



DESVENDANDO A PRENSAGEM DE PELLET FEED DE MINÉRIO DE FERRO
NA UNIDADE DE TUBARÃO

Gilvandro Bueno

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019

DESVENDANDO A PRENSAGEM DE PELLET FEED DE MINÉRIO DE FERRO
NA UNIDADE DE TUBARÃO

Gilvandro Bueno

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Aprovada por: Prof. Luís Marcelo Marques Tavares

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho

Prof. Maurício Guimarães Bergerman

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2019

Bueno, Gilvandro

Desvendando a prensagem de pellet feed de minério de ferro na unidade de tubarão /Gilvandro Bueno. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2019.

XVIII, 132 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 126-132.

1. HPGR 2. Pellet Feed I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela soberana força em todas minhas conquistas.

Aos meus pais Antonio Bueno Sobrinho e Julia Alice Bueno por terem me dado os primeiros ensinamentos da vida e sempre incentivarem meus estudos.

A minha esposa Anapaula Costalonga Bueno e nossos filhos Mateus Costalonga Bueno e Juliana Costalonga Bueno, pelo apoio incondicional e entenderem minhas eventuais ausências para dedicação neste trabalho.

Ao meu gerente Frederico Mayerhofer pela oportunidade oferecida para realização deste mestrado e acreditar no desenvolvimento da equipe.

Ao meu orientador Professor Luís Marcelo Marques Tavares, pelos ensinamentos e ajuda na confecção deste trabalho.

Ao meu coordenador Luis Dantas pela confiança na importância deste trabalho.

Ao amigo Anderson Thomazini pelos desafios que enfrentamos juntos nas disciplinas e companheirismo nos trabalhos em conjunto.

Ao colega de pesquisa Túlio Campos pelas discussões e ajuda dispensada neste e outros trabalhos realizados em equipe.

À equipe da planta piloto: Vinícius, Relphy, Larissa, Ana Paula, Nádia, Everaldo, Anderson, Marquinho, Reinaldo, Valdeenes e Sostenes pela dedicação na realização dos testes e comprometimento nas análises realizadas no laboratório.

À minha equipe e colegas de trabalho pelo companheirismo, em especial ao nosso estagiário Thiago de Almeida pela ajuda na realização dos ensaios na planta piloto, não medindo esforços para participar das atividades neste trabalho.

À VALE S.A. e UFRJ por acreditarem que projetos de pesquisa entre empresa e universidade é importante para o desenvolvimento do País.

Ao meu País por oferecer ensino de pós-graduação gratuito de qualidade. Pátria Amada Brasil!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

DESVENDANDO A PRENSAGEM DE PELLET FEED DE MINÉRIO DE FERRO NA UNIDADE DE TUBARÃO

Gilvandro Bueno

Dezembro/2019

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Desde as primeiras aplicações industriais das prensas de rolos em 1984, na indústria cimenteira, este equipamento vem ganhando espaço nos circuitos de cominuição. A VALE S.A, foi uma das precursoras da aplicação desta tecnologia para cominuição de *pellet feed* para suas usinas de pelotização. Por ser uma tecnologia relativamente nova, muitos desafios ainda estão presentes neste processo, no que diz respeito ao comportamento de quebra (prensabilidade) dos minérios neste equipamento, a aplicação de modelos por meio de simuladores e o escalonamento, que possa representar uma máquina industrial a partir de escalas menores. Neste trabalho foi possível quantificar a influência do teor de umidade na prensabilidade dos minérios de ferro em relação a incremento de área superficial específica, consumo específico de energia, capacidade específica, e utilização de energia. Os minérios com maior percentual de minerais porosos e com maior perda por calcinação (PPC) foram mais sensíveis a estes indicadores. A moabilidade e a prensabilidade foram mensuradas em função da utilização de energia. Os resultados mostraram que a utilização de energia na prensagem é melhor que a moagem. A capacidade específica, o consumo específico de energia e a utilização de energia se mostraram bem comportadas em relação às escalas de HPGR avaliadas. Em relação à simulação, foi identificada variação da função seleção específica em relação ao tamanho da máquina (HPGR) a ser simulada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

UNRAVELING PRESSING OF IRON ORE PELLET FEED IN THE TUBARÃO
UNIT

Gilvandro Bueno

December/2019

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Since its first industrial applications in 1984 in the cement industry, the HPGR has been applied progressively more widely in the comminution circuits. VALE S.A. has been one of the pioneers in applying this technology for pellet feed comminution in its pelletizing plants. As it is a relatively new technology, many challenges remain in application of this process, for instance, regarding the assessment of inherent pressability of ores, the application of models by simulators and scale-up. In the present work it was possible to quantify the influence of moisture content on the iron ores pressability in relation to specific surface area increment, specific energy consumption, specific capacity, and energy utilization. The ores with the highest percentage of porous minerals and higher loss on ignition ores were more sensitive to these indicators. Grindability and pressability were assessed as a function of energy utilization and results showed that energy utilization in pressing is more efficient than grinding. Specific capacity, specific energy consumption and energy utilization were well behaved in relation to the HPGR scales evaluated. Regarding simulation, it was possible to demonstrate that the specific selection function varies in respect the size of machine (HPGR) simulated.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVO GERAL	3
2.1	Objetivos específicos	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Histórico da Prensa de Rolos - HPGR	4
3.2	Princípio de Funcionamento do HPGR	5
3.3	Características dos rolos e revestimentos do HPGR.....	9
3.4	Aplicações para prensa de rolos.....	12
3.5	Aplicações do HPGR em Pellet Feed	13
3.6	Variáveis operacionais da prensa de rolos	17
3.6.1	Capacidade - Q	18
3.6.2	Consumo Específico de Energia - E_{sp}	18
3.6.3	Força Específica de Compressão - F_{sp}	18
3.6.4	Abertura Operacional - xg	19
3.6.5	Capacidade Específica - m	20
3.6.6	Velocidade Periférica - U	20
3.6.7	Ângulo de Captura - α_{ip}	20
3.6.8	Torque e Potência	21
3.6.9	Teor de Umidade	22
3.7	Escorregamento e Extrusão.....	23
3.8	Mecanismo da Cominuição.....	25
3.9	Mecanismo de quebra em leito de partículas	26
3.10	Saturação na quebra em leito de partículas.....	27
3.11	Efeito de Borda	29
3.12	Caracterização dos minérios de ferro para pellet feed	32
3.13	Moabilidade e Prensabilidade	35
3.14	Escalonamento e Modelos para HPGR.....	44
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	50
4.1	Amostras	52
4.2	Ensaio de CLP	53
4.3	Testes em HPGR de Bancada	54

4.4	Testes em HPGR Piloto	57
4.5	Testes em HPGR Industrial	61
4.6	Testes de Moabilidade	65
4.7	Análises.....	66
4.8	Modelagem	68
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
5.1	Prensabilidade	70
5.1.1	Caracterização dos minérios	70
5.1.2	Granulometria	70
5.1.3	Composição Química.....	72
5.1.4	Mineralogia	73
5.1.5	Moabilidade	74
5.1.6	Avaliação da influência da umidade	77
5.1.7	Granulometria e Área Superficial Específica (BSA)	81
5.1.8	Utilização de energia	87
5.1.9	Capacidade Específica	89
5.1.10	Moagem versus Prensagem	90
5.2	Escalonamento	96
5.2.1	Capacidade específica ou m-dot	96
5.2.2	Consumo específico de energia	99
5.2.3	Variação de área superficial específica e granulometria ao longo do comprimento dos rolos	102
5.2.4	Utilização de energia	107
5.3	Modelagem	112
6.	CONCLUSÃO	122
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Prensas de rolos fabricadas pela Köppern, usadas para a briquetagem de materiais finos (DANIEL, 2002)	4
Figura 3.2 Representação de uma prensa de rolos atual (FLSmidth, 2011)	5
Figura 3.3. Sistema hidráulico da prensa de rolos: Cilindros hidráulicos (A), Acumuladores de Nitrogênio (B)	6
Figura 3.4 Apresentação esquemática da prensa de rolos (BARRIOS, 2015)	7
Figura 3.5. Esquema do sistema hidropneumático (THYSSENKRUPP, 2018)	8
Figura 3.6 Conceito tradicional (A) e novo conceito com rolos paralelos (B) (adaptado de OLIVEIRA, 2016)	9
Figura 3.7 Tipos de Rolos: (A) Sólido, (B) Segmentado e (C) Bandagem-Eixo (DANIEL, 2002)	10
Figura 3.8. Rolo Bandagem-na-Bandagem (<i>Tyre-on-Tyre</i>) (THYSSENKRUPP, 2018)	10
Figura 3.9 Tipos de revestimentos dos rolos, perfilados com solda (A e B), pinado (C) e Hexadur® (D) (DANIEL, 2002)	11
Figura 3.10. Rolo novo (A) e rolo desgastado (B)	11
Figura 3.11. Representação esquemática de usina de pelotização com HPGR antes da moagem	15
Figura 3.12. Representação esquemática de usina de pelotização com HPGR após a moagem	15
Figura 3.13. Representação esquemática de multiprensagem, eliminando toda fase úmida do processo de pelotização	16
Figura 3.14. Microfissuras geradas após o a passagem do pellet feed pelo HPGR – ampliação 1000 X (ODENWALD et al., 2003)	17
Figura 3.15. Desenho esquemático das variáveis operacionais da prensa (BARRIOS, 2015)	17
Figura 3.16 Influência do teor de umidade na capacidade específica (Adaptado de VAN DER MEER e LEITE, 2018)	22
Figura 3.17 Extrusão do material pelas laterais esquerda (a) e direita (b) de uma prensa de rolos prensando pellet feed (CAMPOS, 2018)	25
Figura 3.18 Classificação de Schönert sobre leito de partículas (BARRIOS, 2015)	27
Figura 3.19 Saturação em ensaio de compressão em leito de partículas CLP (BARRIOS, 2015)	29
Figura 3.20 Perfil de pressão ao longo do rolo (TORRES & CASALI, 2009)	30

Figura 3.21 <i>Cheek plates</i> prontas para serem instaladas no HPGR (em destaque à esquerda) e já instaladas no equipamento (direita) (RODRIGUES, 2018).....	30
Figura 3.22 Rolos com flange de vedação (OLIVEIRA, 2016)	31
Figura 3.23 Efeito da posição de descarga da prensa na área superficial específica (Blaine), mostrando o efeito de borda em experimento industrial (BUENO e VIANNA, 2016).....	32
Figura 3.24 Localização das minas que abastecem as usinas de pelotização em Vitória - ES (CASAGRANDE, 2017).....	33
Figura 3.25 Características das texturas dos minérios (CASAGRANDE, 2016)	34
Figura 3.26 Demanda energética para moagem de pellet feed (CASAGRANDE, 2016)....	36
Figura 3.27 Prensa Shimadzu (esquerda) e acoplamento copo pistão utilizados nos testes de CLP (direita).....	37
Figura 3.28 Prensa de bancada POLYCOM®	38
Figura 3.29 Prensa em escala piloto KHD/WEIR	38
Figura 3.30 Mecanismo do modelo do balanço populacional (DUNDAR et al., 2013).....	39
Figura 3.31 Taxa de quebra em função de k_r e α da Equação 3.13 (modificado de DUNDAR et al., 2013).....	40
Figura 3.32 Taxa de desaparecimento ($W_{quebrado}/W_{inicial}$) obtida a partir de testes de quebra de partículas em leito (CLP) (modificado de DUNDAR et al., 2013)	40
Figura 3.33 Razão de redução em função da energia específica para vários minérios (A) e influência do tamanho inicial (X_f) na prensabilidade (B) (Adaptado de FUERSTENAU et al., 1996).....	43
Figura 3.34 Comparação da prensabilidade em leito de partículas com partículas individuais (Adaptado de FUERSTENAU et al., 1996).....	43
Figura 3.35 Esquema para dimensionar o HPGR (adaptado de RASHIDI et al., 2016)	44
Figura 3.36 Comparação entre os valores experimentais e calculados para a capacidade (a), potência consumida (b) e distribuição granulométrica do produto (c) para calibração do modelo e simulador	49
Figura 4.1 Descrição esquemática da metodologia utilizada no trabalho contendo a etapa, equipamento utilizado, método do ensaio e tipo de minério.....	51
Figura 4.2 Imagem dos tipos de minérios utilizados no processo de pelotização enquanto ainda nos vagões no Complexo de Tubarão (Vitória – ES).....	52
Figura 4.3 Amostra de minério espalhada para homogeneização nas instalações do LTM. 53	
Figura 4.4 Prensa Shimadzu com copo pistão acoplado utilizados nos testes de CLP	54

Figura 4.5 HPGR de bancada utilizado para testes nas instalações do laboratório da VALE S.A. em Vitória (ES).....	55
Figura 4.6 Mistura de minérios sobre lona em processo de homogeneização.....	57
Figura 4.7 Vista geral da planta contendo um HPGR piloto utilizada para testes de prensagem	57
Figura 4.8 HPGR piloto utilizado para realização dos testes de prensagem.....	58
Figura 4.9 Dispositivo para coleta de amostra longitudinal ao rolo sendo introduzido entre os rolos (esquerda) e já contendo o material para análises (direita).....	59
Figura 4.10 Tela do supervisor de operação do HPGR piloto.....	60
Figura 4.11 Homogeneização das misturas de minério e ajuste do teor de umidade.....	61
Figura 4.12 Balança medidora de teor de umidade	61
Figura 4.13 Sequência de operações realizadas no teste de múltiplas prensagens em HPGR industrial.	63
Figura 4.14 Tela do sistema supervisor utilizado para controle de processo e operador durante teste industrial de multiprensagem em HPGR industrial.....	64
Figura 4.15 Pontos de coleta de amostras no rolo do HPGR 1 utilizado no teste industrial.	64
Figura 4.16 Moinho utilizado para teste de moabilidade	65
Figura 4.17 Peneirador Retsch utilizado nas medidas de distribuição granulométrica de partículas maiores que 500 μm	66
Figura 4.18 Analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer [®] 2000 utilizado para medida da distribuição granulométrica de partículas menores que 500 μm	67
Figura 4.19 Analisador Blaine-Star para medição área superficial específica	67
Figura 4.20 Espectrômetro de fluorescência de raio X (A) e mufla (B)	68
Figura 4.21 Tela do simulador para prensagem de <i>pellet feed</i> em HPGR desenvolvido pela VALE S.A. e LTM/UFRJ	69
Figura 5.1 Distribuições granulométricas dos minérios em trabalhos anteriores (dados de Casagrande (2017) e Takehara (2004)	71
Figura 5.2 Distribuição granulométrica dos minérios como recebido neste estudo.....	71
Figura 5.3 Relação entre o percentual de minerais porosos e o PPC nos minérios estudados	74
Figura 5.4 Moabilidade de amostra do minério de Brucutu	75
Figura 5.5 Moabilidade de amostra do minério de Itabira	75
Figura 5.6 Moabilidade de amostra do minério de Mariana.....	76
Figura 5.7 Moabilidade de amostra do minério de Carajás	76

Figura 5.8 Relação entre consumo específico de energia e umidade para os minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana para velocidades de 0,33 e 0,66 m/s. Valores médios das forças específicas foram utilizados nos gráficos.....	78
Figura 5.9 Influência do teor de umidade na capacidade específica dos minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana com velocidades de 0,33 e 0,66 m/s, utilizando-se resultados médios obtidos nas três forças específicas	79
Figura 5.10 Avaliação da utilização da energia na prensagem dos minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana para 2,5 N/mm ² e média das velocidades de 0,33 e 0,66 m/s.....	81
Figura 5.11 Geração de área superficial específica em função da energia aplicada realizado em ensaio de CLP as amostras de minérios secos e com granulometria entre 0,106 e 0,075 mm	82
Figura 5.12 Redução da granulometria em função da energia aplicada em ensaio de CLP com minérios secos e granulometria entre 0,106 e 0,075 mm	82
Figura 5.13 Distribuição granulométrica do produto do ensaio de CLP com minérios secos e granulometria entre 0,106 e 0,075 mm.....	83
Figura 5.14 Ensaio de CLP para avaliação da saturação dos minérios com granulometria entre 0,106 mm e 0,075 mm aplicando uma carga máxima de 100 kN	84
Figura 5.15 Geração de produto passante em 0,045 mm com minérios secos prensados na prensa de bancada em três níveis de força específica e médias obtidas nas velocidades de 0,33 e 0,66 m/s	85
Figura 5.16 Geração de produto passante em 5 µm com minérios secos prensados na prensa de bancada em três níveis de força específica e médias de velocidades de 0,33 e 0,66 m/s.	86
Figura 5.17 Geração de área superficial específica (ΔBSA) em função do consumo específico de energia em forças específicas de 1,5, 2,5 e 3,5 N/mm ² , nas velocidades de 0,33 e 0,66 m/s e com minérios secos no HPGR de laboratório	87
Figura 5.18 Influência da velocidade na eficiência média em três níveis de força específica (1,5; 2,5 e 3,5 N/mm ²) com prensagem de minérios secos na prensa de bancada a diferentes velocidades.....	88
Figura 5.19 Influência da energia na eficiência medida em três níveis de força específica (1,5; 2,5 e 3,5 N/mm ²) com prensagem de minério seco em prensa de laboratório em duas velocidades (0,33 e 0,66 m/s).....	89
Figura 5.20 Influência da força específica (1,5; 2,5 e 3,5N/mm ²) na capacidade específica para prensagem de minério seco para a média de duas velocidades (0,33 e 0,66 m/s).....	90

Figura 5.21 Ganho de Blaine em função da energia aplicada nos ensaios de moagem e prensagem em CLP com os minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás (linha de tendência para CLP até 4 kWh/t).....	91
Figura 5.22 Ensaio de CLP com prensagem em estágio único e em múltiplos estágios de prensagem realizados com minério de Itabira entre 0,106 e 0,075 mm seco	92
Figura 5.23 Ensaio comparativo dos processos de cominuição para <i>pellet feed</i> realizado com minério de Itabira seco	93
Figura 5.24 Comparação dos resultados dos ensaios de moagem e multiprensagem em HPGR de bancada para os minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás, correlacionando o ganho de área superficial específica em função da energia aplicada.....	94
Figura 5.25 Capacidade específica em prensagem única no HPGR medida em escalas de Bancada, Piloto e Industrial para diferentes misturas de minérios	97
Figura 5.26 Capacidades específicas em multiprensagens no HPGR medidas em escalas de Bancada, Piloto e Industrial para força específica de 2,5 N/mm ² e a mistura I63-B25-M12. Teor de umidade de 7,5%	98
Figura 5.27 Capacidade específica (mdot) para o minério de Itabira multiprensado em HPGR Piloto com força específica de 4,5 N/mm ² e HPGR de Bancada com força específica de 4,2 N/mm ² . Teor de umidade de 5%	98
Figura 5.28 Capacidade específica (mdot) em função do número de passes para a mistura I80-B20 multiprensada em HPGR Piloto e HPGR de Bancada com força específica de 4,0 N/mm ²	99
Figura 5.29 Consumo específico de energia para ensaio prensagem em CLP e HPGR de Bancada e Piloto para minérios individuais	100
Figura 5.30 Consumo específico de energia em função do número de passes para ensaios em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12.....	101
Figura 5.31 Variação da velocidade do rolo com o número de passes para ensaios em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12	101
Figura 5.32 Abertura operacional entre rolos para ensaio em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12.....	102
Figura 5.33 Efeito de borda em relação à área superficial específica no HPGR avaliado em teste Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12	103
Figura 5.34 Variação longitudinal da percentagem passante na peneira de 45 micrometros em ensaios no HPGR em escala Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12.....	103

Figura 5.35 Distribuições granulométricas da alimentação e produtos de três ciclos de prensagem em HPGR avaliado em teste Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12	105
Figura 5.36 Área superficial específica de produto de cada passe em ensaios de multiprensagem em HPGR em escalas de Bancada e Piloto para a mistura I80-B20	106
Figura 5.37 Incremento de área superficial específica por ciclo em ensaio de multiprensagem em HPGR em escalas de Bancada e Piloto para a mistura I80-B20	107
Figura 5.38 Utilização de energia comparando-se ensaios de única prensagem realizados em CLP e HPGR para diferentes escalas: Bancada, Piloto e Industrial para diferentes misturas de minérios.	108
Figura 5.39 Histograma de frequência da utilização de energia em HPGR industriais em prensagem única nas usinas do Complexo de Tubarão	109
Figura 5.40 Utilização de energia para quatro tipos de minérios comparando-se ensaios realizados em CLP e HPGR de Bancada realizado nas mesmas condições de energia e umidade	109
Figura 5.41 Utilização de energia para o minério de Mariana com diferentes teores de umidade em ensaios realizados em CLP e HPGR de Bancada para a força específica de 2,5N/mm ²	110
Figura 5.42 Utilização de energia comparando-se ensaios de múltiplas prensagens realizados em CLP, HPGR de Bancada e HPGR Piloto para minério de Itabira em 4,0 N/mm ² de força específica e 5% de teor de umidade inicial	111
Figura 5.43 Função seleção para o minério de Itabira no HPGR piloto	112
Figura 5.44 Distribuições granulométricas comparando-se resultados experimentais e simulados para HPGR Piloto com minério de Itabira	113
Figura 5.45 Variação longitudinal do Blaine do produto, comparando-se resultados experimentais e simulados para HPGR Piloto com o minério de Itabira (A) e detalhamento dos resultados simulados (B)	114
Figura 5.46 Variação longitudinal da percentagem passante em 0,045 mm do produto, comparando-se resultados experimentais e simulados para o HPGR Piloto com minério de Itabira	115
Figura 5.47 Distribuição granulométrica de alimentação e produto de HPGR em três escalas prensados a 2,5N/mm ² e teor de umidade de 7,5% para amostra I63-B25-M12	118
Figura 5.48 Função seleção para a mistura de minérios I63-B25-M12 em três escalas de HPGR	118

Figura 5.49 Equação empírica para escalonamento da função seleção entre os HPGRs de bancada, piloto e industrial.....121

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 Textura e percentual de porosidade (Adaptado de CASAGRANDE, 2016 e TAKEHARA, 2004).....	34
Tabela 3. 2 Princípios e características dos modelos matemáticos de prensas de rolos.....	46
Tabela 3. 3 Resumo das principais equações do modelo de Torres & Casali modificado (CAMPOS et al., 2019).....	49
Tabela 4.1 Condições de ensaios para avaliação da prensabilidade dos minérios	56
Tabela 4.2 Características dos HPGRs utilizados neste trabalho	62
Tabela 4.3 Características do teste de moabilidade	65
Tabela 5.1 Análises químicas das amostras de trabalhos anteriores	72
Tabela 5.2 Análise química dos minérios deste estudo.....	72
Tabela 5.3 Texturas e minerais presentes nos minérios estudados (* Minerais porosos).....	73
Tabela 5. 4 Característica dos minérios estudados	77
Tabela 5.5 P_{80} do produto dos ensaios de multiprensagem em HPGR para duas escalas (mistura I63-B25-M12).....	104
Tabela 5.6 Percentual passante em 45 μm no produto dos ensaios de multiprensagem em HPGR para duas escalas (mistura I63-B25-M12).....	104
Tabela 5.7 Resumo dos parâmetros utilizados na adaptação do modelo de Torres e Casali modificado aos dados do HPGR piloto para minério de Itabira.....	112
Tabela 5.8 Tabela comparativa de resultados experimentais e simulados para HPGR piloto com minério de Itabira.....	115
Tabela 5.9 Condições operacionais utilizadas no HPGR industrial e via simulação	116
Tabela 5.10 Quadro comparativo de resultados obtidos no HPGR industrial e via simulação	117
Tabela 5.11 Resumo dos parâmetros utilizados na adaptação do modelo de Torres e Casali modificado aos dados do HPGR de bancada, piloto e industrial para a mistura I63-B25-M12	119
Tabela 5.12 Comparação entre resultados experimentais e simulações da prensagem em escala piloto e industrial para a mistura I63-B25-M12 utilizando-se o parâmetro $S1E$ diretamente da escala de bancada e parâmetro escalonado	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	.....	<i>Capacidade (t/h)</i>
t	.....	<i>Tonelada</i>
h	.....	<i>Hora</i>
E_{sp}	.....	<i>Consumo específico de energia (kWh/t)</i>
P	.....	<i>Potência com carga (kW)</i>
P'	.....	<i>Potência em vazio (kW)</i>
F_{sp}	.....	<i>Força específica (N/mm²)</i>
F	.....	<i>Força (kN)</i>
D	.....	<i>Diâmetro</i>
L	.....	<i>Comprimento</i>
x_g	.....	<i>Abertura operacional</i>
x_{stud}	.....	<i>Distância entre pinos</i>
x_p	.....	<i>Penetração na camada autógena</i>
U	.....	<i>Velocidade (m/s)</i>
U_g	.....	<i>Velocidade do minério (m/s)</i>
m	.....	<i>Massa</i>
\dot{m} ou $m\text{-dot}$	.....	<i>Capacidade Específica (ts/m³h)</i>
α_{ip}	.....	<i>Ângulo de captura (°)</i>
ρ_g	.....	<i>Densidade do floco (t/m³)</i>
ρ_a	.....	<i>Densidade aparente do minério (t/m³)</i>
ρ_{sp}	.....	<i>Densidade específica do minério (t/m³)</i>
t	.....	<i>Tempo</i>
τ	.....	<i>Torque (kN*m)</i>
k_d	.....	<i>Parâmetro de Donda (t/kWh)</i>
b_d	.....	<i>Percentual retido na malha de controle (%)</i>
a	.....	<i>Coefficiente angular</i>

B	Área superficial específica inicial (ensaio Donda) (cm^2/g)
r	Taxa de quebra
k_r	Parâmetro operacional da máquina de Dunder et al.
α	Parâmetro de Dunder et al.
x_i	Tamanho da partícula
x_f	Tamanho inicial da partícula
x_{50}	Tamanho com 50% passante
$W_{inicial}$	Massa da fração original
$W_{quebrada}$	Massa de partícula quebrada
j	Parâmetro
t_{10}	Quantidade de partícula 1/10 do tamanho original
A e b	Parâmetros da equação de t_{10} .
S_1^E	Parâmetro da Função quebra
BSA	Área superficial específica ou Blaine (cm^2/g)
ΔBSA	Incremento de área superficial específica ou incremento de Blaine (cm^2/g)

1. INTRODUÇÃO

O processo de cominuição constitui uma etapa importante na produção de bens minerais. Tanto da parte econômica como da adequação de suas propriedades físicas e mineralógicas, o produto de equipamentos de cominuição determina o desempenho de etapas de separação, concentração ou adequação da granulometria de produtos (ALVES, 2012).

Normalmente, equipamentos como britadores, moinhos e prensas de rolos são utilizados como ferramentas para promover a redução de tamanho das partículas dos minerais de interesse. Prensas de Rolos, também chamadas de "*High Pressure Grinding Rolls* (HPGR)", têm constituído nos últimos anos um importante avanço dentro da área da cominuição, bem como do processamento de minérios (BARRIOS, 2015).

O desenvolvimento da Prensa de Rolos (HPGR) começou após um estudo fundamental sobre o esmagamento interparticular em leito de partículas desenvolvido pelo Professor Klaus Schönert da Universidade de Clausthal na Alemanha (SCHÖNERT, 1988; BARRIOS, 2015).

Desde a introdução do HPGR em 1984 como aplicação de moagem na indústria de cimento, o projeto e a engenharia das máquinas passaram por uma curva de aprendizagem e desenvolvimento apreciável (VAN DER MEER, 1997). Utilizada inicialmente em larga escala por indústrias de cimento e posteriormente no processamento de minérios contendo diamantes, a prensa de rolos passou a ser incorporada em circuitos de cominuição de minérios metálicos a partir da sua aplicação na mina de Los Colorados no Chile (CAMPOS, 2017) nas britagens terciária e quaternária de minério de ferro.

A tecnologia de fragmentação por Prensa de Rolos (HPGR) tem ganhado espaço na indústria de transformação mineral em todo mundo, face à competitividade dos custos operacionais envolvidos neste equipamento quando comparado às outras alternativas (TAVARES, 2005; VAN DER MEER, 2010) e vem atingindo níveis de maturidade necessárias para serem utilizadas no processamento de uma grande variedade de tipos de minérios, incluindo a preparação de pellet feed de minério de ferro, para aplicação no processo de Pelotização. A aplicação deste equipamento na preparação do *pellet feed* é importante por ser capaz de aumentar a área superficial

específica do produto com um consumo energético reduzido (MICHAELIS, 2009). No caso da aplicação de HPGR para preparação de *pellet feed*, as instalações atuais localizam a prensa de rolos após a moagem e a filtragem, como um estágio final de cominuição antes da peletização, ou como uma pré-trituração antes dos moinhos de bolas (VAN DER MEER, 1997). Em 1996 a VALE S.A, na época Companhia Vale do Rio Doce, depositou uma patente sobre prensagens múltiplas para produção de *pellet feed* (PI 9602479-8 A). Atualmente está sendo desenvolvido um estudo pela VALE S.A para que a preparação do *pellet feed* seja integralmente realizada por HPGR com múltiplas prensagens, conforme definido na patente de 1996.

Uma série de desafios envolvem o processo de prensagem de *pellet feed* do ponto de vista da granulometria do produto e geração de área superficial específica ou Blaine, que incluem a tipologia do minério, a umidade e a pressão de trabalho. Isso influencia o aumento da área superficial específica do material (Blaine) e acarreta em uma maior dificuldade do controle de processo. Diante destes desafios foi denominado neste trabalho, prensabilidade com sendo a mensuração do comportamento de quebra dos minérios neste equipamento.

A realização de testes industriais de prensagem em diferentes configurações de circuitos e parametrizações nem sempre é viável, devido principalmente a questões de custo e logística associadas ao transporte, preparação do material e número de testes a serem realizados. A utilização de simulação computacional associada a ensaios em escala de bancada e/ou piloto, podem se mostrar como uma ótima alternativa para otimização de circuitos existentes e/ou desenvolvimento de novo circuito a ser implantado.

Neste caso, a modelagem matemática deve ser robusta suficiente a fim de representar em diferentes escalas, os fenômenos envolvidos no processo de prensagem em uma usina industrial.

2. OBJETIVO GERAL

Estudar os efeitos das principais variáveis do processo no comportamento de prensagem de minério de ferro da VALE S.A. para produção de *pellet feed*, visando fornecer subsídios para entender a prensabilidade do minério, o escalonamento e a aplicação de um modelo matemático na previsão da qualidade do produto gerado no HPGR e sua representatividade em escalas de Bancada, Piloto e Industrial.

2.1 Objetivos específicos

- i. Entender o comportamento de minérios de ferro quanto à sua prensabilidade e comparar à moabilidade.
- ii. Estudar o comportamento do HPGR em escalas de Bancada, Piloto e Industrial.
- iii. Aplicar modelo matemático em escala Piloto e Industrial e avaliar sua representatividade nestas escalas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico da Prensa de Rolos - HPGR

O desenvolvimento da Prensa de Rolos (HPGR) começou após um estudo fundamental sobre o esmagamento interparticular. Neste trabalho um leito de partículas foi carregado por força compressiva por meio de um pistão (SCHÖNERT, 1988). Este método de cominuição foi patenteado em 1979 na Alemanha e em 1985 nos Estados Unidos, pelo Professor Klaus Schönert da Universidade de Clausthal na Alemanha (BARRIOS, 2015).

A tecnologia de prensa de rolos não é inteiramente nova. O conceito pode ter sido concebido com base em prensas de rolos manufaturadas pela Köppern em 1918 que foram largamente utilizadas na briquetagem de pós (ALVES, 2012), como apresentado na Figura 3.1.

Projetos existentes de prensas de rolos foram desde então modificados para empregar o conceito do chamado esmagamento entre partículas sob condições operacionais contínuas. De fato, é o conceito de sujeitar um leito de partículas a uma pressão superior a 50 MPa, causando a quebra das partículas por força de contato (DANIEL, 2002).

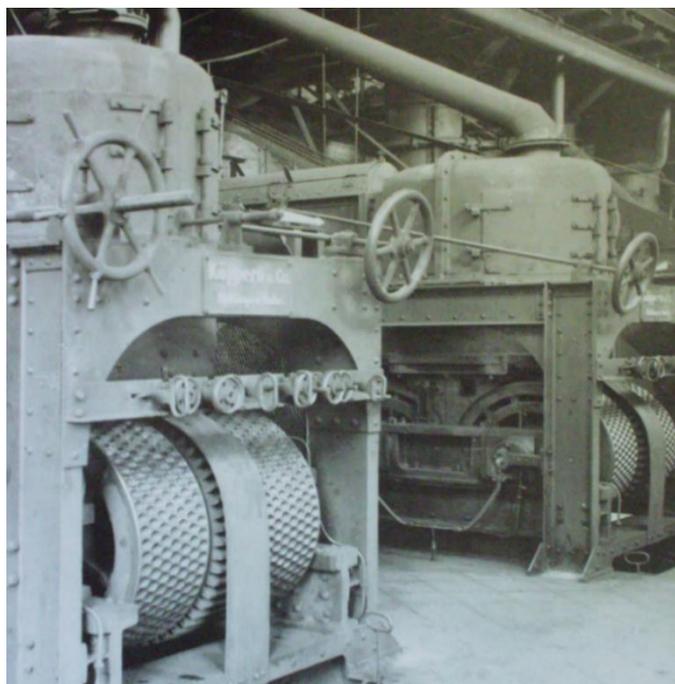


Figura 3.1 Prensas de rolos fabricadas pela Köppern, usadas para a briquetagem de materiais finos (DANIEL, 2002)

Desde a introdução do HPGR em 1984 como aplicação de moagem na indústria de cimento, o projeto e a engenharia das máquinas passaram por uma curva de aprendizagem e desenvolvimento apreciável, cujo resultado é o crescimento gradual de sua aceitação no setor mineral (VAN DER MEER, 1997).

Um grande número de publicações destacou os benefícios e a aplicabilidade do HPGR para a indústria mineral. Geralmente, pode-se afirmar que a tecnologia se destaca pelo menor consumo específico de energia, quando comparado à moagem de bolas (SCHÖNERT, 1988). Schönert (1988) explica que a razão para isso está no transporte controlado promovido pela compressão das prensas de rolos resultando em uma grande proporção de energia disponível usada única e exclusivamente para estressar o material com esta compressão, que pode atingir densidades do leito de 70% a 85% da densidade real do minério. Os fabricantes KHD, Krupp Polysius e Köppern obtiveram concessões de uso da patente de Schönert. Atualmente fabricantes como FLSmidth, Metso, Argo, entre outros, também produzem suas próprias prensas de rolos. Isto resultou em diferentes versões das prensas de rolos atuais, sendo que a mais comumente usada é mostrado na Figura 3.2.

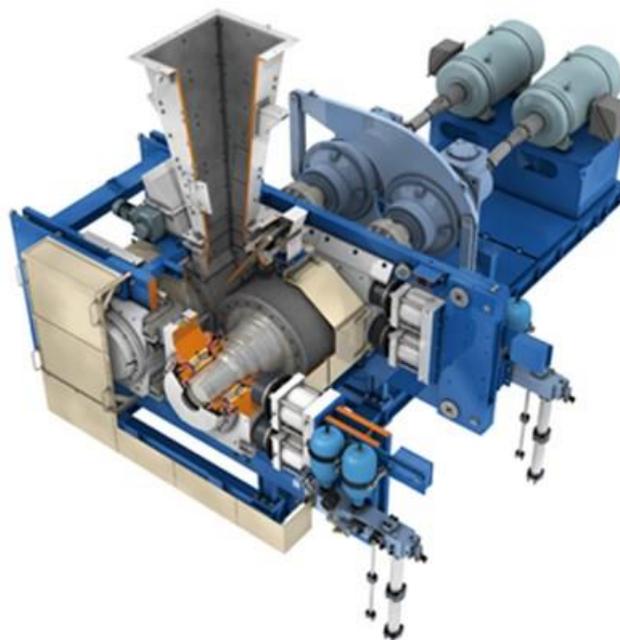


Figura 3.2 Representação de uma prensa de rolos atual (FLSmidth, 2011)

3.2 Princípio de Funcionamento do HPGR

Em uma primeira análise, as prensas de rolos podem ser confundidas com britadores de rolos, porém existem características particulares nestes dois equipamentos

que se diferenciam. Britadores de rolos convencionais têm sido usados na indústria mineral há muito tempo, mas restritos a minerais muito friáveis, como calcário e carvão (OTTE, 1988). Em contrapartida, as prensas de rolos podem ser consideradas como equipamentos de cominuição especiais com potencial para substituir britadores nas etapas de cominuição, SAG, moinhos de barras e moinhos de bolas (ALVES, 2012), este último, também para produção de *pellet feed*.

As prensas de rolos operam com velocidades periféricas inferiores àquelas usadas em britadores de rolos convencionais. Nos britadores a alimentação na câmara de britagem é de tal forma que partículas são sujeitas aos esforços individualmente, o que gera uma grande quantidade de vazios. Já na prensa de rolos é formado um leito de partículas permitindo uma moagem interparticular (BARRIOS, 2015; ALVES, 2012).

A maior diferença entre britadores de rolos convencionais e a prensa de rolos, refere-se ao sistema hidráulico que compõe o HPGR, conforme apresentado na Figura 3.3. O sistema hidráulico permite o movimento oscilatório do rolo móvel durante a operação, enquanto nos britadores de rolos a distância entre os rolos é pré-fixada e se mantém constante durante a operação do equipamento. Essa diferença é muito relevante em relação à forma de transferência de energia da máquina para a partícula, o que leva a resultados distintos em relação à granulometria do produto (ALVES, 2012).



Figura 3.3. Sistema hidráulico da prensa de rolos: Cilindros hidráulicos (A), Acumuladores de Nitrogênio (B)

Basicamente, a prensa de rolos consiste em dois rolos acionados por motores elétricos, girando em sentidos opostos, que recebe a alimentação por gravidade por meio de uma calha de alimentação. O material a ser cominuído é prensado entre os rolos pelo sistema hidráulico que empurra o rolo móvel contra o rolo fixo. Os rolos são apoiados sobre mancais que estão confinados em uma estrutura rígida. A Figura 3.4 apresenta de forma esquemática uma prensa de rolos com seus principais componentes.

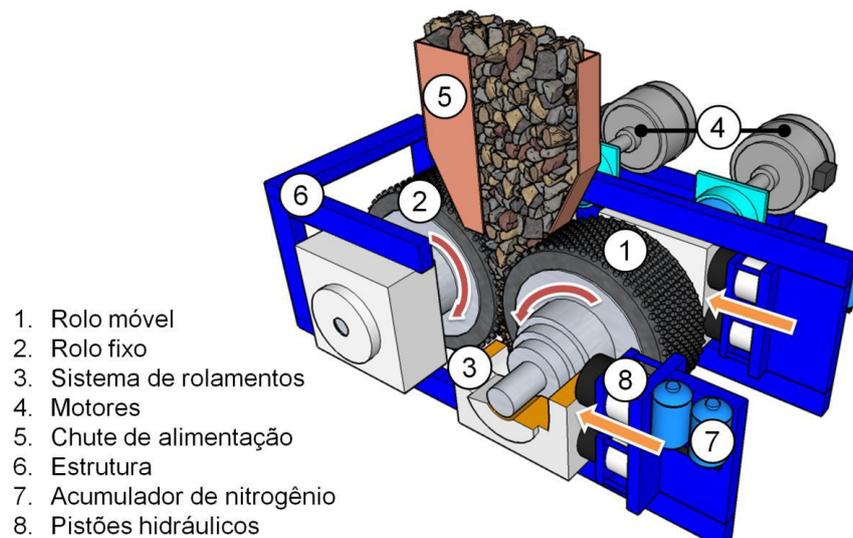


Figura 3.4 Apresentação esquemática da prensa de rolos (BARRIOS, 2015)

Dependendo do modelo da prensa de rolos, ela pode conter dois ou quatro cilindros hidráulicos, bem como acumuladores de nitrogênio distribuídos dos lados direito e esquerdo do rolo móvel. Uma bomba hidráulica pressiona o óleo, comprimindo a câmara dos acumuladores de nitrogênio que transfere a energia para os rolos, promovendo a compressão do leito do material a ser cominuído (Figura 3.5).

Os acumuladores de nitrogênio funcionam como molas pneumáticas, que podem ser mais rígidas ou mais flexíveis dependendo da pressão do gás em seu interior. A pressão de nitrogênio normalmente varia entre 50 e 75% da pressão hidráulica de operação (ALVES,2012). Pressões mais baixas geram uma maior rigidez, enquanto que pressões maiores proporcionam maior flexibilidade ao sistema, permitindo maior abertura operacional entre os rolos (DANIEL,2002).

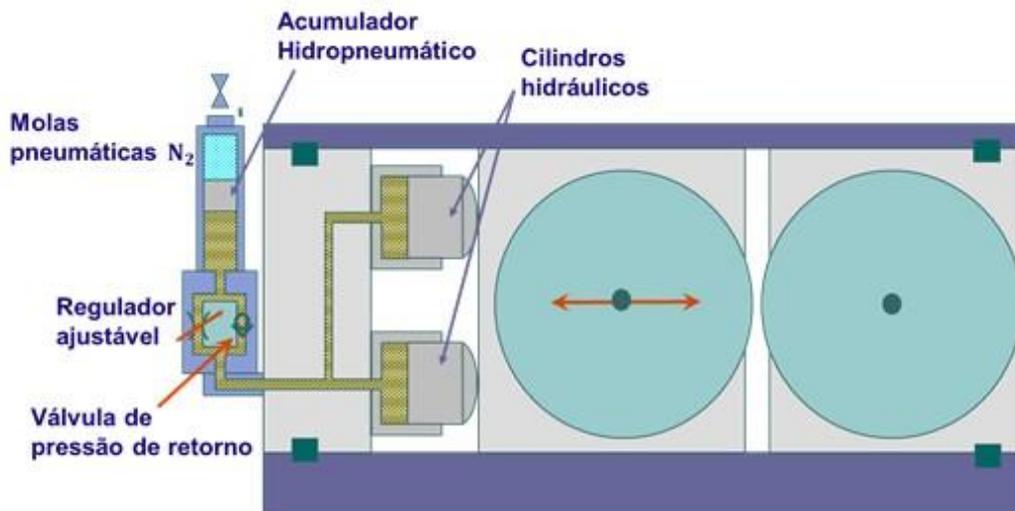


Figura 3.5. Esquema do sistema hidropneumático (THYSSENKRUPP, 2018)

Em linhas gerais o princípio de funcionamento das prensas dos diversos fabricantes é o mesmo. Recentemente a Metso e Argo propuseram uma modificação nos projetos originais com a introdução de flanges para promover a vedação lateral em substituição aos tradicionais *cheek plates*. As diferenças entre estes dois sistemas de vedação estão relacionadas ao efeito de borda e serão tratadas na seção 3.11.

Quanto à parte construtiva do equipamento a principal diferença é que no projeto original, existe um certo grau de liberdade relacionado ao desalinhamento dos rolos, já no novo conceito, os rolos estão sempre paralelos, o que garante uma abertura operacional constante ao longo da largura do rolo. Este paralelismo constante é garantido por um tubo de torção (OLIVEIRA, 2016).

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 tem uma pequena parte absorvida pela base, sendo o restante absorvido pelos cilindros hidráulicos, em decorrência do aumento da pressão (OLIVEIRA, 2016). A Figura 3.6 ilustra de forma esquemática os dois conceitos.

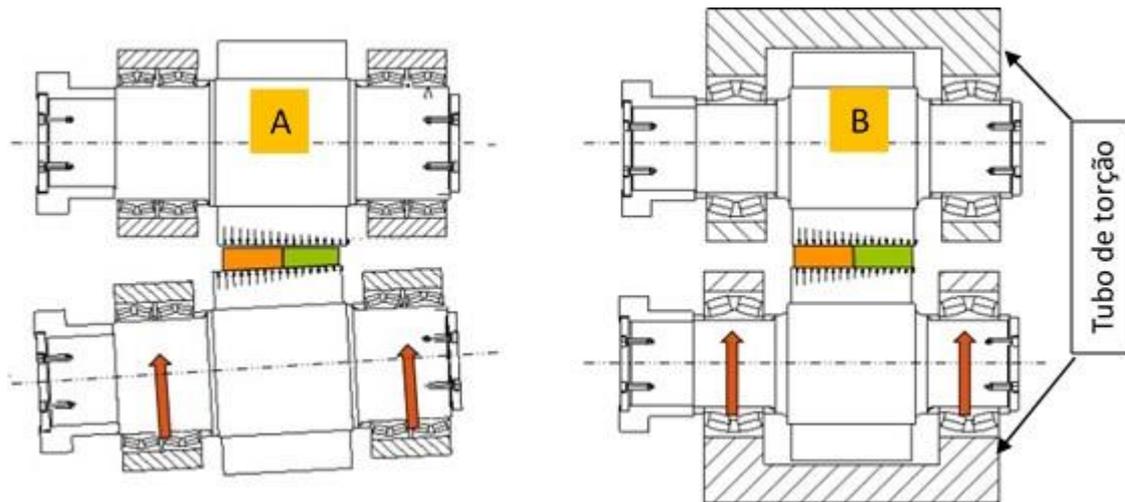


Figura 3.6 Conceito tradicional (A) e novo conceito com rolos paralelos (B) (adaptado de OLIVEIRA, 2016)

3.3 Características dos rolos e revestimentos do HPGR

A prensa de rolos, assim como os demais equipamentos de processamento mineral, tem custo relativamente elevado. Os rolos e revestimentos das prensas fazem parte de uma fração expressiva do custo da prensa de rolos (ROSARIO, 2017). Este fato tem levado ao desenvolvimento da tecnologia construtiva dos rolos voltada à adequação para as diversas aplicações (DANIEL, 2002).

Existem quatro tipos de configurações do eixo dos rolos que podem ser utilizados em conjunto com uma de série revestimentos, dependendo da aplicação:

- Rolo sólido: A bandagem e o eixo formam uma peça única, conforme mostrado na Figura 3.7 (A) cujo custo de fabricação é baixo, porém com o desgaste do revestimento faz-se necessária a troca do conjunto completo. Este modelo encontra-se praticamente em desuso (BARRIOS,2015)
- Rolo Segmentado: São vários segmentos de rolos montados sobre um eixo. Possui como vantagem a troca segmentada do revestimento conforme necessidade, sem a necessidade da troca completa. Esta configuração é apresentada na Figura 3.7 (B).
- Rolo Bandagem-Eixo: A Figura 3.7 (C) apresenta este arranjo que é o mais comumente usado. Consiste em um revestimento na forma de pneu montado sobre um eixo sólido.

- Rolo Bandagem na Bandagem (*tyre on tyre*): Trata-se de uma evolução do modelo bandagem-eixo, possuindo duas bandagens sobrepostas sobre o eixo, o primeiro denominado manga e o segundo, corpo (THYSSENKRUPP, 2018). Sua vantagem é que, em caso de necessidade troca do revestimento, apenas o corpo é trocado, mantendo-se o eixo e a manga montados (Figura 3.8).

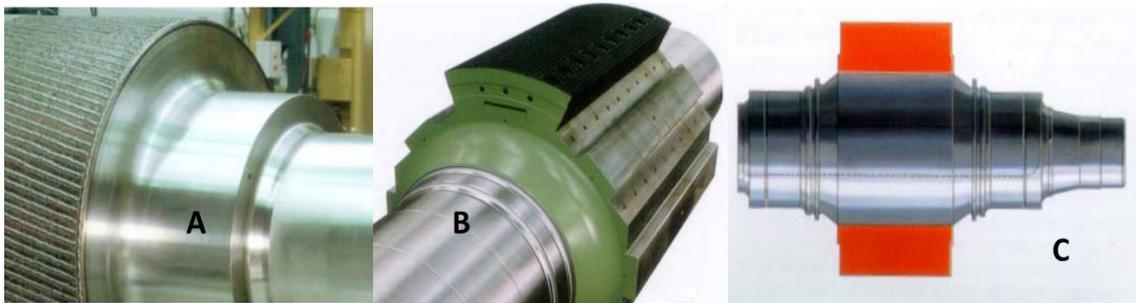


Figura 3.7 Tipos de Rolos: (A) Sólido, (B) Segmentado e (C) Bandagem-Eixo (DANIEL, 2002)

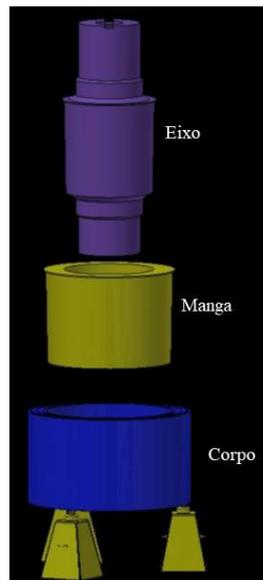


Figura 3.8. Rolo Bandagem-na-Bandagem (*Tyre-on-Tyre*) (THYSSENKRUPP, 2018)

Quanto ao revestimento, os primeiros projetos foram emprestados do setor de cimento e composto por ligas Ni-Hard lisas e posteriormente perfiladas com soldas. Este método teve uma vida limitada devido ao elevado desgaste quando usado em minérios abrasivos (MORLEY, 2010). Por essa razão, foram desenvolvidos rolos pinados de metal duro (*studded*) patenteado pela KHD. Estes rolos pinados proporcionaram uma maior vida útil devido ao fato de ambas as superfícies serem resistentes ao desgaste, mas acima de tudo devido à incorporação de uma camada autógena. Esta camada de

desgaste autógena é formada pelo próprio minério, entre os pinos nos rolos. Desta forma, a superfície do rolo é revestida e protegida contra o desgaste direto da rocha (VAN DER MEER, 1997). A Köppern desenvolveu um outro tipo de revestimento denominado Hexadur[®], que são ladrilhos hexagonais resistentes ao desgaste, confeccionados com metal duro e inseridos em uma matriz macia e distanciados de forma a deixar que uma camada autógena seja formada entre os ladrilhos (MORLEY, 2010). Os tipos de revestimentos citados podem ser visualizados na Figura 3.9.

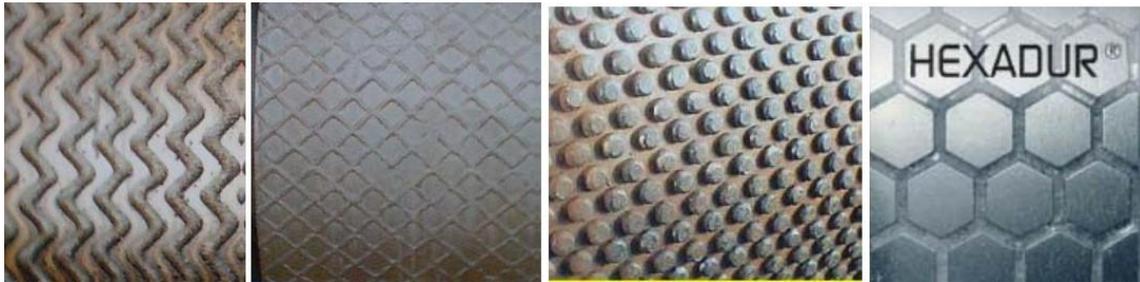


Figura 3.9 Tipos de revestimentos dos rolos, perfilados com solda (A e B), pinado (C) e Hexadur[®] (D) (DANIEL, 2002)

Ainda com todo avanço de novas tecnologias que vem ocorrendo em relação ao revestimento dos rolos, a resistência ao desgaste é o grande desafio para elevar a vida útil do rolo. O desenvolvimento de novos materiais resistentes ao desgaste associado a uma elevada resistência mecânica será a chave para aumentar a durabilidade do equipamento. Na Figura 3.10 pode-se observar dois rolos pinados aplicados a *pellet feed*, sendo um novo 3.10 (A) e outro desgastado 3.10 (B).

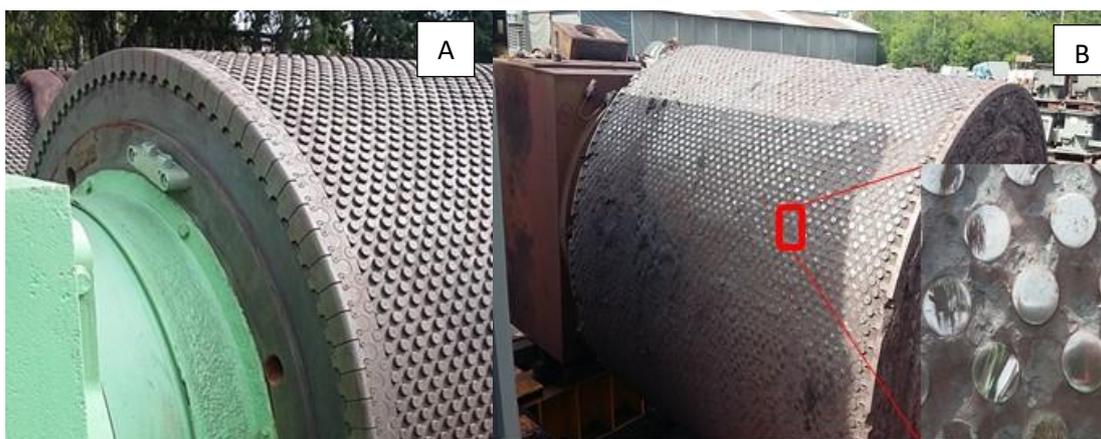


Figura 3.10. Rolo novo (A) e rolo desgastado (B)

3.4 Aplicações para prensa de rolos

A prensa de rolos teve sua primeira aplicação na indústria cimenteira a partir de 1984, visando aumentar a capacidade de operação de usinas. Em seguida, várias configurações de circuito foram derivadas para obter redução no consumo específico de energia geral, transferindo mais do esforço de moagem para o HPGR (DUNDAR et al., 2013).

Devido ao material pré-moído e microfissuras formadas nas partículas, a capacidade da moagem a jusante aumenta enquanto o consumo específico de energia diminui (KELLERWESSEL, 1993). Kellerwessel (1987) relata uma das primeiras aplicações da prensa de rolos sendo utilizada para fabricação de um tipo de cimento, utilizando escória de alto forno e clínquer. No mesmo artigo ele comenta sobre testes com prensa de rolos realizados pela KHD Humboldt Wedag para cominuição de carvão granulado.

Em meados dos anos noventa, instalações de HPGR foram implantadas na indústria mineral, principalmente na pelotização de minério de ferro e na moagem de quimberlitos contendo diamante. Isto foi seguido por aplicações em moagem de rocha dura como minérios de cobre, ouro e platina (DUNDAR et al., 2013).

A indústria de diamantes, ainda na década de 1980, adotou o HPGR para promover a liberação deste mineral da rocha matriz. Neste tipo de aplicação, o HPGR é capaz de liberar preferencialmente diamantes grandes por destaque, utilizando-se uma abertura operacional entre rolos que excede o tamanho das gemas maiores (ALVES, 2012; DANIEL, 2002).

Desde 1996, as prensas de rolos foram paulatinamente introduzidas na indústria de minério de ferro, sendo uma das primeiras aplicações na mina de minério de ferro de Los Colorados, no Chile. Neste processo foi observada a vantagem de substituir as etapas de britagem terciária e quaternária, por uma unidade da prensa de rolos, o que viabilizou o projeto em termos econômicos e operacionais (ALVES, 2012; BARRIOS, 2015). Unidades foram vendidas internacionalmente para vários produtores de minério de ferro com operações localizadas nos Estados Unidos, no Chile, no Brasil, na Índia e na China (DANIEL, 2002).

Nesta mesma época foi estudada a aplicação de HPGR para minério mais competentes. O estudo inicial se deu na mina de cobre denominada Cyprus Sierrita, no

estado do Arizona, nos Estados Unidos. Devido ao desgaste acentuado dos rolos, a disponibilidade foi de 60 %, muito baixa quando se comparava aos resultados encontrados na indústria do cimento, que vinha obtendo valores de 92 a 95%. Estes resultados foram devido à utilização de rolos lisos, semelhantes aos usados na indústria cimenteira (MORLEY, 2010). Após uma década, a tecnologia dos revestimentos se consolidou quando veio a aplicação industrial para minério de cobre, desta vez na mina de Cerro Verde no Peru (BARRIOS, 2015). Em 2008 a empresa Anglo Platinum encomendou duas unidades HPGR para ser instaladas nas usinas de Mogalakwena North e de Northam UG2, ambas na África do Sul. A instalação das unidades HPGR nas usinas cumpriu os objetivos de aumentar a capacidade de processamento aproximadamente em 25%, enquanto reduziu os custos operacionais e de consumo de energia, melhorando a recuperação de platina e reduzindo os níveis de cromo no concentrado final (RULE et al., 2008). A tecnologia da prensa de rolos atingiu o nível de maturidade necessário para ser aplicada na indústria do processamento de minérios competentes como de cobre, platina e ouro (ALVES, 2012) e as indústrias destes minerais são conscientes dos possíveis benefícios do uso da tecnologia de prensa de rolos.

Com o crescente desenvolvimento tecnológico e aplicação da técnica, muitas empresas que atuam no Brasil passaram a incorporar a prensa de rolos em seus circuitos de cominuição (CAMPOS et al., 2016). Os principais exemplos de utilização desta tecnologia hoje no Brasil em indústrias de produção de minérios metálicos são na britagem terciária e quaternária de minério de ferro itabirítico do projeto Minas-Rio (Conceição do Mato Dentro – MG), nas etapas de britagem de minério de cobre na mina de Salobo (Marabá – PA) e em várias usinas de pelletização da VALE S.A e da Samarco S.A.

3.5 Aplicações do HPGR em Pellet Feed

As aplicações iniciais da prensa de rolos na indústria mineral foram seguidas por uma aceitação particularmente ampla para minérios de ferro (VAN DER MEER, 1997). Além das aplicações de britagem terciária e quaternária em uma ampla variedade de tipos de minério, a tecnologia de HPGR também é aplicada na remoagem de concentrado para produção de pelotas de minério de ferro. Um número relativamente grande de unidades foi ou está sendo instalada na produção de pelotas de minério de

ferro nos últimos anos em todo o mundo, seja em circuitos de passagem única em combinação com moagem de bolas ou circuito fechado de múltiplas prensagens em arranjo independente (VAN DER MEER, 2015). Enquanto a função do HPGR nas operações de fragmentação obviamente é a redução de tamanho, a principal finalidade nas aplicações de alimentação de *pellet* é uma combinação de geração de finos com ênfase principal no aumento de área superficial específica.

A área superficial específica ou BSA (*Blaine Surface Area*) expressa em cm^2/g , representa o somatório da área superficial das partículas por unidade de massa. Este parâmetro é normalmente mensurado indiretamente através do ensaio de permeabilidade utilizando-se o permeabilímetro de Blaine. É comum nas indústrias pelotizadoras e cimenteiras, utilizar-se da nomenclatura “Blaine” para expressar a área superficial específica ou BSA. O incremento de área superficial específica é também chamado de ΔBSA .

Durante a década de 1990 uma série de plantas de pelotização passaram a adotar a prensa de rolos como um equipamento importante em seus circuitos de cominuição. Schönert (1979) afirmou que o método mais eficiente para quebrar partículas, em termos de utilização de energia, após a quebra de partículas individuais, é comprimir partículas em leitos. Esta foi a principal motivação para o uso desta tecnologia nas unidades pelotizadoras.

Em 1995, a VALE S.A, então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) iniciou, como uma das pioneiras a implantação da prensa de rolos em seu circuito de cominuição combinada com o processo de moagem, já existente em suas plantas de Pelotização na Unidade de Tubarão em Vitória, no Espírito Santo. Inicialmente foram instaladas duas prensas de rolos, uma na pré-moagem (Usinas I e II) e outra na remoagem com o produto da filtragem após o moinho de bolas (Usina IV) (VAN DER MEER, 1997). As Figuras 3.11 e 3.12 ilustram estes dois circuitos nas instalações da VALE S.A. Esta aplicação se mostrou extremamente benéfica para a preparação de *pellet feed*, e hoje a VALE S.A possui dez prensas de rolos em suas pelotizadoras distribuídas em suas Unidades de Vitória-ES, Nova Lima-MG e São Luís-MA.

Além dos circuitos citados com prensa de rolos antes ou após moagem, alguns autores sugerem rotas diferentes. Um arranjo de reciclagem de produtos (VAN DER MEER e GRUENDKEN, 2008) é projetado para obter aumentos maiores de área

superficial específica (BSA). Van der Meer (2015) realizou diferentes experimentos com prensagens em único estágio, múltiplos estágios e circuito fechado com reciclo de borda. Neste último foi verificado um aumento na área superficial específica. No entanto obteve-se uma elevação no consumo de energia para a mesma taxa de alimentação. Instalações de prensa de rolos em estágio simples conjugado com moagem de bolas para processamento de *pellet feed* tendem a aumentar a capacidade e diminuir o consumo de energia elétrica (EHRENRAUT, 2001).

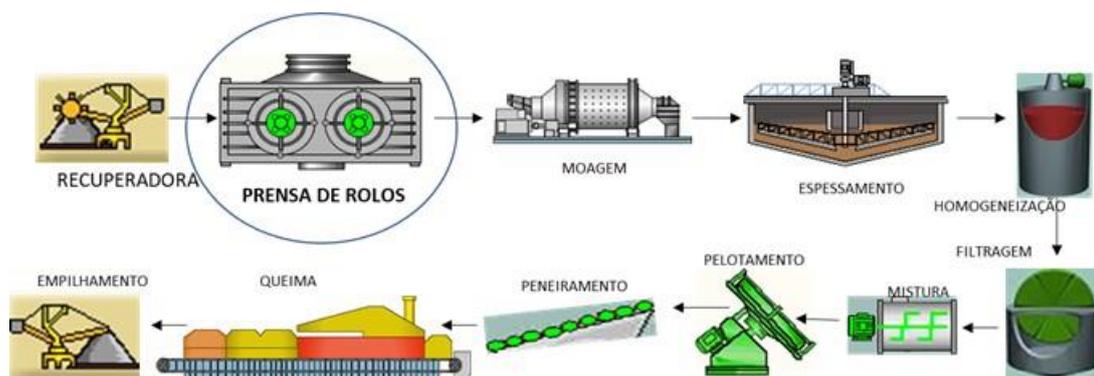


Figura 3.11. Representação esquemática de usina de pelotização com HPGR antes da moagem

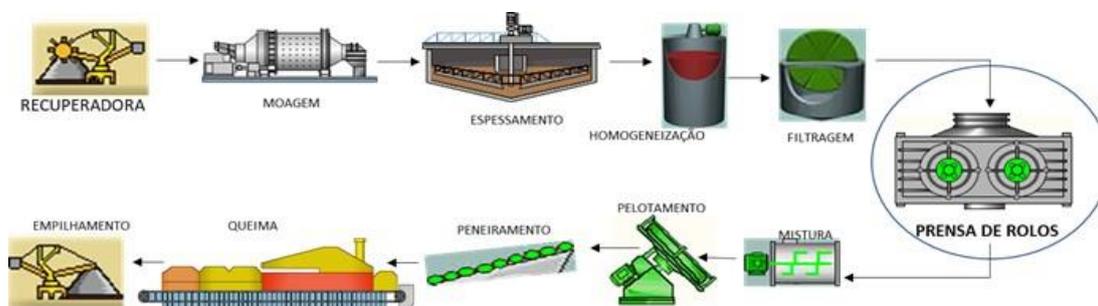


Figura 3.12. Representação esquemática de usina de pelotização com HPGR após a moagem

Visando uma simplificação do processo produtivo de pelotas, atualmente a VALE S.A está desenvolvendo um projeto inovador, conforme patente de sua propriedade, para suprimir a etapa de moagem na preparação do *pellet feed* através de múltiplas prensagens em HPGR, eliminando também toda a fase úmida do processo de produção de pelotas. Esta nova configuração é ilustrada na Figura 3.13.

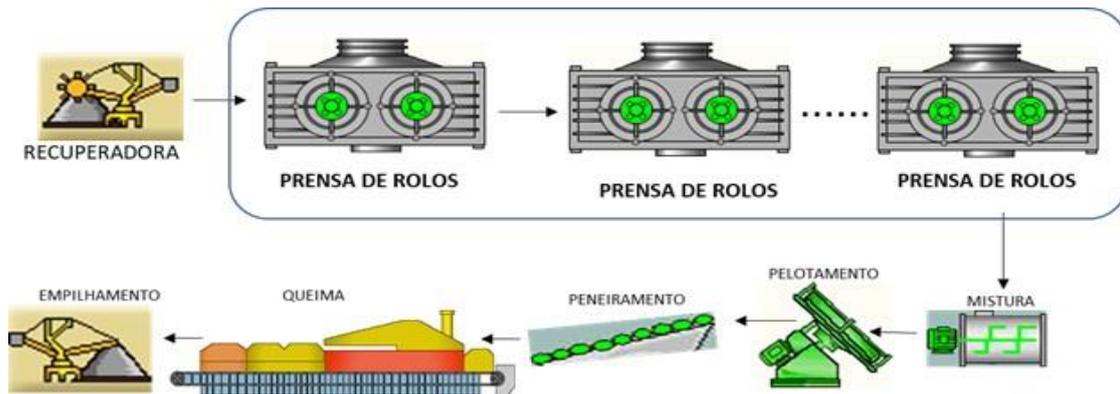


Figura 3.13. Representação esquemática de multiprensagem, eliminando toda fase úmida do processo de pelotização

Além da VALE S.A. outras empresas como LKAB Kiruna e LKAB Mamberget na Suécia, IDI nos EUA e Kudremukh na Índia, adotaram a prensa de rolos para prensagem de *pellet feed* em suas usinas ainda na década de 1990 (VAN DER MEER, 1997).

Na moagem de *pellet feed*, atualmente principalmente à frente ou após a moagem de moinho de bolas, os HPGRs mostraram uma série de benefícios:

- O material triturado por HPGR apresenta razão de redução de tamanho relativamente alta, enquanto gera uma alta proporção de finos (CHAPMAN et al., 2013; MÖRSKY et al., 1995);
- Os HPGRs normalmente geram uma alta proporção de finos, possivelmente não por quebrar partículas por pressão, mas provavelmente mais por atrito e cisalhamento de superfícies de partículas no leito de partículas finas de material úmido. Dependendo das proporções e condições do material de alimentação aplicadas, um aumento na área de superfície específica (ΔBSA) entre 300 cm²/g e 600 cm²/g de Blaine pode ser alcançado em uma única passagem (VAN DER MEER, 2015);
- Em alguns casos, também foi indicado que a forma das partículas do HPGR seria diferente, mais angular em comparação com produtos de moinho de bolas. Isto, juntamente com uma alta proporção de finos, permitiria que um produto HPGR fosse adequado para pelotização a um valor mais baixo de Blaine (BLEIFUSS, 1997);
- Pelotas mais resistentes e mais uniformes foram produzidas a partir dos produtos HPGR, com uma menor demanda por aglomerante (EHRENTAUT e RAO, 2001).

- Redução do consumo de energia através da introdução de microfissuras, que ajudam a aumentar a taxa de produção e / ou a finura do material (SHU e YONGQING, 2008) (Figura 3.14).

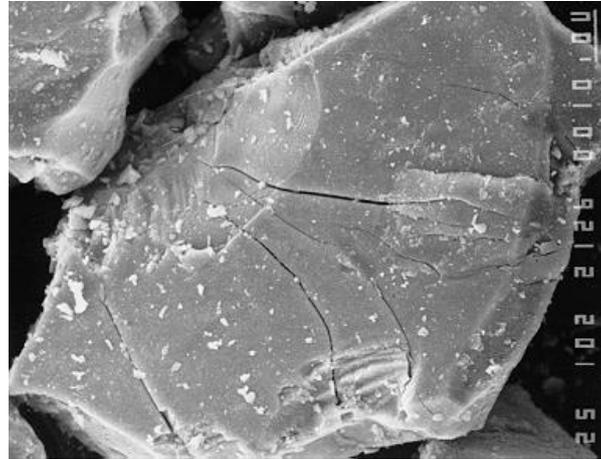


Figura 3.14. Microfissuras geradas após o a passagem do pellet feed pelo HPGR – ampliação 1000 X (ODENWALD et al., 2003)

3.6 Variáveis operacionais da prensa de rolos

Assim como em qualquer equipamento de produção industrial, termos técnicos são introduzidos de forma a poder modelar, escalonar e controlar a operação para um bom desempenho das prensas de rolos. Estes parâmetros operacionais são selecionados para serem monitorados e garantir um bom desempenho do equipamento.

Um desenho esquemático é apresentado na Figura 3.15, que mostra algumas destas variáveis.

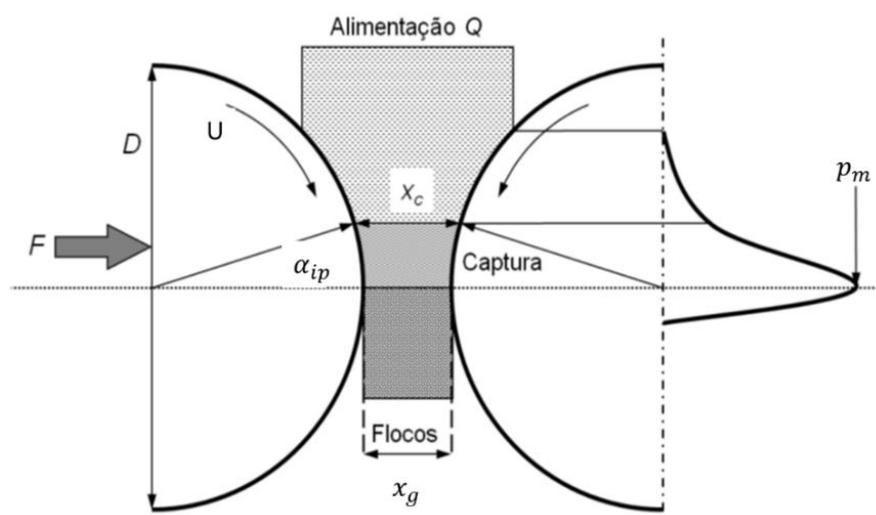


Figura 3.15. Desenho esquemático das variáveis operacionais da prensa (BARRIOS, 2015)

3.6.1 Capacidade - Q

Este parâmetro mede a quantidade de material em massa (m) processada na prensa de rolos por unidade de tempo (t). Normalmente a capacidade é representado pela letra Q conforme Equação 3.1. Esta grandeza é expressa em t/h.

$$Q = \frac{m}{t} \quad \text{Equação 3.1}$$

O deslocamento do material entre o chute de alimentação até sua saída pela abertura operacional segue o modelo de fluxo pistonado (AUSTIN, 1993). Baseado neste estudo Austin (1993) propôs a Equação 3.2 para calcular a capacidade Q (t/h) de uma prensa em função do comprimento L (m), da velocidade do material U_g (m/s), da abertura operacional x_g (m) e da densidade do floco na abertura operacional ρ_g (t/m³):

$$Q = LU_g x_g \rho_g \quad \text{Equação 3.2}$$

3.6.2 Consumo Específico de Energia - E_{sp}

O consumo de específico de energia (E_{sp}), expresso em kWh/t, é definido como o consumo de energia líquida ($P - P'$), onde P é a potência do equipamento operando com carga e P' a potência do equipamento em vazio por unidade de massa de material alimentado (Q). A Equação 3.3 apresenta esta relação. Este parâmetro é independente do tamanho do equipamento, sendo uma função aproximadamente linear da força de compressão específica. Os valores normais na operação se encontram na faixa de 1 a 3 kWh/t (MORLEY, 2010).

$$E_{sp} = \frac{P - P'}{Q} \quad \text{Equação 3.3}$$

3.6.3 Força Específica de Compressão - F_{sp}

A força específica de compressão é definida como a força aplicada aos rolos dividida por sua área projetada (diâmetro x comprimento) (SCHÖNERT, 1988), conforme é mostrado na Equação 3.4. Essa grandeza é expressa em N/mm². A força aplicada aumenta proporcionalmente com o tamanho do equipamento, no entanto, por ser específica em relação à área projetada, pode ser normalizada tornando-a independente ao tamanho do equipamento (VAN DER MEER, 1997). Os valores típicos

de força específica de compressão operacionais estão na faixa de 1-4,5 N/mm² para revestimentos com pinos, e até 6 N/mm² para revestimentos do tipo Hexadur (MORLEY, 2010).

$$F_{sp} = \frac{F}{DL} \quad \text{Equação 3.4}$$

3.6.4 Abertura Operacional - x_g

A abertura operacional, ou simplesmente *gap*, é definida como a distância mínima, em mm, entre os pinos (*studs*) dos rolos fixo e móvel do HPGR. O *gap* é um parâmetro que sofre influência das propriedades físicas do material alimentado, da força específica aplicada, do desgaste da superfície do rolo, e da velocidade dos rolos (BARRIOS, 2015). A abertura de trabalho é um dos principais parâmetros usados na modelagem e escalonamento de prensas de rolos industriais (DANIEL & MORRELL, 2004). Para medição deste parâmetro utiliza-se uma leitura direta através de instrumentos de medição de deslocamento linear do mancal móvel em relação ao fixo. No entanto, Lim e Weller (1999) observaram em seus estudos que a camada autógena permite uma deformação que eleva o valor do *gap* operacional. A partir daí uma estimativa do *gap* de trabalho é obtida a partir das medições feitas pelos instrumentos *on-line* para a folga mínima entre os pinos dos dois rolos (x_{stud}), mais um componente para explicar a profundidade da ponta do pino até a superfície do rolo, a camada autógena. Os valores deste componente foram calculados a partir da média de um número de medições de penetração de pinos na camada autógena multiplicado por um fator que representa a proporção de área de superfície autógena em relação a área de superfície do rolo (LIM & WELLER, 1999). Assim, abertura operacional foi estimado a partir da Equação 3.5:

$$x_g = x_{stud} + 2(fator)x_p \quad \text{Equação 3.5}$$

na qual x_g é a abertura operacional, x_{stud} a distância entre os pinos, x_p a penetração na camada autógena e *fator* refere-se à fração em área de camada autógena em relação à área total do rolo.

3.6.5 Capacidade Específica - \dot{m}

A definição clássica da capacidade específica é dada por KLYMOWSKY et al. (2002) como sendo a capacidade de processamento Q de uma máquina com um diâmetro D do rolo de 1 m, uma largura L de 1 m e uma velocidade periférica U de 1 m/s conforme a Equação 3.6. É uma função das características do material de alimentação e da superfície do rolo, determinada por testes de bancada e piloto, sendo amplamente usada no escalonamento do HPGR. Ela também é conhecida como capacidade específica ou " $m-dot$ ". A unidade utilizada para expressar o $m-dot$ é ts/m³h.

$$\dot{m} = \frac{Q}{DLU} \quad \text{Equação 3.6}$$

3.6.6 Velocidade Periférica - U

A velocidade periférica é um parâmetro de controle em prensas dotadas de motores de velocidades variáveis. Sabe-se que a velocidade dos rolos tem influência direta na capacidade da unidade e, desta forma, ela é utilizada para controlar a vazão de alimentação (LUBJUHN & SCHÖNERT, 1993).

O efeito da velocidade dos rolos na capacidade da prensa de rolos foi estudado por Lubjuhn (1992) na sua tese de doutorado e por Lubjuhn e Schönert (1993), que concluíram que a capacidade é diretamente proporcional à velocidade tangencial dos rolos. Esta afirmação pode ser facilmente compreendida por meio da Equação 3.6. No entanto o aumento da capacidade em função da elevação da velocidade é limitado, devido à extrusão e escorregamento do material. Este assunto será abordado com maior profundidade na seção 3.7.

3.6.7 Ângulo de Captura - α_{ip}

O ângulo de captura é formado entre o ponto na superfície dos rolos que denota a divisão entre as zonas de compressão e o ponto central dos rolos (eixo de rotação), sendo também chamado de ângulo crítico de compressão e sendo expresso em (°) e representado por α_{ip} . O ângulo crítico de compressão situa-se normalmente entre 7 e 9° (KELLERWESSEL, 1996). Austin et al. (1993) propuseram a Equação 3.7 para estimação do ângulo de captura:

$$\cos \alpha_{ip} = \frac{1}{2D} \left[(x_g + D) + \sqrt{(x_g + D)^2 - \frac{4x_g \rho_g D}{\rho_a}} \right] \quad \text{Equação 3.7}$$

sendo ρ_g (t/m³) a densidade do floco e ρ_a (t/m³) a densidade aparente do minério.

O tamanho relativo da zona de compressão é conservado durante o escalonamento se o ângulo crítico de compressão da prensa de teste (escala de bancada) for igual ao ângulo crítico de compressão da prensa industrial (ALVES, 2012).

3.6.8 Torque e Potência

Na zona de compressão da prensa de rolos, o leito de partículas confinado atua como uma alavanca gerando uma forte resistência à rotação. A alta energia dos motores é capaz de gerar torque suficiente para superar esta resistência e forçar a passagem do material entre os rolos. À medida que o leito confinado se move entre os rolos, a pressão no leito aumenta e as partículas são moídas por compressão interparticular sob alta pressão (OTTE, 1988).

No cálculo do torque τ (kNm), Klymowsky et al. (2006) recomendam usar um valor de ângulo de torque, α_τ equivalente à metade do ângulo que limita a zona de quebra interparticular α_{ip} . O cálculo do torque que cada rolo exerce é calculado pela expressão (TORRES e CASALI, 2009):

$$\tau = F \sin \left(\frac{\alpha_{ip}}{2} \right) \frac{D}{2} \quad \text{Equação 3.8}$$

Torres e Casali (2009) propuseram um modelo para o cálculo da potência demandada pela prensa de rolos em função da força de compressão F (kN) aplicada sobre a área efetiva dos rolos.

A potência demandada para movimentar os dois rolos P (kW) é igual ao produto da velocidade periférica U (m/s) dos rolos pelo torque de cada um dos rolos, conforme a equação:

$$P = 2 F \sin \left(\frac{\alpha_{ip}}{2} \right) U \quad \text{Equação 3.9}$$

3.6.9 Teor de Umidade

Para a prensa de rolos, em muitos casos, a umidade ajuda na formação de um leito de material competente e auxilia na produtividade e captura do material para a zona de compressão. Assim, a pré-secagem não é necessária neste processo. Um teor de umidade próximo ou acima de 10% pode, no entanto, ter um efeito negativamente marcante no desempenho da prensa de rolos, o que resulta em uma redução na capacidade específica devido a uma maior extrusão e deslizamento do material úmido (VAN DER MEER, 1997).

Os circuitos de prensagens estão normalmente conjugados com moagens a úmido em moinho de bolas. O fato de se poder operar com um certo teor de umidade neste processo pode ser um benefício significativo naquelas aplicações em que um moinho de bolas seja posicionado subsequente à prensagem. A secagem, obviamente, pode não ser a etapa mais econômica se o processo posterior fosse o novo molhamento do minério para a moagem ou peletização. Geralmente, a moagem da prensa de rolos é responsável por uma diminuição do teor de umidade da ordem de 0,5 a 1,0% (VAN DER MEER, 1997).

Um exemplo do efeito do teor de umidade na capacidade específica de *pellet feed* de minério de ferro é ilustrado na Figura 3.16, na qual é possível observar uma queda mais acentuada na capacidade específica com teor de umidade acima de 8 %.

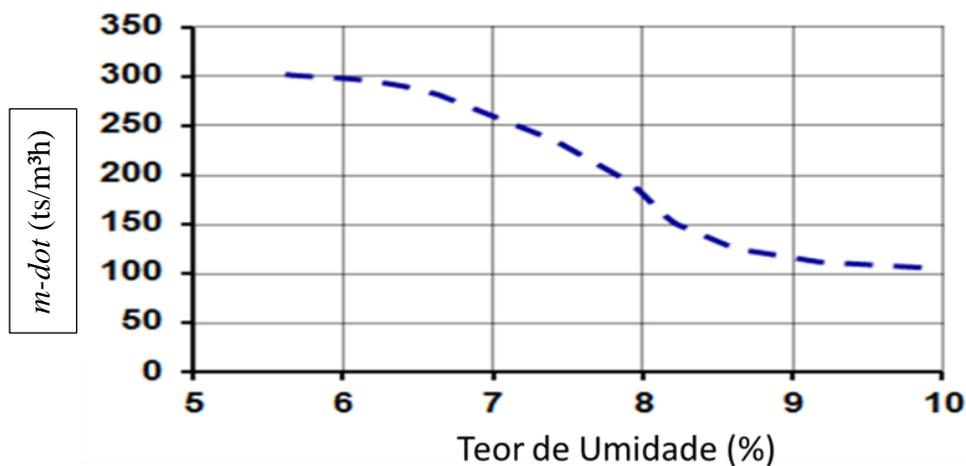


Figura 3.16 Influência do teor de umidade na capacidade específica (Adaptado de VAN DER MEER e LEITE, 2018)

Fuerstenau e Abouzeid (1998) realizaram um estudo sobre a influência do teor de umidade na prensa de rolos para um minério de dolomita. Neste trabalho foi estudada a

influência do teor de umidade em relação aos parâmetros operacionais, granulometria e eficiência energética. Foi verificado que a distância entre os rolos diminuiu à medida que a umidade da alimentação aumentou. Isso pode ser atribuído à alta taxa de extrusão do material devido à diminuição do atrito interno do material como resultado da lubrificação pela água. A velocidade do rolo aumentou em todos os níveis de carga à medida que o teor de umidade aumentou. Isso é esperado, porque a carga aplicada diminuiu com o aumento da umidade da alimentação (FUERSTENAU e ABOUZEID, 1998). Com baixa energia específica aplicada, a extensão da cominuição diminuiu com o aumento da umidade. Isso provavelmente se deve ao fato que parte da energia aplicada é consumida principalmente para compactação, como resultado de menor atrito interno das partículas. Em altas cargas aplicadas, a eficiência da quebra de partículas de tamanho grosseiro foi maior em níveis mais altos de umidade, enquanto a diferença na produção de finos não foi significativa (FUERSTENAU e ABOUZEID, 1998). A 2,3 kWh/t de energia aplicada, o aumento na taxa de quebra para 10,0% de umidade foi de cerca de 50% do valor da taxa de quebra a 0,0% de umidade. Isso indicou que houve um aumento na eficiência energética à medida que o teor de umidade da alimentação foi aumentado (FUERSTENAU e ABOUZEID, 1998).

Comparando-se os trabalhos de Van der Meer (1998) e Fuerstenau e Abouzeid (1998) sobre o efeito da umidade, observam-se conclusões distintas entre os autores, indicando uma possível influência do material estudado nos resultados encontrados.

3.7 Escorregamento e Extrusão

O rendimento de uma prensa de rolos é determinado pela aceleração do material de alimentação dentro da zona de aceleração e introdução na zona de compressão. Ambos processos dependem do atrito interno e do atrito do material na superfície do rolo, que é influenciada pela estrutura da superfície e pela aderência do material (LUBJUHN & SCHÖNERT, 1993).

A pressão, a velocidade e a umidade, em demasia, aumentam a extrusão do material entre os rolos e prejudicam o desempenho da prensa, comprometendo a finura do produto uma vez que reduz o tempo de residência do material na zona de compressão (LIM et al., 1988).

Lim et al. (1988) fizeram também uma analogia da prensa de rolos com o processo de laminação, onde neste caso o aço que passa entre os rolos sai com uma velocidade superior à dos rolos que o deforma em função da grande força compressiva. Este fenômeno leva a uma aceleração de desgaste dos rolos por abrasão (SCHÖNERT, 1991).

À medida que o material se desloca para a posição de menor distância entre os rolos, ocorre uma elevação súbita de pressão, principalmente após o ângulo de captura. Quando o material atinge este ponto, as forças de compressão reduzem-se então a zero na zona de relaxamento. À medida que as forças de compressão são reduzidas dentro da zona de relaxamento, o material normalmente em forma de floco compactado expande-se volumetricamente. Em alguns casos, a expansão volumétrica faz com que o floco se desloque mais rápido que a velocidade dos rolos e, conseqüentemente, ocorra a extrusão (LIM et al., 1998). Lim et al. (1998) propuseram uma relação entre a Equação 3.2 e a Equação 3.6 gerando a Equação 3.10, que resulta numa relação de densidade relativa entre o minério e seu floco assim como a relação de velocidade do rolo e do material:

$$\gamma = \dot{m} \left(\frac{D}{x_g} \right) = \left(\frac{U_g}{U} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_{sp}} \right) \quad \text{Equação 3.10}$$

na qual \dot{m} é a capacidade específica, U (m/s) a velocidade dos rolos e ρ_{sp} (t/m³) a densidade do minério.

Inicialmente pensava-se que a velocidade do material seria a mesma do rolo, sendo a relação U_g/U igual a 1. Porém estudos de Lim et al. (1998), conforme já mencionado, mostraram que esta relação pode ser maior do que 1 para forças específicas acima de 3 N/mm². Testes realizados em HPGR em escala industrial com placas de vedação laterais mostraram que entre 10 a 20% do material alimentado foram extrudados pelas bordas (LIM et al., 1998). Os principais fatores responsáveis pelo aparecimento destes fenômenos são o aumento do teor de umidade do material alimentado à prensa, a redução da abertura operacional e o aumento da força específica de compressão (SCHÖNERT et al. 1990; LIM et al., 1998; LIM & WELLER, 1999).

De forma complementar, o desgaste dos rolos contribui para uma elevação da quantidade de material extrudado. Portanto rolos pinados encorajam a formação de uma camada autógena de material na superfície dos rolos a qual protege efetivamente a superfície dos rolos e reduz a extrusão (BATTERSBY et al. 1992; LIM & WELLER,

1999). A Figura 3.17 ilustra o material sendo extrudado pelas laterais de um HPGR operando com *pellet feed*.

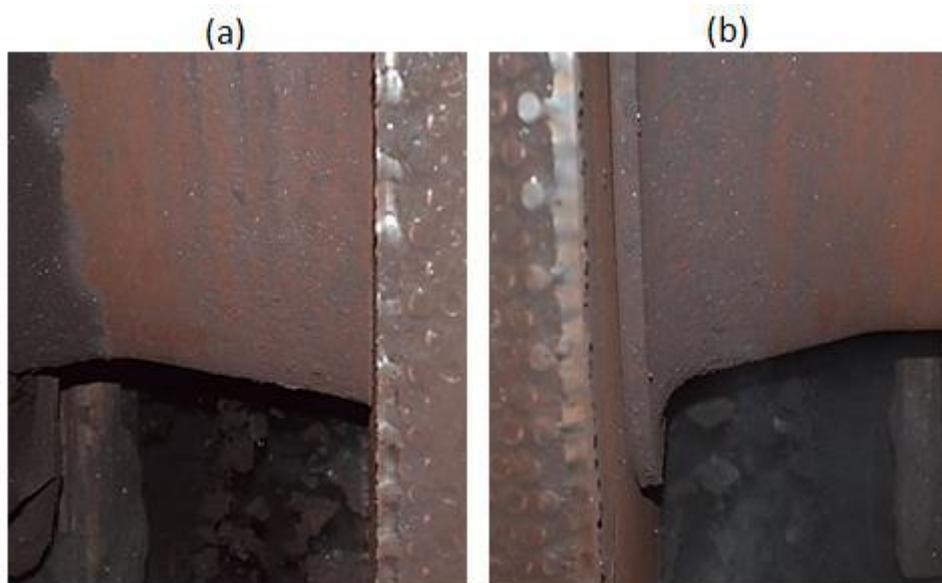


Figura 3.17 Extrusão do material pelas laterais esquerda (a) e direita (b) de uma prensa de rolos prensando *pellet feed* (CAMPOS, 2018)

3.8 Mecanismo da Cominuição

Do ponto de vista da indústria mineral, a cominuição engloba etapas de desmonte de rocha, britagem, moagem e prensagem. Tem por finalidade permitir o manuseio e o transporte do material (CHAVES e PERES, 2006), liberar o mineral de interesse e adequar a distribuição granulométrica para as etapas subsequentes (BERALDO, 1987), como é o caso da pelletização.

A facilidade com que as fases são liberadas depende fundamentalmente do modo de fraturamento dominante que podem ser: fratura intergranular; aleatória e preferencial ou diferencial (TAVARES, 2005). Tavares (2005) exemplifica o tipo de equipamento à fratura obtida e cita que a prensa de rolos é um equipamento que reconhecidamente favorece a fratura intergranular, conforme estudos de Patzelt et al. (1995).

Griffith (1920) descreve em sua teoria que a quebra ocorre, preferencialmente, pela presença de falhas e considerou que uma trinca irá propagar se a perda de energia elástica de deformação é maior que o aumento de energia superficial que acompanha a formação de novas superfícies (TAVARES, 2005).

A abrasão, o estilhaçamento e a clivagem são os principais mecanismos de cominuição (TAVARES, 2005; KING, 2001). 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 (KING, 2001). O estilhaçamento ocorre em elevadas taxas de aplicação de energia, sob condições de esforços de compressão e leva a intensa fragmentação da partícula (TAVARES, 2005). A clivagem ocorre quando a intensidade de aplicação da energia é baixa, baixa taxa de carregamento, de modo que a fragmentação se dá pelo mecanismo da clivagem. Por esse mecanismo, diversos fragmentos relativamente grossos são gerados, ao mesmo tempo que partículas muito mais finas, as quais se originam nos pontos de aplicação dos esforços. A distribuição de tamanhos das partículas é relativamente estreita e frequentemente bimodal (TAVARES, 2005; KING, 2001). Este é o princípio fundamental da prensa de rolos.

3.9 Mecanismo de quebra em leito de partículas

O leito de partículas pode ser definido como um arranjo de partículas sobrepostas na qual existem contatos diretos entre as partículas podendo ou não ser em um espaço confinado. A compactação de um leito de partículas depende fortemente do tamanho das partículas, da distribuição de tamanho, do arranjo e do grau de confinamento (SCHÖNERT, 1995).

Schönert (1979) afirmou que o método mais eficiente para quebrar partículas, em termos de utilização de energia, após a quebra de partículas individuais, é comprimir um leito de partículas entre duas placas (DUNDAR et al., 2013). A redução do tamanho é novamente controlada principalmente pela absorção de energia e, portanto, os resultados devem ser discutidos e representados em termos dessa variável. Para leitos não confinados entretanto, surge a questão de qual deve ser a massa apropriada para a qual a energia deve ser relacionada, porque uma certa fração da amostra é sempre eliminada (SCHÖNERT, 1995).

Barrios (2015) relata que nas primeiras publicações de Schönert sobre quebra em leito, o autor classifica a aplicação dos esforços dentro dos equipamentos de cominuição em dois grupos: carregamento por compressão lenta, como no caso da compressão em prensa de rolos, e o carregamento por compressão rápida ou impacto, como é o caso do impacto de um corpo moedor no interior de um moinho de bolas. A

Figura 3.18 mostra as classificações de Schönert sobre a quebra em leito com carregamento lento e rápido.

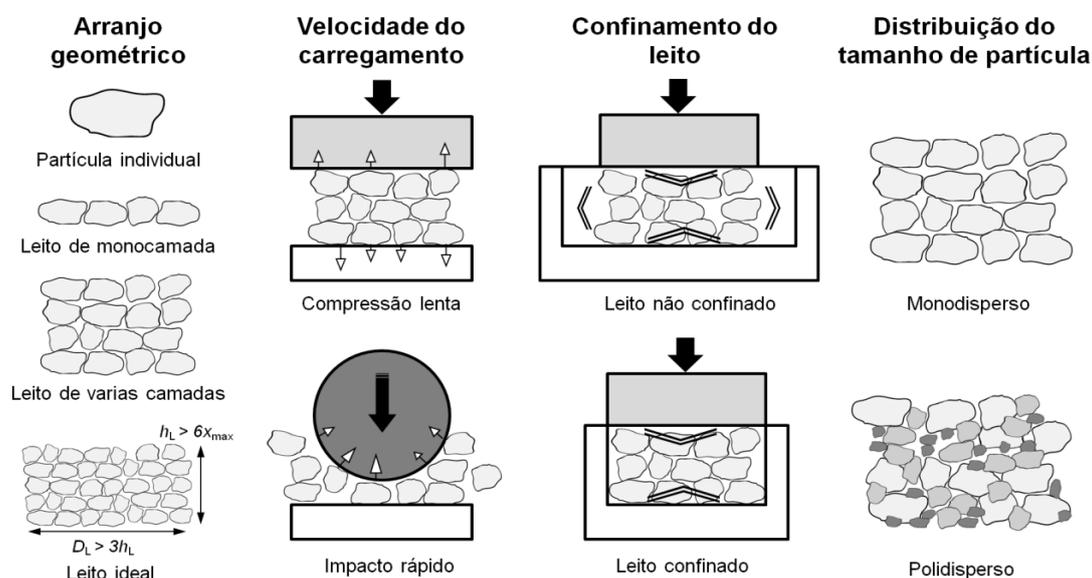


Figura 3.18 Classificação de Schönert sobre leito de partículas (BARRIOS, 2015)

Dando prosseguimento aos estudos, Fuerstenau et al. (1996) e Liu e Schönert (1996), estudaram a compressão de leitos confinados de partículas de diferentes materiais no sistema de prensa de pistão. O objetivo dos trabalhos foi entender como a energia é absorvida pelo leito de partículas na compressão e desenvolver modelos para prever a quebra de leitos mono e polidispersos.

Schönert e Knobloch (1984) propuseram que a cominuição do leito de partículas para altas produções pode ser obtida comprimindo as partículas entre dois rolos de rotação contrária. Através da invenção da prensa de rolos de alta pressão (HPGR), as operações em escala industrial para a quebra de leito comprimido foram alcançadas (DUNDAR et al., 2013).

3.10 Saturação na quebra em leito de partículas

A fragmentação do leito de partículas confinadas de materiais finos é de grande importância econômica para a tecnologia de fragmentação e, como já foi comentado, daí surgiu o HPGR. No processo fragmentação, o efeito da saturação já é bem conhecido, seja em britadores, moagem de bolas e moagem ultrafina.

Durante o primeiro estágio da compressão de um leito de partículas a energia empregada é distribuída para promover um rearranjo das partículas. Com o aumento da

pressão, forças de atrito excedem as forças que causam o rearranjo e o movimento relativo das partículas é interrompido. Daí em diante, um aumento de pressão é acompanhado por menores perdas de atrito transferindo a energia para as partículas até chegar ao ponto de quebra. Após a quebra, ocorre uma distribuição espacial dos fragmentos na área circundante à partícula mãe (MÜTZE, 2007). Schubert (2003) e Mueller (1989) descrevem algumas das principais causas da perda de energia durante o processo de prensagem: perda por fricção, energia de ruptura, deformação plástica e perda por deslocamento de fluidos nos poros. As partículas que não estão quebradas no começo estão cada vez mais envolvidas por fragmentos. Mesmo assim, o número de contatos aumenta e o campo de tensão se torna mais uniforme, de maneira que o sistema se aproxima de uma situação semelhante a hidrostática (SHONERT, 1995). Depois deste ponto, toda a energia excedente é simplesmente dissipada e não ocorre redução do tamanho adicional (TONDO, 1997). Schönert (1988) também observou este fenômeno e relatou que o tamanho do produto se torna mais fino com o aumento de pressão e absorção de energia e convergirá para uma distribuição limite a partir da qual nenhuma quebra adicional será observada. Este fato é essencial para o entendimento e otimização do processo, mesmo porque o processo de quebra interparticular deve ser explorado ao máximo com um mínimo de consumo energético.

O comportamento de saturação dos leitos de partículas descreve a relação entre as forças atuantes no leito de partículas e a energia total fornecida. O comportamento dos esforços está intimamente relacionado à compactação do leito de partículas, que deve ser distinguido em uma deformação puramente elástica e puramente plástica. A deformação elástica pode ser caracterizada pela elasticidade do leito de partículas como um parâmetro específico do material. Com deformação plástica, os contatos entre as partículas mudam de contatos pontuais a contatos planares. Isso aumenta muito as forças de adesão entre as partículas, causando uma maior resistência do leito de partículas para compactação adicional (MÜTZE, 2016). Mütze (2016) propôs ainda um modelo para deduzir este comportamento em um leito de partículas. De acordo com Müller (1989), o excesso de velocidade dos rolos leva a uma perda de eficiência da prensagem, pois o ar que é comprimido com a alimentação ao chegar na zona de maior compressão se torna aprisionado entre as partículas, não tendo por onde escapar, o que contribui para a saturação do leito.

A maioria dos minérios processados em uma prensa de rolos produz agregados com densidades medidas entre 80 e 85% da densidade real do minério (KELLERWESSEL, 1996), esta limitação pode estar relacionada ao efeito de saturação.

Barrios (2015) realizou experimentos de compressão em leito de partículas (CLP) com minério de ferro em duas faixas de tamanhos e demonstrou graficamente que o efeito de saturação ocorre independente da granulometria, onde a partir de um certo nível de força, a deformação do leito é reduzida significativamente, mesmo com pressões de grande magnitudes aplicadas, conforme pode ser visualizado na Figura 3.19.

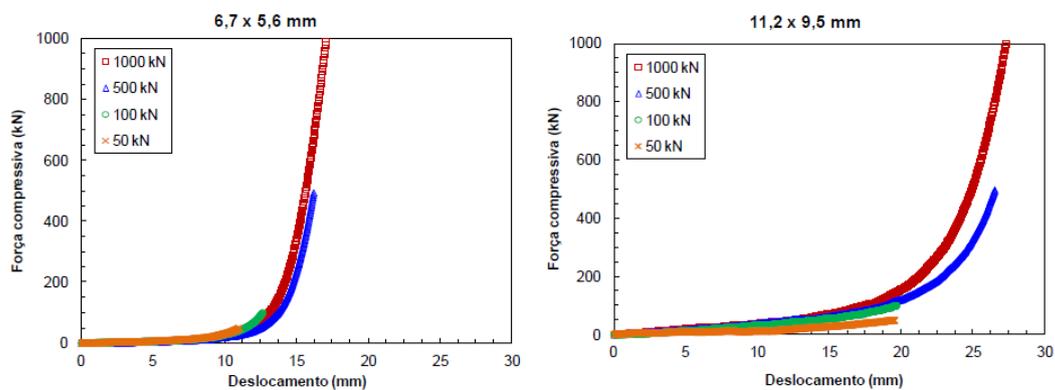


Figura 3.19 Saturação em ensaio de compressão em leito de partículas CLP (BARRIOS, 2015)

3.11 Efeito de Borda

A quebra das partículas na borda dos rolos é diferente daquela que ocorre no centro, sendo que essa variação lateral é mais significativa que aquela observada em um britador de rolos convencional (DANIEL& MORRELL, 2004). Nesta abordagem, deve-se considerar que a descarga do HPGR geralmente consiste de 80 a 90% do material do centro (mais fino), da zona de maior pressão entre os rolos, e 10 a 20% do material da borda (mais grossa), que passou pelos rolos na zona de menor pressão. O material da borda geralmente apresenta uma distribuição de tamanho mais próxima da distribuição do tamanho da alimentação (VAN DER MEER, 2010).

No que diz respeito ao funcionamento do HPGR, Daniel (2002), entre outros autores descrevem que existe um perfil característico de pressão ao longo do rolo, conforme mostra a Figura 3.20. Este perfil gera o que se define como efeito de borda. O gradiente de pressão é originado pela descarga de material nas laterais do rolo (WATSON e BROOKS, 1994). O chamado "efeito de borda" é explicado pelo gradiente

de pressão ao longo do comprimento do rolo, e pela ausência de confinamento lateral do leito de partículas nas bordas dos rolos (DANIEL, 2002).

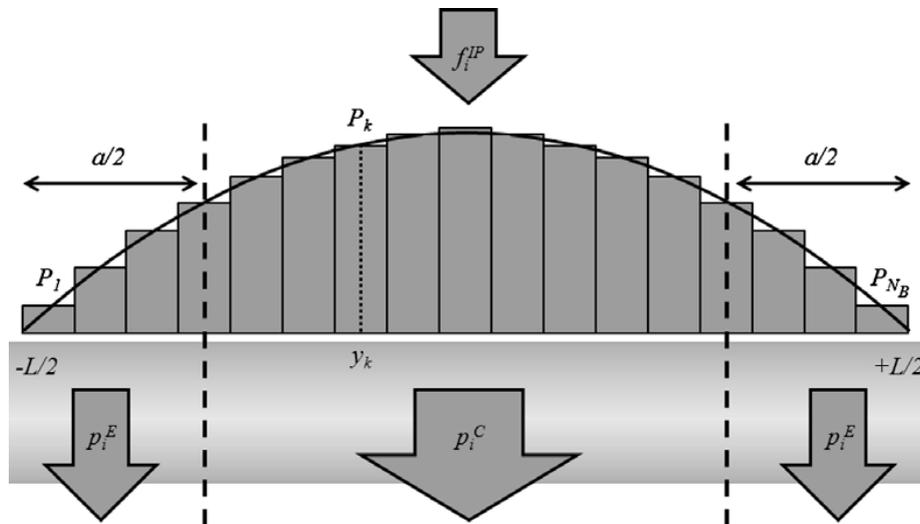


Figura 3.20 Perfil de pressão ao longo do rolo (TORRES & CASALI, 2009)

A forma tradicional de vedação lateral utilizada pela maioria dos fabricantes de HPGR consiste dos *cheek plates*, que são placas de encosto fixas posicionadas nas laterais dos rolos. Elas são responsáveis por confinar o minério na zona de prensagem entre os rolos (DANIEL, 2002), conforme pode ser visualizado na Figura 3.21.



Figura 3.21 *Cheek plates* prontas para serem instaladas no HPGR (em destaque à esquerda) e já instaladas no equipamento (direita) (RODRIGUES, 2018)

O problema de perda de pressão nas bordas pode ser atenuado mediante a inserção de aros laterais, confinando o leito e prevenindo o fluxo de material do leito no sentido longitudinal (ALVES, 2012, OLIVEIRA, 2016). Isso é realizado pela inserção de um flange na forma de aro no próprio rolo em um dos rolos de modo que o outro rolo fique confinado dentro do rolo que possui o flange (Figura 3.22).

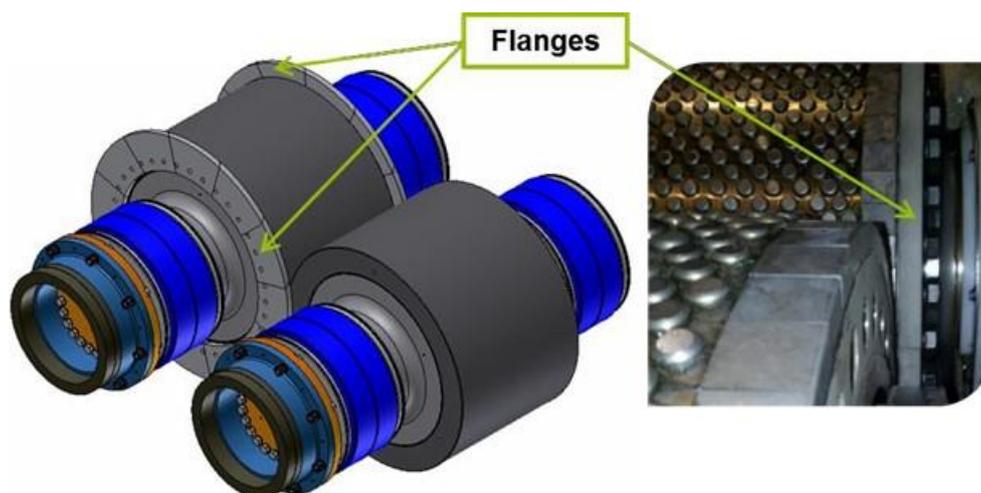


Figura 3.22 Rolos com flange de vedação (OLIVEIRA, 2016)

A principal diferença entre os dois dispositivos de contenção é que o *cheek plate* é uma placa instalada na estrutura da prensa de rolos próxima ao rolo a fim de evitar que o material escape pelas bordas, o qual não se encontra acoplado ao rolo, já os flanges são fixados em um dos rolos, o qual gira juntos com este (OLIVEIRA, 2016). O rolo que não possui o flange gira internamente ao que possui o flange, buscando evitar o *bypass* do material pelas bordas.

Bueno e Vianna (2016), realizaram um experimento em uma unidade industrial de HPGR processando *pellet feed* na VALE S.A com objetivo de verificar na prática, o efeito de borda relacionado com a geração de área superficial específica, determinada pelo permeabilímetro de Blaine. O trabalho experimental foi realizado colhendo-se amostras na alimentação da prensa, em cinco pontos abaixo do rolo, nas bordas e no produto final da prensa de rolos, este último, sendo composto por todo material alimentado no HPGR. (BUENO et al., 2017). A Figura 3.23 apresenta o resultado do experimento industrial.



Figura 3.23 Efeito da posição de descarga da prensa na área superficial específica (Blaine), mostrando o efeito de borda em experimento industrial (BUENO e VIANNA, 2016)

3.12 Caracterização dos minérios de ferro para pellet feed

Uma série de desafios envolve o processo de prensagem de *pellet feed*, quanto à geração de área superficial específica e distribuição granulométrica adequada para o processo de pelotização. A tipologia do minério exerce forte influência neste processo. Diante deste fato faz-se necessário um melhor entendimento da mineralogia das frentes de lavra para um melhor controle de processo.

A fim de suprir de *pellet feed* as usinas de pelotização na Unidade de Tubarão em Vitória no estado do Espírito Santo, de Vargem Grande, localizada no município de Nova Lima, e de Fábrica, localizada no município de Congonhas, ambas no estado de Minas Gerais, a VALE S.A. possui uma ampla diversidade de minérios, sendo distribuídos ao longo do Quadrilátero Ferrífero, localizado na porção central do estado de Minas Gerais (Figura 3.24).

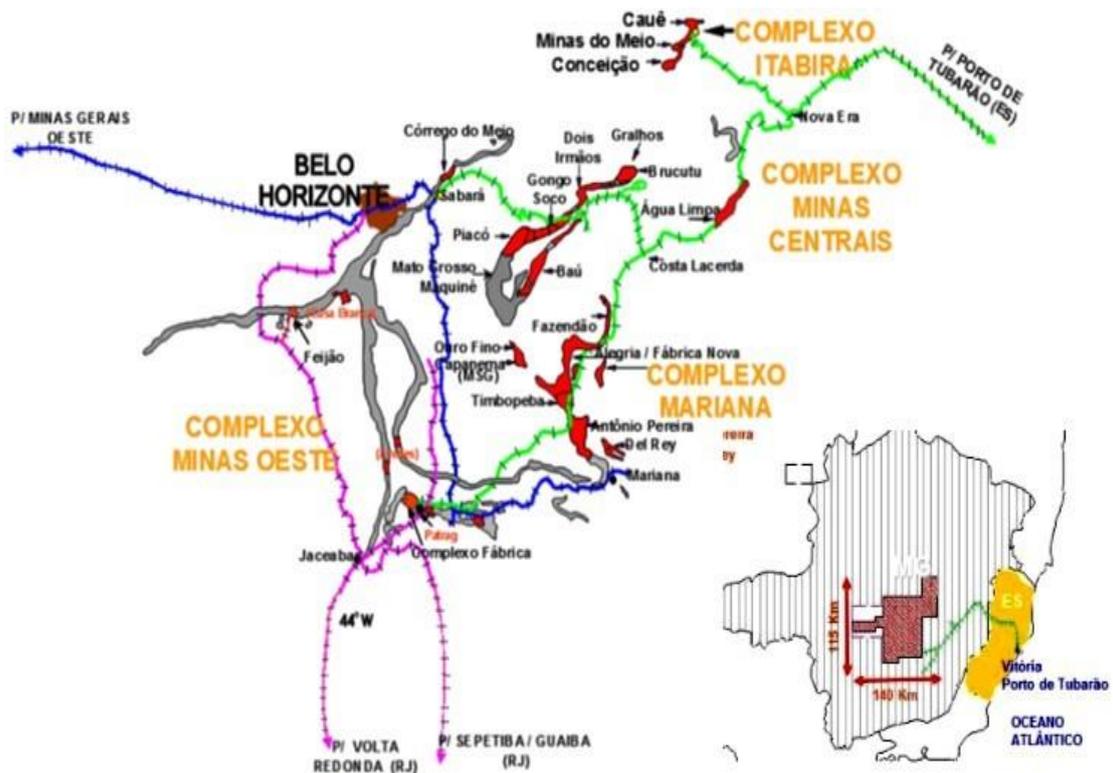


Figura 3.24 Localização das minas que abastecem as usinas de pelotização em Vitória - ES (CASAGRANDE, 2017)

O *pellet feed* que abastece as usinas de Pelotização de Vitória (ES) é originário dos complexos de Mariana, Minas Centrais e Itabira. As minas de Cauê, Conceição e Minas do Meio encontram-se no Complexo Itabira. As usinas pelotizadoras também recebem itabiritos compactos provenientes destas minas. No Complexo Minas Centrais localiza-se a mina de Brucutu. As minas de Timbopeba, Alegria e Fábrica Nova também enviam *pellet feed* para as usinas e pertencem ao complexo de Mariana. Mais recentemente, a mina de Carajás, localizada no estado do Pará, também tem enviado *sinter feed* para as usinas de pelotização localizadas na região sudeste.

Os minérios destas minas apresentam características intrínsecas muito distintas devido às diferentes condições de metamorfismo, tectonismo e intemperismo. Com isso, eles apresentam granulometria, porosidade, tamanho, teores de contaminantes, mineralogias e morfologias diferentes (CASAGRANDE, 2016). De acordo com a classificação da gênese do minério de ferro, os minérios oriundos do Complexo Mariana podem ser considerados como supergênicos, o que pode ser confirmado através de suas características, tais como, moabilidade alta, hidratação e porosidade devido à forte

presença de goethita e martita. Por outro lado, minérios do Complexo Minas Centrais e Itabira podem ser classificados como metassomáticos, apresentando mais de 90% de hematita compacta (CASAGRANDE, 2012). A Tabela 3.1 apresenta as texturas e porosidades dos minérios em função de sua procedência. A Figura 3.25 ilustra de forma esquemática, as características das texturas dos minérios utilizados nas usinas de Pelotização da Vale em Tubarão.

Tabela 3. 1 Textura e percentual de porosidade (Adaptado de CASAGRANDE, 2016 e TAKEHARA, 2004).

Procedência do Minério	Texturas predominantes	Minerais porosos (%)
Itabira*	Granular, tabular e lobular	0,2 a 2,0
Brucutu*	Tabular e granular	7 a 15
Mariana*	Martítica, goethítica, magnetítica, tabular	40 a 49
Carajás**	Microcristalina e granular	>60

*Dados de Casagrande (2016) **Dados de Takehara (2004)

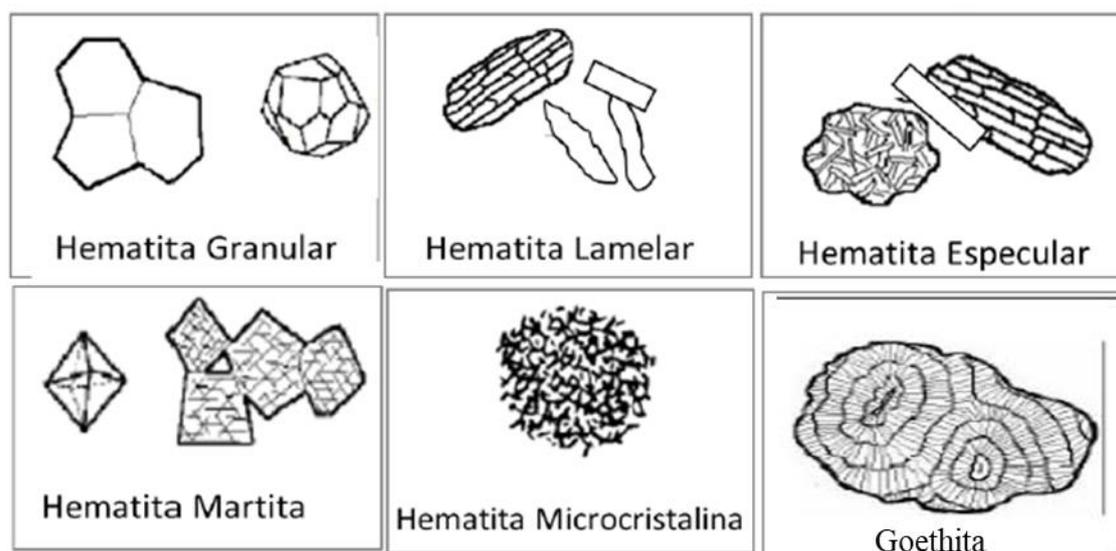


Figura 3.25 Características das texturas dos minérios (CASAGRANDE, 2016)

As características mineralógicas dos domínios dos complexos Itabira e Minas Centrais diferem daquelas do complexo de Mariana. Estas características influenciam diretamente no processo de concentração (tratamento de minérios) e pelotização

(CASAGRANDE, 2017). Uma investigação do comportamento do HPGR, em função da origem dos minérios para as usinas de pelotização, faz-se necessária.

3.13 Moabilidade e Prensabilidade

A granulometria e a área superficial específica (Blaine) compõem a especificação de concentrados de minérios de ferro para produção de pelotas. Para estas especificações serem alcançadas os concentrados passam por etapas de cominuição que, na maioria dos casos, são efetuadas em moinhos de bolas (DONDA, 2003) e prensas de rolos.

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 sollicitação. Após certo valor, conhecido como energia de fratura 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).

É importante saber antecipadamente qual o grau de dificuldade que os minérios apresentam para serem cominuídos, correlacionando com a energia necessária para realização deste trabalho. Para o processo de moagem, Mourão e Stegmiller (1990) e Mourão et al. (1992) desenvolveram um método realizado em moinho de bancada, para minério que suprem as pelotizações da VALE S.A, na época CVRD. Por meio da determinação do consumo de energia e da área superficial específica da alimentação e do produto do teste é calculado um índice de moabilidade. Os autores fazem correlações desse índice de moabilidade de vários tipos de concentrados, com consumo específico de energia determinado em planta piloto e moinhos industriais, classificando-os de acordo com a ocorrência de partículas policristalinas e quanto à gênese dos minérios a partir dos quais os concentrados foram produzidos. O ensaio é realizado com 9,56 kg de minério com o moinho operando a 66,6% da velocidade crítica e a duração do ensaio é determinada pelo número de rotações do moinho, foi padronizado em 5250 rotações/ensaio.

Donda (2003) também propôs um método para moagem, o qual consiste em aplicar diferentes níveis de energia em amostras de concentrados, por meio da moagem em moinho de bolas de bancada, sob diferentes tempos de moagem, em condições pré-

estabelecidas. O tempo de moagem é convertido em consumo específico de energia por meio da aplicação da equação modificada de Rowland (1986) para essas condições pré-estabelecidas. A fim de garantir a comparação do requerimento energético para diferentes tipos de minério, alguns parâmetros do ensaio como: diâmetro do moinho, porcentagem de enchimento, porcentagem de velocidade crítica, porcentagem de sólidos e distribuição granulométrica da carga de corpo moedores devem ser mantidos constantes (DONDA,2003). A Figura 3.26 exemplifica as curvas lançadas graficamente proveniente dos resultados de um ensaio com a metodologia proposta por Donda (2003). Neste gráfico são apresentadas as energias necessárias para geração de área superficial específica e o percentual retido na malha de 0,045 mm para um *pellet feed* típico da alimentação das moagens para as usinas de pelotização da VALE S.A.

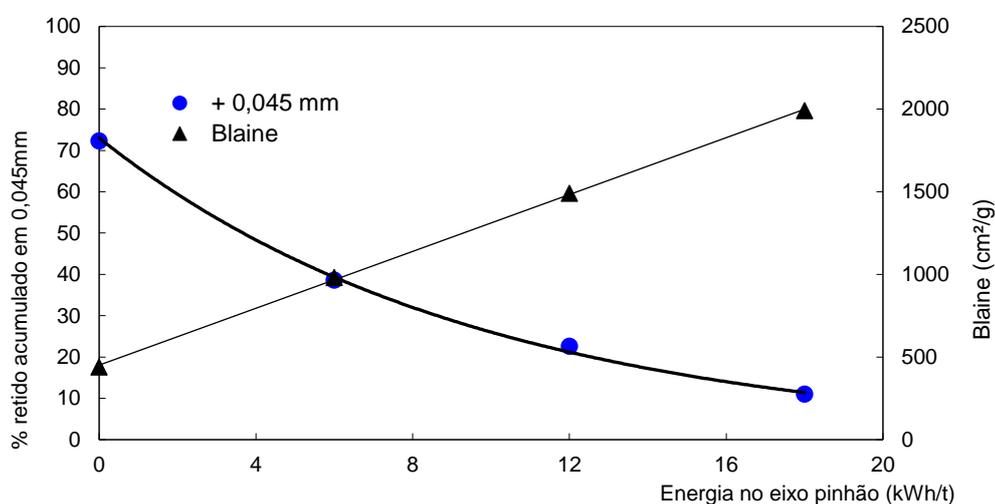


Figura 3.26 Demanda energética para moagem de pellet feed (CASAGRANDE, 2016)

De posse das curvas, a Equação 3.11 para granulometria e a Equação 3.12 para área superficial específica são geradas, a partir das quais podem ser extraídos os coeficientes k_d e a . O valor de k_d (t/kWh) representa a massa gerada na malha de interesse por kWh de energia consumida, sendo que quanto maior este valor maior a facilidade de se gerar um produto mais fino. Já o coeficiente angular a (cm²/g/kWh/t) da equação da reta representa o ganho de geração de área superficial específica para cada kWh de energia consumida (DONDA e ROSA, 2014).

$$y = b_d e^{-k_d E_{sp}} \quad \text{Equação 3.11}$$

$$y = ax + B \quad \text{Equação 3.12}$$

nas quais b_d é o % retido inicial na malha de controle, E_{sp} (kWh/t) o consumo específico de energia, em kWh/t, e B (cm²/g) é a área superficial específica do minério na alimentação do ensaio.

Donda e Rosa (2014) comentam que no caso da prensa de rolos o valor de k_d aumenta com a elevação da pressão, indicando o cuidado de se manter a mesma pressão do ensaio para a prensa quando se objetiva avaliar o valor de k_d de diferentes minérios.

Tavares (2005) estudou o enfraquecimento das partículas de minérios de cobre e ouro ao passar por prensas de rolos. Em seu trabalho ele comprovou esse enfraquecimento, o que já havia sido observado de forma indireta por outros autores, os quais observaram que minérios têm um decréscimo do índice de trabalho ou WI de Bond ao passar pelo HPGR (TAVARES, 2005). Suas observações também corroboram com o trabalho de Fuerstenau e De (1995) sobre o maior enfraquecimento da partícula com a elevação da energia inicial. Este enfraquecimento, entretanto, tende a diminuir à medida que o tamanho das partículas também diminui (TAVARES 2005). Apesar das partículas mais próximas aos rolos estarem sujeitas a esforços de cisalhamento, o dano observado é o mesmo em toda extensão do floco, provavelmente devido à natureza hidrostática dos esforços existentes no leito confinado (TAVARES, 2005).

A compressão em leito de partículas (CLP), realizada normalmente em prensa de pistão, conforme apresentado na Figura 3.27, fornece informações para caracterizar a quebra interparticular e definir parâmetros de modelos (HAWKINS, 2007).



Figura 3.27 Prensa Shimadzu (esquerda) e acoplamento copo pistão utilizados nos testes de CLP (direita)

Este método também é utilizado para medir a relação entre a redução de tamanho e a entrada de energia em um leito comprimido, fornecendo uma descrição da forma característica da distribuição de tamanho do produto (MORREL et al., 1998). Os parâmetros usados para descrever a redução de tamanhos são determinados a partir de testes em uma máquina HPGR de bancada (Figura 3.28) ou em prensa piloto conforme a Figura 3.29, combinados com testes de ruptura em uma prensa de pistão. A resistência do material à quebra também pode ser medida neste ensaio (DUNDAR et al., 2013).



Figura 3.28 Prensa de bancada POLYCOM®



Figura 3.29 Prensa em escala piloto KHD/WEIR

Dundar et al. (2013) estudaram a prensabilidade modificando o modelo do balanço populacional que se baseia na taxa de produção do material dentro da prensa. O processo pode ser descrito em termos de transporte e quebra de uma determinada fração em várias etapas dentro do HPGR. A Figura 3.30 mostra de forma esquemática o mecanismo do modelo do balanço populacional.

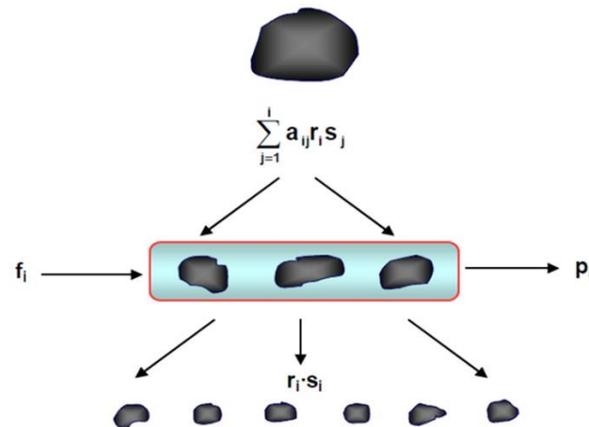


Figura 3.30 Mecanismo do modelo do balanço populacional (DUNDAR et al., 2013)

Na nova abordagem, os parâmetros K_r representando os parâmetros operacionais da máquina, como força específica e (α) , que é uma característica do material, são incorporados à função da taxa de quebra. A taxa de quebra proposta é apresentada por:

$$r = K_r x_i^\alpha \quad \text{Equação 3.13}$$

na qual r é a taxa de quebra e x_i é o tamanho da partícula. A Figura 3.31 ilustra como a taxa de quebra varia em função dos parâmetros K_r e α . Como pode ser observado, o incremento de K_r e α eleva a taxa de quebra para um mesmo tamanho da partícula. A taxa de quebra também aumenta com o tamanho da partícula.

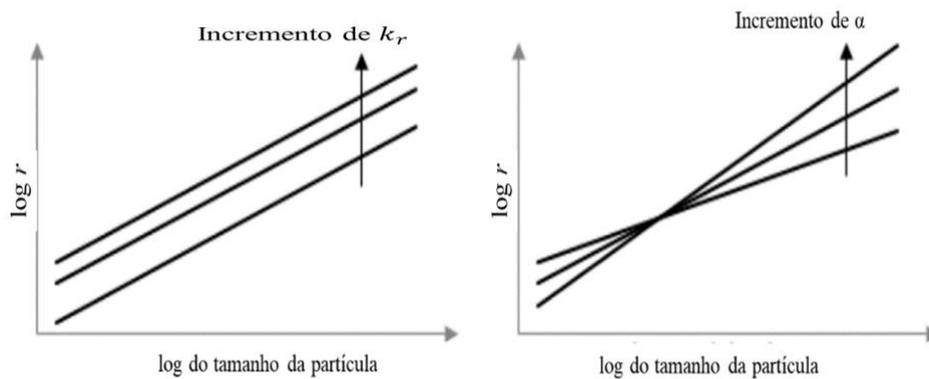


Figura 3.31 Taxa de quebra em função de k_r e α da Equação 3.13 (modificado de DUNDAR et al., 2013)

A quebra em leito de partícula é caracterizada pela transferência de energia interparticular. Nessa abordagem o efeito da distribuição de tamanho no leito é representado pelo parâmetro α , indicando que uma distribuição granulométrica no leito favorece a taxa de quebra para partículas grossas. Por outro lado, o incremento de α prejudica a taxa de quebra para partículas menores que 1mm (DUNDAR et al., 2013).

Ainda neste trabalho, Dundar et al. (2013) relacionaram a taxa de desaparecimento em função da energia aplicada no leito. A taxa de desaparecimento das frações foi calculada pela razão entre a massa de partículas quebradas ($W_{quebrada}$) e a massa da fração original ($W_{inicial}$) em função da energia aplicada, conforme é ilustrado na Figura 3.32.

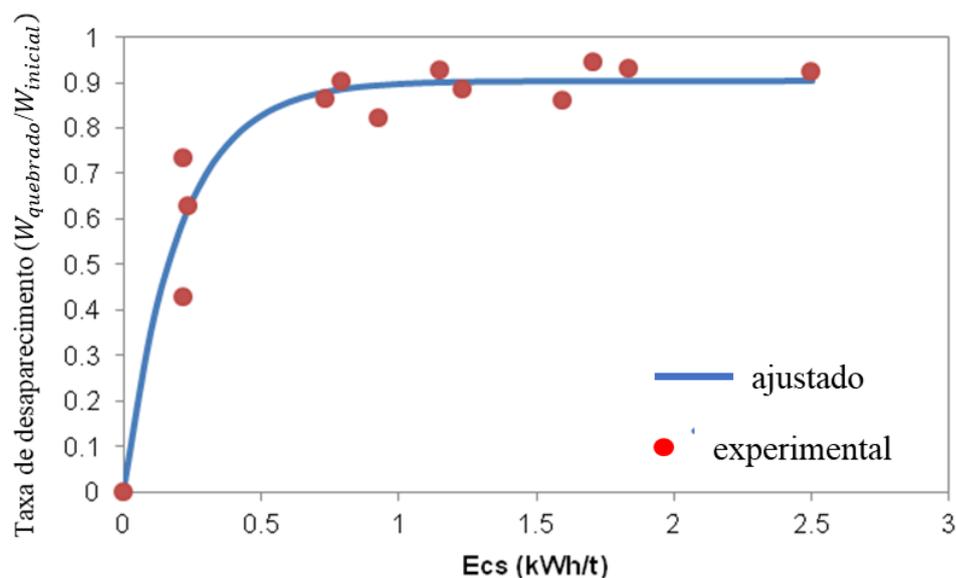


Figura 3.32 Taxa de desaparecimento ($W_{quebrado}/W_{inicial}$) obtida a partir de testes de quebra de partículas em leito (CLP) (modificado de DUNDAR et al., 2013)

A curva dos valores ajustados é dada pela expressão:

$$\frac{W_{quebrado}}{W_{inicial}} = b(1 - e^{-c E_{cs}}) \quad \text{Equação 3.14}$$

Após ajustar os parâmetros b e c , o produto desses ($b*c$) é considerado como um índice da prensabilidade do material nessa abordagem de modelagem. Valores mais altos desse produto sugerem que a taxa de desaparecimento é alta, de modo que o material tem resistência relativamente baixa à quebra sob compressão confinada. Assim, a taxa de quebra aumenta com este valor. A equação é estruturalmente equivalente à equação t_{10} do modelo de Narayanan e Whiten (1983), definido como a quantidade de partículas menores do que um décimo do tamanho inicial das partículas.

O parâmetro t_{10} é diretamente influenciado pela energia (E_{cs}) aplicada à partícula no ensaio de quebra em leito, sendo a relação descrita pela expressão (NAPIER-MUNN et al., 1996):

$$t_{10} = A(1 - \exp(-bE_{cs})) \quad \text{Equação 3.15}$$

sendo A e b parâmetros de quebra do material, no qual o produto $A*b$ indica a suscetibilidade do material à quebra, ou seja, sua prensabilidade. Quanto maior o produto $A*b$ maior será a prensabilidade do material.

Recentemente, Benzer et al. (2017) realizaram estudo de aplicação do modelo proposto por Dundar (2013) para avaliação do circuito de prensagem com minério de ferro itabirítico em uma mineração no Brasil. A partir de ensaios de CLP e testes em HPGR piloto, foi possível prever a distribuição granulométrica do produto da prensa de rolos industrial (BENZER et al., 2017).

Esnault et al. (2015) analisaram o mecanismo de quebra por compressão em leito de partículas em função da porosidade. A porosidade no leito de partículas muda com a energia aplicada. Os autores presumiram que a quebra por compressão pode ser definida como geração de nova área de superfície, referindo-se à lei de Rittinger (1857).

Fuerstenau et al. (1996) estudaram a prensabilidade de oito tipos de minerais através de ensaios de compressão em leito de partículas, comparando a razão de redução de tamanhos (X_f/X_{50}) em função da energia específica (J/g) aplicada. No trabalho foi proposta a equação:

$$\frac{X_f}{X_{50}} = j(x_f)E_{CS} + e \quad (e \approx 1) \quad \text{Equação 3.16}$$

na qual j é um parâmetro que representa a prensabilidade do minério, o qual também é função do tamanho de partícula da alimentação.

Neste mesmo estudo, os autores avaliaram a prensabilidade pela influência do tamanho inicial (X_f) em relação à energia específica (J/g), tendo sido verificado que a prensabilidade diminui à medida que o tamanho inicial é reduzido. Este efeito está relacionado com a saturação do leito, conforme já comentado na seção 3.10. As Figuras 3.33 (A) e (B) mostram os resultados obtidos pelos autores em relação à prensabilidade conforme comentado acima.

Foi verificado também que a compressão em leito de partículas consome metade da energia, comparando-se à compressão de partículas individuais (FUERSTENAU et al., 1996). A Figura 3.34 mostra a energia específica necessária para cominuir um leito de partícula em comparação com partículas individuais.

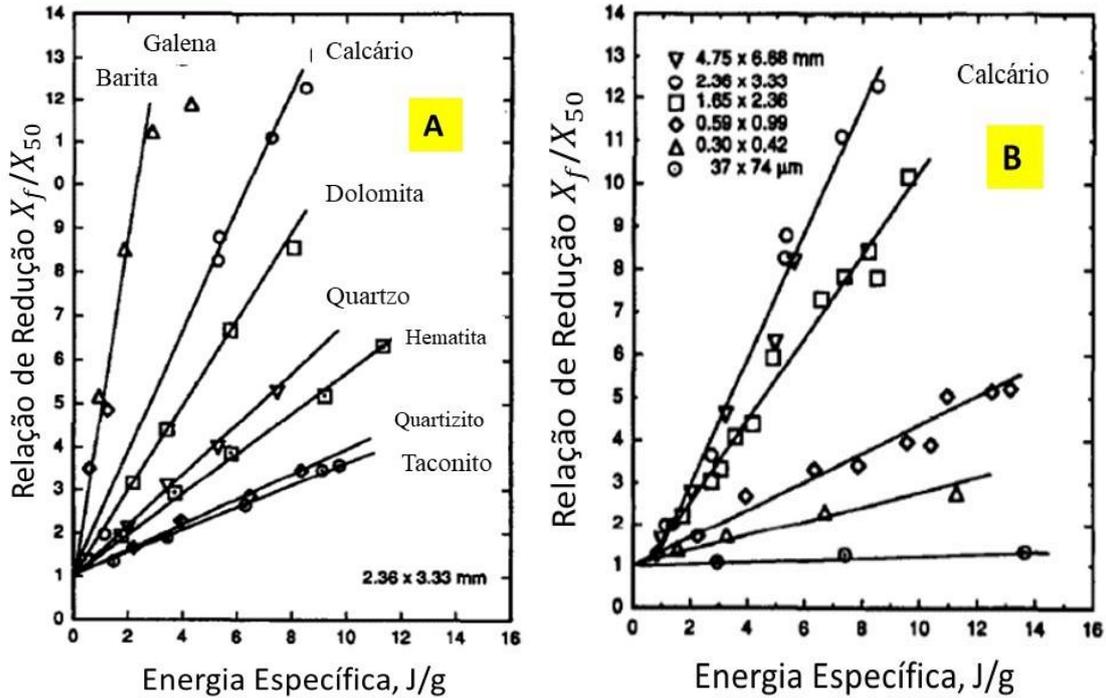


Figura 3.33 Razão de redução em função da energia específica para vários minérios (A) e influência do tamanho inicial (X_f) na prensabilidade (B) (Adaptado de FUERSTENAU et al., 1996)

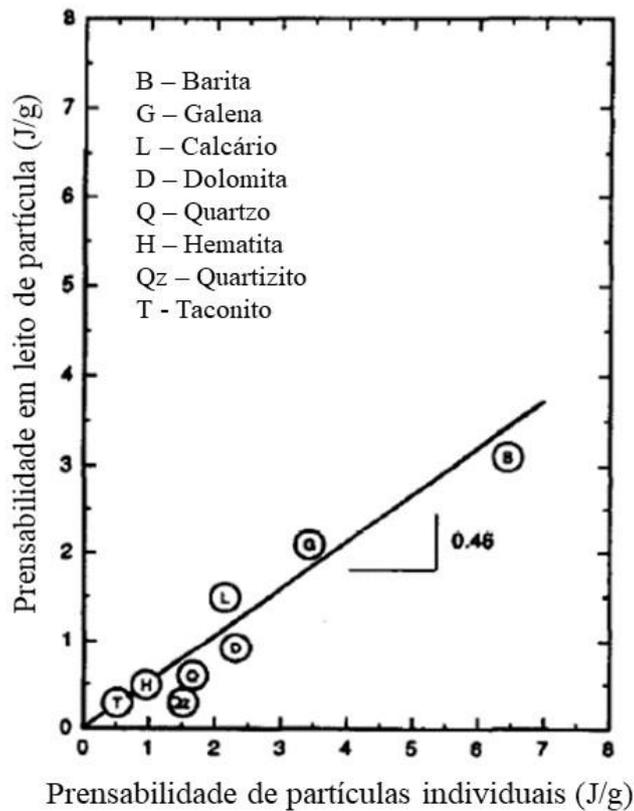


Figura 3.34 Comparação da prensabilidade em leito de partículas com partículas individuais (Adaptado de FUERSTENAU et al., 1996)

Nesta seção foi possível revisar metodologias diferentes desenvolvidas por diversos autores para avaliar a moabilidade e a prensabilidade dos minérios, identificando parâmetros que são intrínsecos de cada material para caracterizar estes índices.

3.14 Escalonamento e Modelos para HPGR

Logo após a introdução do HPGR, Schönert (1985) foi o primeiro a publicar os parâmetros-chave, na forma de equações, para o escalonamento do HPGR. Essas equações foram amplamente citadas por outros (AUSTIN et al. 1993; MORREL et al. 1997). Há várias medidas necessárias para definir os fatores de aumento de escala: a capacidade específica ($m\text{-dot}$), a potência, e a força de específica de prensagem são as três principais informações necessárias para dimensionar um HPGR. Adicionalmente, é importante também quantificar o consumo específico de energia. Para começar, uma série de testes precisa ser realizada para obter os dados necessários para a quantificação dos fatores de escalonamento (RASHIDI et al., 2016).

A Figura 3.35 resume a inter-relação entre os parâmetros de escalonamento. As características de projeto do HPGR e as propriedades do material afetam esses parâmetros. No geral, a expansão da aplicação dos HPGRs não enfrentou mudanças significativas desde a introdução da tecnologia (RASHIDI et al., 2016).

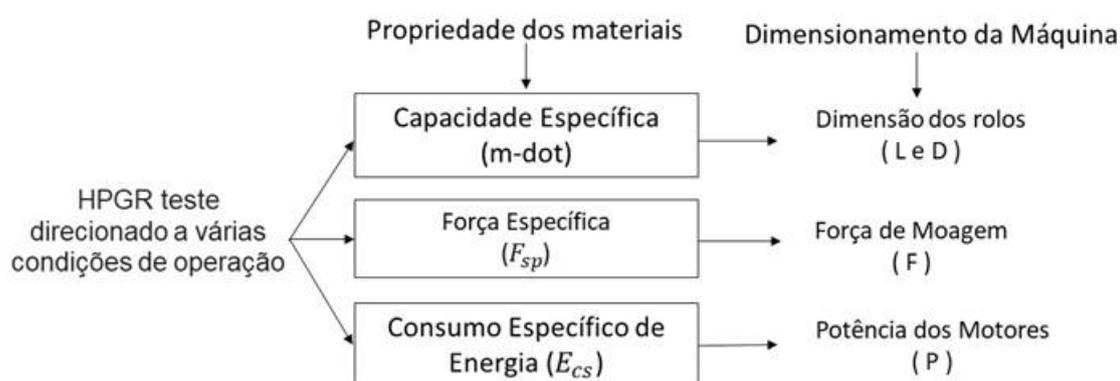


Figura 3.35 Esquema para dimensionar o HPGR (adaptado de RASHIDI et al., 2016)

Um cuidado deve ser tomado quando se realiza o escalonamento de prensas de bancada para escala industrial. A prática tem demonstrado que a capacidade específica

é influenciada pelo tamanho da máquina. Este fato está associado à distribuição granulométrica da alimentação, que normalmente varia entre as escalas, bem como pela fricção interna entre as partículas (BURCHARDT et al., 2011). Partículas de tamanhos maiores de alimentação nos HPGRs em escala industrial podem se comportar de maneira diferente sob compressão do que os mais finos em HPGRs em escala piloto. Essa é a razão pela qual a maioria dos fabricantes prefere executar testes de aumento de escala em unidades grandes, pois permite aproximar o máximo possível o tamanho de partícula a ser ensaiado (RASHIDI et al., 2016). Esta observação não é válida para *pellet feed*, pois mesmo HPGR de bancada de pequenas dimensões podem receber material com a mesma granulometria de equipamentos industriais.

Uma importante observação foi que a função seleção específica é quase constante, independentemente do tamanho das partículas, em contraste com o moinho de bolas. Isso deve ser esperado uma vez que a mesma quantidade de energia é transmitida para todos os tamanhos de partícula em leito confinado na cominuição. A validade deste modelo foi demonstrada a partir de dados experimentais obtidos em HPGR de bancada por Schönert e Fuerstenau (GUTSCHE, 1993). Entretanto, este modelo precisaria ser mais investigado para máquinas de maiores dimensões, nas quais, para uma determinada energia específica, a distribuição de tamanho do produto varia ao longo da largura dos rolos (RASHIDI et al., 2016).

A observação sobre a função seleção estudada por Schönert e Fuerstenau, descrita por Gutsche (1993), só é válida se a mesma quantidade de energia for transmitida para todos os tamanhos de partículas e para baixa quantidade de energia (RASHIDI et al., 2016). Isso é diferente do estudo de Dundar et al. (2013) que, através da aplicação do modelo do balanço populacional quantificou a função seleção em função de parâmetros da máquina, do tamanho da partícula e da energia aplicada.

Austin e Trubelja (1994) desenvolveram um modelo de multicomponentes essencialmente empírico, o qual emprega um grande número de parâmetros, tornando-se difícil gerar os resultados por retro cálculo. Além disso, o efeito de borda não foi abordado neste modelo.

Morrell et al. (1997) adotaram um modelo modular, dividido em três zonas, para prever a taxa de transferência, a potência e a distribuição do tamanho do produto, as quais são: zona de pré-moagem, zona de compressão central e zona periférica. As

distribuições de tamanho de produto para essas três zonas de quebra definidas dentro de um HPGR são calculadas independentemente, introduzindo o conceito do efeito de borda. O modelo de Morrell et al. (1997) foi revisado por Benzer et al. (2001) e Daniel (2002) a partir de dados coletados de vários tamanhos de máquinas HPGR, colocando-os em uma posição única em comparação com o resto dos trabalhos realizados na época. No entanto, ele não descreve totalmente o mecanismo de quebra fundamental que ocorre na zona de compressão em relação a todos os parâmetros que contribuem para a distribuição de tamanhos final do produto (RASHIDI et al., 2016).

Torres e Casali (2009) propuseram uma estrutura modular com base no modelo de Morrell et al. (1997) para simular a capacidade, a potência e a distribuição do tamanho do produto a partir de testes de HPGR em escala piloto. Seu modelo de previsão de distribuição de tamanho de produto compartilha uma estrutura similar com o modelo de Morrell et al. (1997), mas com uma abordagem diferente, pois apresenta um sistema discreto para o leito de partículas. A partir dessa abordagem, o intervalo entre os dois rolos é dividido em N blocos. Esses blocos partem do ângulo de captura e terminam no *gap* de trabalho. A distribuição final do tamanho do produto é dada pela combinação das distribuições de tamanhos de partículas de cada bloco. A distribuição de tamanho de partícula resultante não é apenas uma função do tamanho de partícula de alimentação, mas também depende da posição das partículas dentro de cada bloco, além da posição do bloco correspondente ao longo do intervalo (TORRES & CASALI, 2009). A Tabela 3.2 apresenta de forma resumida os princípios e as características dos modelos segundo seus autores.

Tabela 3. 2 Princípios e características dos modelos matemáticos de prensas de rolos

Autores	Princípio	Características
Austin e Trubelja (1994)	Modelo de multicomponentes empíricos	<ul style="list-style-type: none"> > Emprega um grande número de parâmetros > Não trata do efeito de borda
Morrell et al. (1997)	Modelo modular dividido em três zonas: <ul style="list-style-type: none"> > Pré moagem > Compressão central > Periférica 	<ul style="list-style-type: none"> > Prevê a taxa de transferência, a potência e distribuição de tamanho > Introduziu o conceito do efeito de borda

Benzer et al. (2001) e Daniel (2002)	Revisões do modelo de Morrell et al. (1997) a partir de dados coletados de vários tamanhos de HPGR	> Não descreve o mecanismo de quebra fundamental que contribui para a distribuição do tamanho final do produto
Torres e Casali (2009)	> Estrutura modular com base no modelo de Morrell et al. (1997) > Discretiza o rolo dividindo em N blocos	> Simula a capacidade, a potência e a distribuição granulométrica do produto a partir de testes em HPGR piloto > O produto é a combinação do tamanho da partícula de cada bloco
Dundar et al. (2013)	Aplicação do modelo do balanço populacional	Quantifica a função seleção em função de parâmetros da máquina, do tamanho da partícula e da energia aplicada

Os resultados publicados até agora indicam que a maneira ideal e controlada para determinar a função de seleção e quebra da quebra de leito de partículas é por meio do uso de aparelho de prensa de pistão (CLP). A maior dificuldade em tal modelagem é incluir o efeito de borda (RASHIDI et al., 2016).

Em comparação a outros equipamentos de cominuição na indústria mineral, existe uma quantidade relativamente limitada de literatura disponível sobre prensas de rolos. A modelagem da capacidade e da energia está bem estabelecida na literatura, mas a modelagem da granulometria do produto tem sido particularmente difícil (ALVES, 2012). Mesmo para capacidade e energia, os modelos não levam em consideração o teor de umidade e o efeito de extrusão do material, o que compromete uma representação fiel dos resultados experimentais usando esses modelos. De fato, ajustes nos modelos são comumente necessários para uma melhor descrição da realidade.

Um projeto de pesquisa entre a VALE S.A o Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, está em desenvolvimento para elevar o grau de conhecimento sobre modelagem de HPGR para prensagem de *pellet feed*. Neste sentido, um simulador de HPGR para *pellet feed* com objetivo de prever, a capacidade, a potência, a distribuição granulométrica e a geração de área superficial específica (BSA) do produto foi desenvolvido. Em função de várias vantagens em relação aos demais, em particular de descrever o efeito de borda, o modelo de Torres e

Casali (2009) foi definido como base para a modelagem do *pellet feed* (CAMPOS et al., 2018). Entretanto, investigações preliminares permitiram concluir que o modelo de Torres e Casali subestimava a capacidade e potência do HPGR, quando se comparava os resultados simulados aos valores experimentais (CAMPOS et al., 2016). Esta constatação está associada ao fato do modelo de Torres e Casali não levar em consideração a extrusão, a aceleração e a variação do ângulo de captura do material prensado devido, entre outros fatores o teor de umidade presente no *pellet feed* (CAMPOS, 2018; CAMPOS et al., 2019). Por outro lado, este modelo superestima a quebra das partículas para minérios itabiríticos, quando se aplica a função quebra normalizada neste modelo (CAMPOS et al., 2018). O comportamento da função quebra para minérios itabiríticos já havia sido investigado por Faria (2015), nesse caso aplicado à moagem em moinhos de bolas.

Assim, a fim de tornar o simulador mais robusto, os pesquisadores da VALE S.A. e LTM/UFRJ introduziram correções ao modelo em relação a aceleração (CAMPOS, 2018) e extrusão (CAMPOS et al., 2019) para o modelo de capacidade e correção do ângulo de captura (CAMPOS, 2018) para o modelo de potência. Um ajuste ainda foi necessário para o modelo de granulometria, com a introdução da função quebra não-normalizada (CAMPOS et al., 2019).

As equações com as modificações propostas por Campos (2018) e Campos et al. (2019) estão apresentadas de forma resumida na Tabela 3.3, que alimentam o modelo inserido na plataforma Matlab® (versão R2018a, Mathworks Inc.) onde é possível gerar simulações de HPGR em estado estacionário.

Tabela 3. 3 Resumo das principais equações do modelo de Torres & Casali modificado (CAMPOS et al., 2019)

Capacidade	$Q = 3.6U_g L \rho_g x_g \left(\frac{100}{100 - \gamma} \right)$	$\ln\left(\frac{Y}{A}\right) = -b \frac{x_g}{D} \left(\frac{U}{U_{max}} \right)^\tau$ $U_g = \frac{U x_c \rho_a}{x_g \rho_g}$
Força compressiva	$F = 100R_p \frac{D}{2} L$	
Potência	$P = 2F \sin\left(\frac{c \alpha_{ip}}{2}\right) U$; $C = \frac{\alpha_{ipr}}{\alpha_{ip}}$ $\alpha_{ipr} = \sin^{-1}\left(\frac{P_{Exp}}{2UF}\right) 2$	$\cos \alpha_{ip} = \frac{1}{2D} \left[(s + D) + \sqrt{(s + D)^2 - \frac{4s\rho_g D}{\rho_a}} \right]$
Granulometria do Produto	$p_{i,k} = \sum_{j=1}^i A_{ij,k} \exp\left(-\frac{S_{j,k}}{v_z} z^*\right)$;	$P_k = 2F \sin\left(\frac{\alpha_{ip}}{2}\right) U \frac{L^2 - 4y_k^2}{\sum_{j=1}^{N_B} (L^2 - 4y_k^2)}$
Função Quebra	$B(x, y) = K \left(\frac{x}{y_0}\right)^{n_3} \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2}$	
Função Seleção	$\ln(s_i^E/s_1^E) = \zeta_1 \ln(\bar{x}_i/\bar{x}_1) + \xi_2 \ln(\bar{x}_i/\bar{x}_1)^2$;	$S_{i,k} = \frac{P_k}{H_k} s_i^E$

Este simulador foi calibrado para alimentação de vários minérios itabiríticos aos HPGRs presentes nas usinas de pelotização da VALE S.A em Vitória (ES). As Figuras 3.36 (a), (b) e (c) apresentam a aderência do modelo quanto à capacidade, potência distribuição granulométrica do produto (CAMPOS et al., 2019).

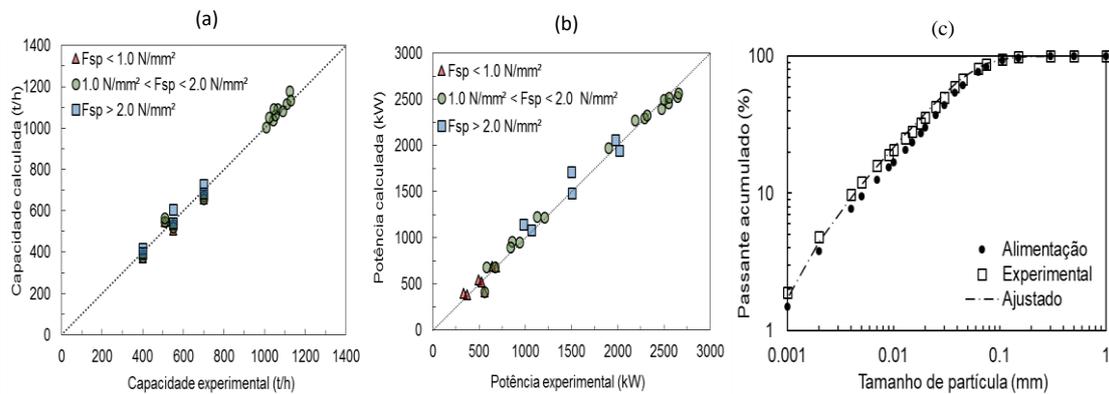


Figura 3.36 Comparação entre os valores experimentais e calculados para a capacidade (a), potência consumida (b) e distribuição granulométrica do produto (c) para calibração do modelo e simulador

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram utilizadas diversas amostras distintas e realizados ensaios de prensagem em várias escalas: compressão de leitos de partículas (CLP), HPGR de Bancada, Piloto e Industrial. Cada equipamento possui suas características e permitem um espectro de configurações que também foram explorados. Nesses vários testes utilizou-se minérios individuais e misturas de minérios com algumas variações do teor de umidade. A Figura 4.1 mostra de forma esquemática, a metodologia utilizada no trabalho contemplando as linhas da pesquisa, os equipamentos e os minérios e suas misturas utilizadas neste trabalho. A seleção das amostras, suas preparações, análises físicas e químicas, bem como execuções dos ensaios com suas respectivas características serão descritas a seguir.

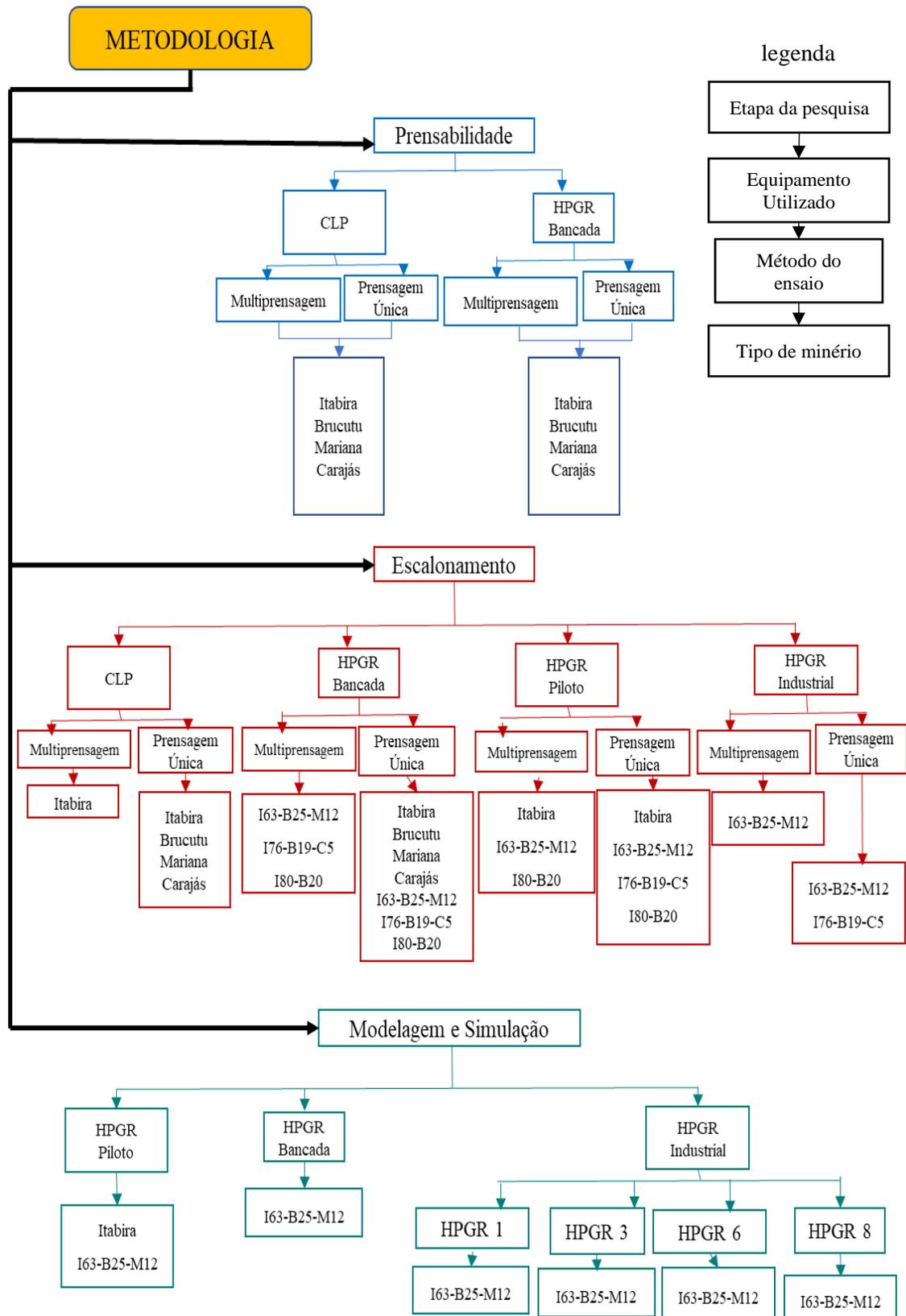


Figura 4.1 Descrição esquemática da metodologia utilizada no trabalho contendo a etapa, equipamento utilizado, método do ensaio e tipo de minério

4.1 Amostras

As usinas de pelletização da VALE S.A são alimentadas com misturas de minérios provenientes das minas de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás. Os tipos de minérios descritos chegam na pelletização de forma individualizada conforme apresentado na Figura 4.2, sendo que a mistura é formada durante a confecção das pilhas de alimentação das usinas. Durante o empilhamento, o fluxo de minério foi desviado para coleta de minério individual, para realização deste trabalho. As proporções das misturas de minérios utilizadas neste trabalho correspondem ao que normalmente se utiliza industrialmente. Neste trabalho os minérios individuais ou misturas de minérios serão identificados conforme sua origem.

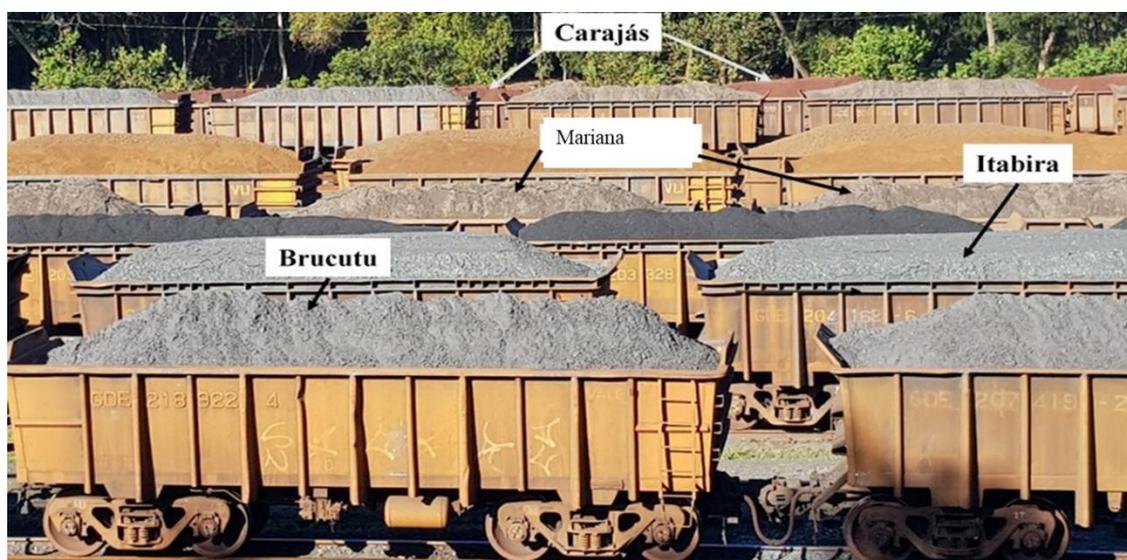


Figura 4.2 Imagem dos tipos de minérios utilizados no processo de pelletização enquanto ainda nos vagões no Complexo de Tubarão (Vitória – ES)

Para os ensaios que foram realizados no LTM/UFRJ, amostras de minérios individuais provenientes de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás foram acondicionadas em tambores de aproximadamente 400 kg cada e enviadas ao Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) para ensaios. Nos casos dos ensaios realizados nas instalações da VALE S.A., os minérios individuais foram transportados por caminhões basculantes até o local de realização do ensaio, onde foram realizadas as misturas. Para o teste industrial, uma pilha de minério foi formada exclusivamente para este ensaio.

4.2 Ensaio de CLP

Os ensaios em CLP tiveram como objetivo estudar o mecanismo de quebra, a saturação da quebra e a influência do teor de umidade na quebra em leito de partículas sob condições cuidadosamente controladas. Os testes foram realizados pelo pessoal técnico do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) no Laboratório de Estruturas (LabEst) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Nas instalações do LTM as amostras foram homogeneizadas e secas para serem usadas nos ensaios de CLP. A Figura 4.3 mostra a etapa de homogeneização no LTM.



Figura 4.3 Amostra de minério espalhada para homogeneização nas instalações do LTM

Para os ensaios em CLP, as amostras individuais dos referidos minérios foram peneiradas e classificadas entre as malhas 0,125–0,106 mm, 0,106–0,075 mm e 0,063–0,045mm. Em cada ensaio utilizou-se 30 gramas de amostra contida nessas faixas granulométricas. De posse das amostras classificadas, os testes foram realizados ajustando-se o teor de umidade (base seca), que variou entre seco, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% em função do objetivo que se desejou avaliar. Adicionalmente, um ensaio com minério de Itabira seco foi realizado para simular múltiplas prensagens.

Para os ensaios em CLP foi utilizado um copo pistão de 40 mm de diâmetro acoplado à prensa Shimadzu conforme apresentado na Figura 4.4. Neste equipamento foi possível medir o deslocamento do pistão e selecionar a força a ser aplicada ao leito, que no presente trabalho variou em 50, 100, 300, 600, 800 e 1000 kN. Nesse

equipamento as forças e deformações experimentadas pelas amostras foram registradas e armazenadas em um arquivo .txt para posterior processamento.



Figura 4.4 Prensa Shimadzu com copo pistão acoplado utilizados nos testes de CLP

Após as prensagens foram medidas as energias aplicadas e o consumo específico de energia com os dados registrados. Amostras geradas nos ensaios foram encaminhadas para o laboratório para medição da distribuição granulométrica e a área superficial específica da alimentação e produto prensado.

4.3 Testes em HPGR de Bancada

Na instalação do laboratório da unidade da VALE S.A. em Vitória (ES) foram realizados testes em HPGR de bancada de fabricação Thyssenkrupp conforme mostra a Figura 4.5. Este equipamento é dotado de rolos pinados com diâmetro de 0,25 m e largura do rolo de 0,1 m, acionada por dois motores de 6,4 kW cada um. Este HPGR foi utilizado para realizar prensagens em estágio único, bem como múltiplas prensagens. O equipamento é dotado de um medidor de abertura operacional. A velocidade dos rolos pode ser definida em dois patamares fixos de 0,33 e 0,66 m/s, enquanto a pressão hidráulica pode ser ajustada de 10 a 100 bar, equivalente a 0,5 a 5,0 N/mm² de força específica. A pressão de nitrogênio, normalmente varia entre 50 e 75% da pressão hidráulica de operação (ALVES, 2012), tendo sido regulada neste trabalho para 70% da pressão hidráulica, que proporciona maior flexibilidade ao sistema, permitindo maior abertura operacional entre os rolos (DANIEL,2002).

Para realização dos ensaios, aproximadamente 10 kg de minério foram adicionados ao silo de alimentação (Figura 4.5) para prensagem única, enquanto 15 kg foram utilizados nos ensaios de múltiplas prensagens, ambos de forma manual com auxílio de um balde.

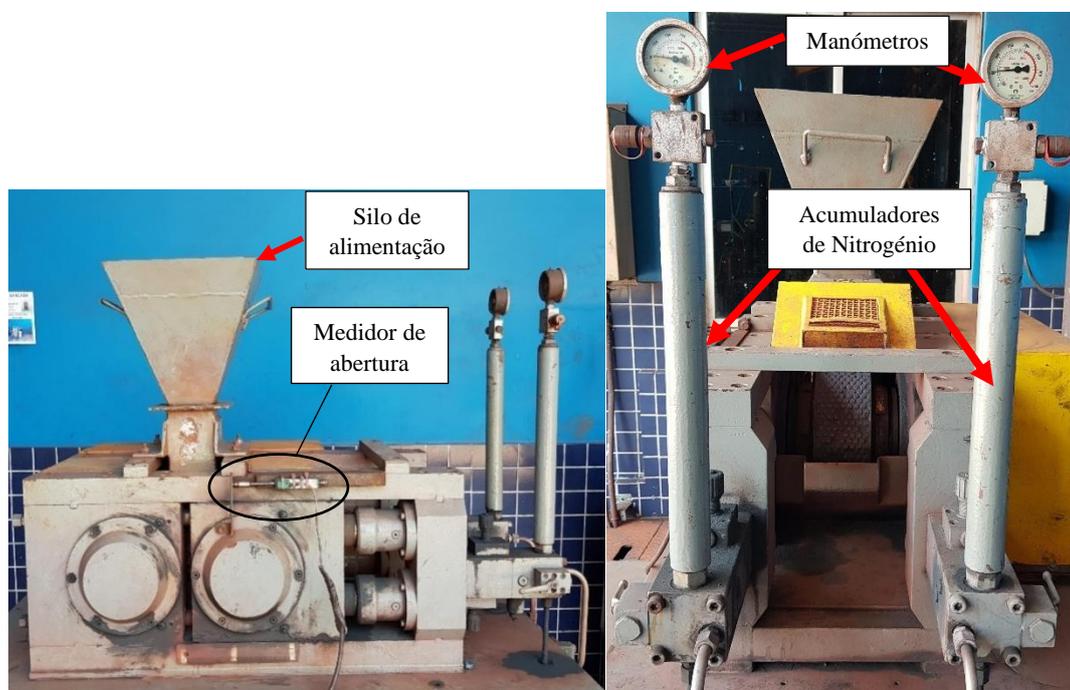


Figura 4.5 HPGR de bancada utilizado para testes nas instalações do laboratório da VALE S.A. em Vitória (ES)

Como informações de saída deste HPGR, é possível extrair a potência dos motores, a abertura operacional, a pressão hidráulica e o tempo de execução do ensaio. Os dados são gerados em arquivo com extensão .txt a cada 250 ms, que podem ser exportados para uma planilha Microsoft Excel[®]. Uma balança é utilizada para medir a massa exata de cada ensaio para calcular a taxa de alimentação, normalmente expressa em t/h. De posse dessas informações, é possível calcular o consumo específico de energia (kWh/t) e a capacidade específica ou $m\text{-dot}$ (ts/m³h). Os dados extraídos foram ainda utilizados para calcular o parâmetro definido como utilização de energia ($\Delta\text{BSA}/\text{kWh}/\text{t}$)

Nos ensaios em prensagem única, após a prensagem o material foi pesado, e uma alíquota de amostra foi retirada e encaminhada para análise no laboratório. No caso dos testes com múltiplas prensagens, após cada passe do material através do HPGR de bancada, o minério foi pesado, uma alíquota de amostra foi retirada e o restante do

material retornado para a prensagem seguinte, e assim o processo se seguiu até completar o número de prensagens estabelecido.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as configurações do HPGR e condições dos minérios nos ensaios para avaliação da prensabilidade dos minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás. Nestes ensaios, o teor de umidade foi variado em quatro níveis, a força específica em três níveis e a velocidade em dois níveis, totalizando 96 ensaios. A força específica e a velocidade dos ensaios foram ajustadas no HPGR. Já para ajuste do teor de umidade, um volume calculado de água com base na massa seca de 10 kg de minério, foi adicionado previamente à realização de cada ensaio.

Tabela 4.1 Condições de ensaios para avaliação da prensabilidade dos minérios

Minérios	Teor de umidade	Força específica (N/mm²)	Velocidade do rolo	Número de ensaios
Itabira	Seco	1,5 (30 bar)		
Brucutu	5,0%	2,5 (50 bar)	0,33 m/s	96
Mariana	7,5%	3,5 (70 bar)	0,66 m/s	
Carajás	10,0%			

Para avaliação da prensabilidade foram ainda realizados ensaios em múltiplas prensagens, totalizando sete passes com os minérios individuais acima. Nestes ensaios foram utilizados minérios secos.

A aplicabilidade dos dados da escala de bancada no escalonamento de HPGR foi avaliada neste equipamento tanto por meio de ensaios com minérios individuais quanto com as seguintes misturas de minérios:

- i. Mistura com 80% minério de Itabira e 20% minério de Brucutu, designado I80-B20;
- ii. Mistura com 63% de minério Itabira, 25% minério Brucutu e 12% minério Mariana, designado I63-B25-M12;
- iii. Mistura de minério contendo 76% minério Itabira, 19% minério Brucutu e 5% minério Carajás, designado I76-B19-C5.

De posse das amostras dos minérios individuais recebidos no laboratório, estes foram secos em estufa e pesados posteriormente nas proporções informadas acima. A

homogeneização foi então realizada espalhando-se os minérios pesados sobre uma lona em formato de pilha, conforme mostra a Figura 4.6.



Figura 4.6 Mistura de minérios sobre lona em processo de homogeneização

4.4 Testes em HPGR Piloto

Os testes em HPGR na escala Piloto foram realizados na usina montada para esta finalidade na unidade da VALE S.A em Vitória (ES). A Figura 4.7 mostra uma vista geral da usina piloto de prensagem em HPGR.



Figura 4.7 Vista geral da planta contendo um HPGR piloto utilizada para testes de prensagem

Esta usina contém um HPGR piloto ou semi-industrial conforme mostrado na Figura 4.8, com dimensões do rolo de 1,0 m de diâmetro e 0,32 m de comprimento. Este equipamento é acionado por dois motores de 150 kW cada um, dotados de inversores de frequência para variação de velocidade. A taxa de produção é medida em t/h por meio de uma balança dinâmica integradora instalada na correia transportadora de produto, sendo a capacidade máxima deste equipamento de 50 t/h.

Os testes foram realizados a uma taxa de 40 t/h, o que representa 80% da capacidade máxima. Esta taxa foi definida levando em consideração o fator de projeto adotado pela VALE S.A. em que os equipamentos devem operar em 80% de sua capacidade máxima. Foi utilizada a massa de aproximadamente 10 t em cada um dos ensaios que compuseram este trabalho. A usina pode ser alimentada por caminhões tipo basculante de até 12 m³ ou pás carregadeiras. O produto pode ser depositado sobre caminhão ou pá carregadeira localizados na extremidade do transportador de correia de produto. No caso de testes com múltiplas prensagens, o produto de cada prensagem retornou ao circuito com auxílio de uma pá carregadeira para nova prensagem, após as coletas de alíquotas de amostras para análises.



Figura 4.8 HPGR piloto utilizado para realização dos testes de prensagem

O HPGR piloto permite a coleta de amostra longitudinalmente abaixo do rolo por meio de um dispositivo desenvolvido para esta finalidade, conforme apresentado na Figura 4.9. Esta amostragem tem por objetivo quantificar a geração de área superficial específica (cm^2/g) e a curva de distribuição granulométrica, em cada seção abaixo do rolo para avaliar o efeito de borda.



Figura 4.9 Dispositivo para coleta de amostra longitudinal ao rolo sendo introduzido entre os rolos (esquerda) e já contendo o material para análises (direita)

O controle operacional deste HPGR é realizado por meio de um controlador lógico dotado de um supervisório, o qual permite inserir os parâmetros operacionais como definição de taxa de alimentação, pressão hidráulica e abertura operacional mínima. A Figura 4.10 ilustra a tela do supervisório com as informações de parâmetros e monitoramento das respostas em tempo real.

Os dados gerados nos testes são armazenados no próprio supervisório e podem ser transferidos para planilha Microsoft Excel[®]. O sistema calcula automaticamente o consumo específico de energia (kWh/t) e a capacidade específica ($\text{ts/m}^3\text{h}$). Outras informações como: abertura operacional (mm), velocidade e rotação do rolo (m/s e rpm), pressão hidráulica (bar), força específica (N/mm^2), taxa de produção (t/h) e torque (Nm e %), podem também ser adquiridas do supervisório. O intervalo entre cada geração de dados no sistema pode ser manipulado entre 0,5 e 2,0 s.

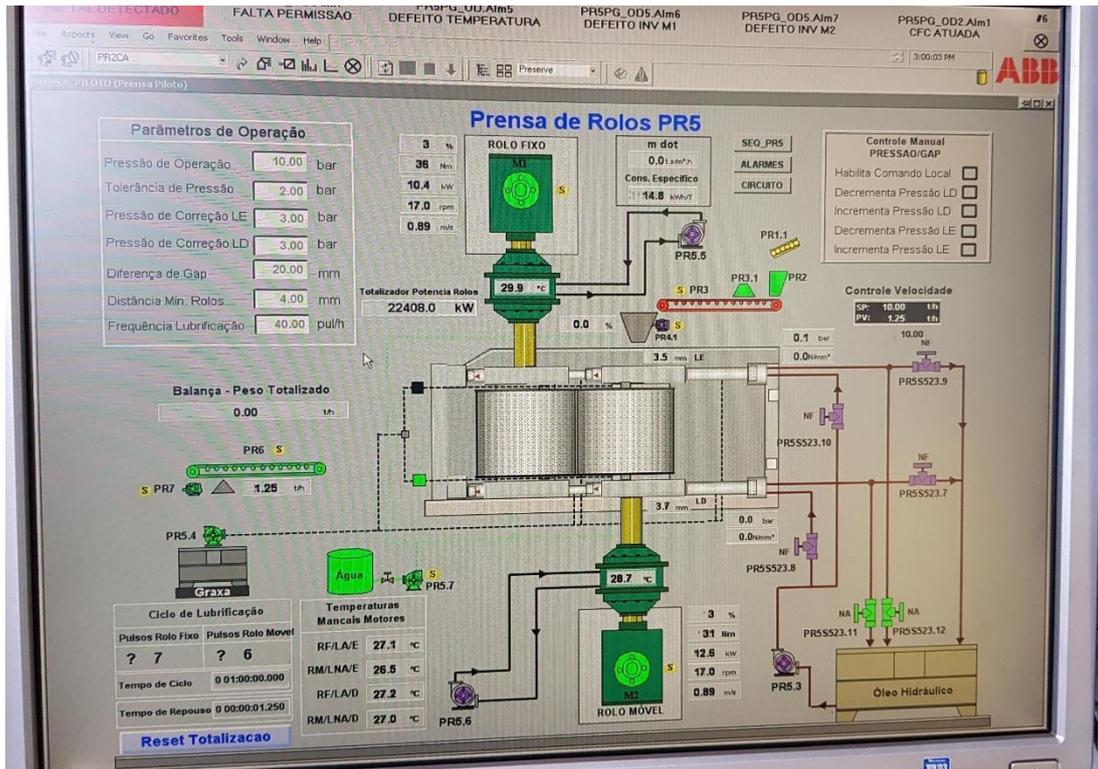


Figura 4.10 Tela do supervisor de operação do HPGR piloto

As amostras de alimentação e produto das prensagens neste equipamento foram encaminhadas ao laboratório para análises de área superficial específica e curvas de distribuição granulométricas.

A aderência da escala piloto no escalonamento de HPGR foi avaliada neste equipamento com minério individual de Itabira testado com teor de umidade em 5% e as misturas de minérios testadas a um teor de umidade fixado em 7,5%, discriminados como I80-B20, I63-B25-M12 e I76-B19-C5, seguindo a codificação descrita em 4.3.

Para preparação dessas misturas utilizadas nos testes, foi necessário pesar os minérios individualmente e espalhar no pátio designado para esta finalidade. Com a ajuda de uma mini pá carregadeira os minérios foram então homogeneizados conforme mostra a Figura 4.11. Para o ajuste do teor de umidade, à medida que se adicionava uma certa quantidade de água, era medido o teor de umidade da mistura com o auxílio de uma balança medidora de umidade mostrada na Figura 4.12, instalada no próprio pátio de homogeneização. O procedimento de medição do novo teor de umidade foi realizado sempre após uma nova homogeneização. O procedimento de homogeneização para controle do teor de umidade foi realizado com uma mini pá carregadeira.



Figura 4.11 Homogeneização das misturas de minério e ajuste do teor de umidade



Figura 4.12 Balança medidora de teor de umidade

4.5 Testes em HPGR Industrial

Nas unidades de pelotização da VALE S.A em Vitória (ES), existem seis HPGRs Industriais em operação, sendo que quatro destes HPGRs foram objeto do presente trabalho. No HPGR 1 foram realizados testes em única prensagem e múltiplas prensagens, enquanto nos HPGRs 3, 6 e 8 foram realizados testes com única prensagem. O HPGR 1 se encontra instalado previamente à moagem (Figura 3.11) e é alimentado com alimentação tal como recebido proveniente das unidades concentradoras existentes nas minas da VALE S.A. Por outro lado, os HPGRs 3, 6 e 8 estão instalados após a filtragem e conseqüentemente após a moagem (Figura 3.12), recebendo uma alimentação mais fina, proveniente dos moinhos.

O HPGR 1 foi utilizado como referência de equipamento industrial neste trabalho no estudo sobre escalonamento a ser apresentado no Capítulo 5.2. Este mesmo equipamento, juntamente com os HPGRs 3, 6 e 8 foram utilizados nas simulações da modelagem, cujos resultados são apresentados no Capítulo 5.3. A Tabela 4.2 mostra as características de projeto de cada um dos HPGRs utilizados nos testes deste trabalho.

Tabela 4.2 Características dos HPGRs utilizados neste trabalho

	HPGR 1	HPGR 3	HPGR 6	HPGR 8
Fabricante	KHD/WEIR	THYSSENKRUPP	THYSSENKRUPP	THYSSENKRUPP
Diâmetro [mm]	1400	2250	1700	2000
Largura [mm]	1600	1550	1400	1500
Taxa de alimentação máx. [t/h]	700	1200	750	1100
Potência dos motores [kW]	1750	1800	1430	1650
Velocidade do rolo [m/s]	1,95	2,01	1,83	2,19
Pressão específica máx. [N/mm ²]	6,39	5,45	3,59	3,82
Pressão máx. [bar]	154	180	170	180
Gap zero [mm]	5	5	3	4

O teste industrial de prensagens múltiplas, totalizando três ciclos, foram realizados no HPGR 1 e demandou uma preparação prévia, pois para este teste foram utilizadas 700 t de minério. A Figura 4.13 ilustra a sequência utilizada para realização do teste. Uma pilha com a mistura de minérios contendo 63% de minério Itabira, 25% minério Brucutu e 12% minério Mariana (I63-B25-M12) foi formada para este teste industrial (Figura 4.13-1). O minério a ser testado foi então carregado em um silo com o auxílio de uma pá carregadeira (Figura 4.13-2). Durante o trajeto foi injetada água para ajuste do teor de umidade em 7,5% (Figura 4.13-3). A mistura de minério foi então prensada no HPGR industrial, HPGR 1 (Figura 4.13-4). Após a etapa de prensagem, o minério sobre o transportador de correia de produto foi desviado para o piso por meio de um desviador de fluxo (Figura 4.13-5), retornado em seguida ao processo com auxílio de uma pá carregadeira para a prensagem seguinte (Figura 4.13-6).



Figura 4.13 Sequência de operações realizadas no teste de múltiplas prensagens em HPGR industrial.

O controle operacional do teste foi realizado na sala de controle da usina de pelletização, por meio de um controlador lógico, onde os parâmetros de taxa de alimentação, pressão de trabalho e nível de coluna foram definidos. A abertura operacional e a velocidade dos rolos são variáveis de resposta em função dos parâmetros operacionais definidos. O monitoramento foi realizado por uma tela supervisória controlada por um operador de HPGR mostrado na Figura 4.14.



Figura 4.14 Tela do sistema supervisor utilizado para controle de processo e operador durante teste industrial de multiprensagem em HPGR industrial

Durante a realização do teste industrial de múltiplas prensagens em HPGR, foram coletadas amostras de alimentação e produto da prensagem. Este teste contou ainda com amostragens de produto longitudinais ao rolo em cinco seções para avaliação do perfil de prensagem e avaliação do efeito de borda. Os pontos de coleta desta amostragem são identificados na Figura 4.15.

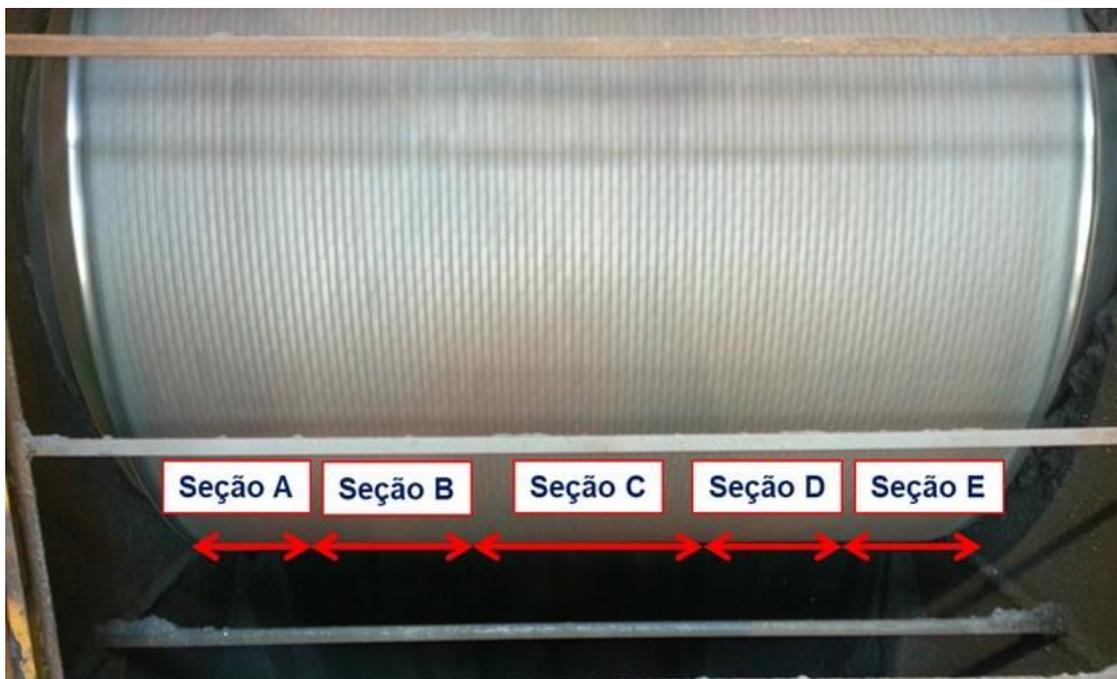


Figura 4.15 Pontos de coleta de amostras no rolo do HPGR 1 utilizado no teste industrial.

4.6 Testes de Moabilidade

Com o intuito de estabelecer uma comparação entre prensagem e moagem em moinhos de bolas, foi avaliada a moabilidade das amostras. Ensaios de moabilidade com amostras dos minérios individuais de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás foram realizados. O teste adotado neste trabalho foi o de requerimento energético proposto do Donda (2003), onde é possível mensurar a quantidade de energia necessária para se atingir o percentual retido em uma determinada fração granulométrica, bem como a área superficial específica gerada em função da energia consumida.

Este ensaio consistiu em realizar a moagem do minério em três tempos definidos: 22, 44 e 66 minutos em moinho de laboratório. A Tabela 4.3 mostra as condições que os ensaios foram realizados, enquanto a imagem do moinho de laboratório utilizado no ensaio é apresentada na Figura 4.16

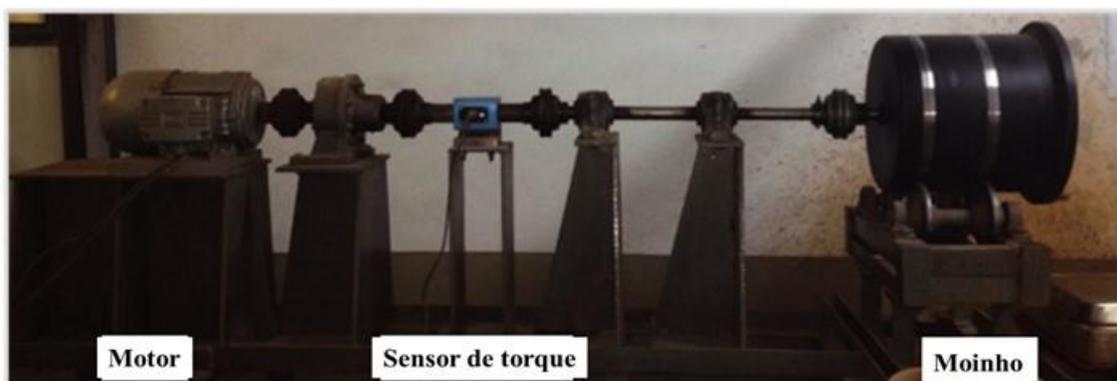


Figura 4.16 Moinho utilizado para teste de moabilidade

Tabela 4.3 Características do teste de moabilidade

Condições do Teste	
Massa de minério (kg)	3,5
Carga moedora (kg)	18
Volume de água (L)	1,167
Massa de polpa (kg)	4,667
% Sólidos em massa	75
Diâmetro do moinho (m)	0,30
Comprimento do moinho (m)	0,30
Diâmetro de bola (m)	0,0225
Porcentagem da velocidade crítica (rpm)	65%
Velocidade do teste (rpm)	52
Fator tempo/energia	0,2728

Ao final de cada intervalo de tempo definido, a energia consumida foi medida com um torquímetro e a carga do moinho é retirada para separação entre os corpos moedores e o minério moído. Uma amostra do minério foi retirada para análises. De posse dos resultados de energia consumida, área superficial específica gerada e percentual retido na malha de controle, são realizadas as correlações entre consumo específico de energia (kWh/t), geração de área superficial específica (cm²/g) e percentual retido em 45 µm, que foi definida como malha de controle. Neste trabalho, os resultados gerados foram apresentados em forma gráfica.

4.7 Análises

As análises físicas e químicas das amostras de alimentação e produto das prensagens foram analisadas no laboratório da VALE S.A. em Vitória (ES).

4.7.1. Análises granulométricas

Para geração das curvas de distribuição granulométrica das amostras ensaiadas foram utilizados dois equipamentos. Um peneirador Retsch (Figura 4.17), que pode operar a seco ou úmido, foi utilizado para análise da distribuição granulométrica do material com tamanho acima de 500 µm. Para material abaixo desta faixa granulométrica, foi utilizado o analisador a laser Malvern Mastersizer[®] 2000 (Figura 4.18).



Figura 4.17 Peneirador Retsch utilizado nas medidas de distribuição granulométrica de partículas maiores que 500 µm.



Figura 4.18 Analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer® 2000 utilizado para medida da distribuição granulométrica de partículas menores que 500 μm .

4.7.2. Análises de área superficial específica

A análise de área superficial específica foi medida de forma indireta por meio da permeabilidade do material ao se passar um fluxo de ar (método de Blaine). Neste caso a área superficial específica (cm^2/g) foi medida no permeabilímetro de Blaine modelo Blaine-Star fabricado pela ZEB (Figura 4.19).



Figura 4.19 Analisador Blaine-Star para medição área superficial específica

4.7.3. Análises químicas e PPC-Perda por calcinação

As análises químicas foram realizadas por espectrômetro de fluorescência de raio X da marca Rigaku com energia dispersiva. A perda por calcinação (PPC) foi medida por perda de massa calcinada com auxílio de uma mufla. Os equipamentos são apresentados na Figura 4.20.



Figura 4.20 Espectrômetro de fluorescência de raio X (A) e mufla (B)

4.8 Modelagem

Como parte de um convênio de pesquisa e desenvolvimento, a VALE S.A. e o Laboratório de Tecnologia Mineral da UFRJ desenvolveram um simulador para prensagem de *pellet feed* em HPGR, o qual é baseado na modificação e adequação do modelo de Torres e Casali (2009) para prensagem de minério de ferro (CAMPOS et al., 2019). Neste trabalho foram realizadas comparações entre simulações e experimentos industriais, com objetivo de avaliar a aderência entre o modelo e resultados industriais.

No simulador são inseridas informações sobre pressão de trabalho, abertura operacional, distribuição granulométrica da alimentação, peso específico do minério, diâmetro, comprimento e velocidade do rolo, além de parâmetros de extrusão, quebra e ângulo de captura que devem ser inicialmente calibrados.

Esta ferramenta foi previamente calibrada para os HPGR piloto e HPGR 3, 6 e 8 (Figura 3.36), em função de algumas misturas de minérios que são utilizadas nestas plantas de pelletização (CAMPOS et al., 2019a, 2009b). Na tela do simulador é possível selecionar o HPGR a ser simulado. Caso ocorra uma mudança na mistura de minério

utilizada em determinada usina, é necessário realizar uma amostragem industrial na alimentação e no produto do HPGR a ser simulado para realizar a calibração dos parâmetros de quebra e extrusão. Para isso uma outra ferramenta é utilizada. Os novos parâmetros devem ser inseridos no simulador para realizar as novas simulações.

Como saída da simulação é possível obter: capacidade (t/h), área superficial específica da alimentação e produto, distribuição granulométrica do produto, consumo específico de energia (kWh/t), entre outros. O simulador apresenta ainda, de forma gráfica, as distribuições granulométricas da alimentação, produto e perfil de Blaine e algumas classes granulométricas em função da posição de saída do produto longitudinal ao rolo. A tela do simulador é mostrada na Figura 4.21.

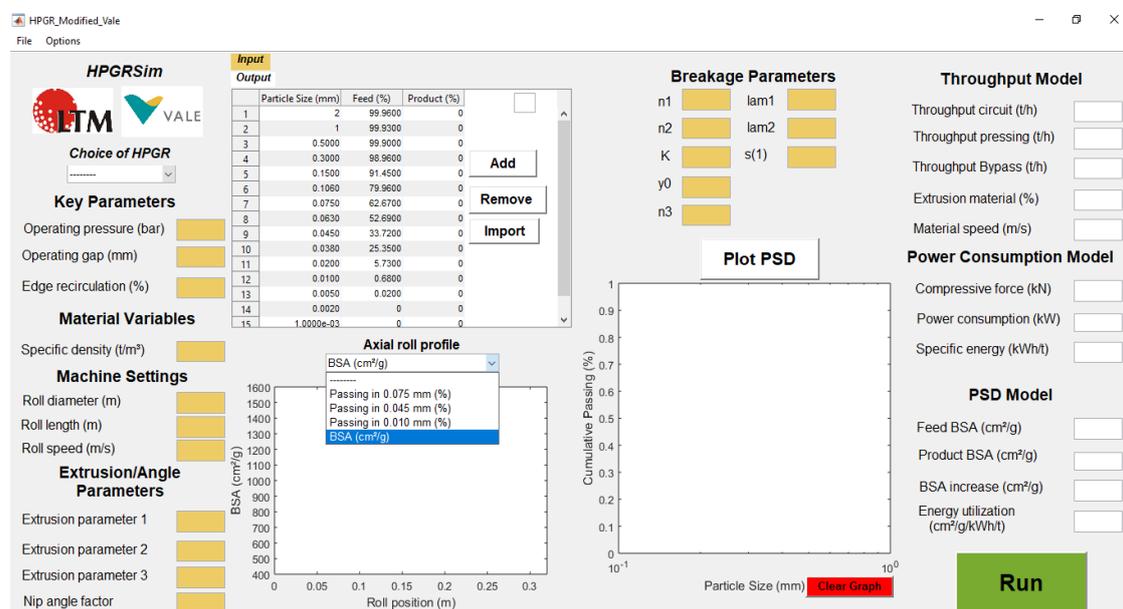


Figura 4.21 Tela do simulador para prensagem de *pellet feed* em HPGR desenvolvido pela VALE S.A. e LTM/UFRJ

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Prensabilidade

5.1.1 Caracterização dos minérios

A fim de entender as características de prensabilidade dos minérios estudados provenientes dos complexos minerários de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana algumas informações preliminares como distribuição granulométricas, composição química, mineralogia e moabilidade foram necessárias.

Trabalhos anteriores, como os de Casagrande (2016 e 2017), com estes minérios foram realizados internamente na VALE S.A., bem como por outros pesquisadores, a exemplo de Takehara (2004). Isto tornou possível comparar os resultados aqui encontrados com os já estudados, assim como aproveitar as informações já disponíveis na literatura, como a mineralogia, por exemplo.

5.1.2 Granulometria

O estudo sobre prensabilidade dos minérios estudados de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana iniciou-se com uma avaliação da distribuição granulométrica do minério como recebido. As distribuições granulométricas históricas e atuais são apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2. Comparando as distribuições granulométricas dos minérios estudados neste trabalho àquelas dos estudos anteriores, pode-se perceber que seguem a mesma tendência geral com o minério de Carajás mais grosseiro e de Itabira, o mais fino. Nos trabalhos anteriores a análise granulométrica foi restrita a tamanhos superiores a 0,038 mm.

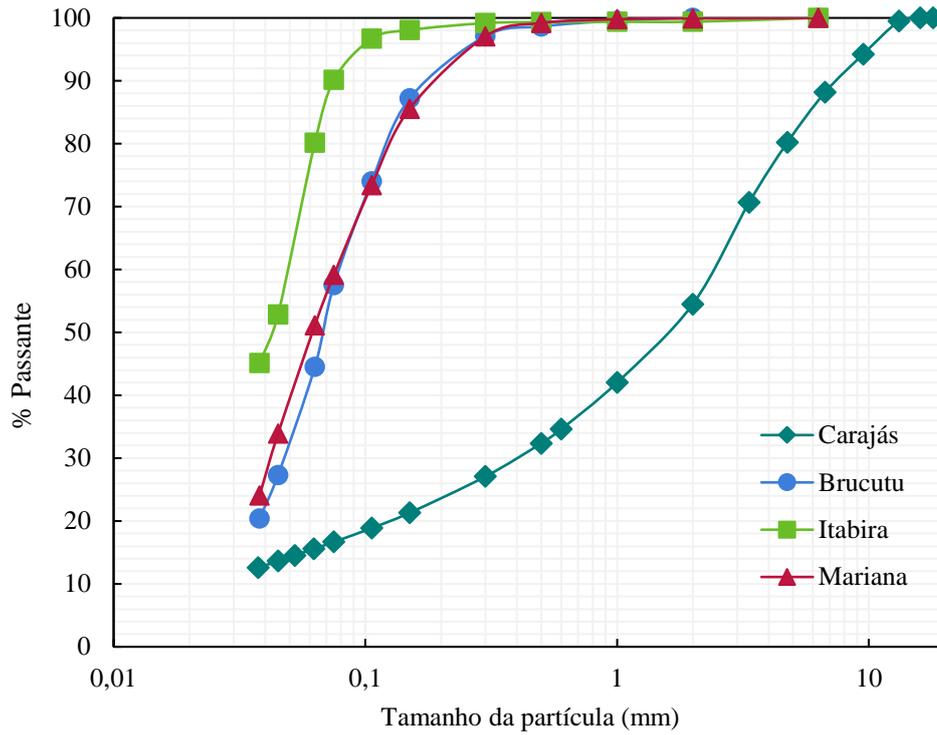


Figura 5.1 Distribuições granulométricas dos minérios em trabalhos anteriores (dados de Casagrande (2017) e Takehara (2004))

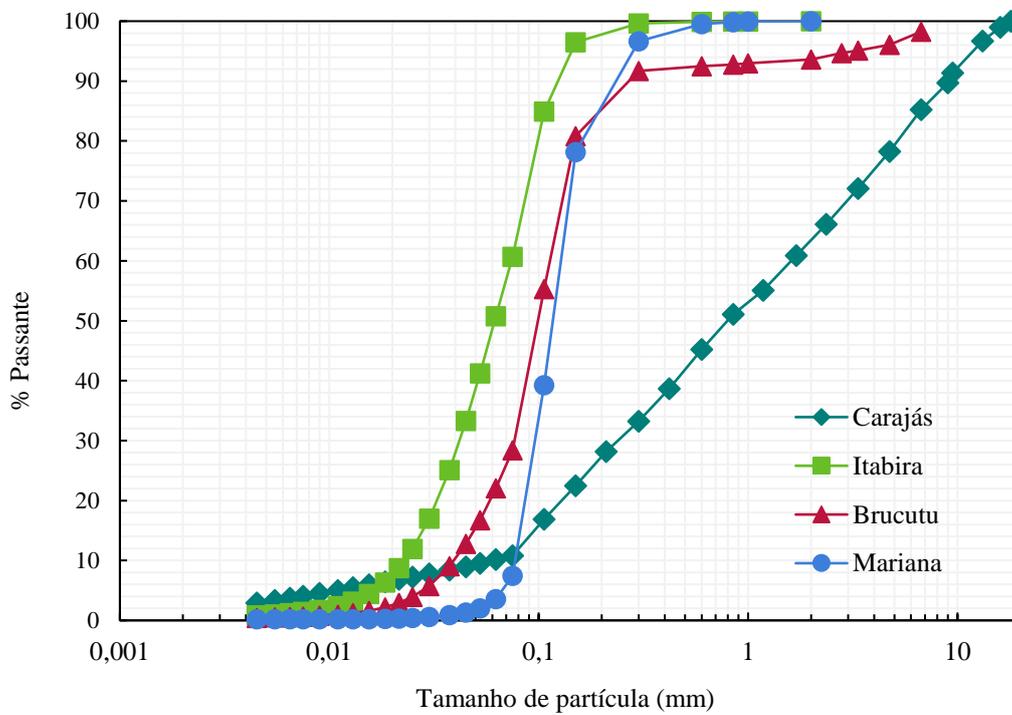


Figura 5.2 Distribuição granulométrica dos minérios como recebido neste estudo

5.1.3 Composição Química

A composição química pode estar relacionada com as características de fragmentação dos minérios, principalmente em relação à presença de quartzo, que por ser um mineral e tenacidade relativamente alta, demanda mais energia para a quebra. Por outro lado, o PPC (perda por calcinação) indica um maior grau de hidratação que confere maior fragilidade aos minérios.

De forma análoga à análise granulométrica, foi comparada também a composição química dos minérios deste estudo, com trabalhos anteriores dos autores citados na avaliação da granulometria. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam este comparativo. O percentual de ferro se mostra aproximadamente equivalente entre os minérios estudados. Este fato se deve ao fato de serem *pellet feed* proveniente de usinas concentradoras, à exceção do minério de Carajás que não sofreu concentração, pois aquela província mineral já confere um percentual de ferro adequado para o processo de pelotização.

Tabela 5.1 Análises químicas das amostras de trabalhos anteriores

Amostra	Teores dos óxidos (%)								PPC
	Cal. Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	
Brucutu*	67,96	1,40	0,31	0,02	0,03	0,01	0,00	0,07	0,86
Carajás**	65,88	0,46	1,49	0,05	0,28	0,02	0,02	0,05	2,86
Itabira*	68,65	0,76	0,27	0,01	0,09	0,01	0,01	0,09	0,37
Mariana*	66,75	1,57	0,59	0,06	0,15	0,01	0,00	0,06	2,30

* Dados de Casagrande (2017)

** Dados de Takehara (2004)

Tabela 5.2 Análise química dos minérios deste estudo

Amostra	Teores dos óxidos (%)								PPC
	Calc Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	
Brucutu	68,05	1,27	0,27	0,03	0,03	0,01	0,02	0,08	0,95
Carajás	65,91	1,41	1,18	0,05	0,20	0,02	0,05	0,08	2,66
Itabira	68,78	1,01	0,22	0,01	0,04	0,02	0,02	0,09	0,23
Mariana	66,16	2,57	0,24	0,04	0,26	0,02	0,04	0,03	2,10

Comparando os dados dos trabalhos anteriores com os valores atuais, não é perceptível uma variação significativa nos valores encontrados, indicando que é possível considerar que não houve alterações relevantes quanto a mineralogia. A partir dos resultados de PPC da Tabela 5.2, pode-se classificar os minérios em dois grupos: um formado por Brucutu e Itabira, com valores de PPC menores que 1,0, ou seja, com menor hidratação, e outro grupo formado por Mariana e Carajás, os quais apresentam valores de PPC maiores que 2,0, ou seja, evidência de maior hidratação.

5.1.4 Mineralogia

O principal mineral de ferro utilizado nas usinas de pelotização da VALE S.A. em Vitória (ES) é a Hematita (Fe_2O_3). Outros minerais ferrosos como Goethita ($FeO.OH.nH_2O$) e Magnetita (Fe_3O_4) podem estar presentes em menores quantidades, além do Quartzo (SiO_2) (CASAGRANDE, 2017). Apesar da mesma composição química, existem diferenças significativas em relação a textura/morfologia nos minerais. A textura confere características de porosidade e dureza diferentes na Hematita. A Tabela 5.3 mostra as diferentes texturas presentes nos minérios estudados.

Tabela 5.3 Texturas e minerais presentes nos minérios estudados (* Minerais porosos).

	Brucutu ¹	Itabira ¹	Mariana ¹	Carajás ²
Hematita Tabular	52,26%	48,00%	17,01%	
Hematita Microcristalina				55,48% *
Hematita Granular	37,72%	50,00%	33,03%	6,74%
Hematita Lamelar	1,69% *			3,55% *
Goethita	4,34% *	1,00% *	13,97% *	
Martita	1,64% *		29,56% *	
Mineral Hidratado				12,01% *
Magnetita			3,65%	
Poros				22,16%
Quartzo	2,00%	0,67%	2,80%	0,03%
Minerais Porosos	7,76%	1,00%	43,54%	71,05%

¹ Dados de Casagrande (2017)

² Dados de Takehara (2004)

Comparando-se os resultados do percentual de minérios porosos com o PPC dos minérios estudados é possível observar uma relação diretamente proporcional entre estes dois parâmetros (Figura 5.3). Os minérios de Brucutu e Itabira apresentam menores quantidades de minerais porosos e menores valores de PPC, enquanto os minérios de Carajás e Mariana possuem quantidades maiores de minerais porosos e maior PPC.

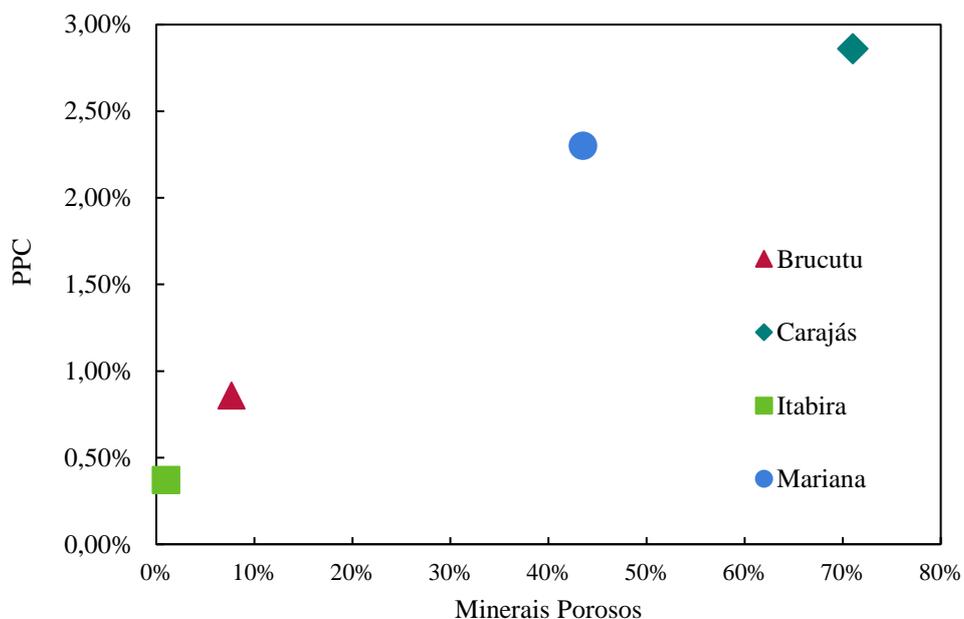


Figura 5.3 Relação entre o percentual de minerais porosos e o PPC nos minérios estudados

5.1.5 Moabilidade

O conceito de prensabilidade ainda é recente e pouco difundido na literatura, no entanto moabilidade já foi amplamente estudada por inúmeros autores e utilizada comumente no processo de cominuição para prever o consumo de energia em função da granulometria e área superficial específica desejada. As Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os resultados dos testes de moabilidade realizados com os minérios estudados.

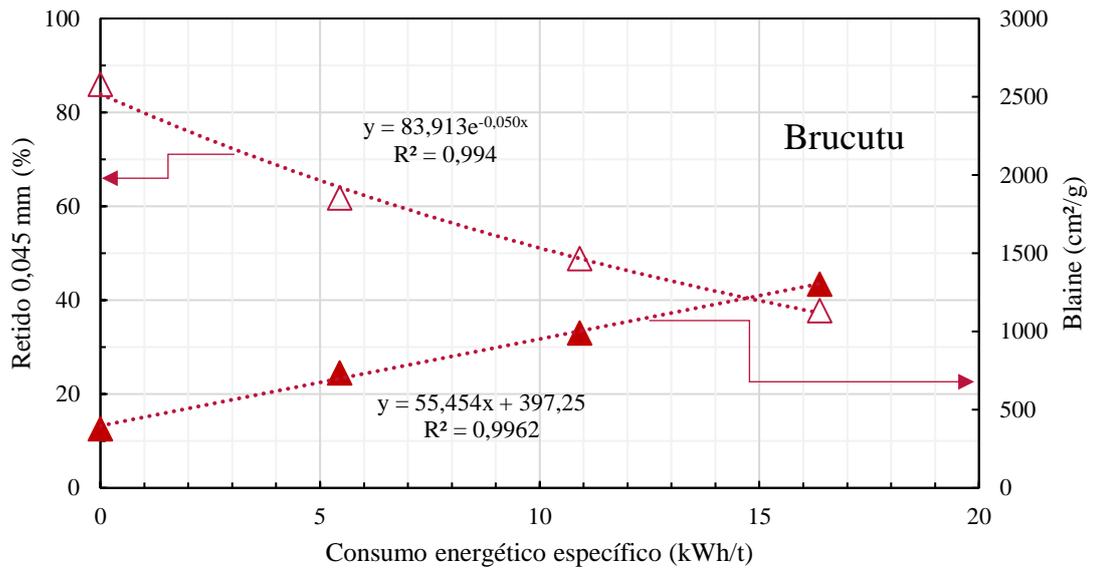


Figura 5.4 Moabilidade de amostra do minério de Brucutu

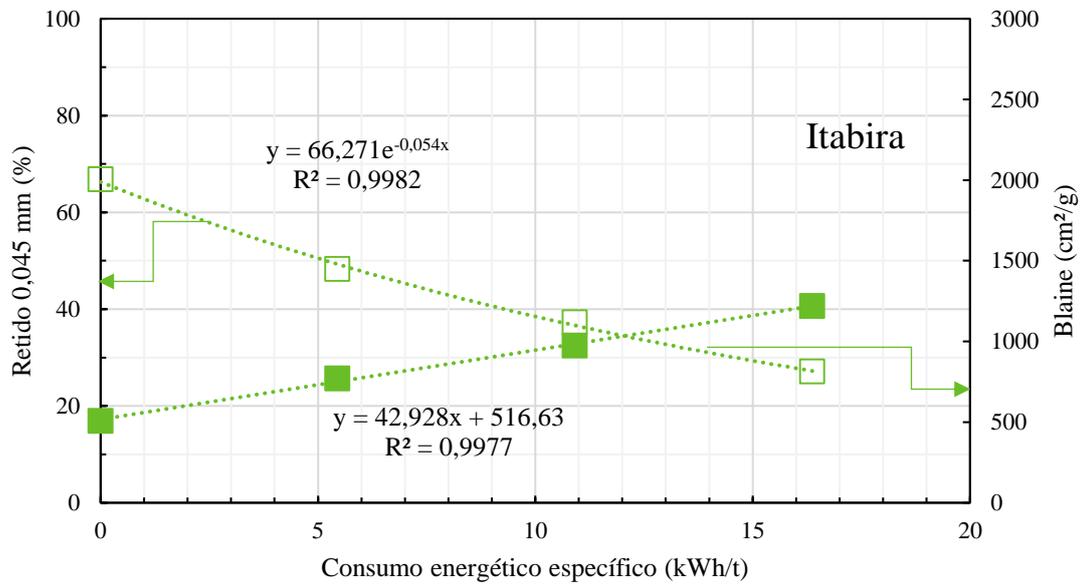


Figura 5.5 Moabilidade de amostra do minério de Itabira

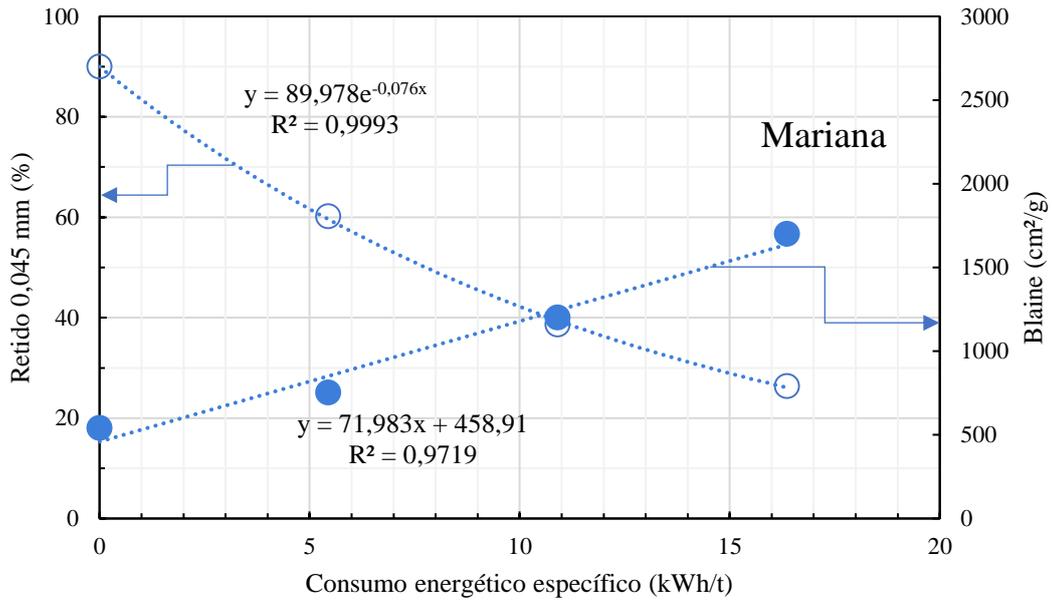


Figura 5.6 Moabilidade de amostra do minério de Mariana

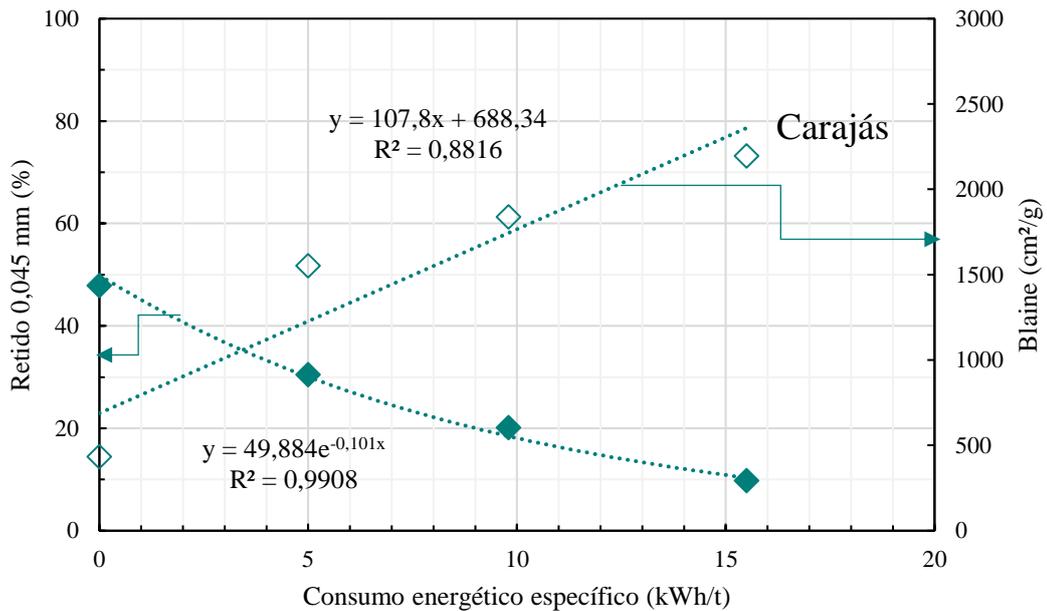


Figura 5.7 Moabilidade de amostra do minério de Carajás

Os resultados dos ensaios de moabilidade nos permitem estabelecer uma ordem crescente de facilidade na moagem destes minérios, partindo de Brucutu e Itabira com moabilidade relativamente próximas e inferiores aos minérios de Mariana e por fim, o minério de Carajás com maior moabilidade. O minério de Carajás não aderiu tão bem à linearidade da curva de Blaine, indicando uma maior geração de área superficial

específica com baixa energia, e menor incremento de área superficial específica quando se imprime uma maior quantidade de energia. Conforme Donda e Rosa (2014), o coeficiente angular da equação exponencial (k_d) (Equação 3.11), expresso em t/kWh, representa o grau de facilidade de um minério em gerar um produto mais fino em termos granulométricos, já o coeficiente linear (α) expresso em cm²/g/kWh/t, representa a capacidade de geração de área superficial específica, verificado na equação da reta (Equação 3.12). A Tabela 5.4 apresenta os percentuais de minerais porosos, PPC e os parâmetros k_d e α de forma consolidada dos vários minérios estudados.

Tabela 5. 4 Característica dos minérios estudados

Minérios	PPC (%)	Minerais porosos (%)	k_d (t/kWh)	α (cm²/g /kWh/t)
Itabira	0,37	1,00	0,054	42,93
Brucutu	0,86	7,76	0,050	55,45
Mariana	2,30	43,54	0,076	71,83
Carajás	2,86	71,05	0,101	107,80

Associando os resultados encontrados nos ensaios de moabilidade com a avaliação mineralógica do percentual de minerais porosos e o percentual PPC, é possível estabelecer uma relação diretamente proporcional com estas grandezas. Pode-se observar que praticamente todos os resultados estão em ordem crescente partindo de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás. Uma pequena inversão ocorre no parâmetro k_d entre Itabira e Brucutu. Portanto, estes resultados nos indicam a ordem do grau de moabilidade entre os minérios estudados.

5.1.6 Avaliação da influência da umidade

Após a caracterização dos minérios provenientes dos complexos de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás quanto à distribuição granulométrica, composição química, mineralogia e moabilidade, o estudo seguiu para testes em prensa de laboratório a fim de investigar o desempenho do processo de prensagem quanto ao consumo específico de energia elétrica (kWh/t), $m\text{-dot}$ (ts/m³h) e utilização de energia (Δ BSA/kWh/t) em função do teor de umidade do minério.

Para esta etapa do estudo, os teores de umidade dos minérios foram ajustados em quatro níveis: seco, 5,0, 7,5 e 10,0% base seca. Os minérios foram prensados individualmente em etapa única de prensagem variando-se a força específica em 1,5; 2,5 e 3,5 N/mm². Os testes foram realizados também variando-se a velocidade periférica dos rolos em dois níveis: sendo 0,33 e 0,66 m/s. Uma maior robustez na análise dos resultados foi obtida utilizando-se os valores médios dos três níveis de força específica ensaiados, para as análises de consumo específico de energia e *m-dot*.

Dentre os minérios analisados foi observado um comportamento de elevação do consumo de energia à medida que aumenta o teor de umidade. A Figura 5.8 relaciona o consumo específico de energia elétrica em função da elevação do teor de umidade nos minérios.

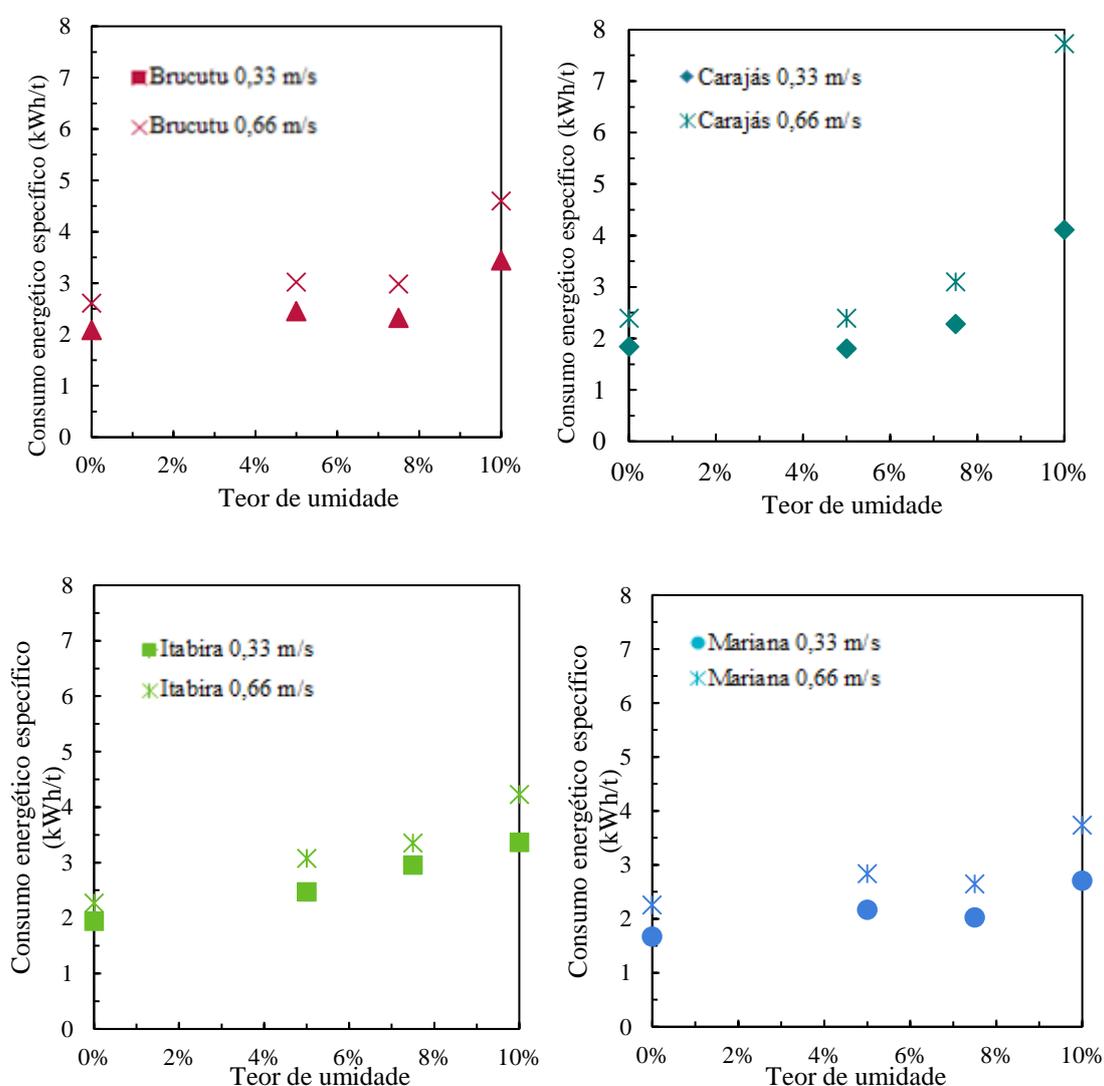


Figura 5.8 Relação entre consumo específico de energia e umidade para os minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana para velocidades de 0,33 e 0,66 m/s. Valores médios das forças específicas foram utilizados nos gráficos

O consumo específico de energia para o minério de Carajás se mostrou mais sensível à mudança de patamar de teor de umidade de 7,5% para 10,0%. Nestes mesmos gráficos foi possível avaliar a influência da velocidade dos rolos, mostrando um consumo de energia sempre superior para a velocidade mais alta.

A Figura 5.9 mostra a influência do teor de umidade na capacidade específica. Para a maioria dos minérios foi observado um ponto ótimo em 7,5% para a capacidade específica, sendo que com umidade superior, o valor sofre uma queda. O minério de Carajás se mostrou mais sensível ao aumento do teor de umidade, apresentando uma queda gradativa na sua capacidade específica. Em todos os casos, como pode ser visualizado na Figura 5.9, também foi verificada uma menor capacidade específica para velocidade periférica mais alta.

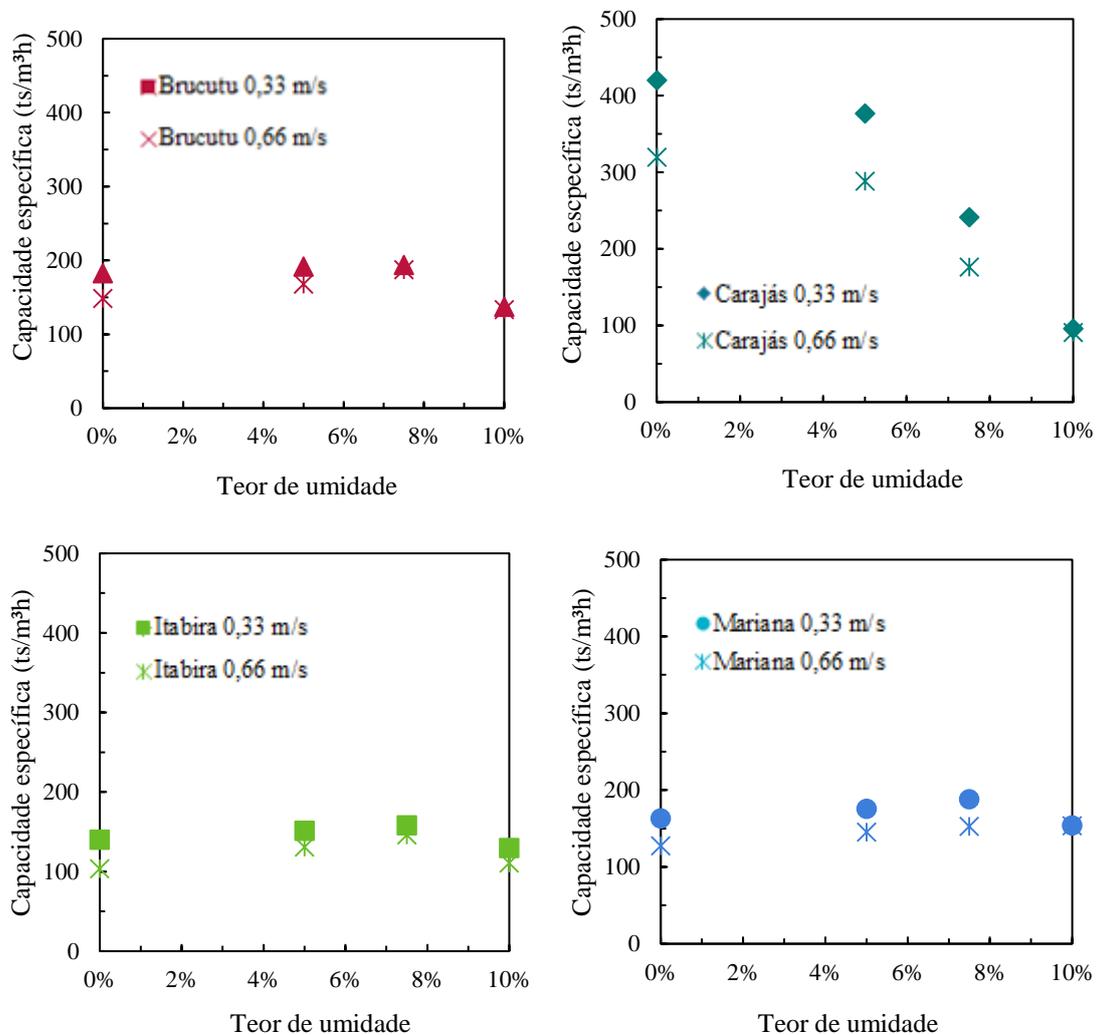


Figura 5.9 Influência do teor de umidade na capacidade específica dos minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana com velocidades de 0,33 e 0,66 m/s, utilizando-se resultados médios obtidos nas três forças específicas

Por se tratar de um *sinter feed*, o minério de Carajás demandou uma maior abertura operacional, o que levou a valores de capacidade específica mais altos. Além disso, o maior percentual de minerais porosos no minério de Carajás o leva a ser mais sensível à saturação intergranular pela umidade, o que pode explicar a redução gradativa da capacidade específica com elevação da umidade observada na Figura 5.9. De fato, a partir do teor de 5,0% de umidade, este efeito se torna mais pronunciado.

A utilização de energia – que pode ser entendida como um índice de eficiência da prensagem – pode ser medida pela razão entre o ganho de área superficial específica (ΔBSA) por unidade de energia elétrica específica (kWh/t). Ensaio em HPGR de bancada para mensurar este parâmetro foram realizados com os minérios estudados em relação à elevação do teor de umidade. Para este ensaio foi utilizada uma força específica de 2,5 N/mm² com a média das duas velocidades periféricas, 0,33 e 0,66 m/s. Novamente conforme pode ser visualizado na Figura 5.10, foi constatado um ponto de umidade ótima em 7,5% para o minério de Brucutu e Itabira, com menor intensidade para este último. O minério de Carajás apresenta eficiência decrescente com a elevação da umidade. Para o minério de Brucutu foi observado um acréscimo da utilização de energia até atingir um ponto máximo, relativo ao teor de umidade em 7,5%. Um efeito similar é observado com o minério de Mariana, no qual é possível observar um comportamento ligeiramente parabólico na utilização de energia em função do teor de umidade, com valor máximo em 5% de umidade. Valores ideais do teor de umidade dos minérios entre 5,0 e 7,5%, onde o HPGR apresenta melhores desempenhos já constatados por Van der Meer (1997) e Van der Meer e Leite (2018).

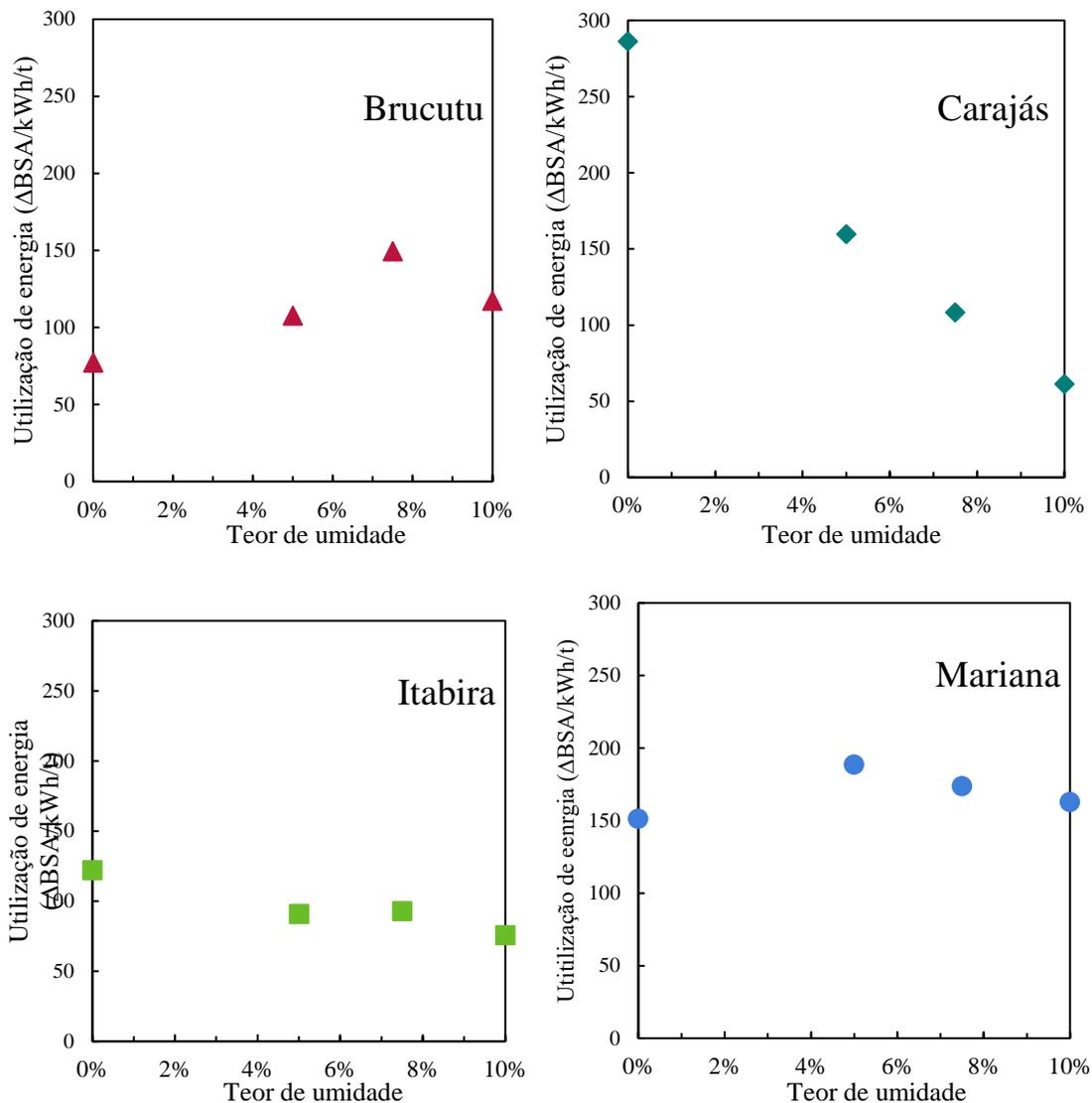


Figura 5.10 Avaliação da utilização da energia na prensagem dos minérios de Brucutu, Carajás, Itabira e Mariana para 2,5 N/mm² e média das velocidades de 0,33 e 0,66 m/s

5.1.7 Granulometria e Área Superficial Específica (BSA)

A partir dos ensaios realizados no CLP foi possível traçar, para os minérios estudados, as curvas t_n e ganho de Blaine (ΔBSA) versus energia com minérios secos e bitolados entre 0,106 e 0,075 mm, onde se identifica a saturação dos minérios e os comportamentos distintos entre estes para elevação da área superficial específica e aumento do percentual passante em 0,045 mm. Em relação ao ganho de Blaine, a Figura 5.11 permite verificar que o minério de Carajás se destaca pela sua capacidade de geração de área superficial específica em relação aos demais. Quando submetidos a um incremento de força contínua, os minerais se quebram até atingir um ponto de saturação conforme estudado por Mütze (2007) e também observado no presente trabalho.

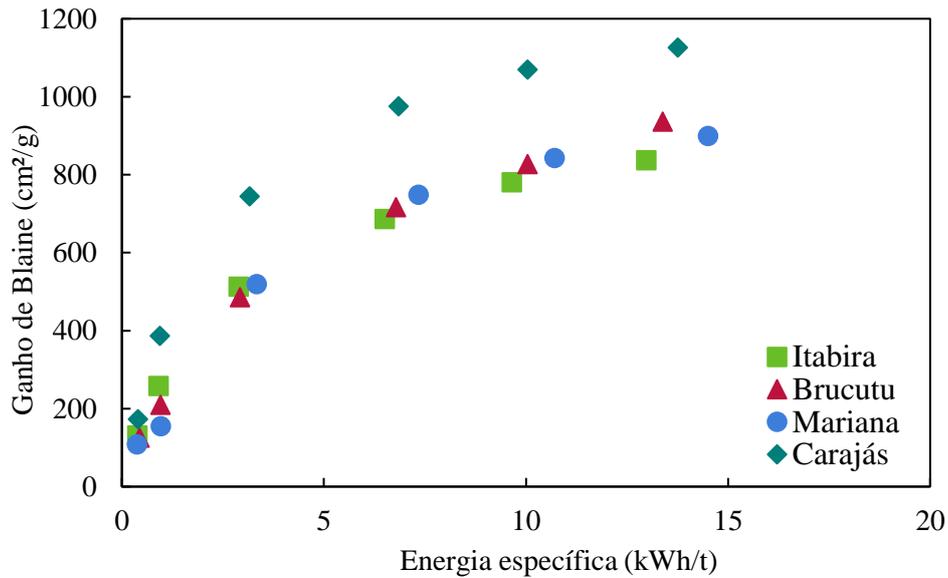


Figura 5.11 Geração de área superficial específica em função da energia aplicada realizado em ensaio de CLP as amostras de minérios secos e com granulometria entre 0,106 e 0,075 mm

Neste mesmo ensaio foram extraídos os resultados de granulometria dos minérios na malha de 0,045 mm, conforme Figura 5.12. Aqui pode-se observar o comportamento de dois grupos de minérios em função de suas características mineralógicas. Os minérios de Itabira e Brucutu, que possuem um menor percentual de minerais porosos, são responsáveis por gerar produtos mais finos que os minérios de Mariana e Carajás que contêm maiores percentuais de minerais porosos.

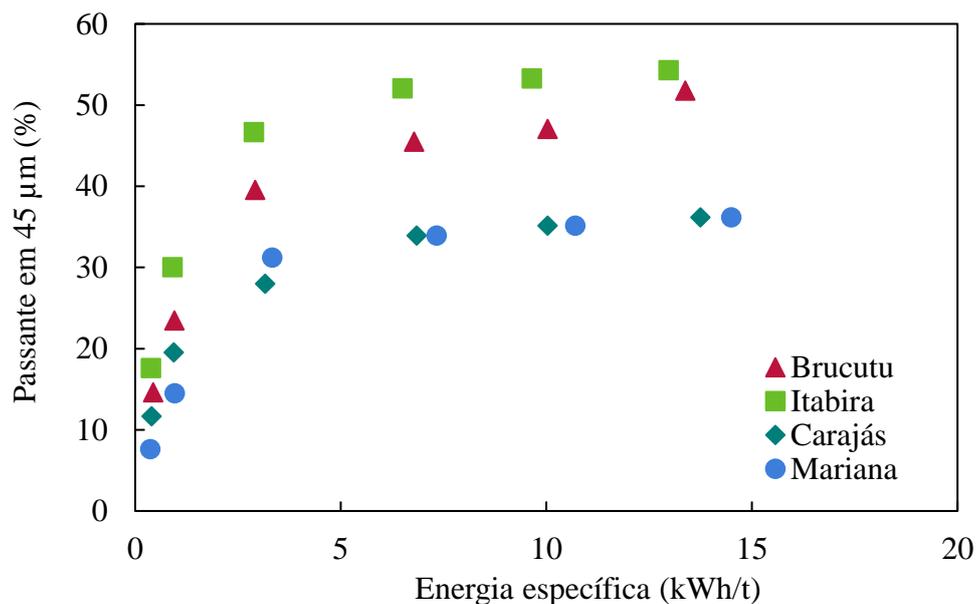


Figura 5.12 Redução da granulometria em função da energia aplicada em ensaio de CLP com minérios secos e granulometria entre 0,106 e 0,075 mm

A Figura 5.13 resume os comentários anteriores de forma a mostrar as curvas de distribuição granulométricas geradas no ensaio, onde é possível verificar que o minério de Carajás gera um percentual maior de material ultrafino quando comparado aos demais minérios. Por outro lado, este mesmo minério de Carajás deixa um resíduo mais grosseiro. Já com o minério de Itabira, é possível se observar o oposto do minério de Carajás.

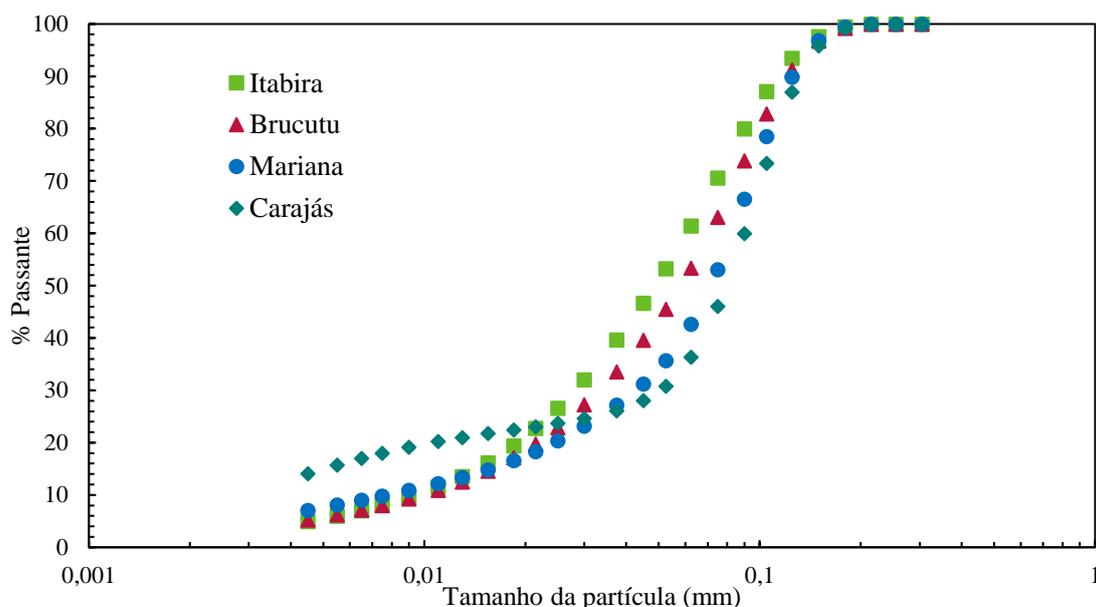


Figura 5.13 Distribuição granulométrica do produto do ensaio de CLP com minérios secos e granulometria entre 0,106 e 0,075 mm

Nos processos por fragmentação em leito, como o caso do HPGR, o efeito da saturação é uma variável de grande influência, considerando o incremento de energia. Conforme já descrito na revisão da literatura, diversos autores, ente eles Schönert (1995 e 1998), Tondo (1997), Mütze (2007, 2014 e 2016), estudaram este fenômeno. Os ensaios por compressão em leito de partícula nos permitiram avaliar também o comportamento reológico do leito dos minérios estudados, conforme apresentado na Figura 5.14. Mais uma vez, as variáveis de composição química (PPC) e mineralógicas (minerais porosos), mostraram suas influências neste comportamento. Uma carga máxima de 100 kN foi imposta às amostras e o deslocamento do pistão foi mensurado, indicando a saturação do leito de partículas.

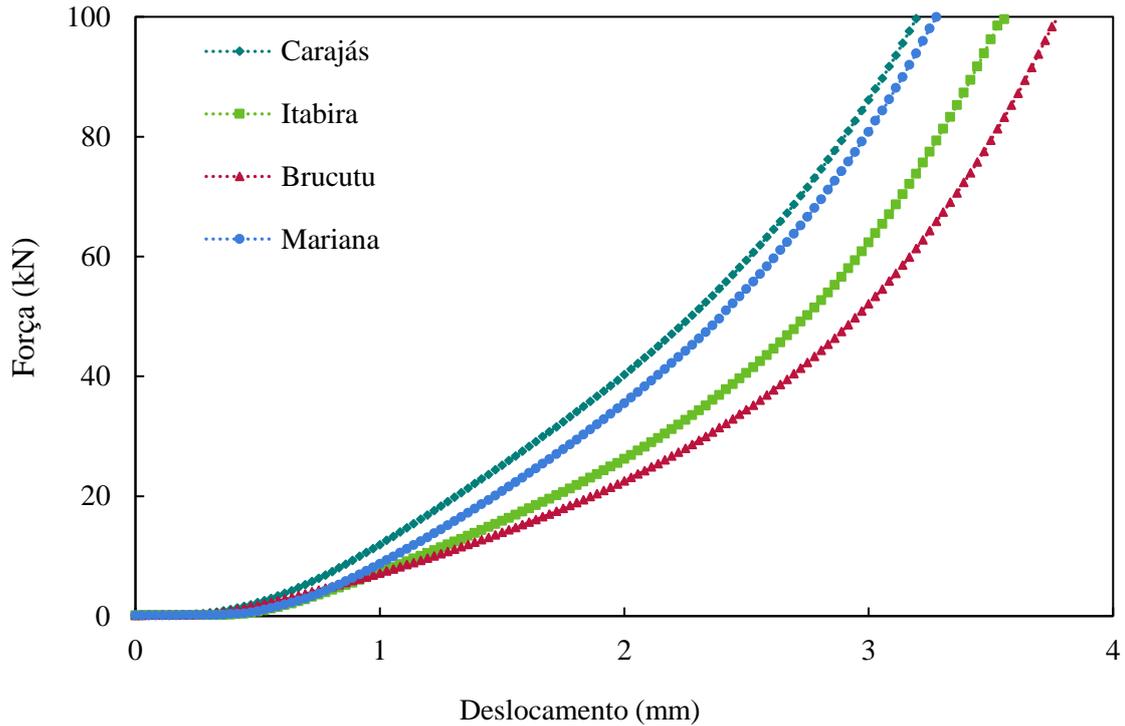


Figura 5.14 Ensaio de CLP para avaliação da saturação dos minérios com granulometria entre 0,106 mm e 0,075 mm aplicando uma carga máxima de 100 kN

No processo de cominuição, é bastante conhecida a relação de redução da granulometria e elevação de área superficial específica com incremento de energia. No caso dos minérios estudados na prensagem em prensa de rolos de bancada a relação se mantém, porém os minérios apresentam comportamentos um tanto quanto distintos. Foram realizados testes em HPGR de bancada variando-se em três níveis as forças específicas aplicadas: 1,5, 2,5 e 3,5 N/mm². Com estes ensaios foi possível extrair informações acerca da geração de área superficial específica e da redução da granulometria. Assim como nos ensaios de CLP, para o ensaio de prensagem a análise foi voltada para a malha de 0,045 mm, que normalmente é usada como controle no processo de pelletização (MEYER, 1980).

A Figura 5.15 destaca a capacidade de geração de um produto mais fino obtido com o minério de Itabira, enquanto que o minério de Carajás apresenta uma menor geração de produto nesta malha de controle. Estes resultados corroboram com o resultado do ensaio de CLP mostrados na Figura 5.12, em que as curvas desses dois minérios se assemelham.

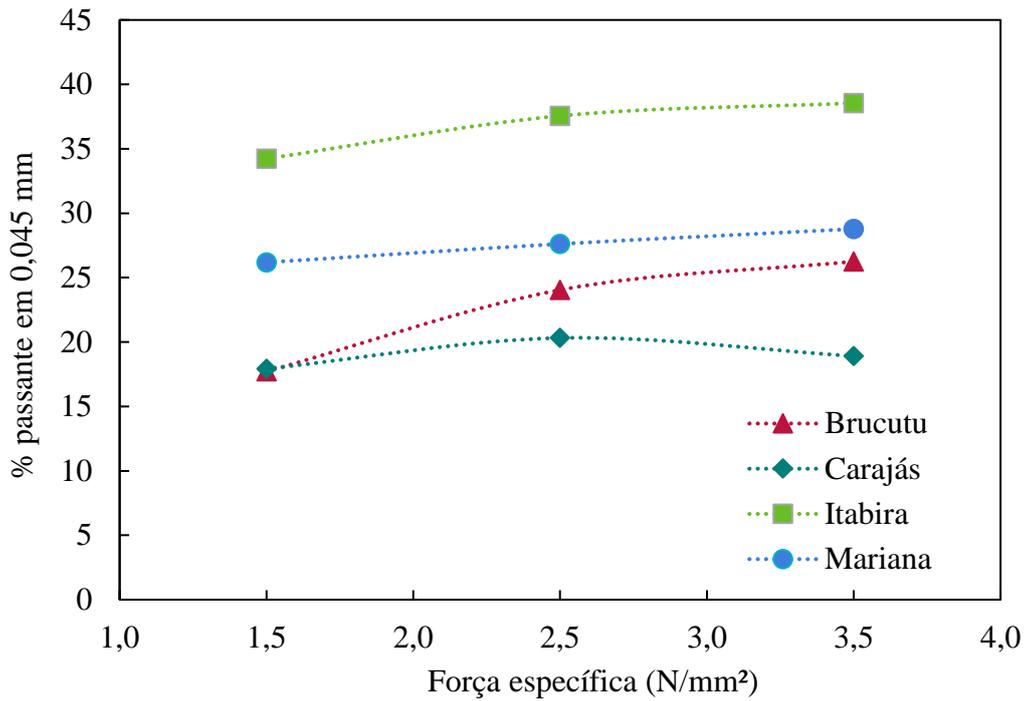


Figura 5.15 Geração de produto passante em 0,045 mm com minérios secos prensados na prensa de bancada em três níveis de força específica e médias obtidas nas velocidades de 0,33 e 0,66 m/s

Uma outra malha de controle de 5 μm foi utilizada para comparar o comportamento dos minérios neste ensaio. Este tamanho foi escolhido por representar a fração ultrafina, fortemente associada à geração de área superficial específica. No caso dessa malha, conforme apresentado na Figura 5.16, os minérios de Carajás e Mariana se mostram com maior capacidade de geração de ultrafinos.

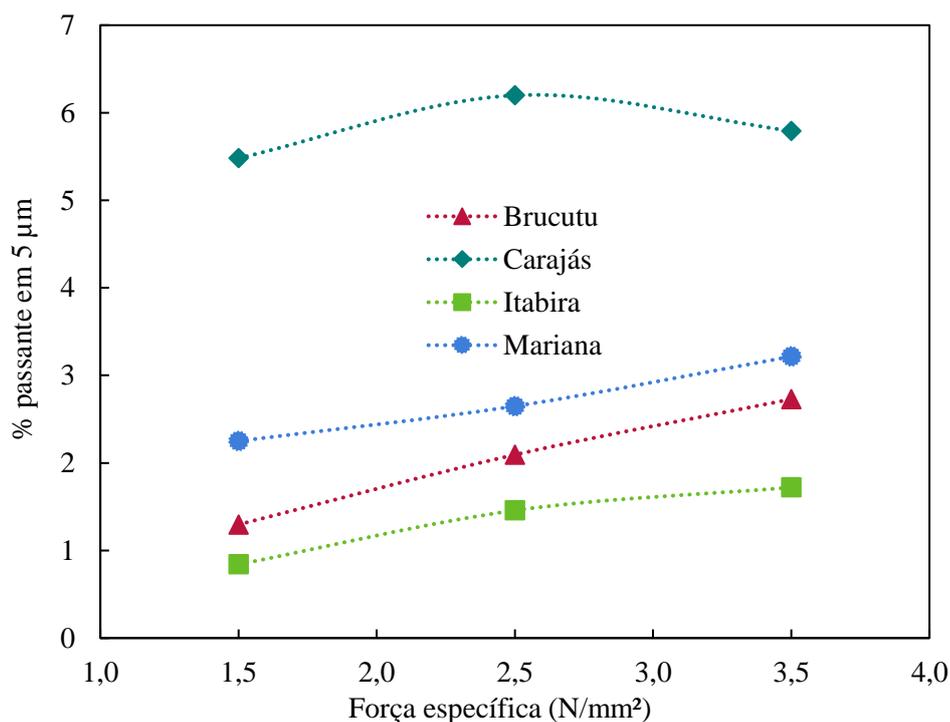


Figura 5.16 Geração de produto passante em 5 µm com minérios secos prensados na prensa de bancada em três níveis de força específica e médias de velocidades de 0,33 e 0,66 m/s

Além da indicação de geração de área superficial específica através do tamanho da partícula de 5 µm, foi também realizada medição de Blaine no ensaio realizado no HPGR de bancada (Figura 5.17). Na figura são evidenciadas as diferentes faixas de ganho de superfície específica para os minérios, sendo que o minério de Brucutu apresentou um menor ganho, seguido pelo de Itabira, Mariana e Carajás com uma maior geração de área superficial específica para o mesmo requerimento energético. Para o minério de Carajás, que não aderiu a linha de tendência, pode-se fazer um paralelo dos resultados obtidos neste ensaio com os encontrados no teste de moabilidade (Figura 5.7). A Figura 5.17 mostra que, para baixos níveis de energia, se obtém uma elevada geração de área superficial específica, ao passo que para energia mais elevadas, o incremento de área superficial específica tende a diminuir. Este fenômeno pode estar associado à presença de fases débeis do minério, que tendem a fragmentar com facilidade a baixas energias específicas. O minério de Itabira, entre todos estudados, é o que apresenta uma maior sensibilidade para elevação de área superficial específica com incremento de energia. Este fato pode ser observado pela inclinação da linha de tendência.

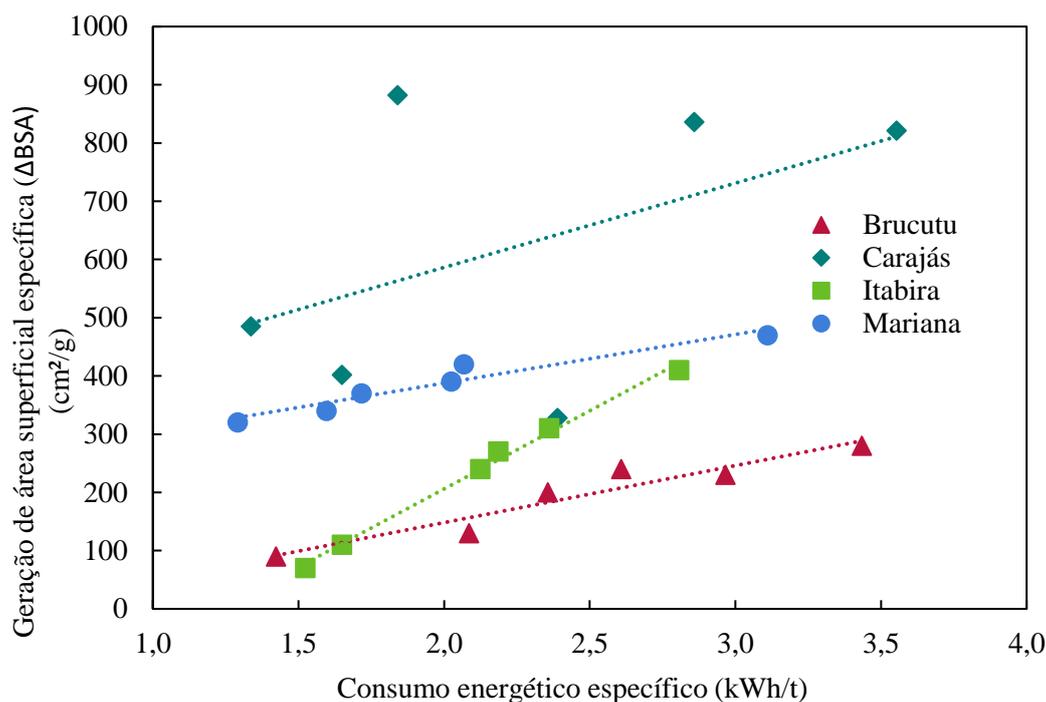


Figura 5.17 Geração de área superficial específica (Δ BSA) em função do consumo específico de energia em forças específicas de 1,5, 2,5 e 3,5 N/mm², nas velocidades de 0,33 e 0,66 m/s e com minérios secos no HPGR de laboratório

É nítida a semelhança do posicionamento das curvas dos minérios quando se compara as Figuras 5.11, 5.16 e 5.17, indicando o mesmo comportamento dos mesmos quando submetidos à compressão em leito de partículas em duas escalas e em dois equipamentos distintos, no ensaio de CLP e no HPGR de bancada.

5.1.8 Utilização de energia

Em comparação com o trabalho de Müller (1989), onde foi estudado a influência da velocidade na eficiência de prensagem, no presente trabalho os minérios foram prensados com velocidades de 0,33 e 0,66 m/s. Müller (1989) relata em seus estudos, uma perda de eficiência com elevação da velocidade devido o ar aprisionado contribuir para a saturação do leito. De fato, neste trabalho foi observado o mesmo comportamento, os minérios com maior percentual de minerais porosos, tendem a atingir a saturação antes dos minérios com menor percentual de minerais porosos, como mostrado na Figura 5.18.

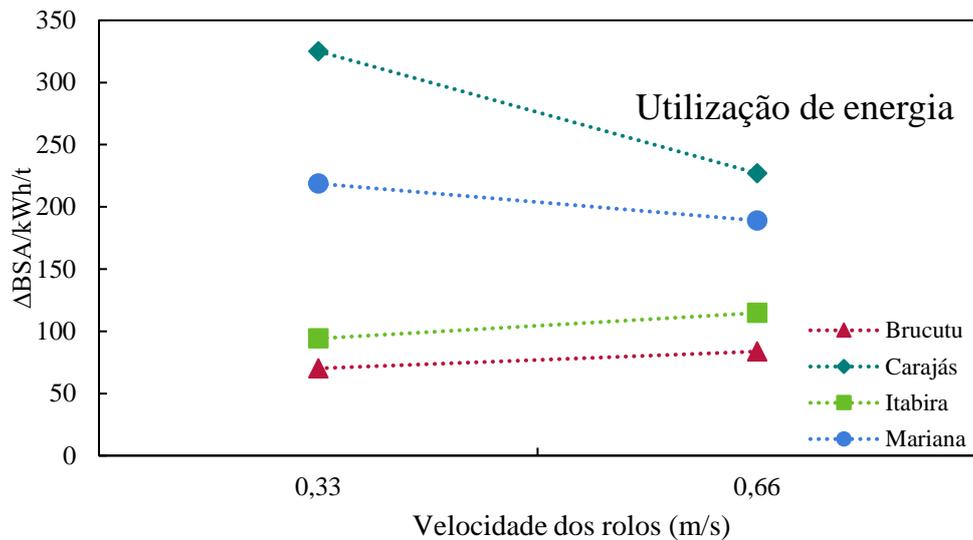


Figura 5.18 Influência da velocidade na eficiência média em três níveis de força específica (1,5; 2,5 e 3,5 N/mm²) com prensagem de minérios secos na pensa de bancada a diferentes velocidades

Para os quatro tipos de minérios estudados, a escala de eficiência ou utilização de energia, que representa o ganho de área superficial específica por unidade de consumo de energia ($\Delta\text{BSA}/\text{kWh}/\text{t}$), seguiu o mesmo comportamento da geração de área superficial específica (Figura 5.17), com Brucutu com menor eficiência, passando por Itabira, Mariana e Carajás. Os minérios de Brucutu, Itabira e Mariana respondem quase que linearmente (Figura 5.19), mantendo a eficiência com incremento de energia. Já o minério de Carajás mostra que a prensagem o torna menos eficiente com o aumento da energia, apresentando uma tendência de queda de geração de área superficial específica à medida que se imprime maiores energias. Este comportamento já havia sido observado no ensaio de moabilidade (Figura 5.7).

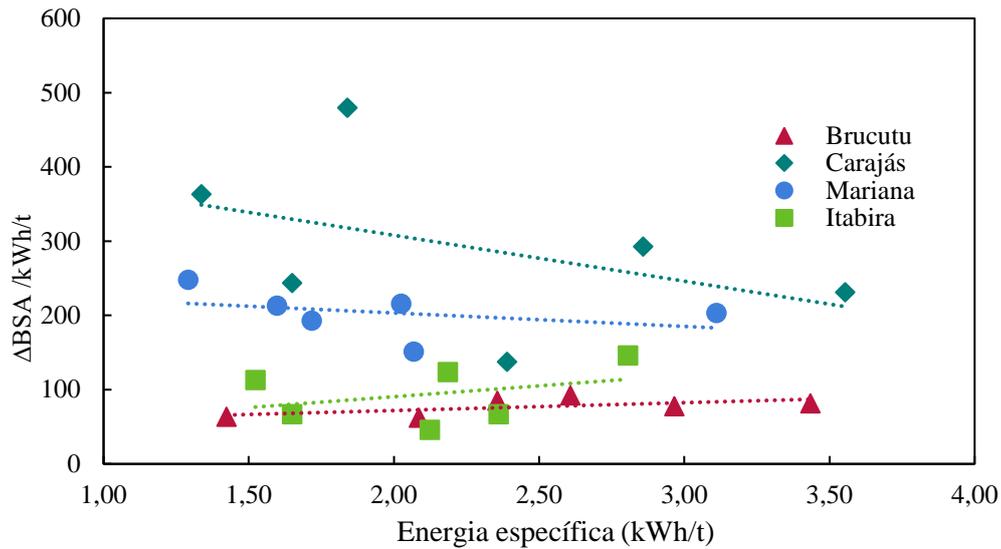


Figura 5.19 Influência da energia na eficiência medida em três níveis de força específica (1,5; 2,5 e 3,5 N/mm²) com prensagem de minério seco em prensa de laboratório em duas velocidades (0,33 e 0,66 m/s)

5.1.9 Capacidade Específica

O estudo para avaliação da capacidade específica, medido em ts/m³h, foi realizado utilizando-se o HPGR de bancada, com os quatro tipos de minérios secos estudados, variando-se a força específica em três níveis: 1,5; 2,5 e 3,5 N/mm². Os resultados das médias de duas velocidades (0,33 e 0,66 m/s) foram lançados na Figura 5.20. Na comparação entre os minérios estudados quanto à capacidade específica, novamente foi possível observar uma escala progressiva com o minério de Carajás apresentando a maior capacidade entre os quatro minérios estudados. O descolamento do minério de Carajás em relação aos demais se deve ao fato de ser um *sinter feed*, que possui granulometria mais grosseira, exigindo uma maior abertura operacional em ambas velocidades. A abertura operacional está diretamente relacionado à capacidade específica (Equação 3.5).

Na Figura 5.20 foi observado um ponto ótimo com maiores capacidades específicas para a força específica em 2,5 N/mm². O minério de Brucutu apresenta elevação da capacidade com incremento da força específica. Neste caso é possível observar uma inversão de posição entre os minérios de Brucutu e Itabira. A queda mais acentuada na capacidade específica com o minério de Carajás, observada na Figura 5.20, com o incremento de força específica se deve ao fato de se tratar de um *sinter feed*. Com aplicação de baixa energia há uma menor quebra da granulometria mais grosseira, mantendo maior a abertura operacional. Quando se imprime maiores quantidades de

energia, ocorre a quebra das partículas maiores, ocasionando redução da abertura operacional com conseqüente redução da capacidade específica. As energias aplicadas no ensaio não foram suficientes para observar o comportamento completo do minério de Brucutu, pois conforme a Figura 5.14 esse minério apresenta menor capacidade de saturação que os demais minérios estudados.

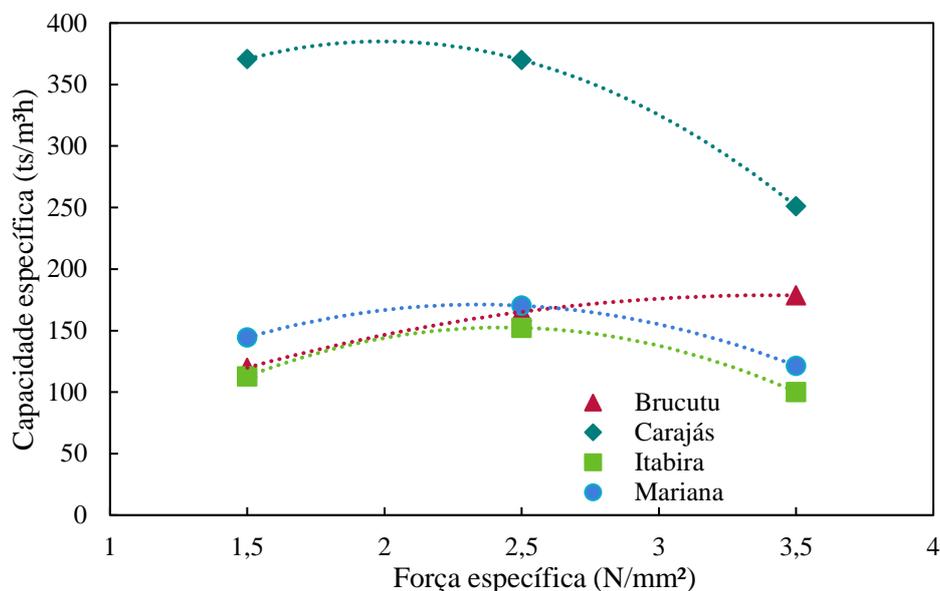


Figura 5.20 Influência da força específica (1,5; 2,5 e 3,5N/mm²) na capacidade específica para prensagem de minério seco para a média de duas velocidades (0,33 e 0,66 m/s)

5.1.10 Moagem versus Prensagem

Após uma investigação do comportamento dos minérios estudados no processo de moagem por meio dos ensaios de moabilidade, assim como o comportamento na prensagem por meio de ensaios de CLP (Compressão em Leito de Partícula) e HPGR de bancada, é possível realizar comparações de eficiências entre estes dois processos de cominuição.

A Figura 5.21 mostra ensaios comparativos do comportamento dos minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás para os ensaios de moagens e prensagem em CLP. Para os testes de moagem, os minérios foram submetidos à energia crescente de moagem em função do tempo de exposição no interior do moinho, conforme metodologia desenvolvida por Donda (2003). Para os ensaios de prensagens em CLP os minérios foram classificados em três classes de tamanho, sendo: 0,150–0,125 mm; 0,106–0,075 mm e 0,063–0,045 mm. Os minérios foram submetidos a forças de compressão crescentes até atingir níveis de energia semelhantes àqueles obtidos na moagem.

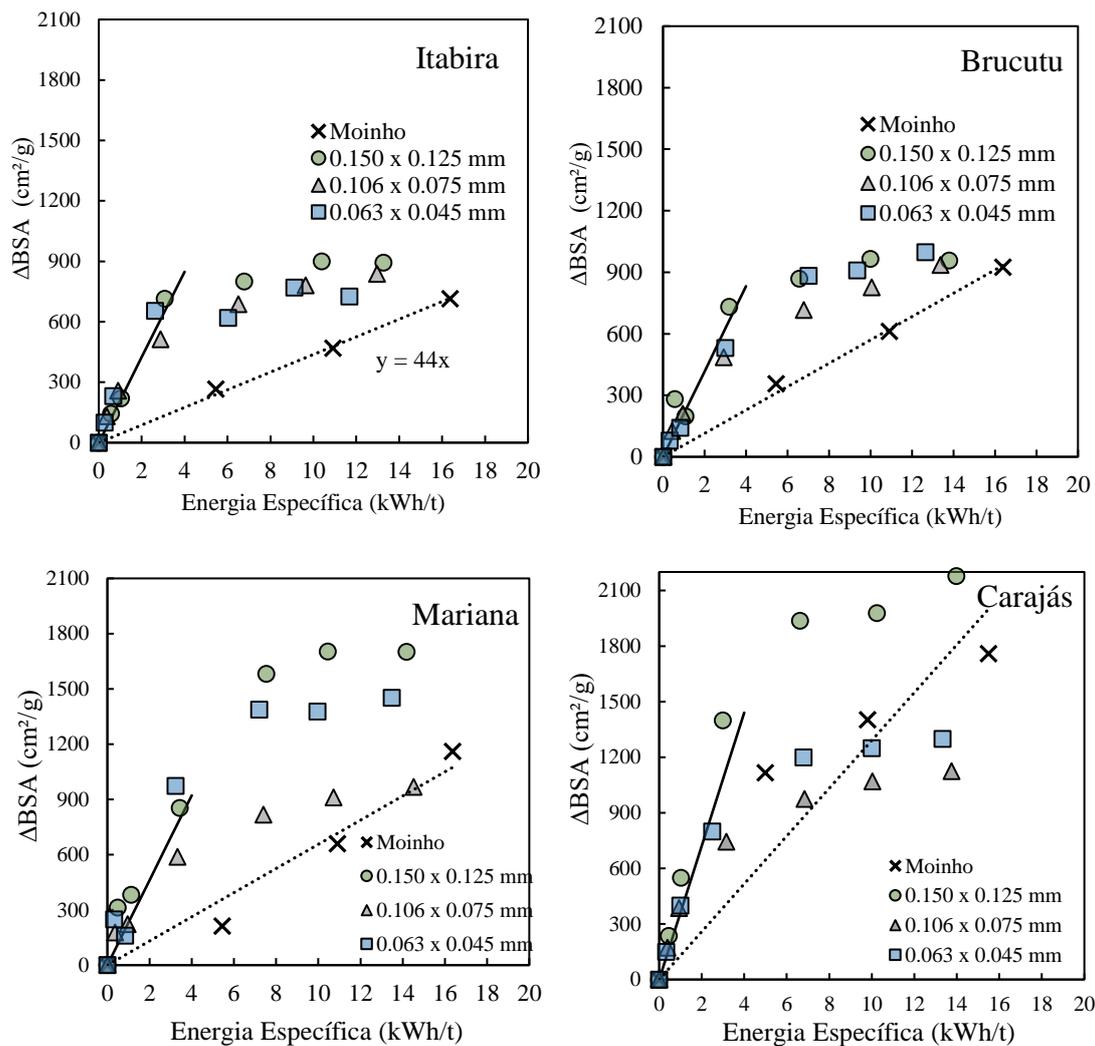


Figura 5.21 Ganho de Blaine em função da energia aplicada nos ensaios de moagem e prensagem em CLP com os minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás (linha de tendência para CLP até 4 kWh/t)

No ensaio de moagem é observado que a área superficial específica se eleva de forma linear à medida que ocorre o incremento de energia, já no ensaio de compressão em leito de partícula ocorre uma saturação conforme já explicado. Estas figuras nos permitem também avaliar o grau de saturação em função do tamanho das partículas prensadas, sendo que para granulometrias maiores é possível se atingir maiores ganhos de área superficial específica até que se chegue ao ponto de saturação, enquanto as granulometrias menores atingem a saturação a energias mais baixas, atingindo, assim um menor ganho de área superficial específica.

Diferentemente do processo de moagem onde se pode imprimir grandes quantidade de energia específica em função do maior tempo de residência da partícula no interior do moinho, no caso do HPGR não existe esta possibilidade devido ao intrínseco baixo tempo de residência das partículas na região de prensagem neste processo de cominuição. Estudos realizados por Morley (2010) e resultados experimentais mostram que a quantidade de energia imprimida no processo de prensagem está na ordem de 1 a 3 kWh/t. Neste intervalo de energia específica pode-se observar uma relação aproximadamente linear entre o ganho de área superficial específica e a energia aplicada no processo de prensagem. Comparando-se os resultados de geração de área superficial específica no processo de prensagem em relação ao processo de moagem, para o intervalo de energia definido acima, pode-se verificar uma maior eficiência do processo de prensagem, visualizado pela maior inclinação da linha de tendência nesta região, definido pelo coeficiente angular da reta.

A fim de minimizar o efeito de saturação observado, foi realizado ensaio de CLP com energia controlada em várias etapas de prensagens. Após cada etapa de prensagem a amostra foi desagregada antes de ser submetida a um novo ciclo de prensagem. Nos ensaios de prensagens cujos resultados são apresentados na Figura 5.22, a força máxima de prensagem foi igual a 1.000 kN, enquanto que a prensagem em estágios contou com uma força de 200 kN por estágio. A Figura 5.22 apresenta os resultados comparativos de ensaios em CLP, no qual a energia específica é dada pela soma das energias aplicadas nos diferentes estágios.

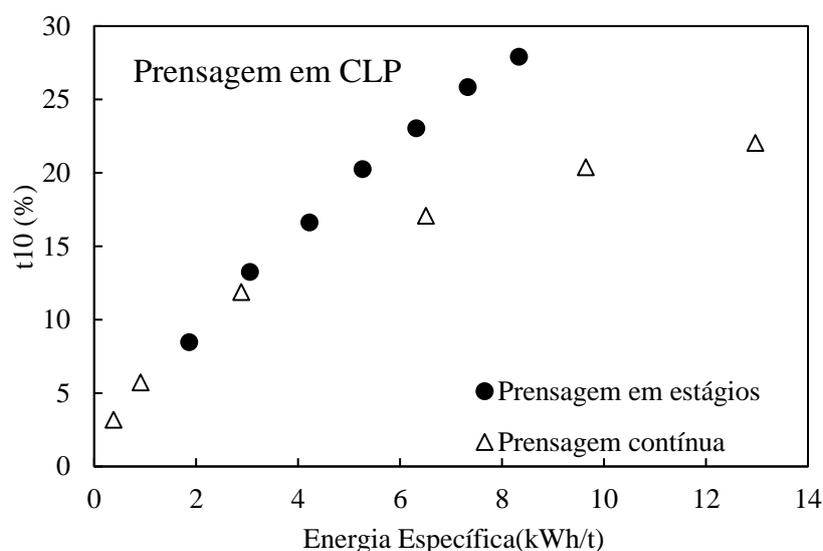


Figura 5.22 Ensaio de CLP com prensagem em estágio único e em múltiplos estágios de prensagem realizados com minério de Itabira entre 0,106 e 0,075 mm seco

Ainda pode ser visualizado na Figura 5.22 que ao se aplicar energias em múltiplas etapas, para uma mesma quantidade de energia imprimida, obteve-se um produto mais fino quando comparado a um único estágio de prensagem, minimizando o efeito de saturação.

Além dos testes realizados em CLP, foi também utilizado um HPGR de bancada a fim de comparar os desempenhos dos processos de moagem, prensagem em CLP e HPGR de bancada. Os resultados são apresentados na Figura 5.23.

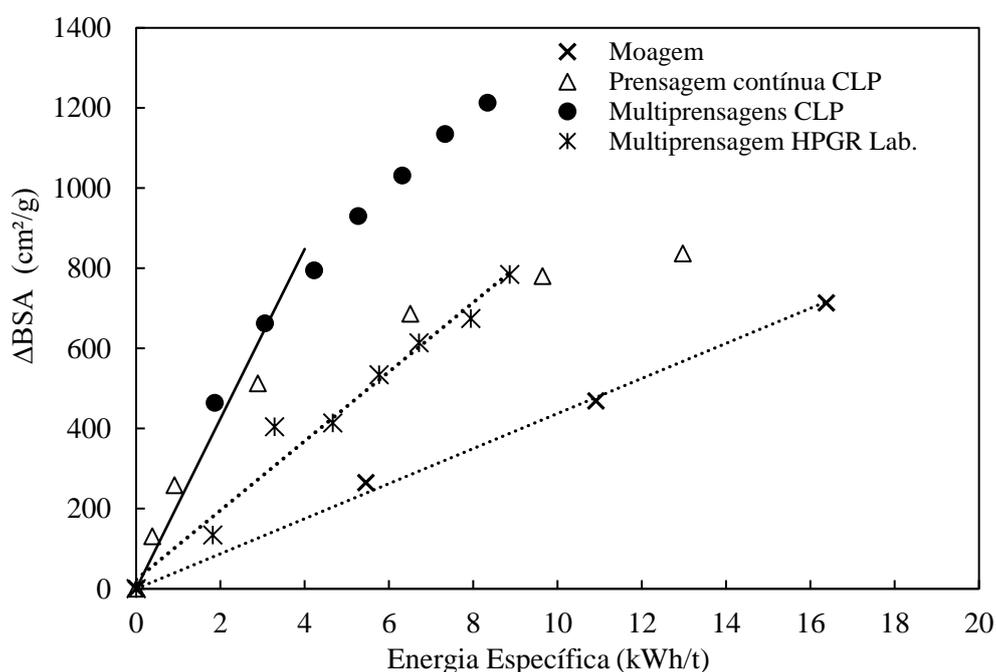


Figura 5.23 Ensaio comparativos dos processos de cominuição para *pellet feed* realizado com minério de Itabira seco

A Figura 5.23 resume de forma clara o comportamento do *pellet feed* quando submetido a diferentes ensaios de cominuição. Primeiramente pode-se visualizar a moagem como um processo de menor eficiência para geração de área superficial específica por unidade de energia consumida. Nos resultados de prensagem em estágio único no CLP, é possível visualizar também o fenômeno de saturação de quebra. Os ensaios de multiprensagem em CLP se mostrou muito eficiente, pois nele não está presente o efeito de borda, uma vez que toda a amostra está submetida à mesma pressão. Além disso, perdas mecânicas também não são contabilizadas no ensaio de CLP, enquanto elas estão presentes no ensaio de prensagem no HGPR de laboratório. Os

resultados de geração de área superficial específica obtidos nos ensaios de multiprensagem em HPGR de bancada se mostraram mais promissores que os da moagem e menos eficientes que o do CLP, pois neste caso, é observado o efeito de borda que contribui para degradação do resultado final.

Dando sequência ao estudo para avaliação do comportamento dos diferentes tipos de minérios no processo de prensagem, foram realizados ensaios de multiprensagens em HPGR de bancada com sete ciclos de prensagens para os minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás, onde pôde-se extrair informações deste processo. As informações coletadas foram comparadas com os resultados de moagem e estão apresentados na Figuras 5.24.

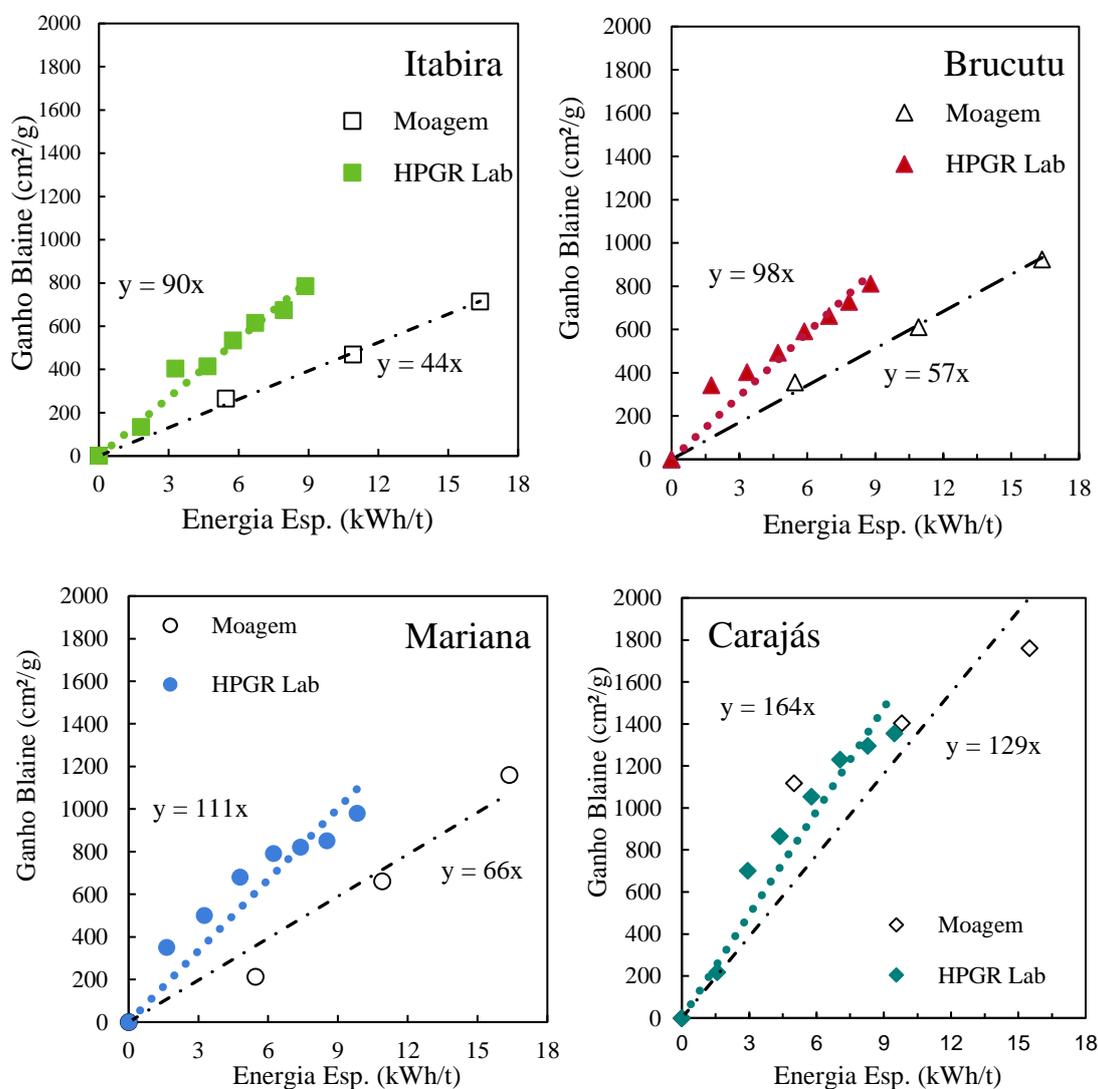


Figura 5.24 Comparação dos resultados dos ensaios de moagem e multiprensagem em HPGR de bancada para os minérios de Itabira, Brucutu, Mariana e Carajás, correlacionando o ganho de área superficial específica em função da energia aplicada

O coeficiente angular da reta nos gráficos representa o ganho de área superficial específica (Δ BSA) por kWh/t consumido, definido como utilização de energia ou eficiência de cominuição. A partir desta informação, pode-se estabelecer uma ordem crescente de eficiência na moagem e prensagem sendo estes processos menos eficiente para o minério de Itabira, seguido de Brucutu, Mariana e por último com maior eficiência, para o minério de Carajás. No caso do minério de Carajás, conforme já mencionado, por se tratar de um *sinter feed*, ocorre preferencialmente a quebra de partículas mais grosseiras em baixa energia de moagem, tornando este processo mais eficiente que a prensagem nesta região. No processo de prensagem, as partículas mais grosseiras tendem a garantir uma maior abertura operacional nesta região de energia, o que leva a uma maior capacidade específica e uma menor eficiência de fragmentação.

A multiprensagem se mostrou uma forma eficiente para a etapa de cominuição de *pellet feed*, pois através deste método é possível garantir a quantidade de energia necessária para se atingir a qualidade desejada do produto. O processo de multiprensagem em HPGR se apresentou mais eficiente que a etapa de moagem em relação à geração de área superficial específica para a mesma quantidade de energia disponibilizada. Uma rota de cominuição com multiprensagens está sendo desenvolvido pela VALE S.A. em Vitória (ES) para substituição ao processo de moagem em moinho de bolas na preparação do *pellet feed* para a etapa de pelletização.

Os testes com os minérios de Brucutu, Itabira, Carajás e Mariana realizados em CLP e HPGR de bancada, complementados pela caracterização dos minérios com análise granulométrica, composição química, mineralógica e ensaios de moabilidade, proporcionaram uma avaliação aprofundada no estudo da prensabilidade destes minérios.

5.2 Escalonamento

De um modo geral, equipamentos utilizados nas indústrias de transformação são de grande porte e de alto custo. Nos momentos de se realizar uma expansão em uma usina ou implantar um novo empreendimento, simulação através de modelos fiéis ou ensaios em escala menores são necessários para avaliar o comportamento do equipamento e do material que se deseja processar, para em seguida passar para escalas maiores. Para que se obtenha êxito na implantação de novos projetos ou na expansão de plantas existentes, os resultados encontrados nas simulações e nos ensaios em escalas menores devem refletir a realidade de um equipamento de porte industrial. No caso dos HPGRs utilizados nas usinas de pelotização da VALE S.A. para adequação da qualidade física em relação à granulometria e à área superficial específica do *pellet feed* para as etapas de produção de pelotas, não é diferente.

A fim de avaliar o efeito de escala na prensagem, nesta etapa do trabalho foram realizados ensaios em HPGR em diferentes escalas: CLP (prensa de pistão), Bancada, Piloto e Industrial.

5.2.1 Capacidade específica ou m-dot

A capacidade específica é a métrica mais clássica para realizar-se o escalonamento em HPGRs (KLYMOWSKY et al., 2002). Devido às características do ensaio, o CLP não pode ser utilizado para o cálculo de m-dot. Foram realizados ensaios em HPGR de Bancada, Piloto e Industrial para comparar a capacidade específica nas diferentes escalas.

A Figura 5.25 apresenta os resultados de capacidade específica obtidos em prensagem única no HPGR em diferentes escalas e com diferentes tipos de misturas de minérios. A mistura contendo 80% de minério de Itabira e 20% de Brucutu (I80-B20) foi prensada com teor de umidade em 7,5% em força específica de 4,0 N/mm², tendo sido utilizadas as prensas em escalas de bancada e piloto para este ensaio. Uma mistura contendo 63% de minério de Itabira, 25% de Brucutu e 12% de Mariana (I63-B25-M12) foi prensada nas escalas de bancada e piloto com teor de 7,5% de umidade e 2,5N/mm² de força específica. O minério de Itabira foi prensado com 5% de umidade nas escalas de bancada (4,2 N/mm²) e piloto (4,5N/mm²). Este teste foi composto ainda por uma

prensagem de uma mistura contendo 76% de minério de Itabira, 19% de Brucutu e 5% de Carajás (I76-B19-C5) prensada com 7,5% de umidade a 2,5N/mm².

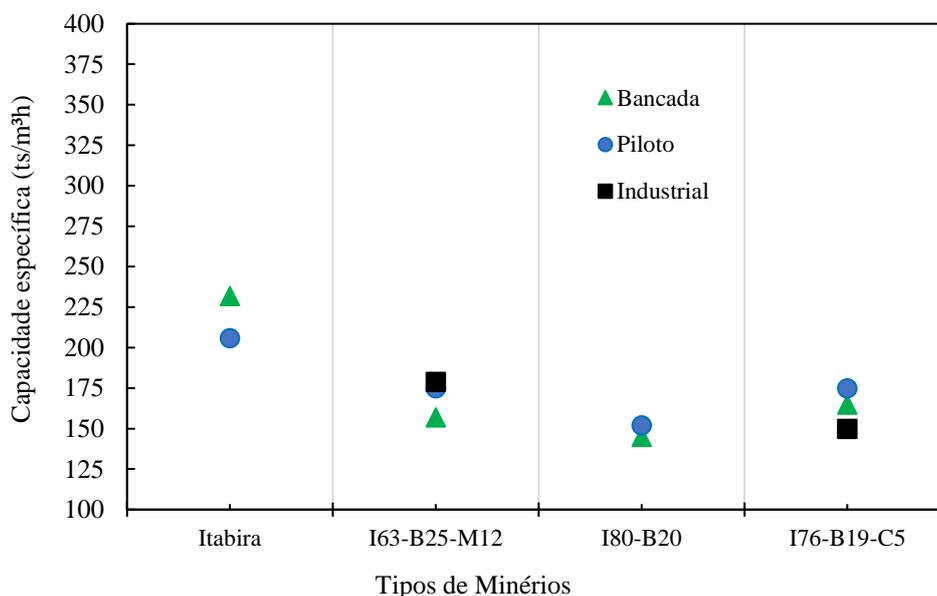


Figura 5.25 Capacidade específica em prensagem única no HPGR medida em escalas de Bancada, Piloto e Industrial para diferentes misturas de minérios

Os resultados indicam uma diferença inferior a 15% entre as escalas para as mesmas misturas de minério. Pode-se observar também comportamentos diferentes entre as misturas, os quais podem ser atribuídos as diferentes condições dos ensaios. É uma prática comum, em projetos de engenharia, considerar um fator de projeto de 20%, portanto as diferenças de resultados entre escalas abaixo deste valor serão consideradas aceitáveis neste trabalho.

Ensaio com múltiplas prensagens também foram realizados com o objetivo de avaliar a evolução da capacidade específica em função do número de passes que os minérios foram submetidos no HPGR. Nos resultados apresentados na Figura 5.26 foi utilizada para a mistura I63-B25-M12. Os testes foram realizados em HPGR nas escalas de bancada e piloto com sete ciclos de prensagens e três ciclos de prensagens em escala industrial. A figura mostra ainda um comportamento de crescimento não linear na capacidade específica nas três escalas estudadas, com uma tendência de estabilidade no *m-dot* à medida que se aumenta o número de ciclos de prensagem. As diferenças de capacidade específicas entre as escalas no mesmo ciclo tendem a se conservar a cada ciclo de prensagem.

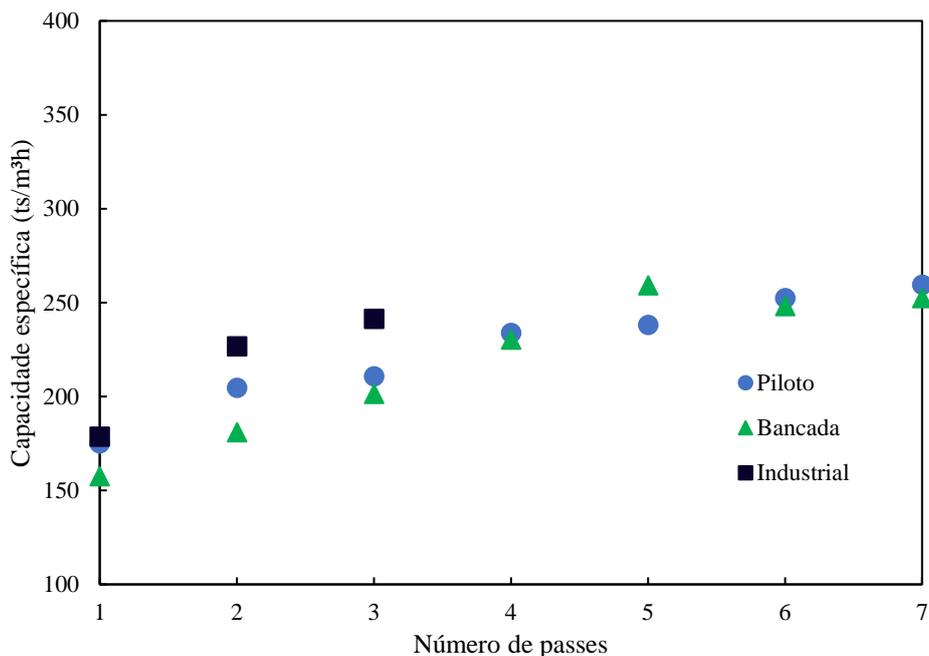


Figura 5.26 Capacidades específicas em multiprensagens no HPGR medidas em escalas de Bancada, Piloto e Industrial para força específica de $2,5 \text{ N/mm}^2$ e a mistura I63-B25-M12. Teor de umidade de 7,5%

O minério de Itabira com 5% de umidade foi também submetido a sete ciclos de prensagem em HPGR de bancada e piloto conforme visualizado na Figura 5.27. Os resultados mostram uma muito boa correspondência nas capacidades específicas até o quinto ciclo. A partir do sexto ciclo a diferença de $m\text{-dot}$ entre as escalas fica na ordem de 11%.

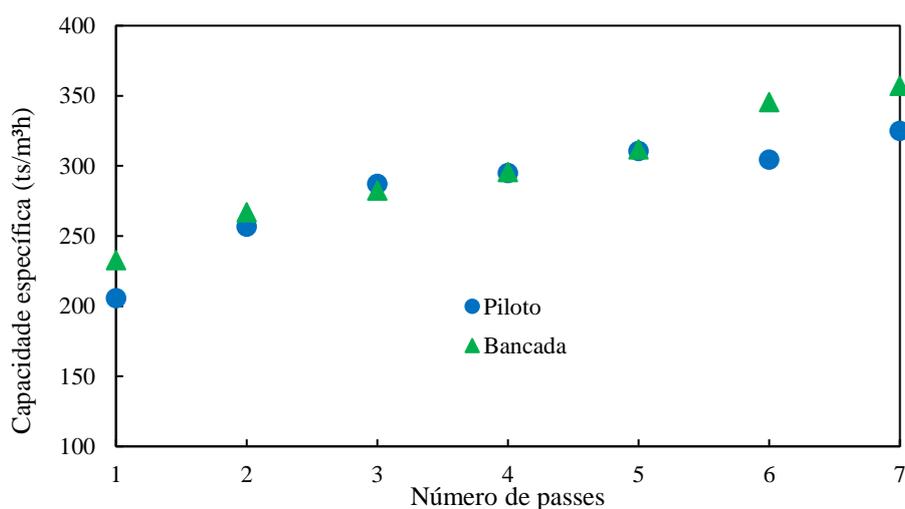


Figura 5.27 Capacidade específica (mdot) para o minério de Itabira multiprensado em HPGR Piloto com força específica de $4,5 \text{ N/mm}^2$ e HPGR de Bancada com força específica de $4,2 \text{ N/mm}^2$. Teor de umidade de 5%

Para finalizar a análise de capacidade específica entre as diferentes escalas, tipos de misturas de minérios e condições dos testes, a mistura I80-B20 foi prensada em múltiplos ciclos num total de sete, com um teor de umidade de 7,5% prensado a 4,0N/mm² nas escalas de bancada e piloto. Os resultados são apresentados na Figura 5.28. Neste ensaio também é possível observar uma boa correspondência entre os resultados de *m-dot* obtidos nas escalas para cada ciclo, apresentando diferença em torno de 5% até o quinto ciclo. Entretanto, é visível um distanciamento dos resultados de capacidade específica a partir do sexto ciclo com redução do *m-dot* no ensaio realizado em bancada. O comportamento de decréscimo do *m-dot* não é esperado para este ensaio, uma vez que, a cada ciclo, o leito tende a ficar mais saturado, forçando uma maior abertura entre os rolos, implicando numa maior capacidade específica para velocidade constante, conforme foi observado nos ensaios em escala piloto.

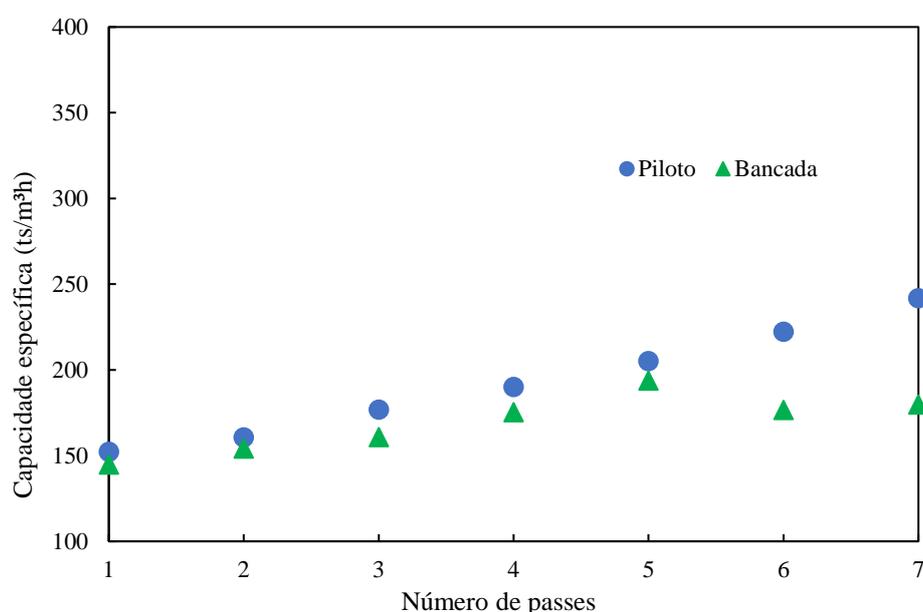


Figura 5.28 Capacidade específica (mdot) em função do número de passes para a mistura I80-B20 multiprensada em HPGR Piloto e HPGR de Bancada com força específica de 4,0 N/mm²

5.2.2 Consumo específico de energia

O consumo específico de energia elétrica é um dos mais importantes parâmetros de monitoramento para qualquer operação industrial. Esta métrica foi avaliada em diferentes escalas de HPGR para verificação de sua aderência entre as escalas testadas. A Figura 5.29 apresenta o consumo específico de energia em testes realizados com minérios de Carajás, Itabira, Mariana e Brucutu em escalas de CLP e HPGR de bancada.

No caso do minério de Itabira, ainda foi realizado ensaio em HPGR piloto. Os ensaios foram realizados com a força específica de 4,0 N/mm² e material seco. Entre as escalas avaliadas, não foram observadas diferenças significativas para o consumo específico de energia. O minério de Brucutu foi o que apresentou a maior diferença entre as duas escalas testadas para este minério.

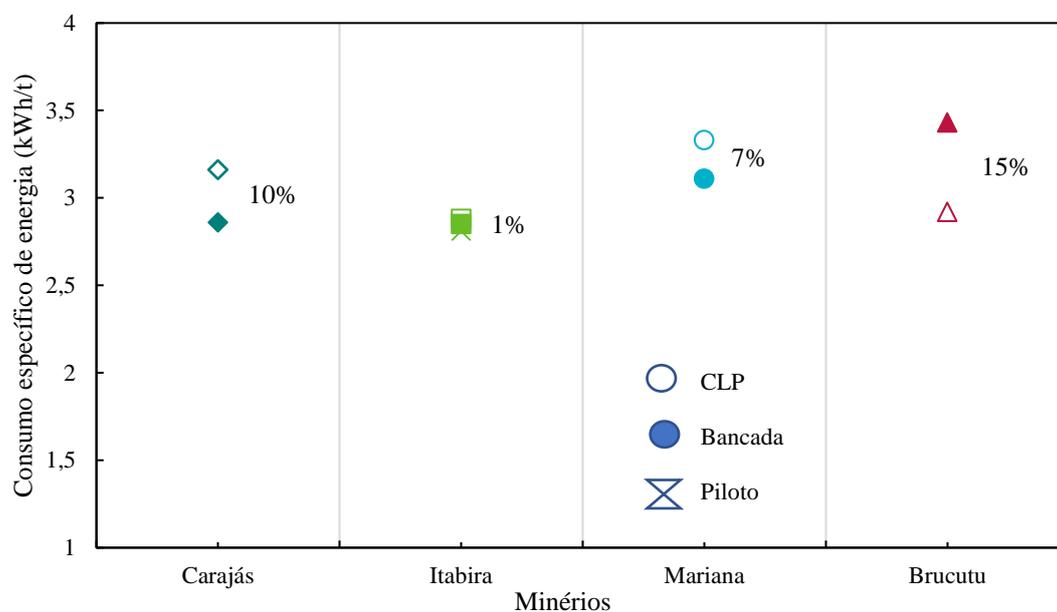


Figura 5.29 Consumo específico de energia para ensaio prensagem em CLP e HPGR de Bancada e Piloto para minérios individuais

O consumo específico de energia foi testado ainda em multiprensagens com HPGRs de bancada, piloto e industrial. Para as escalas de bancada e piloto foram realizados sete ciclos de prensagem, ao passo que na escala industrial foram três ciclos de prensagem. O material testado foi a mistura I63-B25-M12 com teor de umidade inicial de 7,5% e 2,5 N/mm² de força específica. Os resultados apresentados na Figura 5.30 indicam uma boa relação de consumo específico de energia entre as escalas até o terceiro ciclo de prensagem. A cada ciclo de prensagem o consumo cai devido à redução da velocidade do rolo, conforme visualizado na Figura 5.31, e elevação da abertura operacional entre os rolos a cada passe pelo HPGR, conforme mostra a Figura 5.32. No caso do HPGR de bancada, este decréscimo se deve apenas à maior abertura operacional entre os rolos, uma vez que este equipamento opera com velocidade constante, que neste teste foi igual a 0,33 m/s.

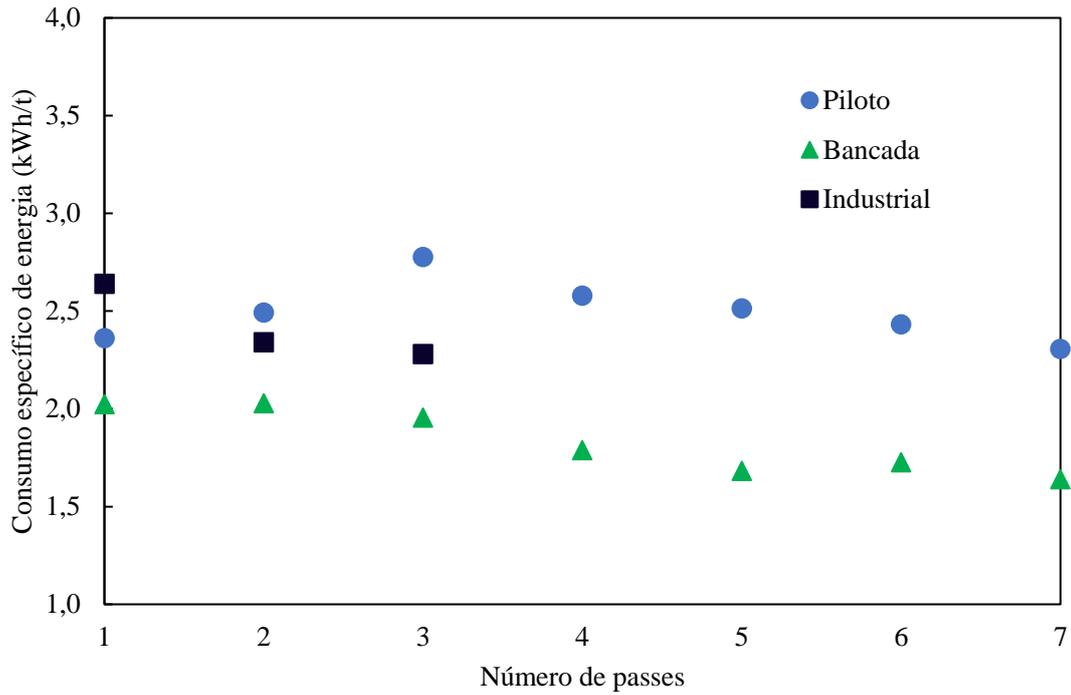


Figura 5.30 Consumo específico de energia em função do número de passes para ensaios em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

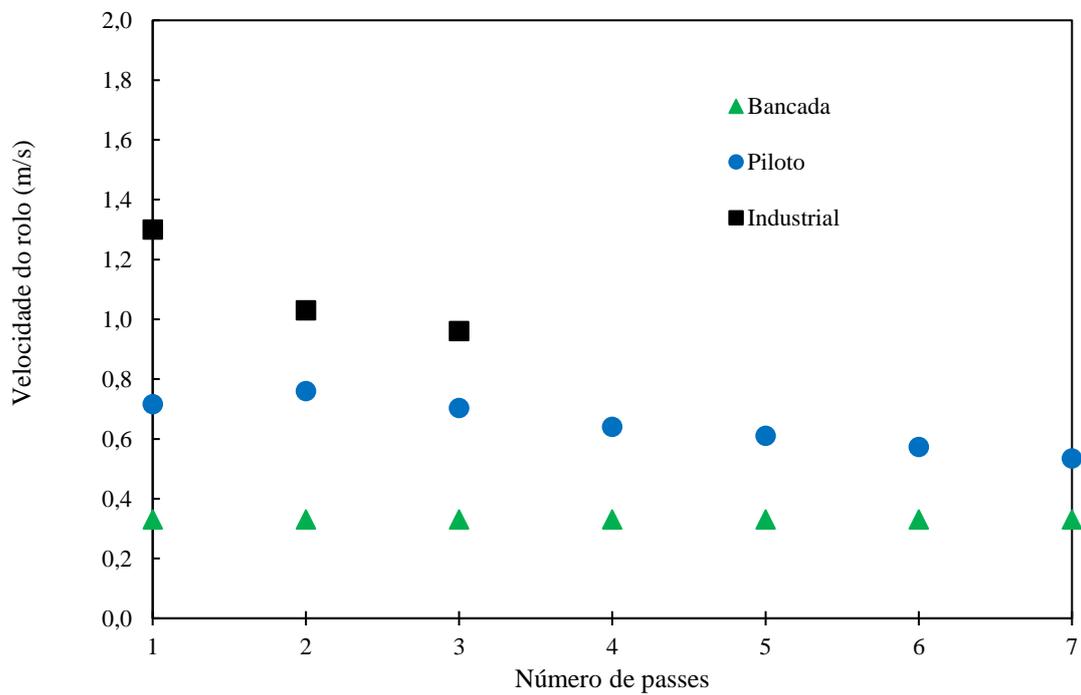


Figura 5.31 Variação da velocidade do rolo com o número de passes para ensaios em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

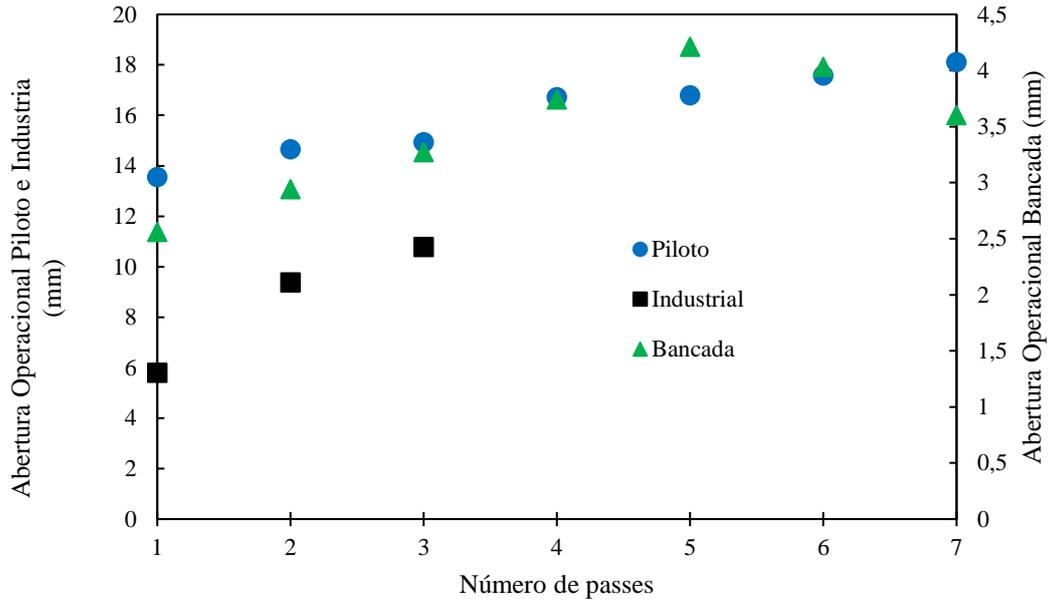


Figura 5.32 Abertura operacional entre rolos para ensaio em HPGR nas escalas de Bancada, Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

5.2.3 Variação de área superficial específica e granulometria ao longo do comprimento dos rolos

A ausência de uma vedação perfeita nas laterais do HPGR é responsável pelo aparecimento de um perfil parabólico de força longitudinal ao rolo, denominado efeito de borda (DANIEL, 2002). A deficiência na vedação lateral leva ainda à geração de *by pass*, que compromete a qualidade do produto.

Por meio de ensaios realizados em HPGR piloto e industrial, pôde-se avaliar o efeito de borda nestas duas escalas com coleta de amostras em cinco pontos distribuídos longitudinalmente abaixo dos rolos designados como Seção A (borda esquerda), Seção B (entre borda esquerda e centro), Seção C (centro do rolo), Seção D (entre centro e borda direita) e Seção E (borda direita). A Figura 5.33 apresenta o efeito de borda medido em termos área superficial específica, enquanto a Figura 5.34 mostra este efeito em função da granulometria passante em 0,045 mm. A mistura de minérios I63-B25-M12 foi prensada a uma força específica de 2,5 N/mm² com teor de umidade inicial de 7,5%. Os ensaios na escala piloto foram realizados em sete ciclos de prensagem, ao passo que na escala industrial foram realizados três ciclos.

O perfil característico do efeito de borda foi constatado na mesma ordem de grandeza nas duas escalas analisadas, tanto para o incremento de área superficial

específica (Figura 5.33), quanto para a granulometria (Figura 5.34). Estas figuras mostram ainda uma tendência de diminuição do efeito de borda, ou seja, a aproximação dos resultados das seções a valores máximos, a cada ciclo de prensagem. É possível verificar também a redução do incremento de área superficial específica e de granulometria com o aumento do número de ciclos.

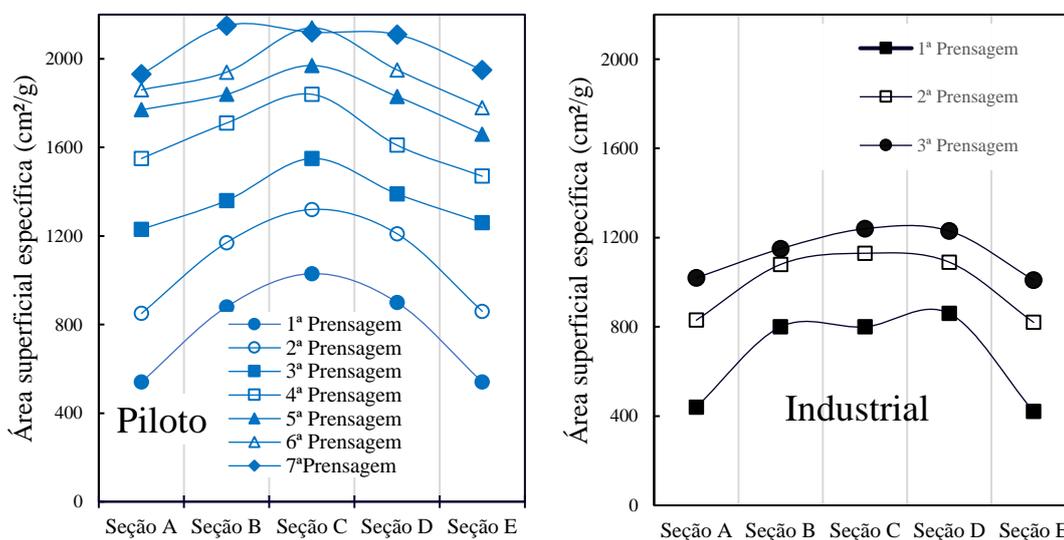


Figura 5.33 Efeito de borda em relação à área superficial específica no HPGR avaliado em teste Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

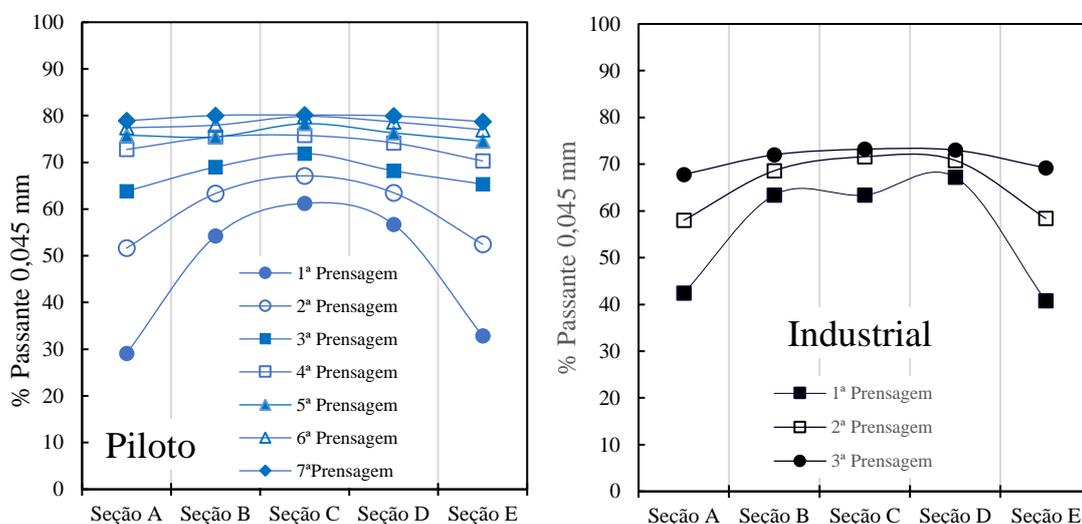


Figura 5.34 Variação longitudinal da percentagem passante na peneira de 45 micrometros em ensaios no HPGR em escala Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

Nos mesmos testes onde foram avaliados o efeito de borda, foram coletadas amostras dos produtos compostos, a fim de realizar uma avaliação comparativa entre as escalas no que diz respeito à redução de tamanho da mistura de minério processada. A Tabela 5.5 apresenta os resultados de P_{80} para os minérios prensados em HPGR piloto

e industrial. Nas duas escalas avaliadas, a redução de tamanho ocorreu de forma similar, indicando uma boa relação deste parâmetro entre as escalas.

Tabela 5.5 P₈₀ do produto dos ensaios de multiprensagem em HPGR para duas escalas (mistura I63-B25-M12)

Escalas	Alimentação	1ª Prensagem	2ª Prensagem	3ª Prensagem
Piloto (µm)	127	94	70	61
Industrial (µm)	142	97	72	67

Com as amostras coletadas no produto homogeneizado, foi realizada ainda uma avaliação do percentual de minério passante na malha de 0,045 mm, que é normalmente utilizada como referência para pelotização (MEYER, 1980). A Tabela 5.6 mostra a relação entre as duas escalas estudadas para este parâmetro de controle da pelotização, sendo possível observar também uma boa aderência em relação à redução de tamanho entre as duas escalas.

Tabela 5.6 Percentual passante em 45 µm no produto dos ensaios de multiprensagem em HPGR para duas escalas (mistura I63-B25-M12)

Escalas	Alimentação	1ª Prensagem	2ª Prensagem	3ª Prensagem
Piloto (%)	28,2	46,6	61,9	68,6
Industrial (%)	25,9	48,8	60,9	64,5

As distribuições granulométricas completas são apresentadas na Figura 5.35, onde é possível verificar um comportamento similar de quebra da mistura de minérios prensados em HPGR piloto e industrial.

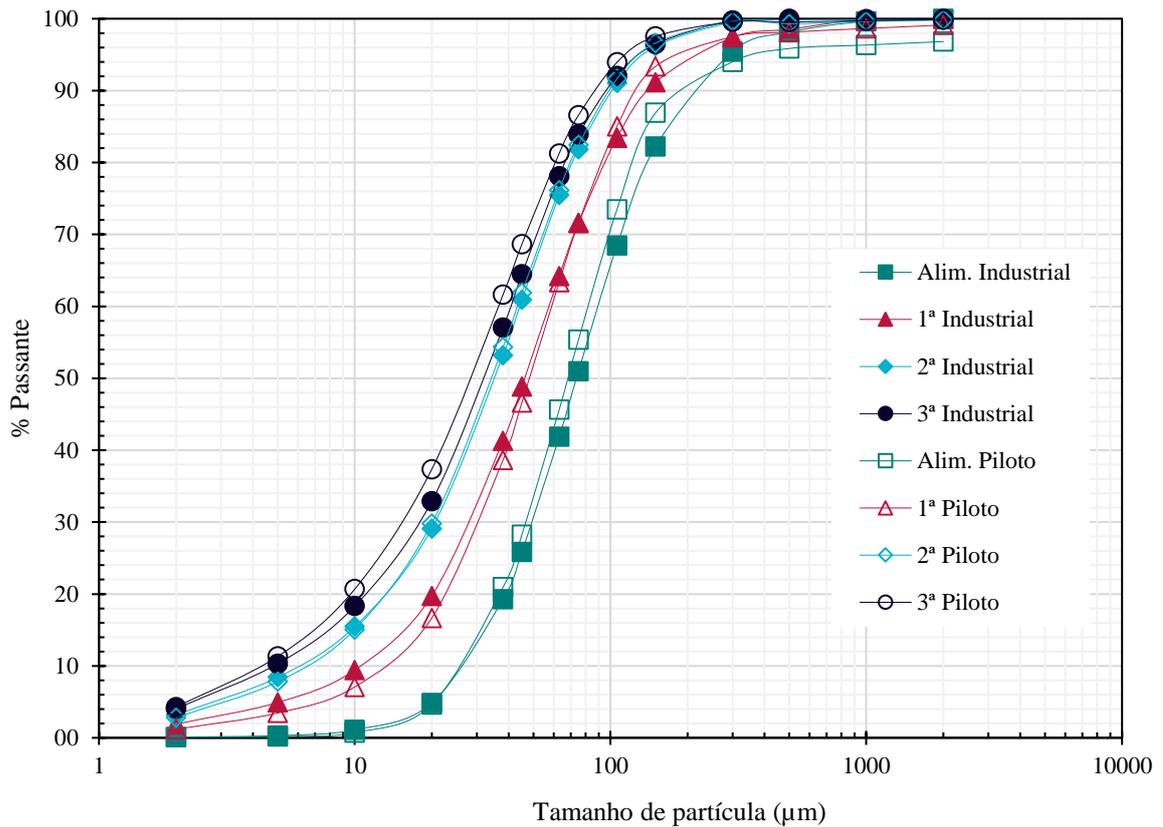


Figura 5.35 Distribuições granulométricas da alimentação e produtos de três ciclos de prensagem em HPGR avaliados em teste Piloto e Industrial para a mistura I63-B25-M12

Um teste de prensagem em múltiplos estágios, totalizando sete passes, foi realizado com a mistura I80-B20 em HPGR de bancada e piloto para avaliação de geração de área superficial específica. Esta mistura de minérios foi testada com teor de umidade inicial igual a 7,5% e submetida a forças específicas de 4,0 N/mm² nos dois equipamentos. A Figura 5.36 apresenta a geração de área superficial específica obtida a cada passe, onde se atingiu ao final das sete passadas do material pelos HPGRs um valor de Blaine superior a 1.900 cm²/g. É nítida a boa correspondência dos resultados destes testes para as escalas avaliadas.

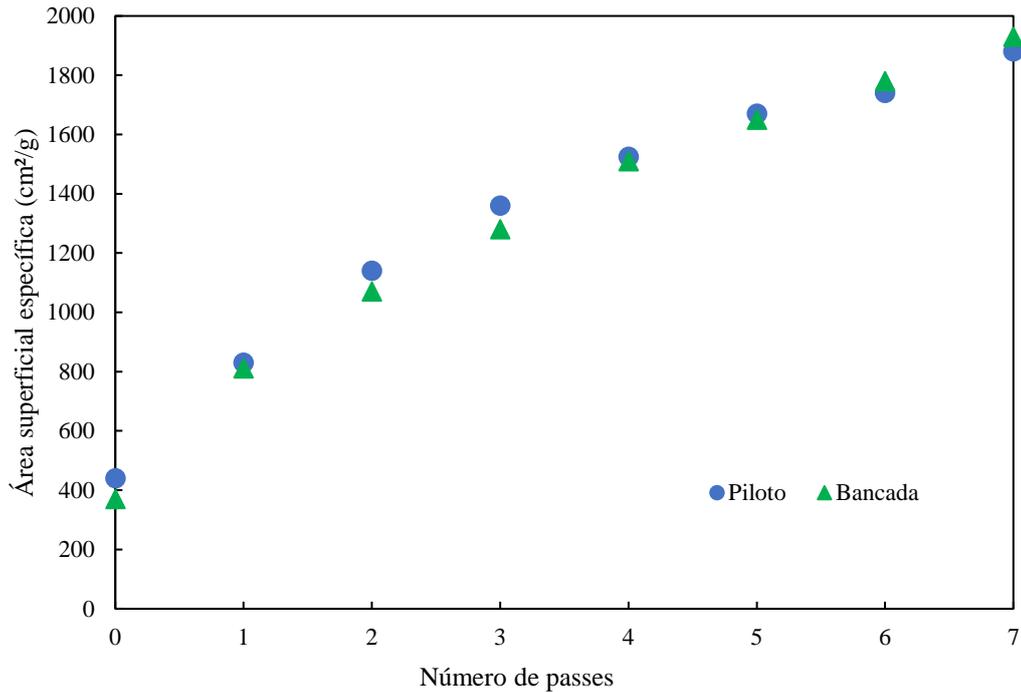


Figura 5.36 Área superficial específica de produto de cada passe em ensaios de multiprensagem em HPGR em escalas de Bancada e Piloto para a mistura I80-B20

Com os resultados gerados nos ensaios de prensagem, foi possível avaliar o incremento de área superficial específica em cada passada. A Figura 5.37 mostra a redução do incremento de área superficial específica à medida que o material foi prensado sucessivamente pelos HPGRs. Inicialmente obteve-se aproximadamente 380 cm²/g de Blaine, ao passo que na sétima prensagem este número está na ordem de 150 cm²/g ou seja, uma redução da ordem de 60% no incremento de área superficial específica para esta mistura de minérios em sete prensagens.

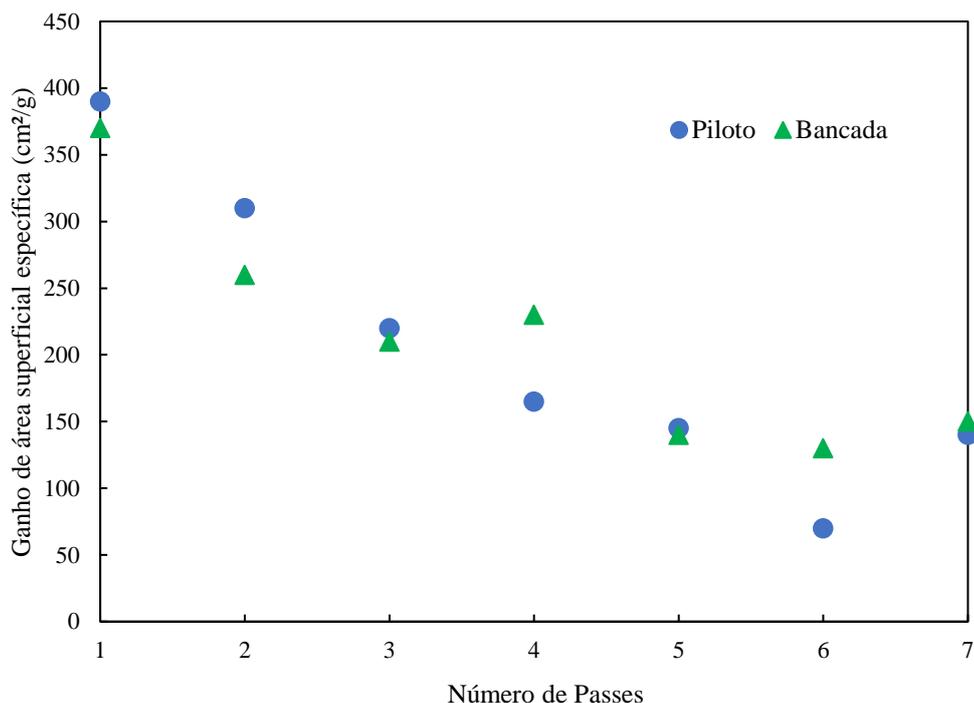


Figura 5.37 Incremento de área superficial específica por ciclo em ensaio de multiprensagem em HPGR em escalas de Bancada e Piloto para a mistura I80-B20

5.2.4 Utilização de energia

O processo de cominuição deve ser eficiente a fim de utilizar a menor quantidade de energia possível de modo a proporcionar a maior geração de área superficial específica no minério. Seguindo essa linha, a utilização de energia reúne os parâmetros estudados anteriormente e deve ser avaliada durante as etapas de escalonamento, a fim de verificar se a eficiência energética será preservada nas diversas escalas, de modo que ensaios em uma escala menor possam representar com fidelidade o comportamento deste parâmetro.

A utilização de energia é medida em função do incremento de área superficial específica (ΔBSA) pela razão do consumo específico de energia elétrica (kWh/t). A Figura 5.38 apresenta os resultados de quatro misturas de minérios testados em prensagem única nas escalas de CLP e HPGR de bancada, piloto e industrial. O minério de Itabira foi prensado com 5% de umidade nas escalas de bancada (4,2 N/mm²) e piloto (4,5 N/mm²). Este minério foi ainda prensado em CLP nas mesmas condições anteriores. A mistura I80-B20 foi prensada com umidade de 7,5% em força específica de 4,0 N/mm², tendo sido realizados ensaios nas escalas de bancada e piloto. A mistura I63-B25-M12 foi prensada nas escalas de bancada e piloto com 7,5% de umidade e 2,5

N/mm² de força específica. Adicionalmente foi ainda realizado teste com a mistura I76-B19-C5, prensada com 7,5% de umidade a 2,5 N/mm². Os resultados mostram uma influência significativa da utilização de energia em função da mistura de minérios. Em relação às escalas, observa-se uma diferença máxima próximo de 20% para a mistura I76-B19-C5 e mínima de 3% para mistura I80-B20. É ainda evidente que, dentre as misturas estudadas, a I63-B25-M12 foi a que apresentou menor utilização de energia, enquanto o minério de Itabira foi a que apresentou a mais alta.

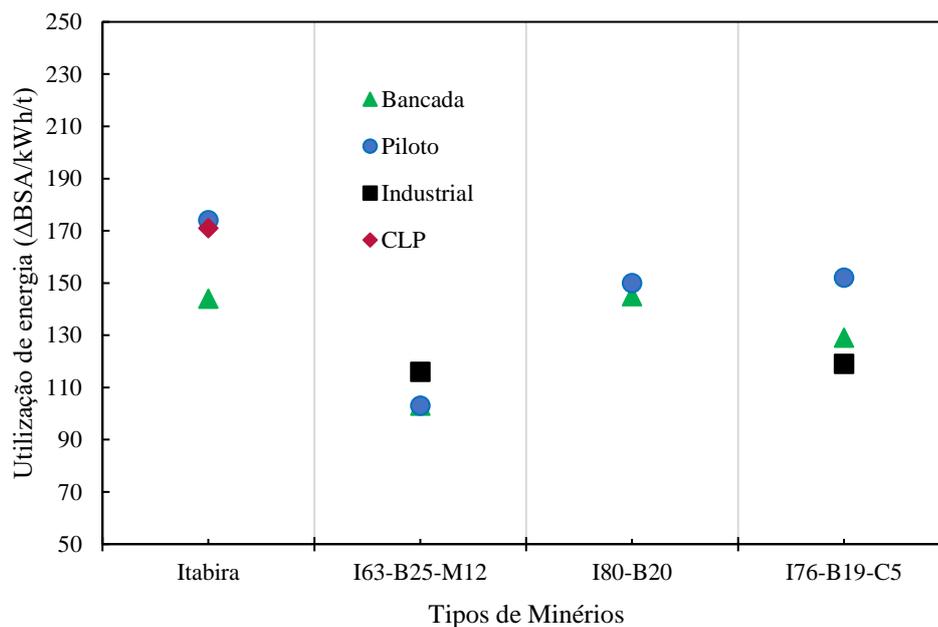


Figura 5.38 Utilização de energia comparando-se ensaios de única prensagem realizados em CLP e HPGR para diferentes escalas: Bancada, Piloto e Industrial para diferentes misturas de minérios.

A Figura 5.39 representa resultados experimentais em unidades industriais que indicam valores de utilização de energia entre 110 e 160 ΔBSA/kWh/t, mostrando que os ensaios realizados nas diferentes escalas estão dentro do intervalo esperado para esta métrica.

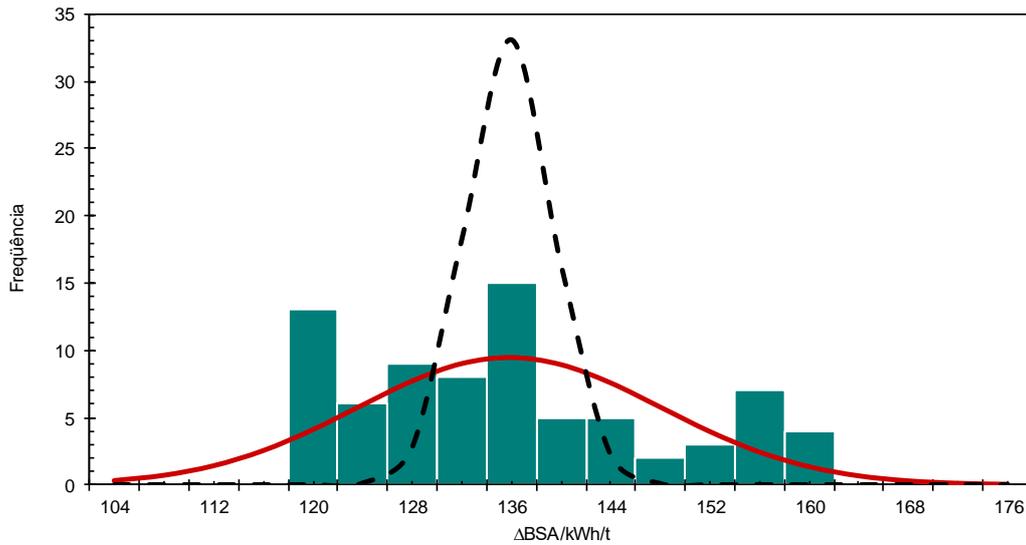


Figura 5.39 Histograma de frequência da utilização de energia em HPGR industriais em prensagem única nas usinas do Complexo de Tubarão

Testes realizados nas escalas de CLP e HPGR de bancada foram realizados com as amostras individuais dos minérios para medida da utilização de energia nestas duas escalas. As condições de teor de umidade e força específica foram preservadas entre as escalas para o mesmo tipo de minério. A partir da Figura 5.40 pode-se observar que a diferença entre a utilização de energia nestas escalas foi de, no máximo, 15%. O minério de Carajás de destaca como o que apresentou a menor diferença entre as escalas estudadas e pela maior geração de área superficial específica para cada unidade de consumo específico de energia elétrica.

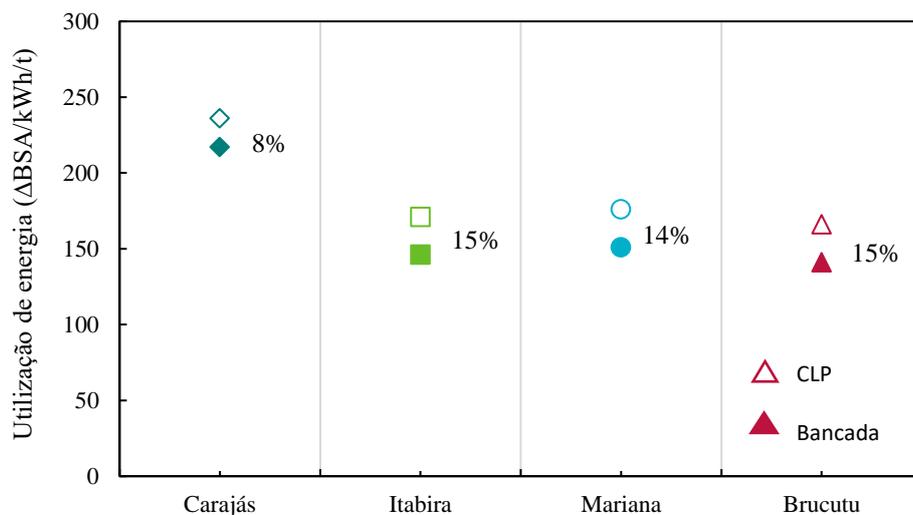


Figura 5.40 Utilização de energia para quatro tipos de minérios comparando-se ensaios realizados em CLP e HPGR de Bancada realizado nas mesmas condições de energia e umidade

Uma avaliação da influência do teor de umidade na utilização de energia na prensagem foi realizada nas escalas de CLP e HPGR de bancada para o minério de Mariana, conforme mostrado na Figura 5.41. Os ensaios foram realizados na mesma condição de força específica e com variação do teor de umidade entre 0,0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. O ensaio com 2,5% de umidade não foi realizado com HPGR de bancada. A aderência dos resultados nas duas escalas estudadas foi muito boa, sendo a diferença inferior a 10%. É possível observar um comportamento ligeiramente parabólico na utilização de energia em função do teor de umidade, com valores máximos entre 2,5 e 5% de umidade, tendo o menor valor sido observado com o minério totalmente seco.

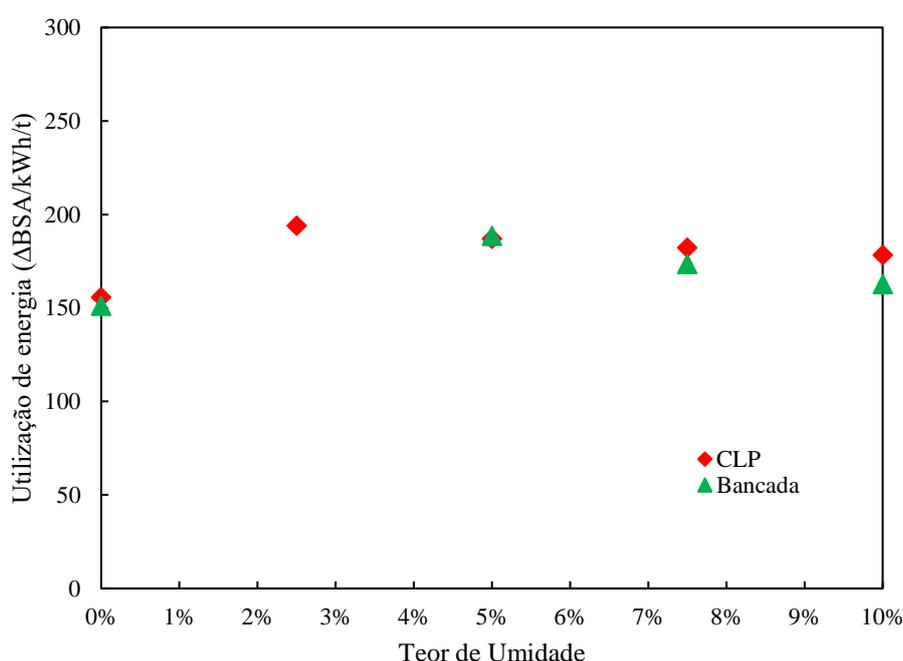


Figura 5.41 Utilização de energia para o minério de Mariana com diferentes teores de umidade em ensaios realizados em CLP e HPGR de Bancada para a força específica de 2,5N/mm²

Ensaio com múltiplas prensagens totalizando sete passes, conforme Figura 5.42, foram realizados para avaliação da utilização de energia nas escalas de CLP e HPGR de bancada e piloto com minério de Itabira na condição de 4,0 N/mm² de força específica e 5% de teor de umidade inicial. Os resultados de utilização de energia nas escalas de HPGR de bancada e piloto apresentaram uma boa aderência entre elas, já o ensaio realizado em CLP se destacou pela maior utilização de energia. Isso pode ser atribuído ao confinamento do leito de partículas no copo utilizado neste experimento, bem como ao fato que a energia é calculada sem considerar as perdas, o que levou a um

maior aproveitamento da energia para realizar a quebra das partículas. Os HPGRs de bancada e piloto são dotados de *cheek plates* para fazer a vedação lateral no rolo, porém a eficiência de vedação deste dispositivo não é comparável ao confinamento que o leito de partículas é submetido no ensaio de CLP. Na figura é ainda visível a redução da utilização de energia a cada ciclo devido ao menor incremento de Blaine a cada passe em função da tendência de saturação do leito.

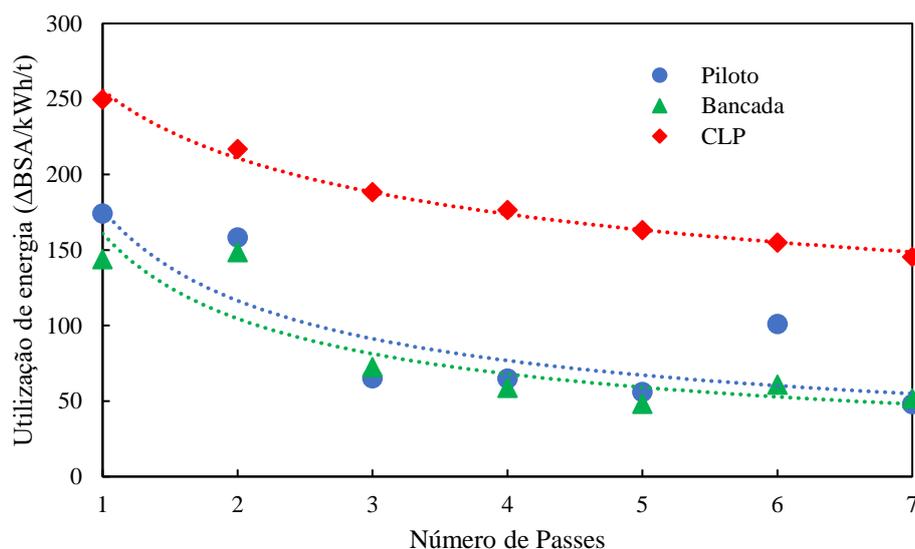


Figura 5.42 Utilização de energia comparando-se ensaios de múltiplas prensagens realizados em CLP, HPGR de Bancada e HPGR Piloto para minério de Itabira em 4,0 N/mm² de força específica e 5% de teor de umidade inicial

Neste capítulo do trabalho foram estudadas as várias escalas de cominuição com HPGR, desde o CLP até escala industrial, de modo a buscar estabelecer relações entre elas e verificar o quanto uma escala menor pode representar uma maior durante um estudo para implantação de um novo empreendimento ou mesmo um repotenciamento em unidades existentes.

Com uma certa margem de tolerância pôde-se observar que é possível utilizar escalas menores, para simular resultados industriais, o que poupa esforço e pode economizar algumas cifras monetárias para as indústrias de transformação que utilizam o HPGR como equipamento de cominuição para adequar a qualidade física do *pellet feed*.

5.3 Modelagem

O modelo que representa o HPGR piloto no simulador foi previamente calibrado com as inserções dos parâmetros ajustados da função quebra não-normalizada e função seleção. Um resumo dos parâmetros de ajuste para o minério de Itabira testado é apresentado na Tabela 5.7, enquanto a Figura 5.43 mostra o comportamento da função de seleção.

Tabela 5.7 Resumo dos parâmetros utilizados na adaptação do modelo de Torres e Casali modificado aos dados do HPGR piloto para minério de Itabira

Parâmetros	Valor
Número de blocos	16
ξ_1	-0.60
ξ_2	-0.16
S_1^E	0.25
K	0.86
n_1	0.89
n_2	5.02
y_0	0.013
n_3	0.46

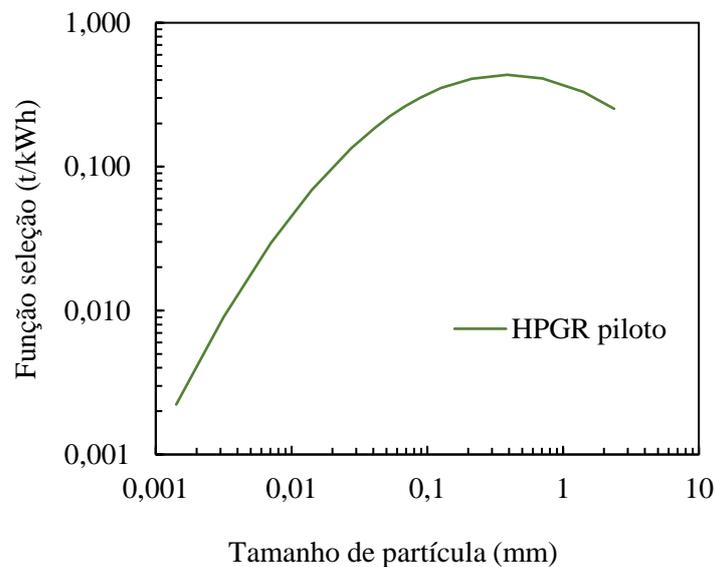


Figura 5.43 Função seleção para o minério de Itabira no HPGR piloto

A Figura 5.44 apresenta o resultado das distribuições granulométricas da alimentação e produtos simulado e experimental em relação ao HPGR piloto. A simulação foi realizada com minério de Itabira prensado com 68 bar de pressão, equivalente a 4,5 N/mm², abertura operacional de 8,5 mm e velocidade do rolo em 0,67 m/s.

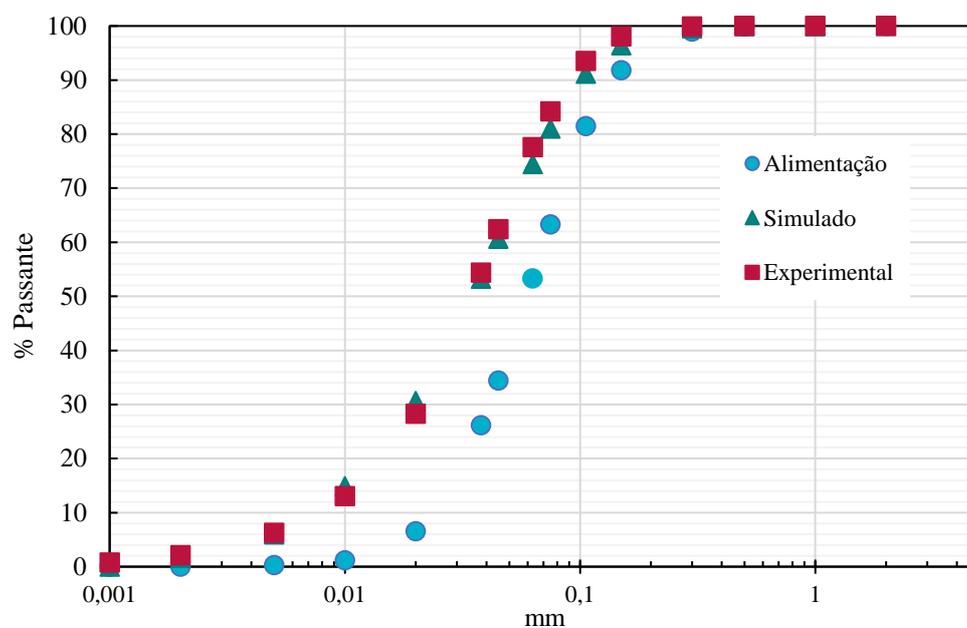
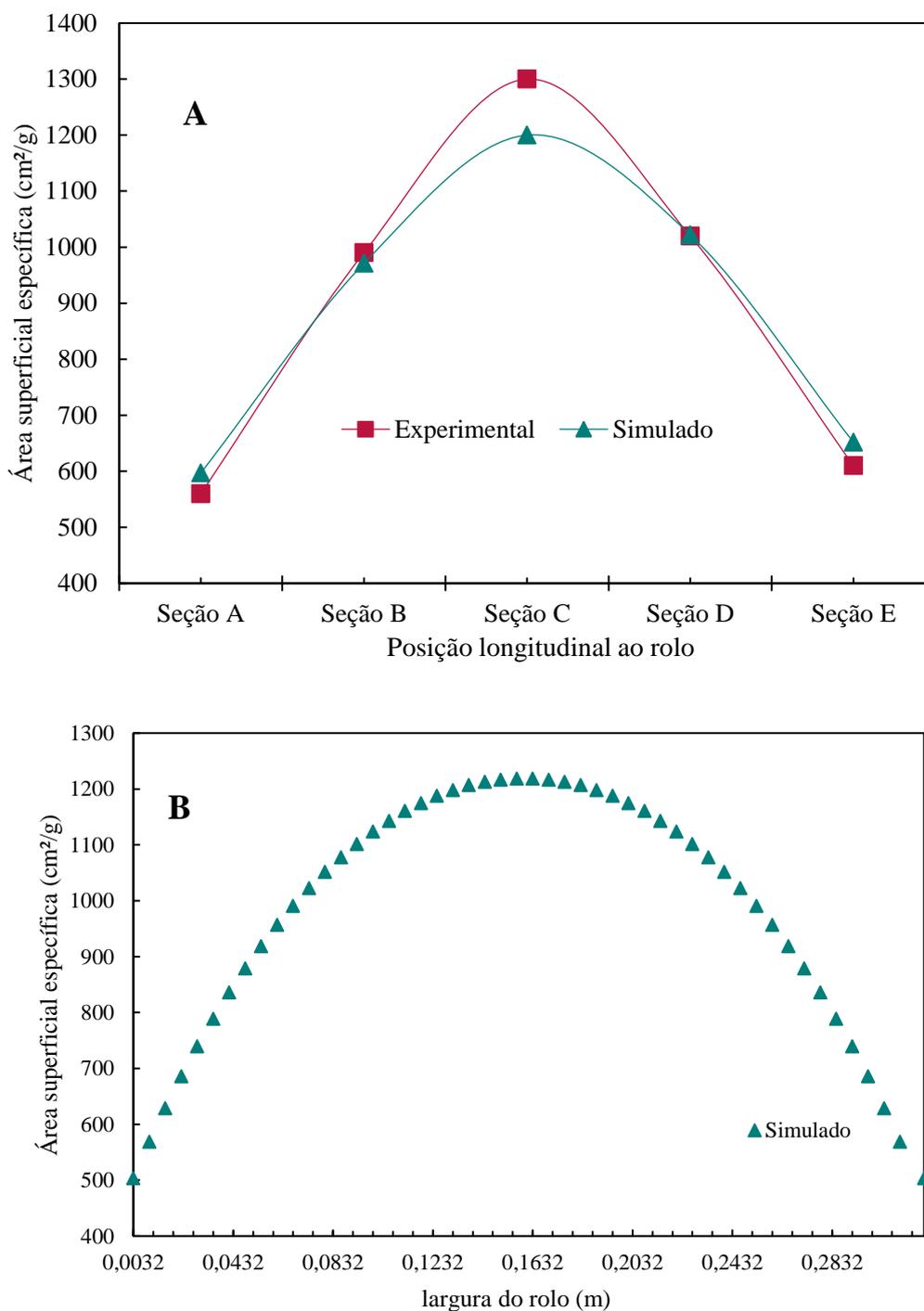


Figura 5.44 Distribuições granulométricas comparando-se resultados experimentais e simulados para HPGR Piloto com minério de Itabira

É possível observar praticamente uma sobreposição dos resultados em relação ao produto gerado pela prensagem via simulação, quando comparado ao produto experimental obtido no HPGR piloto (Figura 5.44). Estes resultados indicam que o simulador está representando com fidelidade o HPGR piloto.

Com as informações geradas pelo simulador e amostragem experimental foram comparados os perfis de Blaine dos produtos nas seções abaixo do rolo. Conforme comentado, o simulador foi desenvolvido com base no modelo que considera o efeito de borda, sendo então este simulador capaz de prever este efeito, discretizando os resultados de Blaine e granulometria longitudinalmente ao rolo, possibilitando visualizar o perfil parabólico tradicional do efeito de borda. É possível observar na Figura 5.45 (A) que os perfis são similares entre os dados experimentais e a média dos valores simulado de Blaine em cada seção, mostrando que o simulador é capaz de prever o comportamento do minério prensado. Já a Figura 5.45 (B) apresenta o perfil simulado

em toda extensão longitudinal ao rolo. A similaridade nos perfis também foi observada em relação às curvas de distribuição granulométricas apresentadas na Figura 5.46.



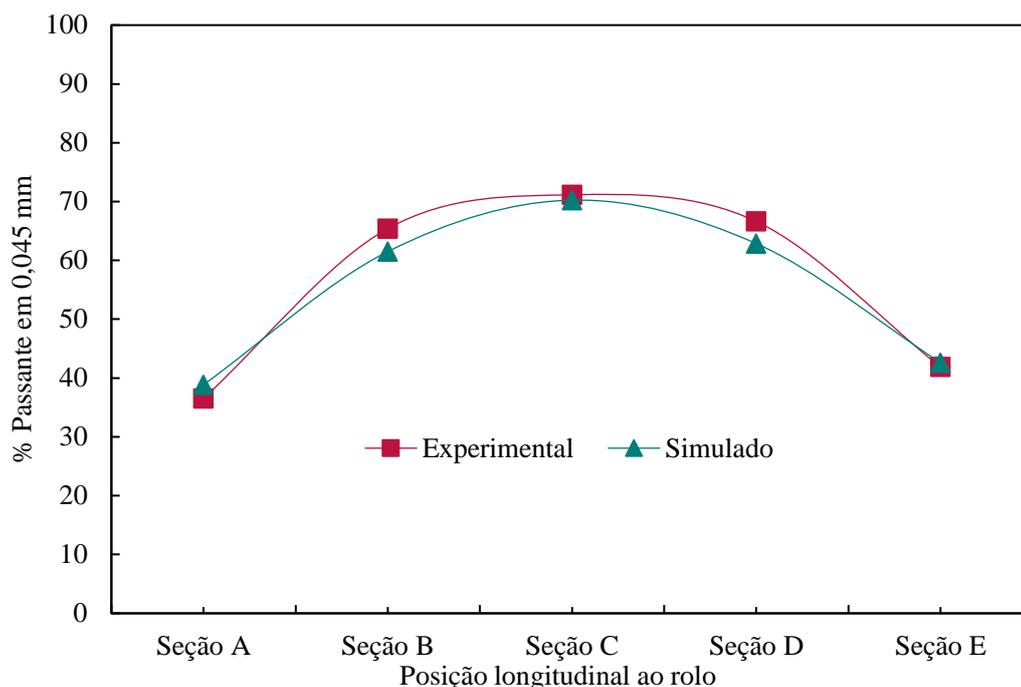


Figura 5.46 Variação longitudinal da percentagem passante em 0,045 mm do produto, comparando-se resultados experimentais e simulados para o HPGR Piloto com minério de Itabira

A Tabela 5.8 mostra resultados simulados e experimentais no HPGR piloto quanto à capacidade, percentual passante na malha de 45 μm do produto, consumo específico de energia e Blaine de alimentação e produto. Os resultados mostram que o simulador fez uma previsão assertiva em relação aos parâmetros avaliados, tendo um maior desvio observado em relação ao consumo específico de energia. No entanto esta diferença é considerada aceitável neste trabalho.

Tabela 5.8 Tabela comparativa de resultados experimentais e simulados para HPGR piloto com minério de Itabira

Condição	Capacidade (t/h)	%< 45 μm produto	Blaine (cm ² /g) produto	Blaine (cm ² /g) alimentação	Consumo específico (kWh/t)
Experimental	39,8	62,4	1050	560	2,90
Simulado	38,3	60,7	984	520	3,31
Diferença (%)	-4%	-3%	-6%	-7%	14%

Dando continuidade ao estudo de modelagem via simulação, foram realizadas comparações entre resultados simulados e dados coletados nas operações de três HPGRs industriais, onde foram também realizadas amostragens experimentais. As condições operacionais foram preservadas na simulação e são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Condições operacionais utilizadas no HPGR industrial e via simulação

Equipamento	Dimensão (m) (Diâmetro x Largura)	Pressão (bar)	Força específica (N/mm²)	Abertura operacional (mm)	Velocidade do rolo (m/s)
Prensa 3	2,25 x 1,55	60	1,2	5,1	0,83
Prensa 6	1,70 x 1,40	88	1,8	13,0	1,22
Prensa 8	2,00 x 1,50	64	1,3	7,1	1,65

Os resultados desta comparação são mostrados na Tabela 5.10. Estes resultados mostram que não apareceram diferenças acima do estabelecido como aceitável. Se considerar todas as diferenças encontradas entre as duas condições, chega-se a uma média de 1% de diferença com 9 pontos percentuais de desvio padrão, o que significa que o simulador foi capaz de prever com um bom grau de acerto, os resultados encontrados nos HPGRs industriais.

Tabela 5.10 Quadro comparativo de resultados obtidos no HPGR industrial e via simulação

Equipamento	Condição	Capacidade (t/h)	Produto		Blaine Alimentação (cm ² /g)	Consumo energético (kWh/t)
			% < 45µm	Blaine (cm ² /g)		
Prensa 3	Experimental	507	73,9	1922	1491	1,26
	Simulado	490	75,3	2079	1420	1,48
	Desvio (%)	-3%	2%	8%	-5%	17%
Prensa 6	Experimental	631	77,0	1901	1638	2,68
	Simulado	524	80,6	2069	1468	2,42
	Desvio (%)	-17%	5%	9%	-10%	-10%
Prensa 8	Experimental	1043	58,1	1843	1594	2,09
	Simulado	1053	64,7	1942	1481	2,12
	Desvio (%)	1%	11%	5%	-7%	1%

Em complemento às simulações, foram comparadas as curvas de distribuição granulométrica da alimentação e produto em três escalas (HPGR de bancada, piloto e industrial) (Figura 5.47) para a mistura I63-B25-M12. Ela permite concluir que as distribuições granulométricas da alimentação são muito semelhantes, enquanto as dos produtos são ligeiramente diferentes.

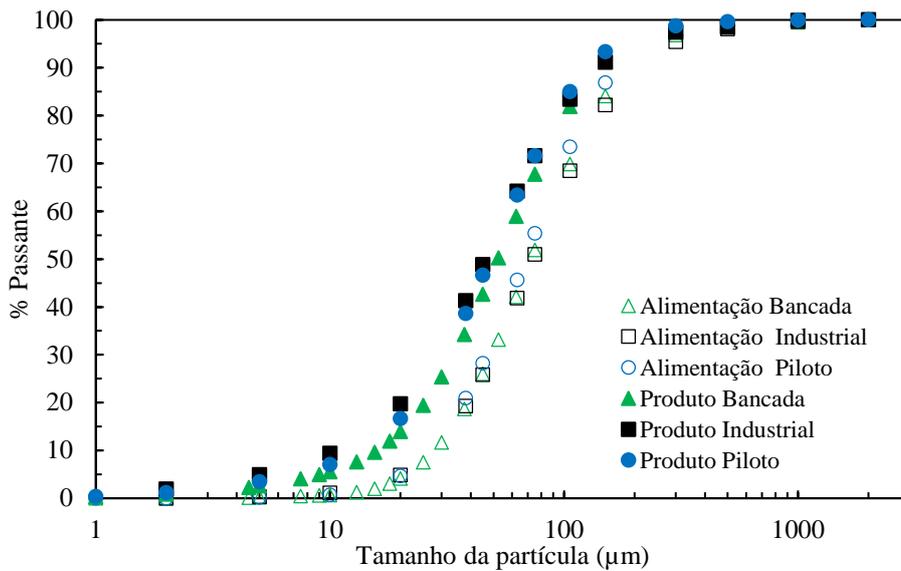


Figura 5.47 Distribuição granulométrica de alimentação e produto de HPGR em três escalas prensados a $2,5\text{N/mm}^2$ e teor de umidade de 7,5% para amostra I63-B25-M12

As curvas da função seleção ajustadas para testes com a mistura I63-B25-M12 nas três escalas de HPGR estão apresentadas na Figura 5.48. É possível observar que a taxa de quebra é superior para o HPGR industrial quando comparado com as escalas menores.

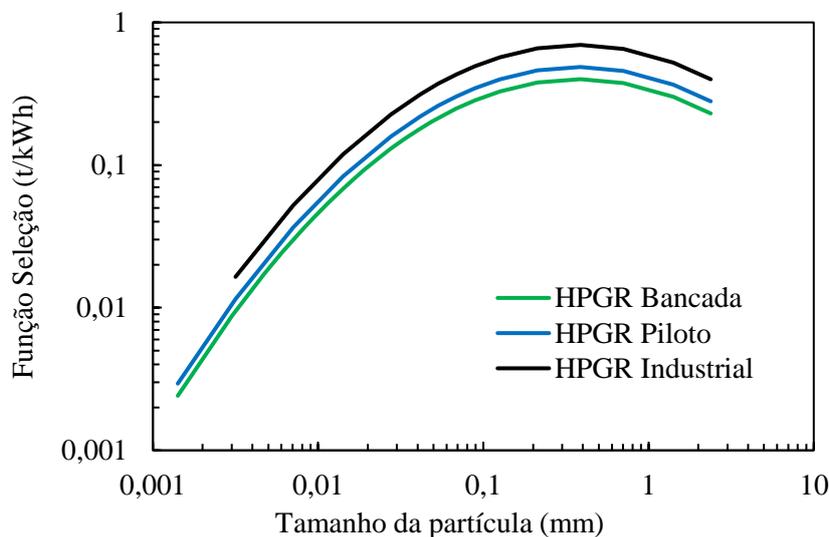


Figura 5.48 Função seleção para a mistura de minérios I63-B25-M12 em três escalas de HPGR

Os parâmetros para determinação das curvas da função seleção específica nas três escalas são apresentadas na Tabela 5.11. O principal parâmetro que variou em cada escala foi S_1^E , que se mostra crescente à medida que aumenta o tamanho da máquina,

ainda que parâmetros que descrevem a modificação do modelo de Torres e Casali no caso da capacidade e potência, também são distintos para as diferentes escalas.

Tabela 5.11 Resumo dos parâmetros utilizados na adaptação do modelo de Torres e Casali modificado aos dados do HPGR de bancada, piloto e industrial para a mistura I63-B25-M12

Parâmetros	Bancada	Piloto*	Industrial**
Número de blocos	16	16	16
ξ_1	-0,60	-0,60	-0,60
ξ_2	-0,16	-0,16	-0,16
S_1^E	0,23	0,25	0,40
K	0,86	0,86	0,86
n_1	0,89	0,89	0,89
n_2	5,02	5,02	5,02
y_0	0,013	0,013	0,013
n_3	0,46	0,46	0,46
A	100	100	100
b	-140	-140	-190
τ	1,2	0,1	0,1
C	2,35	2,8	2,8

* Campos et al. (2019a)

** Campos et al. (2019b)

Com o objetivo de avaliar o potencial do uso do modelo de Torres e Casali modificado na simulação das prensas em escala piloto e industrial diretamente a partir da prensa de laboratório, foram realizadas simulações comparativas utilizando-se de forma direta o parâmetro S_1^E da escala de bancada, sendo os resultados são apresentados na Tabela 5.12. Em relação à capacidade e potência, a aderência da simulação do HPGR piloto foi muito boa com desvio na casa de mais ou menos 1%. Na simulação do HPGR industrial foi observado um desvio mais significativo no consumo específico de energia, superando 20%. Este valor se mostrou atípico em relação às demais simulações realizadas com HPGR industrial (Tabela 5.10).

Os resultados apresentados (Tabela 5.12) mostram que ao se tentar utilizar o parâmetro da S_1^E da função seleção diretamente da escala de bancada para as demais escalas, ocorre uma subestimação dos valores do percentual passante em 45 μm , Blaine e utilização de energia. Os valores do desvio para a utilização de energia chegaram a 27% para escala piloto e 32% para escala industrial. De fato, o HPGR industrial possui

maior taxa de quebra que o HPGR piloto, que por sua vez apresenta maior taxa de quebra em relação à prensa de bancada. Esta afirmação pode ser visualizada quando se compara as curvas da função seleção (Figura 5.48), mostrando evidência que no caso da prensagem, essa função não se mantém rigorosamente a mesma para as diferentes escalas, como é o caso do moinho de bolas (HERBST e FUERSTENAU, 1980).

Tabela 5.12 Comparação entre resultados experimentais e simulações da prensagem em escala piloto e industrial para a mistura I63-B25-M12 utilizando-se o parâmetro S_1^E diretamente da escala de bancada e parâmetro escalonado

HPGR	Condição	t/h	% < 45 μ m Produto	Blaine (cm ² /g) Produto	Utilização de energia (Δ BSA/kWh/t)	kW	kWh/t
Piloto	Experimental	24,51	54,2	830	199	44,4	1,81
	Simulado usando S_1^E bancada	24,2	50,69	737	146	44,3	1,83
	Diferença (%)	-1%	-7%	-11%	-27%	0%	1%
	Simulado usando S_1^E escalonado	24,2	54,2	807	184	44,3	1,83
	Diferença (%)	-1%	▼0%	▼-3%	▼-8%	0%	1%
Industrial	Experimental	520	48,8	890	196	1166	2,24
	Simulado usando S_1^E bancada	589	41,36	733	134	1004	1,75
	Diferença (%)	13%	-15%	-18%	-32%	-14%	-22%
	Simulado usando S_1^E escalonado	589	49,4	889	223	1004	1,75
	Diferença (%)	13%	▼1%	▼0%	▼13%	-14%	-22%

Tendo em vista o efeito da escala na função seleção (Figura 5.50) propõe-se uma expressão para o escalonamento do único parâmetro considerado variável para as escalas, que é S_1^E . A Figura 5.49 mostra a relação empírica do tipo potência entre o diâmetro da prensa e esse parâmetro.

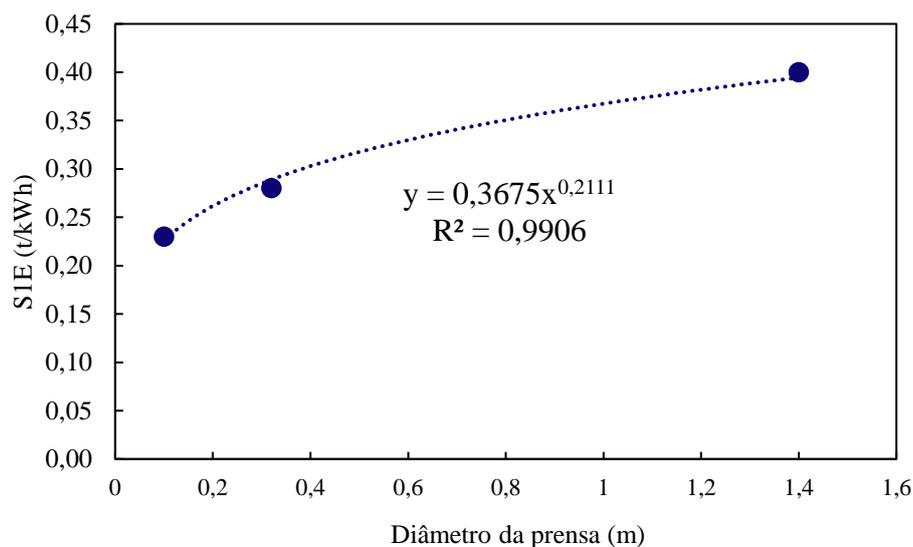


Figura 5.49 Equação empírica para escalonamento da função seleção entre os HPGRs de bancada, piloto e industrial

A partir do momento que foi aplicado a equação da Figura 5.49 para determinar o parâmetro S_1^E ajustado a escala do HPGR desejada, os resultados das simulações foram sensivelmente melhores, conforme pode-se observar pela redução do desvio das simulações utilizando-se o parâmetro escalonado (Tabela 5.12). O parâmetro S_1^E não influencia na capacidade e potência, por esse motivo não foi observada diferença entre os resultados simulados com e sem o parâmetro escalonado para esses indicadores. Estes resultados mostram a importância de se levar em conta a diferença da função seleção entre as escalas quando se deseja realizar simulações de escalas maiores, partindo de ensaios realizados em máquinas de menores dimensões. A validade dessa relação potência, entretanto, deve ser investigada em maior detalhe no futuro.

O simulador para prensagem de *pellet feed* desenvolvido no projeto de pesquisa entre VALE S.A. e LTM/UFRJ se mostrou capaz de realizar previsões assertivas nas simulações proposta. Esta ferramenta se mostrou satisfatória e confiável para prever o desempenho e sugerir alterações nos parâmetros operacionais de máquinas industriais, de forma a alavancar resultados de performance de forma segura.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa mostrou a importância de conhecer as características dos tipos de minérios e misturas de minérios no processo de prensagem. Foi possível mostrar ainda a influência do tamanho da máquina quando se compara as escalas de prensagem em HPGR. Os desafios neste trabalho foram realizar prensagens em várias escalas, bem como promover o teste de multiprensagem em escala industrial, onde a usina não é preparada para este circuito de prensagem.

Neste trabalho foi possível quantificar a influência do teor de umidade na prensabilidade dos minérios em relação a incremento de área superficial específica, consumo específico de energia, capacidade específica, e utilização de energia. Os minérios mais porosos e com maior PPC foram mais sensíveis a estes indicadores com a variação do teor de umidade, destacando o minério de Carajás que apresentou mais sensibilidade. A elevação em demasia do teor de umidade acaba por prejudicar o desempenho desses indicadores, no entanto foi encontrado uma faixa entre 5,0 e 7,5% de umidade em que os indicadores descritos, apresentam melhor rendimento.

Os ensaios no HPGR para avaliar a influência do teor de umidade, foram realizados em duas velocidades, todos os resultados mostraram que para a velocidade maior, o desempenho dos indicadores foi pior, indicando também uma maior sensibilidade na redução do desempenho para os minérios mais porosos.

Em relação à qualidade do produto, os minérios mais porosos e com maior PPC, foram o que apresentaram maior geração de área superficial específica, já os minérios menos porosos e com menor PPC foram os que geraram uma distribuição granulométrica com maior percentual passante na malha de 0,045 mm. Este fato pode estar relacionado à saturação dos minérios, onde os minérios mais porosos e com maior PPC como os de Carajás e Mariana, apresentaram uma saturação mais pronunciada que os minérios de Itabira e Brucutu, esses últimos com menores porosidades e valores de PPC. A multiprensagem se mostrou como uma forma de retardar a saturação, indicando que é possível atingir uma maior área superficial específica quando se realiza a multiprensagem no minério em comparação com prensagem em estágio único, para a mesma energia consumida durante a prensagem.

A moabilidade e a prensabilidade foram mensuradas em função da utilização de energia. É possível verificar que os minérios apresentam a mesma tendência nestes ensaios, ou seja, o minério com maior moabilidade tem maior prensabilidade, no entanto não há uma proporcionalidade entre essas duas métricas. Os resultados desta pesquisa mostraram que a utilização de energia na prensagem é melhor que a moagem. Esta conclusão pode ser observada pela inclinação da reta quando se relaciona o incremento de área superficial específica com o consumo específico de energia para os dois processos de cominuição.

A capacidade específica, o consumo específico de energia e a utilização de energia se mostraram bem comportadas em relação às escalas de HPGR avaliadas, apresentando diferenças inferiores a 20% para o mesmo tipo de minério ou mistura de minérios.

Nas escalas em que foram realizadas multiprensagens no HPGR, ocorreu um acréscimo de capacidade específica e uma redução do consumo específico de energia a cada passe. Esse fato se deve pela elevação da abertura operacional e pela redução da velocidade periférica do rolo a cada prensagem. Durante a multiprensagem o efeito de borda é minimizado, pois ocorre uma redução do incremento de área superficial específica, indicando nos últimos passes a saturação já se evidencia e que não importa a posição que o minério passa pelo rolo, que o incremento de área superficial específica se torna semelhante em cada posição.

Os resultados de qualidade, inclusive o efeito de borda, e indicadores de desempenho obtidos nas simulações foram coerentes com os resultados experimentais, mostrando que o simulador desenvolvido pela VALE S.A. e LTM/UFRJ está calibrado para os HPGR piloto e para os HPGRs 3, 6 e 8 instalados nas plantas de pelotização da VALE S.A. em Vitória (ES). O simulador foi capaz de mostrar a influência da função seleção em relação ao tamanho da máquina (HPGR) a ser simulada. Uma hipótese sobre as diferenças da função seleção entre as escalas de HPGR pode estar associada a relação Diâmetro por Largura (D/L) das máquinas. Para o HPGR de bancada, esta relação é 2,5, para a máquina piloto a relação é 3,125, já para o HPGR industrial a relação D/L é de 0,875.

Em relação às demais aplicações de HPGR, onde normalmente este equipamento opera na etapa de britagem, sua operação na prensagem de *pellet feed* é

desafiadora devido às condições intrínsecas deste processo como o teor umidade e a granulometria de alimentação. São raras as publicações sobre a utilização desta máquina para essa condição. Esta pesquisa contribuiu para desvendar a aplicação do HPGR na preparação da matéria prima para o processo de pelotização.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Comparando-se os resultados de qualidade do produto entre o centro e as bordas do HPGR, é possível observar que existe uma expressiva oportunidade de melhoria a ser explorada a fim garantir maior uniformidade nos resultados. Um estudo comparativo entre os sistemas de vedação existentes, ou até mesmo o desenvolvimento de outro, poderá alavancar os resultados de desempenho destas máquinas.

Durante a operação dos HPGRs ocorre o desgaste natural dos rolos e da vedação lateral (*cheek plates* ou flanges), a perda de desempenho em função desses desgastes do rolo e das vedações laterais é um tema que precisa ser melhor quantificado, inclusive para alertar as equipes de manutenção, o momento de intervenção nas máquinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES V. K. **Metodologia para Simulação e Escalonamento de Prensas de Rolos**. Tese de Doutorado [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- AUSTIN L.G., TRUBELJA M.P., **The Capacity and Product Size Distribution of High Pressure Grinding Rolls**, in: IV Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Concepcion, Chile, pp. 4–67, 1994.
- AUSTIN L.G.; WELLER, R.; LIM, I. L. **Phenomenological Modelling of the High Pressure Grinding Rolls**. XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, n. May, p. 87–96, 1993.
- BARRIOS G.K.P. **Modelagem da prensa de rolos usando o método dos elementos discretos com acoplamento dinâmico e o modelo de substituição de partículas**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, 2015.
- BATTERSBY, M.J.G.; KELLERWESSEL, H.; OBERHEUSER, G., **Important Advances in the Development of High Pressure Rolls Comminution for the Minerals Industry**. Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals, n. October, p. 26–28, 1992.
- BENZER H., DÜNDAR H., ALTUN O., TAVARES L.M.M., POWELL M., MAZZINGHY D. B., RUSSO J.F.C., **HPGR simulation from piston-die tests with an itabirite ore**, REM: Int. Eng. J., Ouro Preto, 70(1), 99-107, 2017.
- BENZER, H., ERGUN L., LYNCH A.J., ONER M., GUNLU A., CELIK I.B., AYDOGAN N., Modelling cement grinding circuits. **Minerals Engineering**, v. 14, p. 1469–1482, 2001.
- BERALDO, J.L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher, 1987.
- BLEIFUSS, R., **MBR Pellet Feed Investigations**. Internal Reporting of KHD & Coleraine Minerals Research Laboratory. 1997.
- BUENO G., BARRIOS G.K.P., MAYERHOFER F.C., TAVARES L.M.M., CARVALHO R.M., **Comparação De Vedações Laterais Em Prensas De Rolos Via Simulação Pelo Método Dos Elementos Discretos**, Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia, materiais e Mineração - ABM, 2017.
- BUENO G., VIANNA I., **Avaliação de performance das prensas Usinas 5 e 6**, Encontro de Especialistas Vale S.A, 08/06/2016.
- BURCHARDT E., PATZELT N., KNECHT J., KLYMOWSKY R., **HPGR's in Minerals: What do Existing Operations Tell us for the Future?**, in: Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology Conference, Vancouver, 2011.

- CAMPOS, T.M. **Modelagem Matemática Da Prensa De Rolos Aplicada À Cominuição De Minério De Ferro**. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- CAMPOS, T.M., BARRIOS, G.K.P., BUENO, G., TAVARES, L.M., **Desafios na modelagem da capacidade e potência consumida da prensa de rolos**, XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belém-PA, 2017.
- CAMPOS, T.M., BARRIOS, G.K.P., SALAZAR, J. S., MAZZINGHY, D.B., RUSSO, J.C., TAVARES, L.M., **Comparação de Modelos Matemáticos na Prensagem de Rolos de Minério de Ferro Itabirítico**. 46º Seminário de Redução/ 17º Minério de Ferro/ 4º Aglomeração, Rio de Janeiro. p. 737, 2016.
- CAMPOS, T.M., BARRIOS, G.K.P., BUENO, G., TAVARES, L.M., **Comparação de circuitos de prensagem de pellet feed previamente à moagem**. 48º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, ABM Week, São Paulo, Brasil, 2018
- CAMPOS, T. M., BUENO, G., BARRIOS, G. K., & TAVARES, L. M. **Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 2: Modeling and simulation**. *Minerals Engineering*, 140, 105876, 2019a.
- CAMPOS, T.M., BUENO, G., TAVARES, L.M. **Avaliação do reciclo de bordas do produto da prensa de rolos em prensagens industriais de pellet feed via simulação computacional**, XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belo Horizonte- MG, 2019b
- CASAGRANDE, C., **Book de minérios do Sistema Sul**, Vale S.A., 2016.
- CASAGRANDE, C., **Mineralogia e Geometalurgia do minério do ferro**, Acervo Vale S.A, 2017
- CASAGRANDE, C., **Influência das diferentes participações de pellet feed brucutu no Processo de Pelotização**, Vale S.A, 2012.
- CHAPMAN N.A., SHACKLETON N.J., MALYSIAK V., O’CONNOR C.T., **Comparative study of the use of HPGR and conventional wet and dry grinding methods on the flotation of base metal sulphides and PGMs**. J. Southern Afr. Instit. Mining Metall., v. 113, p. 407–413, 2013.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Editora Signus, v. 3. 2006.
- DANIEL, M.J., **HPGR model verification and scale-up**. Dissertação de Mestrado, [s.l.] Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 2002.
- DANIEL, M. J.; MORRELL, S., **HPGR model verification and scale-up**. *Minerals Engineering*, v. 17, p. 1149–1161, 2004.

DONDA, J. D.; ROSA A.C., **A Lei da Moagem**, Edição e publicação: Livraria e Editora Graphar, 2014.

DONDA, J.D., **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas**, Tese de Doutorado, UFMG, 2003.

DUNDAR, H.; BENZER, H.; AYDOGAN, N. **Application of population balance model to HPGR crushing**. Minerals Engineering, v. 50-51, p. 114–120, 2013.

EHRENTRAUT, G., RAO, M., **Experience with Roller Press Pellet Plant Kudremukh Iron Ore Company Ltd.**, Aufbereitungs Technik – Minerals Processing No 10, pp. 469–476. October 2001.

ESNAULT, V.P.B., ZHOU H., HEITZMANN D., **New Population Balance Model for Predicting Particle Size Evolution in Compression Grinding**, Minerals Engineering, v. 73 p. 7–15, 2015.

FARIA, P.M.C. **Pellet Feed Grinding Process Optimization Through Simulation Tools and Mathematical Modeling**. [s.l.] Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

FUERSTENAU D.W., GUTSCHE, O., KAPUR, P.C., **Confined particle bed comminution under compressive loads**. International Journal of Mineral Processing, v. 44-45, p. 521–537, 1996.

FUERSTENAU, D.W.; ABOUZEID, A.-Z.M. **The Performance of the High Pressure Roll Mill: Effect of Feed Moisture**. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, v. 32, p. 227–241, 1998.

FUERSTENAU, D.W.; GUTSCHE, O.; KAPUR, P.C. **Confined particle bed comminution under compressive loads**. International Journal of Mineral Processing, v. 44-45, p. 521–537, 1996.

FUERSTENAU, D.W., DE, A., **Comminution: assessing and enhancing its energy efficiency**. In: Mehrotra, S.P., Shekar, R. (Eds.), Mineral Processing: Recent Advances and Future Trends, pp. 141–158. 1995.

GRIFFITH, A.A., **The phenomena of rupture and flow in solids**, Phil. Trans. Royal Soc., Ser. A, Vol. 221, 163-168, 1921.

GUTSCHE O., **Comminution in Roll Mills**, Tese de Doutorado, University of California, Berkeley, 1993.

GUTSCHE O., KAPUR P.C., FUERSTENAU D.W., **Comminution of single particles in a rigidly-mounted roll mill, Part 2: product size distribution and energy utilization**. Powder Technol., vol. 76, p. 263-270. 1993.

HERBST, J.A. and FUERSTENAU, D.W., **Scale-up procedure for continuous grinding mill design Using population balance models**. International Journal of Mineral Processing, 7, 1-31, 1980

<http://flsmidthminerals.com/2011october/2015/12/29/the-missing-link-in-the-comminution-island-concept> , Acessado em 17 de agosto de 2018

https://www.argo-ips.com/the_machines_we_build.html , Acessado em 20 de Outubro de 2018.

KELLERWESSEL, H., **Interparticle Crushing of Moist Ores and Minerals at High Pressures**, Society of Mining Engineers, Annual meeting, Denver, Colorado, February 24-27, 1987.

KELLERWESSEL, H., **High pressure particle bed comminution of mineral raw materials**, Aufbereitungs-Technik, v. 34(5), pp. 243-249, 1993.

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

KLYMOWSKY R., PATZELT N., KNECHT J., BURCHARDT E., **An overview of HPGR technology**. In: Allan, M.J., Major, K., Flintoff, B.C., Klein, B., Mular, A.L. (Eds.), Proc. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology 2006, vol. IV. Department of Mining Engineering, University of British Columbia, Vancouver, B.C., pp. 11–26. 2006.

KLYMOWSKY R., PATZELT N., KNECHT J., BURCHARDT E., **Selection and Sizing of High Pressure Grinding Rolls**, in: A.L. Mular, D.N. Halbe, and D.J. Barratt (Eds.), Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings, pp. 636–668, 2002.

LIM, W. I. L.; WELLER, K. R. **Some benefits of using studded surfaces in high pressure grinding rolls**. Minerals Engineering, v. 12, n. 2, p. 187–203, 1999.

LIU, J.; SCHÖNERT, K. **Modelling of interparticle breakage**. International Journal of Mineral Processing, v. 44-45, p. 101–115, 1996.

LUBJUHN, U., SCHÖNERT, K., **Material Flow in the Acceleration Zone and Throughput of High Pressure Roller Mills**, XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia, pp. 161-168, 1993.

MEYER, K. **Pelletizing of Iron Ores**. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, e Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, 1980.

MICHAELIS, H.V.O.N. **How energy efficient is HPGR?** World Gold Conference, p. 7–18, 2009.

MORLEY, C. HPGR—FAQ. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 110, p. 17–20, 2010.

- MORRELL S., LIM W., SHI F., TONDO L., **Modelling of the HPGR Crusher**, in: Kawatra (Ed.), *Comminution Practices*, pp. 117–126, 1997a.
- MÖRSKY P., KLEMETTI M., KNUUTINEN T., **A comparison of High Pressure Roller Mill and Conventional Grinding**. Proceedings XIX IMPC, 1995. Chapter 8, 55–58. 1995.
- MOURÃO J.M., TOLENTINO, J.J.R., STEGMILLER L., SILVEIRA NETO, P.L., **Avaliação da Moabilidade dos Finos de Minério de Ferro da CVRD e sua Correlação com os Parâmetros de Produção dos Moinhos Industriais**. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral / XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Lourenço. Belo Horizonte, Associação Brasileira de Tecnologia Mineral, V.1, p. 367-386, Set. 1992.
- MOURÃO, J.M.; STEGMILLER, L. **Influência da Estrutura dos Minérios de Ferro na sua Moabilidade**. In: XIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Salvador, Anais. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, V.1, p. 228-243, 1990.
- MÜLLER, F., **Hochdruckzerkleinerung im Gutbett bei Variation von Feuchte und Beanspruchungsgeschwindigkeit**, Dissertation, TU Clausthal. 1989.
- MÜTZE, T. **Energy dissipation in particle bed comminution**. International Journal of Mineral Processing, v. 136, p. 15–19, 2014.
- MÜTZE, T. **Modelling the stress behaviour in particle bed comminution**. International Journal of Mineral Processing, v. 156, p. 14–23, 2016.
- MÜTZE, T.; HUSEMANN, K. **Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution**. Chemical Engineering Research and Design, v. 86, n. 4, p. 379–383, 2007.
- NBR NM 76 Cimento Portland - **Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, JAN 1998
- ODENWALD, B.H.; KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N.; KNECHT J. **Moagem De Concentrado De Minério De Ferro Com Prensas De Rolos Polycom® (HPGR)**, XXXIII Seminário de Redução e Matérias-Primas IV Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto – MG, Setembro 2003
- OLIVEIRA, R.N.M. **Análise de desempenho do HRC™ HPGR em circuito piloto**. 173 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- OTTE, O. **Polycom High Pressure Grinding Principles and Industrial Application**. Third Mill Operators' Conference, n. May, p. 131–135, 1988.
- PATZELT, N., KNECHT, H., BAUM, W., **Case made for high-pressure roll grinding in gold plants**, Mining Engineering, June, pp. 524-529. 1995.

PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO PARA MINÉRIO DE FERRO,
Treinamento interno, Vale S.A, 2008

RASHIDI, S.; RAJAMANI, R. K.; FUERSTENAU, D. W. **A review of the modeling of high pressure grinding rolls**. KONA Powder and Particle Journal, v. 34, p. 125–140, 2017.

RODRIGUES C., **POLYCOM® HPGR – High Pressure Grinding Roll Vale Tubarao**, Thyssenkrupp Industrial Solutions – Münsterland, 28.05.2018 |

ROSARIO P.P., **Technical and economic assessment of a non-conventional HPGR circuit**. Minerals Engineering 103–104;102–111, 2017.

ROWLAND JR, C.A. **Ball Mill Scale-Up – Diameter Factors**. In: SOMASUNDARAM, P. Advances in Mineral Processing. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 605-617, 1986.

RULE, C. M., MINNAAR, D. M., SAUERMAN, G. M., **HPGR — revolution in Platinum?** Third International Platinum Conference, n. October 2008, p. 21–28, 2008.

SCHÖENERT K., **"The Characteristics of Comminution with High Pressure Roller Mills"**, Kona, Vol. 9, pp. 149-158. 1991.

SCHÖENERT K., **Limits of energy saving in milling**. In: 1st World Congress on Particle Technology, Nurenberg. Preprints, Part II, Comminution, pp. 1-21. 1986.

SCHÖENERT K., KNOBLOCH O., **Cement grinding in the twin-roll mill**, Zement-Kalk-Gips, v. 11, pp. 563-568. 1984.

SCHÖENERT K., **Sizing of High Pressure Twin Roll Mills**, Zement Kalk Gips, v. 12, 728–730, 1985.

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

SCHÖENERT, K. **Comminution From Theory To Practice**, Proceedings of the XIX International Mineral Processing Congress, San Francisco, v.1, p.7-14, 1995.

SCHÖENERT, K., **Aspects of the physics of breakage relevant to comminution**, Fourth Tewksbury Symposium, University of Melbourne, pp. 3.1-3.30, 1979.

SHU, L., YONGQING W., **Application of RP 3.6-120/50 Roll Press in Chengchao's Pelletizing Production**. Metal Mine, pp. 263–268, August 2008

TAKEHARA, L., **Caracterização geometalúrgica dos Principais minérios de ferro brasileiros – Fração sinter feed**, Tese de Doutorado, UFRGS, 2004

TAVARES, L.M.M., **Operações Unitárias Em Processamento Mineral – Uma introdução aos processos de preparação e concentração física de matérias-primas minerais**, UFRJ, Junho de 2005

- TAVARES, L.M., **Particle weakening in high-pressure roll grinding**. Minerals Engineering, v. 18, p. 651–657, 2005
- TONDO, L.A., **Phenomenological modeling of a high pressure grinding roll mill**, Dissertação de mestrado, University of Queensland, Brisbane, 1997.
- TORRES, M., CASALI, A., **A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls**, Minerals Engineering, v. 22, p. 1137–1146, 2009.
- VAN DER MEER F.P., LEITE I.A., **Aspects of HPGR in Iron Ore Pellet Feed Preparation**, 19º Simpósio de Mineração, part of the ABM Week, October 2nd-4th, São Paulo, SP, Brazil, 2018
- VAN DER MEER F.P. **Roller Press Grinding of Pellet Feed. Experiences of KHD in the Iron Ore Industry**. In: AusIMM Conference on Iron Ore Resources and Reserves Estimation, Perth, Australia; p. 1–15. 1997.
- VAN DER MEER, F.P., GRUENDKEN, A., **Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls**. Minerals Engineering, v. 23, p. 663–669, 2010.
- VAN DER MEER, F. P., **Pellet feed grinding by HPGR**. Minerals Engineering, v. 73, p. 21–30, 2015.
- WATSON, S. AND BROOKS, M., **KCGM Evaluation of High Pressure Grinding Roll Technology**, Fifth Mill Operators' Conference. AusIMM, Roxby Downs, South Africa, pp. 69-83, 1994.