# **RENATO NUNES MARTINIANO DE OLIVEIRA**

Análise de desempenho do HRC™ HPGR em circuito piloto

São Paulo 2016

# **RENATO NUNES MARTINIANO DE OLIVEIRA**

# Análise de desempenho do *HRC™ HPGR* em circuito piloto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral

São Paulo 2016

# **RENATO NUNES MARTINIANO DE OLIVEIRA**

# Análise de desempenho do *HRC™ HPGR* em circuito piloto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

São Paulo 2016

responsabilidade única do autor e	com a anuência de seu orientador.
São Paulo, de	de
Assinatura do autor:	indo C
Assinatura do orientador	ushown

#### Catalogação-na-publicação

Oliveira, Renato Nunes Martiniano de

Análise de desempenho do HRC™ HPGR em circuito piloto / R. N. M. Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

173 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Cominuição 2.Equipamento de mineração [Desempenho] 3.Processamento de minerais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

# Agradecimentos

A Deus por proporcionar tudo o que sou e o que conquisto.

À minha família.

A José Corsini, Eduardo Nozawa, Bruno Pereira, Julio Almeida, Bruno Pontes e Nicolas Siqueira, equipe da Metso PTI Brasil na época dos trabalhos.

A Birol Sömmez da Metso PTI Turquia.

A Hakan Dündar da Hacettepe Üniversitesi.

A Julio Silva, Andrzej Niklewski, Willer Ito e Edilson Pereira, equipe da Metso Brasil HRC<sup>™</sup> HPGR na época dos trabalhos.

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

Chico Xavier

## RESUMO

OLIVEIRA, R. N. M. **Análise de desempenho do** *HRC***™** *HPGR* **em circuito piloto**. 2016. 173 f. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

A etapa de cominuição é a operação que mais consome energia de forma ineficiente. Pequenos ganhos de eficiência podem impactar significativamente nos custos operacionais da planta. Durante as décadas passadas, foram atingidas melhoras consideráveis na eficácia dos processos não apenas pela otimização integrada das etapas de cominuição, mas também pelo desenvolvimento de tecnologias que permitem o uso mais eficiente da energia. Entre elas está a Prensa de Rolos de Alta Pressão (PRAP, em inglês High Pressure Griding Rolls – HPGR).

Uma campanha experimental em planta piloto foi conduzida para avaliar o desempenho da prensa de rolos (PR) em diferentes configurações de circuito. No total, foram conduzidos 18 ensaios em circuito fechado com peneira, com recirculação parcial do produto da PR e recirculação do produto das bordas.

Este estudo apresenta os resultados de tal campanha e as análises contemplam:

- A comparação do desempenho da PR em diferentes configurações do circuito em termos do consumo de energia, da capacidade do circuito e da granulometria do produto.
- A avaliação do impacto da eficiência de classificação e da carga circulante no desempenho da PR em circuitos fechados.

As análises conduzidas compararam o desempenho da PR a partir dos índices de desempenhos do equipamento e do circuito (capacidade específica, relação de redução e potência específica) que foram obtidos através das variáveis de processo como a vazão mássica, o P<sub>50</sub> das distribuições granulométricas dos fluxos e o consumo de potência.

Porém, dependendo do índice avaliado, uma configuração é mais vantajosa que a outra. Portanto, foi estabelecido um indicador que relacione as três variáveis de

processo (capacidade, consumo de potência e granulometria) para determinar o circuito mais energeticamente eficiente.

Palavras-chave: cominuição, prensa de rolos, HRC<sup>™</sup> HPGR, desempenho

# ABSTRACT

OLIVEIRA, R. N. M. Análise de desempenho do *HRC*<sup>™</sup> *HPGR* em circuito piloto. 2016. 173 f. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Comminution is the most energy-intensive and energy-inefficient operation. A small gain in comminution efficiency can have a large impact on the operating cost of a plant. During the last decade, there have been considerable improvements in comminution efficiency not only due to the optimal design of grinding systems and operating variables that enable more efficient use of existing comminution devices, but also due to the development of comminution devices with the ability to enhance energy utilization. One such recognized technology which addresses most of these issues is the highpressure grinding roll (HPGR).

A pilot scale test program was conduct in order to evaluate the size reduction performance of HPGR operating in different circuit configurations. In total, eighteen pilot-HPGR locked cycle tests were performed to simulate the HPGR performance in closed circuit with a screen, product recycle and edge recycle.

This work provides the results from the pilot scale HPGR test program. The analysis reported herein includes:

- A comparison of different circuit configurations of HPGR operation in terms of energy consumption and product fineness.
- An evaluation of the impact of classification efficiency and circulating load on the performance of closed HPGR circuits.

Analyses conducted compared the HPGR performance based onequipment and circuits indexes (specific capacity, reduction ratio and specific power) that were obtained through process variables such as flow rate, the P50 of the particle size distribution and power consumption.

However, depending on the index evaluated, a configuration is more advantageous than the other. Therefore, an indicator was established that relates the three process

variables (capacity, power consumption and particle size) to determine the most energy efficient circuit.

**Keywords**: comminution, HRC<sup>™</sup>HPGR, performance

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO – ABRASÃO. MODIFICADO DE KING, 2001	17
FIGURA 2 – MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO – COMPRESSÃO. MODIFICADO DE KING, 2001	18
FIGURA 3 – MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO – IMPACTO. MODIFICADO DE KING, 2001	19
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E TAMANHO DA PARTÍCULA NA COMINUIÇÃO.	
Modificado de Hukki, 1961	21
FIGURA 5 – APLICAÇÕES DA PR NA INDÚSTRIA MINERAL. MODIFICADO DE BURCHARDT ET AL., 2011	22
FIGURA 6 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO I. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	23
FIGURA 7 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO II. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	24
FIGURA 8 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO III. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	25
FIGURA 9 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO IV. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	26
FIGURA 10 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO V. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	27
FIGURA 11 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO VI. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	27
FIGURA 12 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO VII. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	28
FIGURA 13 – CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO VIII. MODIFICADO DE MORLEY, 2006B	28
FIGURA 14 – EXEMPLOS DA PR DA FLSMIDTH A/S (À ESQUERDA – FLSMIDTH A/S, 2014) E METSO	
(à direita – Brian, Herman e Whalen, 2015)	30
FIGURA 15 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DA ZONA DE INTERTRAVAMENTO E DE COMPRESSÃO.	
Modificado de Neumann, 2006	31
FIGURA 16 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO HRC™ HPGR. MODIFICADO DE ITO, 2015	32
FIGURA 17 – FLANGES INSTALADOS NO ROLO FIXO. MODIFICADO DE HERMAN, 2013	32
FIGURA 18 – COMPOSIÇÃO DA LINHA DE PRODUTOS HRC <sup>™</sup> HPGR. MODIFICADO DE METSO, 2012	33
FIGURA 19 – HRC <sup>™</sup> HPGR 800 à esquerda e HRC™ HPGR 3000 à direita.	
ARQUIVO PESSOAL DO AUTOR	33
FIGURA 20 – INTERFACE DO METSO DNA. METSO, 2015	34
FIGURA 21 – ESTRUTURA PRINCIPAL (ARCH FRAME) DO HRC <sup>™</sup> HPGR. METSO, 2012	35
FIGURA 22 – CONCEITO TRADICIONAL DA PR E O DA METSO. METSO, 2012	35
FIGURA 23 – COMPARAÇÃO ENTRE A PR COM <i>CHEEK PLATE</i> E COM FLANGE.	
Modificado de Herman, 2013	37
FIGURA 24 – POSICIONAMENTO DOS PISTÕES HIDRÁULICOS. METSO, 2013 E MORLEY, 2006A	37
FIGURA 25 – REGIÕES ENTRE OS ROLOS, DELIMITADAS PELOS ÂNGULOS DE ACELERAÇÃO/INTERTRAVAMEN	NTO
(σ), COMPRESSÃO MÁXIMA (α) E ALÍVIO (γ). MODIFICADO DE SCHÖNERT E LUBJUHN, 1992	38
FIGURA 26 – PRESSÃO AO LONGO DO ROLO. MODIFICADO DE HERMAN, 2013	40
FIGURA 27 – ROLO COM FLANGE. MODIFICADO DE HERMAN, 2013	40
FIGURA 28 – DESGASTES PARA DIFERENTES MATERIAIS. ADAPTADO DE VON MICHAELIS, 2005	42
FIGURA 29 – MECANISMOS DE DESGASTE DOS ROLOS: A) ABRASÃO; B) COMPRESSÃO.	
Modificado de Schumacher e Theisen, 1997	42
FIGURA 30 – INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DO ROLO NA CAPACIDADE DA PR.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL., 2006	47

FIGURA 31 – INFLUÊNCIA DA PRESSÃO ESPECÍFICA NA CAPACIDADE DA PR.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL., 2006	48
FIGURA 32 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE RELATIVA DO ROLO (U/D) NA CAPACIDADE DA PR.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL., 2006	48
FIGURA 33 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA COMINUIÇÃO DA PR.	
MODIFICADO DE SARAMAK E KLEIV, 2013	49
FIGURA 34 – INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO NA CAPACIDADE DA PR.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL., 2006	50
FIGURA 35 – INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ABERTURA DA PENEIRA DE ESCALPE.	
Modificado de Van Der Meer e Maphosa, 2012	51
FIGURA 36 – CONSEQUÊNCIA DA SEGREGAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO.	
Modificado de Van Der Meer e Maphosa, 2012	52
FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DA PRESSÃO ESPECÍFICA NO PRODUTO DA PR.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL., 2006	54
FIGURA 38 – INFLUÊNCIA DA ALIMENTAÇÃO NO PRODUTO DA PR.	
MODIFICADO DE VAN DER MEER E MAPHOSA, 2012	55
FIGURA 39 – INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DO ROLO NO CONSUMO ENERGÉTICO.	
MODIFICADO DE KLYMOWSKYET AL., 2006	56
FIGURA 40 – INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE ESPECÍFICA NO CONSUMO ENERGÉTICO EM RAZÃO	
DO TIPO DE MINÉRIO. MODIFICADO DE KLYMOWSKY ET AL, 2006	56
FIGURA 41 – AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE CARGA PONTUAL. MODIFICADO DE ISRM, 1985	59
FIGURA 42 – PLT – 100 DA CGTS. CORTESIA DA METSO, 2015	59
FIGURA 43 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO DWT	61
FIGURA 44 – DWT DO JKTECH INSTALADO NO CTP. CORTESIA DA METSO, 2015	62
FIGURA 45 – REPRESENTAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA APLICADA E FRAGMENTAÇÃO RESULTANTE	63
FIGURA 46 – UNIDADE HIDRÁULICA E CÂMERAS DE COMPRESSÃO UTILIZADAS NO CLP.	
Cortesia da Hacettepe Üniversitesi, 2013	65
FIGURA 47 – HRC <sup>™</sup> 300 E EQUIPAMENTOS AUXILIARES NAS FACILIDADES DA METSO, SOROCABA (SP)	70
FIGURA 48 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NO ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO	72
FIGURA 49 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NO ENSAIO DE CIRCUITO FECHADO	
COM PENEIRA ABERTURAS DE 3,35 E 2,36 MM	73
FIGURA 50 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NO ENSAIO DE RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO	74
FIGURA 51 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NO ENSAIO DE RECIRCULAÇÃO DA BORDA	75
FIGURA 52 – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO FLOCO PELO MÉTODO DA PARAFINA DERRETIDA	78
Figura 53 – HRC <sup>™</sup> 300 nas facilidades da Metso, Sorocaba (SP)	79
FIGURA 54 – DIVISOR DO PRODUTO EM CENTRO E BORDAS E ROLO COM SUPERFÍCIE PINADA	80
FIGURA 55 – PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO	82
FIGURA 56 – PREPARAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO	82
FIGURA 57 – PROCEDIMENTO DE CARREGAMENTO DO SILO DO ALIMENTADOR	83
FIGURA 58 – PROCEDIMENTO DE COLETA DA AMOSTRA DE ALIMENTAÇÃO	83

FIGURA 59 – DISPOSITIVO EMPREGADO PARA A COLETA DE AMOSTRAS DAS BORDAS
FIGURA 60 – PENEIRADOR QUADRADO À ESQUERDA E PENEIRA CONTÍNUA À DIREITA
FIGURA 61 – DADOS OPERACIONAIS OBTIDOS DURANTE O PERÍODO DO ENSAIO E DE AMOSTRAGEM
FIGURA 62 – RESULTADO DO TESTE DE CARGA PONTUAL
FIGURA 63 – CURVA PARAMETRIZADA RESULTANTE DO ENSAIO DE IMPACTO DO DWT
FIGURA 64 – CURVA PARAMETRIZADA RESULTANTE DO ENSAIO DE CLP
FIGURA 65 – CARGA CIRCULANTE E $P_{50}$ do produto do circuito para os ensaios de alta pressão 95
FIGURA 66 – CARGA CIRCULANTE E $P_{50}$ do produto do circuito para os ensaios de média pressão 96
FIGURA 67 – CARGA CIRCULANTE E $P_{50}$ do produto do circuito para os ensaios de baixa pressão 97
FIGURA 68 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 1 – RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO E50%
FIGURA 69 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 2 – RECIRCULAÇÃO DA BORDA
FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 3 – FECHADO EM 3,35 MM, E100% 100
FIGURA 71 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 4 – RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO, E50% 100
FIGURA 72 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 5 – FECHADO EM 3,35 MM, E75% 101
FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 8 – RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO, E75% 101
FIGURA 74 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 9 – RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO, E75% 102
FIGURA 75 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 11 – FECHADO EM 3,35 MM, E100% 102
FIGURA 76 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 12 – FECHADO EM 3,35 MM, E100% 103
FIGURA 77 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 13 – FECHADO EM 2,36 MM, E100% 103
FIGURA 78 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 19 – RECIRCULAÇÃO DA BORDA
FIGURA 79 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 24 – RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO, E75% 104
FIGURA 80 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 25 – RECIRCULAÇÃO DA BORDA
FIGURA 81 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO 26 – FECHADO EM 3,35, E100% 105
FIGURA 82 – MÉDIA DAS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS PRODUTOS E DAS ALIMENTAÇÕES
DOS ENSAIOS EM CIRCUITO ABERTO PARA ALTA, MÉDIA E BAIXA PRESSÃO
FIGURA 83 – RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA CONSUMIDA E O PRODUTO DA
VELOCIDADE DO ROLO PELA PRESSÃO
FIGURA 84 – VARIAÇÃO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 110
FIGURA 85 – VARIAÇÃO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA MÉDIA EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 110
FIGURA 86 – VARIAÇÃO DA POTÊNCIA ESPECÍFICA (KWS/M <sup>3</sup> ) EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO111
FIGURA 87 – VARIAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO (KWH/T)
EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 111
FIGURA 88 – VARIAÇÃO DA RELAÇÃO DE REDUÇÃO EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 112
FIGURA 89 – VARIAÇÃO DO $P_{50}$ e do $P_{80}$ em decorrência da pressão de operação 113
FIGURA 90 – VARIAÇÃO DA ABERTURA OPERACIONAL EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 113
FIGURA 91 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO FLOCO EM DECORRÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 114
FIGURA 92 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO DA PR EM RAZÃO
DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO
FIGURA 93 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO DA PR EM RAZÃO
DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO

FIGURA 94 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ALIMENTAÇÕES E DOS PRODUTOS PARA DIFERENTES
EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO
FIGURA 95 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ALIMENTAÇÕES E DOS PRODUTOS PARA DIFERENTES
EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO
FIGURA 96 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ALIMENTAÇÕES E DOS PRODUTOS PARA DIFERENTES
EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO E ABERTURA DE TELAS – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO
FIGURA 97 – MUDANÇA RELATIVA NO CONSUMO ESPECÍFICO DE POTÊNCIA E NA RELAÇÃO DE REDUÇÃO EM
RAZÃO DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO
FIGURA 98 – MUDANÇA RELATIVA NO CONSUMO ESPECÍFICO DE POTÊNCIA E NA RELAÇÃO DE REDUÇÃO EM
RAZÃO DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO
FIGURA 99 – COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ENSAIOS EM DUPLICATA
DE RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO E50% (ENSAIOS 1 E 4) 123
FIGURA 100 – COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ENSAIOS EM DUPLICATA
DE RECIRCULAÇÃO DA BORDA (ENSAIOS 2 E 7) 124
FIGURA 101 – COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ENSAIOS EM DUPLICATA
DE RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO E50% (ENSAIOS 6 E 8) 124
FIGURA 102 – COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ENSAIOS EM DUPLICATA
DE RECIRCULAÇÃO DO PRODUTO E75% (ENSAIOS 9 E 10) 125
FIGURA 103 – COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ENSAIOS EM DUPLICATA
DE RECIRCULAÇÃO DA BORDA (ENSAIOS 19 E 20) 126
FIGURA 104 – VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DOS ENSAIOS
DE RECIRCULAÇÃO DE PRODUTO EM RAZÃO DA POTÊNCIA ESPECÍFICA APLICADA
FIGURA 105 – VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DOS ENSAIOS
DE RECIRCULAÇÃO DA BORDA EM RAZÃO DA POTÊNCIA ESPECÍFICA APLICADA
FIGURA 106 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO E DO PRODUTO PARA OS DIFERENTES
CIRCUITOS – ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO 128
FIGURA 107 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO E DO PRODUTO PARA OS DIFERENTES
CIRCUITOS – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO 129
FIGURA 108 – RELAÇÃO DE REDUÇÃO EM RAZÃO DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO 130
FIGURA 109 – RELAÇÃO DE REDUÇÃO EM RAZÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE POTÊNCIA 130
FIGURA 110 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO EM RAZÃO DO TIPO DE CIRCUITO –
ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO 131
FIGURA 111 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO EM DECORRÊNCIA DO TIPO DE CIRCUITO –
ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO 131
FIGURA 112 – DESEMPENHO DA PR EM DECORRÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DE CIRCUITO –
ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO 132
FIGURA 113 – DESEMPENHO DA PR EM DECORRÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DE CIRCUITO – ENSAIOS DE MÉDIA
PRESSÃO
FIGURA 114 – PRODUÇÃO RELATIVA LÍQUIDA E CONSUMO ESPECÍFICO POR TONELADA DE MATERIAL GERADO
PASSANTE EM 2,0, 1,0 E 0,3 MM – ENSAIOS DE ALTA PRESSÃO133

FIGURA 115 – PRODUÇÃO RELATIVA LÍQUIDA E CONSUMO ESPECÍFICO POR TONELADA DE MATERIAL GERADO	С
PASSANTE EM 2,0, 1,0 E 0,3 MM – ENSAIOS DE MÉDIA PRESSÃO	134
FIGURA 116 – RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E TAMANHO DA PARTÍCULA NA COMINUIÇÃO.	
Modificado de Hukki, 1961	137
FIGURA 117 – APLICAÇÃO DA LEI DA COMINUIÇÃO PARA O CIRCUITO	138
FIGURA 118 – TOMADA DOS PONTOS NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
PARA APLICAÇÃO DA LEI DA COMINUIÇÃO	138
FIGURA 119 – WIO PARA A ANÁLISE DO CIRCUITO, ALTA PRESSÃO	139
FIGURA 120 – WIO PARA A ANÁLISE DO CIRCUITO, MÉDIA PRESSÃO	140

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FATORES QUE INFLUENCIAM A CAPACIDADE DA PR, ELABORADA PELO AUTOR	47
TABELA 2 – FATORES QUE INFLUENCIAM A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DA PR.	
ELABORADA PELO AUTOR	53
TABELA 3 – FATORES QUE INFLUENCIAM O DESGASTE DO ROLO. ELABORADA PELO AUTOR	57
Tabela 4 – Valores de referência para a constante multiplicadora	
DO ENSAIO DE CARGA PONTUAL	61
TABELA 5 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA UNIDADE HIDRÁULICA UTILIZADA NO CLP	65
TABELA 6 – ENSAIOS PROGRAMADOS PARA A CAMPANHA	76
TABELA 7 – RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS	78
TABELA 8 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO HRC <sup>™</sup> 300B	79
TABELA 9 – RESULTADOS ORIUNDOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	85
TABELA 10 – RESULTADOS ORIUNDOS DO PLT	87
TABELA 11 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS DO DWT	88
TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO (AXB)	89
TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (T <sub>A</sub> )	89
TABELA 14 – RELAÇÃO ENTRE ECS E T <sub>10</sub> PARA O ENSAIO DE IMPACTO DO DWT	90
TABELA 15 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENSAIO DE ABRASÃO DO DWT	91
TABELA 16 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS DO CLP	91
TABELA 17 – RELAÇÃO ENTRE ECS E T <sub>10</sub> PARA O ENSAIO CLP	92
TABELA 18 – WI DE BOND EM MOINHO DE BOLAS E DE BARRAS PARA A ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO	93
TABELA 19 – CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DE WI	93
TABELA 20 – WI DE BOND EM MOINHO DE BOLAS PARA O PRODUTO DOS ENSAIOS 2, 3 E 13	93
TABELA 21 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS BALANÇOS DE MASSAS	98
TABELA 22 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CIRCUITO ABERTO	107
TABELA 23 – FAIXA DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CIRCUITO ABERTO	108
TABELA 24 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CIRCUITO FECHADO COM PENEIRA	115
TABELA 25 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CIRCUITO FECHADO COM RETORNO PARCIAL	DOS
PRODUTOS	122
TABELA 26 – RESUMO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO	135
TABELA 27 – RESUMO DOS WIO OPERACIONAIS PARA OS CIRCUITOS	139

# LISTA DE SIGLAS

- PR Prensa de Rolos
- ISRM International Society of Rock Mechanics
- DWT Drop Wheigt Test
- CLP Compressão de Leito de Partículas
- HPGR High Pressure Griding Roll
- O/S Oversize (material retido na peneira)
- U/S Undersize (material passante na peneira)

INT – Produto intermediário (passante na primeira tela da peneira, porém retido na segunda)

- O/F Overflow
- U/F Undefflow
- Top size dimensão da maior partícula
- E Eficiência
- DD Duplo deck

S	U	М	Á	R	10
-	-		~	• •	

1	INTRODUÇÃO13				
2	OBJETIVO14				
3	REVIS	ÃO BIBLIOGRÁFICA	15		
	31 C	ΟΜΙΝΙ ΙΙCÃO	15		
	3.1.1	Mecanismo de cominuição			
	3.1.2	"Leis" da cominuição			
	3.2 P	RENSA DE ROLOS	21		
	3.2.1	Histórico	21		
	3.2.2	Aplicações	23		
	3.2.3	Descrição do equipamento			
	3.2.4	Conceitos			
	3.2.5	Variáveis de processo	43		
	3.2.6	Desempenho da PR			
	3.3 C	ARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO	58		
	3.3.1	Ensaio de Carga Pontual	58		
	3.3.2	Drop Weight Test	61		
	3.3.3	Ensaio de Compressão de Leito de Partículas (CLP)			
			• • • •		
	3.3.4	Ensaios de Bond			
4	3.3.4 CAMP	Ensaios de Bond	66 <b>70</b>		
4	3.3.4 <b>CAMP</b> 4.1 C	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO	66 <b>70</b> 71		
4	3.3.4 CAMP 4.1 C <i>4.1.1</i>	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto	66 <b>70</b> 71 71		
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm	66 70 71 71 71		
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto			
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação da borda			
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação da borda Ensaios realizados			
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação parcial do produto Ensaios realizados EQUIPAMENTO – HRC <sup>™</sup> 300			
4	3.3.4 <b>CAMP</b> 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação parcial do produto Recirculação da borda Ensaios realizados EQUIPAMENTO – HRC <sup>™</sup> 300 REPARAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO			
4	3.3.4 <b>CAMP</b> 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P 4.4 P	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação da borda Ensaios realizados EQUIPAMENTO – HRC <sup>™</sup> 300 REPARAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO ROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.			
4	3.3.4 <b>CAMP</b> 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P 4.4 P 4.5 C	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação parcial do produto Recirculação da borda Ensaios realizados EQUIPAMENTO – HRC <sup>™</sup> 300 REPARAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO ROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO			
4	3.3.4 <b>CAMP</b> 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P 4.4 P 4.5 C 4.6 D	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL ONFIGURAÇÕES DE CIRCUITO Circuito aberto Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm Recirculação parcial do produto Recirculação parcial do produto Recirculação da borda Ensaios realizados EQUIPAMENTO – HRC <sup>™</sup> 300 REPARAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO ROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO ADOS EXPERIMENTAIS			
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P 4.4 P 4.5 C 4.6 D RESU	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL			
4	3.3.4 CAMP 4.1 C 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.4 4.1.5 4.2 O 4.3 P 4.4 P 4.5 C 4.6 D RESU 5.1 C	Ensaios de Bond ANHA EXPERIMENTAL			

5.1.2 Drop Weight Test	
5.1.3 Ensaio de Compressão de Leito de Partículas	
5.1.4 Ensaios de Wi Bond	
5.2 ENSAIOS NA PRENSA DE ROLOS	94
5.2.1 Análise do balanço de massas	
5.2.2 Ensaios em circuito aberto	
5.2.3 Ensaios em circuito fechado	
5.3 EFEITO DA CONFIGURAÇÃO DE CIRCUITO NO DESEMPENHO DA PR.	
5.4 INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA APLICADA E FRAGMEN	tação 134
5.4.1 Análise do circuito	139
6 CONCLUSÕES	
REFERÊNCIAS	147
APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE PLT	
APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE DWT	
APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE CLP	
APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE WI	
APÊNDICE E – RESULTADO DOS ENSAIOS NA PR	

## 1 INTRODUÇÃO

Desenvolvida com base nos estudos de fragmentação por compressão de uma camada de partículas, conduzidos pelo professor Klaus Schönert em 1979 na Alemanha, a prensa de rolos (PR) mostrou-se energeticamente eficiente e foi rapidamente utilizada, em meados da década de 1980, na indústria cimenteira e diamantífera. O atrativo para o primeiro segmento foi a redução dos custos obtidos a partir da diminuição do consumo energético, do aumento da capacidade e da longa vida útil dos rolos. No ramo diamantífero, o aumento da liberação e da recuperação justificou os elevados custos de manutenção, em consequência do desgaste da superfície dos rolos (HERBST et al., 2011 e KLYMOWSKY et al., 2006).

Em meados dos anos de 1990, novas tecnologias foram desenvolvidas para reduzir o desgaste dos rolos e permitir que a PR fosse utilizada em minérios mais competentes. A principal inovação foi a adição de pinos de alta resistência à superfície dos rolos. Essa alteração permite que uma camada autógena (formada pelo próprio material) proteja a superfície dos rolos (SCHUMACHER e THEISEN, 1997), com consequente redução dos custos de manutenção.

A partir dessas inovações, diversas operações implementaram essa tecnologia e tais experiências foram fundamentais para otimizar sua aplicação (BURCHARDT et al., 2011).

De acordo com Morley (2006b), os possíveis circuitos de cominuição nos quais a PR é utilizada apresentam quatro objetivos: aumentar a eficiência energética, elevar a capacidade do circuito, melhorar o desempenho metalúrgico e cominuir as partículas seletivamente. Dessa forma, gera-se grande flexibilidade para o uso da PR, permitindo sua aplicação em diversos circuitos e com várias finalidades, as quais dependem das características do minério e da rota de processamento.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho da Prensa de Rolos (PR) em diversas configurações de circuito: aberto, fechado com peneira e com recirculação do produto e da borda. Pretende-se demonstrar os principais conceitos desse equipamento, que recentemente vem sendo aplicado na indústria mineral para tratar minérios mais resistentes, bem como as vantagens e os desafios de sua operação, sejam eles ambientais e/ou econômicos.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### 3.1 Cominuição

No contexto da indústria mineral, a cominuição, cujo significado deriva do latim *comminuere* (fazer menor), engloba as seguintes etapas de redução de tamanho da partícula: desmonte de rocha, britagem e moagem. Tem por finalidade permitir o manuseio e o transporte do material (CHAVES e PERES, 2006), adequar a distribuição granulométrica para as etapas subsequentes ou liberar o mineral de interesse para sua recuperação na etapa de separação (CHAVES e PERES, 2006, BERALDO, 1987, e LUZ et al., 2002).

Os métodos de cominuição são classificados de acordo com a distribuição granulométrica do minério. O desmonte de rocha é considerado o primeiro estágio desse processo, uma vez que o minério é retirado do local original (WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006). Posteriormente, na usina de processamento mineral, a cominuição é dividida entre britagem e moagem.

Na britagem, a redução do tamanho da partícula é feita em diversos estágios, com baixa relação de redução (variando de 3:1 a 6:1em cada estágio), geralmente a seco, principalmente por impacto ou compressão (WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006). O consumo específico de energia na britagem é relativamente baixo (BERALDO, 1987), entre 0,2 e 2,0 kWh/t (ROSENQVIST, 2004). Diferente da etapa de moagem, na qual a relação de redução é elevada, geralmente feita a úmido. Os principais mecanismos de fragmentação são impacto e abrasão, com elevado consumo energético, entre 2 e 25 kWh/t.

No entanto, há uma faixa granulométrica em que a operação de britagem sobrepõe a de moagem. Estudos demonstram que o consumo da moagem grosseira é aproximadamente o dobro do da britagem fina (FLAVEL, 1978).

#### 3.1.1 Mecanismo de cominuição

Partículas de rochas são formadas por minerais que apresentam estruturas cristalinas específicas (LUZ et al., 2002). Para serem fraturadas, é necessário que elas sejam submetidas a uma força que exceda seu limite de ruptura (BERALDO, 1987).

Diversos fatores contribuem para a fragmentação de uma partícula e, portanto, o resultado nunca é previsto com exatidão. Entretanto, a probabilidade de quebra está relacionada à quantidade de energia que é absorvida durante a solicitação. Após certo valor, conhecido como energia de quebra da partícula, ela se rompe. Esse limite é intrínseco ao material, além de depender do tamanho, da morfologia, da estrutura e da intensidade/direção da força (KING, 2001).

Mesmo para partículas do mesmo material e com as mesmas propriedades, energias de quebra diferentes são observadas. Essa característica comprova a teoria descrita por Griffith, de que a quebra ocorre, preferencialmente, pela presença de falhas, que foram geradas durante a gênese mineral (KING, 2001).

Os três principais mecanismos de cominuição são: abrasão, compressão e impacto. No primeiro estágio de cominuição – desmonte de rocha –, próximo à parede dos furos, o mecanismo predominante, é a compressão, uma vez que no início da detonação, a tensão exercida pelas ondas de choque é superior à resistência da rocha. Entretanto, quando as ondas de choque trocam de meio (rocha-face livre), há a reflexão das mesmas e a rocha acaba se rompendo por uma força de tração indireta, resultante de duas forças de compressão com sentidos opostos (diametral). Os gases em expansão exercem força no maciço e abrem as trincas formadas.

Na britagem, o principal mecanismo presente é a compressão, seguido pela abrasão, ambos em consequência do movimento do excêntrico dos britadores de mandíbulas, cônicos e giratórios. Em alguns tipos de britadores o mecanismo predominante é de impacto. Na etapa de moagem, os três mecanismos estão presentes. A compressão e a abrasão ocorrem quando as partículas são comprimidas entre os corpos moedores e/ou entre partículas de maior dimensão. Já o impacto ocorre na zona de queda das bolas (BERALDO, 1987).

#### 3.1.1.1 Abrasão

A abrasão é o resultado de esforços de cisalhamento na superfície e de uma força normal na superfície da partícula insuficiente para que haja ruptura. Como consequência, há apenas a fragmentação superficial da partícula. A distribuição granulométrica típica apresenta dois picos (excesso de finos e de partículas com tamanhos próximos aos da original) bem separados por faixas granulométricas que não apresentam partículas (KING, 2001). A Figura 1 ilustra a porcentagem retida simples e a acumulada passante, bem como a fragmentação obtida para esse mecanismo.



Figura 1 – Mecanismo de fragmentação – abrasão. Modificado de King, 2001

#### 3.1.1.2 Compressão

A principal característica da fragmentação obtida por meio da compressão é uma distribuição granulométrica bimodal (KING, 2001 e WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006), com quantidade significativa de finos gerada na zona de compressão e com partículas maiores resultantes da quebra por tração indireta (em função da compressão diametral).

No mecanismo de compressão, a aplicação da força é normal à superfície da partícula e lenta (em comparação à quebra por impacto), o que permite que, com o surgimento da primeira fratura, o esforço seja aliviado (BERALDO, 1987). A Figura 2 ilustra a porcentagem retida simples e a acumulada passante, bem como a fragmentação obtida para esse mecanismo.



Figura 2 – Mecanismo de fragmentação – compressão. Modificado de King, 2001

#### 3.1.1.3 Impacto

A fragmentação por impacto é obtida por meio da rápida aplicação de uma força de compressão, cuja intensidade é muito superior à resistência da partícula (BERALDO, 1987). Diversos tamanhos de partícula são obtidos por esse mecanismo e, uma vez que uma alta energia é aplicada, o processo de quebra não é seletivo. A Figura 3 ilustra a porcentagem retida simples e a acumulada passante, bem como a fragmentação obtida para esse mecanismo.



Figura 3 – Mecanismo de fragmentação – impacto. Modificado de King, 2001

## 3.1.2 "Leis" da cominuição

As chamadas "leis" da cominuição relacionam o consumo específico de energia com a granulometria da alimentação e do produto do circuito (WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006). O interesse nesta associação se deu em função dos elevados custos processos de cominuição (BERALDO, 1987). Entretanto, nenhuma delas é completamente satisfatória, pois a ineficiência dos processos cominutivos é elevada, ou seja, apenas uma pequena parcela da energia total é disponível para a quebra das partículas, enquanto o restante é absorvido pelos próprios equipamentos (WILLS e ATKINSON, 1993).

A equação empírica (Equação 1) relaciona a energia consumida ao inverso da variação de diâmetro dos produtos elevado a uma função-potência (BERALDO, 1987).

$$dE = -K \frac{dx}{x^n}$$
 Equação 1

Onde:

- Energia aplicada (kWh/t)
- E = X = K = Diâmetro da partícula (mm)
- Constantes dependentes do material (kWh/t)
- Constantes dependentes do processo cominutivo (adimensional)I n =

Diversos pesquisadores realizaram diferentes interpretações dessa relação, que integrada dá origem a outras equações (BERALDO, 1987):

Para  $n \neq 1$ , tem-se a equação de Charles (1957):

$$E = K_1 [x_f^{-n+1} - x_i^{-n+1}]$$
 Equação 2

Para n = 2, tem-se a Lei de Rittinger (1857):

$$E = K_2 \left( \frac{1}{x_f} - \frac{1}{x_i} \right)$$
 Equação 3

Para n = 1, tem-se a Lei de Kick (1883):

$$E = K_3 ln\left(\frac{x_i}{x_f}\right)$$
 Equação 4

Para n = 1,5, tem-se a Lei de Bond (1952):

$$E = K_4 \left( \frac{1}{x_f^{0.5}} - \frac{1}{x_i^{0.5}} \right)$$
 Equação 5

A primeira lei da cominuição, proposta por Rittinger (Equação 3), estabelece que a energia consumida é proporcional à área nova gerada na fragmentação, que é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula.

A segunda lei (Equação 4), proposta por Kick, determina que a energia consumida é proporcional à redução do volume da partícula.

Bond propôs a terceira lei da cominuição (Equação 5) com base em uma intensa campanha de comparação entre ensaios laboratoriais e consumo energético em escala industrial e piloto.

A Figura 4 apresenta a relação entre o consumo de energia e a granulometria do produto, proposta em 1961 por Hukki (HUKKI, 1961). A partir disso, foi possível verificar que as três leis seriam aplicáveis em intervalos granulométricos específicos. Assim, a lei de Kick se aplicaria à britagem, a de Bond à moagem e a de Rittinger à de moagem superfina.



Figura 4 – Relação entre energia e tamanho da partícula na cominuição. Modificado de Hukki, 1961

## 3.2 Prensa de Rolos

#### 3.2.1 Histórico

O desenvolvimento da PR iniciou-se após os estudos do prof. Klaus Schönert sobre a compressão de partículas individuais e a de camadas de partículas. Os resultados mostraram que o consumo de energia foi reduzido pela metade nas etapas posteriores à da britagem na PR (SCHÖNERT, 1988).

A PR foi rapidamente implantada, em meados dos anos de 1980, em circuitos industriais para processar materiais mais brandos encontrados na indústria cimenteira, em que reduções de custos foram atingidas em razão da economia de

energia, do aumento da capacidade do circuito e da longa vida útil das superfícies dos rolos. Entretanto só foi aplicada em materiais mais competentes que justificassem os altos custos de manutenção dos rolos, como em rochas diamantíferas, pois preservava a gema devido à fratura preferencial nos interstícios das partículas (SAMPAIO e DELBONI JÚNIOR, 2007 e HERBST et al., 2011).

As aplicações da PR no processamento de minérios mais competentes e abrasivos tornaram-se viáveis após a introdução, a partir da década de 1990, de novas tecnologias na confecção da superfície dos rolos. A principal inovação foi a adição de pinos de alta resistência à superfície dos rolos. Essa alteração permite que uma camada autógena (formada pelo próprio material) proteja os rolos (SCHUMACHER e THEISEN, 1997) e que os custos de manutenção sejam reduzidos.

Atualmente existem seis principais fornecedores desse equipamento: KHD Humboldt Wedag International AG (Weir), Koppern (Outotec), Metso, FLSmidth A/S, CITIC e Polysius.

A Figura 5 apresenta, de acordo com Burchardt et al., (2011), o crescimento de aplicações da PR na indústria mineral de acordo com o tipo de rocha processada: diamantíferas, minério de ferro e de alta tenacidade.



Figura 5 – Aplicações da PR na indústria mineral. Modificado de Burchardt et al., 2011

### 3.2.2 Aplicações

De acordo com Morley (2006b), os circuitos de cominuição nos quais a PR pode ser utilizada são agrupados em quatro principais grupos, cujos objetivos são: aumentar a eficiência energética, elevar a capacidade do circuito, melhorar o desempenho metalúrgico e atingir uma cominuição seletiva.

Normalmente, o motivo mandatório para a aplicação da PR como alternativa aos circuitos convencionais (britagem e moagem) é o aumento da eficiência energética.

Entre a Figura 6 e a Figura 13, são apresentados os possíveis circuitos nos quais a PR pode ser utilizada. A flexibilidade da aplicação da PR possibilita variações de circuitos de acordo com a necessidade do projeto, além de permitir o uso de peneiramento a seco ou a úmido.

A Figura 6 mostra um circuito com estágio único de peneiramento, enquanto a Figura 7 ilustra um circuito com duas etapas de peneiramento.



Figura 6 – Configurações de circuito I. Modificado de Morley, 2006b



Figura 7 – Configurações de circuito II. Modificado de Morley, 2006b

Ambas as configurações apresentam vantagens e desvantagens.

Com apenas um estágio de peneiramento (Figura 6), a capacidade da peneira deve comportar o recebimento do produto do britador primário, secundário e da PR. Como essa operação é feita geralmente a seco, são necessárias medidas para o controle de poeira. Outra consequência dessa configuração é a redução da quantidade de finos na alimentação da PR, fator que pode acelerar o desgaste dos rolos. Uma alternativa é o retorno de material fino para a PR. Entre os pontos positivos, estão o número reduzido de equipamentos e o de transportadores de correia.

Com a introdução de um segundo estágio de peneiramento (Figura 7), o produto do britador primário não precisa ser peneirado, e as peneiras podem ser dimensionas para cada aplicação específica. Além disso, a alimentação da PR conterá os finos

naturais do processo. Outra vantagem dessa alternativa é a possibilidade de peneiramento a úmido. Entre as desvantagens, estão a maior quantidade de equipamentos e de transportadores de correia e a possibilidade da presença de finos oriundos do britador primário que prejudiquem a operação na britagem secundária.

As Figuras 8 e 9 apresentam outras combinações de configurações de circuito, onde o produto da PR alimenta diretamente o moinho de bolas com duas possibilidades. A primeira é com retorno da fração do produto da PR correspondente às bordas dos rolos. A segunda possibilidade é sem o retorno dessa fração à alimentação da PR. Outra alternativa é a presença (ou não) da peneira secundária para a remoção do material grosseiro presente na descarga do moinho.

A desvantagem de não fechar o circuito de prensagem é que o circuito de moagem de bolas será submetido a oscilações de acordo com a alimentação da PR.

Por outro lado, ao retornar o produto das bordas, uma maior PR deve ser dimensionada para se adequar à elevada carga circulante.



Figura 8 – Configurações de circuito III. Modificado de Morley, 2006b

A PR pode ser utilizada em projetos de expansão, de forma a aumentar a capacidade de circuitos de moagem de bolas (Figura 9), melhorar o desempenho de uma operação de britagem de seixos num circuito de moagem SAG (Figura 10), ou ainda elevar a capacidade de um circuito existente de britagem convencional (Figura 11).

Ao introduzir a PR antes do moinho (Figura 9), além de fornecer ao circuito de moagem uma alimentação mais fina (e em alguns casos mais adequada a essa etapa), a fração do produto final do circuito de cominuição presente no produto da PR é elevada de forma significativa. Essas novas condições possibilitam o aumento da capacidade do circuito de moagem.



Figura 9 – Configurações de circuito IV. Modificado de Morley, 2006b

Em circuitos com a presença de moinhos semiautógenos (SAG), apresentados na Figura 10, a prensa pode ser aplicada para reduzir o tamanho da alimentação do moinho ou para cominuir as partículas que apresentam baixa taxa de quebra no interior do moinho. Para a segunda alternativa, deve-se tomar um cuidado adicional com as bolas que saem do moinho e são encaminhadas para PR, uma vez que a operação desse equipamento é muito fortemente impactada por elementos não britáveis. Entretanto, para ambas alternativas, a capacidade do circuito é aumentada.



Figura 10 – Configurações de circuito V. Modificado de Morley, 2006b

A Figura 11 apresenta uma alternativa para aliviar a etapa de britagem terciária. A PR pode trabalhar ou em paralelo com o britador existente ou até mesmo substituílo.



Figura 11 – Configurações de circuito VI. Modificado de Morley, 2006b

Em circuitos cujo objetivo seja aumentar o desempenho metalúrgico, a PR é utilizada antes da etapa de lixiviação devido à geração de microfraturas, que facilitam a percolação do liquido de lixiviação, aumentando, portanto, a recuperação. A Figura 12 e 13 apresentam duas combinações de circuito, sendo a diferença entre elas o retorno do material da borda dos rolos que sofre menor compressão e, consequentemente, tem menos microfraturas, fator este que reduz potencialmente a recuperação.



Figura 12 – Configurações de circuito VII. Modificado de Morley, 2006b



Figura 13 – Configurações de circuito VIII. Modificado de Morley, 2006b

Mendes et al. (2011) apresentaram os benefícios da aplicação da PR no tratamento de *pallet feed* prévio à pelotização. Foram observados o aumento da resistência à queda de uma pelota verde da superfície específica e da redutibilidade (capacidade de redução da pelota) e a redução da dosagem de bentonita.

Diversos autores (VON MICHAELIS, 2009; MORLEY, 2006a; VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012) identificaram que o produto da PR apresentou um Wi menor em comparação com o da alimentação do circuito. De acordo com eles, essa seria uma segunda consequência das microfraturas presentes no produto da PR.

A utilização adicional da PR é em circuitos de cominuição seguidos de concentração densitária de gemas. Para essa aplicação, a quebra preferencial e, portanto, de maneira seletiva, favorece a preservação de gemas, o que resulta num maior valor agregado do produto.

Assim, recomenda-se estudar em detalhe o emprego da PR em razão do circuito e do objetivo, de forma a estabelecer a viabilidade técnica e econômica para cada tipo de operação.
#### 3.2.3 Descrição do equipamento

A PR é constituída basicamente por dois rolos paralelos que giram em sentido contrário, sendo que um é fixo à estrutura do equipamento e o outro é móvel e desloca-se sobre um trilho, dependendo da pressão solicitada pelo minério nos atuadores hidráulicos (MORLEY, 2006a). A alimentação é feita na vertical sobre a abertura entre os rolos. A Figura 14 apresenta duas ilustrações da PR.



Figura 14 – Exemplos da PR da FLSmidth A/S (à esquerda – FLSmidth A/S, 2014) e Metso (à direita – Brian, Herman e Whalen, 2015)

O processo de cominuição inicia-se com o intertravamento das partículas (zona demarcada pelo ângulo de intertravamento –  $\sigma$ ) e é finalizado na zona de compressão máxima, delimitada pelo ângulo de compressão –  $\alpha$ . Após a compressão máxima, o produto sofre uma pequena força normal que é consequência de sua expansão, uma vez que há um alívio na pressão exercida pela PR. Nessa região não demarcada pelo ângulo de alívio –  $\gamma$ , não há mais cominuição. A geometria de tais regiões e as pressões exercidas na camada de partículas, ilustradas na Figura 15, variam para cada configuração de circuito e para cada minério.



Figura 15 – Esquema simplificado da zona de intertravamento e de compressão. Modificado de Neumann, 2006

Os rolos são movidos por motores independentes e conectados a estes por redutores e podem operar a uma velocidade fixa ou variável, dependendo da demanda do trabalho. Usualmente, a superfície dos rolos é protegida por pinos de carbeto de tungstênio, que ajudam a formar uma camada autógena de proteção. Entretanto, o rolo pode ser liso ou protegido por uma camada de metal de maior resistência (KLYMOWSKY et al., 2006).

Apesar de suas grandes dimensões, é necessária uma fundação menor em comparação aos circuitos convencionais de britagem, pois a vibração durante a operação torna-se reduzida (KLYMOWSKY et al., 2006).

A capacidade da PR varia de 50 até 4.200 t/h e o consumo específico é cerca de 1 a 3 kWh/t (KLYMOWSKY et al., 2006, e KHD Humboldt Wedag International AG, 2010).

# 3.2.3.1 HRC<sup>™</sup> HPGR

O HRC<sup>™</sup> HPGR (*High Pressure Grindng Roll*) é o conceito da PR da Metso.

A Figura 2 apresenta os principais componentes do HRC<sup>™</sup> HPGR: estrutura principal (*Arch frame*), cilindros hidráulicos, conjunto do eixo, braço de torque, redutor, o

motor elétrico, base e proteções. A Figura 17 ilustra os flanges que podem ser instalados nas laterais do rolo fixo. Esse dispositivo melhora a distribuição da pressão ao longo da espessura do rolo e, consequentemente, reduz o efeito de borda (descrito na sessão 3.2.4.2). Sua utilização está atrelada a uma das vantagens da estrutura principal, que é a eliminação do desalinhamento entre os rolos.



Figura 16 – Principais componentes do HRC™ HPGR. Modificado de ITO, 2015



Figura 17 – Flanges instalados no rolo fixo. Modificado de Herman, 2013

A Metso disponibiliza ao mercado diversos tamanhos do HRC<sup>™</sup> HPGR (Figura 18) para atender às diferentes aplicações/capacidade da indústria metálica e não metálica. A descrição do equipamento é dada pela sigla HRC<sup>™</sup> e pelo diâmetro dos respectivos rolos. O menor equipamento da linha tem potência instalada de 130 kW e capacidade típica entre 70 e 145 t/h. Na outra ponta, a potência instalada atinge 11.400 kW e a capacidade fica entre 2.700 e 5.400 t/h.



Figura 18 – Composição da linha de produtos HRC<sup>™</sup> HPGR. Modificado de Metso, 2012

O conceito do equipamento é o mesmo para todos os tamanhos disponíveis. Entretanto, o projeto de cada um varia de acordo com o tamanho deles, como é demonstrado na Figura 19, em que é comparado o HRC<sup>™</sup>800 (à esquerda) com o HRC<sup>™</sup>3000 (à direita).



Figura 19 – HRC<sup>™</sup> HPGR 800 à esquerda e HRC™ HPGR 3000 à direita. Arquivo pessoal do autor

O HRC<sup>™</sup> HPGR está integrado com a plataforma de automatização da Metso, a qual se chama Metso DNA. Dessa forma, é possível monitorar e controlar os parâmetros operacionais através de uma interface (Figura 20) de fácil utilização.



Figura 20 – Interface do Metso DNA. Metso, 2015

O grande diferencial da PR da Metso frente à dos concorrentes é consequência da estrutura principal (*Arch frame*) e da posição dos pistões, os quais serão detalhados nos itens a seguir.

## 3.2.3.1.1 Estrutura principal – Arch frame

A estrutura principal do HRC<sup>™</sup> HPGR (*Arch frame*) é patenteada pela Metso e seus principais componentes (Figura 21) são: base, carcaça lateral, tubo de torção e mancais.



Figura 21 – Estrutura principal (Arch frame) do HRC<sup>™</sup> HPGR. Metso, 2012

A partir desses componentes, foi possível obter uma abertura operacional uniforme por toda a largura dos rolos, mesmo com uma alimentação não uniforme ao longo da largura dos rolos, como apresentado na sessão 3.2.6.1. O mecanismo que mantém o alinhamento é patenteado pela Metso e consiste na conexão entre os mancais pelo do tubo de torção. Dessa forma, quando um dos lados do rolo começa a abrir, o tubo alinha o outro lado. A torção, exercida pela camada de partícula no equipamento, é uma pequena parte absorvida pela base, em função do ponto de pivotamento entre o *arch frame* e a base, sendo o restante absorvido pelos cilindros hidráulicos, em decorrência do aumento da pressão. A Figura 22 compara o conceito tradicional da PR e o da Metso.



Figura 22 – Conceito tradicional da PR e o da Metso. Metso, 2012

As vantagens obtidas com esse conceito são:

• Eliminação dos tempos de parada por desalinhamento

Nas prensas tradicionais, quando o desalinhamento dos rolos atinge um limite predeterminado, o equipamento é automaticamente desligado por motivos de segurança, uma vez que a pressão operacional nos pistões pode atingir níveis muito elevados.

• Redução dos tempos de parada por quebra dos rolamentos

Com o desalinhamento dos rolos, os rolamentos sofrem esforços que os danificam.

• Possibilidade do uso dos flanges

A diferença entre o conceito tradicional, que utiliza o *cheek plate*, e o do HRC<sup>™</sup> HPGR é apresentada na Figura 23. O *cheek plate* é uma placa instalada na estrutura da PR, cujo formato visa manter uma alimentação uniforme por toda a largura dos rolos. Porém, como esse dispositivo não está acoplado ao rolo, há uma folga que possibilita que o minério escape da zona de compressão e seja reportado diretamente ao produto. Essa ineficiência torna-se mais significativa com o desgaste que essa peça sofre ao longo da operação, uma vez que é fixa e o minério exerce nela uma força de abrasiva.

A garantia de abertura uniforme entre os rolos possibilita que os flanges sejam instalados. Por elas rotacionarem junto com o rolo fixo, minimizam a passagem do minério pelas bordas (e, consequentemente, as paradas por desgaste) e melhoram a distribuição de forças ao longo da largura do rolo. Sua instalação em equipamentos que não garantam a uniformidade da abertura entre os rolos não é plausível, pois, quando ocorrer um desalinhamento, os flanges se chocariam com o rolo à sua frente e ficariam danificados.



Figura 23 – Comparação entre a PR com *cheek plate* e com flange. Modificado de Herman, 2013

### 3.2.3.1.2 Pistões hidráulicos

O posicionamento dos pistões hidráulicos do HRC<sup>™</sup> HPGR (acima da linha formada pelos centros dos rolos) é diferente do conceito tradicional. A Figura 24 apresenta a principal diferença entre os conceitos. Enquanto no equipamento da Metso a força exercida pelos pistões é metade da força de compressão exercida na zona de britagem (pela função de braço de força que a estrutura principal exerce), nas demais PR a força dos pistões é igual à força de compressão. Essa configuração reduz o número e o tamanho dos cilíndricos hidráulicos.



Figura 24 – Posicionamento dos pistões hidráulicos. Metso, 2013 e Morley, 2006a

#### 3.2.4 Conceitos

#### 3.2.4.1 Processo cominutivo

A região entre os rolos é definida por Schönert e Lubjuhn (1992) em três zonas (Figura 25): aceleração/intertravamento das partículas, compressão máxima e alívio.



Figura 25 – Regiões entre os rolos, delimitadas pelos ângulos de aceleração/intertravamento (σ), compressão máxima (α) e alívio (γ). Modificado de Schönert e Lubjuhn, 1992

Na parte superior do rolo, as partículas são aceleradas, em consequência da aceleração da gravidade e da força de atrito, até atingir a velocidade da superfície do rolo. As partículas, cujos diâmetros são maiores que a abertura operacional da máquina, são cominuídas nessa região (definida pelo ângulo  $\sigma$ ), apesar de a zona de compressão máxima, delimitada pelo ângulo  $\alpha$ , ser a principal responsável por fragmentá-las.

A última região, zona de alívio, é definida entre a linha que une o eixo dos rolos e a posição em que não há mais força normal aplicada à superfície do rolo (delimitada pelo ângulo de alívio  $\gamma$ ).

Uma extensa campanha de ensaios com rolos de superfície lisa, conduzida por Schönert e Lubjuhn (1992) apontou que o ângulo de compressão máxima varia entre 7 e 13º e o de alívio entre 3 e 9º.

## 3.2.4.2 Forças aplicadas e efeito da borda

A força exercida pelos pistões hidráulicos sobre a camada de partículas varia entre 2,0 e 20 MN e a pressão na abertura entre os rolos atinge entre 80 e 400 MPa. Entretanto, o perfil da distribuição da pressão ao longo da superfície do rolo não é homogêneo, em consequência da geometria do equipamento. Os rolos estão em movimento, e a parte final do silo de alimentação, conhecido como *cheek plate,* é fixa. Dessa forma, o intertravamento das partículas nas bordas dos rolos é reduzido. Isso implica ineficiência no processo de cominuição, conhecido como efeito de borda (MORLEY, 2010).

Os principais impactos negativos dessa ineficiência são: (a) produto da região da borda mais grosseiro, podendo ocorrer até o *by-pass* da alimentação na região, (b) desgaste não uniforme dos rolos e (c) redução da eficiência energética do processo, uma vez que, no centro do rolo, a força aplicada é muito superior à necessária para quebrar as partículas (HERMAN, KNORR e WHALEN, 2013).

Com o objetivo de reduzir o efeito de borda, estão sendo estudadas alternativas, como a utilização de pinos de proteção diferenciados na região de borda e de rolos equipados com flanges, que giram juntos com o rolo e aumentam o intertravamento do material na zona em questão, além de pressionarem o retorno do produto da borda para a alimentação da PR. Figura 26 ilustra os perfis da distribuição de pressão ao longo do eixo longitudinal rolo tradicional e do equipado com flange. A Figura 27 apresenta uma ilustração do dispositivo proposto por esses mesmos autores.



Figura 26 – Pressão ao longo do rolo. Modificado de Herman, 2013



Figura 27 – Rolo com flange. Modificado de Herman, 2013

#### 3.2.4.3 Relação L/D

O diâmetro dos rolos varia entre 0,5 e 3,0 m e a largura entre 0,2 e 2,4 m (BEARMAN, 2006; KLYMOWSKY et al., 2006; Metso, 2012; KHD Humboldt Wedag International AG, 2010 e Koppern, 2010). A relação de aspecto (L/D) varia de acordo com o fabricante e apresenta implicações significativas no dimensionamento, na seleção do tipo de proteção da superfície do rolo e no desempenho, bem como nos custos da máquina.

Para um equipamento de relação de aspecto maior, sob as mesmas condições de operação de um com menor L/D, a velocidade angular e o desgaste por revolução

serão maiores, devido à grande diferença relativa de velocidade entre a superfície do rolo e as partículas. O peso dos rolos com menor L/D é maior, considerando apenas as geometrias dos rolos.

Para a mesma força específica de moagem, a potência requerida no motor para PR com diferentes relações L/D é a mesma. Dessa forma, o conjunto de transmissão para o equipamento com menor L/D deve oferecer torques maiores. Por outro lado, uma relação L/D maior limita a espessura dos eixos e dos rolos.

Para uma relação L/D elevada, o efeito de borda é menos significativo, resultando em produtos ligeiramente mais finos. Porém, se a alimentação não for bem distribuída, esse benefício se tornará uma preocupação, em razão do desgaste não uniforme da superfície dos rolos e de seus consequentes desalinhamentos. Rolos com larguras reduzidas minimizam os efeitos da alimentação heterogênea.

#### 3.2.4.4 Desgaste dos rolos

É natural que a utilização de novas tecnologias seja acompanhada de problemas operacionais, especialmente quando elas são transferidas entre indústrias minerais. No caso da PR, sua utilização iniciou-se na indústria cimenteira para fragmentação de farinha crua e clínquer (SAMPAIO e DELBONI JÚNIOR, 2007). Apesar do bom desempenho na indústria cimenteira, ao processar minérios mais tenazes, foram observados desgastes, atingindo até duas ordens de magnitude maiores (SERGEANT, 1995).

O desgaste dos rolos pode ser estimado pelo ensaio na unidade de bancada denominada ATWAL, desenvolvido pela Polysius, que, apesar de não se relacionar diretamente a valores obtidos em equipamentos industriais, é uma medida relativa para verificar abrasividade relativa entre os minérios. A Figura 28 apresenta o desgaste obtidos no ensaio ATWAL para diferentes materiais (VON MICHAELIS, 2005).



Figura 28 – Desgastes para diferentes materiais. Adaptado de Von Michaelis, 2005

O desgaste dos rolos é consequência de dois mecanismos, abrasão e compressão, que ocorrem em locais diferentes dos rolos. O primeiro é característica da zona de intertravamento, onde, além da forca de compressão, há diferença de velocidade entre as partículas e a superfície dos rolos (Figura 29a). Entretanto, nessa região, o desgaste não é elevado devido às forças normais reduzidas aplicadas no rolo. Na segunda região, na zona de compressão máxima, não há diferença de velocidade entre a superfície dos rolos e a camada de partículas, assim, só existe o mecanismo de compressão (Figura 29b).



Figura 29 – Mecanismos de desgaste dos rolos: a) abrasão; b) compressão. Modificado de Schumacher e Theisen, 1997

#### 3.2.5 Variáveis de processo

## 3.2.5.1 Ângulos de intertravamento, compressão e alívio

De acordo com Klymowsky et al. (2006), os ângulos de intertravamento (Equação 6) e compressão máxima, o qual varia entre 6 e 10 graus (Equação 7), são funções, respectivamente, da densidade do floco, densidade da alimentação e da maior partícula.

$$\sigma = \arccos\left(1 - \frac{\binom{x_{max}}{S} - 1.S}{1000.D}\right)$$
 Equação 6

Onde:

σ	Ângulo de intertravamento das partículas (rad)
x <sub>max</sub>	Tamanho da maior partícula (mm)
S	Espessura do floco (mm)
D	Diâmetro do rolo (m)

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\left(\frac{\delta_c}{\delta_f} - 1\right).S}{1000.D}\right)$$

Equação 7

Onde:

- α Ângulo de compressão máxima (rad)
- $\delta_c$  Densidade do floco (t/m<sup>3</sup>)
- $\delta_{\rm f}$  Densidade aparente da alimentação (t/m<sup>3</sup>)
- S Espessura do floco (mm)
- D Diâmetro do rolo (m)

#### 3.2.5.2 Pressão específica

A pressão específica (Equação 8) é definida como a força aplicada nos rolos (kN), dividida pelo diâmetro (m) e pela largura (m) dos rolos (SCHÖNERT, 1988).

$$P_{esp} = \frac{F}{1000.D.L}$$
 Equação 8

Onde:

Pesp	Pressão específica (N/mm <sup>2</sup> )
F	Força aplicada nos rolos (kN)
D	Diâmetro do rolo (m)
L	Largura do rolo (m)

Valores típicos de operação ocorrem entre 1,0 e 4,5 N/mm<sup>2</sup> em superfícies pinadas dos rolos e atingem 8 N/mm<sup>2</sup> em aplicações na indústria cimenteira.

### 3.2.5.3 Pressão máxima entre os rolos

A pressão máxima entre os rolos é definida como a pressão aplicada na zona de compressão do equipamento. Essa região varia para cada equipamento e para cada minério. Geralmente, seu valor é 40 a 60 vezes maior do que a pressão específica, sendo calculada pela Equação 9 (SCHÖNERT, 1988):

$$P_{m \dot{\alpha} x} = \frac{F}{1000. D. L. k. \alpha}$$
 Equação 9

Onde:

 $P_{máx}$ Pressão máxima (N/mm²)FForça aplicada nos rolos (kN)DDiâmetro do rolo (m)LLargura do rolo (m)KConstante do material (0,18 – 0,23)

*α* Ângulo de compressão máxima (rad)

A vazão é calculada a partir do volume do produto multiplicado pela densidade do material na abertura entre os rolos (flocos). Calculada pela Equação 10.

$$M = L. s. u. \delta_c. 3,6$$
 Equação 10

Onde:

Μ	Vazão mássica (t/h)
---	---------------------

- L Largura do rolo (m)
- s Abertura operacional do equipamento (mm)
- u Velocidade periférica do rolo (m/s)
- $\delta_c$  Densidade do material na abertura da PR (t/m<sup>3</sup>)

Durante a operação, a abertura da PR é uma variável não controlável, sendo dependente das características do minério, principalmente granulometria de alimentação e tenacidade, e da PR (diâmetro e tipo de superfície dos rolos) MORLEY, 2010). A pressão operacional influencia inversamente a abertura operacional, ou seja, quanto maior a pressão, menor a abertura.

## 3.2.5.5 Vazão mássica específica

O cálculo da vazão mássica específica, ou capacidade específica, pode ser efetuado de duas formas, como mostrado em sequência.

## Cálculo a partir da relação s/D

A vazão mássica específica (Equação 11), calculada a partir da relação entre a abertura da máquina (s) e o diâmetro do rolo (D), é função da densidade do produto (floco).

$$\dot{m}_c = \frac{s}{D} \cdot \delta_c \cdot 3.6$$
 Equação 11

Onde:

- $\dot{m}_{c}$  Vazão mássica específica s/D (t.s/m<sup>3</sup>h)
- s Abertura operacional do equipamento (mm)

D Diâmetro do rolo (m)

 $\delta_c$  Densidade do material na abertura da PR (t/m<sup>3</sup>)

### Cálculo a partir da relação alimentação

A vazão mássica específica também pode ser calculada a partir da alimentação (Equação 12), sendo função do diâmetro, da largura e da velocidade periférica do rolo (MORLEY, 2006a):

$$\dot{m}_f = rac{M}{D.L.u}$$
 Equação 12

Onde:

- $\dot{m}_{f}$  Vazão mássica específica (t.s/m<sup>3</sup>h)
- M Vazão mássica (t/h)
- D Diâmetro do rolo (m)
- L Largura do rolo (m)
- u Velocidade periférica do rolo (m/s)

## 3.2.6 Desempenho da PR

Estudos de viabilidade devem ser conduzidos para comparar as prováveis vantagens (equipamentos menores, geração menor de ultrafinos) e desvantagens (mais desgastes, maior carga circulante/peneiramento) de operar a PR de acordo com cada configuração apresentada no item 3.2.1. As conclusões devem ser específicas e restritas a cada caso e tipo de minério (VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012).

## 3.2.6.1 Fatores que influenciam a capacidade específica

A capacidade específica é um dos principais aspectos de desempenho da PR e depende de cada aplicação, além de diversos fatores, que podem ser divididos em três grupos, conforme apresentado na Tabela 1.

Fat	Fatores que influenciam a capacidade da PR		Grau de influência
1.	Rel	acionados ao equipamento:	
	$\triangleright$	Tipo de superfície dos rolos	Alto
	$\triangleright$	Pressão específica	Baixo
	≻	Velocidade de rotação dos rolos	Moderado
	$\triangleright$	Razão L/D	Baixo
2.	. Relacionados ao minério:		
	≻	Peso específico	Alto
	≻	Resistência à compressão	Alto
	≻	Umidade da alimentação	Moderado
		Distribuição granulométrica da alimentação	Alto
3.	Relacionada à condição de alimentação:		
	$\triangleright$	Nível e fluidez de material no silo	Alto
	$\succ$	Segregação da alimentação	Alto

Tabela 1 – Fatores que influenciam a capacidade da PR, elaborada pelo autor

De acordo com Klymowsky et al. (2006), o fator que mais tem influência na capacidade específica da PR é o tipo de superfície dos rolos (Figura 30). Os rolos pinados apresentam capacidades superiores (de 50 a 100%) quando comparados com rolos lisos ou com ranhuras.



Figura 30 – Influência da superfície do rolo na capacidade da PR. Modificado de Klymowsky et al., 2006

A variação da pressão específica de operação tem baixa influência na capacidade da PR, com exceção de alimentações finas e úmidas, como é o caso de concentrado de minério de ferro, como apresentado na Figura 31.



Modificado de Klymowsky et al., 2006

A velocidade de rotação dos rolos influencia moderadamente a capacidade da PR, uma vez que a capacidade absoluta aumenta linearmente com a elevação da velocidade relativa (u/D), apesar de a capacidade específica ser reduzida nas mesmas condições. Essa situação é ilustrada na Figura 32. É importante ressaltar que o aumento da capacidade absoluta não é diretamente proporcional à elevação da velocidade relativa dos rolos.



Figura 32 – Influência da velocidade relativa do rolo (u/D) na capacidade da PR. Modificado de Klymowsky et al., 2006

A relação L/D pode afetar a capacidade do equipamento entre 5 e 10%, uma vez que equipamentos com diâmetros maiores (baixos L/D) favorecem o intertravamento de partículas em condições de alimentação mais grosseira.

A densidade aparente do minério tem grande influência na capacidade específica do equipamento, pois a PR se comporta como um dispositivo de processamento volumétrico (assim como os britadores convencionais), ou seja, quanto maior a densidade do minério, maior a capacidade específica em toneladas por hora do equipamento.

A umidade, em conjunto das altas pressões de operação, propicia a aglomeração do produto da PR. Este produto aglomerado, conhecido como floco (*flakes*) pode atingir até 90% da densidade do minério processado, dependendo da pressão operacional (SARAMAK e KLEIV, 2013).

Por outro lado, quando o material é processado a seco, há a possibilidade de não se formar uma camada estável de partículas na zona de compressão e, consequentemente, reduzir a abertura operacional da máquina. Fato este que também diminui a capacidade específica (SARAMAK e KLEIV, 2013). Desse modo, há uma faixa de umidade ótima para cada distribuição granulométrica da alimentação em conjunto, sob uma determinada condição operacional (SARAMAK e KLEIV, 2013 e KLYMOWSKY et al., 2006), conforme ilustrado na Figura 33.



Figura 33 – Influência da umidade na cominuição da PR. Modificado de Saramak e Kleiv, 2013

A distribuição granulométrica da alimentação é um parâmetro que influencia significativamente a capacidade específica da PR. De modo geral, quanto mais tenaz a rocha, menor é a quantidade de finos gerada nas etapas de cominuição anteriores à PR. Dessa forma, quanto mais estreita for a faixa granulométrica da alimentação, seja pelas propriedades da rocha, seja pelo fluxograma de processo da operação, menor será a capacidade específica (Figura 34).



Figura 34 – Influência da distribuição granulométrica da alimentação na capacidade da PR. Modificado de Klymowsky et al., 2006

A alimentação com menos material fino, responsável por preencher os espaços vazios, será mais susceptível à ação dos pistões hidráulicos e será mais compactada, diminuindo não somente a abertura operacional como também sua capacidade. A Figura 35 ilustra a variação da capacidade específica para diferentes aberturas da peneira de escalpe instalada na alimentação da PR.



Figura 35 – Influência da distribuição granulométrica da abertura da peneira de escalpe. Modificado de Van Der Meer e Maphosa, 2012

O chute de alimentação da PR não pode limitar o fluxo de material à zona de compressão. Desse modo, a PR deve operar sob condições de alimentação afogada e, consequentemente, estável, para aumentar a capacidade do equipamento e reduzir o desgaste dos rolos.

A segregação da alimentação influencia negativamente a eficiência do equipamento, uma vez que proporciona diferentes distribuições granulométricas ao longo da largura dos rolos, ou seja, partículas grosseiras alimentadas em um lado e, as finas, no outro, como apresentado na Figura 36. Em outros equipamentos, como britadores cônicos ou de impacto e moinhos, esse efeito não é muito significativo como na PR. Isso resulta em desgaste e relação de redução desigual ao longo do rolo, além do desalinhamento do rolo (VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012).



Figura 36 – Consequência da segregação da alimentação. Modificado de Van Der Meer e Maphosa, 2012

## 3.2.6.2 Fatores que influenciam a distribuição granulométrica do produto

Diversos fatores influenciam a distribuição granulométrica do produto da PR, os quais podem ser classificados em relação aos parâmetros operacionais do equipamento e às propriedades do minério. A Tabela 2 ilustra cada fator e seu grau de influência.

Fatores que influenciam a distribuição granulométrica Grau de influência do produto da PR 1. Relacionados ao equipamento: Pressão específica Alto Abertura operacional Alto > Relação entre material na zona centrale de borda/by-Alto pass do rolo 2. Relacionados ao minério: Top size da alimentação Alto > Distribuição granulométrica da alimentação Alto Propriedades do minério Alto

Tabela 2 – Fatores que influenciam a distribuição granulométrica do produto da PR. Elaborada pelo autor

A pressão específica é o fator que mais influência a distribuição granulométrica do produto da PR. A Figura 37 ilustra a porcentagem de finos no produto da PR (material passante na malha de 1 mm de abertura), com variação da pressão aplicada.



De acordo com Klymowsky et al. (2006), a geração máxima de finos é atingida entre 4 e 5N/mm<sup>2</sup>, com algumas exceções causadas pelas propriedades do minério, como é o caso do minério de ferro.

Enquanto a pressão específica influência significativamente a geração de material fino, a abertura operacional causa maior impacto na porção mais grossa do produto. A maior partícula encontrada no produto pode apresentar a dimensão da abertura operacional (no caso da alimentação ser mais grosseira que a abertura operacional) ou o tamanho da maior partícula contida na alimentação (no caso da alimentação mais fina que a abertura operacional).

Em decorrência de o perfil da distribuição da pressão ao longo da superfície do rolo não ser homogêneo, ocorre grande geração relativa de finos no centro dos rolos, enquanto, em sua borda, a força de compressão é reduzida e, eventualmente, não há britagem nessa região, resultando em distribuições de partículas mais grosseiras (MORLEY, 2006a).

A distribuição granulométrica da alimentação influencia significativamente a distribuição do produto. Dependendo da quantidade inicial de finos na alimentação, o produto para uma alimentação truncada (fluxo sem a presença de finos devido a uma etapa anterior de peneiramento) é semelhante, apesar de ligeiramente mais grosso ao de uma alimentação completa (com finos), caso ilustrado na Figura 38.

Isso indica que a relação de redução para uma alimentação truncada é maior, uma vez que a geração de finos é maior (VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012).



Dundar et al. (2009) conduziu uma campanha experimental variando a quantidade de finos na alimentação da PR e concluiu que a introdução de finos na alimentação da PR é benéfica até certo ponto, uma vez que auxilia na formação de uma camada de partículas mais estável e, como consequência, a aplicação da energia. Porém, o excesso de finos é prejudicial devido à limitação do processo de compressão, ou seja, uma camada de partícula muito compacta não sofre compressão.

#### 3.2.6.3 Fatores que influenciam o consumo energético

O consumo específico de energia da PR é diretamente proporcional à pressão específica aplicada e inversamente proporcional à capacidade específica. Como a capacidade específica para os rolos pinados é maior, o consumo energético para essa configuração é menor nas mesmas condições operacionais (Figura 39) e, para os minérios com alta capacidade específica, o consumo energético específico é reduzido – Figura 40 (KLYMOWSKY et al., 2006).



Figura 39 – Influência da superfície do rolo no consumo energético. Modificado de Klymowskyet al., 2006



Figura 40 – Influência da capacidade específica no consumo energético em razão do tipo de minério. Modificado de Klymowsky et al, 2006

#### 3.2.6.4 Fatores que influenciam o desgaste dos rolos

Os fatores que influenciam o desgaste dos rolos podem ser divididos em três grupos: propriedades da superfície dos rolos, propriedades físicas do minério e condições operacionais. A Tabela 3 ilustra cada fator e sua influência.

Fatores que influenciam o desgaste dos rolos	Grau de influência
1. Relacionados à superfície dos rolos:	
Resistência à abrasão da superfície	Alto
<ul> <li>Formação da camada autógena</li> </ul>	Alto
2. Relacionados ao minério:	
<ul> <li>Distribuição granulométrica da alimentação</li> </ul>	Alto
Propriedades do minério	Alto
3. Relacionados as condições operacionais:	
Pressão específica	Alto
Velocidade do rolo	Alto

Tabela 3 – Fatores que influenciam o desgaste do rolo. Elaborada pelo autor

O fator que mais influência no desgaste do rolo é a conformação e o material de sua superfície e, de maneira geral, quanto mais dura, maior a resistência ao desgaste. A adição de pinos de alta resistência à superfície dos rolos aumentou cerca de 30 vezes a resistência ao desgaste em relação ao rolo liso, uma vez que uma camada autógena (formada pelo próprio material) protege os rolos.

As propriedades físicas do minério que mais influenciam o desgaste são: distribuição granulométrica da alimentação, umidade, tenacidade, composição mineralógica e tamanho do grão. A presença de silicatos e mica aumenta, em alguns casos, significativamente a abrasividade do minério.

Em casos cujos finos da alimentação são retirados da alimentação da PR (alimentação escalpada), a capacidade específica do equipamento é reduzida. Para compensar essa redução, a velocidade do rolo é aumentada, resultando em maior desgaste. Outra consequência negativa de a alimentação ser escalpada é que a camada autógena de proteção do rolo não é suficientemente competente (VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012). A presença de água auxilia a formação dessa camada de proteção. Entretanto, se a alimentação apresentar muita umidade, o desgaste torna-se acentuado devido ao maior escorregamento das partículas em relação ao rolo (SARAMAK e KLEIV, 2013).

#### 3.3 Caracterização do minério

Os ensaios de caracterização mecânica do minério são importantes para complementar o presente estudo, pois, a partir deles, é possível associar o desempenho do equipamento/processo a tais características. No âmbito do presente trabalho, foram realizados os seguintes ensaios: Carga Pontual, *Drop Weight Test*, Compressão de Leito de Partículas (CLP) e Wi de Bond, este último tanto para o moinho de barras como para o de bolas.

#### 3.3.1 Ensaio de Carga Pontual

O ensaio de carga pontual é um método rápido, simples e alternativo ao ensaio de compressão uniaxial, que visa à determinação da resistência mecânica à compressão. Porém, em decorrência dessas características, esse ensaio incorpora erro de correlação ao comparar os dois métodos (ISRM, 1985).

Segundo a *International Society of Rock Mechanics* (ISRM), há três métodos de determinação do índice de resistência à carga pontual: diametral, axial e em blocos (regulares ou não). A Figura 41 ilustra as amostras para cada tipo de ensaio.



Figura 41 – Amostras para o ensaio de carga pontual. Modificado de ISRM, 1985

O ensaio padrão consiste em romper um corpo de prova com 50 mm de diâmetro com uma força aplicada perpendicularmente, como apresentado pelas setas na Figura 41. O modelo do equipamento utilizado foi o PLT – 100 da GCTS, o qual está instalado no Centro de Tecnologia de Processo (CTP) da Metso, em Sorocaba (Figura 42).



Figura 42 - PLT - 100 da CGTS. Cortesia da Metso, 2015

Dessa forma, o índice é calculado pela Equação 13.

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$
 Equação 13

Onde:

Is<sub>(50)</sub> Índice de compressão à carga pontual – diâmetro equivalente de 50 mm (MPa)

P Pressão de fissura do corpo de prova (kN)

D Diâmetro do corpo de prova (mm)

Para amostras com diâmetros diferentes de 50 mm ou em forma de bloco (regular ou não), deve-se aplicar à Equação 13 um fator de correção, apresentado na Equação 14.

$$I_{s(50)} = I_s x F \quad com \quad F = \left(\frac{D^*}{50}\right)^{0,45}$$
 Equação 14

$$D^* = \sqrt{\frac{4LC}{\pi}}$$
 para corpo de prova com formato de bloco $D^* = D_c$  para corpo de prova com diâmetro maior que 50 mm

Onde:

F Fator de correção para corpos de prova com diâmetro diferente de 50 mm

*D*<sup>\*</sup> Diâmetro de corpos de prova diferente de 50 mm ou diâmetro equivalente

L Largura da seção de ruptura da partícula, mm

C Comprimento da seção de ruptura da partícula, mm

Devem ser realizadas no mínimo dez rupturas para que os dois maiores e os dois menores índices sejam desconsiderados e uma média dos valores restantes calculada.

Com o intuito de determinar a resistência à compressão uniaxial, deve-se multiplicar o índice determinado pelo ensaio de carga pontual por uma constante que é objeto de investigação de muitos pesquisadores.

$$\sigma_c = K. I_{s(50)}$$
 Equação 15

Na Tabela 4, são mencionados alguns valores de referência para tal constante.

do ensaio de carga pontual				
Valore de K	Referência			
24,0	BROCH e FRANKLIN (1972)			
24,0	BIENIAWSKI (1974)			
22,7	BIENIAWSKI (1975)			
24,0	BROOK (1985)			
	READ, THORNTON e REGAN (1980)			
16,0	(1) Rochas sedimentares			
20,0	(2) Basalto			
20-25	ISRM (1985)			

Γabela 4 – Valores de referência para a constante multiplicador	a
do ensaio de carga pontual	_

### 3.3.2 Drop Weight Test

O objetivo do *Drop Weight Test* (DWT) é obter uma relação entre a energia aplicada no minério e a fragmentação resultante (NAPIER-MUNN et al., 1999).

O equipamento, apresentado na Figura 43 e na Figura 44, é construído sobre uma base de concreto reforçado para suportar as quedas da base metálica. Devido às combinações de massas e alturas, faixas amplas de energia podem ser testadas, bem como tamanhos diferentes de partículas, que são separadas em lotes.

O modelo do equipamento utilizado foi DWT do JKTech, o qual está instalado no CTP da Metso, em Sorocaba



Figura 43 – Esquema simplificado do DWT



Figura 44 – DWT do JKTech instalado no CTP. Cortesia da Metso, 2015

O procedimento consiste em formar 15 lotes de 30 partículas, sendo três de cada faixa granulométrica: -63 + 53 mm; -45 + 37,5 mm; -31,5 + 26,5 mm; -22,4 + 19 mm e -16 + 13,2 mm. As partículas são submetidas individualmente a impactos com energias específicas correspondentes entre 0,5 e 2,5 kWh/t.

A energia específica envolvida em cada queda é:

$$E_{cs} = \frac{H_r.M_d.0,0272}{M_p}$$
 Equação 16

Onde:

- $E_{cs}$  Energia específica aplicada (kWh/t)
- H<sub>r</sub> Altura efetiva da queda (cm)
- M<sub>d</sub> Massa da base metálica (kg)
- M<sub>p</sub> Massa da partícula (g)

A altura efetiva da queda corresponde à altura inicial menos a altura residual da partícula quebrada. Esse cuidado deve ser tomado, pois, mesmo após a queda da base, ainda há fragmentos de rochas por debaixo dela, o que resulta numa menor altura efetiva de queda.

Ao fim da quebra de cada lote, todos os fragmentos são reunidos e peneirados. Após esse ensaio, o parâmetro  $t_{10}$ , que corresponde à porcentagem passante na malha um décimo do *top size*, é determinado para cada lote fragmentado.

Dessa forma, é possível relacionar o mecanismo de quebra (no caso, impacto) à energia disponível e à fragmentação pela seguinte equação:

$$t_{10} = A \left( 1 - e^{-bE_{cs}} \right)$$
 Equação 17

Onde:

t <sub>10</sub>	% passante do produto em um décimo do <i>top size</i>
A, b	Parâmetros característicos do minério quanto à resistência ao impacto
E <sub>cs</sub>	Energia específica aplicada em kWh/t

O fenômeno de fragmentação é descrito por uma curva logarítmica de crescimento inicial elevado (determinado pelo valor de *b*), resultando num comportamento assintótico (determinado pelo parâmetro *A*), conforme demonstrado na Figura 45.



Figura 45 – Representação da relação entre energia aplicada e fragmentação resultante

Os parâmetros A e b são intrínsecos ao material testado, e o produto de ambos representa um índice de resistência da amostra.

Faz parte do DWT um ensaio de abrasão para determinar o comportamento mecânico da rocha a esse mecanismo de cominuição. Para sua realização, é utilizado um moinho quadrado de 305 mm diâmetro, que conta com quatro aletas de 6 mm. É importante ressaltar que não há corpos moedores no seu interior. São utilizados 3 kg de amostras entre 55 e 38 mm. O procedimento consiste em moer o

minério por 10 minutos e peneirar o produto para determinar o parâmetro  $t_a$ , que corresponde ao parâmetro  $t_{10}$  dividido por 10.

Ensaios auxiliares, como a determinação da densidade real do minério, também são realizados. O procedimento consiste em medir a massa de um conjunto de partícula sob duas condições: submersa na água e secas.

## 3.3.3 Ensaio de Compressão de Leito de Partículas (CLP)

Assim como o DWT, o CLP também visa obter uma relação entre a energia aplicada no minério e a fragmentação resultante. Entretanto, a transferência de energia ao material não é feita por impacto, mas sim por compressão lenta.

Não há um procedimento experimental padronizado para o ensaio de CLP, pois o diâmetro da câmara de compressão é função do tamanho máximo da partícula testada. Entretanto, quanto maior a câmara, menor é a pressão exercida. Dessa forma, para a realização do ensaio com diferentes faixas granulométricas, utilizam-se diferentes tamanhos de câmaras.

Para este estudo, foram testadas as seguintes faixas granulométricas: -5,6 + 4,75 mm; -4,0 + 3,35 mm e -2,0 + 1,7 mm. A massa de cada lote foi fixada em 500 g e a força aplicada a uma taxa de 5 kN/s, até atingir os limites máximos, predeterminados de 50, 100, 500 e 1.000 kN.

A unidade hidráulica e as câmaras de compressão utilizadas para o estudo são ilustradas na Figura 46. Este equipamento pertence à Hacettepe Üniversitesi da Turquia.



Figura 46 – Unidade hidráulica e câmeras de compressão utilizadas no CLP. Cortesia da Hacettepe Üniversitesi, 2013

A unidade hidráulica tinha capacidade máxima de carga de 2.000 kN e estava integrada a um computador para aquisição e armazenamento dos dados de força aplicada e distância percorrida pelo pistão. Mais detalhes da especificação do equipamento são apresentados na Tabela 5.

Parâmetro			Valor	Unidade
Máxima capacidade c	le carga		2.000	kN
Taxa máxima de aplicação da força			2,5	kN/s
Precisão do medidor de distância			10	μm
Diâmetro da câmera de compressão			100	mm
Comprimento da câm	era de compressão		200	mm

Tabela 5 – E	specificaçõe	s técnicas da	a unidade hidr	ráulica utilizada	no CLP

A mesma parametrização utilizada no DWT para correlacionar a energia com a fragmentação é ajustada para o CLP. Entretanto, essa abordagem considera que partículas de diferentes tamanhos seriam quebradas da mesma forma quando submetidas à mesma energia por impacto.
O efeito do tamanho da partícula deve ser considerado para tornar o ajuste mais confiável conforme BANINI (2000); VOGEL e PEUKERT (2004), SHI e KOJOVIC (2007), resultando na Equação 18.

$$t_{10} = A(1 - e^{(-bE_{cs} * x)})$$
 Equação 18

Onde:

x é a média geométrica do intervalo (mm)

# 3.3.4 Ensaios de Bond

O índice de moabilidade de Bond (Wi – *Work Index*) é o parâmetro de cominuição que indica a resistência do minério à moagem e, numericamente, é a energia necessária (expressa em kWh por tonelada curta) requerida para reduzir um material de tamanho teórico infinito a 80% passante na malha de teste (100 malhas Tyler ou 150µm) (FIGUEIRA, PRETTI e VALLE, 1985). Segundo a NBR 11376 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS, 1990), o método de determinação do valor do índice energético para o moinho de bolas consiste em utilizar:

- 1. Moinho, liso, de diâmetro e comprimento igual a 12 polegadas com rotação de 70 rpm.
- 2. Alimentação com material abaixo de 3,35 mm, sem conter mais do que 28% de passante na malha de teste.
- Carga moedora de 285 bolas de aço (massa específica de 7,83 g/cm<sup>3</sup>) pesando 20,125 kg, distribuídas da seguinte forma:

Número de bolas	Diâmetro (mm)
43	36,5
67	30,2
10	25,4
71	19,1
94	15,9

4. Moagem a seco em circuito fechado e carga circulante de 250% no equilíbrio.

O Wi para moinho de bolas é calculado pela Equação 19:

$$BWI = \frac{44,5}{Am^{0,23} x \, Mob^{0.82} x \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)}$$
 Equação 19

Onde:

BWi	Índice de moabilidade para moinho de bolas(kWh/st)
Am	Abertura da malha de teste (µm)
Р	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto (µm)
F	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação (µm)
Mob	Média dos últimos três valores do índice de moabilidade no equilíbrio (g/rev)

Para a determinação do Wi de barras, o método é o seguinte.

De acordo com Bond (1961a e 1961b), o procedimento do ensaio consiste na preparação da alimentação menor que de 12,7 mm. O tamanho do moinho de barras é padronizado em 0,305 m de diâmetro e 0,610 m de comprimento, além de ter aletas internas, também padronizadas. O moinho rotaciona a 40 rpm, e a carga consiste de oito barras de 533,4 mm de comprimento, sendo seis de 31,75 mm e duas de 44,45 mm de diâmetro, totalizando 33,38 kg.

O procedimento para determinar o índice energético de barras é semelhante ao descrito na NBR 11376, porém é realizado até que a carga circulante atinja 100%.

O Wi para moinho de barras é calculado pela Equação 20:

$$RWI = \frac{62}{Am^{0,23} x \, Mob^{0.625} x \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)}$$
 Equação 20

Onde:

RWi	Índice de moabilidade para moinho de barras(kWh/st)
Am	Abertura da malha de teste (µm)
Р	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto (µm)
F	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação (µm)
Mob	Média dos últimos três valores do índice de moabilidade no equilíbrio (g/rev)

A partir do Wi, o consumo do circuito industrial pode ser estimado pela Equação 21.

$$W_{pre} = WI x \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)$$
 Equação 21

Onde:

W <sub>pre</sub>	Energia específica prevista para o circuito industrial (kWh/t)
Wi	Índice de moabilidade (kWh/t)
Р	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto (µm)
F	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação (µm)

#### 3.3.4.1 Aplicações específicas

De acordo com Morrell (2011), a abordagem do Bond (Equação 21) para prever o consumo específico de energia de um circuito industrial pode ser efetiva e validada se a distribuição granulométrica da alimentação e a do produto final forem paralelas entre si, uma vez que utiliza apenas da malha que passa 80% da massa tanto para a alimentação, como para o produto.

Dessa forma, o Wi operacional, definido por Rowland (1998) como um indicador da eficiência energética da operação de cominuição, cuja concepção se baseia no rearranjo da Equação 21, pode ser aplicado apenas à moagem sob as condições de paralelismo das distribuições granulométrica da alimentação e do produto. A Equação 22 apresenta o índice proposto por Rowland.

$$WIo = \frac{W_{exp}}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)}$$
Equação 22

Onde:

Wio	Wi operacional (kWh/t)
W <sub>exp</sub>	Energia específica experimental do circuito industrial (kWh/t)
Р	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto (µm)
F	Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação ( $\mu m$ )

Uma alternativa a esse indicador é apresentada por Morrell (2011), que considerou um circuito de moagem SAG seguido por bolas. Neste cenário, considera-se o  $P_{80}$ da britagem e o  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone para determinar o consumo específico de energia para o circuito todo. Em seguida, o consumo específico da etapa de moagem SAG é calculado a partir de modelos de potencias (MORRELL 2009, 2010 e 2011). Por esse motivo, o consumo específico da moagem de bolas é obtido pela subtração dos consumos dos circuitos antecessor.

# 4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental consistiu na execução de ensaios em planta piloto que contava com uma PR, além de peneira e dos demais equipamentos de manuseio. Fotos da planta piloto instalada na unidade da Metso, em Sorocaba (SP), são mostradas na Figura 47.



Figura 47 – HRC<sup>™</sup>300 e equipamentos auxiliares nas facilidades da Metso, Sorocaba (SP)

No total, foram conduzidos 18 ensaios. Como o equipamento estava instalado em circuito aberto, foram realizados, para cada configuração, cinco ciclos, de forma a atingir o regime e simular o desempenho do equipamento em diferentes circuitos: aberto ou fechado, este último com peneira ou com recirculação do produto/borda. Repetições foram realizadas para garantir a reprodutibilidade e a consistências dos ensaios.

Os ensaios foram realizados com diferentes pressões da PR para determinar o efeito da pressão específica na granulometria do produto de cada circuito. As pressões de 2,0 N/mm<sup>2</sup>, 3,5 N/mm<sup>2</sup> e 5,5N/mm<sup>2</sup> foram selecionadas, representando pressões baixas, médias e altas, respectivamente.

A velocidade angular do rolo foi ajustada em 29 rpm (ou 0,456 m/s de velocidade periférica) para os ensaios de alta pressão. Entretanto, alguns ensaios (todos de baixa pressão e alguns de média) foram realizados com 23 rpm (ou 0,361 m/s). Com a velocidade reduzida, o tempo de processamento da alimentação pelo equipamento tornou-se maior e facilitou a coleta de material.

O propósito principal de conduzir os ensaios em circuito fechado foi atingir uma distribuição granulométrica estável do produto do circuito e obter um leito de partículas estável entre os rolos para realizar uma operação mais eficiente. Como a carga circulante afeta a distribuição granulométrica da alimentação da PR, o desempenho do equipamento varia de acordo com a configuração do circuito.

Amostras de aproximadamente 5 kg da alimentação da PR e de 2 kg do(s) produto(s), para cada ciclo, foram coletadas para fazer a análise granulométrica e determinar a densidade e espessura do floco. Para a determinação da distribuição granulométrica da alimentação do circuito foi realizado um corte transversal à direção das pilhas alongadas utilizadas (maiores detalhes na sessão 4.3) e, para garantir que a granulometria se mantivesse constante durante a campanha de ensaios, uma comparação com a amostra de alimentação da PR de cada primeiro ciclo dos ensaios foi conduzida.

Os próximos itens descrevem as configurações de circuito adotadas para a realização dos ensaios.

### 4.1 Configurações de circuito

### 4.1.1 Circuito aberto

O primeiro ciclo de cada ensaio foi considerado um circuito aberto. Dessa forma, pode-se avaliar um circuito sem nenhum tipo de recirculação de material e/ou classificação. A Figura 48 ilustra os pontos de amostragem para esse tipo de circuito, além de uma representação esquemática da PR utilizada nos ensaios.



Figura 48 – Pontos de amostragem no ensaio de circuito aberto

#### 4.1.2 Circuito fechado dotado de peneira com abertura de 3,35 e 2,36 mm

Por se tratar de um equipamento com características de britador terciário ou quaternário, o circuito geralmente é fechado com uma peneira para garantir o *top size* da alimentação da próxima etapa. A distribuição granulométrica do circuito depende do tamanho da abertura da tela. Quanto menor esse valor, maior a carga circulante do circuito. Peneiramento a úmido pode ser utilizado para aberturas menores, sempre considerando a descompactação (leve compressão sobre a tela da peneira) do material – procedimento prévio ao peneiramento.

No ensaio de circuito fechado com peneira, o *oversize* da peneira retorna a alimentação do britador e, dependendo da eficiência do peneiramento utilizado para cada configuração do circuito, uma quantia do *undersize* foi reportada manualmente à alimentação do circuito.

As eficiências de peneiramento utilizadas nos ensaios foram de 75 e 100%. A eficiência de peneiramento foi definida pela quantidade de material reportado ao *undersize* da peneira e a quantidade de finos presentes na alimentação que deveriam passar pela tela da peneira. A Equação 23 mostra o cálculo da eficiência de peneiramento dos ensaios.

$$E = \frac{u(a-o)}{a(u-o)}.100$$
 Equação 23

Onde:

- *a* Quantidade de material fino na alimentação
- *o* Quantidade de material fino no *oversize*
- *u* Quantidade de material fino no *undersize*

Para simular uma eficiência de peneiramento de 75%, o procedimento consistiu em peneirar todo o produto com 100% de eficiência e, posteriormente, quartear o passante em quatro alíquotas e redirecionar uma delas para o produto retido na tela da peneira. A Figura 49 ilustra os pontos de amostragem para esse tipo de circuito.



Figura 49 – Pontos de amostragem no ensaio de circuito fechado com peneira aberturas de 3,35 e 2,36 mm

## 4.1.3 Recirculação parcial do produto

O ensaio de recirculação parcial do produto foi realizado para simular um circuito com retorno parcial do produto sem nenhum tipo classificação. As cargas circulantes praticadas foram de25 e 50%. Na primeira configuração, do segundo ao quinto ciclo, a alimentação era composta de 75% de material fresco e 25% do produto do ciclo anterior. Já para a segunda configuração, com carga circulante de 50%, a relação

entre alimentação nova e produto foi 1:1. A Figura 50 ilustra os pontos de amostragem adotados para o circuito com recirculação parcial do produto.



Figura 50 – Pontos de amostragem no ensaio de recirculação do produto

# 4.1.4 Recirculação da borda

Em consequência do efeito de borda, onde ocorre menor compressão, o produto dessa região é, geralmente, mais grosso do que o resultante da região central dos rolos. A partir do dispositivo que divide o fluxo em três partes (esquerda, centro e direita), foi possível avaliar o produto das bordas. Nos ensaios conduzidos sob tal configuração, todo o material das bordas foi recirculado. A Figura 51 ilustra os pontos de amostragem adotados para esse tipo de circuito.



Figura 51 – Pontos de amostragem no ensaio de recirculação da borda

### 4.1.5 Ensaios realizados

A Tabela 6 apresenta as principais condições dos ensaios programados para a campanha, enquanto a Tabela 7 resume os realizados, seus respectivos códigos e os ensaios laboratoriais – densidade aparente (DA), distribuição granulométrica (DG), densidade do floco (DF) e espessura do floco (EF). Foram conduzidos, no total, dois ensaios de baixa pressão, oito de média e oito de alta.

A campanha de ensaios contemplou duplicatas para garantir a reprodutibilidade dos ensaios. Dessa forma, os ensaios pares seriam: 1 e 4, 2 e 7, 9 e 10, 11 e 12, 13 e 18, 14 e 15 e, por fim, 19 e 20.

Pressão	Ensaio	Condição operacional	Eficiência da classificação (E)
	1	Recirculação do produto	50
	2	Recirculação da borda	100
	3	Fechado com peneira (3,35 mm)	100
Alto $(E \in N)/mm^2$	4	Recirculação do produto	50
Alla (5,5 N/IIIII )	5	Fechado com peneira (3,35 mm)	75
	6	Recirculação da borda	75
	7	Recirculação da borda	100
	8	Recirculação do produto	75
	9	Recirculação do produto	75
	10	Recirculação do produto	75
	11	Fechado com peneira (3,35 mm)	100
	12	Fechado com peneira (3,35 mm)	100
	13	Fechado com peneira (2,36 mm)	100
$M_{adia} (2 E N/mm^2)$	14	Fechado com peneira (1,19 mm)	100
	15	Fechado com peneira (1,19 mm)	100
	16	Fechado com peneira (1,19 mm)	75
	17	Fechado com peneira (3,35 mm)	75
	18	Fechado com peneira (2,36 mm)	100
	19	Recirculação da borda	100
	20	Recirculação da borda	100
	21	Fechado com peneira (3,35 mm)	75
	22	Fechado com peneira (3,35 mm)	100
Baixa (2,0 N/mm <sup>2</sup> )	23	Fechado com peneira (2,36 mm)	75
	24	Recirculação do produto	75
	25	Recirculação da borda	100
Média (3,5 N/mm <sup>2</sup> )	26	Fechado com peneira (3,35 mm)	100

Tabela 6 – Ensaios programados para a campanha

Os ensaios 14, 15, 16, 18 e 23 seriam realizados com o objetivo de analisar o desempenho da PR em circuito fechado, com abertura da tela da peneira de 1,19 ou 2,36 mm. Entretanto, em razão das horas consumidas para realizar o ensaio 13 e da limitação dos equipamentos de classificação, eles foram abortados.

O motivo da não realização dos ensaios 17, 21 e 22 foi a mudança de prioridade de projetos desenvolvidos pela Metso.

O ensaio para determinar a densidade aparente foi conduzido com a amostra de alimentação da PR de cada ciclo. Seu procedimento consistiu em quartear esta amostra para obter três alíquotas com, aproximadamente, 1 kg cada. Dessa forma, foram realizadas três repetições para se obter uma média. Cada alíquota era inserida numa proveta de 1,5 L, com graduação de 2 mL. Com um bastão, o minério era golpeado por 30 vezes, com o objetivo de reduzir os espaços vazios gerados

pelo empolamento, e, em seguida, o volume era aferido. Por fim, o material era colocado na balança fabricada pela Marte, com precisão de 0,01 g para medir a sua massa.

O ensaio para determinar a distribuição granulométrica, de todas as amostras de todos os ciclos, foi conduzido a seco, com peneiras de oito polegadas de diâmetro e duas de altura. Utilizou-se um peneirador vibratório suspenso Metso para acoplar o jogo de peneiras. Foram usadas as seguintes malhas quadradas, em milímetros: 19,0; 12,5; 9,50; 6,30; 4,75; 3,36; 2,36; 1,68; 1,18; 0,840; 0,600; 0,420; 0,300; 0,210; 0,150; 0,106 e 0,075.

Devido à grande quantidade de aberturas utilizadas e à limitação da quantidade de peneiras que podem ser inseridas no peneirados automático, foram montados dois jogos: um com as telas mais abertas (de 19,0 a 0,084 mm) e o outro com as telas mais fechadas (de 0,600 a 0,075 mm). Dessa forma, alimentava-se o jogo mais grosseiro com toda a amostra e o material passante em 0,084 mm alimentava o segundo jogo.

Para calcular a densidade do floco, foi utilizado o método da parafina derretida (Figura 52). Neste ensaio, a parafina derretida recobre o floco, e a absorção de água, durante a verificação do seu volume numa proveta, é reduzida. Ensaios iniciais foram feitos para avaliar a influência da massa e do volume da parafina no cálculo da densidade do floco. O procedimento consistiu em verificar a diferença, em gramas, entre a massa do floco com e sem parafina. Obteve-se o resultado médio de 0,2 g. A variação do volume foi considerada desprezível, uma vez que a camada de parafina formada era muito fina. Portanto, para minimizar os erros de medição, a massa do floco foi medida antes de sua imersão na parafina. Por fim, a densidade do floco adotada foi uma média de aproximadamente cinco medidas por ciclo, dependendo de sua formação após a etapa de cominuição.

Uma vez que o floco estava recoberto com a parafina, mediu-se sua espessura com um paquímetro.



Figura 52 – Determinação da densidade do floco pelo método da parafina derretida

Os ensaios com circuito fechado com peneira (média pressão: ensaios 3, 5, 13 e 26; alta: ensaios 11 e 12) foram conduzidos com 80 kg de massa processada por ciclo. Para o circuito com recirculação de 25% do produto (baixa pressão: ensaio 24; média: ensaios 9 e 10; alta: ensaios 6 e 8), foram adotados 90 kg e, para o circuito com 50% de recirculação do produto (alta pressão: ensaios 1 e 4), utilizados 60 kg. A configuração com recirculação da borda (baixa pressão: ensaio 25; média: ensaios 19 e 20; alta: ensaios 2 e 7) foi processada com 100 kg de material por ciclo.

Essa quantidade elevada de massa por ciclo foi empregada para minimizar o efeito prejudicial que a retirada de amostras do circuito causa no balanço de massa dos ensaios.

	Pres (	ssão ir N/mm	nicial ²)			Ponto	os de a	amostr	agem	
Condições Operacionais	2,0	3,5	5,5	Massa processada por ciclo (kg)	Alimentação	Produto	Oversize	Undersize	Centro	Borda
Fechado com peneira (3,35 mm) Ensaios 3, 5, 11, 12 e 26	_	3	2	80	DG DA	DG DF EF	DG	DG		
Fechado com peneira (2,36 mm) Ensaio 13	-	1	-	80	DG DA	DG DF EF	DG	DG		DG
Recirculação do produto Ensaios 6, 8, 9,10 e 24	1	2	2	90	DG DA	DG DF EF				
Recirculação do produto Ensaios 1 e 4	_	-	2	60	DG DA	DG DF EF				
Recirculação da borda Ensaios 2, 7, 19, 20 e 25	1	2	2	100	DG DA	DG DF EF			DG	DG
Total	2	8	8							

#### Tabela 7 – Resumo dos ensaios realizados

# 4.2 O equipamento – HRC<sup>™</sup> 300

O equipamento utilizado na campanha de ensaios foi o HRC<sup>™</sup> 300, instalado nas dependências da Metso, em Sorocaba (SP) – Figura 53 –, cujas especificações são apresentadas na Tabela 8.



Figura 53 – HRC<sup>™</sup> 300 nas facilidades da Metso, Sorocaba (SP)

Parâmetros	Valor Unidade	Parâmetros	Valor Unidade
Potência instalada	2motores de 15 kW	Velocidade do motor	1100 Rpm
Diâmetro dos rolos	300 Mm	Aberturas operacionais	Mínimo de 2 Mm
Largura dos rolos	150 Mm	<i>Top size</i> da alimentação	0–19 Mm
Velocidade dos rolos	23-29 rpm	Faixa de pressão	$0 - 8 \text{ N/mm}^2$
Superfície dos rolos	Pinada –		

Tabela 8 – Especificações técnicas do HRC<sup>™</sup> 300b

É importante ressaltar a diferença de fabricação da unidade piloto para a industrial (apresentada no item 3.2.3.1).

O HRC<sup>™</sup> 300 foi desenvolvido para a realização de ensaios, cujo objetivo era determinar os limites de operação necessários para o desenvolvimento do HRC<sup>™</sup> HPGR. Por esse motivo, a estrutura principal, as consequências da propriedade de paralelismo entre os rolos e a faixa de pressão são as diferenças mais significativas.

O HRC<sup>™</sup> instalado na planta piloto da Metso e empregado neste estudo estava equipado com sensores de pressão, de abertura, de velocidade e com célula de carga, que registravam os dados experimentais a cada dois segundos. Finalizados os ensaios, os dados de cada ciclo foram extraídos e, posteriormente, analisados. Um silo, de aproximadamente 0,1 m<sup>3</sup>, colocado sobre o equipamento auxiliou a manutenção da alimentação constante, deixando a câmera de britagem sempre cheia.

Para aumentar a vida útil dos rolos, a superfície tinha pinos de tungstênio, pois os protegem da abrasividade do material, uma vez que uma camada autógena fica depositada nos interstícios dos pinos. Teve-se o cuidado de processar, caso a superfície dos rolos não estivesse com a camada autógena em razão do período de chuva na época da realização dos ensaios, uma amostra menor apenas para formá-la.

Para os ensaios de recirculação de borda, foi utilizado um dispositivo (Figura 54) que divide o produto em três partes (centro e bordas esquerda e direita).



Figura 54 – Divisor do produto em centro e bordas e rolo com superfície pinada

#### 4.3 Preparação da alimentação do circuito

O minério utilizado na campanha foi adquirido junto à unidade de Sorocaba da Pedreira Cantareira, pertencente à empresa Holcim. Trata-se de granito padrão usado pela Metso para a confecção das curvas padrão de produto para diversos equipamentos.

Como a alimentação do HRC<sup>™</sup> devia conter uma faixa granulométrica completa (0-19 mm), foram adquiridos quatro produtos da Holcim: pedra 1, pedra 1/2, pedrisco limpo e pó de pedra, os quais foram homogeneizados por duas vezes no pátio de carregamento da empresa: ao carregar o caminhão e ao basculá-los no chão. Foi obtido um total de 12,2 toneladas, na seguinte proporção: 2,2 t de pedra 1; 2,7 t de pedra 1/2; 3,6 t de pedrisco limpo; 3,7 t de pó de pedra.

Já nas dependências da Metso, foram feitas pilhas alongadas de homogeneização e, depois, cobertas para proteção contra a chuva (Figura 55). A umidade máxima aceitável para realizar os ensaios foi determinada em 5% com o objetivo de evitar desgaste nos rolos e valores incorretos de vazão específica. Para manter a umidade constante ao longo da campanha de ensaios, as amostras foram quarteadas e espalhadas em um local coberto (Figura 56).

A distribuição granulométrica do circuito foi determinada por um corte transversal à direção das pilhas alongadas. A confirmação que a granulometria da pilha se manteve constante durante toda a campanha experimental foi feita com a amostra da alimentação da PR dos primeiros ciclos de cada ensaio.



Figura 55 – Pilhas de homogeneização da alimentação



Figura 56 – Preparação da alimentação

### 4.4 Procedimento experimental

Para cada ciclo dos ensaios, toda a alimentação (seja nova, seja com produto reciclado) foi colocada num silo pequeno equipado com alimentador de correia (Figura 57). Todas as amostras da alimentação foram tomadas na descarga desse alimentador (Figura 58) antes de o material ser transferido para a correia do HRC<sup>™</sup>. O equipamento permaneceu desligado até que todo o material estivesse no pequeno silo vertical sobre a abertura da máquina.



Figura 57 – Procedimento de carregamento do silo do alimentador



Figura 58 – Procedimento de coleta da amostra de alimentação

Nos ensaios conduzidos com cinco ciclos, o produto da primeira passagem pela máquina era peneirado ou dividido de acordo com a configuração do circuito. O produto dos ciclos intermediários (segundo, terceiro e quarto) era descartado, e a quantidade de amostra retirada da pilha de homogeneização calculada com base na massa da carga circulante e na massa pré-estimada, conforme listada na Tabela 7. A retirada das amostras dos fluxos do circuito foi feita em três incrementos a cada dez segundos. Esse tempo foi adotado para minimizar o efeito de redução do nível de minério no silo e, consequentemente, a força peso sobre o leito de partículas que se localizavam na zona de compressão.

Para avaliar o desempenho do circuito com retorno das bordas, os fluxos de material foram separados pelo dispositivo introduzido na parte inferior do equipamento (Figura 59). Em seguida, as amostras foram armazenadas separadamente.



Figura 59 – Dispositivo empregado para a coleta de amostras das bordas

Para os ensaios com peneiramento, utilizou-se, dependendo da abertura da tela e/ou da eficiência desejada, a peneira contínua de 1,1 x 0,19 m ou o peneirador quadrado de 0,6 x 0,6 m. Para atingir alta eficiência de classificação de 3,35 mm e realizar o ensaio com abertura de 2,36 mm, usou-se o peneirador quadrado e, para as outras condições, a peneira contínua. A Figura 60 ilustra as peneiras utilizadas nos ensaios.



Figura 60 – Peneirador quadrado à esquerda e peneira contínua à direita

#### 4.5 Caracterização do minério

Para a realização dos ensaios laboratoriais, foram tomadas amostras da alimentação, cuja distribuição granulométrica atendesse às especificações dos ensaios, conforme apresentado no item 3.3.

#### 4.6 Dados experimentais

As condições estipuladas para a operação, em conjunto com os dados obtidos e os resultados dos ensaios laboratoriais, foram utilizadas para determinar os parâmetros de desempenho do circuito, apresentados na Tabela 9.

Origem	Parâmetro	Unidade
	Duração do ensaio	S
	Pressão operacional dos pistões	Bar
Instrumentação do equipamento	Potência do motor	kW
	Abertura operacional ente os rolos	mm
	Velocidade dos rolos	rpm
	Vazão de sólidos	t/h
	Capacidade específica	ts/hm <sup>3</sup>
Parâmetros de processo	Potência específica volumétrica	kWs/hm <sup>3</sup>
	Consumo energético	kWh
	Potência específica mássica	kWh/t
	Distribuição granulométrica	_
	Densidade aparente da alimentação	t/m <sup>3</sup>
	Densidade do floco	t/m <sup>3</sup>
	Espessura do floco	mm

Tabela 9 – Resultados oriundos do procedimento experimental

A partir da instrumentação da máquina foi possível analisar os parâmetros operacionais, como duração do ensaio, pressão, potência, abertura e velocidade dos rolos. Somado o balanço de massas a esse conjunto de dados, avaliaram-se os parâmetros de processos, como capacidade absoluta e específica, potência específica e consumo energético absoluto e específico.

A Figura 61 ilustra um exemplo dos dados operacionais obtidos durante o período de realização de um ensaio e de amostragem do circuito para o mesmo. Os valores médios de cada ensaio foram calculados durante a operação estável do equipamento e serviram para determinar as relações entre os parâmetros.



Figura 61 – Dados operacionais obtidos durante o período do ensaio e de amostragem

Os ensaios laboratoriais, realizados para cada ciclo de cada ensaio, incluíram a determinação da densidade aparente da alimentação, da densidade e espessura do floco e da distribuição granulométrica de todas as amostras obtidas durante a amostragem do circuito.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

# 5.1 Caracterização do minério

A caracterização do minério foi realizada para compreender o comportamento do mesmo frente a diferentes mecanismos de quebra (compressão, impacto e abrasão). Os resultados de cada ensaio são apresentados a seguir.

# 5.1.1 Ensaio de Carga Pontual

O resultado do ensaio de Carga Pontual é apresentado na Tabela 10 e resumido na Figura 62, que indica a média, os valores máximo e mínimo e o primeiro e o terceiro quartil.

Tabela 10 – Resultados oriundos do PLT						
Partícula	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Pico de quebra (kN)	ls₅₀ (MPa)		
1	41	61	9.10	2.98		
2	32	58	14.5	6.00		
3	45	78	14.5	3.70		
4	49	62	15.4	4.36		
5	43	71	12.8	3.67		
6	56	57	14.0	3.84		
7	32	49	11.4	5.43		
8	43	75	17.1	4.63		
9	56	78	13.4	2.90		
10	45	72	7.70	2.07		
11	40	52	11.3	4.30		
12	42	67	17.0	5.11		
13	30	61	14.0	5.99		
14	59	77	12.1	2.54		
15	52	74	14.5	3.43		
16	45	49	13.5	4.95		
17	41	56	8.2	2.88		
18	41	79	17.6	4.78		
19	47	55	19.6	6.32		
20	42	64	8.00	2.49		
Média	44	65	13.30	4.09		
σ	5.34	8.50	2.47	1.01		

O índice de carga pontual ( $I_{S50}$ ) pode ser usado para estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) a partir do fator multiplicador da média (utilizado 24 por ser o valor estimado pela maioria dos autores – Tabela 4). Para a alimentação do circuito, o  $I_{S50}$  médio foi 4,09 MPa (UCS estimada de 98 MPa) e, respectivamente, menor e maior quartil de 2,96 e 4,99 MPa.



Figura 62 – Resultado do Teste de Carga Pontual

## 5.1.2 Drop Weight Test

O resumo dos resultados do DWT é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Sumário dos resultados do DWT						
	А	В	Axb	ta	Densidade do minério (t/m³)	
Alimentação do circuito	73,5	1,14	83,7	0,325	2,72	

Uma classificação típica, proposta por Delboni Júnior (2003), por categorias, para a resistência ao impacto e à abrasão é fornecida na Tabela 12 e na

Tabela 13, respectivamente. De acordo com essas classificações, a amostra de alimentação do circuito foi considerada de baixa resistência em relação à quebra por impacto (valor de Axb de 83,7) e muito alta abrasividade (valor de t<sub>a</sub>: 0,325).

Intervalo		Basistância de imposto	Sigla
Menor	Maior	Resistencia ao impacto	Sigia
0	9,9	Excepcionalmente alta	ETA
10	19,9	Extremamente alta	EXA
20	29,9	Muito alta	MT
30	39,9	Alta	ALT
40	49,9	Moderadamente alta	MDA
50	59,9	Média	MED
60	69,9	Moderadamente baixa	MDB
70	89,9	Baixa	MAI
90	109,9	Muito baixa	MTB
> 1	10	Extremamente baixa	ETB

Tabela 12 – Classificação qualitativa de resistência ao impacto (Axb)

Tabela 13 – Classifica	ição q	jualitativa	de	resistência	à	abrasão (	(t <sub>a</sub> )	)
------------------------	--------	-------------	----	-------------	---	-----------	-------------------	---

\_\_\_\_

Intervalo		Posistôncia ao impacto	Sigla
Menor	Maior	Resistencia ao impacto	Sigia
0,00	0,19	Extremamente alta	EAAb
0,20	0,39	Muito alta	MTAb
0,40	0,59	Alta	ALAb
0,60	0,79	Moderadamente alta	MAAb
0,80	0,99	Média	MDAb
1,00	1,19	Moderadamente baixa	MOAb
1,20	1,39	Baixa	BAAb
1,40	1,59	Muito baixa	MBAb
> 1	,60	Extremamente baixa	EBAb

A relação entre Ecs e  $t_{10}$  para o ensaio de impacto é apresentada na Tabela 14 e o gráfico com a curva parametrizada é mostrado na Figura 63. A distribuição granulométrica do ensaio de abrasão é apresentada na Tabela 15.

Lote	Tamanho da patícula	Ecs (kWh/t)	t <sub>10</sub>
1		0,40	31,8
2	63,0 x 53,0 mm	0,25	23,8
3		0,10	11,8
4		1,01	53,2
5	45,0 x 37,5 mm	0,25	21,2
6		0,10	6,98
7		2,51	69,9
8	31,5 x 26,5 mm	1,00	50,6
9		0,25	18,0
10		2,50	69,9
11	22,4 x 19,0 mm	1,00	47,1
12		0,25	15,2
13		2,50	70,1
14	16,0 x 13,2 mm	1,00	42,9
15		0,25	14,5

Tabela 14 – Relação entre Ecs e t<sub>10</sub> para o ensaio de impacto do DWT



Figura 63 – Curva parametrizada resultante do ensaio de impacto do DWT

Tamanho (mm)	Retido simples (g)	% Acumulada passante
37.5	2633.18	12.5
26.5	188.37	6.19
19.0	45.89	4.67
13.2	23.40	3.89
9.50	13.16	3.45
6.70	3.20	3.35
4.75	2.52	3.26
3.35	1.84	3.20
2.36	1.12	3.16
1.70	1.32	3.12
1.18	1.54	3.07
0.850	1.67	3.01
0.600	2.35	2.93
0.425	4.64	2.78
Fundo	83.63	0.00

Tabela 15 – Distribuição granulométrica do ensaio de abrasão do DWT

### 5.1.3 Ensaio de Compressão de Leito de Partículas

O resumo dos resultados do ensaio de CLP é apresentado na Tabela 16.

Tabela 10 – Sulliano dos resultados do CEP							
	Α	b	Axb				
Alimentação do circuito	33,6	0,282	9,47				

Tabela 16 – Sumário dos resultados do CLP

Apesar de as variáveis resultantes do CLP e do DWT serem as mesmas (A e b), a Tabela 12 não pode ser usada como referência para a CLP, uma vez que os mecanismos de quebra de ambos os ensaios são diferentes, sendo o mecanismo predominante no ensaio de CLP a compressão e, no DWT, o impacto.

A relação entre Ecs e t<sub>10</sub> é apresentada na Tabela 14 e o gráfico com a curva parametrizada é mostrado na Figura 63.

Lote	Tamanho da natícula		t
LOIE			·10
1		0,11	3,38
2	5 60 x 4 75 mm	0,27	8,65
3	3,00 × 4,75 mm	1,17	25,7
4		1,97	32,5
5		0,10	3,25
6	4.00 x 2.25 mm	0,27	7,49
7	4,00 x 3,35 mm	1,13	22,5
8		1,96	28,9
9		0,09	2,13
10	2.00 × 1.70 mm	0,25	4,59
11	2,00 x 1,70 mm	1,08	17,3
12		1,93	23,5

Tabela 17 – Relação entre Ecs e t<sub>10</sub> para o ensaio CLP



Figura 64 – Curva parametrizada resultante do ensaio de CLP

#### 5.1.4 Ensaios de Wi Bond

Dois ensaios de Wi de Bond foram feitos, um em moinho de bolas (*BBMWi*) e outro em moinho de barras (*BRMWi*). Como apresentado na Tabela 18, o resultado do Wi de bolas foi 18,15 kWh/t para a malha de 149 µm e do Wi de barras foi 13,00 kWh/t

para a malha de 1180 µm, indicando um minério de média tenacidade de acordo com a Tabela 19, proposta por Napier-Munn et. al. (1999).

	Malha (mm)	F <sub>80</sub> (μm)	P <sub>80</sub> (µm)	BBMWi (kWh/t)	BRMWi (kWh/t)
Wi de bolas	0,149	2.812	115	18,15	-
Wi de barras	1,18	9.064	1.084	_	13,00

Tabela 18 – Wi de Bond em moinho de bolas e de barras para a alimentação do circuito

Tabela 19 – Classificação qualitativa de Wi						
Intervalo		Classifiasaão				
Menor	Maior	Classificação				
7	9	Baixa				
9	14	Média				
14	20	Alta				
> 20		Muito alta				

Foram conduzidos os ensaios de Wi de bolas com o produto dos ensaios 2, 3 e 13 para verificar a redução deste índice após o processo de cominuição da PR.

Ensaio	Condição operacional	Malha (mm)	F <sub>80</sub> (μm)	Ρ <sub>80</sub> (μm)	BBMWi (kWh/t)
2	Recirculação da borda	0,149	1.853	122	16,45
3	Fechado com peneira (3,35 mm)	0,149	1.658	121	17,95
13	Fechado com peneira (2,36 mm)	0,149	1.022	122	20,18

Tabela 20 – Wi de Bond em moinho de bolas para o produto dos ensaios 2, 3 e 13

Para efeito de comparação, o Wi de bolas do produto dos ensaios 2 e 3 mostraram--se mais baixos (16,45 e 17,95 kWh/t) em comparação com o da alimentação do circuito (18,15 kWh/t).

Entretanto, para que essa comparação seja válida, seria importante que as condições dos ensaios ( $F_{80}$ ,  $P_{80}$  e abertura da malha) fossem as mesmas. Enquanto a malha manteve-se constante e os  $P_{80}$  ficaram bem próximos, os  $F_{80}$  dos produtos dos circuitos variaram, sendo seus valores mais baixos (1.853, 1.658 e 1.022 µm) em comparação ao da alimentação do circuito (2.812 µm).

Dessa forma, o Wi mais elevado do produto do ensaio 13 é consequência dessa variação nas condições do ensaio. Este comportamento é coerente com o apresentado na sessão 3.1.2 (Equação 1), onde o consumo de energia é inversamente proporcional ao tamanho da partícula.

### 5.2 Ensaios na prensa de rolos

Os resultados de 90 ensaios individuais foram usados para investigar as relações entre as variáveis de processo e o desempenho da PR, principalmente a capacidade específica, o consumo específico de potência, a abertura operacional e a distribuição granulométrica do produto. Esses índices foram agrupados de acordo com o tipo de circuito (aberto ou fechado) e a pressão inicial (alta, média e baixa).

O consumo energético foi avaliado em termos de vazão, bem como por quantidade de material gerada menor que 2,0, 1,0 e 0,3 mm.

#### 5.2.1 Análise do balanço de massas

O balanço de massa foi realizado com os dados provenientes da amostragem de cada ciclo de cada ensaio. Os resultados estão apresentados nas Figuras 65, 66 e 67.



Figura 65 – Carga circulante e P<sub>50</sub> do produto do circuito para os ensaios de alta pressão



Figura 66 – Carga circulante e P<sub>50</sub> do produto do circuito para os ensaios de média pressão



Figura 67 – Carga circulante e P<sub>50</sub> do produto do circuito para os ensaios de baixa pressão

A partir desses resultados, é possível assumir que, para a maioria dos ensaios, após o terceiro ciclo, o circuito atinge o estado de regime, sendo os dados analisados, neste trabalho, uma média dos valores do terceiro, quarto e quinto ciclos.

Os resultados do ensaio 6 mostraram-se inconsistentes devido à maior presença de finos na alimentação da PR no segundo ciclo do que no quinto. Essa diferença pode ser consequência da variação da alimentação nova. Porém, como a distribuição dessa amostra foi feita apenas no primeiro ciclo, não há dados para comprová-la.

Ao comparar o ensaio 2 com o 7 (repetições do ensaio com retorno da borda – Figura 100), foi encontrada uma diferença na quantidade inconsistente de finos no produto do centro dos rolos no ensaio 7 (detalhes na sessão 5.2.3.2). Esse resultado pode ser consequência da amostragem desse fluxo. Para efeito de comparação, foram utilizados os dados do ensaio 2, representando o ensaio com retorno da borda.

A Tabela 21 resume os resultados do balanço de massas de cada ensaio. A distribuição granulométrica de cada fluxo de cada ensaio válido é apresentada nas Figuras de 68 a 81.

Ensaio	Configuração	Eficiência de classificação	ncia de Carga icação circulante		Alimentação (t/h)		Produto (t/h)	
	do circuito	(%)	(%)	Nova	PR	(t/h)	PR	Circuito
Alta press	são							
	Aberto	_	-	5,6	5,6	-	5,6	5,6
8	Recirculação do produto E75%**	70,3	41,8	4,2	6,0	1,8	6,0	4,2
3	Fechado E100%, (3,35 mm)	82,7	51,0	3,6	5,5	1,8	5,5	3,6
2	Recirculação da borda**	62,9	81,0	3,6	6,5	2,9	6,5	3,6
5	Fechado E75%, (3,35 mm)	63,3	95,9	3,1	6,2	3,0	6,2	3,1
1 e 4*	Recirculação do produto E50%**	50,1	100,3	3,1	6,2	3,1	6,2	3,1
Média pre	essão							
	Aberto	_	-	4,6	4,6	_	4,6	4,6
26	Fechado E100%, (3,35 mm)	98,1	32,4	3,2	4,3	1,1	4,3	3,2
13	Fechado E100%, (2,36 mm)	97,2	43,8	2,8	4,1	1,2	4,1	2,8
9-10*	Recirculação do produto E75%**	68,8	45,5	4,2	6,2	1,9	6,2	4,2
11 e 12*	Fechado E100%, (3,35 mm)	79,1	56,8	2,7	4,2	1,5	4,2	2,7
19 e 20*	Recirculação da borda**	63,9	79,1	2,6	4,7	2,1	4,7	2,6
Baixa pre	ssão							
	Aberto	_	-	4,6	4,6	-	4,6	4,6
24	Recirculação do produto 25%**	75,7	32,1	3,7	4,9	1,2	4,9	3,7
25	Recirculação da borda	65,6	74,9	2,8	4,8	2,1	4,8	2,8

Tabela 21 – Resumo dos resultados dos balanços de massas

\*: Média das repetições

\*\*: Eficiência da classificação calculada em 3,35 mm



Figura 68 – Distribuição granulométrica do ensaio 1 – Recirculação do produto E50%



Figura 69 – Distribuição granulométrica do ensaio 2 – Recirculação da borda



Figura 70 – Distribuição granulométrica do ensaio 3 – Fechado em 3,35 mm, E100%



Figura 71 – Distribuição granulométrica do ensaio 4 – Recirculação do produto, E50%



Figura 72 – Distribuição granulométrica do ensaio 5 – Fechado em 3,35 mm, E75%



Figura 73 – Distribuição granulométrica do ensaio 8 – Recirculação do produto, E75%


Figura 74 – Distribuição granulométrica do ensaio 9 – Recirculação do produto, E75%



Figura 75 – Distribuição granulométrica do ensaio 11 – Fechado em 3,35 mm, E100%



Figura 76 – Distribuição granulométrica do ensaio 12 – Fechado em 3,35 mm, E100%



Figura 77 – Distribuição granulométrica do ensaio 13 – Fechado em 2,36 mm, E100%



Figura 78 – Distribuição granulométrica do ensaio 19 – Recirculação da borda



Figura 79 – Distribuição granulométrica do ensaio 24 – Recirculação do produto, E75%







Figura 81 – Distribuição granulométrica do ensaio 26 – Fechado em 3,35, E100%

#### 5.2.2 Ensaios em circuito aberto

Os resultados dos ensaios em circuito aberto foram obtidos a partir do primeiro ciclo de cada ensaio, portanto, antes do peneiramento ou da divisão dos fluxos. As distribuições granulométricas médias, tanto dos produtos quanto das alimentações, correspondentes às médias dos ensaios de alta, média e baixa pressão, são ilustradas na Figura 82. As condições operacionais e os resultados médios obtidos são apresentados na Tabela 22.



Figura 82 – Média das distribuições granulométricas dos produtos e das alimentações dos ensaios em circuito aberto para alta, média e baixa pressão

Ensaio	Configuração do circuito	Força específica	Capacidade específica	Potência específica	Abertura operacional	Espessura do floco	Densidade do floco	P <sub>80</sub>	P <sub>50</sub>	Relação de redução
		N/mm <sup>2</sup>	ts/hm <sup>3</sup>	kWh/t	mm	Mm	t/m <sup>3</sup>	Mm	mm	(F <sub>50</sub> /P <sub>50</sub> )
1	Recirculação do produto 50%	5,5	277	2,53	6,1	11,7	2,0	3,64	1,14	4,5
2	Recirculação da borda	5,2	268	2,47	5,9	10,9	2,0	3,66	1,12	4,9
3	Fechado E 100 (3,35 mm)	5,2	272	2,58	6,1	12,1	2,0	3,37	1,13	4,3
4	Recirculação do produto 50%	5,3	275	2,60	5,8	13,2	1,8	3,63	1,05	5,3
5	Fechado E 75 (3,35 mm)	5,3	265	2,53	5,9	12,2	1,7	3,78	1,07	4,5
8	Recirculação do produto 25%	5,7	281	2,69	5,8	11,0	1,9	3,81	1,11	5,1
Média p	ara os ensaios de alta pressão	5,4 ± 0,2	273 ± 5	2,48 ± 0,1	5,9 ± 0,1	11,8 ± 0,8	1,9 ± 0,1	3,6 ± 0,1	1,1 ± 0	4,8 ± 0,4
9**	Recirculação do produto 25%	3,8	292	1,94	6,4	11,2	1,7	4,14	1,31	4,2
10**	Recirculação do produto 25%	3,8	284	1,98	6,5	12,5	1,9	3,80	1,19	3,8
11	Fechado E 100 (3,35 mm)	3,8	297	1,81	5,5	11,1	2,5	4,00	1,27	4,4
12	Fechado E 100 (3,35 mm)	3,8	302	1,79	5,7	11,4	2,2	3,49	1,20	4,1
13	Fechado E 100 (2,36 mm)	3,8	281	1,85	5,1	10,8	2,8	3,81	1,20	4,8
19	Recirculação da borda	3,7	266	1,98	5,1	10,8	1,8	4,01	1,25	5,0
20	Recirculação da borda	3,7	267	2,02	4,8	11,8	1,9	4,18	1,27	4,9
26	Fechado E 100 (3,35 mm)	3,7	276	1,98	5,2	11,4	1,7	4,14	1,31	4,8
Média para os ensaios de média pressão		3,7 ± 0,1	282 ± 12	1,90 ± 0,1	5,5 ± 0,6	11,2 ± 0,5	2,1 ± 0,4	3,9 ± 0,2	1,2 ± 0,0	4,7 ± 0,4
24	Recirculação do produto 25%	2,2	284	1,38	5,4	13,1	2,1	4,52	1,69	3,4
25	Recirculação da borda	2,2	284	1,35	5,4	12,0	2,5	4,63	1,56	3,4
Média p	ara os ensaios de baixa pressão	2,2 ± 0,0	284 ± 0,0	1,36 ± 0	5,4 ± 0,0	12,6 ± 0,6	2,3 ± 0,2	4,6 ± 0,1	1,6 ± 0,1	$3,4 \pm 0,0$

Tabela 22 – Resumo dos resultados dos ensaios em circuito aberto

A partir dos resultados operacionais próximos para cada grupo (Tabela 22 e 23) e da similaridade entre as distribuições granulométrica da alimentação nova para todos os ensaios (Figura 82), pode-se validar que a operação da PR se manteve constante durante a campanha de ensaios e que a preparação da alimentação foi adequada.

Na Figura 82, é possível verificar que a distribuição granulométrica da alimentação do circuito (que é proveniente da pilha alongada), independente da pressão utilizada, manteve-se semelhante ao longo dos ensaios. Outro dado que está de acordo com a literatura é que quanto maior a pressão, mais fino o PR.

De acordo com as principais variáveis de processo apresentadas na Tabela 22 e com suas respectivas médias e desvios padrão, é possível verificar que os dados estão coerentes com a literatura e consistentes entre si (quanto maior a pressão, menor a capacidade específica, maior a potência específica e a relação de redução) e com pouca variabilidade dentro de cada grupo (pressão alta, média e baixa).

Variáve		Alta	Média	Baixa							
Variaver		Mín. / Méd. / Máx.	Mín. / Méd. / Máx.	Mín. / Méd. / Máx.							
Força específica (N/mm <sup>2</sup> )		5.2 / 5.4 / 5.7	3.7 / 3.8 / 3.8	2.2 / 2.2 / 2.2							
Capacidade específica (ts/hm <sup>3</sup> )		265/ 273/ 281	266 / 283 / 302	284 / 284 / 284							
Potência específica (kWh/t)		2.5 / 2.6 / 2.7	1.8 / 1.9 / 2.0	1.3 / 1.4 / 1.4							
Espessura do floco (mm)		10.9 / 11.9 / 13.2	10.8 / 11.4 / 12.5	12 / 12.6 / 13.1							
Relação de re (F <sub>50</sub> /P <sub>50</sub> )	dução	4.3 / 4.8 / 5.3	3.8 / 4.5 / 5.0	3.4 / 3.4 / 3.4							
	2,0	37.7 / 40.6 / 43.1	34.7 / 38.9 / 43.0	31.2 / 32.2 / 33.1							
% Passante	1,0	30.5 / 32.9 / 35.0	27.3 / 30.4 / 33.1	24.2 / 24.3 / 24.3							
	0,3	17.0 / 18.4 / 19.2	15.1 / 16.7 / 18.1	11.8 / 12.3 / 12.7							

Tabela 23 – Faixa de variação dos resultados dos ensaios em circuito aberto

Como alguns ensaios foram conduzidos com a velocidade de rotação dos rolos em 29 rpm e outros com 23 rpm, o efeito dessa variável no consumo de potência e na capacidade foi avaliada e quantificada, principalmente nos ensaios 9 e 10, para realizar a média dos ensaios de média pressão.

A Figura 83 apresenta a relação entre a potência registrada nos motores e o produto entre a velocidade dos rolos e a pressão de operação. Esse produto foi adotado para normalizar as diferentes condições dos ensaios. Dessa forma, foi encontrada uma relação linear, que possibilitou estimar a potência consumida nos ensaios 9 e 10, cujos valores estimados foram, respectivamente, 9,01 e 9,03 kW.



5.2.2.1 Capacidade específica em função da pressão

No total, foram utilizados 16ensaios em circuito aberto para investigar a influência da pressão na capacidade específica (Figura 84 e Figura 85). Na primeira figura, todos os dados foram lançados, enquanto, na segunda, a relação foi obtida entre os valores médios dos grupos. A Figura 84 apresenta os resultados dos 15 ensaios.



Figura 84 – Variação da capacidade específica em decorrência da pressão de operação



Figura 85 – Variação da capacidade específica média em decorrência da pressão de operação

Conforme apresentado na Figura 85, com o aumento da pressão, a capacidade específica média é reduzida. Esse comportamento, que está de acordo com a literatura, é consequência da redução da abertura operacional do equipamento. Neste caso, entretanto, a magnitute do decrescimento é pequena, com média de 273, 282 e 284 ts/hm<sup>3</sup>, para as respectivas pressões de 5,4, 3,7 e 2,2 N/mm<sup>2</sup>.

A Figura 86 e a Figura 87 apresentam, respectivamente, a variação de consumo específico de potência em função da pressão aplicada.



Figura 86 – Variação da potência específica (kWs/m<sup>3</sup>) em decorrência da pressão de operação



Com o aumento da pressão de operação, eleva-se a potência específica. Essa é uma tendência típica, pois maiores pressões de operação demandam aumento de potência nos motores.

## 5.2.2.3 Propriedades do produto em função da pressão

A relação entre a relação de redução (RR), definida pelo quociente entre o tamanho que passa 50% da alimentação pelo tamanho que passa 50% do produto, e a pressão operacional é apresentada na Figura 88.



Figura 88 – Variação da relação de redução em decorrência da pressão de operação

É possível observar na Figura 88 que há aumento da relação de redução até um ponto de saturação, acima do qual a elevação da pressão não resulta na redução significativa do produto. O mesmo comportamento pode ser observado em relação a  $P_{50}$  e  $P_{80}$  do produto. Ambos os valores são reduzidos com o aumento da pressão, embora o efeito seja mais acentuado para o  $P_{80}$ , conforme mostra a Figura 89.



Figura 89 – Variação do P<sub>50</sub> e do P<sub>80</sub> em decorrência da pressão de operação

Como apresentado na revisão bibliográfica (sessão 3.2.4.1 e 3.2.5.4), quanto maior a pressão, menor a abertura operacional e, consequentemente, maior a densidade do floco. Entretanto, esse comportamento não é observado na Figura 90 e nem na 91. Adicionalmente, a abertura operacional deve ser similar à espessura do floco. Porém, nessa campanha de ensaios, os valores não foram semelhantes, uma vez que se identificou um erro de calibração do sensor de abertura, o qual foi sanado após os ensaios.



Figura 90 – Variação da abertura operacional em decorrência da pressão de operação



Figura 91 – Variação da densidade do floco em decorrência da pressão de operação

# 5.2.3 Ensaios em circuito fechado

Em regime, a distribuição granulométrica da alimentação da PR em circuito fechado é diferente do circuito aberto, pois há carga circulante do circuito. Isso resultou em diferentes capacidades específicas, consumos de potência e distribuições granulométricas dos produtos. Para investigar esses efeitos, uma série de ensaios foi realizada para verificar o desempenho do equipamento em circuito fechado com peneiramento e/ou recirculação parcial do produto.

## 5.2.3.1 Circuito fechado com peneiramento

No total, foram realizados cinco ensaios em circuito fechado, sendo quatro com abertura da tela de 3,35 mm e um com 2,36 mm. A eficiência de peneiramento foi calculada pela Equação 23, apresentada anteriormente.

A Tabela 24 resume as condições praticadas e os resultados obtidos para os ensaios em circuito fechado.

				Alta press	ão		Média					
					Fechado			Fechado				
			Aberto	E83% (Ensaio 3)	E63% (Ensaio 5)	Aberto	E79% (Ensaio 11)	E98% (Ensaio 26)	E97% (Ensaio 13			
Abertura da tela mm				3,35	3,35		3,35	3,35	2,36			
Capacidade		t/h	5,6	3,6	3,1	4,6	2,7	3,2	2,8			
Eficiência de peneira	mento	%	n/a	82,7	63,3	n/a	79,1	98,1	97,2			
Carga circulante %			n/a	51,0	95,9	n/a	56,8	32,4	43,8			
Pressão de operação N/mm <sup>2</sup>			5,4	5,3	5,5	3,7	3,8	3,8	3,9			
Densidade aparente da alimentação da PR			1,8	2,1	1,8	1,8	1,9	2,0	1,8			
Capacidade específica ts/m³			273	177	154	282	164	200	175			
Potência específica		kWh/t	2,6	3,7	4,4	1,9	3,0	2,6	3,0			
Abertura operacional		mm	5,9	5,7	6,2	5,2	4,8	4,5	4,9			
F <sub>50</sub>		mm	5,3	5,1	5,3	5,7	6,0	5,6	6,2			
P <sub>50</sub> mm		mm	1,1	0,5	0,4	1,2	0,5	0,7	0,6			
Relação de redução (F <sub>50</sub> /P <sub>50</sub> ) -			4,8	9,3	12,2	4,7	11,8	8,0	10,6			
	-2,0 mm	I	2,3	2,6	2,2	1,8	1,9	1,9	1,9			
Produção líquida (t/h)	-1,0 mm	I	1,8	1,9	1,7	1,4	1,4	1,4	1,4			
()	-0.3 mm		1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7			

Tabela 24 – Resumo dos resultados dos ensaios em circuito fechado com peneira

A carga circulante variou entre 32,4 e 95,9%, de acordo com a eficiência de peneiramento e da abertura da tela. Assim, a notação E83% corresponde à eficiência de 83% no peneiramento. A capacidade específica e o consumo específico de potência foram afetados de forma significativa quando a PR operou em circuito fechado em comparação à operação em circuito aberto.

No caso dos ensaios de circuito fechado com peneiramento, a alimentação efetiva da PR é composta pelo *oversize* da peneira e pela alimentação nova do circuito. Como consequência, esse fluxo apresentou um P<sub>80</sub> menor em relação à alimentação do circuito aberto (de 10,2 mm no circuito aberto para 8,4 e 7,7 mm nos circuitos fechados com diferentes eficiências de peneiramento), conforme mostrado na Figura 92 para os ensaios de alta pressão. A Figura 93 mostra o mesmo comportamento para os ensaios de média pressão, onde o P<sub>80</sub> da alimentação do circuito aberto foi de 11,7 mm e para os ensaios com circuito fechado este valor reduziu entre 9,3 e 10,0 mm. As consequências desses efeitos foram a redução da capacidade específica e o maior consumo específico de potência. Como se observa na Tabela 24, o ensaio de alta pressão em circuito aberto resultou numa capacidade específica de 273 ts/m³h, ao passo que, para os ensaios com circuito fechado, esse valor foi reduzido para 177 e 154 ts/m³h, dependendo da eficiência de peneiramento. A

redução na capacidade afetou o consumo energético específico do circuito, o qual aumentou de 2,6 para 3,7 e 4,4 kWh/t, de acordo com a eficiência de peneiramento. Entretanto, a distribuição granulométrica do produto ficou significativamente mais fina, como comprovado pelo  $P_{50}$  que reduziu de 1,1 mm no circuito aberto para aproximadamente 0,5 mm no circuito fechado.

A mesma comparação é válida para os ensaios de média pressão, ou seja, a capacidade específica era 282 ts/m<sup>3</sup>h para o ensaio de circuito aberto e ao modificar a configuração para fechado, esse valor foi reduzido para 200, 175 e 164 ts/m<sup>3</sup>h, dependendo da eficiência de peneiramento. Novamente, a redução na capacidade afetou o consumo energético específico do circuito, o qual aumentou de 1,9 para 2,6 e 3,0 kWh/t. A distribuição granulométrica do produto ficou significativamente mais fina, como comprovado pelo  $P_{50}$  que reduziu de 1,2 mm no circuito aberto para uma média de 0,6 mm no circuito fechado.



Figura 92 – Distribuição granulométrica da alimentação da PR em razão da eficiência de peneiramento – Ensaios de alta pressão



Figura 93 – Distribuição granulométrica da alimentação da PR em razão da eficiência de peneiramento – Ensaios de média pressão

A distribuição granulométrica das alimentações e dos produtos dos ensaios é apresentada nas Figura 94 e 95.



Figura 94 – Distribuição granulométrica das alimentações e dos produtos para diferentes eficiências de peneiramento – Ensaios de alta pressão

Como pode ser visto, as alimentações são similares, porém o produto do circuito aberto é mais grosseiro. Nesse caso, quanto menor a eficiência do peneiramento, mais fino é o produto do circuito.

A Figura 94 compara os resultados dos ensaios de alta pressão com a eficiência de peneiramento (calculada na abertura de 3,35 mm) de 82,7% (E83%) e de 63,3% (E63%). Embora as alimentações fossem parecidas, o ensaio com menor eficiência de peneiramento (E63%) apresentou maior quantidade de finos, uma vez que as partículas, cujos tamanhos eram próximos aos da abertura da tela, eram reportadas ao produto retido da peneira.

A Figura 95 apresenta a mesma comparação para os ensaios de média pressão de operação. Neste caso as curvas dos produtos não se cruzaram, pois a menor eficiência de peneiramento foi de 79% que é bem mais elevada que os 63% do ensaio de alta pressão.



Figura 95 – Distribuição granulométrica das alimentações e dos produtos para diferentes eficiências de peneiramento – Ensaios de média pressão

O efeito da abertura da tela da peneira é apresentado na Figura 96, a qual traz os resultados dos ensaios 13 e 26, ambos com eficiência de peneiramento alta (E97% e E98%) e média pressão. Como esperado, quanto menor a abertura da tela, mais fino o produto.



Figura 96 – Distribuição granulométrica das alimentações e dos produtos para diferentes eficiências de peneiramento e abertura de telas – Ensaios de média pressão

As Figura 97 e 98 apresentam o aumento relativo do consumo específico de potência e a elevação relativa da redução, respectivamente, para os ensaios de alta e média pressão, em comparação com o ensaio de circuito aberto, este último representado pelo símbolo E0%.

Em ambos os casos, o aumento relativo da relação de redução é maior que o do consumo específico de potência. Os ensaios com menor eficiência de classificação (E63% e E79%) apresentaram o maior consumo específico de potência em consequência da maior carga circulante e menor quantidade de produto final, apesar de apresentarem maior relação de redução.



Figura 97 – Mudança relativa no consumo específico de potência e na relação de redução em razão da eficiência de peneiramento – Ensaios de alta pressão



Figura 98 – Mudança relativa no consumo específico de potência e na relação de redução em razão da eficiência de peneiramento – Ensaios de média pressão

# 5.2.3.2 Circuito fechado com retorno parcial dos produtos

Nos ensaios com retorno parcial dos produtos, foram reciclados 100% do material das bordas e 25% ou 50% de todo o produto. A Tabela 25 resume os resultados dos ensaios em circuito fechado com retorno parcial dos produtos. Não há classificação "real" nesses ensaios, apenas a divisão dos produtos. A eficiência da classificação nesses casos foi calculada para a fração 3,35 mm.

			Alta	a pressão			Média press	são	Baixa pressão				
			Fechado					Fecl	hado	Fechado			
			Aberto	Recirculação do produto 50%	Recirculação do produto 25%	Recirculação da borda	Aberto	Recirculação do produto 25%	Recirculação da borda	Aberto	Recirculação do produto 25%	Recirculação da borda	
Ensaio			-	1-4	8	2	-	9-10	19-20		24	25	
Eficiência de peneiramento		%	n/a	50,2	70,3	62,9	n/a	68,8	63,9	n/a	75,7	65,6	
Carga circulante		%	n/a	100	42	81	n/a	46	79	n/a	32	75	
Pressão de operação		N/mm <sup>2</sup>	5,40	5,66	5,82	5,44	3,72	3,93	3,82	2,20	2,23	2,27	
Densidade aparente da alimentação da PR		t/m <sup>3</sup>	1,79	1,98	1,60	2,02	1,81	1,89	1,85	1,79	1,84	1,79	
Capacidade espec	ífica	ts/m³h	272	150	206	174	277	206	161	284	230	171	
Potência específica	а	kWh/t	2,5	4,6	3,4	4,0	2,0	2,7	3,2	1,4	1,7	2,2	
Abertura operacior	nal	mm	5,87	6,65	6,48	6,74	5,79	6,75	5,33	5,38	5,91	5,54	
F <sub>50</sub>		mm	5,44	5,52	5,56	5,31	5,61	5,16	6,02	5,56	5,60	5,25	
P <sub>50</sub>		mm	1,11	0,71	0,84	0,59	1,26	1,01	0,68	1,62	1,63	0,94	
Relação de redução (F <sub>50</sub> /P <sub>50</sub> )		_	4,91	7,75	6,63	9,01	4,46	5,13	8,89	3,42	3,43	5,56	
	-2,0 mm		2,36	1,58	1,98	2,02	38,9	1,74	1,48	1,48	1,21	1,21	
Produção líquida (t/h)	-1,0 mm		1,91	1,36	1,66	1,69	30,4	1,44	1,20	1,12	0,96	0,98	
(51)	-0,3 mm		1,05	0,83	1,00	1,02	16,7	0,84	0,69	0,57	0,51	0,53	

Tabela 25 – Resumo dos resultados dos ensaios em circuito fechado com retorno parcial dos produtos

Repetições de alguns ensaios foram conduzidas para garantir a reprodutibilidade, a qual não foi atingida apenas nos ensaios 6-8 e 2-7, como explicado anteriormente. Nas Figura 99, 100, 101, 102 e 103, são apresentadas as distribuições granulométricas para os ensaios em duplicata, os quais contemplam o 1-4, 2-7, 6-8, 9-10 e 19-20.

A Figura 99 apresenta a comparação entre as distribuições granulométricas dos fluxos do ensaio 1 e 4, nos quais havia apenas a recirculação do produto com 50% de eficiência.



Figura 99 – Comparação da distribuição granulométrica dos ensaios em duplicata de recirculação do produto E50% (ensaios 1 e 4)

Os dados resultados mostraram-se consistentes entre si, apesar de uma pequena variação na parte grosseira da alimentação nova. Como mostrado no item 5.2.1, o balanço de massa é apresentado como uma média de ambos os ensaios.

A Figura 100 apresenta a comparação entre as distribuições granulométricas dos fluxos do ensaio 2 e 7, nos quais havia apenas a recirculação do material da borda dos rolos.



Figura 100 – Comparação da distribuição granulométrica dos ensaios em duplicata de recirculação da borda (ensaios 2 e 7)

Como mostrado no item 5.2.1, o as distribuições granulométricas do ensaio 7 não foram consistentes entre si, uma vez que o produto do centro dos rolos apresentou uma baixa quantidade de finos (o que influenciou no produto global da prensa). Em comparação com a distribuição granulométrica da borda do ensaio 2, é possível comprovar a inconsistência na fração menor que 0,2 mm.

A Figura 101 apresenta a comparação entre as distribuições granulométricas dos fluxos do ensaio 6 e 8, nos quais havia apenas a recirculação do produto com 50% de eficiência.



Figura 101 – Comparação da distribuição granulométrica dos ensaios em duplicata de recirculação do produto E50% (ensaios 6 e 8)

Os dados resultados mostraram-se consistentes entre si. Como mostrado no item 5.2.1, o balanço de massa é uma média de ambos os ensaios.

A Figura 102 apresenta a comparação entre as distribuições granulométricas do fluxo dos ensaios 9 e 10, nos quais havia apenas a recirculação do produto com 75% de eficiência.



Figura 102 – Comparação da distribuição granulométrica dos ensaios em duplicata de recirculação do produto E75% (ensaios 9 e 10)

Os dados resultados mostraram-se consistentes entre si. Como mostrado no item 5.2.1, o balanço de massa é apresentado como uma média de ambos os ensaios.

A Figura 103 apresenta a comparação entre as distribuições granulométricas do fluxo dos ensaios 19 e 20, nos quais havia apenas a recirculação das bordas dos rolos.



Figura 103 – Comparação da distribuição granulométrica dos ensaios em duplicata de recirculação da borda (ensaios 19 e 20)

Os dados resultados mostraram-se consistentes entre si, apesar de uma pequena variação na parte grosseira da alimentação nova. Como exposto no item 5.2.1, o balanço de massa é uma média de ambos os ensaios.

# 5.2.3.3 Ensaios com recirculação do produto e da borda

A Figura 104 apresenta a relação entre o consumo específico de potência e a distribuição granulométrica do produto para os ensaios com retorno de 25% do produto final. A mesma abordagem é apresentada na Figura 105 para o ensaio com retorno da borda.



Figura 104 – Variação da distribuição granulométrica do produto dos ensaios de recirculação de produto em razão da potência específica aplicada



Figura 105 – Variação da distribuição granulométrica do produto dos ensaios de recirculação da borda em razão da potência específica aplicada

Como já apresentado, a granulometria do circuito é influenciada pelo nível de influência da potência específica aplicada. Para ambos os circuitos, quanto maior a potência específica aplicada, mais fina a distribuição granulométrica.

## 5.3 Efeito da configuração de circuito no desempenho da PR

Para avaliar o desempenho da PR em diferentes configurações de circuito, foram consideradas as respectivas capacidades de redução de tamanho das partículas e as condições operacionais. Desse modo, a relação de redução (RR50) foi calculada entre a alimentação e a descarga do equipamento.

Ao variar a configuração de circuito, a primeira consequência é a distribuição granulométrica do fluxo que alimenta a PR, apresentas na Figura 106 e na 107.



Figura 106 – Distribuição granulométrica da alimentação e do produto para os diferentes circuitos – Ensaios de alta pressão

Como pode ser observado na Figura 106, uma vasta gama de distribuições foi gerada, e a recirculação do produto final e da borda produziu as curvas mais finas. Nos ensaios com classificação, é possível comprovar o efeito da eficiência da classificação na alimentação da PR, uma vez que o ensaio com baixa eficiência há grande presença de finos, que deveriam ter sido reportados ao produto do circuito, retornando à PR. Fato este que não foi notado com a eficiência mais elevada, já que a alimentação da PR apresenta menor quantidade de partículas, menos de aproximadamente 3,0 mm. Essas condições impactaram na carga circulante dos circuitos e, consequentemente, nos índices para avaliá-los.



Figura 107 – Distribuição granulométrica da alimentação e do produto para os diferentes circuitos – Ensaios de média pressão

Para os ensaios conduzidos com média pressão, as distribuições granulométricas da alimentação da PR, apresentadas na Figura 107, são mais consistentes entre si, uma vez que a granulometria do ensaio com reciclagem da borda foi mais fina em comparação com o circuito aberto e os ensaios com circuito fechado apresentaram uma porção mais fina no início da distribuição (frações maiores) e uma quantidade menor de finos, devido à elevada eficiência.

Em relação aos produtos da PR para os diversos circuitos, é importante ressaltar que, independentemente da distribuição granulométrica de sua alimentação e da pressão utilizada, o P<sub>80</sub> esteve entre 3 e 4 mm para todos os ensaios e que a distribuição toda apresenta um envelope bem definido. Isso comprova que a PR absorve certas variações do circuito.

Não foi possível observar uma relação clara entre a relação de redução no equipamento e a pressão/potência específica utilizada, como demonstram as Figuras 108 e 109. De acordo com a literatura, quanto maiores forem a pressão e/ou a potência específica consumida, maior será a relação de redução.



Figura 108 – Relação de redução em razão da pressão de operação



Figura 109 – Relação de redução em razão do consumo específico de potência

A mesma abordagem foi utilizada para comparar o desempenho da PR inserida em diferentes circuitos. Nesse caso, observaram-se diferentes resultados em razão da eficiência da classificação. A Figura 110 apresenta as distribuições dos produtos em decorrência da configuração de circuito para os ensaios de alta pressão, enquanto a Figura 111 mostra os resultados dos ensaios sob média pressão de operação.



Figura 110 – Distribuição granulométrica do produto em razão do tipo de circuito – Ensaios de alta pressão



Figura 111 – Distribuição granulométrica do produto em decorrência do tipo de circuito – Ensaios de média pressão

Por meio das Figuras 112 e 113, as quais resumem o desempenho da PR em decorrência do circuito para os ensaios de alta e de média pressão, respectivamente, é possível confirmar que o desempenho da PR depende da configuração do circuito utilizada.



Figura 112 – Desempenho da PR em decorrência da configuração de circuito – Ensaios de alta pressão



Figura 113 – Desempenho da PR em decorrência da configuração de circuito – Ensaios de média pressão

Nota-se nas Figuras 112 e 113 o aumento da carga circulante com a redução da eficiência de classificação e, como consequência, ocorre a elevação no consumo específico de potência. A relação de redução para o circuito com retorno de uma porcentagem do produto é bem reduzida em comparação aos outros circuitos,

conforme apresentado na Figura 112. Enquanto para os circuitos com retorno de 25% e 50% do produto a relação de redução foi, respectivamente, 6,4 e 7,8, para os demais circuitos esta relação variou entre 9,0 e 12,2.

Uma hipótese para esse fenômeno é a existência de finos em quantidade relativamente alta na alimentação da PR, reduzindo a cominuição das partículas maiores. A potência específica aumenta com a redução da densidade aparente da alimentação, porém uma quantia excessiva de finos sugere certa redução na cinética do processo de compressão, resultando na baixa relação de redução e no alto consumo energético relativo. O circuito com retorno da borda apresentou características semelhantes, porém com efeito menos acentuado.

O consumo específico de potência para a geração líquida de material passante em 2,0, 1,0 e 0,3 mm é apresentado na Figura 114 e na Figura 115 para os ensaios de alta e média pressão, respectivamente. Para efeito de comparação, o ensaio de circuito aberto foi considerado como referência.



Figura 114 – Produção relativa líquida e consumo específico por tonelada de material gerado passante em 2,0, 1,0 e 0,3 mm – Ensaios de alta pressão



Figura 115 – Produção relativa líquida e consumo específico por tonelada de material gerado passante em 2,0, 1,0 e 0,3 mm – Ensaios de média pressão

Conforme se observa nas Figuras 114 e 115, a produção final líquida de produto ficou entre 5 e 10% à do ensaio em circuito aberto, independentemente da pressão. Entre os ensaios de alta pressão, apenas aquele com maior eficiência de peneiramento apresentou maior quantidade de produto líquido gerado (112% em relação ao circuito aberto para a fração abaixo de 2 mm) e menor consumo específico de potência (5,2 kWh/t em comparação com os 6,2 kWh/t consumido no circuito aberto para a fração abaixo de 2 mm). O ensaio com retorno da borda foi ligeiramente menos eficiente (menor que 10%), enquanto o ensaio com retorno do produto foi significativamente menos eficiente.

## 5.4 Investigação da relação entre energia aplicada e fragmentação

As análises conduzidas nos itens 5.2 e 5.3 compararam o desempenho da PR em função da configuração do circuito. Os índices de desempenhos do circuito (capacidade específica, relação de redução e potência específica) foram obtidos através de variáveis de processo como vazão mássica, P<sub>50</sub> das distribuições granulométricas dos fluxos e o consumo de energia.

Foi possível hierarquizar o desempenho em função de cada um desses índices. A Tabela 26 apresenta um resumo dos índices de desempenho para cada circuito.

				Alta p	ressão			Média pressão						
,		Fechado com Aberto peneira		do com eira	Recirculação do produto			Aberto	l co	<sup>-</sup> echad m pene	Recirculação do produto			
			E83%	E63%	E50%	E75%	Borda		E79%	E98%	E97%	E75%	Borda	
Ensaio		n/a	3	5	1-4	6-8	2	n/a	11-12	26	13	9-10	19-20	
Abertura da tela da peneira	mm	-	3,35	3,35	-	-	-		3,35	3,35	2,36	-	-	
Capacidade específica	ts/m³h	273	177	154	150	206	174	277	164	200	175	206	161	
Energia específica	kWh/t	2,6	3,7	4,4	4,6	3,4	4,0	2,0	3,0	2,6	3,0	2,7	3,2	
Relação de redução (F <sub>50</sub> /P <sub>50</sub> )	-	4,8	9,3	12,2	7,7	6,6	9,0	4,5	11,8	8,0	10,6	5,1	8,9	

Tabela 26 – Resumo dos índices de desempenho

De acordo com a Tabela 26, para os ensaios de alta pressão, o circuito que apresentou a maior capacidade específica (273 ts/m<sup>3</sup>h) foi o aberto e a menor foi o circuito com recirculação de 50% do produto (150 ts/m<sup>3</sup>h). Esse resultado é consequência direta da carga circulante do circuito. Enquanto no primeiro caso todo o material cominuído pela PR foi reportado ao produto do circuito, no segundo caso apenas metade da alimentação da PR se constituiu em produto do circuito. Para os ensaios de média pressão, o circuito aberto também foi o que apresentou maior capacidade específica, pelos mesmos motivos.

A segunda consequência da variação da carga circulante é o consumo de energia específica. O circuito que apresentou maior capacidade específica, também apresentou o menor consumo específico de energia. Isto é consequência do consumo de potência (mecânica e elétrica) semelhante a cada ciclo de cada ensaio, conforme apresentado no Apêndice E – Resultado dos ensaios na PR. Ou seja, essa variável foi semelhante para qualquer condição de operação. Logo, a afirmação contrária também é válida: onde o circuito que apresentou menor capacidade específica apresentou maior consumo específico de potência.

A relação de redução, por sua vez é influenciada por outras condições do circuito além da capacidade e da potência. Esse índice é fortemente influenciado pela

configuração testada e pela eficiência envolvida na etapa de classificação. Dessa forma, o circuito que apresentou maior relação de redução (para ensaios com alta pressão) foi o circuito fechado com peneira, cuja tela tinha 3,35 mm de abertura, com eficiência de peneiramento relativamente baixa (63%). Devido a essa baixa eficiência, apenas as partículas significativamente menores que a abertura da tela eram direcionadas ao produto do circuito. Como a alimentação dos circuitos foi considerada constante ao longo da campanha experimental, a relação de redução desse circuito foi elevada. Em contrapartida, o circuito aberto apresentou uma relação de redução muito baixa, uma vez que não apresenta a etapa de classificação.

Comportamento semelhante foi observado nos ensaios de média pressão, pois o circuito fechado com baixa eficiência de peneiramento apresentou alta relação de redução e o circuito aberto a mais baixa. A partir dos ensaios 11, 13 e 26, foi possível observar o impacto que a eficiência de classificação teve sobre a relação de redução. A comparação ente os ensaios 11 e 26 é direta, pois em ambos os ensaios foram utilizadas a mesma abertura da tela. O ensaio de maior eficiência de peneiramento apresentou uma relação de redução menor. A comparação entre os ensaios 11 e 13 mostra uma condição com aberturas diferentes de telas e, mesmo o ensaio 13 sendo conduzido com uma tela de abertura menor, em razão de sua alta eficiência de peneiramento, a relação de redução foi mais baixa que a do ensaio 11, este último realizado com uma tela mais aberta.

Portanto, dependendo do índice avaliado, uma configuração é mais vantajosa que a outra.

O ideal neste caso seria, portanto, selecionar um índice que envolvesse, simultaneamente, as três variáveis de processo (capacidade, consumo de potência e granulometria) para determinar o circuito mais energeticamente eficiente.

O Wi operacional, definido por Rowland (1998) como um indicador da eficiência energética da operação de moagem, cuja concepção baseia-se no rearranjo da Equação 21, pode ser aplicado para comparar os circuitos de forma relativa.

Entretanto, há três observações relacionadas ao uso do Wi operacional como um índice para comparar as configurações analisadas:

- O produto da PR não atende às condições de paralelismo entre as distribuições granulométrica da alimentação e do produto do circuito como, mostrado na Figura 118.
- A aplicação da PR, seja ela em escala industrial ou piloto, situa-se numa faixa de operação entre a moagem e a britagem, conforme apresentado na Figura 116 (Figura 4 modificada).
- Os mecanismos de fragmentação predominantes nos ensaios de Wi, sejam eles de barras ou de bolas, não são os mesmos que o observado no processo de cominuição na PR.



Figura 116 – Relação entre energia e tamanho da partícula na cominuição. Modificado de Hukki, 1961

Por esse motivo, o Wi operacional não é o índice mais adequado para realizar tal comparação, abrindo oportunidades para futuros estudos nesta área.

Portanto, as equações utilizadas na análise foram:

$$Wio = \frac{W_{exp}}{\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)}$$
Equação 22

Onde:

Wio Wi operacional (kWh/t)

W<sub>exp</sub> Energia específica experimental do circuito industrial (kWh/t)
- P Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto (µm)
- F Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação (µm)

A abordagem descrita foi aplicada para a configuração do circuito global, que considera a alimentação nova e o produto final do circuito fechado. Essa abordagem considera os pontos de amostragem em verde na Figura 117.



Figura 117 – Aplicação da Lei da cominuição para o circuito



Figura 118 – Tomada dos pontos na distribuição granulométrica para aplicação da lei da cominuição

#### 5.4.1 Análise do circuito

Os resultados dos Wi operacionais, calculado a partir da abordagem proposta por Rowland, são apresentados na Tabela 27. As Figuras 119 e 120 apresentam o Wi operacional de cada configuração em relação ao circuito aberto para os ensaios de alta e média pressão, respectivamente.

			Alta pressão						Média pressão				
		Aberto	Fechao pen	do com eira	Re d	ecirculaç o produ	:ão to	Aberto	l co	Fechado m pene	o eira	Recircu do pro	ulação oduto
			E83%	E63%	E50%	E75%	Borda		E79%	E98%	E97%	E75%	Borda
Ensaio		-	3	5	1-4	6-8	2	-	11-12	26	13	9-10	19-20
Wio	kWh/t	34,5	16,9	20,5	40,8	39,0	27,7	28,8	15,6	16,3	17,6	34,8	25,0

Tabela 27 – Resumo dos Wio operacionais para os circuitos



Figura 119 – Wio para a análise do circuito, alta pressão



Figura 120 – Wio para a análise do circuito, média pressão

A análise destes indicadores para a alimentação e para o produto do circuito é válida para verificar qual circuito é mais energeticamente eficiente, uma vez que as três variáveis de processos do circuito (capacidade, granulometria e potência) são correlacionadas.

#### 5.4.1.1 Alta pressão

Em relação aos ensaios conduzidos com alta pressão, o circuito fechado com alta eficiência de peneiramento (ensaio 3) apresentou maior eficiência energética em relação aos demais ensaios.

A configuração com recirculação da borda (ensaio 2) é um processo mais eficiente em relação ao circuito aberto, uma vez que o material presente na região de borda do rolo apresenta granulometria mais grosseira devido ao efeito de borda. Porém, em comparação aos circuitos fechados com peneira, essa configuração é menos eficiente.

A comparação entre o ensaio 3 e o 5 é válida, pois indica que uma eficiência de peneiramento mais baixa é prejudicial para a eficiência energética do circuito. Ou seja, a maior relação de redução no ensaio 5 não justifica, do ponto de vista de

eficiência energética, a redução na capacidade especificado circuito. Esse comportamento é coerente para o circuito de moagem de bolas, conforme apresentado por Jankovic e Valery (2013).

Para os ensaios de recirculação do produto, independentemente da porcentagem do produto que retornou à alimentação da PR, o Wi operacional indicou que estes circuitos não são energeticamente eficientes em comparação com os demais, incluindo o circuito aberto. Os índices de desempenho que contribuíram negativamente para essa configuração foi a relativa baixa capacidade específica no ensaio 1-4 e a relativa baixa relação de redução para o ensaio 6-8.

#### 5.4.1.2 Média pressão

Os resultados dos Wio sugeriram que, para as configurações com circuito fechado com peneira, o ensaio 26 apresenta menor eficiência energética em relação ao ensaio 11-12 e maior em relação ao 13.

O indicador do ensaio 26 ser maior do que ao do ensaio 11-12 é um comportamento contrário ao observado nos ensaios de alta pressão, onde quanto maior a eficiência de peneiramento, maior a eficiência energética do circuito. Nesse caso, a maior relação de redução obtida no ensaio 11-12 justificou, do ponto de vista de eficiência energética, a redução na capacidade específica do circuito.

A comparação entre o ensaio 26 e o 13 é válida, pois o circuito fechado com a abertura de 2,36 mm é menos eficiente do que o fechado com 3,35 mm. Há duas explicações para esta conclusão. A primeira é que o consumo de energia é inversamente proporcional ao tamanho da partícula, como apresentado na Equação 1 da sessão 3.1.2. Logo, para reduzir o tamanho da partícula abaixo de 2,36 mm será necessário maior consumo de energia em comparação com um produto menor que 3,35 mm. A segunda é que a PR não fornece a energia necessária para cominuir a partícula e, com o aumento relativo da carga circulante, o processo global se torna menos eficiente, ou seja, a PR não seria eficiente para cominuir abaixo de 2,36 mm.

Para os ensaios com recirculação de produto, quanto à configuração, seja com retorno de 25% de todo o produto, seja com recirculação da borda, foram observados os mesmos comportamentos que nos ensaios de alta pressão: menor eficiência energética com retorno de todo o produto em relação a todos os circuitos e o circuito com retorno da borda, é um processo mais eficiente em relação ao circuito aberto, porém se comparado aos circuitos fechados com peneira, essa configuração é menos eficiente.

#### 6 CONCLUSÕES

Uma prensa de rolos de alta pressão, em escala laboratorial, com rolo de 300 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, foi utilizada para avaliar diversas configurações de circuito, as quais incluíram: circuito aberto, circuito fechado com peneiramento (com diferentes eficiências de classificação e abertura de telas) e circuito fechado com recirculação de frações do produto (25 ou 50% de todo o produto e 100% da borda). Um total de 18 ensaios foi conduzido para analisar o desempenho da PR sob tais condições.

Contribuições deste estudo:

- Elaboração de um procedimento experimental para avaliar o desempenho da PR em diferentes configurações operacionais.
- Análise dos potenciais benefícios dos diferentes circuitos.
- Investigação dos efeitos da eficiência da classificação e da carga circulante no desempenho do circuito com PR.

Conclusões desta campanha experimental:

- O circuito aberto apresentou o menor consumo específico de energia (2,6 kWh/t), porém a redução granulométrica (relação de redução) foi a menor entre todos os circuitos ensaiados (4,8), apesar de resultar em vazão mássica (273 e 277 ts/m<sup>3</sup>h para os ensaios de alta e média pressão, respectivamente) relativamente mais alta.
- A operação em circuito fechado com peneiramento ou com retorno da borda aumentou de maneira significativa a relação de redução (com média de 9 para os ensaios de alta e média pressão).
- O circuito com recirculação de 50% de todo o produto apresentou o maior consumo específico de energia (4,6 kWh/t para o ensaio de alta pressão), assim como relação de redução (7,7) menor em relação à do circuito com recirculação da borda (9,0) devido à presença excessiva de finos na

alimentação da PR. Ao reciclar mais do que 25% do produto, a potência específica aumenta, significativamente, em relação ao circuito aberto.

- O circuito com recirculação da borda é menos eficiente que a operação em circuito aberto, principalmente em relação ao consumo específico de energia por tonelada de material gerado abaixo de 2,0 1,0 e 0,3 mm. Esse parâmetro foi entre 10 e 20% maior em relação ao circuito aberto, porém com considerável relação de redução. Essa configuração pode ser utilizada como alternativa ao circuito com peneiramento.
- Ao operar em circuito fechado com peneira com baixas eficiências de classificação (63% para o ensaio de alta pressão e 79% para o de média), os consumos específicos de energia foram um dos maiores entre as configurações (4,4 e 3,0 kWh/t para os ensaios de alta e média pressão, respectivamente), apesar de demonstrarem boas relações de redução (12,2 e 11,8 para os ensaios de alta e média pressão, respectivamente).

As análises conduzidas nos itens 5.2 e 5.3 compararam o desempenho da PR, quanto à configuração do circuito, a partir dos índices de desempenhos do equipamento e do circuito (capacidade específica, relação de redução e potência específica), que foram obtidos através das variáveis de processo como a vazão mássica, o P<sub>50</sub> das distribuições granulométricas dos fluxos e o consumo de potência. Porém, dependendo do índice avaliado, uma configuração é mais vantajosa que a outra.

Pretendeu-se, portanto, buscar um indicador que relacione as três variáveis de processo (capacidade, consumo de potência e granulometria) para determinar o circuito mais energeticamente eficiente.

O Wi operacional, definido por Rowland (1998) como um indicador da eficiência energética da operação de moagem, cuja concepção se baseia no rearranjo da Equação 21, pode ser aplicado para comparar os circuitos de forma relativa. Porém, há três observações para o uso desta abordagem: (1) o produto da PR não atende às condições de paralelismo entre as distribuições granulométrica da alimentação e do produto do circuito, (2) a aplicação da PR, seja ela em escala industrial ou piloto, situa-se numa faixa de operação entre a moagem e a britagem e (3) os mecanismos

de fragmentação predominantes nos ensaios de Wi, sejam eles de barras ou de bolas, não são os mesmos que o observado no processo de cominuição na PR.

Por esse motivo, o Wi operacional não é o índice mais adequado para realizar tal comparação. Logo, há oportunidades de futuros estudos nesta área.

Em relação aos ensaios conduzidos com alta pressão, o circuito fechado com alta eficiência de peneiramento (ensaio 3) apresentou maior eficiência energética em relação aos demais ensaios.

A configuração com recirculação da borda (ensaio 2) é um processo mais eficiente em relação ao circuito aberto. Porém, comparado aos circuitos fechados com peneira, essa configuração é menos eficiente.

A comparação entre o ensaio 3 e o 5 é válida, pois indica que uma eficiência de peneiramento mais baixa é prejudicial para a eficiência energética do circuito.

Para os ensaios de recirculação do produto, independentemente da porcentagem do produto que retornou à alimentação da PR, o Wi operacional indicou que esses circuitos não são energeticamente eficientes em comparação com os demais, incluindo o circuito aberto.

Em relação aos ensaios conduzidos com média pressão, os Wio sugeriram que, para as configurações com circuito fechado com peneira, o ensaio 26 apresenta menor eficiência energética em relação ao ensaio 11-12 e maior em relação ao 13.

O indicador do ensaio 26 ser maior do que ao do ensaio 11-12 é um comportamento contrário ao observado nos ensaios de alta pressão, onde quanto maior a eficiência de peneiramento, maior a eficiência energética do circuito. Nesse caso, a maior relação de redução obtida no ensaio 11-12 justificou, do ponto de vista de eficiência energética, a redução na capacidade específica do circuito.

A comparação entre o ensaio 26 e o 13 é válida, pois o circuito fechado com a abertura de 2,36 mm é menos eficiente do que o fechado com 3,35 mm. Há duas explicações para essa conclusão. A primeira é que o consumo de energia é inversamente proporcional ao tamanho da partícula, como apresentado na Equação 1 da sessão 3.1.2. Logo, para reduzir o tamanho da partícula abaixo de 2,36 mm,

será necessário maior consumo de energia em comparação com um produto menor que 3,35 mm. A segunda é que a PR não fornece a energia necessária para cominuir a partícula e, com o aumento relativo da carga circulante, o processo global se torna menos eficiente, ou seja, a PR não seria eficiente para cominuir abaixo de 2,36 mm.

Para os ensaios com recirculação de produto, quanto à configuração, seja com retorno de 25% de todo o produto, seja com recirculação da borda, foram observados os mesmos comportamentos dos ensaios de alta pressão: menor eficiência energética com retorno de todo o produto em relação a todos os circuitos e o circuito com retorno da borda é um processo mais eficiente em relação ao circuito aberto, porém, se comparado aos circuitos fechados com peneira, essa configuração é menos eficiente.

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS: NBR 11376: Moinho de bolas, determinação do índice de trabalho. Rio de Janeiro, 1990.

BANINI, G. A. An integrated description of rock breakage in comminution machines. 2000. 244 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – School of Engineering, University of Queensland, Brisbane, 2000.

BEARMAN, R. High pressure grinding rolls – characterising and defining process performance for engineers. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Advances in comminution**, Littleton: SME, 2006. p. 3-14.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher, 1987.

BIENIAWSKI, Z. T. Estimating the strength of rock materials. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 74, n. 8, p. 312-320, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. The point load test in geotechnical practice. **Eng. Geology**, v. 9, n. 1, p. 1-11, Sept. 1975.

BOND, F. C. Crushing and grinding calculations. Part I. **British Chemical Engineering**, v. 6, p. 378-385, 1961a.

BOND, F. C. Crushing and grinding calculations. Part II. **British Chemical Engineering**, v. 6, p. 543-548, 1961b.

FIGUEIRA, H. V.; PRETTI, L. A.; VALLE, L. R. M. Estudo de um método simplificado para determinação do "índice de trabalho" e sua aplicação à remoagem. Brasília: DNPM, 1985. (Série Tecnologia Mineral, n. 36).

BRIAN, K.; HERMAN, V.; WHALEN, D. A closer look at increasing HPGR efficiency via reductions in edge effect. 2015. Disponível em: <a href="http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/03/HRC-Edge-Effect-SME-2015-FINAL.pdf">http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/03/HRC-Edge-Effect-SME-2015-FINAL.pdf</a>>. Acesso em: 01 jun. 2005.

BROOK, N. The equivalent core diameter method of size and shape correction in pointload testing. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, v. 22, p. 61-70, 1985.

BROCH, E.; FRANKLIN J. A. The point load strength test. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci., v. 9, p. 669-697, 1972.

BURCHARDT, E. et al. HPGR's in minerals: what do existing operations tell us for the future? In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS GRINDING, SEMIAUTOGENOUS GRINDING AND HIGH PRESSURE GRINDING ROLL TECHNOLOGY, 24-28 September 2011, Vancouver, Canada. **SAG 2011**. Vancouver, 2011. p. 1-20. (Paper 108).

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Tratamento de minérios**: britagem, peneiramento e moagem. São Paulo: Editora Signus, 2006. v. 3.

DELBONI JÚNIOR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. Apostila do curso PMI 5004.

DUNDAR, H. et al. Effect of the recycling load on the high pressure grinding rolls' performance – A case study with the industrial unit during cement clinker grinding. In: MILL OPERATORS CONFERENCE 2009, 10<sup>TH.</sup>, Oct. 12-14 2009, Adelaide, Australia. **Proceedings**. Victoria: AusIMM, 2009. p. 161-166. (Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, v. 11)

FLAVEL, M. D. Control of crushing circuits will reduce capital and operating costs. **Min. Mag.**, v.138, p. 207-213, Mar. 1978.

FLSmidth A/S.HPGR – High Pressure Grinding Roll for the minerals industry.Midvale,UT.,2014.Disponívelem:<http://www.flsmidth.com/~/media/PDF%20Files/Grinding/FLSmidth\_HPGR\_brochur</td>e2014\_email.ashx>. Acesso em: 27 jun. 2015.

HERBST, J. A. et al. Detailed modeling of an HPGR/HRC for prediction of plant scale unit performance. In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS GRINDING, SEMIAUTOGENOUS GRINDING AND HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS TECHNOLOGY 24-28 September, 2011, Vancouver, Canada. **SAG 2011**: oral presentation. Vancouver: CIM, 2011. p. 1-20.

HERMAN, V.; KNORR, B.; WHALEN, D. HRC<sup>™</sup>: taking HPGR efficiency to the next level by reducing edge effect. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONFERENCE, 10<sup>th</sup>., 15-18 Oct. 2013, Santiago, Chile. **PROCEMIN 2013**. Santiago, GECAMIN, 2013. p. 195-202.

HUKKI, R. T. Proposal for a solomonic settlement between the theory of von Rittinger, Kick and Bond. **Transactions AIME**, v. 220, p. 403-408, 1961.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Commission on Testing Methods. Suggested method for determining point load strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., v. 22, p. 51-60, 1985.

ITO, W. T. **HRC™ – Metso HPGR**. Lima, Peru: ExpoConvial, 2015. Apresentação em Powerpoint.

JANKOVIC, A.; VALERY, W. Closed circuit ball mill – basics revisited. **Minerals Engineering**, v. 43-44, p. 148-153, 2013.

KHD HUMBOLDT WEDAG INTERNATIONAL AG. Weir Minerals Division. **First choice for HPGR technology and service**. Madison, WI., 2010. Disponível em: <a href="http://www.weirminerals.com/pdf/Weir%20Minerals%20-">http://www.weirminerals.com/pdf/Weir%20Minerals%20-</a>

%20KHD%20HPGR%20brochure.FINAL-LOW%20RES--082011.pdf>. Acesso em: 12 maio 2015.

KING, R. P. **Modeling and simulation or mineral processing systems**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.

KLYMOWSKY, R. et al. Selection and sizing of high pressure grinding rolls. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Advances in comminution**, Littleton: SME, 2006. p. 636-668.

KOPPERN. Specialists in High-Pressure Comminution. **High-pressure grinding**. [Hattingen, 2010]. Disponível em: <a href="http://imsengineering.co.za/wp-">http://imsengineering.co.za/wp-</a> content/uploads/2013/06/Koppern-HPGR-brochure2.pdf>. Acesso em: 12 de maio de 2015.

LUZ, A. B. et al. Tratamento de minérios. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

MENDES, V. et al. Study on improving the quality of pallet made from Vale hematite pallet feed. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH-TEMPERATURE METALLURGICAL PROCESSING, 2<sup>nd</sup>., 2011, San Diego, Calif. **TMS 2011**: 140<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition: collected proceedings. Warrendale, Pa.: Minerals, Metals and Materials Society, 2011. Em DVD.

METSO. **HRC™HPGR**: Agricultural limestone application. 2015. Disponível em: < <a href="http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/728D5434E1">http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/728D5434E1</a> 10DFB9C2257DCE002FF818/\$File/AggLime%20\_final.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2015.

METSO. New product and service announcements. In: METSO PRESS CONFERENCE: New Product and Service Announcements, 24 Sept. 2012. Disponível em: <http://www.metso.com/miningandconstruction/mm\_gen.nsf/WebWID/WTB-121003-

2256F-A0830/\$File/Sept242012\_Minexpo\_press\_Gaughenbaugh\_final.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2015.

MORLEY, C. High pressure grinding rolls: a technology review. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Advances in comminution**, Littleton: SME, 2006a. p. 15-39.

MORLEY, C. Flowsheets for HPGR. In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 2006, Vancouver, Canada. **Proceedings**. Vancouver: University of British Columbia, 2006b. v. IV, p. IV172-IV189.

MORLEY, C. 'HPGR-FAQ'. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 110, p. 107-115, Mar. 2010.

MORRELL, S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 6, p. 544-549, May 2009.

MORRELL, S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds inconventional crushers and high pressure grinding rolls. **Minerals Engineering**, v. 23, n. 2, p. 151-153, Jan. 2010.

MORRELL, S. The appropriateness of the transfer size in AG and SAG mill circuit design. In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS GRINDING, SEMIAUTOGENOUS GRINDING AND HIGH PRESSURE GRINDING ROLL TECHNOLOGY, 24-28 September 2011, Vancouver, Canada. **SAG 2011**: proceedings. Vancouver, 2011. p. 1-12. (Paper 153).

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral comminution circuits**: their operation and optimization. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre / University of Queensland, 1999, 413 p. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing).

NEUMANN, E. W. Some basics on high-pressure grinding rolls. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Advances in comminution**, Littleton: SME, 2006. p. 41-49.

READ J. R. L.; THORNTON P. N.; REGAN W. M. A rational approach to the point load test. In: AUSTRALIA-NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS, 3<sup>rd</sup>., May 12-16 1980, Wellington, N.Z. **Proceedings**. Wellington, N.Z.: Institution of Professional Engineers of New Zealand, 1980. p. 2/35-2/39. (Proceedings of Technical Groups, v. 6, n. 1, part 1).

ROSENQVIST, T. **Principles of extractive metallurgy**. Trondheim: Tapir Academic Press, 2004.

ROWLAND, C. A. Using the Bond Work index to measure operating efficiency. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 15, n. 4, p. 32-36, Nov. 1998.

SAMPAIO, J. A.; DELBONI JÚNIOR, H. Cominuição. In: FERNANDES, F. R. C. et al (Ed.). **Tendências tecnológicas Brasil 2015**: Geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Parte 2, cap. 2, p. 103-131.

SARAMAK, D.; KLEIV, R. A. The effect of feed moisture on the comminution efficiency of HPGR circuits. **Minerals Engineering**, v. 43-44, p. 105-106, Apr. 2013.

SCHÖNERT, K. A first survey of grinding with high-compression roller mills. International Journal of Mineral Processing, v. 22, p. 401-412,1988.

SCHÖNERT, K.; LUBJUHN, U. Angle of compression and throughput in highpressure grinding rolls. **Zement Kalk Gips**, v. 45, n. 12, p. 621-627, Dec. 1992.

SCHUMACHER, M.; THEISEN, W. **HEXADUR - A novel wear protection of highpressure roller presses for comminution**. Hattingen: Maschinenfabick KOPPERN 1997. n. 11.5.

SERGEANT, P. J. The high-compression roller mill – an overview. In: COLLOQUIUM, INTERACTIONS BETWEEN COMMINUTION AND DOWNSTREAM PROCESSING, 1995. Randburg: Mintek, 1995. p. 1-15.

SHI, F.; KOJOVIC, T. Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, p. 156-163, 2007

VAN DER MEER, F. P.; MAPHOSA, W. High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 112, n. 7, p. 637-647, 2012.

VOGEL, L.; PEUKERT, W. Determination of material properties relevant to grinding by practicable labscale milling tests. **International Journal of Mineral Processing**, v. 74, p. S329-S338, Dec. 2004. Suppl. 1.

VON MICHAELIS, H. V. Real and potential metallurgical benefits of HPGR in hard rock ore processing. In: RANDOL HPGR WORKSHOP, 22 August 2005, Perth, W. Australia. [Mini-presentation & panel discussion]. Perth: [s.ed.], 2005. p. 1-9.

VON MICHAELIS, H. V. How energy efficient is HPGR? In: WORLD GOLD CONFERENCE, 2009. [Papers]. Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. p. 1-12.

WILLS, B. A.; ATKINSON, K. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. **Minerals Engineering**, v. 6, n. 7, p. 697-706, July 1993.

WILLS, B. A.; NAPPIER-MUNN, T. J. **Wills' mineral processing technology**: an Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7<sup>th</sup>. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. 444 p.

### APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE PLT



Laboratory Sheet

#	Width (mm)	Length (mm)	Peak Load (kN)	Breakage Type	Broken Area	$D^2_{Equiv}$	$Is = (P/D_e^2)$	F=(D <sup>2</sup> Equiv/2500) <sup>0.225</sup>	Is <sub>50</sub> =F(P/D <sup>2</sup> <sub>Equiv</sub> )
1	41.25	61.34	9.06	2	1987.27	2530.28	0.0036	1.0027	3.59
2	32.15	58.33	14.48	2	1472.86	1875.31	0.0077	0.9374	7.24
3	45.05	78.19	14.54	2	2766.53	3522.46	0.0041	1.0802	4.46
4	49.34	62.34	15.42	2	2415.77	3075.86	0.0050	1.0477	5.25
5	42.67	71.07	12.84	2	2381.76	3032.56	0.0042	1.0444	4.42
6	55.82	57.16	13.99	2	2505.95	3190.67	0.0044	1.0564	4.63
7	31.77	49.18	11.37	2	1227.14	1562.45	0.0073	0.8996	6.55
8	43.45	74.72	17.08	2	2549.86	3246.58	0.0053	1.0606	5.58
9	55.61	78.14	13.42	2	3412.84	4345.37	0.0031	1.1325	3.50
10	44.98	72.22	7.65	2	2551.33	3248.46	0.0024	1.0607	2.50
11	40.45	51.96	11.32	2	1650.74	2101.78	0.0054	0.9617	5.18
12	42.41	66.92	16.99	2	2229.02	2838.08	0.0060	1.0289	6.16
13	29.51	61.22	14.03	2	1418.90	1806.60	0.0078	0.9295	7.22
14	58.50	77.16	12.10	2	3545.18	4513.86	0.0027	1.1422	3.06
15	52.08	74.08	14.48	2	3030.13	3858.09	0.0038	1.1025	4.14
16	45.22	48.69	13.53	2	1729.26	2201.76	0.0061	0.9718	5.97
17	41.20	55.83	8.15	2	1806.57	2300.20	0.0035	0.9814	3.48
18	40.94	78.71	17.56	2	2530.86	3222.39	0.0054	1.0588	5.77
19	47.05	55.10	19.61	2	2036.11	2592.46	0.0076	1.0082	7.63
20	41.98	64.22	7.96	2	2117.40	2695.96	0.0030	1.0171	3.00
Average	44.1	65.1	13.30		2235.1	2845.8	0.0049	1.0263	4.93
St.Dev	5.34	8.50	2.47		432.5	550.6	0.0014	0.0461	1.22

### APÊNDICE B - RESULTADO DO ENSAIO DE DWT

Client Holcin - Eco Efficiency Project Sample Source Sample Name Sample Identification

Size Distribut	ions	63.0 x 53	.0 mm	Mean Siev	ve Size		57.8			
Energy		0.40			0.25			0.10		
Original Sample Weight (g)	3262.64				3284.67			3271.41		
Size	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	
53.0	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	267.8	8.20	91.80	
37.5	0.0	0.00	100.00	110.4	3.37	96.63	976.5	29.90	61.90	
26.5	351.6	10.84	89.16	539.8	16.47	80.16	455.7	13.95	47.95	
19.0	528.8	16.29	72.87	624.2	19.04	61.12	537.3	16.45	31.50	
13.2	381.4	11.75	61.12	523.1	15.96	45.16	317.3	9.71	21.79	
9.50	480.3	14.80	46.32	367.8	11.22	33.93	168.2	5.15	16.64	
6.70	353.8	10.90	35.41	252.3	7.70	26.24	115.5	3.53	13.11	
4.75	259.2	7.99	27.43	178.2	5.44	20.80	95.0	2.91	10.20	
3.35	195.2	6.01	21.41	157.9	4.82	15.98	76.3	2.34	7.86	
2.36	119.9	3.69	17.72	98.4	3.00	12.98	48.1	1.47	6.39	
1.70	105.5	3.25	14.47	81.2	2.48	10.50	40.1	1.23	5.16	
1.18	101.1	3.11	11.35	80.2	2.45	8.05	39.2	1.20	3.96	
0.850	65.3	2.01	9.34	49.0	1.50	6.56	25.0	0.77	3.19	
0.600	67.0	2.07	7.28	50.2	1.53	5.03	24.0	0.73	2.46	
0.425	49.4	1.52	5.75	36.1	1.10	3.92	17.8	0.54	1.92	
Pan	186.8	5.75	0.00	128.6	3.92	0.00	62.6	1.92	0.00	
Total	3245.3	100.00		3277.4	100.00		3266.2	100.00		
t10	k	n	t10	k	n	t10	k	n	t10	
Calculations	16.77	0.90	31.79	31.16	0.77	23.77	83.83	0.78	11.77	

Size Distributions

45.0 x 37.5 mm

Mean Sieve Size

41.1

Energy	1.01				0.25		0.10			
Original Sample Weight (g)		1507.1			1509.65		1516.05			
Size	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	
37.5	0.0	0.00	100.00	66.6	4.42	95.58	299.4	19.82	80.18	
26.5	0.0	0.00	100.00	154.5	10.26	85.32	346.8	22.96	57.22	
19.0	5.9	0.39	99.61	143.2	9.51	75.81	413.1	27.35	29.86	
13.2	39.3	2.62	96.99	228.3	15.16	60.65	146.2	9.68	20.19	
9.5	122.0	8.12	88.87	277.0	18.39	42.25	91.8	6.08	14.11	
6.70	208.1	13.85	75.03	170.9	11.35	30.90	55.8	3.70	10.41	
4.75	242.0	16.10	58.93	108.7	7.22	23.69	39.1	2.59	7.83	
3.35	199.9	13.30	45.63	84.1	5.59	18.10	28.6	1.89	5.93	
2.36	111.8	7.44	38.19	51.8	3.44	14.66	18.7	1.24	4.69	
1.70	98.4	6.55	31.64	42.8	2.84	11.82	13.8	0.91	3.78	
1.18	91.7	6.10	25.54	39.9	2.65	9.17	13.5	0.90	2.88	
0.85	62.4	4.15	21.39	25.6	1.70	7.46	8.2	0.54	2.34	
0.600	65.1	4.33	17.06	26.3	1.75	5.71	8.1	0.53	1.81	
0.425	49.6	3.30	13.76	18.9	1.26	4.46	6.1	0.40	1.40	
0.300	41.2	2.74	11.02	15.8	1.05	3.41	5.1	0.34	1.07	
Pan	165.7	11.02	0.00	51.3	3.41	0.00	16.1	1.07	0.00	
Total	1502.9	100.00		1505.7	100.00		1510.4	100.00		
t10	k	n	t10	k	n	t10	k	n	t10	
Calculations	5.29	1.08	53.24	21.45	0.87	21.20	100.44	0.82	6.98	

#### Size Distributions

31.5 x 26.5 mm

Mean Sieve Size

28.9

Energy		2.51			1.00		0.25				
Original Sample Weight (g)		1159.84			1154.74			1159.13			
Size	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.		
26.5	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00		
19.0	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	109.8	9.49	90.51		
13.2	0.0	0.00	100.00	4.1	0.35	99.65	250.2	21.64	68.87		
9.5	1.3	0.11	99.89	22.2	1.93	97.72	193.3	16.71	52.16		
6.7	20.7	1.80	98.09	120.3	10.46	87.26	158.0	13.66	38.50		
4.75	117.1	10.17	87.92	175.9	15.28	71.98	134.8	11.65	26.85		
3.35	158.9	13.80	74.12	199.4	17.32	54.66	82.4	7.12	19.73		
2.36	118.0	10.25	63.88	107.8	9.37	45.30	44.4	3.84	15.89		
1.70	116.2	10.09	53.79	94.5	8.21	37.09	38.5	3.33	12.56		
1.18	104.7	9.09	44.70	87.9	7.64	29.45	34.8	3.01	9.55		
0.85	75.7	6.57	38.12	56.7	4.92	24.52	21.2	1.83	7.72		
0.60	76.4	6.63	31.49	58.7	5.10	19.42	22.2	1.92	5.80		
0.425	62.0	5.38	26.11	44.4	3.86	15.57	15.3	1.32	4.48		
0.300	55.6	4.83	21.29	38.7	3.37	12.20	12.5	1.08	3.40		
0.212	41.5	3.60	17.69	27.3	2.37	9.83	8.3	0.72	2.68		
Pan	203.7	17.69	0.00	113.1	9.83	0.00	31.0	2.68	0.00		
Total	1151.65	100.00		1150.82	100.00		1156.59	100.00			
t10	k	n	t10	k	n	t10	k	n	t10		

 Calculations
 2.31
 0.81
 69.86
 4.54
 0.77
 50.61
 30.89
 0.68
 18.02

Size Distributions

22.4 x 19.0 mm

Mean Sieve Size

20.6

Energy	2.50 1.00					0.25				
Original Sample Weight (g)		440.22			440.05		439.72			
Size	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	
19.0	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	
13.2	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	51.1	11.55	88.45	
9.5	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	106.3	24.04	64.41	
6.7	1.4	0.33	99.67	17.2	3.94	96.06	82.4	18.63	45.78	
4.8	8.1	1.85	97.82	48.7	11.16	84.90	65.7	14.84	30.94	
3.35	50.0	11.43	86.39	86.8	19.87	65.03	42.0	9.49	21.45	
2.36	51.7	11.80	74.59	59.8	13.70	51.32	20.6	4.65	16.81	
1.70	51.3	11.72	62.87	44.0	10.08	41.25	16.5	3.74	13.07	
1.18	51.7	11.80	51.07	41.9	9.59	31.65	15.1	3.41	9.66	
0.85	33.4	7.64	43.43	25.6	5.87	25.78	9.1	2.06	7.61	
0.60	35.7	8.15	35.28	24.9	5.71	20.07	8.6	1.94	5.67	
0.43	27.4	6.25	29.03	18.8	4.30	15.78	6.2	1.39	4.27	
0.300	24.3	5.54	23.49	15.9	3.64	12.13	4.9	1.11	3.16	
0.212	16.5	3.76	19.74	11.0	2.52	9.61	3.2	0.73	2.44	
0.150	24.7	5.63	14.11	13.0	2.97	6.64	3.7	0.83	1.61	
Pan	61.8	14.11	0.00	29.0	6.64	0.00	7.1	1.61	0.00	
Total	437.8	100.00		436.5	100.00		442.4	100.00		
							_			
t10	k	n	t10	k	n	t10	k	n	t10	
Calculations	1.72	0.99	69.87	3.37	0.92	47.05	18.07	0.83	15.17	

#### Size Distributions

16.0 x 13.2 mm

Mean Sieve Size

14.5

Energy		2.50			1.00			0.25	
Original Sample Weight (g)		144.56			144.56			144.33	
Size	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.	Weight Ret (g)	% Ret.	Cum. % Pass.
13.2	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	6.3	4.35	95.65
9.5	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	14.6	10.09	85.56
6.7	0.0	0.00	100.00	1.0	0.70	99.30	34.2	23.64	61.92
4.8	0.0	0.00	100.00	7.2	5.04	94.26	29.4	20.37	41.54
3.4	6.5	4.56	95.44	21.0	14.69	79.57	18.5	12.80	28.74
2.36	10.1	7.08	88.36	23.1	16.19	63.38	10.9	7.51	21.23
1.70	16.4	11.47	76.89	21.4	15.00	48.38	6.9	4.77	16.46
1.18	23.2	16.30	60.59	17.4	12.17	36.21	6.2	4.28	12.18
0.85	15.7	10.99	49.60	9.4	6.60	29.61	3.9	2.72	9.46
0.60	14.6	10.23	39.37	10.5	7.34	22.27	3.4	2.33	7.14
0.43	10.9	7.62	31.75	7.3	5.12	17.15	2.6	1.77	5.37
0.30	9.3	6.50	25.26	6.0	4.19	12.97	2.0	1.39	3.97
0.212	6.7	4.70	20.56	4.1	2.85	10.11	1.3	0.91	3.07
0.150	8.3	5.80	14.76	4.8	3.33	6.78	1.5	1.01	2.06
0.106	5.0	3.49	11.27	2.6	1.85	4.93	0.8	0.56	1.50
Pan	16.1	11.27	0.00	7.0	4.93	0.00	2.2	1.50	0.00
Total	142.5	100.00		142.6	100.00		144.5	100.00	
t10	k	n	t10	k	n	t10	k	n	t10
Calculations	1.25	1.24	70.06	2.51	1.06	42.89	11.66	0.89	14.48

1.24 70.06 Abrasion

55 x 37.5

Mean Sieve Size 45.4

Size	Weight Ret (g)	%Ret	Cum % Pass
37.5	2633	88	12
26.5	188	6	6
19	46	2	5
13.2	23	1	4
9.5	13	0	3
6.7	3	0	3
4.75	3	0	3.26
3.35	2	0	3.20
2.36	1	0	3
1.7	1	0	3
1.18	2	0	3
0.85	2	0	3
0.6	2	0	3
0.425	5	0	3
pan	84	3	0
Total	3007.8	100.0	

k	3E+27
n	0.06
ta	0.325

#### APÊNDICE C - RESULTADO DO ENSAIO DE CLP





### APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE WI

ill Work Index	[							
Holcim Feed Júlio Almeida Sorocaba 17/12/2013	1	Closing sieve: 16 [# Tyler] Closing sieve: 1.180 [mm] Initial Mass ( C ): 2162.50 [g] IPP (Ideal Potencial Product): 1081.25 [g] Material Density: 1.730 [t/m <sup>3</sup> ] % of passing product of the initial mass: 17.27 [%]						
heet								
Feed [g] S 373.61	Product [g] T = C - M 659 65	Product [g] U = T - S 286.04	Deviation [g] D = IPP - R -1 081 25	[g] M = R - T 1 502 85	Fresh Feed [g] R = T 2162 50	Moability [g/r] V = U/Q 9.535	Rotations [#] Q = (IPP - S)/V 30	
113.92 200.67 204.24 186.63	1161.93 1182.61 1080.67 1084.07	1048.01 981.94 876.43 897.44	421.60 -80.68 -101.36 0.58	1,000.57 979.89 1,081.83 1,078.43	659.65 1161.93 1182.61 1080.67	10.376 11.552 11.532 11.506	101 85 76 78	
			*Average	of the last th	ree moabilitv r	numbers (GE	3P) [a/rotation]	
(n-2) (n-1) (n)	11.552 11.532 11.506	[g/rotation] [g/rotation] [g/rotation]	, no. ugo		Moability	11.530	[g/rotation]	
oad	0400.50							
Fresh Feed	2162.50	[9]		Circ	culating Load	99.79	[%]	
ssing Product	1082.37	[9]		*4.0000000	of the least 0 a	r 2 avalaa p	opping product	
(n-1) (n)	1080.67 1084.07	[g] [g]		Pas	sing Product	1082.37	[g]	
Evaluation	0.004	[mark]						
P80	0.932	(mm) [mm]			WI	13.10 11.88	[kWh/t] [kWh/st]	
tion	Food	Draduat						
[mm] 12.7 9.52 6.35 4.76 3.36 2.38 1.68 1.19 0.84 0.59 0.42 0.30 0.21 0.15 0.10	cum. % pass. 100.0 82.8 62.3 46.2 32.5 26.4 21.4 17.3 14.6 12.0 10.2 8.3 6.9 5.8 4.8	cum. % pass. 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 72.7 52.7 40.9 30.1 22.9 17.9 12.6	100 90 80 70 60 50 40 30 20 0 10 0 0.1		1 size [mm]	10	Feed Product	
	II Work Index Holcim Feed Júlio Almeida Sorocaba 17/12/2013 heet Feed [g] S 373.61 113.92 200.67 204.24 186.63 (n-2) (n-1) (n) oad Fresh Feed ssing Product Juct (n-1) (n) (n) Evaluation Fao Pao tion Size [mm] 12.7 9.52 6.35 4.76 3.36 2.38 1.68 1.19 0.84 0.59 0.42 0.30 0.21 0.15 0.10 0.07	III Work Index           Holcim           Feed           Júlio Almeida           Sorocaba           17/12/2013           heet           Feed           Product           [g]           S           T = C - M           373.61           659.65           113.92           1161.93           200.67           1182.61           204.24           1080.67           186.63           1084.07           Image: Sign Product           (n-1)           11.506           oad           Fresh Feed           2162.50           ssing Product           1082.37           Juct           (n-1)           1080.67           (n)           1084.07           Size           Feed           [mm]           cum.% pass.           12.7           100.0           9.52           82.8           6.35           6.35           2.38           2.38      <	III Work Index         Holcim         Feed       Product         Júlio Almeida       Sorocaba         Sorocaba       [g]         III Mork Index       Product         Preed       Product         Product       Product         [g]       [g]         S       T = C - M         U = T - S       373.61         659.65       286.04         113.92       1161.93         1048.01       200.67         200.67       1182.61         981.94       204.24         1080.67       876.43         186.63       1084.07         897.44       897.44             (n-1)       11.552         [g/rotation]       (n-1)         (n-1)       1082.37         [g]       (n)         1080.67       [g]         ssing Product       1082.37         [m]       (n)         1080.67       [g]         (n)       1080.67         [m]       (n)         1080.67       [g]         (n)       1080.67         [m]       (n)         [m] <td>III Work Index       Holcim         Feed       IPP         Júlio Almeida       % of passing p         Sorocaba       % of passing p         17/12/2013       Implementation         heet       Feed       Product       Product       Deviation         [g]       [g]       [g]       [g]       [g]       [g]         s       T=C-M       U=T-S       D=IPP-R       373.61       659.65       286.04       -1,081.25         200.67       1182.61       981.94       -80.68       204.24       1080.67       876.43       -101.36         200.67       11.552 [g/rotation]       (n-1)       11.532 [g/rotation]       .058       113.92         (n-1)       11.552 [g/rotation]       .058       113.92       1161.93       104.07         (n-1)       11.552 [g/rotation]       .058       113.92       1161.93       .01.93         (n-1)       1080.67 [g]      </td> <td>li Work Index Holcim Feed Júlio Almeida Sorocaba Júlio Almeida Sorocaba Júlio Almeida Sorocaba T = C-M S T = C-M S T = C-M U = T - S J = IPP - R M = R - T J = 10 S T = C-M U = T - S J = IPP - R M = R - T J = 10 D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 10 S T = C - M U = T - S D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 10 J = 10 S T = C - M U = T - S D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 1</td> <td>li Work Index Feed Fe</td> <td>lil Work Index Holcim Feed Holcim Feed Closing sieve: 1.80 Closing sieve: 1.80 IPP (Ideal Potencial Product): 1081.25 Material Density: 1.730 Sorocaba Soro</td>	III Work Index       Holcim         Feed       IPP         Júlio Almeida       % of passing p         Sorocaba       % of passing p         17/12/2013       Implementation         heet       Feed       Product       Product       Deviation         [g]       [g]       [g]       [g]       [g]       [g]         s       T=C-M       U=T-S       D=IPP-R       373.61       659.65       286.04       -1,081.25         200.67       1182.61       981.94       -80.68       204.24       1080.67       876.43       -101.36         200.67       11.552 [g/rotation]       (n-1)       11.532 [g/rotation]       .058       113.92         (n-1)       11.552 [g/rotation]       .058       113.92       1161.93       104.07         (n-1)       11.552 [g/rotation]       .058       113.92       1161.93       .01.93         (n-1)       1080.67 [g]	li Work Index Holcim Feed Júlio Almeida Sorocaba Júlio Almeida Sorocaba Júlio Almeida Sorocaba T = C-M S T = C-M S T = C-M U = T - S J = IPP - R M = R - T J = 10 S T = C-M U = T - S J = IPP - R M = R - T J = 10 D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 10 S T = C - M U = T - S D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 10 J = 10 S T = C - M U = T - S D = IPP - R M = R - T J = 10 J = 1	li Work Index Feed Fe	lil Work Index Holcim Feed Holcim Feed Closing sieve: 1.80 Closing sieve: 1.80 IPP (Ideal Potencial Product): 1081.25 Material Density: 1.730 Sorocaba Soro	

Bond Ball Mi	II Work Index							
Client: Sample: Contact: Origin: Executed By: Local:	HRC-Holcim Holcim Júlio Almeida Sorocaba		c	IPP % of passing p	C Initia Ideal Poten Mat product of the	Closing sieve: Closing sieve: al Mass ( C ): cial Product): erial Density: e initial mass:	100 0.149 1120.00 320.00 1.600 5.42	[# Tyler] [mm] [g] [g] [t/m <sup>3</sup> ] [%]
Date:	17/10/2012							
Laboratory S	heet							
Cycle [#]	Feed [g] S	Product [g] T = C - M	Product [g] U = T - S	Deviation [g] D = IPP - R	Retained [g] M = R - T	Fresh Feed [g] R = T	Moability [g/r] V = U/Q	Rotations [#] Q = (IPP - S)/V
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	60.80 8.46 17.82 19.78 18.08 17.42	156.02 328.75 364.87 333.55 321.47 320.18	95.22 320.29 347.05 313.77 303.39 302.76	-800.00 163.98 -8.75 -44.87 -13.55 -1.47	963.98 791.25 755.13 786.45 798.53 799.82	1,120.00 156.02 328.75 364.87 333.55 321.47	0.952 0.979 1.123 1.175 1.194 1.192	100 327 309 267 254 254
Moability				*Average	of the last th	ree moability	numbers (GE	3P) [a/rotation]
	(n-2) (n-1) (n)	1.175 1.194 1.192	[g/rotation] [g/rotation] [g/rotation]			Moability	1.187	[g/rotation]
Circulating L	oad							
_	Fresh Feed	1120.00	[g]		Cir	culating Load	249.10	[%]
Pas	sing Product	320.83	[g]					
Passing Prod	luct				*Average	of the last 2	or 3 cycles pa	assing product
	(n-1) (n)	321.47 320.18	[g]		Pas	sing Product	320.83	[g]
Work Index E	valuation							
	F <sub>80</sub> P <sub>80</sub>	2.812 0.115	[mm] [mm]			WI	18.15 16.46	[kWh/t] [kWh/st]
Size Distribut	tion	Food	Dreduct					
[ASTM] 6 8 12	[mm] 3.36 2.38 1.68	cum. % pass. 100.0 64.9 49.0	cum. % pass. 100.0 100.0 100.0	100 90 80 70	¢	/ • • • • •		
16 20 30 40 50 70 100 140 200	1.19 0.84 0.59 0.42 0.30 0.21 0.15 0.10 0.07	33.4 25.6 19.1 14.4 10.4 7.8 5.4 4.2 3.1	100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 70.9 48.2	50 50 40 30 20 10 0 0.01	0.1	0	Fe Pro- 1.00	ed oduct 10.00
						size [mm]		

Bond Ball Mil	II Work Index	C								
Client: Sample: Contact: Origin: Executed By: Local: Date:	HRC Eco Test 2 Brasil Bruno Pontes Sorocaba 19/12/2013	5	¢	IPP % of passing p	C Initia (Ideal Potend Mat product of the	Closing sieve: Closing sieve: al Mass ( C ): cial Product): erial Density: e initial mass:	100 0.149 1232.00 352.00 1.76 26.11	100 [# Tyler] 0.149 [mm] 1232.00 [g] 352.00 [g] 1.76 [t/m²] 26.11 [%]		
Laboratory S	heet									
Cycle [#]	Feed [g] S	Product [g] T = C - M	Product [g] U = T - S	Deviation [g] D = IPP - R	Retained [g] M = R - T	Fresh Feed [g] R = T	Moability [g/r] V = U/Q	Rotations [#] Q = (IPP - S)/V		
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	321.77 124.42 92.18 90.29 91.08 92.21	476.51 353.04 345.81 348.84 353.17 352.87	154.74 228.62 253.63 258.55 262.09 260.66	-880.00 -124.51 -1.04 6.19 3.16 -1.17	755.49 878.96 886.19 883.16 878.83 879.13	1232.00 476.51 353.04 345.81 348.84 353.17	1.547 1.555 1.519 1.503 1.506 1.507	100 147 167 172 174 173		
Moability				*Average	of the last th	ree moability r	numbers (GE	P) [a/rotation]		
	(n-2) (n-1) (n)	1.503 1.506 1.507	[g/rotation] [g/rotation] [g/rotation]			Moability	1.505	[g/rotation]		
Circulating L	Oad	4000.00	1-1							
Pas Passing Prod	sing Product	353.02	[9] [9]		*Average	culating Load	248.99 or 3 cycles pa	[%] assing product		
Work Index F	(n-1) (n)	353.17 352.87	[9] [9]		Pas	ssing Product	353.02	[9]		
work index E	valuation	4.050	[march]							
Size Distribut	P80 P80	0.122	[mm] [mm]			WI	16.45 14.93	[kWh/t] [kWh/st]		
Size Distribut	Sizo	Food	Product							
512e [ASTM] 6 8 12 16 20 30 40 50 70 100 140 200	512e [mm] 3.36 2.38 1.68 1.19 0.84 0.59 0.42 0.30 0.21 0.21 0.15 0.10 0.07	reed cum. % pass. 100.0 85.0 78.1 69.6 62.7 55.1 47.1 39.9 34.1 26.1 21.2 16.6	Product cum. % pass. 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 64.9 46.9	100 90 80 70 50 30 30 30 20 10 0 0.01	0.1			ed pduct		
						size [mm]				

Bond Ball Mi	II Work Index								
Client: Sample: Contact: Origin: Executed By: Local: Date:	H.R.C Eco Test 3 Brasil Bruno Pontes Sorocaba 17/12/2013 boot		Closing sieve: 100 [# Tyler] Closing sieve: 0.149 [mm] Initial Mass ( C ): 1246.00 [g] IPP (Ideal Potencial Product): 356.00 [g] Material Density: 1.78 [t/m³] % of passing product of the initial mass: 21.73 [%]						
Cycle	Food	Product	Product	Deviation	Retained	Eroch Food	Moability	Potations	
[#]	[9] S	[g] T = C - M	[g] U = T - S	[g] D = IPP - R	[g] M = R - T	[g] R = T	[g/r] V = U/Q	[#] Q = (IPP - S)/V	
1	270.79	403.40	132.61	-890.00	842.60	1246.00	1.326	100	
2	87.66	344.42	256.76	-47.40	901.58	403.40	1.2/1	202	
4	78.69	358.70	280.01	-6.14	887.30	362.14	1.315	213	
5	77.95	368.09	290.14	-2.70	877.91	358.70	1.369	212	
6	79.99	358.64	278.65	-12.09	887.36	368.09	1.379	202	
(	77.93	357.67	279.74	-2.64	888.33	358.64	1.385	202	
ğ									
10									
11									
12									
14									
Moability				*Average	of the last th	ree moability i	numbers (GE	BP) [g/rotation]	
	(n-2) (n-1) (n)	1.369 1.379 1.385	[g/rotation] [g/rotation] [g/rotation]			Moability	1.378	[g/rotation]	
Circulating L	oad	4046.00			0.0		0.47.00		
Pas	sing Product	358 16	[g] [g]		CIR	culating Load	247.89	[%]	
Passing Prod	luct	555.10	191		*Average	of the last 2 d	or 3 cycles pa	assing product	
_					Pas	ssing Product	358.16	[9]	
Work Index F	(n-1) (n)	358.64 357.67	(9) (9)						
WORK INDEX E	Foo	1 658	[mm]			M	17.05	ILW6/H	
	P <sub>80</sub>	0.121	[mm]			wi	16.28	[kWh/st]	
Size Distribut	tion								
Size	Size	Feed	Product	100 T		<b>0000</b>	<del>0 0 0 0 0</del>		
[ASTM]	[mm] ci 3.36	um. % pass. 100 0	cum. % pass. 100.0	90		/			
ĕ	2.38	91.2	100.0	80		/			
12	1.68	80.5	100.0	70					
16	1.19	68.8	100.0	S 60			A		
30	0.59	51.8	100.0	x 50	6				
40	0.42	43.0	100.0	E 40 .					
50	0.30	35.4	100.0	20				ed	
100	0.21	29.7	100.0	10				oduct	
140	0.10	17.2	66.0	0					
200	0.07	13.1	44.9	0.01	0.1	0 size [mm]	1.00	10.00	

Bond Ball Mi Client: Sample: Contact: Origin: Executed By: Local: Date:	II Work Index HRC Eco Test 13 Brasil Bruno Pontes Sorocaba 20/12/2013	5		IPP % of passing (	C Initia (Ideal Poten Mat product of the	Closing sieve: Closing sieve: al Mass ( C ): cial Product): erial Density: initial mass:	100 0.149 1197.00 342.00 1.71 25.32	[# Tyler] [mm] [g] [g] [t/m <sup>3</sup> ] [%]
Laboratory S	heet	Droduct	Droduct	Doviation	Potningd	Freeh Food	Moobility	Detetione
[#] 1 2 3 4 5	100 5 303.20 115.51 77.29 87.94 88.74	[g] T = C - M 456.19 305.25 347.31 350.46 344.85	[g] U = T - S 152.99 189.74 270.02 262.52 256.11	[g] D = IPP - R -855.00 -114.19 36.75 -5.31 -8.46	[9] M = R - T 740.81 891.75 849.69 846.54 852.15	[g] R = T 1197.00 456.19 305.25 347.31 350.46	[g/r] V = U/Q 1.530 1.282 1.311 1.353 1.370	[#] Q = (IPP - S)/V 100 148 206 194 187
6 7 8 9 10 11 12 13 14	87.32 86.65	342.21 341.96	254.89 255.31	-2.85 -0.21	854.79 855.04	344.85 342.21	1.370 1.373	186 186
Moability		4 070		*Average	of the last th	ree moability i	numbers (GE	3P) [g/rotation]
Circulations	(n-2) (n-1) (n)	1.370 1.370 1.373	[g/rotation] [g/rotation] [g/rotation]			Moability	1.3/1	[g/rotation]
Pas	Fresh Feed	1197.00 342.09	[g] [a]		Cire	culating Load	249.91	[%]
Passing Prod	luct		101		*Average	of the last 2 d	or 3 cycles pa	assing product
	(n-1) (n)	342.21 341.96	(g) (g)		Pas	sing Product	342.09	[9]
Work Index E	Evaluation	4 000						
Sizo Distribut	P <sub>80</sub>	0.122	[mm] [mm]			W	20.18 18.30	[kWh/t] [kWh/st]
Size	Size	Feed	Product	100				
[ASTM] 6 8 12 16 20 30 40 50 70 100 140	[mm] 3.36 2.38 1.68 1.19 0.84 0.59 0.42 0.30 0.21 0.21 0.15 0.10	cum. % pass. 100.0 99.4 97.8 84.8 74.2 63.4 52.5 42.8 35.3 25.3 20.3	cum. % pass. 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 64.9	100 90 80 70 50 % 40 30 20 10 0			Fe	ed pduct
200	0.07	15.6	44.7	0.01	0.1	0 size [mm]	1.00	10.00

### APÊNDICE E – RESULTADO DOS ENSAIOS NA PR

### Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 01

Inic	ial Mass =	60	Recycle	Eff 50				
Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
Total Feed	60.0	60.2	61.6	59.7	59.7	kg	60.3	33.2
<b>Operating Pressure</b>	68.5	70.4	71.4	71.8	72.2	Bar	71.8	
<b>Operating Pressure</b>	5.48	5.63	5.71	5.75	5.77	N/mm2	5.7	
Test time	36.0	32.0	34.0	32.0	32.0	S	32.7	32.0
තු Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
📅 Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
capacity Total	6.00	6.77	6.52	6.72	6.71	tph	6.7	3.73
Capacity Cake	5.82	5.85	5.59	4.41	5.41	tph	5.1	
Specifc Throughput Total	292.8	330.5	318.2	328.0	327.7	ts/m³h	324.6	
Specifc Throughput Cake	283.9	285.3	272.9	215.0	263.8	ts/m³h	250.6	
🖁 Total Mechanical Power	13.0	12.9	11.9	12.2	12.2	kW	12.1	
Total Electrical Power	13.0	12.9	13.8	13.1	13.3	kW	13.4	13.4
Specific Mec. Energy	2.16	1.90	1.83	1.82	1.81	kWh/t	1.8	
Specific Elect. Energy	2.16	1.90	2.12	1.95	1.98	kWh/t	2.0	3.60
Average Flake Thickness	11.7	11.0	10.9	9.24	10.6	mm	10.2	
Flake Sg	2.03	2.16	2.08	1.94	2.08	t/m3	2.0	
Bulk Density	1.84	1.91	1.95	1.94	1.95	t/m3	1.9	
Operating gap	6.46	7.10	7.23	7.26	7.31	mm	7.3	

#### Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 02

	Inicia	Mass =	100	Recycle	Edge Eff	100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	100.9	98.9	100.7	100.0	100.9	kg	100.5	60.5
	Operating Pressure	65.4	66.6	67.5	68.3	68.4	Bar	68.1	
	Operating Pressure	5.23	5.33	5.40	5.47	5.47	N/mm2	5.4	
	Test time	66.0	59.0	58.0	56.0	56.0	S	56.7	56.0
e	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
088	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
та	Capacity Total	5.50	6.04	6.25	6.43	6.48	tph	6.4	3.89
Da	Capacity Cake	5.29	5.32	5.73	5.06	6.05	tph	5.6	
ш	Specifc Throughput Total	268.7	294.7	305.1	313.7	316.5	ts/m³h	311.7	
d fr	Specifc Throughput Cake	258.0	259.4	279.6	246.7	295.0	ts/m³h	273.8	
cte	Total Mechanical Power	12.9	12.9	12.9	13.0	13.0	kW	12.9	
olle	Total Electrical Power	12.9	12.9	12.9	13.0	13.0	kW	12.9	12.9
ta c	Specific Mec. Energy	2.34	2.14	2.06	2.03	2.00	kWh/t	2.0	
Da	Specific Elect. Energy	2.34	2.14	2.06	2.03	2.00	kWh/t	2.0	3.33
	Average Flake Thickness	10.9	11.4	11.3	9.75	12.0	mm	11.0	
	Flake Sg	1.97	1.90	2.07	2.11	2.05	t/m3	2.1	
	Bulk Density	1.88	1.91	1.92	1.96	2.19	t/m3	2.0	
	Operating gap	6.25	6.62	6.86	7.03	7.13	mm	7.0	

### Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 03

Test								
rest	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
Total Feed	80.5	81.1	80.2	80.4	79.8	kg	80.1	58.3
Operating Pressure	65.6	65.4	65.6	65.5	66.4	Bar	65.8	
Operating Pressure	5.25	5.23	5.24	5.24	5.31	N/mm2	5.3	
Test time	52.0	53.0	52.0	52.0	50.0	S	51.3	50.0
Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Capacity Total	5.58	5.51	5.55	5.57	5.75	tph	5.6	4.20
Capacity Cake	5.93	5.79	5.63	5.35	5.10	tph	5.4	
Specifc Throughput To	tal 272.1	268.8	271.0	271.8	280.4	ts/m³h	274.4	
Specifc Throughput Ca	<b>ke</b> 289.1	282.6	274.5	261.0	248.6	ts/m³h	261.4	
Total Mechanical Pow	er <u>12.8</u>	12.4	12.2	12.3	12.1	kW	12.2	
<b>Total Electrical Power</b>	12.8	12.4	12.3	12.3	12.1	kW	12.2	12.22
Specific Mec. Energy	2.29	2.25	2.20	2.21	2.10	kWh/t	2.2	
Specific Elect. Energy	2.29	2.25	2.21	2.21	2.10	kWh/t	2.2	2.91
Average Flake Thickne	ss 12.1	11.1	11.0	10.2	10.3	mm	10.5	
Flake Sg	1.98	2.13	2.08	2.13	2.01	t/m3	2.1	
Bulk Density	1.91	1.84	1.90	1.86	1.78	t/m3	1.8	
Operating gap	6.25	6.09	6.03	5.88	6.11	mm	6.0	

# Eco HRC TestworkHRC 300 - Test 04

	Inicia	l Mass =	60	Recycle	Eff 50		_		
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	59.6	61.2	60.7	61.4	61.4	kg	61.2	34.1
	Operating Pressure	65.8	68.3	69.5	70.1	71.1	Bar	70.2	
	Operating Pressure	5.27	5.47	5.56	5.61	5.69	N/mm2	5.6	
	Test time	38.0	36.0	34.0	34.0	35.0	S	34.3	35.0
Ē	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
088	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
ТаГ	Capacity Total	5.64	6.12	6.42	6.50	6.31	tph	6.4	3.51
Da	Capacity Cake	5.69	7.85	5.82	6.36	5.27	tph	5.8	
E O D	Specifc Throughput Total	275.5	298.9	313.6	317.4	308.2	ts/m³h	313.0	
d fr	Specifc Throughput Cake	277.5	383.0	283.9	310.3	257.3	ts/m³h	283.8	
scte	Total Mechanical Power	12.9	12.9	12.5	12.8	13.1	kW	12.8	
olle	Total Electrical Power	12.9	12.9	12.8	12.8	13.1	kW	12.9	12.93
tac	Specific Mec. Energy	2.29	2.10	1.94	1.98	2.08	kWh/t	2.0	
Da	Specific Elect. Energy	2.29	2.10	1.99	1.98	2.08	kWh/t	2.0	3.68
	Average Flake Thickness	13.2	13.0	12.1	12.1	12.0	mm	12.1	
	Flake Sg	1.76	2.45	1.95	2.14	1.78	t/m3	2.0	
	Bulk Density	1.86	2.01	2.00	2.03	2.02	t/m3	2.0	
	Operating gap	5.94	6.51	6.55	6.59	6.62	mm	6.6	

### Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 05

	Inicial Mass =	80	Closed 3	3.35 mm	Eff 75			
Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
Total Feed	81.7	81.1	81.1	80.8	80.6	kg	80.8	45.6
Operating Pressure	66.5	68.2	69.2	69.2	69.8	Bar	69.4	
Operating Pressure	5.32	5.45	5.53	5.54	5.58	N/mm2	5.6	
Test time	54.0	50.0	46.0	48.0	48.0	s	47.3	48.0
Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Capacity Total	5.44	5.84	6.35	6.06	6.05	tph	6.2	3.42
Capacity Cake	5.00	5.77	6.01	4.35	4.72	tph	5.0	
Specifc Throughput To	tal 265.7	285.1	309.7	295.7	295.1	ts/m³h	300.2	
Specifc Throughput Ca	<b>ke</b> 243.8	281.5	293.2	212.3	230.2	ts/m³h	245.2	
Total Mechanical Pow	er <u>12.9</u>	12.5	13.0	12.9	12.7	kW	12.9	
<b>Total Electrical Power</b>	13.1	12.7	13.0	12.9	12.7	kW	12.9	12.8
Specific Mec. Energy	2.37	2.15	2.04	2.13	2.11	kWh/t	2.1	
Specific Elect. Energy	2.40	2.17	2.04	2.13	2.11	kWh/t	2.1	3.76
Average Flake Thickne	ess 12.2	12.0	12.1	10.9	11.4	mm	11.5	
Flake Sg	1.67	1.95	2.01	1.62	1.68	t/m3	1.8	
Bulk Density	1.91	1.95	1.95	1.95	1.95	t/m3	1.9	
Operating gap	6.05	6.36	6.45	6.41	6.41	mm	6.4	

Ec	o HRC Testwork	HRC	300 - Te	est 06					
	Inicia	Mass =	90	Recycle	Eff 75				
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5	(	Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	90.8	90.2	89.8	90.3	90.2	kg	90.1	67.7
	Operating Pressure	68.8	70.2	70.9	71.2	71.7	Bar	71.3	
	Operating Pressure	5.51	5.62	5.67	5.70	5.74	N/mm2	5.7	
	Test time	64.0	63.0	62.0	60.0	60.0	S	60.7	60.0
er	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
980	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
таг	Capacity Total	5.11	5.15	5.22	5.42	5.41	tph	5.3	4.06
Dai	Capacity Cake	5.63	5.58	6.03	6.03	5.25	tph	5.8	
Б	Specifc Throughput Total	249.2	251.5	254.6	264.5	264.0	ts/m³h	261.0	
d fr	Specifc Throughput Cake	274.6	272.1	294.3	294.1	256.3	ts/m³h	281.5	
ct e	Total Mechanical Power	11.2	12.6	12.3	10.3	12.3	kW	11.6	
olle	Total Electrical Power	13.5	13.2	13.1	13.3	13.4	kW	13.3	13.25
ta c	Specific Mec. Energy	2.20	2.45	2.36	1.90	2.27	kWh/t	2.2	
Dai	Specific Elect. Energy	2.64	2.55	2.51	2.46	2.47	kWh/t	2.5	3.26
	Average Flake Thickness	11.4	12.5	11.9	12.3	12.0	mm	12.1	
	Flake Sg	2.00	1.81	2.06	1.99	1.79	t/m3	1.9	
	Bulk Density	1.98	1.96	1.95	1.97	1.95	t/m3	2.0	
	Operating gap	6.13	6.13	6.27	6.29	6.30	mm	6.3	

### Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 07

Ir	nicial Mass =	100	Recycle	Edge Eff	100			
Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
Total Feed	100.3	100.3	100.5	100.3	100.0	kg	100.3	60.4
<b>Operating Pressure</b>	70.7	72.1	73.1	73.0	72.9	Bar	73.0	
Operating Pressure	5.66	5.77	5.85	5.84	5.83	N/mm2	5.8	
Test time	60.0	54.0	54.0	54.0	52.0	S	53.3	52.0
Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Capacity Total	6.02	6.69	6.70	6.69	6.92	tph	6.8	4.18
Capacity Cake	5.69	5.81	5.42	5.33	5.30	tph	5.4	
Specifc Throughput Total	293.8	326.5	327.1	326.3	337.8	ts/m³h	330.4	
Specifc Throughput Cake	277.6	283.3	264.5	260.1	258.5	ts/m³h	261.0	
Total Mechanical Power	12.8	12.5	12.7	12.1	12.4	kW	12.4	
Total Electrical Power	14.0	13.3	13.3	13.2	13.3	kW	13.3	13.2
Specific Mec. Energy	2.13	1.87	1.89	1.82	1.79	kWh/t	1.8	
Specific Elect. Energy	2.33	1.99	1.98	1.97	1.92	kWh/t	2.0	3.17
Average Flake Thickness	11.4	12.5	11.7	12.5	11.8	mm	12.0	
Flake Sg	2.04	1.89	1.88	1.74	1.83	t/m3	1.8	
Bulk Density	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	t/m3	1.6	
Operating gap	5.95	6.19	6.40	6.34	6.41	mm	6.4	

## Eco HRC Testwork HRC 300 - Test 08

	Inic	cial Mass =	90	Recycle	Eff 75				
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	89.7	89.8	90.0	90.2	89.7	kg	89.9	67.8
	Operating Pressure	70.7	72.5	72.6	72.8	72.8	Bar	72.8	
	Operating Pressure	5.66	5.80	5.81	5.83	5.82	N/mm2	5.8	
	Test time	56.0	54.0	54.0	54.0	54.0	S	54.0	54.0
ъ	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
880	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
ta	Capacity Total	5.76	5.99	6.00	6.01	5.98	tph	6.0	4.52
Da	Capacity Cake	5.07	6.21	5.21	5.61	5.89	tph	5.6	
- Mo	Specifc Throughput Total	281.4	292.3	292.7	293.4	291.8	ts/m³h	292.6	
dfr	Specifc Throughput Cake	247.3	303.2	254.0	273.9	287.2	ts/m³h	271.7	
scte	Total Mechanical Power	13.8	12.5	11.7	12.6	13.0	kW	12.4	
¶0	Total Electrical Power	13.8	12.9	12.5	13.1	13.4	kW	13.0	13.01
ta	Specific Mec. Energy	2.39	2.09	1.95	2.10	2.17	kWh/t	2.1	
Da	Specific Elect. Energy	2.39	2.16	2.09	2.17	2.24	kWh/t	2.2	2.88
	Average Flake Thickness	11.0	12.7	11.8	12.6	11.7	mm	12.0	
	Flake Sg	1.87	2.00	1.80	1.81	2.04	t/m3	1.9	
	Bulk Density	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	t/m3	1.6	
	Operating gap	5.82	6.26	6.29	6.34	6.41	mm	6.3	

Test 09

	Inicial	Mass =	95	Recycle	Eff 75				
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4	Circuit
	Total Feed	89.8	90.1	89.7	90.5		kg	90.1	65.4
	Operating Pressure	47.3	48.6	48.9	49.2		Bar	49.0	
	Operating Pressure	3.78	3.89	3.91	3.93		N/mm2	3.92	
ger	Test time	54.0	54.0	52.0	52.0		S	52.0	52.0
080	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0		rpm	29.0	
taL	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0		rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	5.99	6.01	6.21	6.26		tph	6.24	4.53
mo'	Capacity Cake	4.55	5.06	6.45	6.34		tph	6.40	
d fr	Specifc Throughput Total	292.2	293.2	303.2	305.8		ts/m³h	304.5	
scte	Specifc Throughput Cake	222.1	246.9	314.9	309.3		ts/m³h	312.1	
Solle	Total Electrical Power	11.6	11.1	11.1	11.4		kW	11.2	11.2
ta c	Specific Elect. Energy	1.93	1.86	1.78	1.81		kWh/t	1.80	2.48
Da	Average Flake Thickness	11.2	11.9	12.2	12.23		mm	12.2	
	Flake Sg	1.66	1.73	2.15	2.11		t/m3	2.13	
	Bulk Density	1.83	1.86	1.82	1.86		t/m3	1.84	
	Operating gap	6.40	6.75	6.76	6.79		mm	6.77	

# **Eco HRC Testwork**

	Inicial	Mass =	95	Recycle	Eff 75				
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	90.6	90.2	90.2	90.7	90.3	kg	90.4	66.4
	Operating Pressure	47.4	48.3	49.1	49.3	49.7	Bar	49.4	
	Operating Pressure	3.79	3.86	3.93	3.94	3.97	N/mm2	3.95	
	Test time	56.0	54.0	52.0	52.0	52.0	S	52.0	52.0
ē	Rolls Speed	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	rpm	29.0	
380	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
ta L	Capacity Total	5.82	6.01	6.24	6.28	6.25	tph	6.26	4.60
Da	Capacity Cake	5.33	6.21	5.15	5.10	4.88	tph	5.04	
E O D	Specifc Throughput Total	284.2	293.4	304.7	306.4	305.2	ts/m³h	305.4	
d fr	Specifc Throughput Cake	260.1	303.1	251.1	248.9	237.8	ts/m³h	245.9	
scre	Total Electrical Power	11.5	10.7	10.9	11.2	11.3	kW	11.1	11.1
	Specific Elect. Energy	1.98	1.78	1.75	1.78	1.80	kWh/t	1.78	2.42
tac	Average Flake Thickness	12.5	12.8	11.9	12.9	12.4	mm	12.4	
Da	Flake Sg	1.7	1.97	1.76	1.61	1.60	t/m3	1.65	
	Bulk Density	1.86	1.93	1.94	1.95	1.95	t/m3	1.95	
	Operating gap	6.51	6.60	6.63	6.72	6.76	mm	6.70	

Test 11

	Inicial	Mass =	85	Closed 3	3.35 mm	Eff 100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	80.4	80.7	82.0	80.7	81.2	kg	81.3	54.0
	Operating Pressure	47.3	46.5	47.1	47.8	47.7	Bar	47.5	
	Operating Pressure	3.78	3.72	3.77	3.82	3.81	N/mm2	3.80	
ē	Test time	60.0	70.0	68.0	68.0	70.0	S	68.7	68.7
980	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
ц	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.83	4.15	4.34	4.27	4.18	tph	4.26	2.83
B	Capacity Cake	4.08	4.43	4.03	3.68	4.22	tph	3.98	
d fr	Specifc Throughput Total	297.0	255.5	267.0	263.0	257.1	ts/m³h	262.4	
cte	Specifc Throughput Cake	251.1	272.7	247.8	226.5	259.5	ts/m³h	244.6	
olle	Total Electrical Power	8.6	8.0	7.9	8.0	7.9	kW	7.95	8.0
tac	Specific Elect. Energy	1.78	1.92	1.82	1.88	1.90	kWh/t	1.87	2.81
Da	Average Flake Thickness	11.1	11.5	11.0	10.9	10.9	mm	10.9	
	Flake Sg	1.89	1.98	1.88	1.73	1.98	t/m3	1.86	
	Bulk Density	1.82	1.77	1.78	1.78	1.77	t/m3	1.78	
	Operating gap	5.52	4.93	4.70	4.85	4.82	mm	4.79	

# Eco HRC Testwork

	Inicia	Mass =	85	Closed 3	8.35 mm	Eff 100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Cyc 3-4-5	Circuit
	Total Feed	81.7	80.9	81.0	81.1	81.4	kg	81.2	54.7
	Operating Pressure	48.1	46.5	47.3	47.8	47.1	Bar	47.4	
	Operating Pressure	3.85	3.72	3.78	3.82	3.76	N/mm2	3.79	
ē	Test time	60.0	72.0	70.0	70.0	70.0	S	70.0	70.0
800	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
та	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.90	4.04	4.17	4.17	4.19	tph	4.17	2.81
ы	Capacity Cake	5.47	3.43	3.99	4.19	4.35	tph	4.17	
dfr	Specifc Throughput Total	301.7	248.8	256.4	256.6	257.6	ts/m³h	256.9	
cte	Specifc Throughput Cake	336.8	210.9	245.2	257.7	267.4	ts/m³h	256.8	
elle.	Total Electrical Power	8.8	8.0	8.0	7.8	7.8	kW	7.84	7.8
ta	Specific Elect. Energy	1.79	1.97	1.91	1.87	1.85	kWh/t	1.88	2.79
B	Average Flake Thickness	11.4	11.5	11.4	11.4	11.5	mm	11.4	
	Flake Sg	2.46	1.53	1.79	1.88	1.94	t/m3	1.87	
	Bulk Density	1.83	1.78	1.80	1.79	1.79	t/m3	1.79	
	Operating gap	5.71	4.86	4.94	4.94	4.63	mm	4.84	

Test 13

Inici	al Mass =	85	Closed 2	.36 mm	Eff 100			
Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
Total Feed	81.0	80.8	80.8	80.8	80.6	kg	80.7	60.1
<b>Operating Pressure</b>	47.2	46.7	47.4	48.2	49.0	Bar	48.2	
<b>Operating Pressure</b>	3.77	3.73	3.79	3.85	3.92	N/mm2	3.86	
😈 Test time	64.0	72.0	72.0	72.0	72.0	S	72.0	72.0
📅 Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
👖 Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
🛎 Capacity Total	4.56	4.04	4.04	4.04	4.03	tph	4.04	3.00
Capacity Cake	4.66	4.50	4.67	4.23	4.46	tph	4.45	
Specifc Throughput Total	280.3	248.6	248.6	248.6	247.9	ts/m³h	248.3	
🖁 Specifc Throughput Cake	286.6	277.0	287.5	260.5	274.0	ts/m³h	274.0	
🚆 Total Electrical Power	8.4	8.5	8.6	8.5	8.7	kW	8.61	8.6
Specific Elect. Energy	1.85	2.10	2.14	2.10	2.16	kWh/t	2.13	2.87
Average Flake Thickness	10.8	10.5	10.7	11.3	10.6	mm	10.9	
Flake Sg	2.21	2.19	2.23	1.92	2.15	t/m3	2.10	
Bulk Density	1.79	1.76	1.74	1.75	1.76	t/m3	1.75	
Operating gap	5.13	4.78	4.91	4.79	4.87	mm	4.85	

# Eco HRC Testwork

	Inicial	Mass =	105	Recycle	Edge Eff	100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	101.2	100.9	101.5	101.3	99.7	kg	100.8	61.0
	Operating Pressure	45.8	46.4	47.1	47.4	48.3	Bar	47.6	
	Operating Pressure	3.66	3.71	3.77	3.79	3.86	N/mm2	3.81	
ē	Test time	84.0	80.0	78.0	76.0	76.0	s	76.7	76.7
800	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
та	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.34	4.54	4.68	4.80	4.72	tph	4.73	2.86
ы	Capacity Cake	5.83	6.70	5.01	4.43	4.96	tph	4.80	
dfr	Specifc Throughput Total	266.8	279.6	288.2	295.2	290.7	ts/m³h	291.4	
cte	Specifc Throughput Cake	358.9	412.0	308.2	272.4	305.3	ts/m³h	295.3	
elle.	Total Electrical Power	8.6	8.4	8.4	8.4	8.4	kW	8.38	8.4
ta	Specific Elect. Energy	1.97	1.84	1.78	1.76	1.77	kWh/t	1.77	2.93
B	Average Flake Thickness	10.8	13.2	11.9	11.7	11.9	mm	11.8	
	Flake Sg	2.78	2.60	2.16	1.94	2.14	t/m3	2.08	
	Bulk Density	1.78	1.87	1.86	1.88	1.87	t/m3	1.87	
	Operating gap	5.08	5.33	5.45	5.33	5.66	mm	5.48	

Test 20

	Inicial	Mass =	105	Recycle	Edge Eff	100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	101.2	100.0	100.3	101.0	99.9	kg	100.4	60.3
	Operating Pressure	45.8	46.9	47.7	48.1	48.7	Bar	48.2	
	Operating Pressure	3.66	3.75	3.82	3.85	3.89	N/mm2	3.85	
ē	Test time	84.0	76.0	76.0	76.0	74.0	S	75.3	75.3
980	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
ц	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.34	4.74	4.75	4.79	4.86	tph	4.80	2.88
B	Capacity Cake	4.17	4.93	4.51	5.17	5.04	tph	4.91	
d fr	Specifc Throughput Total	266.9	291.6	292.3	294.5	299.0	ts/m³h	295.2	
cte	Specifc Throughput Cake	256.8	303.0	277.2	317.8	310.3	ts/m³h	301.8	
olle	Total Electrical Power	8.7	8.5	8.3	8.5	8.4	kW	8.41	8.4
tac	Specific Elect. Energy	2.00	1.79	1.75	1.77	1.74	kWh/t	1.75	2.92
Da	Average Flake Thickness	11.8	12.5	11.6	11.8	12.7	mm	12.0	
	Flake Sg	1.82	2.03	1.99	2.25	2.03	t/m3	2.09	
	Bulk Density	1.77	1.81	1.83	1.84	1.83	t/m3	1.83	
	Operating gap	5.19	5.51	5.18	5.28	5.48	mm	5.31	

# Eco HRC Testwork

	Inicial	Mass =	95	Recycle	Eff 75				
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	90.6	90.2	90.2	90.7	90.3	kg	90.4	73.1
	Operating Pressure	27.1	27.4	27.7	27.7	28.1	Bar	27.8	
	Operating Pressure	2.17	2.19	2.22	2.21	2.25	N/mm2	2.23	
	Test time	70.0	66.0	64.0	66.0	66.0	S	65.3	65.3
ē	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
80	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
ta L	Capacity Total	4.66	4.92	5.07	4.95	4.93	tph	4.98	4.03
Ğ	Capacity Cake	5.41					tph		
ш	Specifc Throughput Total	286.7	302.7	312.1	304.4	303.2	ts/m³h	306.6	
dfr	Specifc Throughput Cake	332.6					ts/m³h		
cte	Total Electrical Power	6.3	6.1	6.3	6.1	6.2	kW	6.19	6.2
elle.	Specific Elect. Energy	1.35	1.23	1.23	1.24	1.26	kWh/t	1.24	1.54
ta	Average Flake Thickness	13.1	-	-	-	-	mm		
Da	Flake Sg	2.1	-	-	-	-	t/m3		
	Bulk Density	1.79	1.80	1.82	1.85	1.85	t/m3	1.84	
	Operating gap	5.39	5.74	6.04	5.87	5.88	mm	5.93	

Test 25

	Inicial	Mass =	105	Recycle	Edge Eff	100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	101.2	100.0	100.3	101.0	99.9	kg	100.4	62.5
	Operating Pressure	27.9	28.2	28.2	28.3	28.6	Bar	28.4	
	Operating Pressure	2.23	2.25	2.26	2.27	2.28	N/mm2	2.27	
er	Test time	76.0	76.0	74.0	74.0	74.0	S	74.0	74.0
980	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
таг	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.79	4.74	4.88	4.91	4.86	tph	4.88	3.04
mo	Capacity Cake	5.90					tph		
d fr	Specifc Throughput Total	295.0	291.6	300.2	302.5	299.0	ts/m³h	300.5	
scte	Specifc Throughput Cake	362.9					ts/m³h		
olle	Total Electrical Power	6.1	6.1	6.1	6.0	6.1	kW	6.08	6.1
tac	Specific Elect. Energy	1.28	1.28	1.26	1.22	1.25	kWh/t	1.25	2.00
Da	Average Flake Thickness	12.0	-	-	-	-	mm		
	Flake Sg	2.52	-	-	-	-	t/m3		
	Bulk Density	1.78	1.80	1.81	1.80	1.76	t/m3	1.79	
	Operating gap	5.44	5.46	5.84	5.39	5.50	mm	5.58	

# Eco HRC Testwork

	Inicial	Mass =	85	Closed 3	8.35 mm	Eff 100			
	Test	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5		Сус 3-4-5	Circuit
	Total Feed	80.4	80.7	82.0	80.7	81.2	kg	81.3	65.0
	Operating Pressure	47.3	46.5	47.1	47.8	47.7	Bar	47.5	
	Operating Pressure	3.78	3.72	3.77	3.82	3.81	N/mm2	3.80	
ē	Test time	60.0	70.0	68.0	68.0	70.0	s	68.7	68.7
088	Rolls Speed	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	rpm	23.0	
БГ	Motor Speed	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	rpm	1100.0	
Da	Capacity Total	4.83	4.15	4.34	4.27	4.18	tph	4.26	3.41
ш	Capacity Cake	4.22	4.31	4.65	4.35	13.67	tph	7.56	
dfr	Specifc Throughput Total	297.0	255.5	267.0	263.0	257.1	ts/m³h	262.4	
cte	Specifc Throughput Cake	259.5	265.4	286.2	267.5	840.7	ts/m³h	464.8	
elle	Total Electrical Power	8.6	8.0	7.9	8.0	7.9	kW	7.95	8.0
tac	Specific Elect. Energy	1.78	1.92	1.82	1.88	1.90	kWh/t	1.87	2.33
Da	Average Flake Thickness	11.4	11.3	10.4	11.8	39.6	mm	20.6	
	Flake Sg	1.89	1.95	2.29	1.90	1.77	t/m3	1.99	
	Bulk Density	1.81	1.73	1.74	1.82	1.76	t/m3	1.77	
	Operating gap	5.52	4.93	4.70	4.85	4.82	mm	4.79	