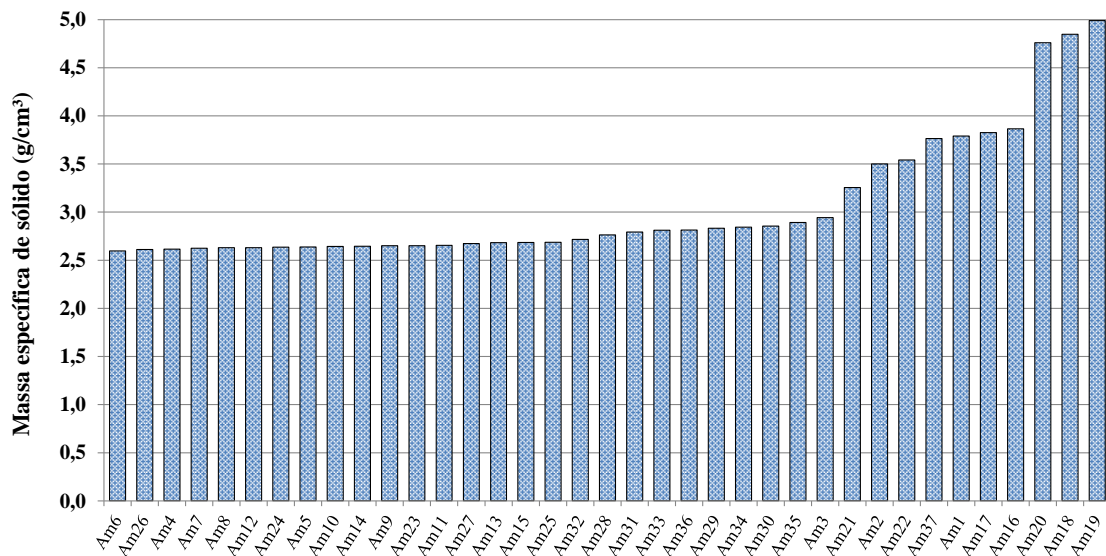
A massa específica de sólidos foi medida através de picnometria, conforme descrito na metodologia deste trabalho.

A Tabela 5.1 resume os valores médios obtidos para a massa específica de sólidos de cada uma das amostras analisadas:

Tabela 5.1. Massa específica de sólidos das 37 amostras

Amostra	Material	ρ_s	Amostra	Material	ρ_s	Amostra	Material	ρ_s
Am1	Itabirito	3,79	Am13	Gnaisse	2,68	Am25	Granito	2,69
Am2	Itabirito	3,50	Am14	Gnaisse	2,64	Am26	Granito	2,61
Am3	Sulfeto de ouro	2,94	Am15	Gnaisse	2,68	Am27	Granito	2,67
Am4	Gnaisse / Areia Industrial	2,62	Am16	Itabirito	3,87	Am28	Granito	2,76
Am5	Gnaisse / Areia Industrial	2,64	Am17	Itabirito	3,83	Am29	Calcário / Areia industrial	2,83
Am6	Gnaisse	2,60	Am18	Hematita	4,85	Am30	Gnaisse / Areia industrial	2,85
Am7	Gnaisse	2,62	Am19	Hematita / Granulado	4,99	Am31	Gnaisse / Areia industrial	2,79
Am8	Gnaisse	2,63	Am20	Hematita / Sinter Feed	4,76	Am32	Calcário	2,72
Am9	Gnaisse	2,65	Am21	Bauxita	3,25	Am33	Calcário	2,81
Am10	Gnaisse	2,64	Am22	Bauxita	3,54	Am34	Gnaisse	2,84
Am11	Gnaisse	2,65	Am23	Quartzo / Areia de aluvião	2,65	Am35	Gnaisse	2,89
Am12	Gnaisse	2,63	Am24	Quartzo / Areia de aluvião	2,64	Am36	Gnaisse	2,81
						Am37	Bauxita	3,76

A Figura 5.1 apresenta o gráfico com valores de massa específica de sólidos em ordem crescente.

**Figura 5.1.** Massa específica de sólidos das amostras em ordem crescente

Os valores de massa específica de sólidos das amostras variam de 2,60g/cm³ a 4,99g/cm³. A amostra de menor valor foi a Am6 (2,60g/cm³ - gnaisse), enquanto o maior foi da Am19 (4,99g/cm³ - hematita / granulado). Com exceção das amostras de itabirito, hematita (minério de ferro) e bauxita (minério de alumínio) todas as demais amostras possuem massa específica de sólidos abaixo de 3,00g/cm³. As amostras de gnaisse, granito e algumas de calcário (agregados) possuem massa específica de sólidos muito próximas (entre 2,60 e 2,90g/cm³).

5.1.2. Massa específica aparente

A massa específica aparente foi medida a partir do método da proveta, conforme descrito na metodologia deste trabalho.

A Tabela 5.2 resume os valores médios obtidos para cada amostra analisada.

Tabela 5.2. Massa específica aparente das 37 amostras

Amostra	Material	ρ_B	Amostra	Material	ρ_B	Amostra	Material	ρ_B
Am1	Itabirito	2,07	Am13	Gnaise	1,43	Am25	Granito	1,54
Am2	Itabirito	2,22	Am14	Gnaise	1,56	Am26	Granito	1,16
Am3	Sulfeto de ouro	1,54	Am15	Gnaise	1,61	Am27	Granito	1,28
Am4	Gnaise / Areia Industrial	1,93	Am16	Itabirito	1,96	Am28	Granito	1,43
Am5	Gnaise / Areia Industrial	1,47	Am17	Itabirito	2,02	Am29	Calcário / Areia industrial	1,56
Am6	Gnaise	1,31	Am18	Hematita	2,10	Am30	Gnaise / Areia industrial	1,51
Am7	Gnaise	1,29	Am19	Hematita / Granulado	2,74	Am31	Gnaise / Areia industrial	1,45
Am8	Gnaise	1,16	Am20	Hematita / Sinter Feed	2,21	Am32	Calcário	1,61
Am9	Gnaise	1,32	Am21	Bauxita	1,10	Am33	Calcário	1,78
Am10	Gnaise	1,20	Am22	Bauxita	1,12	Am34	Gnaise	1,42
Am11	Gnaise	1,34	Am23	Quartzo / Areia de aluvião	1,28	Am35	Gnaise	1,42
Am12	Gnaise	1,38	Am24	Quartzo / Areia de aluvião	1,56	Am36	Gnaise	1,32
						Am37	Bauxita	1,12

A Figura 5.2 apresenta o gráfico com valores de massa específica aparente em ordem crescente.

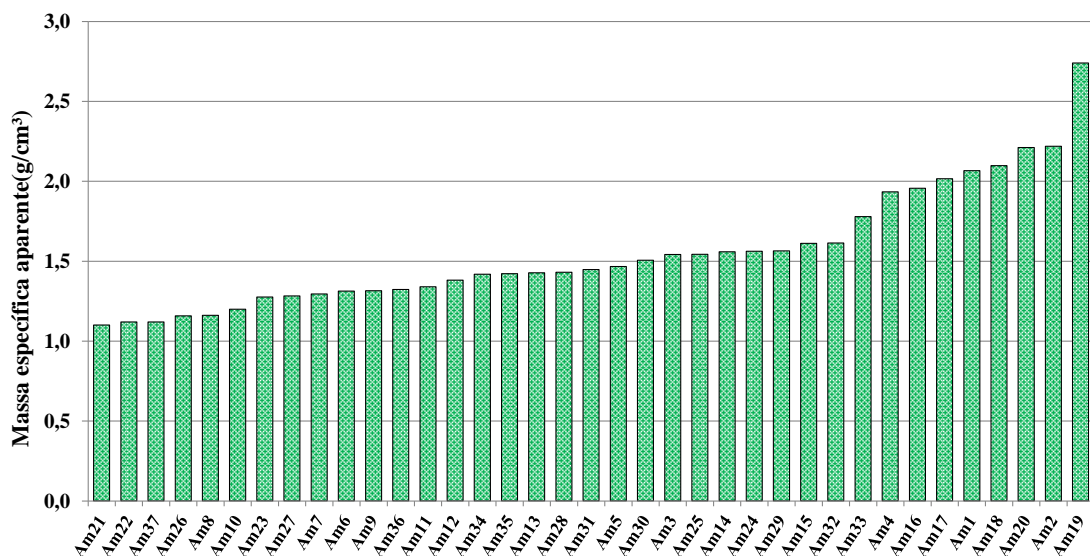


Figura 5.2. Massa específica aparente das amostras em ordem crescente

Os valores de massa específica aparente variaram de $1,1\text{g/cm}^3$ a $2,74\text{g/cm}^3$. A amostra de menor valor foi a Am21 ($1,1\text{g/cm}^3$ - bauxita) e a de maior valor a Am19 ($2,74\text{g/cm}^3$ -

hematita / granulado). As amostras de itabirito e hematita tiveram as maiores massas específicas aparente, seguidas pelas amostras de agregado (gnaisse, granito e calcário). As três amostras de bauxita (Am21, Am22 e Am37) permaneceram com os menores valores de massa específica aparente, 1,1g/cm³, 1,2g/cm³ e 1,2g/cm³, respectivamente. Possivelmente devido à maior granulometria (principalmente da Am21) e maior umidade destas amostras.

5.1.3. Umidade

A umidade foi calculada a partir do método clássico, apresentado no capítulo anterior.

A Tabela 5.3 resume os valores obtidos para cada uma das amostras analisadas e apresenta também o tipo de operação (a úmido ou a umidade natural) em que foram coletadas.

Tabela 5.3. Umidade das 37 amostras

Amostra	Material	Tipo de peneiramento	Umidade (%)	Amostra	Material	Tipo de peneiramento	Umidade (%)
Am1	Itabirito	A Úmido	8,53	Am20	Hematita / Sinter Feed	Umidade natural	6,4
Am2	Itabirito	A Úmido	7,8	Am21	Bauxita	A Úmido	7,5
Am3	Sulfeto de ouro	A Úmido	6,12	Am22	Bauxita	A Úmido	9,5
Am4	Gnaisse / Areia Industrial	Umidade natural	3,3	Am23	Quartzo / Areia de aluvião	A Úmido	8,2
Am5	Gnaisse / Areia Industrial	Umidade natural	3,2	Am24	Quartzo / Areia de aluvião	A Úmido	9,2
Am6	Gnaisse	Umidade natural	2,34	Am25	Granito	Umidade natural	4,2
Am7	Gnaisse	Umidade natural	2,12	Am26	Granito	Umidade natural	2,9
Am8	Gnaisse	Umidade natural	2,6	Am27	Granito	Umidade natural	3,2
Am9	Gnaisse	Umidade natural	2,67	Am28	Granito	Umidade natural	4,5
Am10	Gnaisse	Umidade natural	3,4	Am29	Calcário / Areia industrial	Umidade natural	6,8
Am11	Gnaisse	Umidade natural	2,1	Am30	Gnaisse / Areia industrial	Umidade natural	7,1
Am12	Gnaisse	Umidade natural	3,2	Am31	Gnaisse / Areia industrial	Umidade natural	6,5
Am13	Gnaisse	Umidade natural	3,9	Am32	Calcário	Umidade natural	2,8
Am14	Gnaisse	Umidade natural	5,1	Am33	Calcário	Umidade natural	2,1
Am15	Gnaisse	Umidade natural	6,1	Am34	Gnaisse	Umidade natural	3,4
Am16	Itabirito	A Úmido	9,4	Am35	Gnaisse	Umidade natural	2,6
Am17	Itabirito	A Úmido	7,2	Am36	Gnaisse	Umidade natural	2,1
Am18	Hematita	Umidade natural	9,4	Am37	Bauxita	A Úmido	8,9
Am19	Hematita / Granulado	Umidade natural	5,2				

A Figura 5.3 apresenta o gráfico com valores de umidade em ordem crescente.

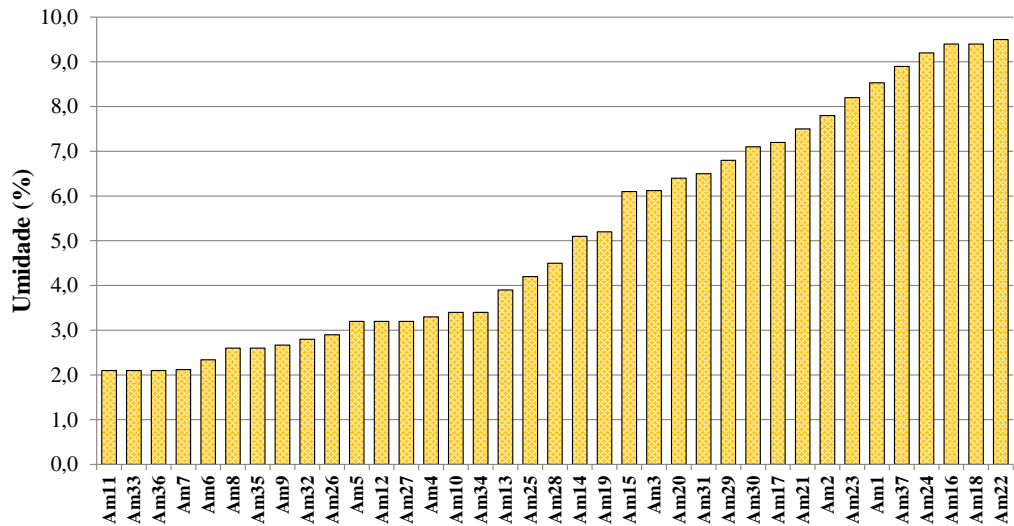


Figura 5.3. Umidade das amostras em ordem crescente

Os valores de umidade variaram de 2,10% a 9,50%. As amostras de menor umidade foram as Am11 (gnaisse), Am33 (calcário) e Am36 (gnaisse) com 2,1% e a de maior umidade a Am22 (9,50% - bauxita). A partir dos dados apresentados, observa-se que as amostras coletadas nas alimentações dos peneiramentos a úmido, possuem valores a partir de 7,2% (Am17 – itabirito), exceto a Am3 (6,12% - sulfeto de ouro). A Am18 possui a segunda maior umidade (9,40% - hematita), e foi coletada numa operação de peneiramento a umidade natural.

5.1.4. Índice de forma

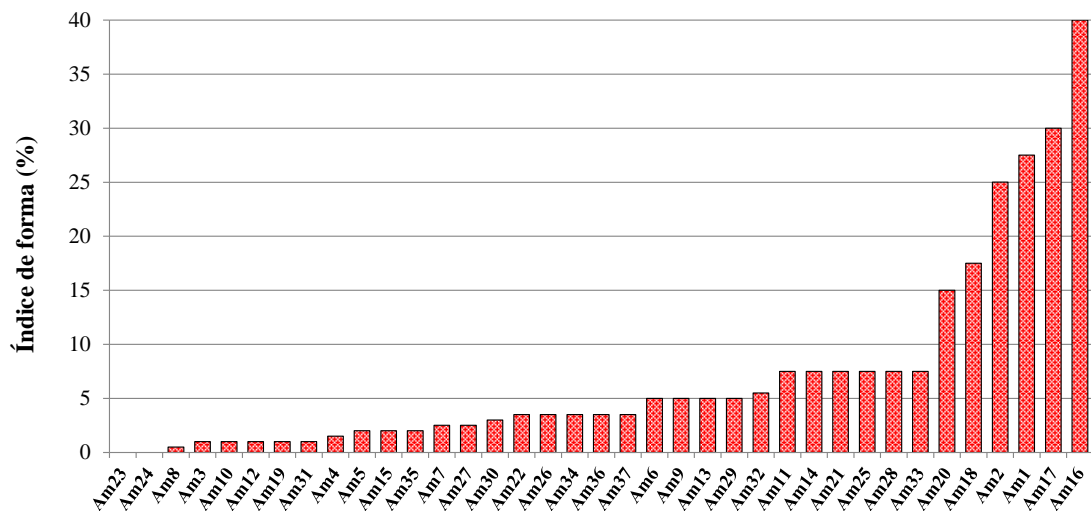
O índice de forma foi analisado a partir da contagem de partículas irregulares (relação $> 3/1$) e regulares (relação $< 3/1$), conforme descrito na metodologia deste trabalho.

A Tabela 5.4 resume todos os resultados obtidos para cada uma das amostras analisadas.

Tabela 5.4. Índice de forma das 37 amostras

Amostra	Material	Índice de Forma (%)	Amostra	Material	Índice de Forma (%)	Amostra	Material	Índice de Forma (%)
Am1	Itabirito	27,50	Am13	Gnaisse	5,00	Am25	Granito	7,50
Am2	Itabirito	25,00	Am14	Gnaisse	7,50	Am26	Granito	3,50
Am3	Sulfeto de ouro	1,00	Am15	Gnaisse	2,00	Am27	Granito	2,50
Am4	Gnaisse / Areia Industrial	1,50	Am16	Itabirito	40,00	Am28	Granito	7,50
Am5	Gnaisse / Areia Industrial	2,00	Am17	Itabirito	30,00	Am29	Calcário / Areia industrial	5,00
Am6	Gnaisse	5,00	Am18	Hematita	17,50	Am30	Gnaisse / Areia industrial	3,00
Am7	Gnaisse	2,50	Am19	Hematita / Granulado	1,00	Am31	Gnaisse / Areia industrial	1,00
Am8	Gnaisse	0,50	Am20	Hematita / Sinter Feed	15,00	Am32	Calcário	5,50
Am9	Gnaisse	5,00	Am21	Bauxita	7,50	Am33	Calcário	7,50
Am10	Gnaisse	1,00	Am22	Bauxita	3,50	Am34	Gnaisse	3,50
Am11	Gnaisse	7,50	Am23	Quartzo / Areia de aluvião	0,00	Am35	Gnaisse	2,00
Am12	Gnaisse	1,00	Am24	Quartzo / Areia de aluvião	0,00	Am36	Gnaisse	3,50
						Am37	Bauxita	3,50

A Figura 5.4 apresenta o gráfico ordenado do índice de forma das amostras em ordem crescente.

**Figura 5.4.** Índice de forma das amostras em ordem crescente

O índice de forma variou entre 0% a 40%. As amostras com menor proporção de partículas irregulares foram: Am23 e Am24 (0% - quartzo / areia de aluvião) e a de maior proporção foi a Am16 (40% - itabirito). Além do mais, os materiais com maior índice de forma foram o itabirito e a hematita (>15%), com exceção da Am19 (hematita / granulado), que conteve apenas 1% de partículas irregulares.

5.2. Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento

Os ensaios de cinética de peneiramento foram executados através de cinco ensaios de distribuição granulométrica para cada uma das 37 amostras. Inicialmente realizou-se um

ensaio padrão, com a amostra previamente seca e desagregada, aplicando-se o tempo de 20min. Posteriormente realizaram-se quatro análises intermediárias, variando-se os tempos de peneiramento entre 20s, 40s, 60s e 80s (e “preservando as características físicas originais das amostras”). Um dos requisitos fundamentais destas quatro análises intermediárias foi o de manter a mesma série de peneiras definida após a validação pelo método de Gaudin no ensaio padrão. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os resultados gráficos de todas as 37 amostras. Os dados de todos os ensaios estão contidos no Anexo C.

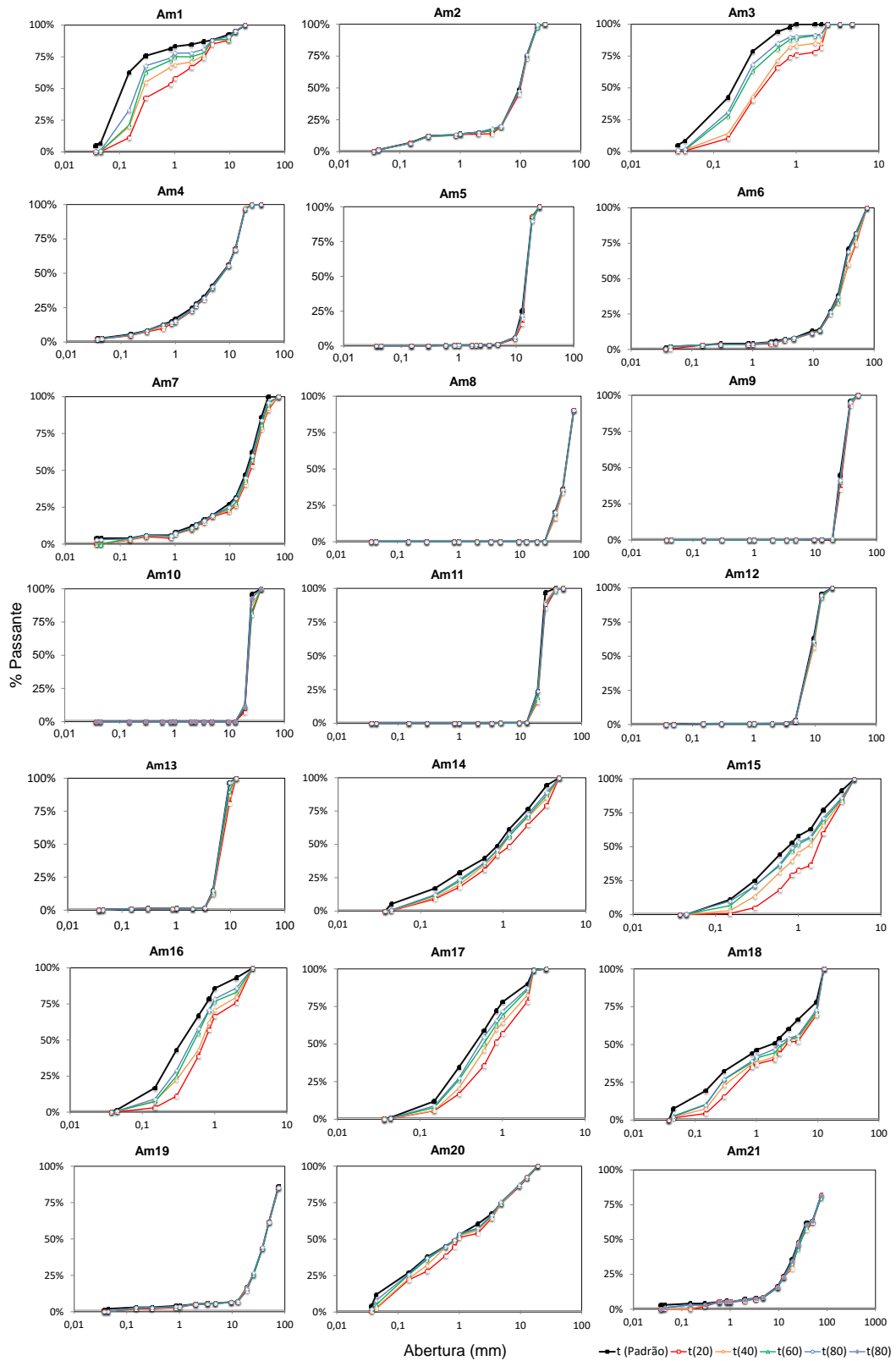


Figura 5.5. Distribuições granulométricas dos ensaios de cinética de peneiramento das amostras Am1 a Am21.

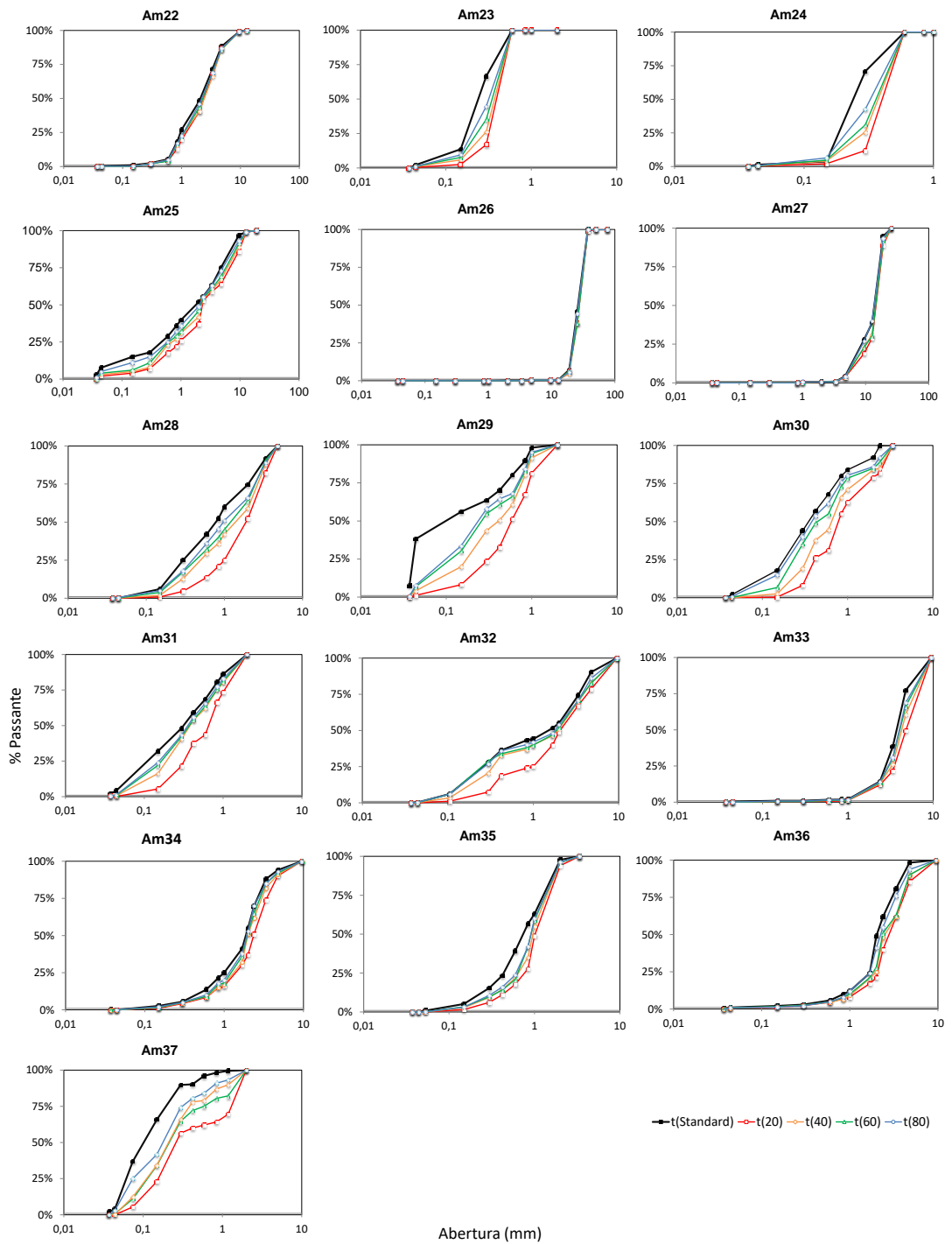


Figura 5.6. Distribuições granulométricas dos ensaios de cinética de peneiramento das amostras Am22 a Am37.

A disposição das curvas de distribuições granulométricas obtidas gerou as seguintes observações:

a) Um determinado grupo de amostras, tais quais: Am2, Am4, Am8, Am12, Am13 ou Am26 geraram curvas de distribuições granulométrica “visivelmente” sobrepostas, ou seja, os valores obtidos em todas as cinco análises foram muito semelhantes. Estes resultados indicaram que o peneiramento ocorreu de maneira acelerada (cinética elevada), uma vez que não foi perceptível alterações (afinamento) nas curvas de distribuição granulométrica ao longo do tempo de peneiramento. A maior facilidade de peneiramento destas amostras também se confirma pelo fato que, mesmo mantidas as características originais (antes da etapa de secagem e desagregação), os resultados são praticamente os mesmos em relação às análises com amostras secas e desagregadas.

A Figura 5.7 apresenta como exemplo imagens das massas retidas da amostra Am4, considerando as peneiras de aberturas 3,36mm e 0,841mm, nos cinco tempos de peneiramento, juntamente com valores de % passante nos respectivos ensaios.

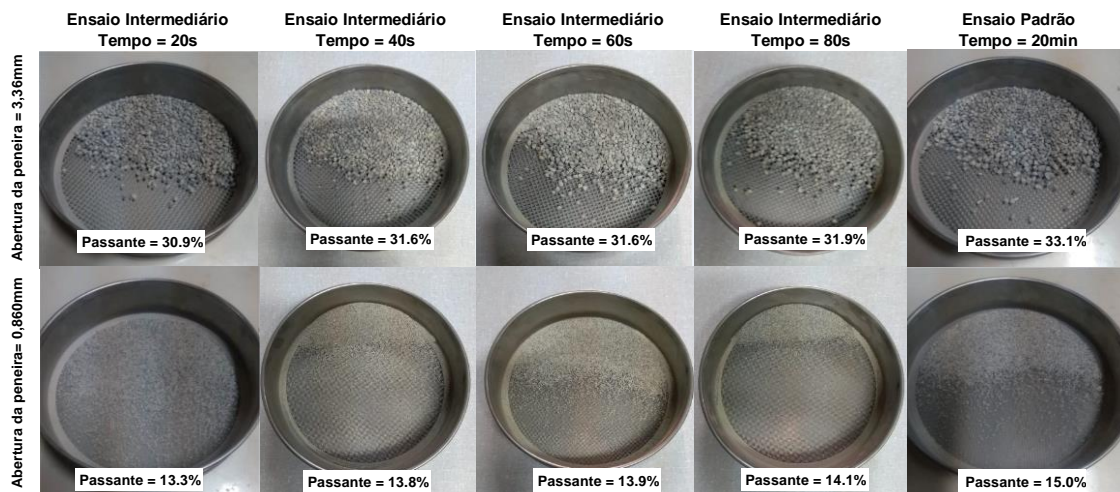


Figura 5.7. Massas retidas nas malhas de 3,36mm e 0,841mm e %passante dos quatro ensaios intermediários e do ensaio padrão da amostra Am4.

b) Ao contrário da observação anterior, outro grupo deu origem a distribuições granulométricas nitidamente distintas, tais como observado nas amostras: Am1, Am3, Am16, Am24, Am29 ou Am37. Um fato em comum foi que, em todas as amostras, as curvas de distribuição granulométrica do tempo de 20s apresentaram-se dispostas

abaixo das demais curvas dos ensaios de tempos menores. Isto sugeriu a existência de certa quantidade de finos que ficou retido nas maiores aberturas nas análises intermediárias. As curvas de 20s, 40s, 60s e 80s se dispuseram respectivamente e gradualmente logo acima, até evoluir à curva mais superior (fina) do gráfico – curva de distribuição granulométrica padrão. Estes resultados indicaram, portanto, que o aumento do tempo de peneiramento foi predominante para o aumento da eficiência de peneiramento global destas amostras. Pode-se concluir que se trata de materiais que apresentam um grau de dificuldade maior no processo de peneiramento, ou seja, as partículas finas têm maior dificuldade de atravessar a abertura das telas, e logo, necessitam, dentre outros fatores, de um tempo de residência maior sobre a tela de peneiramento. Pode-se considerar, portanto, que estes materiais possuem baixa cinética de peneiramento. Isto se deve possivelmente aos efeitos adversos de uma ou mais propriedade física, o que será mais bem investigado adiante.

A Figura 5.8 tomou como exemplo imagens das massas retidas da amostra Am1, nas peneiras de aberturas 2,0mm e 0,045mm, em todos os tempos de peneiramento, juntamente com informações dos valores de % passante nas respectivas malhas.

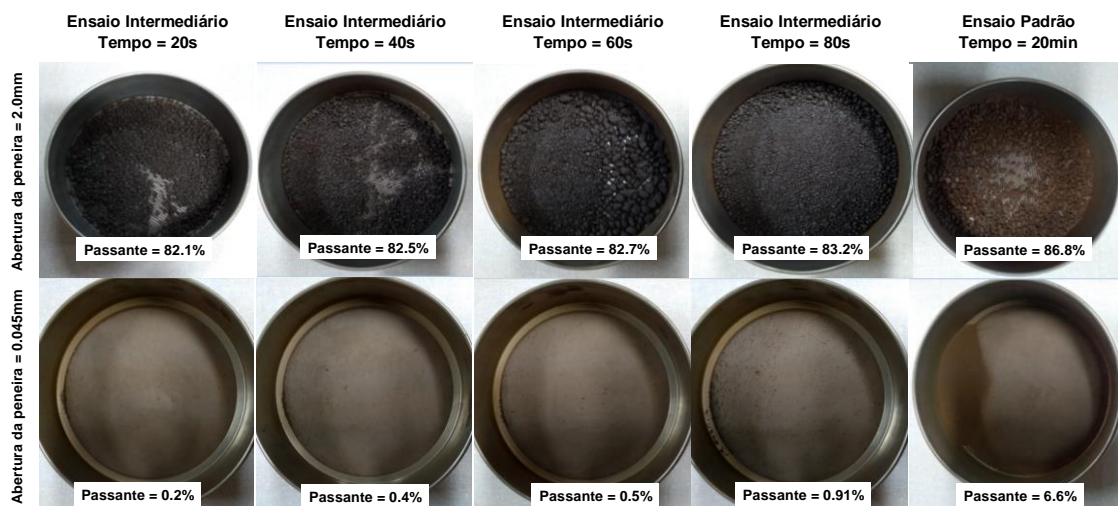


Figura 5.8. Massas retidas nas malhas de 2,0mm e 0,045mm e %passante dos quatro ensaios intermediários e do ensaio padrão da amostra Am1.

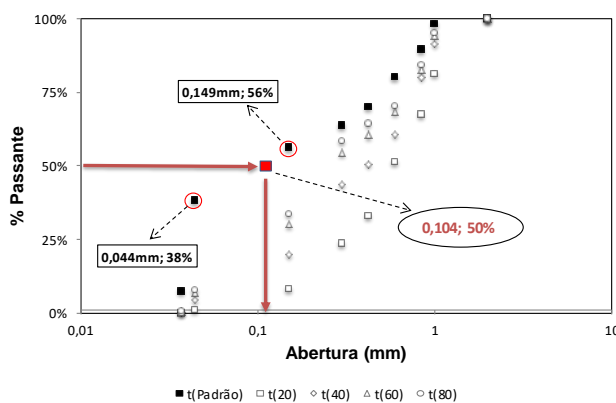
5.2.1. Determinação da cinética de peneiramento

De posse dos dados de distribuição granulométrica de cada ensaio, o tamanho médio d_{50} pôde ser calculado por interpolação entre os dois tamanhos adjacentes conhecidos (d_s ; P_s) e (d_i ; P_i). A Equação 5.1 foi gerada e modificada a partir da função log-normal truncada definida por King (2001), e foi utilizada com este objetivo. A Figura 5.9 exemplifica o cálculo do d_{50} da distribuição granulométrica padrão da amostra Am29.

$$d_{50} = a_i \times e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{50\%}{P_i}\right) \times \ln\left(\frac{a_s}{a_i}\right)}{\ln\left(\frac{P_s}{P_i}\right)} \right]} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

- d_{50} : Tamanho médio do sistema particulado [mm].
- a_i : Abertura da peneira adjacente inferior ao d_{50} [mm].
- a_s : Abertura da peneira adjacente superior ao d_{50} [mm].
- P_i : Passante na peneira inferior ao d_{50} [%].
- P_s : Passante na peneira superior ao d_{50} [%].



Exemplo de cálculo do tamanho médio d_{50} da amostra Am29

Equação 5.1

$$d_{50} = d_i \times e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{50\%}{P_i}\right) \times \ln\left(\frac{d_s}{d_i}\right)}{\ln\left(\frac{P_s}{P_i}\right)} \right]}$$

$$d_{50} = 0,044 \times e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{50\%}{38\%}\right) \times \ln\left(\frac{0,149}{0,044}\right)}{\ln\left(\frac{56\%}{38\%}\right)} \right]}$$

$d_{50} = 0,104mm$

Figura 5.9. Cálculo do d_{50} da curva de distribuição granulométrica padrão da amostra Am29.

Após a determinação dos tamanhos médios de todos os ensaios, os valores obtidos foram correlacionados com os respectivos tempos de peneiramento. A curva da

regressão obtida foi considerada como a “curva cinética de peneiramento” da amostra, conforme discutido adiante (Figura 5.10).

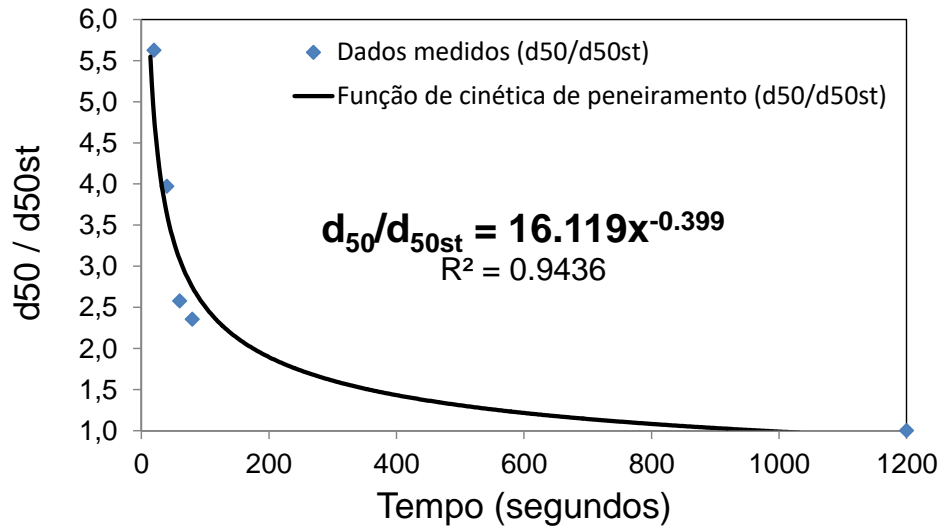


Figura 5.10. Curva de cinética de peneiramento da amostra Am29.

Outro exemplo observado foi tomado da amostra Am13, pertencente ao grupo de amostras cujos valores das distribuições granulométricas das análises intermediárias e padrão permaneceram relativamente sobrepostos. A Figura 5.11 exibe a curva de cinética de peneiramento obtida.

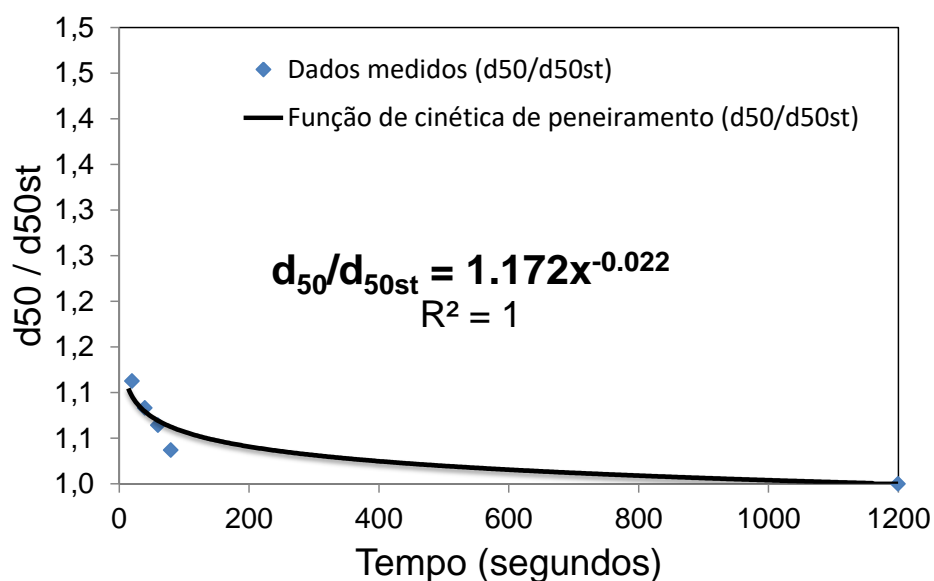


Figura 5.11. Curva de cinética de peneiramento da amostra Am13.

A partir das curvas de cinética de ambas as amostras, observou-se que os valores de d_{50} decresceram com o tempo, tendendo a se estabilizar horizontalmente em $d_{50}/d_{50st} = 1$, próximo do tempo da análise padrão (1200s – 20min). A interpretação gráfica sugere que quanto menor as variações entre os valores de d_{50} , e quanto mais próximo d_{50}/d_{50st} está de 1,0, menor a concavidade da curva de cinética, e logo maior a cinética de peneiramento. Na prática, isto significa dizer que a eficiência de peneiramento, mesmo em tempos menores (análises intermediárias) geram resultados muito próximos ou iguais ao peneiramento de maior tempo (análise padrão).

O modelo matemático que foi mais adequado para descrever este fenômeno foi a função potencial, descrita pela Equação 5.2.

$$\Delta d_{50} = d_{50}/d_{50st} = \beta \times t^k \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

- d_{50} : tamanho médio (mm).
- d_{50st} : tamanho médio da análise padrão – t=20min (mm).
- β : parâmetro de ajuste da função (mm)
- t : tempo de peneiramento (s).
- k : parâmetro de ajuste da função (mm/s).

O parâmetro k é o principal responsável pelo ajuste da concavidade da curva da função potencial. O valor de k obtido para a amostra Am29 foi de -0,399mm/s, enquanto para a amostra Am13 foi de -0,022mm/s. Logo quanto maior o valor de k (ou quanto mais próximo à zero), mais colinear é a distribuição dos valores de d_{50}/d_{50st} para uma determinada amostra. Conclui-se que existe uma relação direta deste parâmetro com o tempo de peneiramento. Além do mais, k pode ser determinado a partir do ensaio padrão proposto, possuindo atributos matemáticos e fenomenológicos satisfatórios para ser considerado como um parâmetro balizador da “cinética de peneiramento” de sistemas particulados.

Os resultados apresentados foram também obtidos a partir das demais amostras, seguindo o mesmo procedimento descrito. A Tabela 5.5 resume os valores de d_{50} interpolados de cada curva granulométrica e a cinética de peneiramento k gerada para cada amostra.

Tabela 5.5. Parâmetros obtidos nos ensaios de cinética de peneiramento das 37 amostras

Amostras	Δ Tamanho médio (mm) - d_{50} x tempo de peneiramento (s)					Cinética de peneiramento k (mm/s)
	Ensaio intermediário				Ensaio padrão	
	20	40	60	80		
Am1	0,62	0,28	0,26	0,22	0,13	-0,234
Am2	10,12	9,82	9,74	9,83	9,65	-0,008
Am3	0,40	0,37	0,24	0,23	0,18	-0,174
Am4	7,74	7,65	7,74	7,55	7,37	-0,012
Am5	16,48	16,21	15,96	16,07	15,70	-0,013
Am6	32,82	33,09	31,49	30,53	30,14	-0,019
Am7	23,85	22,43	21,73	21,13	20,15	-0,032
Am8	58,14	59,26	58,24	58,14	58,03	-0,002
Am9	29,26	28,14	27,92	27,73	26,81	-0,021
Am10	23,98	23,37	23,50	23,34	23,36	-0,003
Am11	23,15	22,93	22,81	22,39	22,15	-0,009
Am12	9,16	9,26	9,11	9,09	9,02	-0,006
Am13	7,98	7,77	7,64	7,44	7,18	-0,022
Am14	1,25	1,02	0,98	0,95	0,87	-0,060
Am15	1,77	1,30	0,94	0,88	0,76	-0,155
Am16	0,75	0,69	0,55	0,51	0,38	-0,155
Am17	0,82	0,67	0,59	0,54	0,48	-0,100
Am18	3,13	2,81	2,71	2,28	1,76	-0,153
Am19	41,91	41,90	42,11	41,74	41,92	-0,00005
Am20	0,97	0,91	0,88	0,86	0,88	-0,014
Am21	29,37	27,90	30,46	28,48	27,26	-0,019
Am22	2,47	2,50	2,34	2,23	2,10	-0,039
Am23	0,45	0,42	0,38	0,33	0,26	-0,125
Am24	0,47	0,42	0,39	0,34	0,27	-0,123
Am25	2,31	2,25	2,18	2,06	1,81	-0,060
Am26	28,35	28,38	28,43	26,85	26,49	-0,020
Am27	15,45	15,17	15,23	14,12	14,22	-0,020
Am28	1,92	1,43	1,23	0,97	0,78	-0,181
Am29	0,58	0,41	0,27	0,25	0,10	-0,399
Am30	0,79	0,66	0,44	0,38	0,35	-0,158
Am31	0,67	0,38	0,38	0,36	0,32	-0,117
Am32	2,07	1,93	1,87	1,78	1,52	-0,071
Am33	4,82	4,39	4,20	4,14	3,83	-0,043
Am34	2,35	1,99	1,96	1,94	1,89	-0,064
Am35	1,02	0,96	0,92	0,92	0,75	-0,076
Am36	2,84	2,51	2,37	2,25	2,03	-0,065
Am37	0,27	0,23	0,22	0,19	0,11	-0,225

A Figura 5.12 apresenta o histograma de distribuição de frequência da cinética de peneiramento das amostras. A densidade dos agrupamentos sugeriu se classificar a cinética de peneiramento em três classes de intervalos: (1) $k > -0,05$ (2) $-0,05 \leq k < -0,150$ e (3) $\leq -0,150$

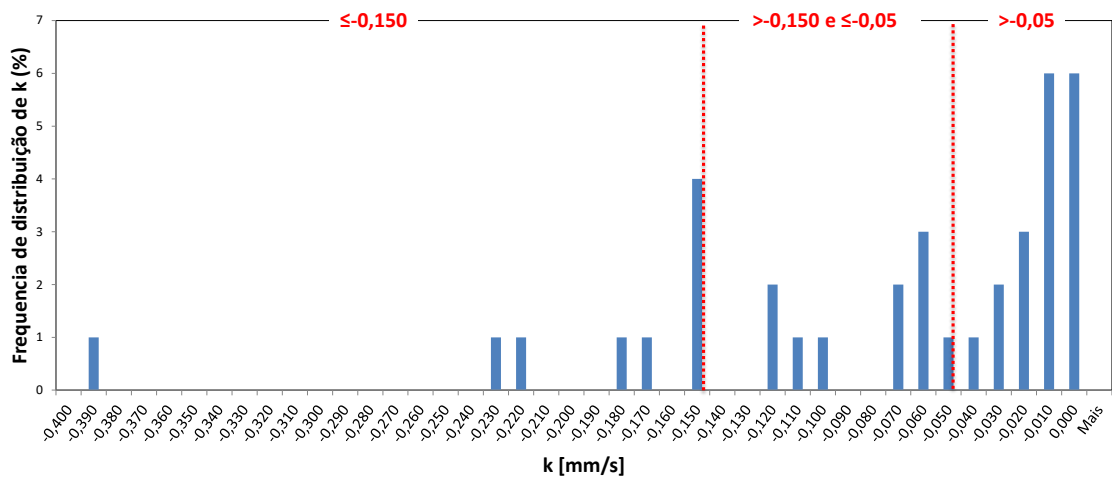


Figura 5.12. Histograma de distribuição da cinética de peneiramento das 37 amostras e agrupamento de três classes de valores.

A Figura 5.13 e Tabela 5.6 apresentam todas as amostras ordenadas segundo sua cinética de peneiramento, delimitadas pelas três classes: classe A ($>-0,05$), classe B ($-0,05 \leq k < -0,150$) e classe C ($\geq -0,150$).

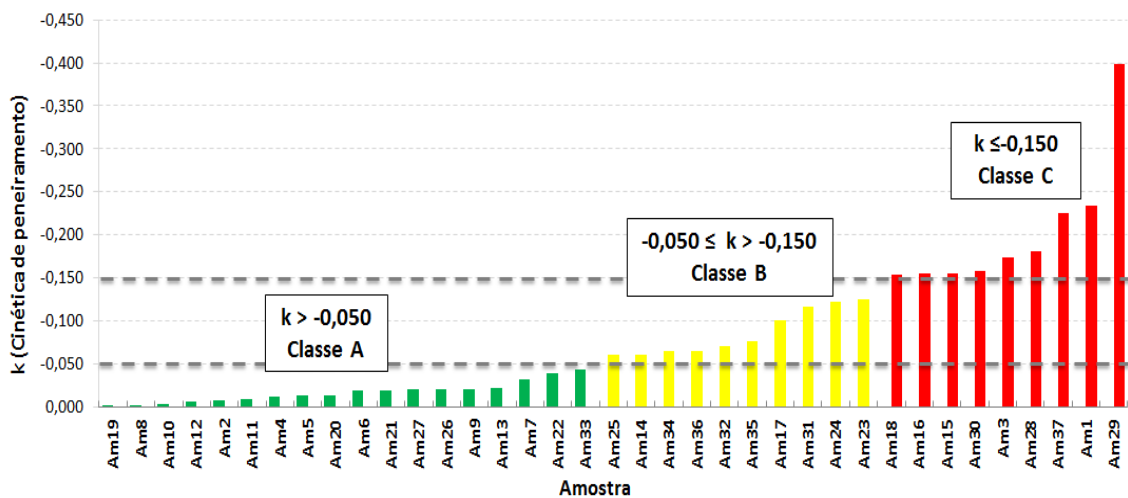


Figura 5.13. Agrupamento das amostras segundo a classe e cinética de peneiramento k

Tabela 5.6. Classificação das amostras segundo a cinética e nível de dificuldade de peneiramento.

Classe de peneiramento	Cinética de peneiramento - "k"	Nível de dificuldade (Peneirabilidade)	Classificação das amostras testadas
A	> -0.05 (<i>Elevada</i>)	Baixo	Am2; Am4; Am5; Am6; Am7; Am8; Am9; Am10; Am11; Am12; Am13; Am19; Am20; Am21; Am22; Am26 e Am27 e Am33
B	≤-0.05 e >-0.15 (<i>Média</i>)	Médio	Am14; Am17; Am23; Am 24; Am25; Am31; Am32; Am34; Am35 e Am36
C	≤-0.15 (<i>Baixa</i>)	Elevado	Am1; Am3; Am15; Am16; Am18; Am28; Am29; Am30 e Am37

Observou-se que os valores obtidos de cinética de peneiramento variaram a partir de $-5,0 \times 10^5$ mm/s (amostra Am19, hematita / granulado), amostra de granulometria mais grossa, maior massa específica de sólidos e aparente e também baixa umidade se comparada com as demais amostras de minério de ferro. Esta amostra possui a maior cinética de peneiramento e, portanto, o material que gera o menor grau de dificuldade no processo de peneiramento. A menor cinética de peneiramento foi de $-0,399$ mm/s (amostra Am29, calcário, fonte de areia industrial), destacada por ser uma das amostras de distribuição granulométrica mais fina, dentre todas estudadas. É o material que estabelece o nível mais elevado de dificuldade no processo de peneiramento.

5.2.2. Avaliação da eficiência segundo a classe de peneiramento

A análise da eficiência de peneiramento foi realizada em relação as classes estabelecidas. Inicialmente foram calculados todos os valores de eficiência de cada peneira para os resultados das análises intermediárias, utilizando a Equação 5.3 que foi adaptada da equação clássica de eficiência de peneiramento do fluxo passante (Equação 3.21 – Capítulo 3), conforme apresentado por Valadão *et. at.* (2012).

$$E^U = \frac{P_{ai}^{int}}{P_{ai}^{stand}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde:

- E^U : Eficiência de peneiramento do fluxo passante (%);

- P_{ai}^{int} : Passante na peneira de abertura a na posição i da análise intermediária (%);
- P_{ai}^{stand} : Passante na peneira de abertura a na posição i da análise padrão (%).

Em seguida calculou-se a média destes valores obtidos em cada malha, agrupados pelo tempo de peneiramento. A Figura 5.14 apresenta os gráficos de eficiência obtidos nas três classes de peneiramento.

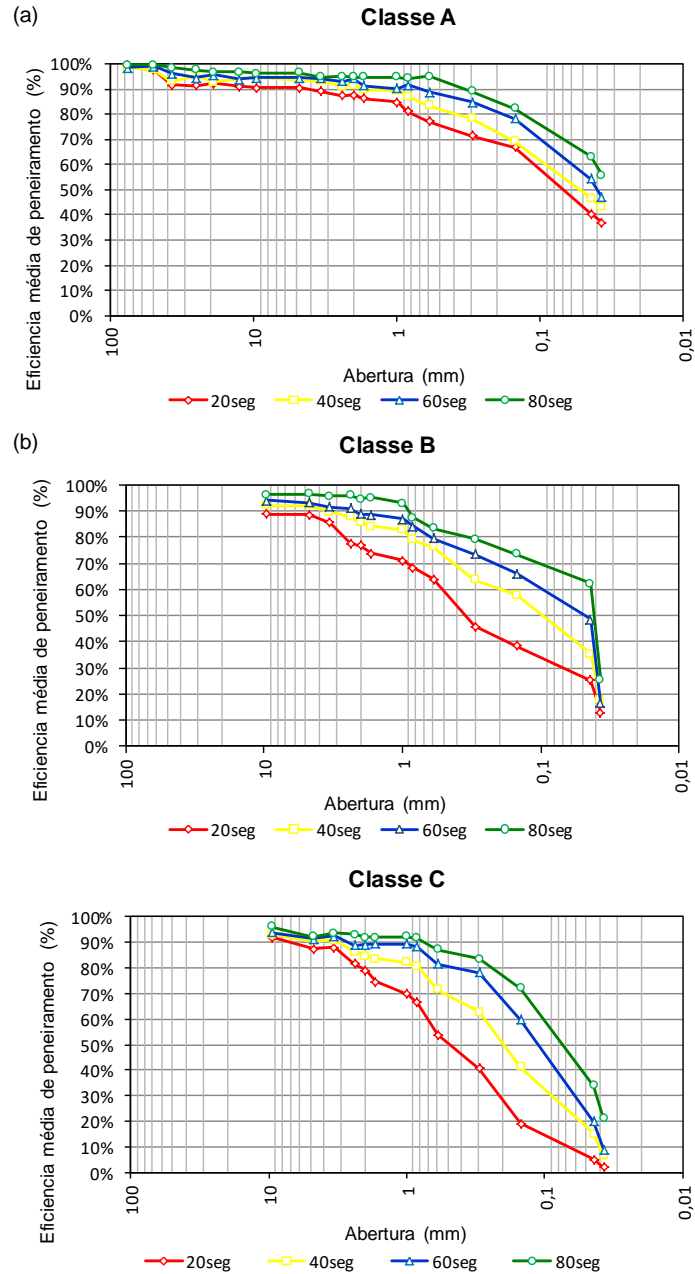


Figura 5.14. Eficiência média de peneiramento em função da abertura para cada tempo de peneiramento – (a) Classe A; (b) Classe B; (c) Classe C.

De modo geral, as curvas de eficiência decresceram em conjunto com a diminuição da abertura e com o tempo de peneiramento. Comparando-se as três classes de amostras, a partir do tempo de peneiramento de 20s, observa-se que as amostras da classe A mantiveram seus valores de eficiência em patamares superiores a 80% até a malha de 1,0mm. A partir daí decresceram até atingir o valor mínimo de 40%. A mesma

avaliação para as amostras das classes B e C mostrou permanência acima de 80% até aproximadamente a malha de 2,0mm, atingindo um valor próximo de 12% e 2%, respectivamente nas menores malhas. As amostras da classe C decresceram de forma mais acentuada que as demais classes, e praticamente se anularam na menor malha de peneiramento.

O gráfico da Figura 5.15 compara a média das eficiências de cada classe dos quatro tempos de peneiramento intermediários. A curva da classe A assumiu um patamar superior a partir da malha próxima de 4,0mm, onde também as três curvas começaram a se distinguir. As curvas das classes B e C não foram bem distintas até próximo da malha de 0,297mm. Somente a partir daí as curvas de eficiência global puderam ser observadas em posições claras e distintas, permanecendo a curva da classe A com valores de eficiência mais elevados, seguida consecutivamente pelas curvas da classe B e C.

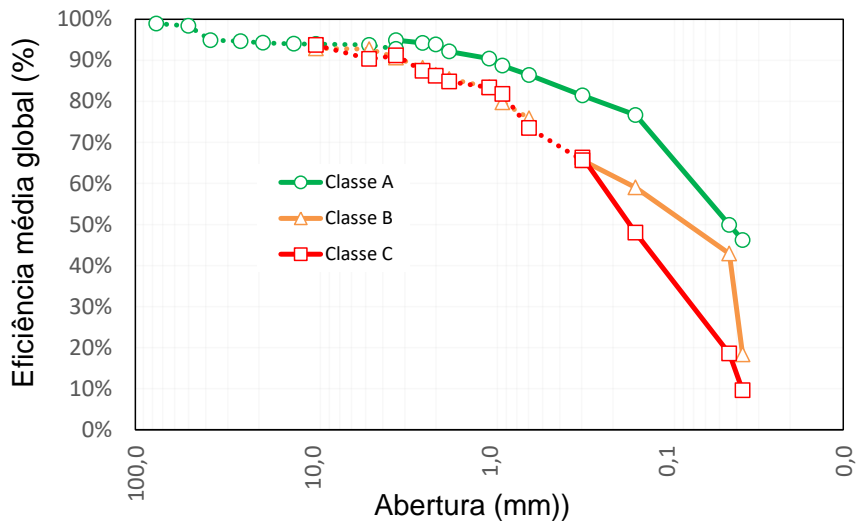


Figura 5.15. Eficiência média global de peneiramento em função da malha de peneira nas três classes de peneiramento

5.2.3. Efeito das propriedades físicas na cinética de peneiramento

Os resultados obtidos na etapa de caracterização: massa específica de sólidos e aparente, umidade, forma de partícula e a distribuição granulométrica real (gerada pela análise padrão), foram avaliados e correlacionados segundo a classe de cinética. A distribuição

granulométrica real foi representada pelos dois parâmetros: tamanho médio, d_{50} e percentual passante na menor malha, $37\mu\text{m}$ ($\%<37\mu\text{m}$). A Figura 5.16 apresenta as análises de cada um destes parâmetros em cada classe de cinética de peneiramento.

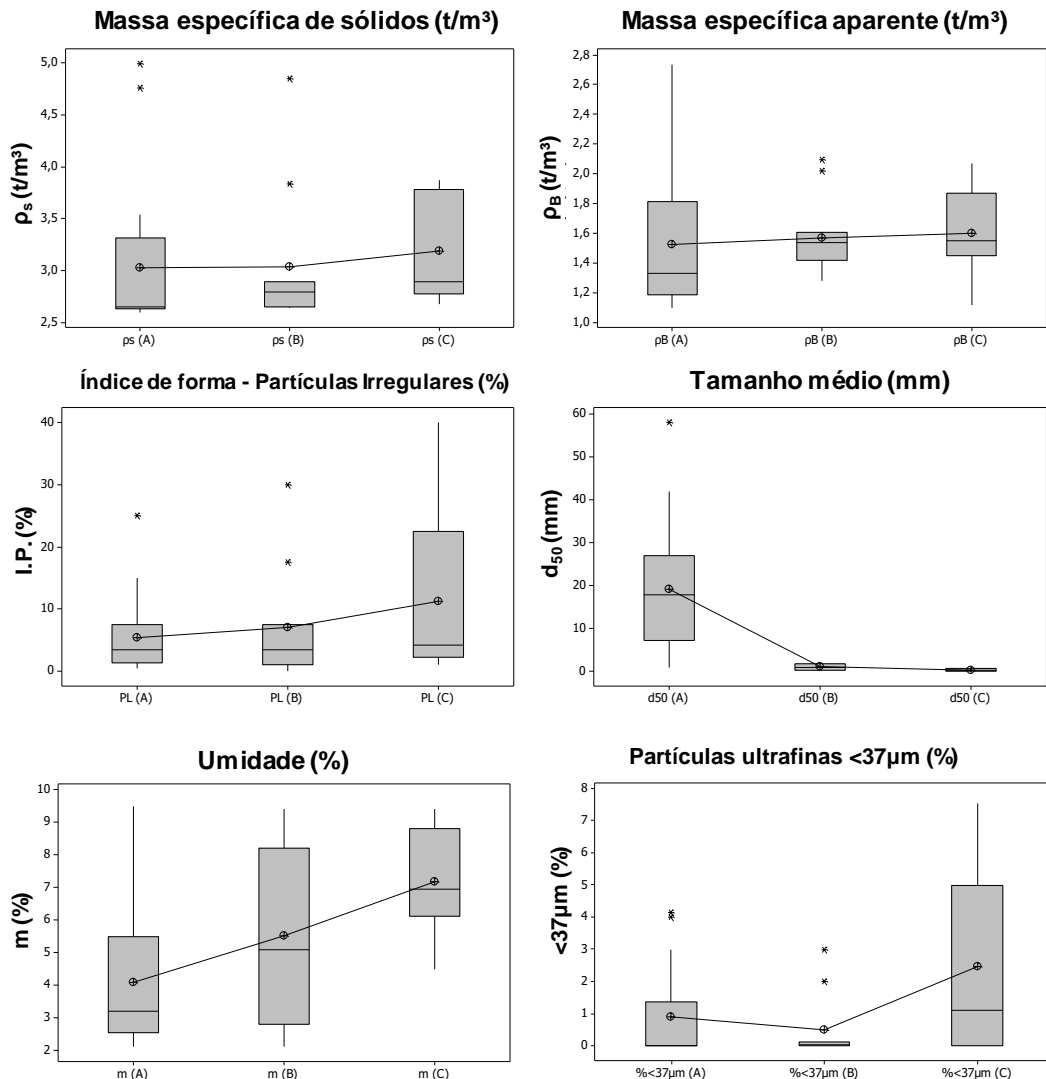


Figura 5.16. Box plot das propriedades físicas nas três classes de cinética de peneiramento.

Os resultados analíticos não apresentaram agrupamentos distintos e significativos para a massa específica de sólidos e aparente, bem como quanto ao percentual de partículas irregulares, embora neste último se destaque uma concentração maior de partículas irregulares na classe C. Segundo Wills (2006) e Drzymala (2007) partículas com forma irregular dificultam a eficiência dos processos de peneiramento. A umidade, embora não

tenha gerado agrupamentos tão distintos, apresentou uma tendência de aumento de seu valor médio da classe A até a classe C, permanecendo as amostras mais úmidas concentradas na classe C. De acordo com Filho (2017) minérios com umidade superior a 5% podem causar graves problemas ao peneiramento. Quanto aos parâmetros extraídos das distribuições granulométricas reais, o tamanho médio d_{50} se apresentou distintamente agrupado entre as classes. Pôde-se observar que a classe A é composta por amostras de granulometria mais grossa – 75% dos valores de d_{50} estão acima de 9,34mm; a classe C representou amostras de granulometria mais fina – 75% dos valores de d_{50} estão abaixo de 0,77mm; e a classe B, amostras de granulometria “intermediária” entre as demais classes – 50% dos valores de d_{50} se concentraram entre 0,48mm e 3,83mm. O parâmetro associado às partículas ultrafinas - %<37 μ m, embora não apresente agrupamento nítido entre as classes, concentrou uma faixa de valores maiores nas amostras de classe C. Isto confirmou sobre a maior dificuldade de peneiramento para certas amostras quando associadas a grande presença de ultrafinos.

Com base nestas observações foram realizadas quatro análises de correlação envolvendo as seguintes variáveis: (a) k e umidade; (b) k e d_{50} ; (c) k e %<37 μ m e (d) umidade e d_{50} . A Figura 5.17 apresenta os gráficos de correlação e os melhores modelos de ajustes obtidos.

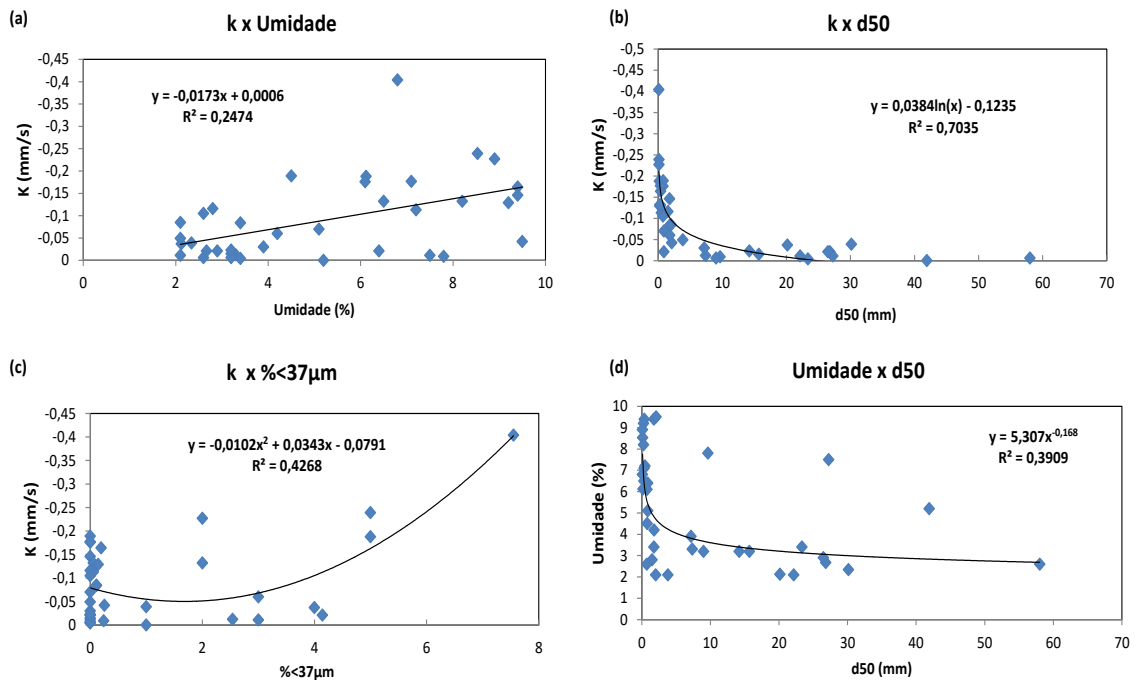


Figura 5.17. Gráficos de correlação entre as variáveis que mais influenciaram na cinética de peneiramento

As análises sugerem que a granulometria é a variável com melhor correlação frente a cinética de peneiramento. O gráfico da Figura 5.17b analisou a correlação entre o parâmetro de cinética de peneiramento k e o tamanho médio d_{50} , o que gerou o maior grau de correlação entre todas as análises realizadas: $R^2 = 0,6746$, através de uma função logarítmica. A tendência desta função mostrou que: à medida que se aumenta o tamanho médio da amostra aumenta também sua cinética de peneiramento, se estabilizando próximo a zero, que é o valor máximo.

A Figura 5.17c apresentou o segundo maior grau de correlação, entre as variáveis k e $\%<37\mu\text{m}$ ($R^2 = 0,456$). A tendência observada foi que a cinética de peneiramento diminuiu com o aumento do percentual de ultrafinos segundo uma função quadrática.

Os graus de correlações envolvendo a umidade se apresentaram menores, ambos abaixo de 0,4. Observou-se uma tendência de diminuição da cinética de peneiramento com o aumento da umidade (Figura 5.17a), bem como o aumento da umidade com a diminuição do tamanho médio d_{50} , o que também pôde se concluir sobre a maior afinidade de sistemas particulados mais finos com a umidade.

5.3. Dimensionamento de peneiras e ajustes no método de Peter King

Este tópico será dividido em duas partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados calculados pelos três métodos estudados neste trabalho e uma avaliação comparativa dos resultados destas simulações com os valores das áreas das peneiras e qualidades dos produtos reais. A segunda parte tratará dos ajustes realizados no MPK com o objetivo de se aumentar a precisão e confiabilidade na aplicação deste método.

5.3.1. Dimensionamento de peneiras e avaliação comparativa com as condições industriais

A seleção de peneiras industriais é definida, principalmente, a partir da área de peneiramento e da qualidade granulométrica dos produtos. Para esta etapa foram selecionados os três métodos clássicos de dimensionamento de peneiras, com base nas respectivas referências bibliográficas: 1) MAC – Allis-Chalmers (METSO, 2005), 2) MPK – Peter King (KING, 2001) 3) MK – Karra (KARRA, 1979). O MAC, apesar de ser considerado o método mais tradicional, não possibilita o cálculo das distribuições granulométricas dos produtos *oversize* e *undersize*.

As peneiras avaliadas neste tópico foram utilizadas no peneiramento industrial das substâncias representadas pelas seguintes amostras coletadas nos fluxos de alimentação: Am1, Am4, Am5, Am6, Am7, Am18, Am23, Am25, Am29, Am32 e Am34. Como ressaltado no capítulo anterior, estas operações foram rigorosamente selecionadas devido ao rígido controle operacional, cujos projetos das peneiras são considerados referência por especialistas do assunto.

Para maior facilidade e agilidade nos cálculos dos três métodos propostos, foi utilizado o simulador *S³ - Smart Screen Simulator*, programado em linguagem VBA, em plataforma Microsoft Excel®, que foi desenvolvido especialmente para este trabalho.

As Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os dados de entrada inseridos no simulador para as 15 condições.

Tabela 5.7. Parâmetros de entrada das simulações 1 a 5.

Simulação	1	2	3	4	5
Processo / Amostra	Am1	Am4	Am5	Am6	Am7
Taxa de alimentação de sólidos (t/h)	450,0	169,0	400,0	600,0	650,0
Abertura da tela (mm)	8,00	4,8	12,7	12,7	19,0
Diâmetro do fio (mm)	-	1,8	3,3	3,3	4,6
Abertura projetada da tela (mm)	8,00	4,5	12,2	12,2	18,2
Densidade aparente (t/m³)	2,07	1,9	1,5	1,3	1,3
d50	0,13	7,4	15,7	30,1	20,1
Área Aberta (%)	29,0	53,3	64,9	62,6	64,9
Passante na metade da abertura (%)	87,6%	26,1%	2,4%	9,8%	27,2%
Passante na abertura (%)	91,0%	39,2%	25,2%	14,0%	47,3%
Retido acumulado na abertura (%)	9,0%	60,8%	74,8%	86,0%	52,7%
Passante na metade da abertura projetada (%)	87,6%	25,1%	2,2%	9,5%	26,7%
Passante na abertura projetada (%)	91,0%	38,0%	20,3%	13,8%	45,4%
Retido acumulado na abertura projetada (%)	9,0%	62,0%	79,7%	86,2%	54,6%
Passante no tamanho 1,25h	100,0%	47,5%	25,4%	17,3%	56,7%
Passante no tamanho 0,75h	68,3%	28,5%	15,3%	10,4%	34,0%
Posição do deck (1, 2 ou 3)	1	1	1	1	1
Inclinação da peneira (graus)	0	15	15	15	15
Velocidade do fluxo sobre o deck (m/min)	16,6	20,0	20,0	20,0	25,0
Número de camadas	4	4	4	4	4
Altura de camada na descarga (mm)	32,0	19,0	50,8	50,8	76,0
Umidade (%)	9,0%	3,3%	3,2%	2,3%	2,1%
Fator Projeto	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tipo de peneiramento (seco ou úmido)	Wet	Dry	Dry	Dry	Dry
Forma da abertura	Square	2x1 slot	2x1 slot	Square	Square
Teor de partículas alongadas > 15%?	Yes	No	No	No	No
Condição da superfície do minério	Material úmido, lamacento ou pegajoso	Material seco britado	Material seco britado	Material seco britado	Material seco britado
Tipo de tela	Poliuretano	Aço	Aço	Aço	Aço
Tipo de Peneira	Horizontal	Inclinada	Inclinada	Inclinada	Inclinada
k	-0,234	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032

Tabela 5.8. Parâmetros de entrada das simulações 6 a 10.

Simulação	6	7	8	9	10
Processo / Amostra	Am18	Am23	Am25	Am29	Am32
Taxa de alimentação de sólidos (t/h)	600,0	650,0	100,0	60,0	80,0
Abertura da tela (mm)	10,0	0,3	4,8	0,6	1,0
Diâmetro do fio (mm)	2,7	0,3	1,8	0,3	0,9
Abertura projetada da tela (mm)	9,6	0,3	4,5	0,6	0,9
Densidade aparente (t/m ³)	2,1	1,3	1,5	1,6	1,6
d50	1,8	0,3	1,8	0,1	1,5
Área Aberta (%)	62,3	62,3	53,3	49,1	28,0
Passante na metade da abertura (%)	67,2%	13,6%	55,7%	63,6%	37,9%
Passante na abertura (%)	89,0%	66,6%	75,0%	80,2%	44,0%
Retido acumulado na abertura (%)	11,0%	33,4%	25,0%	19,8%	56,0%
Passante na metade da abertura projetada (%)	66,5%	12,2%	54,7%	62,8%	37,2%
Passante na abertura projetada (%)	79,2%	56,5%	73,3%	78,0%	43,7%
Retido acumulado na abertura projetada (%)	20,8%	43,5%	26,7%	22,0%	56,3%
Passante no tamanho 1,25h	99,1%	70,6%	91,7%	97,5%	54,6%
Passante no tamanho 0,75h	59,4%	42,3%	55,0%	58,5%	32,8%
Posição do deck (1, 2 ou 3)	1	1	1	1	1
Inclinação da peneira (graus)	15	15	15	8	15
Velocidade do fluxo sobre o deck (m/min)	27,0	26,0	28,0	15,0	18,0
Número de camadas	4	4	4	4	4
Altura de camada na descarga (mm)	40,0	1,2	19,0	2,4	4,0
Umidade (%)	9,4%	8,2%	4,2%	6,8%	2,8%
Fator Projeto	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tipo de peneiramento (seco ou úmido)	Dry	Wet	Dry	Dry	Dry
Forma da abertura	Square	4x1 slot	Square	4x1 slot	3x1 slot
Teor de partículas alongadas > 15%?	Yes	No	No	No	No
Condição da superfície do minério	Material úmido, lamacento ou pegajoso	Material úmido, lamacento ou pegajoso	Material seco britado	Material com superfície úmida ou proveniente de pilhas de superfície com até 15% de umidade por volume	Material seco britado
Tipo de tela	Aço	Aço	Aço	Aço	Aço
Tipo de Peneira	Inclinada	Inclinada	Inclinada	Inclinada	Inclinada
k	-0,153	-0,125	-0,060	-0,399	-0,071

Tabela 5.9. Parâmetros de entrada das simulações 11 a 15.

Simulação	11	12	13	14	15
Processo / Amostra	Am34	Am4 (T2)	Am5 (T2)	Am6 (T2)	Am7 (T2)
Taxa de alimentação de sólidos (t/h)	80,0	169,0	144,0	180,0	350,0
Abertura da tela (mm)	2,00	4,8	12,7	12,70	19,0
Diâmetro do fio (mm)	1,0	1,8	3,3	3,3	4,6
Abertura projetada da tela (mm)	1,90	4,5	12,2	12,15	18,2
Densidade aparente (t/m³)	1,42	1,9	1,5	1,31	1,3
d50	1,89	7,4	15,7	30,14	20,1
Área Aberta (%)	44,4	53,3	64,9	62,6	64,9
Passante na metade da abertura (%)	25,0%	26,1%	2,4%	9,8%	27,2%
Passante na abertura (%)	55,0%	39,2%	25,2%	14,0%	47,3%
Retido acumulado na abertura (%)	45,0%	60,8%	74,8%	86,0%	52,7%
Passante na metade da abertura projetada (%)	23,9%	25,1%	2,2%	9,5%	26,7%
Passante na abertura projetada (%)	50,6%	38,0%	20,3%	13,8%	45,3%
Retido acumulado na abertura projetada (%)	49,4%	62,0%	79,7%	86,2%	54,7%
Passante no tamanho 1,25h	63,2%	47,5%	25,4%	17,3%	56,6%
Passante no tamanho 0,75h	37,9%	28,5%	15,3%	10,4%	34,0%
Posição do deck (1, 2 ou 3)	1	1	1	1	1
Inclinação da peneira (graus)	15	15	15	15	15
Velocidade do fluxo sobre o deck (m/min)	18,0	20,0	20,0	20,0	25,0
Número de camadas	4	4	4	4	4
Altura de camada na descarga (mm)	8,0	19,0	50,8	50,8	76,0
Umidade (%)	3,4%	3,3%	3,2%	2,3%	2,1%
Fator Projeto	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tipo de peneiramento (seco ou úmido)	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry
Forma da abertura	4x1 slot	2x1 slot	2x1 slot	Square	Square
Teor de partículas alongadas > 15%?	No	No	No	No	No
Condição da superfície do minério	Material seco britado	Material seco britado	Material seco britado	Material seco britado	Material seco britado
Tipo de tela	Aço	Aço	Aço	Aço	Aço
Tipo de Peneira	Inclinada	Inclinada	Inclinada	Inclinada	Inclinada
k	-0,064	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032

Cabe lembrar que as simulações 12, 13, 14 e 15 foram executadas a partir dos mesmos dados de entrada das simulações 2, 3, 4 e 5, respectivamente. A única variação foi na taxa de alimentação, que foi menor que a taxa de alimentação de projeto, em cada uma destas quatro últimas simulações.

Os fatores de correção, respectivos produtórios e as capacidades unitárias de peneiramento relacionadas aos três métodos de simulação podem ser visualizados nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12.

Tabela 5.10. Fatores de correção k_i , produtórios Πk_i e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 1 a 5).

Simulação	1			2			3			4			5		
Processo / Amostra	Am1			Am4			Am5			Am6			Am7		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK
k1	1,96	1,95	2,88	0,71	0,72	1,00	0,42	0,25	0,73	0,49	0,40	0,81	0,76	0,74	1,02
k2	0,94	0,96	1,49	1,31	1,35	0,86	1,74	1,86	0,64	2,70	2,85	0,57	1,19	1,21	0,94
k3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k4	1,32	1,29	1,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k5	0,58	0,58	0,51	1,07	1,07	1,00	1,25	1,25	1,00	1,25	1,25	1,00	1,30	1,30	1,00
k6	0,90	0,90	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k7	1,00	0,75	-	0,85	1,00	-	0,85	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k8	1,00	1,00	-	1,14	1,15	-	1,14	1,15	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k9	-	1,15	-	-	1,00	-	-	1,00	-	-	1,00	-	-	1,00	-
k10	-	1,29	1,29	-	1,21	1,21	-	0,92	0,92	-	0,82	0,82	-	0,81	0,81
k11	-	-	0,80	-	-	0,88	-	-	0,92	-	-	0,94	-	-	0,85
Πk	1,27	1,40	4,54	0,96	1,45	0,90	0,89	0,61	0,40	1,66	1,16	0,35	1,17	0,94	0,66
Q_u^F (m ³ /h/m ²) (MAC) / W_{ij}^F (t/h/m ²) (MPK) / W_u^U (t/h/m ²) (MK)	16,6	38,4	13,3	12,7	32,2	9,4	21,1	45,0	16,7	21,1	45,0	16,7	26,1	51,6	20,4

Tabela 5.11. Fatores de correção k_i , produtórios Πk_i e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 6 a 10).

Simulação	6			7			8			9			10		
Processo / Amostra	Am18			Am23			Am25			Am29			Am32		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK
k1	1,54	1,54	1,83	1,51	0,47	0,85	1,31	1,31	1,23	1,45	1,47	1,64	0,96	0,96	0,36
k2	0,95	0,96	1,35	0,98	1,03	1,08	1,01	1,00	1,28	0,99	0,98	1,34	1,24	1,26	0,92
k3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k4	1,00	1,00	1,00	ERRO!	1,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k5	1,25	1,25	1,00	0,49	0,49	1,00	1,07	1,07	1,00	0,98	0,98	1,00	0,56	0,56	1,00
k6	0,90	0,90	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k7	-	0,75	-	1,00	0,75	-	0,85	1,00	-	0,75	0,85	-	1,00	1,00	-
k8	1,00	1,00	-	1,24	1,25	-	1,00	1,00	-	1,24	1,25	-	1,21	1,20	-
k9	-	1,00	-	-	1,00	-	-	1,00	-	-	1,07	-	-	1,00	-
k10	-	1,31	1,31	-	0,80	0,80	-	0,96	0,96	-	0,98	0,98	-	1,01	1,01
k11	-	-	0,75	-	-	0,82	-	-	0,77	-	-	0,76	-	-	0,86
Πk	1,64	1,63	2,44	0,90	0,31	0,60	1,20	1,35	1,17	1,32	1,57	1,62	0,81	0,82	0,29
Q_u^F (m ³ /h/m ²) (MAC) / W_{ij}^F (t/h/m ²) (MPK) / W_u^U (t/h/m ²) (MK)	18,6	41,5	14,7	3,1	12,1	-2,3	12,7	32,2	9,4	4,5	15,6	-0,1	5,8	18,7	1,6

Tabela 5.12. Fatores de correção k_i , produtórios Πk_i e capacidades unitárias dos três métodos de simulação (Simulações 11 a 15).

Simulação	11			12			13			14			15		
Processo / Amostra	Am34			Am4 (T2)			Am5 (T2)			Am6 (T2)			Am7 (T2)		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK
k1	0,70	0,70	0,99	0,71	0,72	1,00	0,42	0,25	0,73	0,49	0,40	0,81	0,76	0,74	1,02
k2	1,13	1,12	1,01	1,31	1,35	0,86	1,74	1,86	0,64	2,70	2,85	0,57	1,19	1,21	0,94
k3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k5	0,89	0,89	1,00	1,07	1,07	1,00	1,25	1,25	1,00	1,25	1,25	1,00	1,30	1,30	1,00
k6	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k7	0,85	1,00	-	0,85	1,00	-	0,85	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k8	1,24	1,25	-	1,14	1,15	-	1,14	1,15	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-
k9	-	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	-
k10	-	0,00	0,89	-	0,00	1,21	-	0,00	0,92	-	0,00	0,82	-	0,00	0,81
k11	-	-	0,84	-	-	0,88	-	-	0,00	-	-	0,94	-	-	0,86
Πk	0,74	0,77	0,74	0,96	1,45	0,90	0,89	0,61	0,40	1,66	1,16	0,35	1,17	0,94	0,66
Q_u^F (m ³ /h/m ²) (MAC) / W_u^F (t/h/m ²) (MPK) / W_u^B (t/h/m ²) (MK)	8,2	23,9	4,6	12,7	32,2	9,4	21,1	45,0	16,7	21,1	45,0	16,7	26,1	51,6	20,4

As Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam os resultados das áreas de peneiramento e respectivas larguras e colunas das simulações 1 a 11 e da condição real de cada cenário. Todas estas simulações consideraram a capacidade de projeto das respectivas peneiras avaliadas. A largura simulada foi a “mínima” suficiente para atender as duas principais condições já discutidas neste trabalho: mantendo-se a relação mínima, de 2:1, entre o comprimento e a largura, e garantindo uma altura de camada de no máximo quatro vezes a abertura da tela da peneira na descarga do deck de peneiramento. Vale ressaltar que todas as áreas simuladas foram multiplicadas pelo fator de “1,2”, normalmente utilizado nos projetos destes equipamentos.

Tabela 5.13. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulações 1 a 5).

Simulação	1			2			3			4			5		
Processo / Amostra	Am1			Am4			Am5			Am6			Am7		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK
Área da peneira simulada (m ²)	12,4	10,1	8,1	17,8	9,0	15,5	17,4	17,5	4,1	15,7	13,8	15,7	19,7	16,1	18,1
Largura mínima (m)	1,0	1,0	1,0	3,0	2,1	2,8	2,9	3,0	1,4	2,8	2,6	2,8	2,5	2,5	2,5
Comprimento equivalente (m)	12,6	10,2	8,2	6,0	4,2	5,6	5,9	5,9	2,8	5,6	5,3	5,6	8,0	6,5	7,4
Área da peneira industrial (m ²)	14,9			10,0			20,0			14,9			14,9		
Largura mínima (m)	2,4			2,0			2,0			2,4			2,4		
Comprimento equivalente (m)	4,9			5,0			5,0			6,1			6,1		

Tabela 5.14. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulações 6 a 10).

Simulação	6			7			8			9			10		
Processo / Amostra	Am18			Am23			Am25			Am29			Am32		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK	MAC	MPK	MK
Área da peneira simulada (m ²)	11,2	10,6	14,6	ERRO!	16,1	ERRO!	5,1	2,8	6,7	7,9	2,9	ERRO!	12,8	6,3	92,4
Largura mínima (m)	1,4	1,4	1,4	ERRO!	2,8	ERRO!	0,6	0,6	0,6	2,0	1,2	ERRO!	2,5	1,8	6,8
Comprimento equivalente (m)	8,0	7,6	10,4	ERRO!	5,7	ERRO!	8,1	4,4	10,6	4,0	2,4	ERRO!	5,1	3,5	13,6
Área da peneira industrial (m ²)	18,6			3,0			3,6			10,5			9,9		
Largura mínima (m)	1,5			1,2			1,2			1,4			1,8		
Comprimento equivalente (m)	6,1			2,4			3,0			7,5			5,5		

Tabela 5.15. Resultado final das simulações e comparação com as dimensões das peneiras industriais (Simulação 11).

Simulação	11		
Processo / Amostra	Am34		
Método de dimensionamento	MAC	MPK	MK
Área da peneira simulada (m ²)	11,1	5,2	11,2
Largura mínima (m)	2,4	1,6	2,4
Comprimento equivalente (m)	4,7	3,2	4,7
Área da peneira industrial (m ²)	6,5		
Largura mínima (m)	1,5		
Comprimento equivalente (m)	4,3		

A Figura 5.18 ilustra também, de forma gráfica, as áreas das peneiras industriais e os resultados das simulações realizadas a partir da capacidade de projeto destas peneiras.

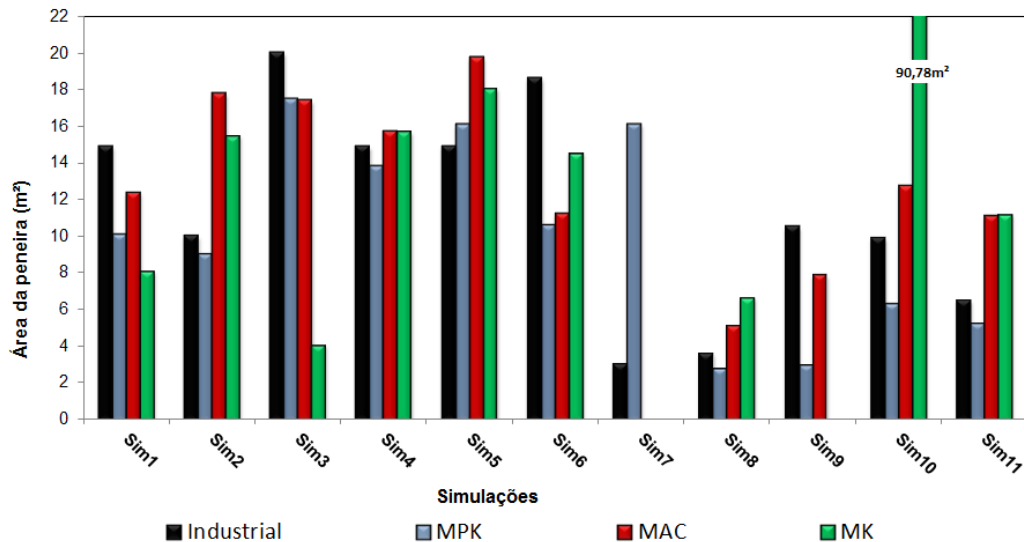


Figura 5.18. Avaliação comparativa das áreas de peneiramento industriais e simulações.

Observou-se que as áreas simuladas pelo MPK se mantiveram abaixo das áreas industriais em quase todas as simulações. As únicas exceções foram os resultados das simulações 5 e 7. A diferença entre as áreas da simulação 5 e da industrial foi de apenas 1,18m² ou em torno de 7,4% de diferença, valor irrelevante para fins de definição de projeto, uma vez que esta diferença pode ser absorvida pela aproximação na seleção das peneiras dentro dos catálogos de fabricantes, fatores de projeto, ou até mesmo pequenas variações nos parâmetros dos equipamentos ou do material alimentado. Quanto à simulação 7, esta apresentou uma área simulada significativamente maior que à área da própria peneira industrial (16,1m² *versus* 3,0m², respectivamente), o que representa uma diferença em torno de 13,1m², ou quase cinco vezes maior. Avaliando com maior detalhe os parâmetros desta simulação, notou-se que se trata da condição cuja abertura da tela é a menor de todas as condições, igual a 0,297mm, o que evidenciou a dificuldade deste método em cálculos de peneiras com pequenas aberturas. Este fato é corroborado também pela impossibilidade dos demais métodos (MAC e MK) gerarem quaisquer resultados para esta simulação. Ainda observando as demais condições com pequenas aberturas, o MK não foi capaz de gerar resultados para a simulação 9, uma vez que a abertura da tela é igual a 0,6mm, o que implicou num valor negativo da capacidade unitária ($W_u^U = -2,3\text{t/h/m}^2$). Da mesma forma a área calculada na simulação 10 (abertura de 1,0mm) foi extremamente discrepante em relação ao valor real da área (90,98m² *versus* 9,90m², respectivamente). Neste caso tanto o produtório dos fatores, quanto a capacidade unitária apresentaram valores muito abaixo da expectativa ($\Pi ki = 0,29$ e $W_u^U = 1,63\text{t/h/m}^2$). Esta situação elevou grandemente o valor da área da peneira, uma vez que mesmo sendo pequenas as vazões mássicas de alimentação e passante na peneira, o valor a ser relacionado foi desproporcionalmente menor. Os menores desvios ocorreram nas condições 2 (MPK, -10%), condição 3 (MAC e MPK, ambos igual a -13%), condição 4 (MAC, 5%, MPK, -7% e MK, 5%) e condição 5 (MPK, 8%). Em todas estas condições, o Gnaisse foi o material alimentado, cuja umidade variou entre 2,12% e 3,3%, menor que quase todos os outros materiais e a densidade aparente média próxima de 1,6t/m³ (densidade padrão do método). As aberturas das telas variaram entre 4,76mm e 19mm. As demais simulações MAC e MK

apresentaram desvios tanto positivos quanto negativos em relação às áreas industriais, no entanto, todos os desvios com valores absolutos maiores do que 20%.

A Figura 5.19 destaca de forma gráfica as correlações entre resultados industriais e simulações entre os três métodos avaliados. Para tanto, os *outliers* que foram observados em cada método foram excluídos dessas análises, tais quais: simulação 7 de todos os métodos e simulações 9 e 10 do MAC e MK. Em todas estas condições as aberturas se apresentaram fora do limite matemático do método ou com valores muito baixos para serem aplicados. A partir da observação dos resultados, ficou evidente que a melhor correlação ocorreu para o MPK ($R^2 = 0,69$ e parâmetro de inclinação da reta de interpolação = 0,83), enquanto a pior correlação ocorreu no MK ($R^2 = 0,005$ e parâmetro de inclinação da reta de interpolação = 0,063).

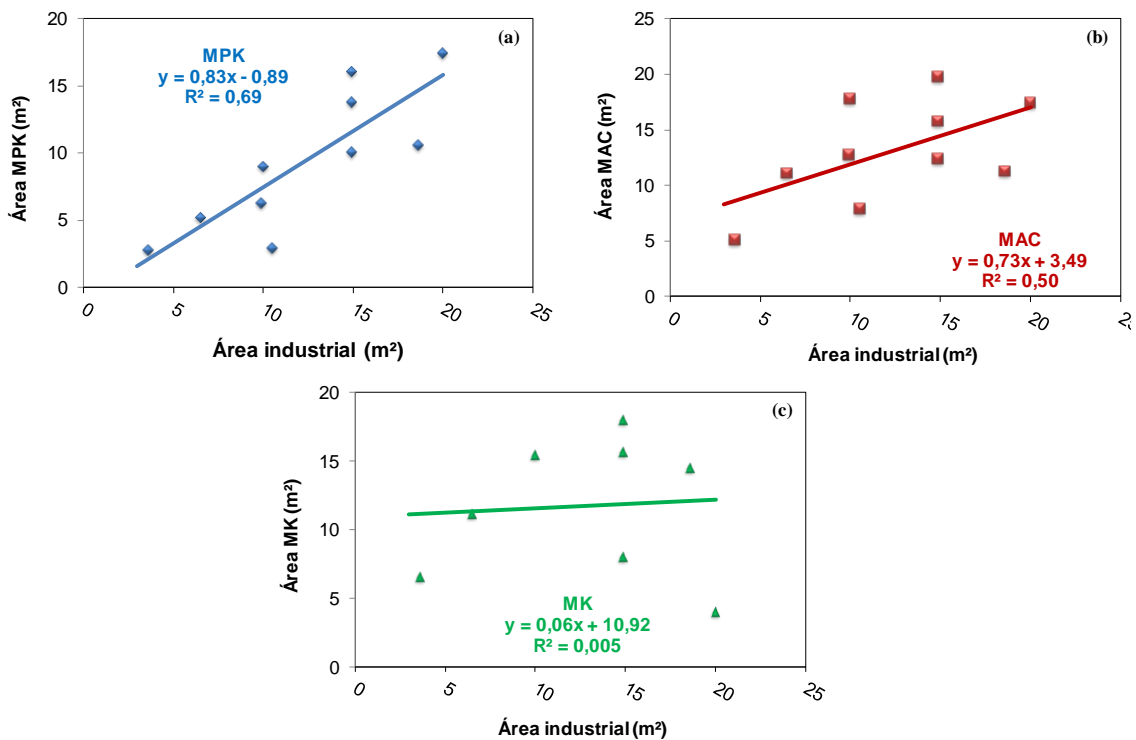


Figura 5.19. Correlações entre os resultados das áreas de peneiramento das 11 condições industriais e das simulações (a) Área MPK x Área Industrial (b) Área MAC x Área Industrial (c) Área MK x Área Industrial.

Em cada cenário simulado foi possível obter o balanço de massas da peneira, incluindo as partições dos produtos e distribuições granulométricas (*oversize* e *undersize*). Isto possibilitou que os resultados obtidos pelos modelos MPK e MK fossem comparados com o balanço de massas do peneiramento industrial real. Vale lembrar que o MAC não possui equações para o cálculo de distribuição granulométrica dos produtos. As Figuras 5.20 a 5.34 apresentam o balanço de massa calculado para cada cenário, principais parâmetros utilizados em cada método e eficiências globais obtidas em cada processo.

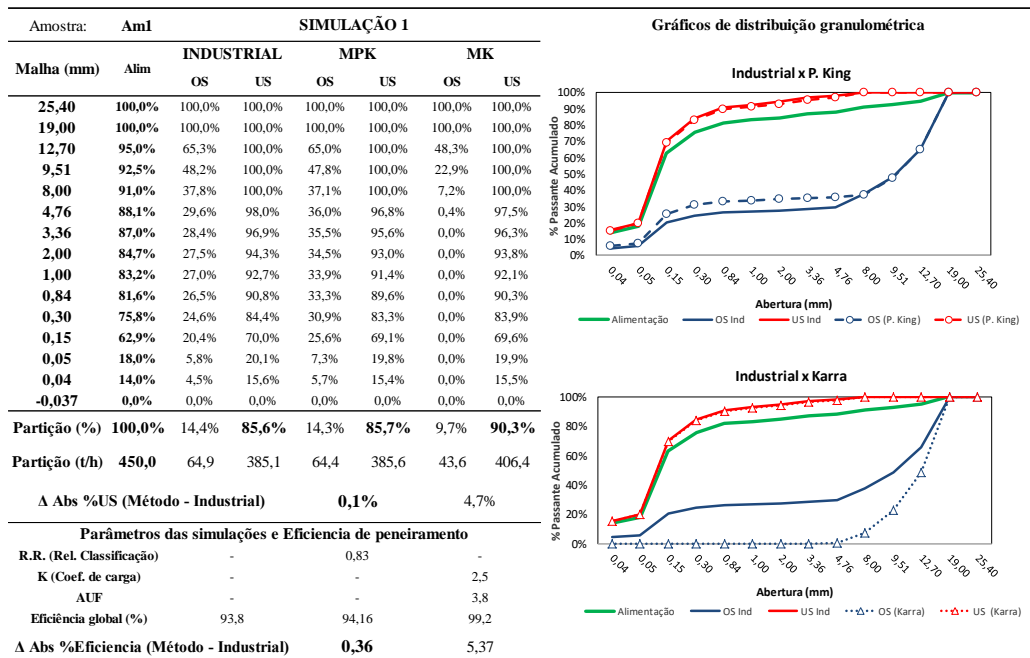


Figura 5.20. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 1.

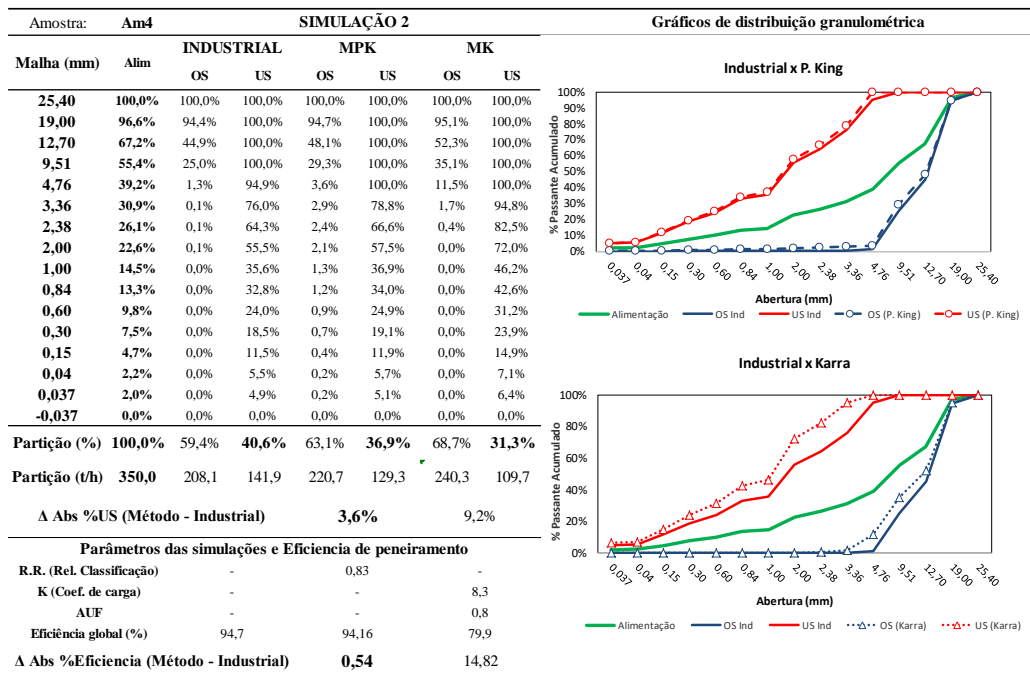


Figura 5.21. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 2.

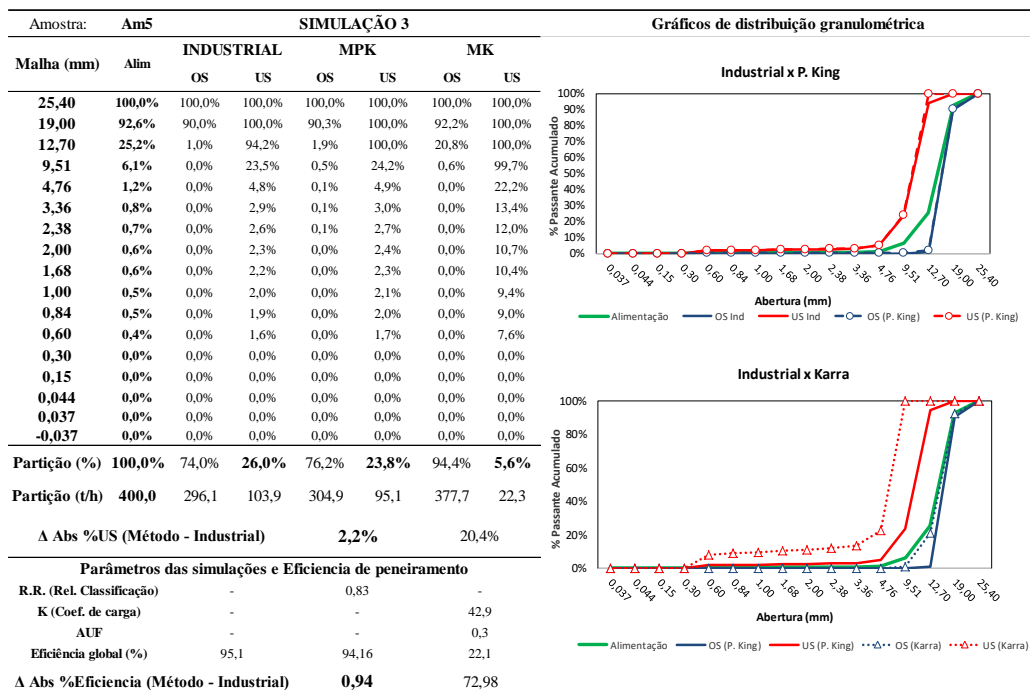


Figura 5.22. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 3.

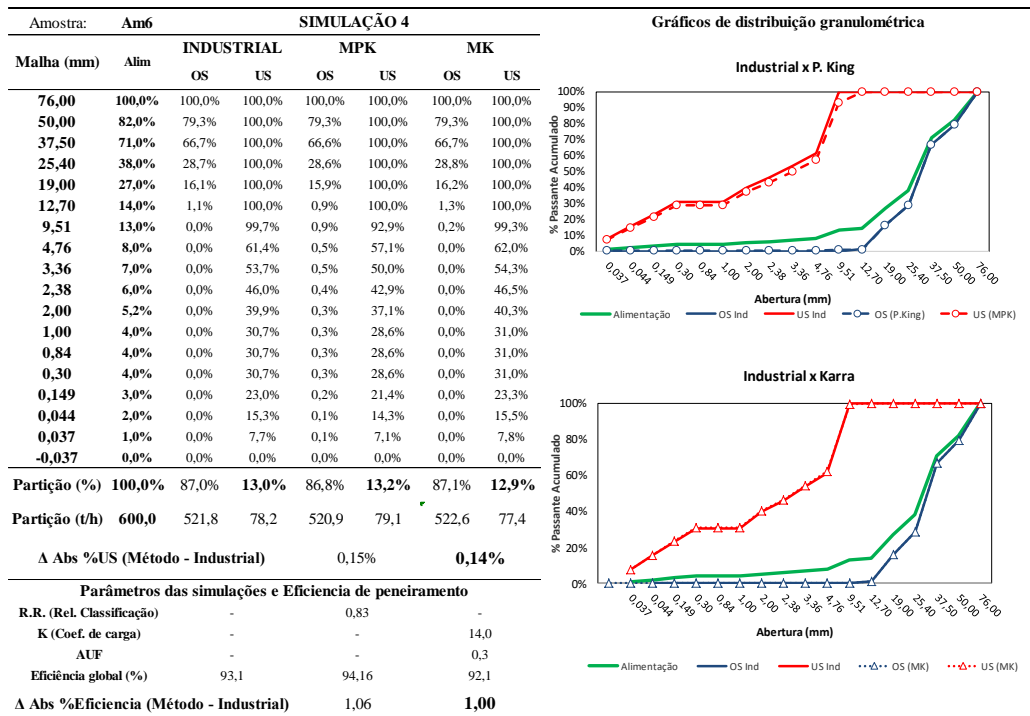


Figura 5.23. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 4.

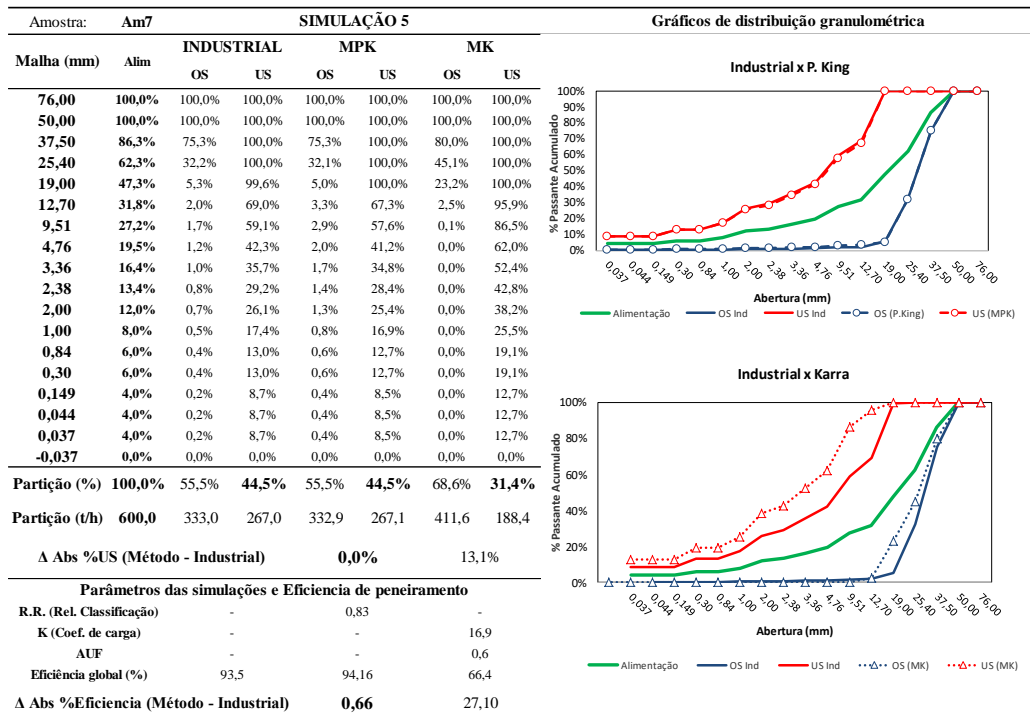


Figura 5.24. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 5.

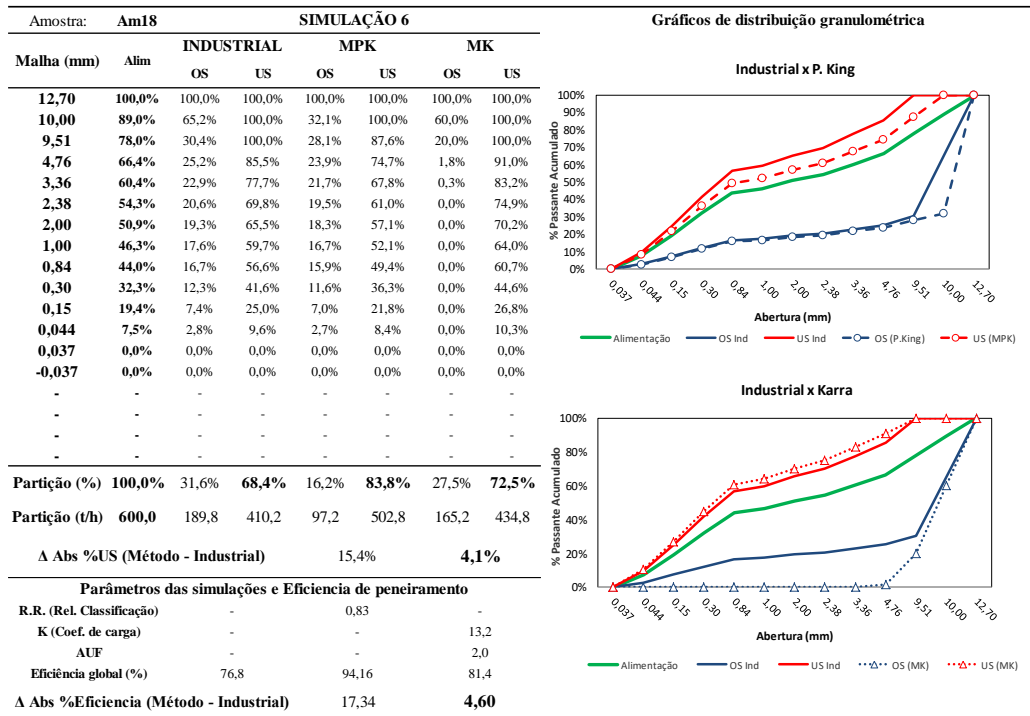


Figura 5.25. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 6.

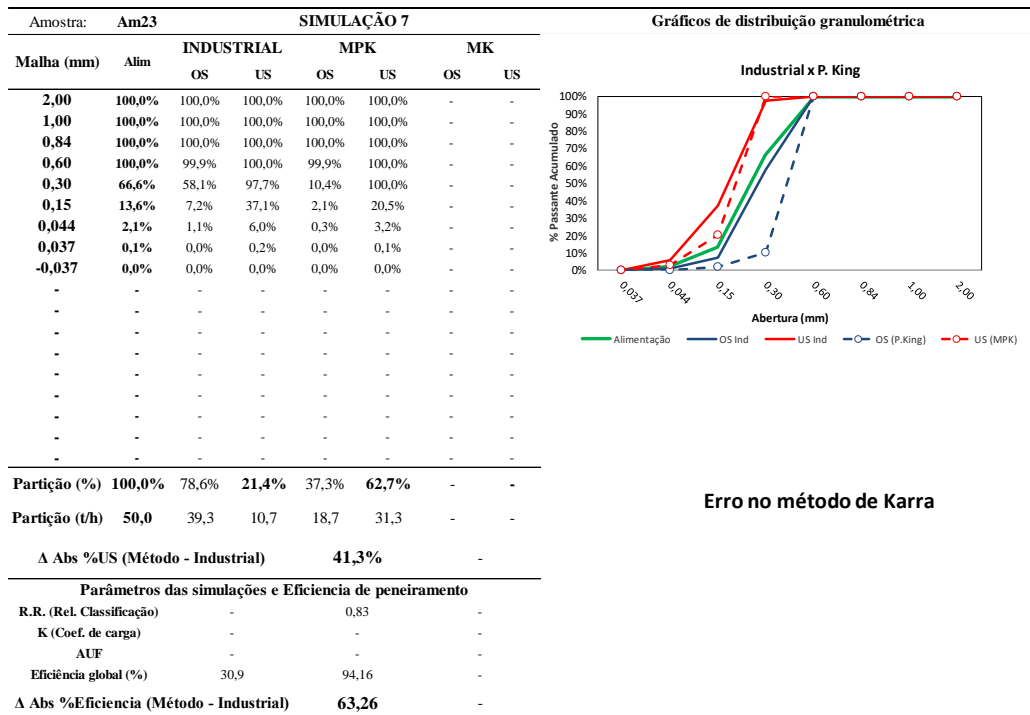


Figura 5.26. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 7.

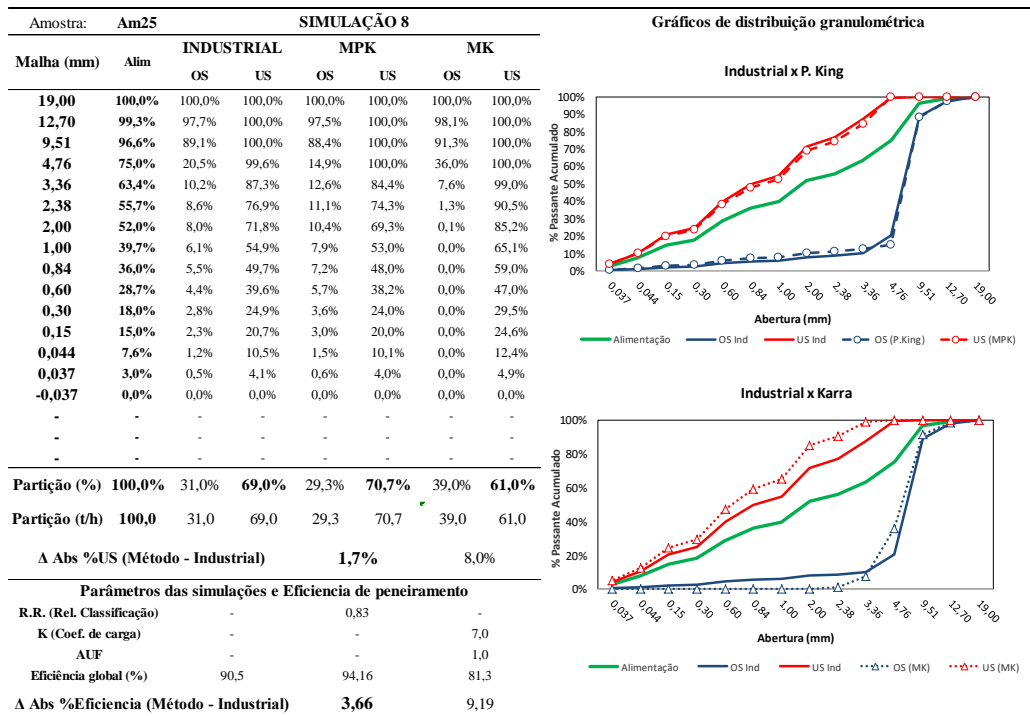


Figura 5.27. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 8.

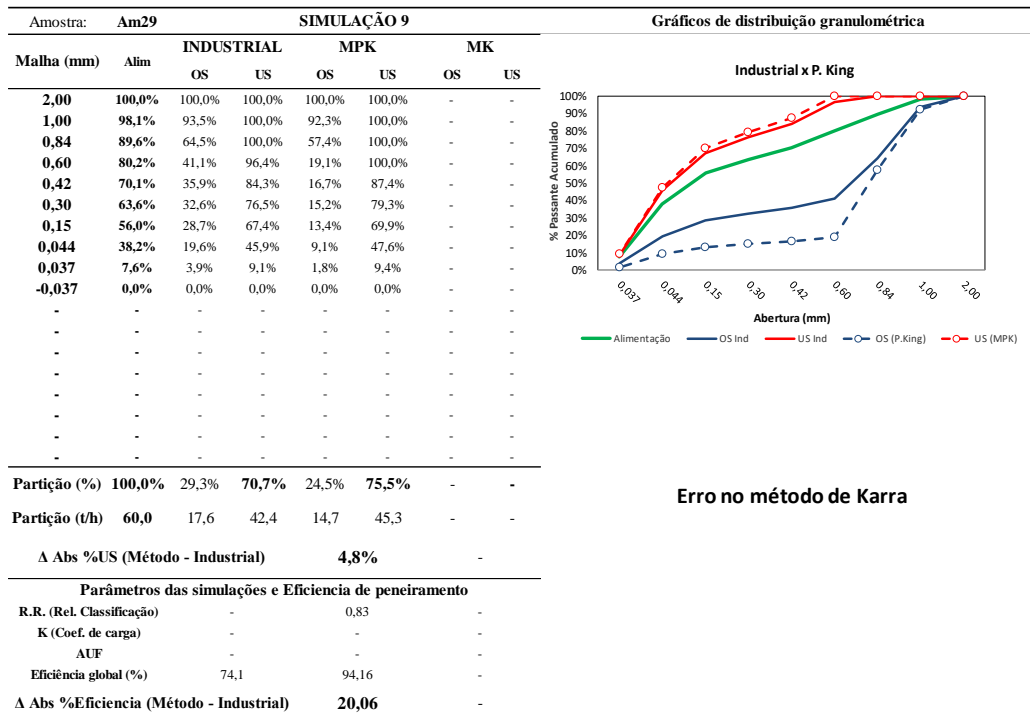


Figura 5.28. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 9.

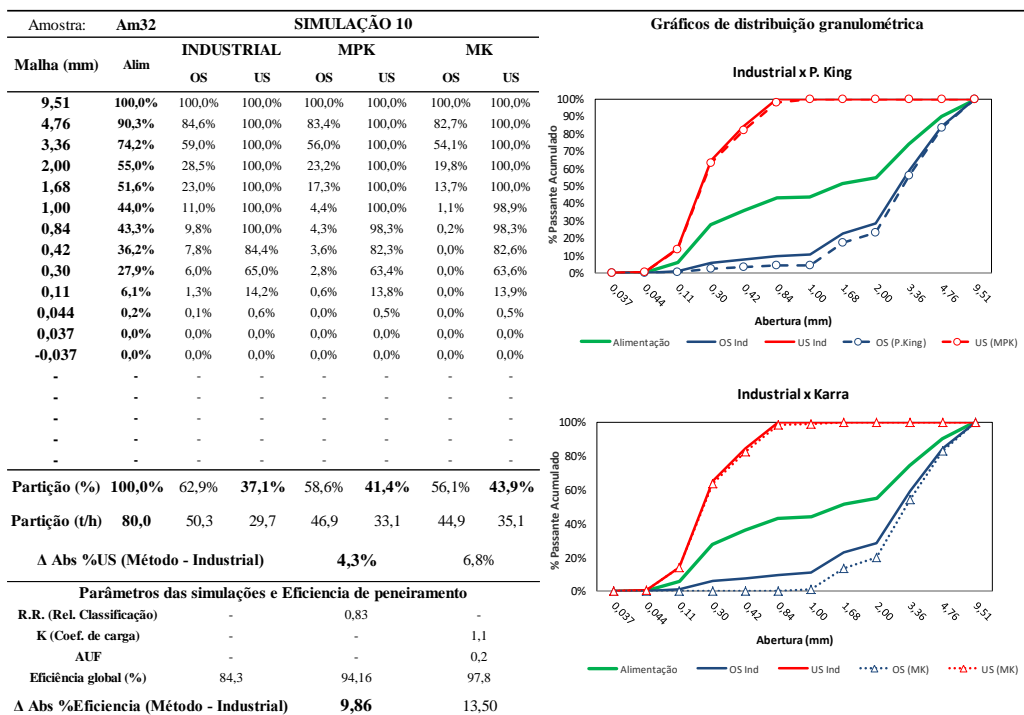


Figura 5.29. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 10.

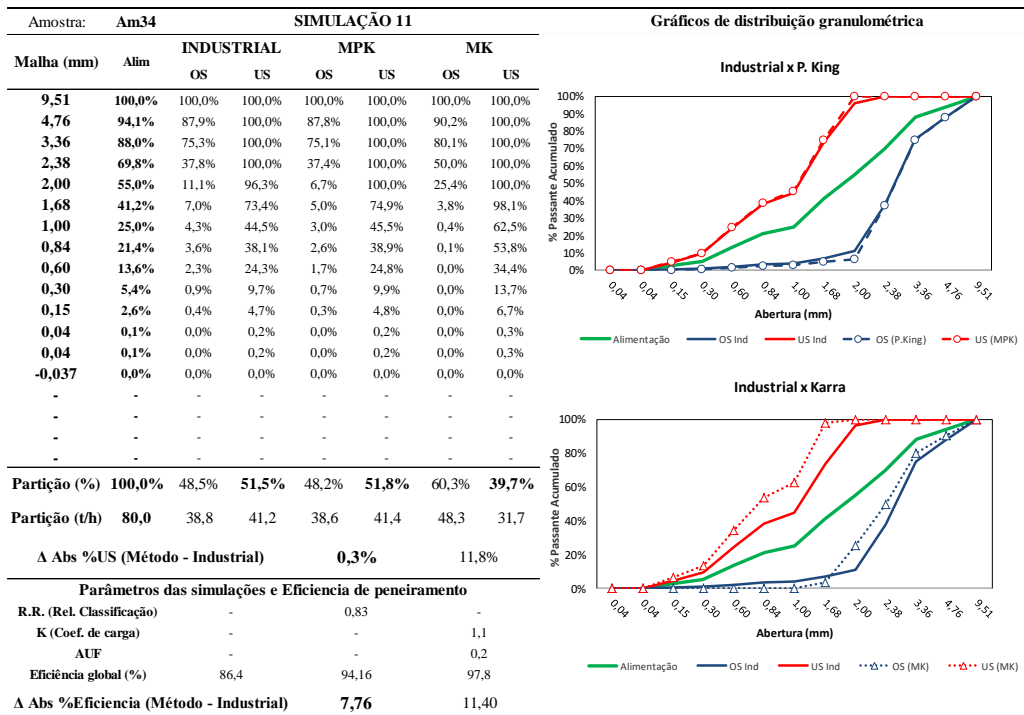


Figura 5.30. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 11.

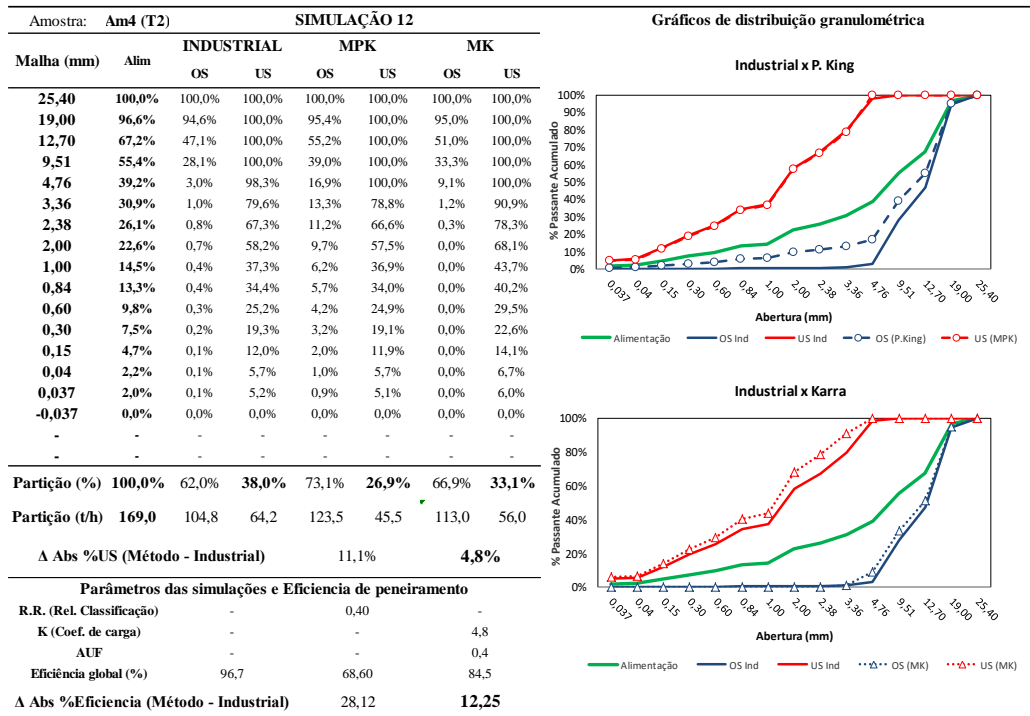


Figura 5.31. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 12.

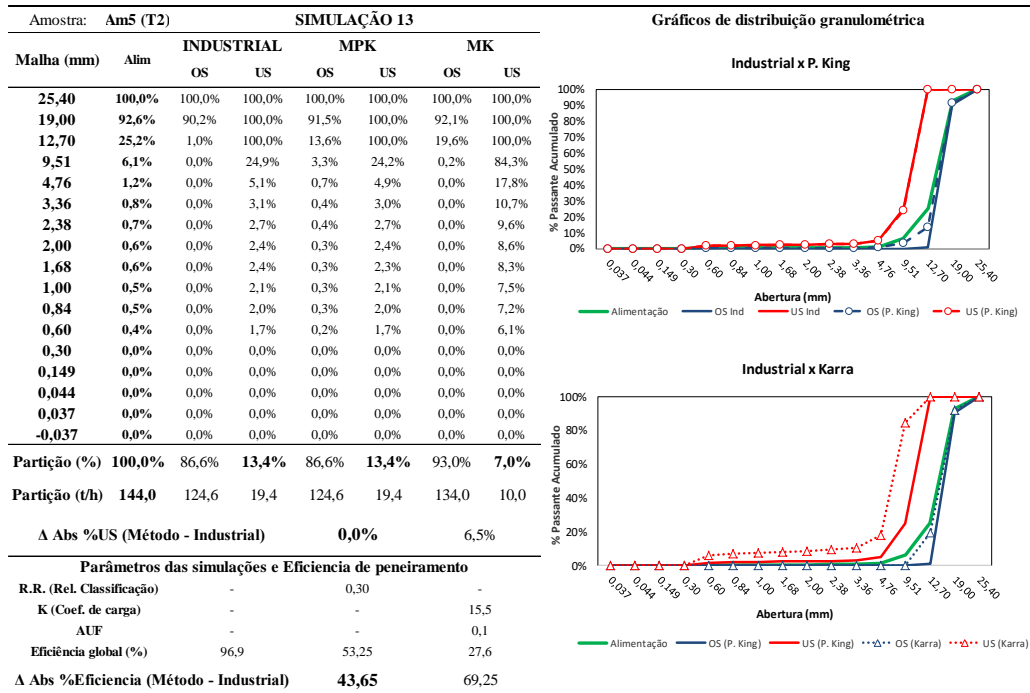


Figura 5.32. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 13.

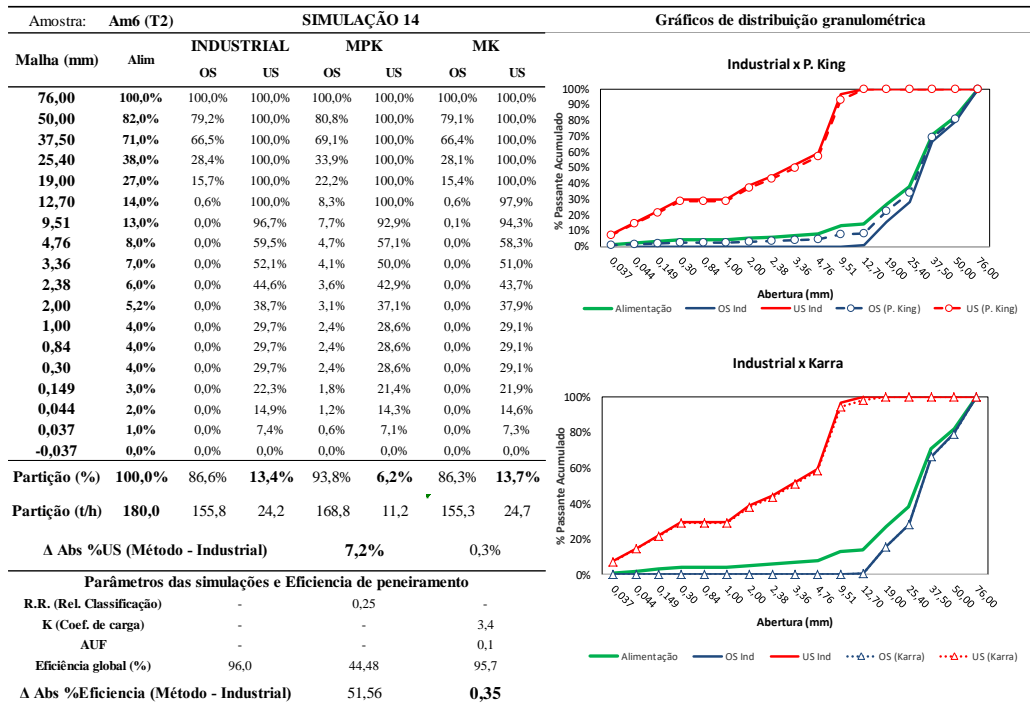


Figura 5.33. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 14.

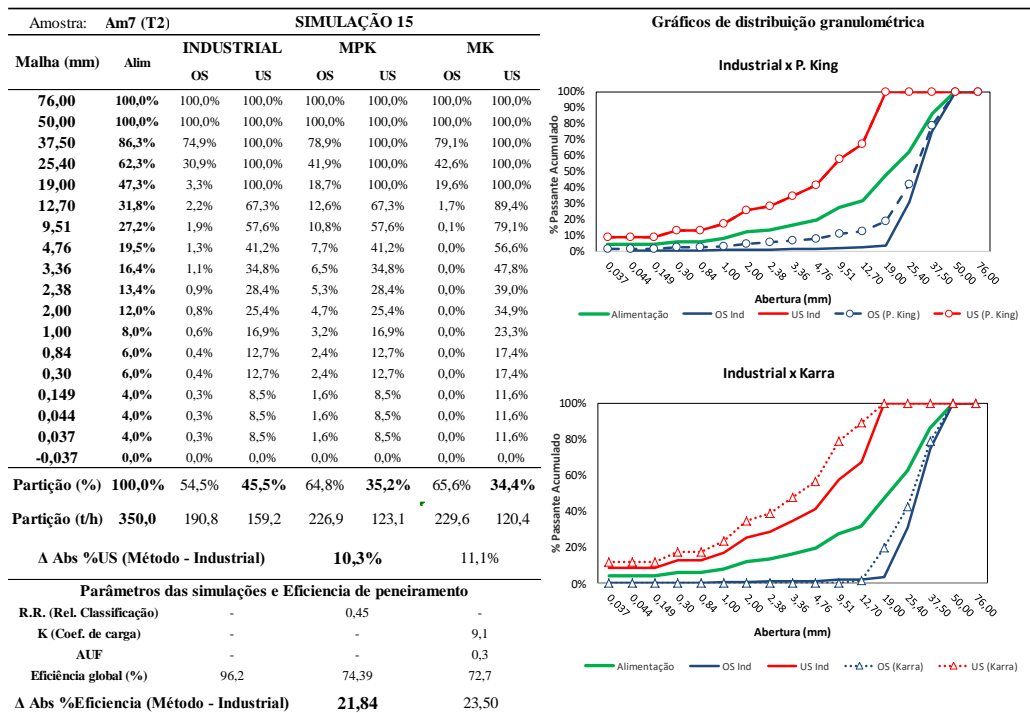


Figura 5.34. Balanço de massas, distribuições granulométricas e eficiência de peneiramento da Simulação 15.

Os balanços de massas das simulações puderam ser avaliados e comparados, a partir das partições de massa para *undersize* e das eficiências globais de peneiramento. Em relação às partições de massa para *undersize* observou-se que o MPK apresentou maior aderência à condição industrial que o MK. Um contraponto nesta afirmação pôde ser notado a partir dos resultados da simulação 7, onde a diferença das partições para *undersize* chega a 41,3%. Fato este que pode ser explicado pela limitação do método na simulação de aberturas de telas muito finas, que neste caso foi de 0,297mm. Também vale ressaltar que se trata da única peneira estática deste trabalho. Desconsiderando, portanto, a simulação 7, a Figura 5.35 apresenta correlações entre os valores de partição para *undersize* dos dois métodos analisados e do industrial, confirmando numericamente a maior aderência do MPK com a condição industrial.

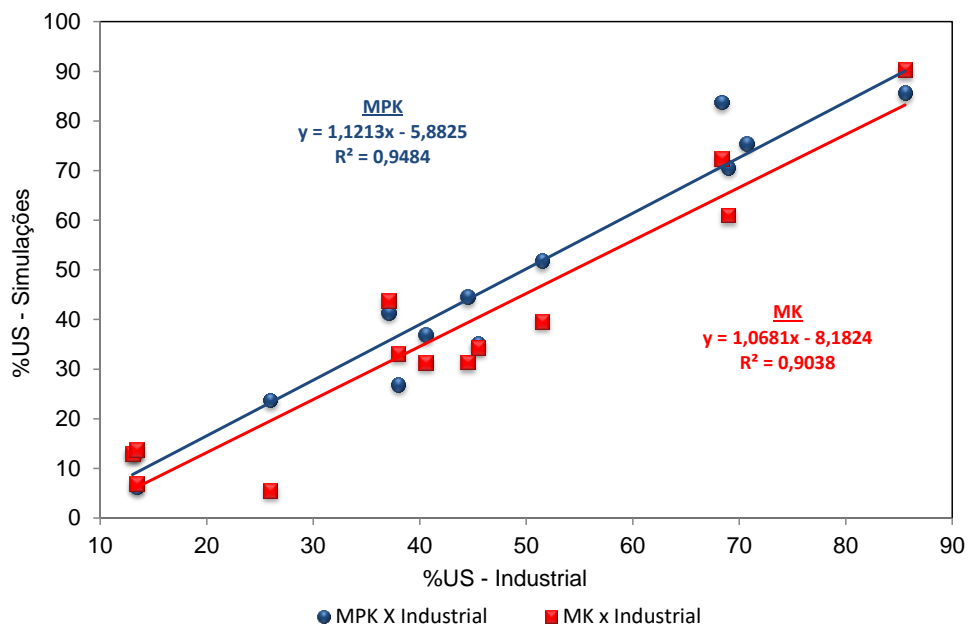


Figura 5.35. Avaliação comparativa da partição de massa para *undersize* nas condições industriais e simulações com MPK e MK.

Quanto à avaliação das eficiências de peneiramento global, observou-se que o MK apresentou valores bastante discrepantes em relação às eficiências industriais (Figura 5.36).

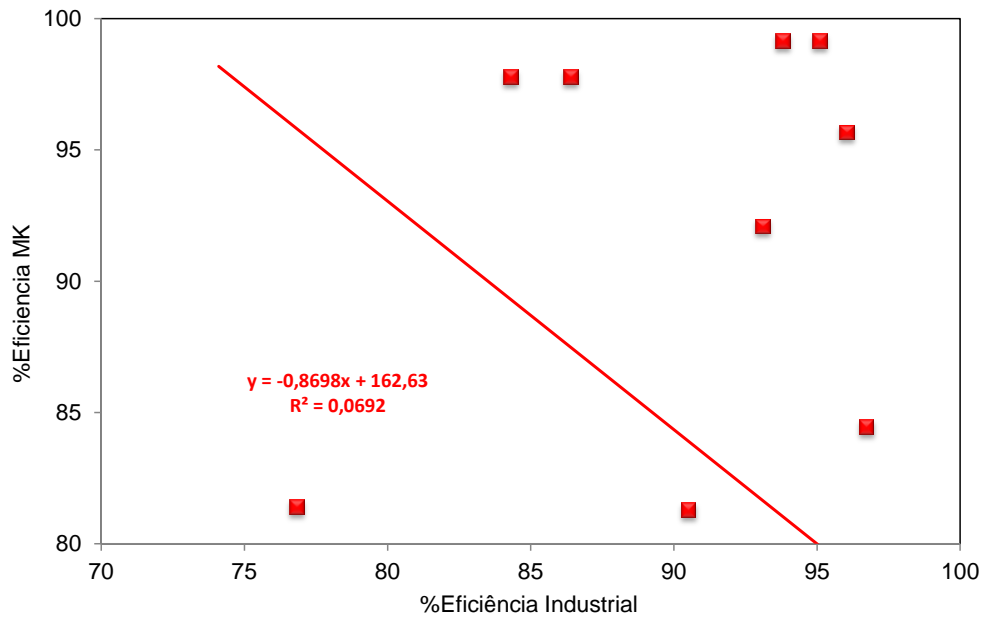


Figura 5.36. Avaliação comparativa das eficiências globais nas condições industriais e simulações do MK.

As únicas exceções aconteceram nas simulações 4 e 14. Em relação ao MPK, a eficiência de peneiramento não variou para as simulações com taxas de alimentação de projeto (simulações 1 a 11). Isto ocorreu devido à eficiência deste método estar em função direta da relação de classificação (R.R.) (Equação 3.51). Este parâmetro, por sua vez, também não variou devido à área da peneira ser calculada a partir da taxa de alimentação e da capacidade unitária corrigida, ou seja, são variáveis que se comportam proporcionalmente. Desta forma, R.R. nas 11 primeiras simulações foi igual a 0,83, enquanto as eficiências de peneiramento global foram iguais a 94,2%. Já para as simulações 12 a 15, que foram executadas a partir de menores taxas de alimentação, se mantiveram as áreas de projeto calculadas, fazendo com que R.R., juntamente com as eficiências globais também variassem. Observou-se, também, que nas simulações com taxas de alimentação reduzidas, houve aumento dos desvios entre as condições industriais. Isto pode ser explicado devido à eficiência de peneiramento nas condições industriais ter aumentado à medida que se reduziu a taxa de alimentação. Este fato se contrapõe ao MPK, no qual a eficiência de peneiramento diminui juntamente com a taxa de alimentação, como pode ser interpretado a partir da Equação 3.53, da revisão

bibliográfica deste trabalho. Estas equações serão discutidas com maiores detalhes no próximo tópico.

5.3.2. Ajustes no MPK

No tópico anterior foram apresentados os resultados de todas as simulações, seus desvios em relação às condições industriais, e devidas observações e análises. Neste tópico serão propostos ajustes no MPK para as funções de capacidade unitária (W_u^F), com a finalidade de se calcular a área da peneira de forma mais precisa, diminuindo os desvios entre o método e as condições industriais (real). Além do mais serão ajustadas também as funções de eficiência de peneiramento, que refletem diretamente nas distribuições granulométrica dos produtos simulados. Para todas estas análises serão considerados: os principais dados obtidos nas condições industriais, funções matemáticas e parâmetros simulados pelo MPK juntamente com a cinética de peneiramento. A correlação com este último parâmetro será de fundamental importância para se compreender o comportamento das variações de capacidade unitária em função da “peneirabilidade” de cada material.

➤ Ajuste da função de capacidade unitária de peneiramento “ W_u^F ”

A primeira etapa para o ajuste da capacidade unitária do MPK ($W_u^F(ajust)$) foi o cálculo deste parâmetro a partir da relação com a taxa de alimentação de projeto, a área de peneiramento industrial (real) e produtório dos fatores (obtido em cada simulação). Desta forma, inicialmente foi calculada a capacidade unitária “real” da peneira ($W_u^F(real)$) A Equação utilizada foi, portanto, a seguinte:

$$W_U^F(real) = \frac{W^F \times kP}{A \times \Pi k_i} \quad \text{Equação 5.4}$$

A Tabela 5.16 apresenta os parâmetros utilizados e os resultados desta etapa.

Tabela 5.16. Capacidade unitária real ($W_{u^F}^{real}$) a partir da relação entre taxa de alimentação de projeto, área de peneiramento e o produtório dos fatores de correção Πk_i * (obtido a partir do MPK)

Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Área da peneira industrial (m ²)	14,9	10,0	20,0	14,9	14,9	18,6	3,0	3,6	10,5	9,9	6,5
Taxa de alimentação (t/h)	450	350	400	600	650	600	50	100	60	80	80
Πk_i *	1,40	1,45	0,61	1,16	0,94	1,63	0,31	1,35	1,57	0,82	0,77
$W_{U^F}^{real}$ (t/h/m ²)	26,0	29,1	39,3	41,8	55,7	23,7	65,6	24,8	4,4	11,9	19,1

Os valores calculados das capacidades unitárias reais foram, em seguida, subtraídos pelas capacidades unitárias de MPK obtidas pela função original do método. A Tabela 5.17 apresenta todos estes valores e os resultados das diferenças entre eles.

Tabela 5.17. Diferenças entre as capacidades unitárias real e a do MPK

Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
W_{U^F} (t/h/m ²) - MPK	38,4	32,2	45,0	45,0	51,6	41,5	12,1	32,2	15,6	18,7	23,9
$W_{U^F}^{real}$ (t/h/m ²)	26	29	39	42	56	24	66	25	4	12	19
ΔW_{U^F} (t/h/m ²)	12,5	3,1	5,7	3,2	-4,1	17,8	-53,4	7,4	11,2	6,8	4,8

Inicialmente observou-se uma discrepância no valor obtido na simulação 7. Pelo mesmo motivo das análises anteriores, este valor será “expurgado”, por ser considerado um *outlier* em relação aos demais dados. Vale lembrar que nesta simulação a abertura da tela foi a menor entre todas as simulações ($a = 0,3\text{mm}$). Em relação aos demais dados cabe a seguinte observação: quanto maior a diferença obtida entre os valores das capacidades unitárias “reais” e “ajustadas” pelo MPK, menor será a área da peneira calculada pelo método, em relação à área real da peneira em cada condição. Na Figura 5.18 do tópico anterior, pôde-se observar que as áreas das peneiras calculadas pelo MPK foram menores que as áreas das peneiras reais em quase todas as condições avaliadas. Ao contrário, se a diferença foi negativa, como no único caso ocorrido na simulação 5, significa que a área obtida pelo MPK foi maior em relação à área industrial.

Uma vez que as principais variáveis de projeto e operacional das peneiras em análise já estão inter-relacionadas nos cálculos de ajustes da capacidade unitária (através dos fatores de correção Πk_i), o motivo destas diferenças pode estar relacionada com outras características e propriedades não evidentes dos materiais da alimentação. No tópico anterior foi desenvolvido o parâmetro relativo à peneirabilidade do material, ou

“cinética de peneiramento”. Este mesmo parâmetro será relacionado no desenvolvimento desta questão. A Tabela 5.18 apresenta os dados de cada simulação, bem como a classificação das amostras conforme os critérios já definidos.

Tabela 5.18. Cinética, classe de peneiramento e diferença entre as capacidades unitárias MPK real e MPK ajustado.

Conditions	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11
Material	Itabirito	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Hematita	Granito	Calcário	Calcário	Gnaisse
k [mm/s]	-0,234	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032	-0,153	-0,060	-0,399	-0,071	-0,064
Classe de peneiramento	C	A	A	A	A	C	B	C	B	B
ΔW_U^F (t/h/m ²)	12,5	3,1	5,7	3,2	-4,1	17,8	7,4	11,2	6,8	4,8

A Figura 5.37 apresenta a análise de correlação entre a diferença das capacidades unitária e a cinética de peneiramento.

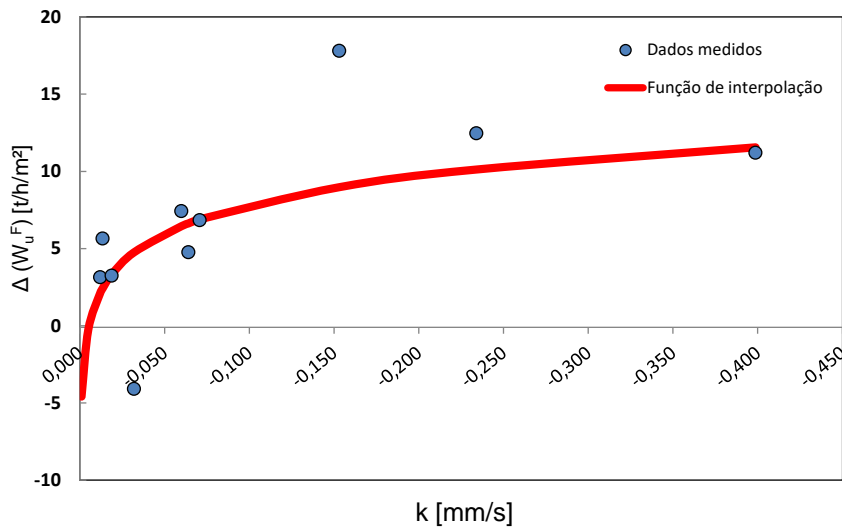


Figura 5.37. Análise de correlação da diferença das capacidades unitárias (MPK real e MPK ajustado) em função da cinética de peneiramento de cada material.

Pela tendência da curva da função obtida na análise de correlação entre as duas variáveis percebe-se que a diferença entre as capacidades unitárias aumenta à medida que a cinética de peneiramento se torna mais negativa. A melhor função de ajuste foi a seguinte equação:

$$\Delta W_u^F = 3,48 \times \ln(-k) + 16,79 \quad \text{Equação 5.5}$$

O significado físico desta correlação indica que quanto menor a cinética de peneiramento (grau de peneirabilidade do material), mais distante é a capacidade unitária do MPK em relação à capacidade unitária real, calculada pelo mesmo método.

A capacidade unitária ajustada pelo MPK ($W_u^F_{ajust}$) pode ser desenvolvida a partir da subtração entre a capacidade unitária real do mesmo método (Equações 3.40 e 3.41) e a diferença obtida (ΔW_u^F) pela Equação 5.5 desenvolvida anteriormente.

$$W_u^F_{ajust} = [0,783a + 37] - [3,48 \times \ln(-k) + 16,79] \quad \text{Se } a \geq 25mm$$

e

$$W_u^F_{ajust} = [20,0a^{0,33} - 1,28] - [3,48 \times \ln(-k) + 16,79] \quad \text{Se } a < 25mm$$

Logo, a capacidade unitária ajustada do MPK pode ser dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$W_u^F_{ajust} = [0,783a + 37] - [3,48 \times \ln(-k) + 16,79] \quad \text{Se } a \geq 25mm \quad \text{Equação 5.6}$$

$$W_u^F_{(ajust)} = 0,783a - 3,48 \times \ln(-k) + 20,21 \quad \text{Se } a \geq 25mm \quad \text{Equação 5.7}$$

A cinética de peneiramento k da alimentação da peneira passa a ser, portanto, fator influente no cálculo da capacidade unitária do MPK ajustado.

A Figura 5.37 representa graficamente a disposição das curvas de capacidade unitária ajustada a partir do MPK. Neste gráfico também se pode observar a curva de capacidade unitária original do método (azul negrito), e as regiões de diferentes graus de peneirabilidade dos materiais a serem peneirados.

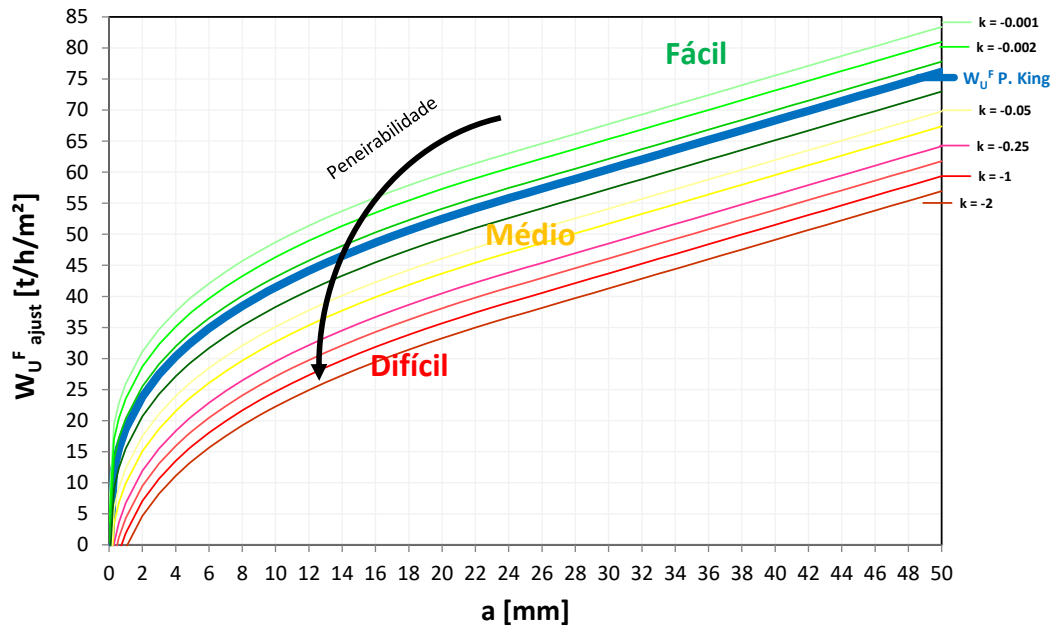


Figura 5.38. Capacidade unitária ajustada do MPK x abertura da tela

A partir da nova função desenvolvida da capacidade unitária foi possível se recalcularem as áreas das peneiras. A Tabela 5.19 apresenta os parâmetros utilizados e os respectivos resultados.

Tabela 5.19. Área de peneiramento simulada a partir da capacidade unitária ajustada de MPK

Condição	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11
Material	Itabirito	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Hematita	Granito	Calcário	Calcário	Gnaisse
Abertura da tela (mm)	8,0	4,8	12,7	12,7	19,0	10,0	0,6	1,0	2,0	4,8
k (cinética) [mm/s]	-0,479	-0,108	-0,144	-0,077	0,074	-0,752	-0,300	-2,567	-0,576	-0,249
W_U^F (t/h/m²) ajust	26,0	29,1	39,3	41,8	55,7	23,7	65,6	24,8	4,4	11,9
Área simulada (m²)	14,5	9,4	18,2	14,8	17,7	14,1	3,5	23,2	10,6	7,5
Área real (m²)	14,9	10,0	20,0	14,9	14,9	18,6	3,6	10,5	9,9	6,5
Δ Área (m²)	-0,4	-0,6	-1,8	-0,1	2,8	-4,5	-0,1	12,7	0,7	1,0

Os resultados evidenciaram significativa aderência entre as áreas de peneiramento recalculadas a partir dos ajustes realizados na função de capacidade unitária do MPK. O maior desvio ocorreu na simulação 9, que pode ser explicado, dentre outros fatores: pela menor abertura dentre todas as condições ($a=0,6\text{mm}$), maior cinética de peneiramento e subdimensionamento da área da própria peneira industrial (real). A Figura 5.38

apresenta gráfico de correlação evidenciando a significativa aderência entre os resultados das demais áreas industriais e simuladas a partir do método ajustado (expurgando o dado da simulação 9).

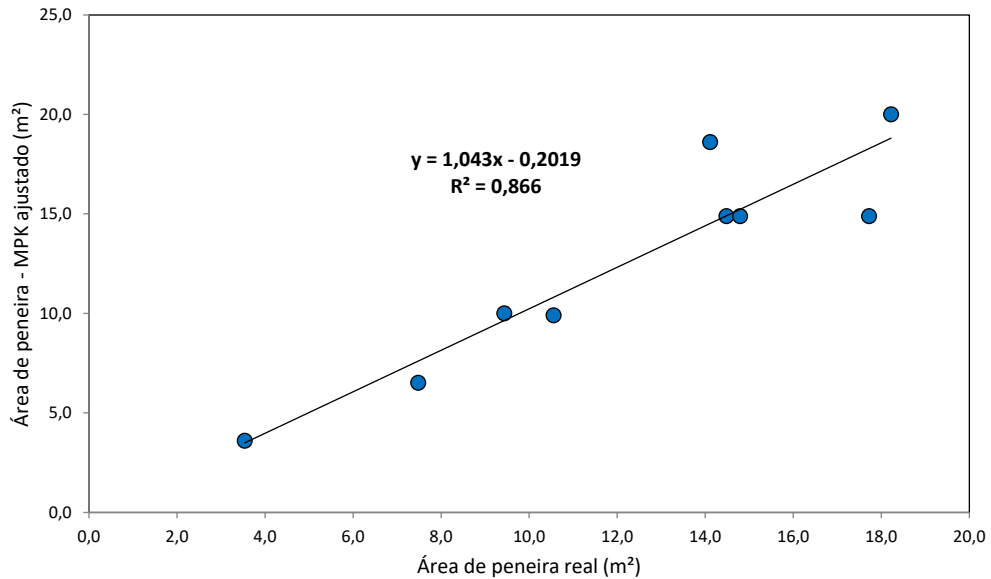


Figura 5.39. Correlação entre as áreas das peneiras industriais reais e simuladas pelo MPK ajustado

O grau de correlação obtido de 0,866, assim como o parâmetro 1,043, ambos muito próximos 1,0, indicam que a área de peneiramento simulada possui uma ótima correlação e aderência com as áreas industriais reais das condições avaliadas. Desta forma o modelo proposto ($W_u^F_{ajust}$) para o cálculo da área de peneiramento foi considerado válido para fins de simulação e dimensionamento de uma peneira industrial vibratória.

➤ **Ajuste da função de eficiência de peneiramento e cálculos de distribuição granulométrica**

A eficiência de peneiramento no MPK está intimamente associada à razão de classificação R.R (Equação 3.51), que, por sua vez, envolve a razão entre a taxa de alimentação, área de peneiramento, capacidade unitária e o produtório dos fatores de

correção. Desta forma, sendo a área de peneiramento calculada a partir destes mesmos parâmetros, a razão de classificação assume um valor constante, conforme evidenciado pelos resultados das simulações 1 a 11. Isto significa que a eficiência de peneiramento prevista pelo MPK, também será constante. Uma forma de se variar a razão de classificação neste caso é variando-se também a taxa de alimentação em uma peneira (de área constante), ou do contrário, variando-se a área de peneiramento para uma mesma taxa de alimentação. Destas duas maneiras, a eficiência também variará conforme já exposto pelas Equações 3.52 e 3.53. A Figura 5.40 apresenta de forma gráfica o comportamento desta função do MPK.

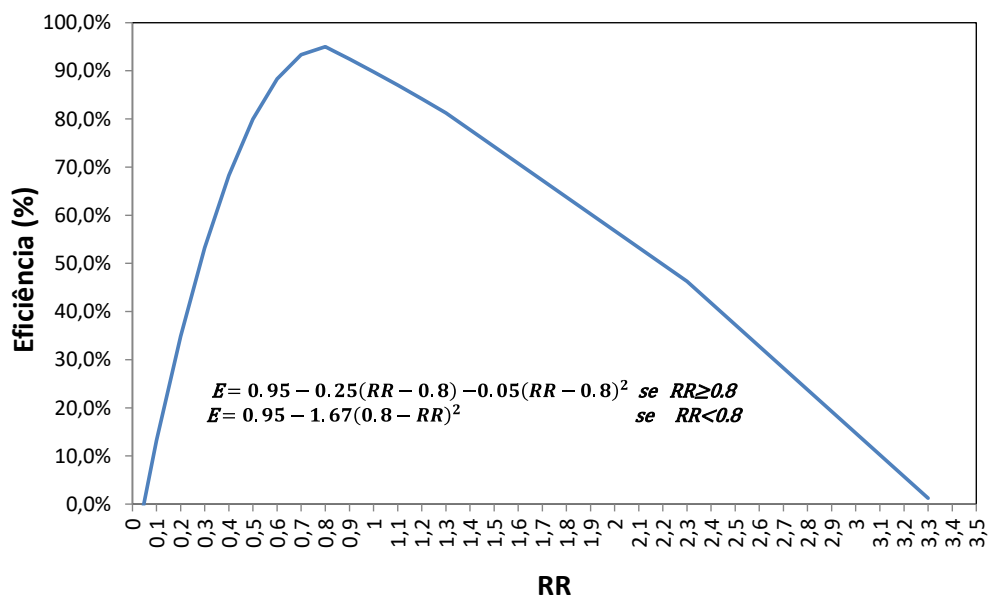


Figura 5.40. Eficiência de peneiramento x RR

A eficiência de peneiramento, segundo o MPK, apresenta um ponto ótimo na razão de classificação, $RR=0,8$. Para razões de classificação acima deste valor (significando na prática que a peneira opera sobrecarregada) o peneiramento perde eficiência de uma forma gradativa e relativamente suave. Do outro lado, quando a razão de classificação assume valores menores do que 0,8 (significando na prática que a peneira opera “aliviada”) a eficiência de peneiramento diminui de forma mais intensa que na condição de sobrecarga. A explicação física para este fenômeno pode ser encontrada em Metso (2005): quando a taxa de material sobre o deck é pequena, ou a altura de camada é

baixa, as partículas sofrem “sobressaltos” excessivos sobre o deck, diminuindo o número de tentativa de passagem das partículas de *undersize*, e diminuindo, portanto, a probabilidade de peneiramento, a eficiência. Em contrapartida quando se existe uma altura de camada de material mínima ou suficiente, o leito de partículas mais grossas impede saltos excessivos das partículas finas, e ao mesmo tempo as forçam a passar pela superfície de peneiramento.

A experiência prática, assim como todos os conceitos teóricos explorados sobre peneiramento neste trabalho, evidenciam que a performance de um processo de peneiramento está atrelado a diversos fatores, não se atendo somente a razão entre a taxa de alimentação e à área de peneiramento (razão de classificação), como sugere o MPK. Naturalmente, se trata de uma avaliação com alto grau de complexidade.

De forma a simplificar tal análise, inicialmente decidiu-se avaliar os valores de eficiência obtidos nos peneiramentos industriais nas condições 2 a 11, nos quais as alimentações foram iguais às taxas de projeto, e a razão de classificação constante (Tabela 5.10 e Figura 5.41). A condição 1 não foi utilizada por ser o único “peneiramento a úmido”. O mesmo será exclusivamente discutido no tópico final deste trabalho.

Tabela 5.20. Valores de eficiência dos peneiramentos industriais e cinéticas de peneiramento das amostras de alimentação para as condições 2 a 11.

Condição	2	3	4	5	6	8	9	10	11
Material	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Hematita	Granito	Calcário	Calcário	Gnaisse
k [mm/s]	-0,013	-0,019	-0,032	-0,153	-0,060	-0,399	-0,399	-0,064	-0,012
RR	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Eficiência industrial (real)	94,70	95,10	93,10	93,50	76,82	90,50	74,10	84,30	86,40

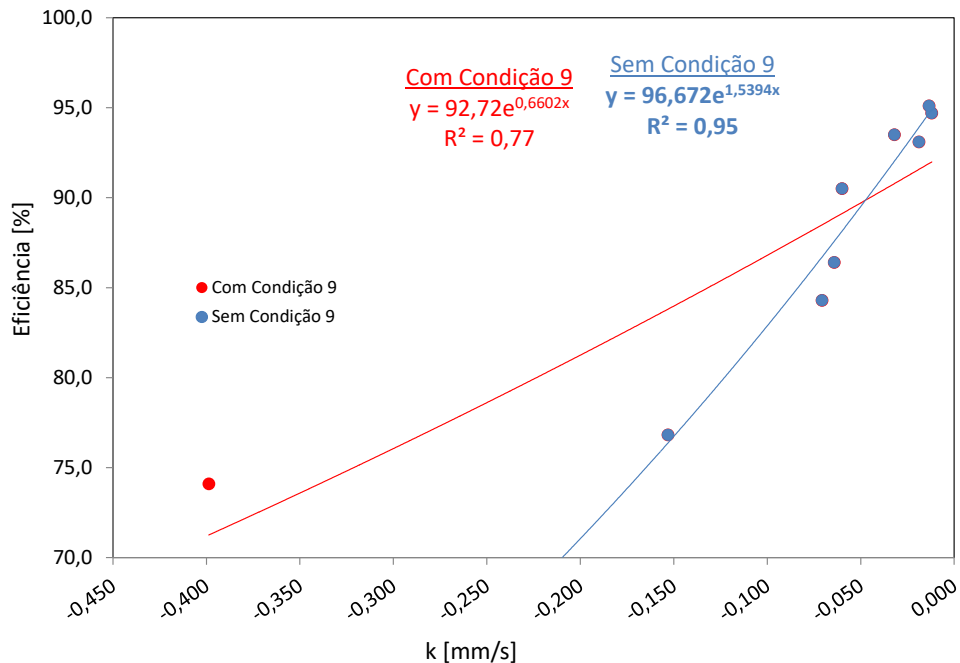


Figura 5.41. Eficiência de peneiramento x cinética de peneiramento – Valores obtidos nas condições 2 a 11.

Inicialmente ficou evidente que as eficiências de peneiramento não convergiram para um valor constante. Indo mais a fundo na análise observou-se que as variações de eficiência obtidas nestes processos possuem uma boa correlação com a cinética de peneiramento, confirmando assim a forte relação das características do material (peneirabilidade) na performance de peneiramento.

O par de pontos da condição 9 foi expurgado em uma das correlações, assim como nas análises anteriores, por ser considerada um *outlier*. Percebe-se que o R^2 passou de 0,77 para 0,95 após esta ação.

Quanto a relação da razão de classificação e a eficiência de peneiramento, os resultados obtidos industrialmente se contrapõem à tese de MPK, dentro das condições testadas. A Tabela 5.21 apresenta os resultados, considerando peneiramento da mesma substância (gnaisse) em diferentes razões de classificação.

Tabela 5.21. Valores de eficiência e razões de classificação para peneiramento de gnaisse

Condição	2	3	4	5	11	12	13	14	15
Material	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse
k [mm/s]	-0,013	-0,019	-0,032	-0,153	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032	0,000
Eficiência industrial (real)	94,70	95,10	93,10	93,50	86,40	96,7	96,9	96,0	96,2
RR	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,40	0,30	0,25	0,45

A Figura 5.42 apresenta a correlação entre estas duas variáveis.

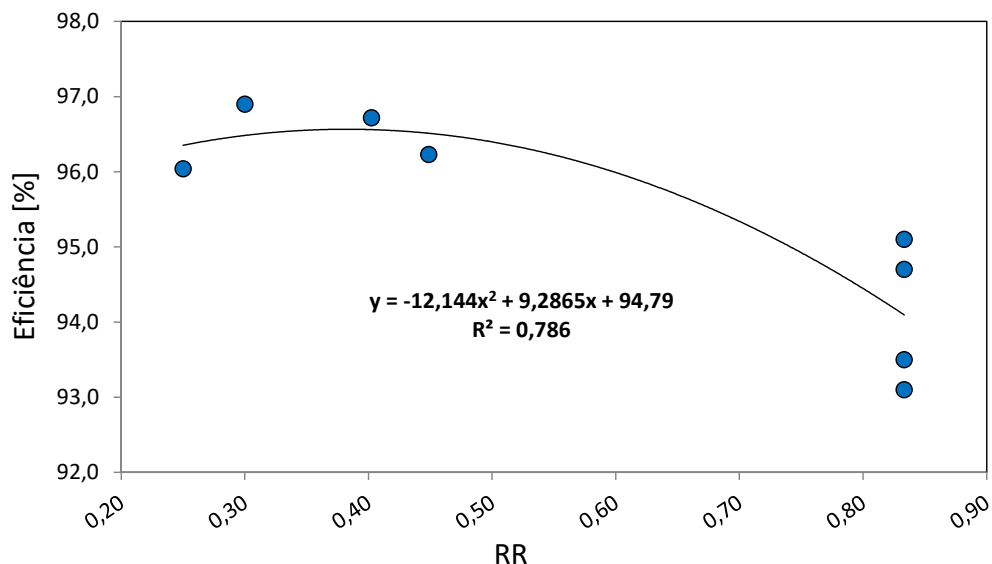


Figura 5.42. Eficiência de peneiramento x razão de classificação para peneiramento de gnaisse.

Do gráfico nota-se que a eficiência de peneiramento cresce com a diminuição da razão de classificação, contrariamente à tendência empregada no MPK. Ou seja, na prática, fica claro que a diminuição da taxa de alimentação para uma mesma área de peneiramento favoreceu a eficiência do processo, até o limite testado.

A Figura 5.43 apresenta de maneira conjunta a curva de eficiência x razão de classificação empregada no MPK e os respectivos pontos obtidos nos resultados deste trabalho.

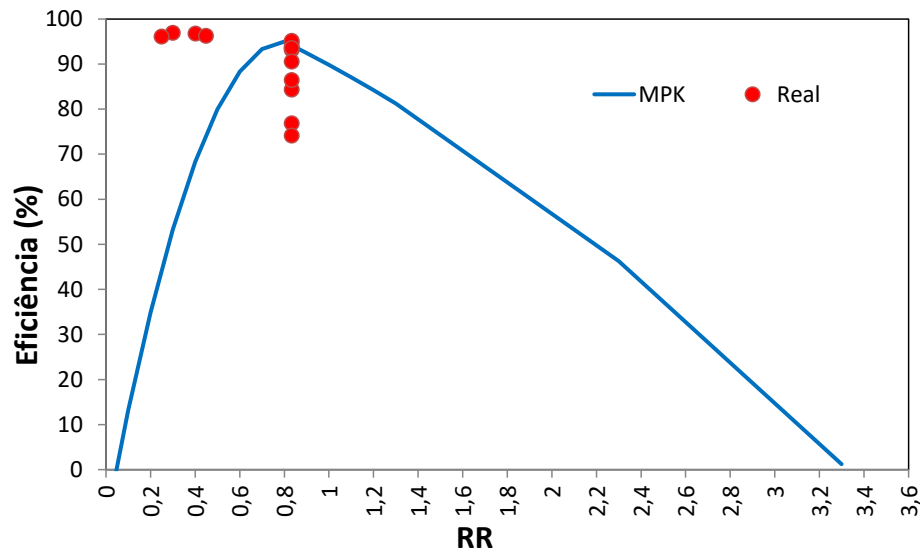


Figura 5.43. Eficiência de peneiramento x RR (dados reais e simulados pelo MPK)

De posse de todos os dados obtidos, e das análises realizadas até o momento, é possível se sugerir os seguintes ajustes empíricos nas funções de MPK para o cálculo de eficiência:

- **RR ≥ 0,8**

A função de eficiência apresentada na Equação 3.50 possui como máximo valor 0,95 (ou 95% de eficiência) exatamente no ponto RR=0,8. No entanto, foi observado nas análises anteriores que as eficiências neste mesmo ponto “ótimo” variaram em função da cinética de peneiramento do material, segundo a Equação 5.8, interpolada pelo gráfico da Figura 5.41.

$$E = 96,672e^{1,5394 \times k}$$

Equação 5.8

Substituindo a Equação 5.8 na Equação 3.52 tem-se uma nova função para eficiência na região $RR \geq 0,8$, considerando também a cinética de peneiramento, dado pela Equação 5.9.

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 \quad \text{Equação 5.9}$$

- **RR < 0,8**

Ao contrário do que se propõe o MPK, para o cálculo de eficiência em razões de classificação abaixo de 0,8, resultados com peneiramento de gnaisse evidenciaram acréscimo no valor da eficiência com a diminuição de RR. A Tabela 5.22 apresenta os valores calculados pela função interpolada do gráfico da Figura 5.42, bem como as diferenças obtidas entre a eficiência no ponto RR=0,8 e as demais.

Tabela 5.22. Valores de eficiência calculados e diferença obtida a partir do ponto RR=0,8.

RR	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
Eficiência simulada *	94,4%	95,3%	96,0%	96,4%	96,6%	96,5%	96,2%	95,6%	94,8%
Δ Eficiência	94,4%	95,3%	96,0%	96,4%	96,6%	96,5%	96,2%	95,6%	94,8%

* Eficiência calculada a partir da função de interpolação do gráfico da Figura 5.42.

As diferenças dos valores de eficiência a partir do ponto RR=0,8 foram novamente correlacionadas com os valores de RR. A Figura 5.44 apresenta o gráfico e a melhor função de correlação obtida.

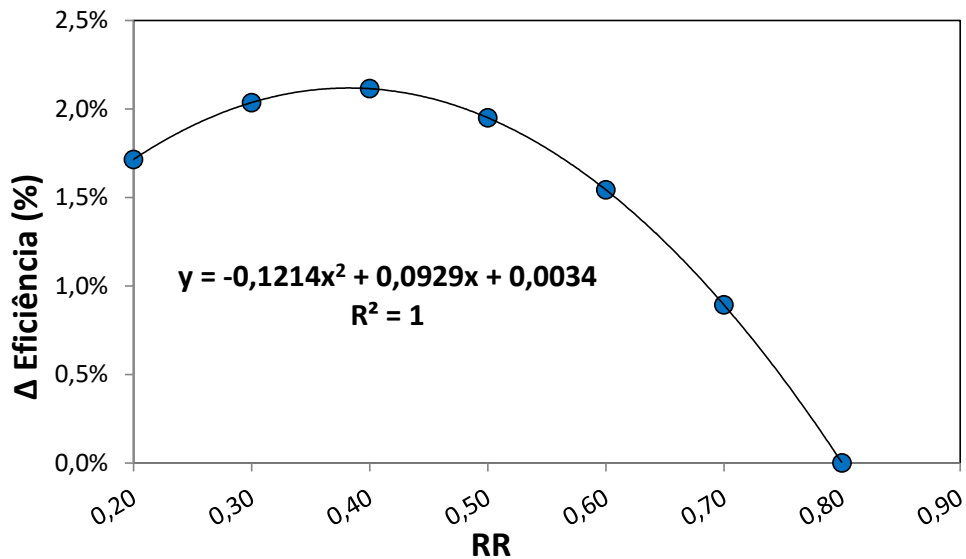


Figura 5.44. Diferenças dos valores de eficiência a partir do ponto $RR=0,8$ em função de RR .

A Equação 5.10 passa a ser, portanto, a diferença dos valores de eficiência a partir do ponto 0,8.

$$\Delta E = -0,1214 \times RR^2 + 0,0929 \times RR + 0,0034 \quad \text{Equação 5.10}$$

Somando-se, portanto, as Equações 5.10 e 5.8 tem-se a Equação 5.11 que representará o cálculo de eficiência no intervalo $RR < 0,8$.

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,1214 \times RR^2 + 0,0929 \times RR + 0,0034 \quad \text{Equação 5.11}$$

- **Função de eficiência ajustada a partir do MPK**

Com base nas análises anteriores, o conjunto de Equações 5.12 e 5.13 apresentam o modelo de cálculo ajustado a partir do método de Peter King.

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 \quad \text{Se } RR \geq 0,8 \quad \text{Equação 5.12}$$

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,1214 \times RR^2 + 0,0929 \times RR + 0,0034 \quad \text{Se } RR < 0,8 \quad \text{Equação 5.13}$$

A Figura 5.45 apresenta graficamente as curvas geradas por este sistema, juntamente com a apresentação da curva de eficiência original do MPK.

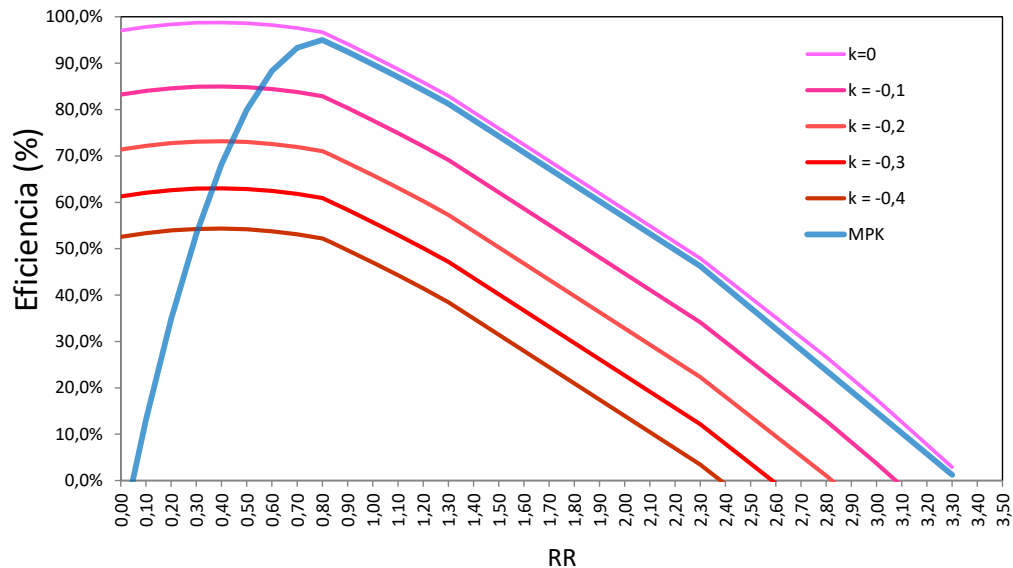


Figura 5.45. Curvas de eficiência ajustadas a partir do MPK para peneiramento a umidade natural.

➤ Simulação de peneiramento a úmido

De acordo com Ferrara e Preti (1975), métodos matemáticos geralmente não são aplicados a processos de peneiramento a úmido. Apenas duas condições dos peneiramentos estudados foram executadas a úmido: condição 1 (itabirito – amostra 1) e condição 7 (areia – amostra 23). Os dados da condição 7, conforme já avaliados nos tópicos anteriores, foram eliminados de todas as análises por serem considerados *outliers*. Embora a falta de mais dados impeça qualquer possibilidade de se estabelecer um modelo de correlação entre as principais variáveis, como foi feito nas condições anteriores, é possível afirmar que o efeito da “lavagem” da água, em condições bem controladas, pode alavancar significativamente a eficiência de peneiramento, como na condição 1. As vantagens do peneiramento a úmido foram descritas por Wills (2006), e reportado na revisão bibliográfica deste trabalho.

Para fins comparativos os dados da condição 1 foram simulados, utilizando o modelo ajustado de MPK, e considerando o peneiramento a “umidade natural” (Simulação 16)

A Figura 5.46 apresenta a comparação entre os valores simulados e reais, bem como a diferença no balanço de massas e eficiências nas duas situações.

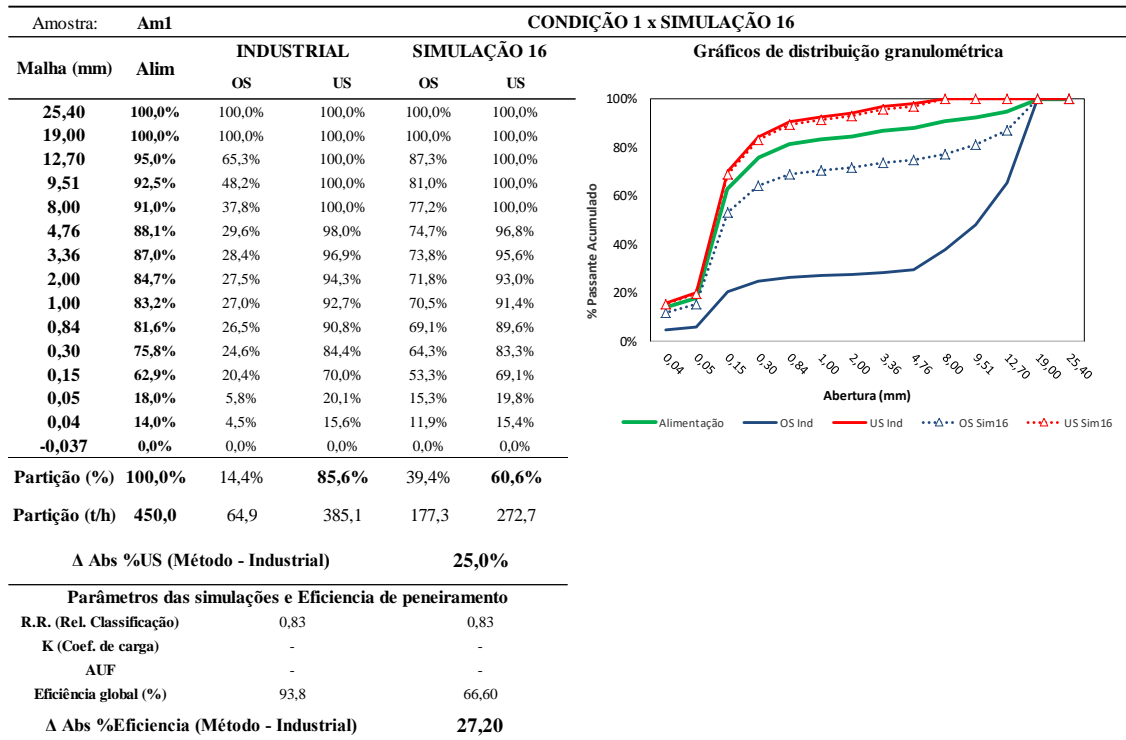


Figura 5.46. Comparação entre condição real (peneiramento a úmido) e simulação (peneiramento a umidade natural) a partir dos dados da Condição 1

Observou-se que o efeito da água no peneiramento do itabirito, cuja cinética de peneiramento é igual a $-0,234\text{mm/s}$, e considerado de peneiramento difícil, beneficiou o processo em termos do aumento de eficiência promovido. O resultado deste processo foi similar a qualquer material com elevada cinética de peneiramento. Isto pôde ser confirmado pelo cálculo da cinética de peneiramento utilizando as Equações 5.12 e 5.13. Neste caso, k foi igual a $-0,014\text{mm/s}$. Portanto, assumindo-se que os efeitos nas variações do peneiramento a partir das variações de RR fossem similares ao modelo de peneiramento a umidade natural, seria possível se extrapolar a eficiência da condição de peneiramento a úmido pelo MPK ajustado. Desta forma, o comportamento do material submetido ao peneiramento a úmido seria considerado similar a qualquer material cuja cinética de peneiramento fosse igual a $-0,014\text{mm/s}$. A Figura 5.47 apresenta a curva de eficiência de peneiramento a úmido no MPK ajustado.

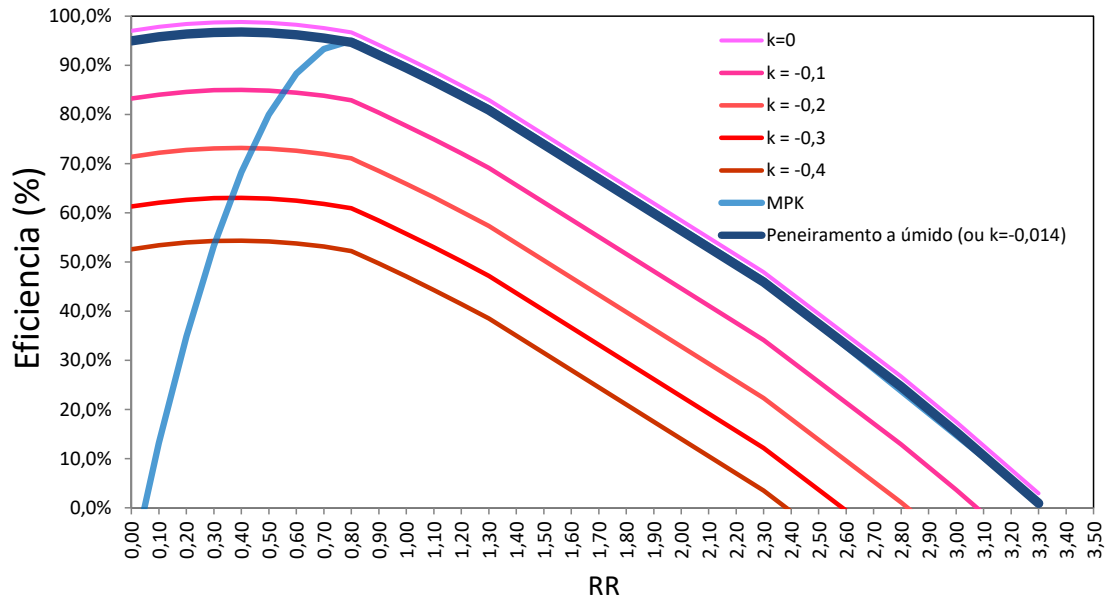


Figura 5.47. Curvas de eficiência original e ajustadas a partir do MPK para peneiramento a umidade natural e peneiramento a úmido.

Obviamente a extrapolação da análise do peneiramento a úmido deve ser tratada somente como uma hipótese, que ainda necessita de ser mais bem investigada. Existem muitas outras variáveis que influenciam este tipo de processo, tais como: percentual de sólidos da alimentação, projeto dos sprays (pressão de água de cada spray, número de sprays por linha, quantidade de linhas ao longo do comprimento da peneira, distância dos sprays ao deck de peneiramento, tipo de spray, etc).

A Tabela 5.23 apresenta os valores simulados e reais dentre as condições avaliadas, os respectivos desvios obtidos.

Tabela 5.23. Valores simulados e reais de eficiência das condições analisadas e os desvios obtidos.

Condição	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15
Material	Itabirito	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Hematita	Granito	Calcário	Calcário	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse
Tipo de peneiramento	A úmido	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco	A seco
Abertura da tela [mm]	8,0	4,8	12,7	12,7	19,0	10,0	4,8	0,6	1,0	2,0	4,8	12,7	12,7	19,0
k [mm/s]	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032	-0,153	-0,060	-0,399	-0,399	-0,064	-0,012	-0,013	-0,019	-0,032	0,000
RR	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,40	0,30	0,25	0,45
Eficiência industrial (real) [%]	93,8	94,70	95,10	93,10	93,50	76,82	90,50	74,10	84,30	86,40	96,7	96,9	96,0	96,2
Eficiência simulada [%]	93,8	94,1	93,8	93,1	91,2	75,5	87,3	95,8	85,9	86,7	97,0	96,7	95,8	94,1
Δ Eficiência [%]	0,0	-0,6	-1,3	0,0	-2,3	-1,3	-3,2	21,7	1,6	0,3	0,3	-0,2	-0,2	-2,1

Da mesma forma que foi discutida para os resultados das áreas de peneiramento, os valores de eficiência reais e simulados, a partir dos modelo ajustado, foram plotados no gráfico de correlação na Figura 5.48.

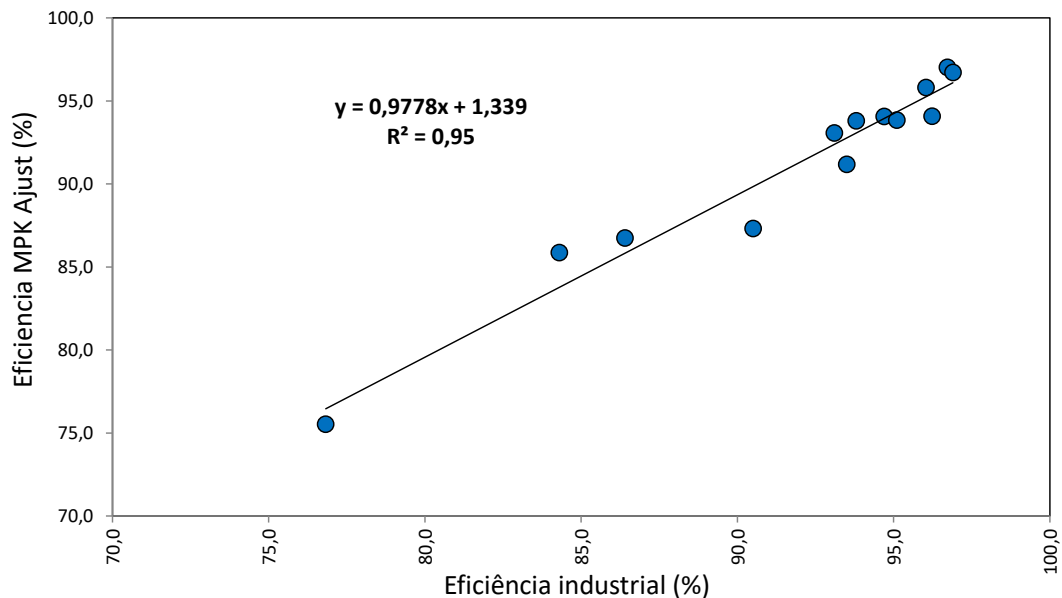


Figura 5.48. Correlação entre as eficiências globais simuladas e industriais.

O grau de correlação obtido de 0,9534, assim como o parâmetro de inclinação 0,9778, ambos muito próximos 1,0, indicam que a eficiência simulada possui ótima correlação e aderência com os valores de eficiência industrial das condições avaliadas. Desta forma o

modelo proposto para o cálculo de eficiência pode ser considerado válido para fins de simulação e previsibilidade de um processo de peneiramento.

6. CONCLUSÕES

6.1. Caracterização das amostras

Os resultados da etapa de caracterização das 37 amostras evidenciaram que os materiais avaliados possuem grande variabilidade nas suas principais propriedades física. A massa específica de sólidos variou de 2,60g/cm³ a 4,99g/cm³, enquanto a massa específica aparente apresentou variação entre 1,1g/cm³ a 2,74g/cm³. A umidade, por sua vez, variou entre 2,10% a 9,50%, sendo que a amostra Am22, de bauxita, apresentou o maior valor. O índice de forma (percentual de partículas irregulares – lamelares ou alongadas), conforme definido neste trabalho, oscilou entre 0% a 40%. As amostras de itabirito e hematita apresentaram os maiores valores, geralmente acima de 15%.

6.2. Avaliação da peneirabilidade e determinação da cinética de peneiramento

O ensaio desenvolvido para a determinação da cinética de peneiramento, bem como o parâmetro de cinética de peneiramento se mostraram coerentes para a classificação do grau de peneirabilidade das amostras. A maior ou menor facilidade de peneiramento das amostras depende diretamente do tempo de peneiramento, a partir de uma função potencial, o que justifica a terminologia utilizada para a definição deste parâmetro. O parâmetro **k** pode ser obtido a partir do expoente da função de interpolação da variação do parâmetro **d₅₀** de cada curva granulométrica em função do tempo de peneiramento. Logo, quanto menor o valor de **k**, menor a cinética e maior o grau de dificuldade de peneiramento de um determinado material. Os valores obtidos de cinética de peneiramento variaram a partir de -5,0x10⁵mm/s (amostra Am19, hematita / granulado) a -0,399mm/s (amostra Am29, calcário, fonte de areia industrial).

A partir de uma análise de distribuição de frequência dos valores foi possível se definir três classes de cinética de peneiramento, em função do grau de peneirabilidade: classe A ($k > -0,05$) – cinética elevada, classe B ($-0,05 \leq k < -0,150$) – cinética média e classe C ($k \geq -0,150$) – cinética baixa. Cada classe de peneiramento pôde ser distinguida a partir de distintos patamares de eficiência de peneiramento. Os resultados mostraram que os valores de eficiência decresceram juntamente com a diminuição da abertura e do tempo de peneiramento. A distinção entre as curvas começou a ocorrer a partir de malhas

próximas de 4,0mm, onde os valores de eficiência de peneiramento das amostras de classe A começaram a assumir patamares mais superiores que as demais curvas das outras duas classes. Somente a partir de malhas próximas de 0,297mm a curva da classe B se posicionou acima da curva da classe C.

Análises de correlação com as principais propriedades medidas mostraram que a granulometria é o principal influenciador da cinética de peneiramento, seguido pela umidade. De acordo com os resultados a cinética de peneiramento cresce, através de uma curva logarítmica, com o aumento do tamanho médio d_{50} . O grau de correlação R^2 da função obtida foi de 0,6709. Ocorreu também um aumento da cinética de peneiramento com a diminuição da quantidade de partículas ultrafinas na amostra, representada pelo percentual de partículas abaixo de $37\mu\text{m}$. O grau de correlação R^2 obtido foi de 0,4512, através de uma função polinomial de segunda ordem.

6.3. Dimensionamento de peneiras e ajustes no MPK

A partir da avaliação dos resultados de área de peneiramento calculados pelos três métodos observou-se que: (a) áreas simuladas pelo MPK se mantiveram abaixo das áreas industriais em quase todas as simulações (b) Os três métodos apresentaram limitação no cálculo da área de peneiramento para aberturas menores. As equações de capacidade unitária dos métodos MAC e MK não se aplicaram para aberturas menores do que 0,3mm, conforme observado na simulação 7. Da mesma forma o MK também não foi suficiente para o cálculo das áreas nas simulações 9 e 10, que empregaram aberturas de tela igual a 0,6mm e 1,0mm, respectivamente. Para a abertura de 0,6mm se gerou um valor negativo para a capacidade unitária e para a abertura de 1,0mm um valor baixo o suficiente para se gerar uma área de peneira quase dez vezes maior nesta condição. Os menores desvios obtidos entre os valores simulados e os reais ocorreram nas seguintes condições: 2 (MPK, -10%), 3 (MAC e MPK, ambos igual a -13%), 4 (MAC, 6%, MPK, -7% e MK, 5%) e 5 (MPK, 8%). Portanto, todos menores do que 13% (em valor absoluto). O gnaisse foi a alimentação em todas estas simulações, cujos valores de umidade variaram entre 2,12% e 3,3%, e as aberturas das telas entre 4,76mm e 19mm. Todas as demais simulações apresentaram desvios absolutos acima de 20%.

Além dos menores desvios no cálculo da área de peneiramento nestas quatro condições, o MPK também foi o método mais aderente em relação à partição de massa para *undersize* (%US). O grau de correlação obtido neste caso foi de 0,9484, e o parâmetro de inclinação da função linear igual a 1,1213. Quanto aos valores de eficiência simulados observou-se que o MK gerou valores substancialmente distintos dos reais. Nas condições 12 a 15, onde houve variação da taxa de alimentação, em intervalos menores que a taxa de alimentação de projeto, os valores de eficiência aumentaram à medida que a taxa de alimentação e o RR diminuíram. Esta é uma tendência oposta à equação de eficiência empregada pelo MPK, onde a eficiência diminui com a diminuição da taxa de alimentação, a partir do ponto de 80% (RR=0,8) da capacidade da peneira.

Os ajustes do MPK foram, portanto, realizados a partir das equações de capacidade unitária e de eficiência. Para o ajuste da capacidade unitária, a área de peneiramento industrial (real), taxa de alimentação de projeto e os respectivos produtórios dos fatores, obtidos pelo MPK foram inter-relacionados obtendo-se novos valores (ajustados) de capacidade unitária. Os desvios entre estes valores foram correlacionados com a cinética de peneiramento de cada amostra, obtendo-se um novo modelo de cálculo para a capacidade unitária (Equações 5.6 e 5.7), que incluiu, além da abertura da tela, a cinética de peneiramento como novo parâmetro:

$$W_u^F_{ajust} = 0,783a - 3,48 \times \ln(-k) + 20,21 \quad \text{Se } a \geq 25mm$$

$$W_u^F_{ajust} = 20a^{0,33} - 3,48 \times \ln(-k) - 18,07 \quad \text{Se } a < 25mm$$

A correlação entre os valores simulados de capacidade unitária pelo MPK ajustado e os valores reais gerou um grau de correlação de 0,866 e parâmetro de inclinação da função linear igual a 1,043, ambos muito próximos a 1,0. Concluiu-se, portanto, que a área de peneiramento simulada possuiu uma ótima correlação e aderência com as áreas industriais reais das condições avaliadas. Desta forma o modelo proposto para o cálculo da área de peneiramento pôde ser validado para fins de simulação e dimensionamento de uma peneira industrial vibratória dentro das condições consideradas.

Para o ajuste do modelo de eficiência de peneiramento, a cinética de peneiramento também foi inserida nas equações. Para isto, separaram-se as análises, da mesma maneira sugerida pelo método original, $RR \geq 0,8$ e $RR < 0,8$. O resultado final dos modelos matemáticos ajustados foi apresentado segundo as Equações 5.12 e 5.13.

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 \quad \text{Se } RR \geq 0,8$$

$$E = 0,96672e^{1,5394 \times k} - 0,1214 \times RR^2 + 0,0929 \times RR + 0,0034 \quad \text{Se } RR < 0,8$$

Além disto, observou-se também que a o ajuste do modelo para o caso de peneiramento a úmido se tornou extremamente complexo devido à inclusão de outras variáveis intrínsecas neste tipo de operação, tais quais se podem citar: percentual de sólidos da alimentação, projeto dos sprays (pressão de água de cada spray, número de sprays por linha, quantidade de linhas ao longo do comprimento da peneira, distância dos sprays ao deck de peneiramento, tipo de spray, etc). Uma avaliação pontual e preliminar do peneiramento a úmido foi realizada a partir da condição 1, que foi alimentada por itabirito, cuja cinética de peneiramento k foi igual a $-0,234$ mm/s (classe C). Apesar de ter sido considerado um material de cinética de peneiramento baixa, o valor da eficiência global foi de 93,8%, para $RR=0,833$ (bem acima das operações a umidade natural, cujas amostras possuíam cinéticas similares ou maiores). Observou-se, portanto, que os resultados desta operação, foram muito semelhantes ao peneiramento a umidade natural de material com cinética de peneiramento igual a $-0,014$ mm/s. Contudo, se faz necessário uma análise mais criteriosa, e com uma maior quantidade de dados para definição mais precisa do modelo no caso de operações a úmido.

Finalmente, a análise de correlação entre os valores simulados de eficiência de peneiramento global pelo modelo ajustado e os valores reais gerou um grau de correlação de 0,9534 e parâmetro de inclinação da função linear igual a 0,9778, ambos também muito próximos de 1,0. Conclui-se, assim, que a eficiência de peneiramento global calculada a partir do MPK ajustado, também possuiu uma ótima correlação e aderência com as eficiências globais reais das condições avaliadas.

Os modelos matemáticos ajustados foram inseridos no software S^3 - *Smart Screen Simulator*, desenvolvido em planilha Excel®, na linguagem VBA. Foram considerados adequados e confiáveis para aplicações como dimensionamento e seleção de peneiras, bem como em predições operacionais.

7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

Diversos parâmetros relacionados diretamente a sistemas particulados foram desenvolvidos para auxiliar no modelamento e dimensionamento de distintas operações unitárias, tais como: índice de moabilidade e WI no processo de moagem, energia específica no processo de britagem ou a própria cinética de flotação. Em todos estes casos, os parâmetros podem ser medidos e aplicados em modelos matemáticos, possibilitando inclusive uma avaliação quantitativa das características de distintos materiais em cada caso.

Da mesma forma, o desenvolvimento de um parâmetro que determine as características e comportamento dos materiais ao ser peneirado em peneiras vibratórias industriais sempre foi almejado por profissionais e acadêmicos da área. Principalmente porque os métodos de dimensionamento de peneiras mais aplicados são os empíricos, conforme discutido no decorrer deste trabalho. Embora cada um destes métodos proponha fatores inter-relacionados com muitas propriedades físicas que afetam o peneiramento (umidade, densidade, forma, etc), nenhum deles utiliza qualquer fator relacionado diretamente com a vocação dos sistemas particulados em serem peneirados. Isto, portanto, motivou a elaboração do parâmetro “cinética de peneiramento”, que embora, de caráter empírico, pode ser determinado via ensaio padrão proposto. Além do mais foi possível se determinar graus de classificação, em relação à maior ou menor dificuldade dos materiais em serem peneirados.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que a cinética de peneiramento foi fiel ao comportamento real dos materiais nos processos de peneiramento, e diversas conclusões puderam ser tomadas, tais como: a influência de propriedades físicas dos minérios na cinética de peneiramento, a necessidade de áreas de peneiras maiores para materiais com cinéticas menores (e vice e versa), a relação indireta com as curvas de eficiência de peneiramento, etc.

O modelo de Peter King (MPK), considerado clássico na literatura, pôde ser reajustado em função deste parâmetro determinado.

8. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A avaliação comparativa entre os três métodos clássicos de peneiramento com condições reais possibilitou um melhor entendimento da precisão e confiabilidade dos resultados gerados por cada um destes métodos. Nestas circunstâncias, o modelo de Peter King (MPK) se apresentou mais aderente em diversos cenários, no entanto, com restrições nos intervalos de aberturas de telas menores, e algumas propriedades físicas, tais quais: umidade e densidade aparente.

A cinética de peneiramento, combinada com o modelo de Peter King, propiciou ajustes importantes no modelo original. A análise final demonstrou que os valores das áreas das peneiras e eficiências de peneiramento do modelo ajustado se apresentaram mais aderentes que o modelo original e que os demais métodos de dimensionamento.

Isto prova que o novo modelo gerado neste trabalho pode ser aplicado com maior grau de precisão e confiabilidade nos novos projetos de equipamentos, bem como servir para melhorar o controle operacional e a previsibilidade das operações existentes.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho foram avaliados diversos parâmetros e variáveis, de equipamentos e de materiais, que influenciam diretamente no processo de peneiramento. No entanto, algumas condições importantes merecem ser mais bem investigadas, tais como, a influência da condição dinâmica da peneira (frequência, amplitude e aceleração), bem como o processo de peneiramento a úmido. Para este último, sugere-se coletar mais amostras, levando-se em consideração principalmente a atuação das seguintes variáveis: % sólidos na alimentação e a pressão de água e quantidade de sprays na peneira. Também é sugerido se investigar o comportamento de outros materiais submetido ao peneiramento a úmido em diferentes taxas de alimentação, e consequentemente diferentes RR.

Outra sugestão se deve à continuidade das análises do modelo matemático de ajuste da função $f(t) = \Delta d_{50}$. Recomenda-se investigar a correlação dos dados obtidos neste trabalho (e de futuros trabalhos), com resultados calculados pelo modelo de cinética de primeira ordem, do tipo: $f(t) = \Delta d_{50} = \beta \times \exp(-kt) + I$, sendo β e k parâmetros de ajuste da função e t , o tempo de peneiramento. Em seguida, avaliar qual o sentido físico dos valores calculados para os parâmetros na peneirabilidade dos materiais, e suas correlações com as propriedades físicas, principalmente, com a granulometria e umidade. Determinar se este ou outro modelo matemático se aplicaria melhor na avaliação do grau de peneirabilidade dos materiais.

Para melhorar a praticidade e segurança na utilização do simulador S^3 - *Smart Screen Simulator*, que foi elaborado em plataforma Excel[®], sugere-se transcrever a linguagem VBA adotada para alguma linguagem fechada (C++, Java, Python, etc), de forma a facilitar a utilização aos potenciais usuários do software.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRONZINOX (2017) Disponível em <
<http://www.abronzinox.com.br/peneirasparalaboratorio.aspx>>. Acessado em
11/11/2017.

ALLEN, T. (1997) Particle Size Measurement. 5th ed. London: Chapman and Hall, 525p.

ALLIS-CHALMERS (1953) Vibrating screen: theory and selection, Milwaukee, Wisconsin, EUA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52:2003; Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45:2006; Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. RJ. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7809:2019; Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248:2003; Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9775:2011; Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9939:2011; Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6458:2016; Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 4701:2014; Minérios de ferro – Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, RJ. 2014. 39p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM ISO 2395:1997; Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário. Rio de Janeiro. RJ. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM-ISO 3310-1:2010; Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, RJ. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457:2016; Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, RJ. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM ISO 565:1997; Peneiras de ensaio - Tela de tecido metálico, chapa metálica perfurada e lâmina eletroformada - Tamanhos nominais de abertura. Rio de Janeiro, RJ. 7p.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4791-10:2010; Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA, EUA. 6p.

ATKINS, P. e Jones, L. (2001) Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente, Porto Alegre: Bookman, p.39-40.

CAPUTO, H. P. (1988) Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos. Vol 1. 6ª Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. RJ.

CARVALHO, S. C. (2004) Simulação probabilística de peneiramento vibratório. Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

CASTECH. (2019) Disponível em: <<http://www.castech.com.br/produtos/peneiras/telas-metalicas-para-peneiras-vibratorias-de-fertilizantes/>>. Acessado em 22/03/2019.

CHAVES, A. P. & PERES A. E. C. (2012) Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem, Editora Signus, Vol 3, 5ª ed., São Paulo, SP.

CORREA, E. M. C., Garcia, A. M, e Diez, M. A. D. (2004) Application of the Rosin–Rammler and Gates–Gaudin–Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. Materials Characterization 52. Abril. Badajoz, Espanha.

DANA, J. D. (1974) Manual de mineralogia. Livros Tecnicos e Cientificos. Rio de Janeiro, RJ.

DERRICK. (2018) Disponível em: <<http://derrick.com/Products/repulp/#1466105826340-c7a4cb0a-267f>>. Acessado em 07/07/2018.

DIALMATICA. (2018a) Disponível em: <http://dialmatica.com.br/pg3.php?id_cat=2&&id=133>. Acessado em 02/05/2018.

DIALMATICA. (2018b) Disponível em <http://dialmatica.com.br/pg3.php?id_cat=2&&id=132>. Acessado em 02/05/2018.

DIRECT INDUSTRY. Disponível em: <<http://www.directindustry.com>>. Acessado em 13/11/2018.

DRZYMALA, J. (2007) Mineral Processing - Foundations of theory and practice of mineralurgy, 1ª ed, Wroclaw University of Technology, Polônia, p. 151-153.

FERRARA, G. and Preti, U. (1975). A contribution to screening kinetics, Proc. 1 lth Int. Min. Proc. Cong., Cagliari. EUA.

FILHO, E. S. N., 2017. Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias em instalações de britagem. Dissertação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. p. 10-45.

FLINTOFF, B.C., Plitt, L.R., and Turak, A.A. (1987) Cyclone modelling: A review of present technology, CIM Bull., 80(905), Sept. 39-50. EUA.

FRANÇA, S.C.A. e COUTO, H.J.B. (2007) Análise Microgranulométrica – Malvern e Sedigraph. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. e BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. CETEM/MCT. p. 101-122. Rio de Janeiro. RJ.

GALÉRY, R.; Valadão, G. E. S. e Montenegro, L. C. M. Separação por tamanho. In: Valadão, G. E. S. e Araújo, A. C. A. (2007) Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte, Editora UFMG. p. 61-84.

GAUDIN, A. M. (1939) Principles of mineral dressing. New York, EUA.

GOTOH, K. and Finney J. (1975) Representation of the size and shape of a single particle. Powder Technology, 12, p. 125-130

HAYER & BOECKER. (2005). Catálogo comercial da empresa. Pedro Leopoldo. MG

HAYER & BOECKER. (2019). Disponível em: <<http://www.haverbrasil.com.br/segmentos#classifica%C3%A7%C3%A3o#274#3>> Acessado em 20/03/2019.

HAYER & BOECKER TELAS. (2019) Disponível em <<http://www.havertelas.com.br/segmentos>>. Acessado em 22/03/2019.

HAYER & TYLER The screening group. (2012). THE ROCK BOOK. St. Catharines. Canada.

HILDEN, M. M. (2008). A dimensional analysis approach to the scale-up and modeling of industrial screens. JKMRC, Janeiro.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15968:2016; Direct reduced iron – Determination of apparent density and water absorption of hot briquetted iron (HBI). 7p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3852:2007; Direct reduced iron – Iron ores for blast furnace and direct reduction feedstocks — Determination of bulk density. 6p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2596:2006; Iron ores — Determination of hygroscopic moisture in analytical samples — Gravimetric, Karl Fischer and mass-loss methods. 32p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3087:2011; Iron ores — Determination of the moisture content of a lot. 18p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2591-1:1988; Test sieving - Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate. 13p.

KARRA, V.K. (1979) Development of a model for predicting the screening performance of vibrating screens. CIM Bulletin, pp. 168–171.

KELLY, E.G., Spottiswood D.J., (1982) Introduction to Mineral Processing, Wiley, New York. EUA. 491p.

KELSALL, D.F. (1953) A further study of the hydraulic cyclone. Chemical Engineering. Sci., 2, 254-272. EUA.

KING R.P. (2001) Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. (1ª ed). Mineral Technologies, Inc. 425 South 1000 East Suite 410 Salt Lake City, UT 84102 USA.

LÓPEZ, J.; Vercik, A. e Costa, E.J.X. (2008) Meios granulares e experimentos simples para a sala de aula. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 30, n. 1, p. 1308-1 a 1308-5.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA, S. L.M. (2010) Tratamento de minérios. Centro Tecnologia Mineral, p. 4-5, Rio de Janeiro, RJ.

LYNCH, A.J. and Narayanan, S.S. (1986). Simulation the design tool for the future, in Mineral Processing at a Crossroads, ed. B.A. Wills and R.W. Barley, Martinus Nijoff Publishers, Dordrecht, 89. EUA.

METSO Minerals (2005) Manual de britagem. 6ª edição. Sorocaba, São Paulo, Brasil.

METSO Minerals (2008) Crushing and Screening Handbook. Capítulo 4. p. 2-21. 3ª edição. Lokomonkatu 3, Finlândia.

METSO Mineração. (2018a). Disponível em: <www.metso.com.br/produtos/alimentadores/grelhas-vibratorias>. Acessado em 20/10/2018.

METSO Mineração. (2018b). Disponível em: <<https://www.metso.com/br/produtos/peneiras/vibrating/peneiras-metso-serie-ef/>>. Acessado em 20/10/2018.

MILHOMEM, F. O. (2013). Modelagem de desaguamento em peneira, Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

MILHOMEM, F. O., 2013. Modelagem de desaguamento em peneira. Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. p. 22-34.

MOGENSEN, F.A. (1965). A new method of screening granular materials, Quarry Managers J., Oct., 409. Alemanha.

NAPIER-MUNN, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., and Kojovic, T. (1996) Mineral comminution Circuits - Their Operation and Optimisation, Chapter 12, JKMRRC, The University of Queensland, Brisbane, 413. Australia.

POOLE, A. B., Sims, I. (1998). Concrete petrography - A Handbook of Investigative Techniques. 2ª ed. Inglaterra.

PROLAB. Disponível em: <<http://www.prolab.com.br/produtos/vidrarias-para-laboratorio/picnometro/>>. Acessado em 21/03/2019.

REVISTA MINÉRIOS E MINERALES. Disponível em: <<http://revistaminerios.com.br/peneiras-que-operam-em-temperaturas-extremas/>>. Acessado em 20/03/2019.

REVISTA MINÉRIOS. Disponível em: <http://www.minerios.com.br/EdicoesInt/1561/36/Peneiras_de_alta_frequencia__melhoram_taxa_de_moagem.aspx>. Acessado em 10/02/2018.

SALES, C. G., Roberto, R. X., Camargo, C., Fazollo, F., Lino, C. R., (2011) Influência dos métodos de peneiramento na caracterização granulométrica das amostras de alimentação da britagem de Brucutu. 1º seminário de Planejamento de Ferrosos, VALE, Belo Horizonte, MG.

SAMPAIO, J. A.; França, S. C. A., Braga, P. F. A., (2007) Tratamento de minérios – Práticas laboratoriais. 1ªed., Centro Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ. p. 55-72.

SZTABA, K. (1993). Peneiramento, Editora Śląskie, Katowice. Polônia.

TORQUATO, N., Tulio, M. (2007) Manual de processo – Peneiramento. VALE. Belo Horizonte. MG. 18p.

TRANSPORTE DE GRANÉIS. Disponível em: <http://www.transportedegraneis.ufba.br/arquivos/tabela_mesh.pdf>. Acessado em 04/07/2017.

TROMMEL SCREEN. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trommel_screen>. Acessado em 25/07/2018.

TYLER. W.S. (2017). Ro-Tap[®] E Manual. Filtration and Industrial Screening Products. Ohio. EUA.

UFSCAR – PPGEQ. Disponível em: <<http://www.ppgeq.ufscar.br/ppgeq/areas-de-pesquisa-1/sistemas-particulados-1/sistemas-particulados>>. Acessado em 11/10/2018.

VALADÃO, G. E. S.; Araújo, A. C. (2012) Introdução ao Tratamento de Minérios, 1^a ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, MG.

VALIRE, S. B. e Wennen, J. E., (1980) Screening in Mineral Processing Operations. In: Mular, A.L., Bhappu, R.B. Mineral Processing Plant Design, 2^a ed., Littleton, SME, p.917-928. EUA.

WILLS, B.A., Napier-Munn, T.J. (2006) Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, 7^a ed., 444p, Elsevier Science and Technology Books, Amsterdam, Holanda, p. 186-191.

11. ANEXOS

• ANEXO A

A constante ϵ é uma característica do tipo de minério, do tamanho de especificação e da percentagem no tamanho de especificação. Pode ser determinada pela Equação 11.1.

$$\epsilon = 2,5 \times 10^{-5} \times P(100 - P)d_{95}^3 (l/d_{95})^{0,5} \quad \text{Equação 11.1}$$

Onde:

- P : percentagem no tamanho de especificação (Tabela 11.1).
- d_{95} : tamanho máximo nominal da amostra para análise granulométrica (mm).
- l : tamanho de especificação (mm).

Para a utilização da Equação 11.1 na prática, sugere-se que os valores de P apresentados na Tabela 8.1 sejam adotados.

Tabela 11.1. Valores de P

% no tamanho de especificação	P	P(100-P)
0 a 4,9	5	475
5 a 9,9	10	900
10 a 14,9	15	1275
15 a 19,9	20	1600
20,0 a 24,9	25	1875
25 a 29,9	30	2100
30 a 34,9	35	2275
35 a 40,0	40	2400

O tamanho de especificação é um percentual acumulado “menor que” ou “maior que”, este valor deve ser o valor utilizado para l na Equação 11.1.

É definido por dois tamanhos de abertura de peneira, então:

- a) se o tamanho de especificação estiver na fração grossa, a menor das duas aberturas de peneira deve ser utilizada para l na Equação 11.1;
- b) se o tamanho de especificação estiver na fração fina, a maior das duas aberturas de peneira deve ser utilizada para l na Equação 11.1.

No caso de minérios finos (-6,3mm), a experiência prática tem demonstrado que a massa mínima da amostra utilizada para peneiramento não deve ser inferior a 50g, e este valor deve ser utilizado sempre que a massa calculada pela equação for menor que o mesmo.

- ANEXO B

Tabela 11.2. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em milímetros) –
Parte 1 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1)

Abertura nominal ¹⁾ a Tamaños de abertura nominal ¹⁾ a			Tolerâncias das aberturas/ Tolerancias en el tamaño de aberturas			Diâmetros dos fios \emptyset Diámetro de los alambres \emptyset		
Dimensões principais/ Tamaños principales	Dimensões suplementares/ Tamaños suplementarios		Para qualquer tamanho de abertura/ Para cualquier tamaño de aberturas	Para um tamanho médio de aberturas/ Para un tamaño promedio de aberturas	Tolerância intermediária/ Tolerancia intermedia	Tamaños preferidos/ Tamaños preferidos	Faixa permitida de variação/ Rango permitido de cambio	
	R 20/3	R 20	R 40/3	$\pm X$	$\pm Y$	$\pm Z$	\emptyset_{nom}	\emptyset_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
125	125	125	4,51	3,66	4,09	8	9,2	6,8
	112		4,15	3,29	3,72	8	9,2	6,8
	100	106	3,99 3,82	3,12 2,94	3,55 3,38	6,3 6,3	7,2 7,2	5,4 5,4
90	90	90	3,53	2,66	3,09	6,3	7,2	5,4
	80		3,24	2,37	2,8	6,3	7,2	5,4
		75	3,09 2,97	2,22 2,1	2,65 2,54	6,3 5,6	7,2 6,4	5,4 4,8
63	63	63	2,71	1,87	2,29	5,6	6,4	4,8
	56		2,49	1,67	2,08	5	5,8	4,3
		53	2,39 2,29	1,58 1,49	1,99 1,89	5 5	5,8 5,8	4,3 4,3
45	45	45	2,12	1,35	1,73	4,5	5,2	3,8
	40		1,94	1,2	1,57	4,5	5,2	3,8
		37,5	1,85 1,78	1,13 1,07	1,49 1,42	4,5 4	5,2 4,6	3,8 3,4
31,5	31,5	31,5	1,63	0,95	1,29	4	4,6	3,4
	28		1,5	0,85	1,17	3,55	4,1	3
		26,5	1,44 1,38	0,8 0,76	1,12 1,07	3,55 3,55	4,1 4,1	3 3
22,4	22,4	22,4	1,27	0,68	0,98	3,55	4,1	3
	20		1,17	0,61	0,89	3,15	3,6	2,7
		19	1,13 1,08	0,58 0,55	0,85 0,82	3,15 3,15	3,6 3,6	2,7 2,7
16	16	16	0,99	0,49	0,74	3,15	3,6	2,7
	14		0,9	0,43	0,67	2,8	3,2	2,4
		13,2	0,86 0,83	0,41 0,39	0,64 0,61	2,8 2,5	3,2 2,9	2,4 2,1

Tabela 11.3. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em milímetros) –
Parte 2 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1)

Abertura nominal ¹⁾ a Tamaños de abertura nominal ¹⁾ a			Tolerâncias das aberturas/ Tolerancias en el tamaño de aberturas			Diâmetros dos fios ϕ Diámetro de los alambres ϕ		
Dimensões principais/ Tamaños principales	Dimensões suplementares/ Tamaños suplementarios		Para qualquer tamanho de abertura/ Para cualquier tamaño de aberturas	Para um tamanho médio de aberturas/ Para un tamaño promedio de aberturas	Tolerância intermediária/ Tolerancia intermedia	Tamanhos preferidos/ Tamaños preferidos	Faixa permitida de variação/ Rango permitido de cambio	
	R 20/3	R 20	R 40/3	$\pm X$	$\pm Y$	$\pm Z$	ϕ_{nom}	ϕ_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
11,2	11,2	11,2	0,77	0,35	0,56	2,5	2,9	2,1
	10	9,5	0,71	0,31	0,51	2,5	2,9	2,1
8	9	8	0,68	0,3	0,49	2,24	2,6	1,9
	8	8	0,65	0,28	0,47	2,24	2,6	1,9
5,6	8	8	0,6	0,25	0,43	2	2,3	1,7
	7,1	6,7	0,55	0,22	0,38	1,8	2,1	1,5
5,6	6,3	5,6	0,53	0,21	0,37	1,8	2,1	1,5
	5,6	5,6	0,51	0,2	0,35	1,8	2,1	1,5
4	5	4,75	0,47	0,18	0,32	1,6	1,9	1,3
	5	4,75	0,43	0,16	0,29	1,6	1,9	1,3
4	4,5	4	0,41	0,15	0,28	1,6	1,9	1,3
	4	4	0,4	0,14	0,27	1,4	1,7	1,2
2,8	4	4	0,37	0,13	0,25	1,4	1,7	1,2
	3,55	3,55	0,34	0,11	0,23	1,25	1,5	1,06
2,8	3,15	2,8	0,32	0,11	0,22	1,25	1,5	1,06
	2,8	2,8	0,31	0,1	0,21	1,25	1,5	1,06
2	2,8	2,8	0,29	0,09	0,19	1,12	1,3	0,95
	2,5	2,36	0,26	0,08	0,17	1	1,15	0,85
2	2,24	2	0,25	0,08	0,17	1	1,15	0,85
	2	2	0,24	0,07	0,16	0,9	1,04	0,77
1,4	2	2	0,23	0,07	0,15	0,9	1,04	0,77
	1,8	1,7	0,21	0,06	0,14	0,8	0,92	0,68
1,4	1,6	1,4	0,2	0,06	0,13	0,8	0,92	0,68
	1,4	1,4	0,19	0,05	0,12	0,8	0,92	0,68
1	1,4	1,4	0,18	0,05	0,11	0,71	0,82	0,6
	1,25	1,18	0,16	0,04	0,1	0,63	0,72	0,54
1	1,12	1	0,16	0,04	0,1	0,63	0,72	0,54
	1	1	0,15	0,04	0,1	0,56	0,64	0,48
1	1	1	0,14	0,03	0,09	0,56	0,64	0,48

¹⁾ De acordo com o Projeto NM-ISO 565, tabela 1/De acuerdo con el Proyecto NM-ISO 565, tabla 1.

NOTA - Todas as dimensões de aberturas são aplicáveis a tecido simples/Todos los tamaños de aberturas son aplicables al tejido simple.

Tabela 11.4. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em micrômetros) – Parte 1 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1)

Abertura nominal ⁽¹⁾ a Tamaños de abertura nominal ⁽¹⁾ a			Tolerâncias das aberturas/ Tolerancias en el tamaño de aberturas			Diâmetros dos fios ϕ Diámetro de los alambres ϕ		
Dimensões principais/ Tamaños principales	Dimensões suplementares/ Tamaños suplementarios		Para qualquer tamanho de abertura/ Para cualquier tamaño de aberturas	Para um tamanho médio de aberturas/ Para un tamaño promedio de aberturas	Tolerância intermediária/ Tolerancia intermedia	Tamanhos preferidos/ Tamaños preferidos	Faixa permitida de variação/ Rango permitido de cambio	
	R 20/3	R 20	R 40/3	$\pm X$	$\pm Y$	$\pm Z$	ϕ_{nom}	ϕ_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
710	900		131	31	61	500	580	430
		850	127	29	78	500	580	430
	800		122	28	75	450	520	380
500	710	710	112	25	69	450	520	380
	630		104	22	63	400	460	340
		600	101	21	61	400	460	340
355	560		96	20	58	355	410	300
	500	500	89	18	54	315	360	270
	450		84	16	50	280	320	240
250		425	81	16	48	280	320	240
	400		78	15	47	250	290	210
	355	355	72	13	43	224	260	190
180		300	67	12	40	200	230	170
	315		65	12	38	200	230	170
	280	280	62	11	37	180	210	150
125	250	250	58	9,9	34	160	190	130
	224		54	9	32	160	190	130
		212	52	8,7	30	140	170	120
90	200		50	8,3	29	140	170	120
	180	180	47	7,6	27	125	150	106
	160		44	6,9	25	112	130	95
63		150	43	6,6	25	100	115	85
	140		41	6,3	24	100	115	85
	125	125	38	5,8	22	90	104	77
50		106	36	5,4	21	80	92	68
	112		35	5,2	20	71	82	60
	100	100	34	5	19	71	82	60
31	90	90	32	4,6	18	63	72	54
	80		30	4,3	17	56	64	48
		75	29	4,1	17	50	58	43
31	71		28	4	16	50	58	43
	63	63	26	3,7	15	45	52	38
	56		25	3,5	14	40	46	34
31		53	24	3,4	14	36	41	31
	50		23	3,3	13	36	41	31

Tabela 11.5. Tolerâncias das aberturas e diâmetro dos fios (medidas em micrômetros) – Parte 2 (ABNT NBR NM-ISO 3310-1)

Abertura nominal ¹⁾ a Tamaños de abertura nominal ¹⁾ a			Tolerâncias das aberturas/ Tolerancias en el tamaño de aberturas			Diâmetros dos fios ϕ Diámetro de los alambres ϕ			
Dimensões principais/ Tamaños principales	Dimensões suplementares/ Tamaños suplementarios		Para qualquer tamanho de abertura/ Para cualquier tamaño de aberturas	Para um tamanho médio de aberturas/ Para un tamaño promedio de aberturas	Tolerância intermediária/ Tolerancia intermedia	Tamanhos preferidos/ Tamaños preferidos	Faixa permitida de variação/ Rango permitido de cambio		
	R 20/3	R 20	R 40/3	+X	$\pm Y$		+Z	ϕ_{nom}	ϕ_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
45	45	45	22	3,1	13	32	37	27	
	40		21	3		12	37	27	
R'10	36	38	20	2,9	11	30	35	24	
			20	2,8		11	30	35	24
32	36	38	19	2,7	11	28	33	23	
25			16	2,5		9	25	29	21
20			14	2,3		8	20	23	17

¹⁾ De acordo com o Projeto NM-ISO 565, tabela 2/De acuerdo con el Proyecto NM-ISO 565, tabla 2.

NOTA - Todas as dimensões de aberturas são aplicáveis a tecido simples. Aberturas iguais ou inferiores a 63 μm são aplicáveis também para tecido cruzado/Todos las aberturas son aplicables al tejido simple. Tamaños de aberturas de 63 μm y menores son aplicables también para tejido cruzado.

