

JÚLIO CESAR FIGUEIREDO DE ALMEIDA

Análise de desempenho do HRC™HPGR na produção de areia manufaturada

São Paulo
2023

JÚLIO CESAR FIGUEIREDO DE ALMEIDA

Análise de desempenho do HRC™HPGR na produção de areia manufaturada

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de Mestre
em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

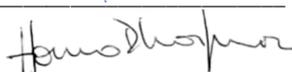
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de novembro de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Almeida, Júlio Cesar Figueiredo de
Análise de desempenho do HRC™HPGR na produção de areia
manufaturada / J. C. F. Almeida -- versão corr. -- São Paulo, 2023.
130 p.

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

1.HPGR 2.Areia Manufaturada 3.Agregados 4.Cominuição 5.HRC™
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

À minha Mãe, Maria Elisa, pelo amor que
transcende a vida, por tudo.

Ao meu pai, João.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por tudo que fez e tem feito em minha vida.

Aos meus pais, João e Maria, pelo que sou.

À minha esposa Ellen, pelo fundamental incentivo ao longo dessa jornada.

Aos meus irmãos João, Marcos e Lisiane.

Aos meus avós Josefa e Gerson, pelo amor e incentivo de sempre.

À toda a minha família, em especial as minhas tias Sandra, Nil e Pri.

Aos amigos João, Vi, Ana Soares e Jonni Moura, por estarem presentes nas importantes etapas dessa caminhada.

À Juliana Colacioppo, pela minha primeira grande oportunidade profissional.

Aos amigos Bruno Pereira, Francisco Pedrosa, Fernando Bicalho, Luiz Roberto, Renato Oliveira, Eduardo Nozawa, Ricardo Takeda e Edis Nunes, pelo incentivo para realização desse trabalho.

Agradecimentos especiais para Suzanne Lynch-Watson e Juan Frausto Gonzalez, pela amizade, suporte e incentivo de sempre. Obrigado por tornar esse trabalho possível.

Agradecimento especial ao Grupo Itaquareia e seus colaboradores, por permitir e apoiar fortemente o desenvolvimento deste estudo. O incentivo, o pioneirismo na produção de areias e a cultura de apoio à pesquisa do Grupo Itaquareia contribuíram diretamente para a realização deste trabalho. Agradecimentos ao Rafael Bento e toda a equipe da Unidade 6 da Itaquareia, pelo espírito colaborativo e forte apoio nesse projeto.

Agradecimentos aos Laboratórios LCT e LTM da Universidade de São Paulo, aqui representados por Dr. Maurício Bergerman, Dra. Carina Ulsen e Guilherme Nery.

Ao Edilson Pereira, pelo suporte com o teste na prensa de bancada.

Agradecimentos ao Prof. Dr. Luis Marcelo Tavares, pelas sugestões feitas durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradecimentos especiais à Metso por incentivar, suportar e colaborar ativamente com o desenvolvimento desse estudo. Agradecimentos adicionais às equipes de vendas, suporte técnico, aplicação e desenvolvimento do HRC™ HPGR na área de Agregados, representadas aqui por Everson Cremonese, Marcelo Motti, Anderson Brini, Hugo Athayde, Maria Musel, Marcelo Antonio, Caroline Raymundo, Willer Ito, Julio Silva e Thiago F. Silva.

Agradecimento especial ao amigo Alfredo Reggio, por apoiar esse trabalho e compartilhar um pouco da sua vasta experiência na produção de areia manufaturada.

Agradecimentos aos colaboradores do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Agradecimentos especiais aos colaboradores das escolas “Nicota Soares”, “José Lopes Fernandes”, “Dr. Demétrio de Azevedo Junior” e “José Vasques Ferrari”, onde vivi as fases mais importantes da minha vida.

Agradecimentos ao Prof. Dr. Homero Delboni, pela amizade, ensinamentos, parceria e fundamental contribuição para esse trabalho.

Agradecimentos finais a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para realização desse estudo.

Um grande abraço à minha querida Itapeva-SP, cidade na qual tive o privilégio de crescer e conhecer o “mundo” da mineração.

RESUMO

ALMEIDA, Júlio Cesar Figueiredo. **Análise de Desempenho do HRC™HPGR na Produção de Areia Manufaturada**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 2023.

Na industrial mineral, os custos relativos a etapas de cominuição são significativos e se apresentam historicamente como um dos principais desafios desse segmento. Durante as últimas décadas a tecnologia de Prensa de Rolos de Alta Pressão - PRAP ou *High Pressure Grinding Rolls*– HPGR se consolidou como importante alternativa para circuitos de cominuição, em virtude da maior eficiência energética, além da capacidade de processamento. Devido ao alto investimento para aquisição do equipamento e às condições de projetos que limitavam operacionalmente essa tecnologia, as aplicações de HPGRs ocorreram nos últimos anos nas indústrias com minérios de alto valor agregado. Porém, através da redução dos custos de fabricação de HPGRs e desenvolvimentos recentes da tecnologia, a Metso, fornecedora global de equipamentos para mineração, desenvolveu recentemente a aplicação da tecnologia HPGR também para indústria de agregados. Em função da crescente demanda por aplicações industriais, o presente trabalho visou avaliar o desempenho do HRC™ HPGR na produção de areia manufaturada. O trabalho realizado incluiu amostragens em uma usina industrial existente, bem como a execução de ensaios paralelos em equipamento de laboratório com as amostras obtidas na respectiva campanha de amostragens. A partir dos dados e informações obtidas, bem como caracterização das amostras, foi avaliado o desempenho do equipamento industrial HRC™ nessa recente modalidade de aplicação. A avaliação de desempenho indicou que o HRC™ foi uma alternativa adequada para a produção de areia manufaturada, tendo por base Normas Brasileiras relativas a areias utilizadas em concreto e filtros.

Palavras-chave: HPGR, Areia Manufaturada, Agregados, Cominuição, HRC™

ABSTRACT

ALMEIDA, Júlio Cesar Figueiredo. **Performance Analysis of HRC™ HPGR in Manufactured Sand Production.** 2023. Dissertation (Master of Science) – Department of Mining and Petroleum Engineering, Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2023.

The costs associated to comminution in the mining industry are high, therefore representing a challenge for significant reductions. During the last decades the technology of High Pressure Grinding Rolls - HPGR has been consolidated as an important alternative for comminution circuits, due to the relative greater energy efficiency. Due to the relative high investment costs HPGR applications have been limited to applications in high added value ores. However, through lower HPGR manufacturing costs and recent technology developments, Metso, a global supplier of mining equipment, has recently developed the application of HPGR technology to the aggregates industry as well. Due to the growing demand for industrial applications, the present work aimed to assess the performance of HRC™ HPGR in manufactured sand production. A survey campaign was carried out in an industrial processing plant, followed by laboratory testing and material characterization. The results were thoroughly compared with Brazilian Standards, indicating that the HRC™ was an adequate alternative for the production of sands for both concrete and filter.

Palavras-chave: HPGR, Manufactured Sand, Agregates, Comminution, HRC™

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das principais pedreiras e minerações de exploração de areia na RMSP.....	5
Figura 2- Limites da distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	7
Figura 3– Desenho esquemático do funcionamento do britador tipo VSI.....	9
Figura 4– Desenho esquemático do funcionamento do britador tipo cônico.....	10
Figura 5– Forma de agregados de origem basáltica produzidos nos britadores tipo cônico (a) e nos britadores tipo VSI (b).	11
Figura 6 - Exemplos de prensa de rolos de alta pressão.....	14
Figura 7 - Esquemática da prensa de rolos.....	16
Figura 8 - Rolo montado com pinos de carbeto de tungstênio.	17
Figura 9 - Imagem de uma camada autógena de material formada entre os pinos do rolo....	17
Figura 10 - Efeito da segregação do material	18
Figura 11 – Exemplo de distribuição irregular da alimentação na prensa.....	18
Figura 12 - Região entre rolos descrita por Schönert e Lubjuhn (1992).....	20
Figura 13 - Representação do efeito borda e o gradiente de pressão ao longo do rolo.	21
Figura 14 - Relação entre a capacidade específica e o tipo de revestimento dos rolos.	26
Figura 15 - Influência da velocidade relativa do rolo na capacidade do HPGR.....	27
Figura 16 - Influência da pressão específica no produto da prensa.....	27
Figura 17 - Relação entre consumo de energia e força específica de moagem.....	29
Figura 18 - Principais componentes do HRC™.....	30
Figura 19 - Linha de produtos Metso HRC™.....	31
Figura 20 - Representação da estrutura <i>Arch Frame</i> . Imagem à esquerda, estrutura simplificada. Imagem à direita, estrutura detalhada.	31
Figura 21 - Rolo sendo montado na estrutura <i>Arch Frame</i>	32
Figura 22 - Diferenças entre um HPGR tradicional e o HRC™.....	33
Figura 23 - Uso dos flanges no projeto de prensas da Metso.	33
Figura 24 - Comparação entre HPGR prensa com <i>cheek plate</i> e com flanges.	34
Figura 25 - Comparação da distribuição da pressão ao longo do rolo para HPGR com <i>cheek plate</i> e com flanges.....	35
Figura 26 - Posicionamento do sistema hidráulico de pressão: sistema tradicional e sistema criado pela Metso.....	35
Figura 27 - HPGR Metso linha HRC™e.....	36
Figura 28 - Metso HRC™ HPGR para a aplicação em agregados.	37
Figura 29 - Cava da Mineração Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes.....	40
Figura 30 - Peneira Estática.....	40
Figura 31 - Peneira Vibratória da Mineração Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes.....	41
Figura 32: Silo de armazenamento e caminhão sendo carregado com um dos produtos finais.	42
Figura 33 - Fluxograma Geral do Processo – Itaquareia Unidade de Mogi das Cruzes.....	43
Figura 34 - Circuito de cominuição - Unidade de Mogi das Cruzes.	44
Figura 35 - Equipamento Metso HRC™8 instalado no circuito de cominuição da Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes.....	44

Figura 36 - Conjunto sensor-câmera à esquerda e à direita detector de metais.	45
Figura 37 - Interface de operação do HRC™ da Mineração Itaquareia – Unidade de Mogi das Cruzes.....	46
Figura 38 - Prensa de bancada Metso D1000.....	47
Figura 39 - Representação gráfica do moinho utilizado nos testes.....	48
Figura 40 - Moinho tipicamente usados no teste de Wi de Bond.	49
Figura 41: Exemplo de placa utilizada no teste de Abrasão de Bond.....	50
Figura 42: Equipamento LCPC, 1- Motor, 2- Rotor e fixador da placa, 3- recipiente da amostra, 4-funil usado para colocar amostra no recipiente.	52
Figura 43: Exemplo de dispositivo utilizado no ensaio de leito de partículas (CLP).....	53
Figura 44: Exemplo de dispositivo utilizado no ensaio de Point Load Test.....	54
Figura 45 - Exemplo partículas usadas no teste de PLT.....	55
Figura 46 - Determinação da morfologia da partícula.....	57
Figura 47 - Determinação da morfologia da partícula conforme proposto por Krumbein e Sloss (1963).....	57
Figura 48 - Equipamento Camsizer do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo.....	58
Figura 49 - Síntese do trabalho desenvolvido.	59
Figura 50 - Circuito de cominuição da Itaquareia Mogi das Cruzes para areia manufaturada e pontos amostrados.....	61
Figura 51 - Observação da limpeza do silo através da câmera.....	63
Figura 52 - Caminhão basculante retirando o material remanescente no silo.....	63
Figura 53 - Exemplo de retirada do material de um ponto de amostragem.....	65
Figura 54 - Parte das amostras separadas para envio ao Laboratório da Metso.	65
Figura 55 - Exemplo de peneira utilizada nos ensaios granulométricos.....	67
Figura 56 – Malhas utilizadas nos ensaios granulométricos.....	67
Figura 57 - Formação e presença de <i>flakes</i> no produto da prensa da Itaquareia.	68
Figura 58 - Aparência dos <i>flakes</i> antes e após o teste com a parafina.....	69
Figura 59 – Tabela de referência para Abrasividade de Bond.....	71
Figura 60: Tabela de referências para resultados do teste de PLT.	73
Figura 61: Realização da pilha de homogeneização.....	74
Figura 62: Câmara de alimentação do equipamento.....	75
Figura 63: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Pedrisco Fino 1 N/mm ²	76
Figura 64: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Pedrisco Fino 1,8 N/mm ²	77
Figura 65: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	79
Figura 66: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	80
Figura 67: Condições operacionais e resultados das campanhas realizadas na prensa industrial e prensa de bancada.....	81
Figura 68 - Relação entre Energia Específica (kWh/t) e t ₁₀ para o ensaio CLP.	82
Figura 69: Testes CLP realizados com a Areia Grossa - Distribuição granulométrica do produto sob diferentes forças de compressão.	83

Figura 70: Testes CLP realizados com Pedrisco Fino - Distribuição granulométrica do produto sob diferentes forças de compressão.	83
Figura 71: Ensaio da forma das partículas	84
Figura 72: Esfericidade para as diferentes amostras.	86
Figura 73: Razão de aspecto para as diferentes amostras.....	86
Figura 74 – Distribuições granulométricas - Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm ²	89
Figura 75 - Distribuições granulométricas - Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm ²	90
Figura 76 - Distribuições granulométricas - Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	90
Figura 77 - Distribuições granulométricas - Amostragem 5 – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	91
Figura 78 - Distribuições granulométricas - Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm ²	91
Figura 79 – Vazões obtidas a partir do balanço de massas	93
Figura 80 - Granulometrias de alimentação das diferentes amostragens.	94
Figura 81 - Granulometrias da amostragem 4 e 5	94
Figura 82 - Variações da capacidade específica em função da pressão de operação	97
Figura 83 - Variações do consumo energético específico em função da pressão de operação	98
Figura 84 - Variações da densidade do <i>flake</i> em função da pressão de operação	98
Figura 85 – Variações da abertura operacional em função da pressão de operação	99
Figura 86 - Variações da Relação de Redução (RR80) em função da pressão de operação	100
Figura 87 - Variações da Relação de Redução (RR50) em função da pressão de operação	100
Figura 88 – Variações das vazões de alimentação e de energias específicas em função da pressão de operação	101
Figura 89 – Variações do Wi Operacional e das vazões de alimentação do HRC em função da pressão de operação nas diferentes amostragens.....	103
Figura 90 - Escala de cores utilizada para classificação dos produtos de acordo com atendimento às normas correspondentes.....	105
Figura 91 – Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm ²	105
Figura 92 – Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm ²	107
Figura 93 – Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	108
Figura 94 – Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm ²	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	6
Tabela 2- Opções de tecnologias de britagem empregados na produção de areia manufaturada.....	12
Tabela 3 - Principais Aplicações HPGR.....	15
Tabela 4 - Fatores que influenciam a capacidade específica da prensa.....	25
Tabela 5 - Modelos de prensas Metso utilizadas no mercado de agregados.....	38
Tabela 6 - Condições estabelecidas para cada amostragem.....	60
Tabela 7 - Descrição dos pontos definidos para coleta das amostras.....	62
Tabela 8 - Principais dados gerados nas amostragens.....	70
Tabela 9 – Resultados Análises químicas.....	71
Tabela 10 - Referência de classificação para resultados de abrasividade - LAC.....	72
Tabela 11 - Referência de classificação para resultados de britabilidade - LBC.....	72
Tabela 12 – Condições empregadas no teste de bancada.....	74
Tabela 13: Condições operacionais e resultados das campanhas realizadas na prensa industrial e na prensa de bancada.....	80
Tabela 14 – Parâmetros A, b e Índice de Quebra (Axb).....	82
Tabela 15: Esfericidade e Razão de Aspecto.....	85
Tabela 16: Resultados do teste de WI de Bolas.....	87
Tabela 17: Classificação qualitativa do Wi.....	88
Tabela 18 – Vazões de sólidos obtidas pelos balanços de massas.....	92
Tabela 19: Condições de operação e principais índices de desempenho de cada amostragem.....	96
Tabela 20: Wi Operacional calculados para as diferentes amostragens.....	102
Tabela 21 - Resultados Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm ²	106
Tabela 22 - Resultados Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm ²	107
Tabela 23 - Resultados Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	108
Tabela 24 - Resultados Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm ²	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	MERCADO DE AGREGADOS E AREIA MANUFATURADA	3
3.1.1	Agregado miúdo – Norma e requisitos para classificação dos materiais	6
3.1.2	Equipamentos utilizados na produção de agregados miúdos	8
3.2	HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR)	13
3.2.1	Equipamento e Principais Conceitos	13
3.2.2	Processo Cominutivo	19
3.2.3	Variáveis de Processos de HPGR	22
3.2.4	Desempenho	24
3.2.5	HRC™HPGR	29
3.3	PROCESSO PRODUTIVO DE AREIA DA MINERAÇÃO ITAQUAREIA	39
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	46
3.4.1	Prensa de bancada D1000	46
3.4.2	Wi de Bond	48
3.4.3	Índice de abrasão de Bond	50
3.4.4	LCPC	51
3.4.5	Ensaio de Compressão de Leito de Partículas (CLP)	52
3.4.6	Point Load Test	53
3.4.7	Análise de forma da partícula	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	58
4.2	CAMPANHA EXPERIMENTAL	59
4.2.1	Amostragens no Circuito de Cominuição da Itaquareia	59
4.2.2	Ensaios realizados	66
4.2.3	Dados gerados em cada amostragem	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
5.1	CHARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO	70
5.1.1	Composição Química	70
5.1.2	Abrasão de Bond	71
5.1.3	LCPC - Abrasividade e Britabilidade	72
5.1.4	Point Load Test (PLT)	73

5.1.5	Prensa de Bancada D1000.....	73
5.1.6	Testes CLP.....	81
5.1.7	Análise de Forma da Partícula.....	84
5.1.8	Wi de Bolas	87
5.2	Balanço de Massas	88
5.2.1	Granulometrias.....	89
5.2.2	Vazões	91
5.2.3	Reprodutibilidade.....	93
5.3	Índices de Desempenho	95
5.4	Indicadores para avaliação das características dos produtos em relação às especificações técnicas para areia manufaturada	103
5.4.1	Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1,0 N/mm ²	105
5.4.2	Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm ²	106
5.4.3	Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm ²	108
5.4.4	Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm ²	109
6	CONCLUSÕES	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Índice de Abrasividade
HPGR	<i>High Press Grinding Rolls</i>
PR	Prensa de Rolos
PRAP	Prensa de Rolos de Alta Pressão
PLT	<i>Point Load Test</i>
CLP	Compressão de Leito de Partículas
DWT	<i>Drop Weight Test</i>
U/F	<i>Underflow</i>
O/F	<i>Overflow</i>
O/S	<i>Oversize</i>
U/S	<i>Undersize</i>
<i>Top Size</i>	Dimensão da maior partícula
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
HRC™	HPGR conceito da Metso
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo
WI	Work index - Índice de Trabalho

1 INTRODUÇÃO

Em determinadas regiões do Brasil, além das restrições ambientais à exploração e ao alto custo de produção de areia natural, existem dificuldades em se obter produto de boa qualidade. De fato, a dificuldade de produção de areia natural de qualidade e a proibição da sua lavra em muitas áreas geram a necessidade de extração da areia em locais distantes dos principais centros de consumo, elevando gastos com transporte, que correspondem muitas vezes a dois terços do custo final da areia (LA SERNA e REZENDE, 2009; AGUIRRE e HENNIES, 2010).

Nesse sentido, uma alternativa para a redução dos problemas associados à extração da areia natural e à disposição dos resíduos das pedreiras tem sido a produção de areia artificial, a partir dos resíduos gerados no processo de britagem para a produção de brita (NEVILLE, 1997). Observa-se também que o processo de beneficiamento de areia natural gera resíduos considerados rejeitos que poderiam ser reaproveitados caso esses materiais fossem cominuídos e reclassificados. Drago et al., (2009) pontuam que a areia obtida a partir da britagem de rochas, apesar de ainda ter seu uso restrito no Brasil, apresenta considerável potencial de crescimento. Tais fatos justificam e incentivam o desenvolvimento de estudos que verifiquem a viabilidade do emprego de areia de britagem na produção de concreto e demais produtos para a construção civil.

A areia de britagem, ou agregado miúdo de pedra britada, pó-de-pedra, areia artificial ou areia manufaturada, é considerado de difícil utilização em obras correntes, mas tem sido intensivamente utilizado pelas indústrias fornecedoras de argamassas industrializadas (DRAGO et al., 2009). Além disso, diversos autores (Buest, 2022; Sosa et al., 2020; Almeida e Pereira, 2004; Lodi e Prudêncio Junior, 2006; Buest, 2006; Pereira, 2008) têm desenvolvido uma série de estudos que visam a avaliar o uso da areia de britagem em concretos e argamassas, em substituição completa ou parcial da areia natural.

A crescente demanda pelo uso de areia manufaturada incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias para atender esse mercado. Diante desse cenário, a fornecedora global de equipamentos para mineração, Metso, ao identificar um potencial de utilização do equipamento de cominuição HPGR no setor de minerais industriais, desenvolveu rapidamente uma linha específica para atender este segmento, denominada de HRC™ Aggregates (PEDROSA, 2019).

Apesar de historicamente ser considerado um equipamento para diferentes aplicações, devido a fatores econômicos e limitações operacionais do equipamento, tradicionalmente as aplicações da tecnologia HPGR ocorreram nos últimos anos nas indústrias com minério de alto valor agregado, o que torna o seu uso na indústria de agregados uma aplicação recente (PEDROSA, 2019).

A escassez de informações na literatura acadêmica sobre a aplicação, o desempenho e benefícios do uso de HPGRs no segmento de agregados da indústria mineral, motivou o desenvolvimento do presente estudo.

Acredita-se que a análise de desempenho do HRC™HPGR na produção de areia manufaturada deverá contribuir assim com o desenvolvimento do mercado de agregados, ajudando a todos os profissionais que nele estão inseridos, seja a comunidade acadêmica, empresas de engenharia ou fornecedores de areia manufaturada.

2 OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o desempenho do HRC™ na produção de areia manufaturada. O desempenho foi avaliado não apenas em termos de índices específicos do equipamento, como capacidade específica e consumo energético específico, mas também nas características do produto obtido, este último em função das especificações técnicas de areia manufaturada.

Adicionalmente, este trabalho visou avaliar um método para estimativa de granulometrias de areias manufaturadas produzidas com HRC™ em aplicações nas quais haja limitação de quantidade de amostras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MERCADO DE AGREGADOS E AREIA MANUFATURADA

Agregado é todo material granular encontrado na natureza ou proveniente de fragmentação mecânica. La Serna e Rezende (2009) os classificam como materiais sem forma ou volume definido, com dimensões e propriedades para uso em obras de engenharia civil.

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR7211 (2022) define, o agregado pode ser classificado pela sua dimensão em *graúdo* (pedra britada e pedregulho), com dimensões entre 75 mm e 4,75 mm, e *miúdo* (areia natural ou de britagem), com dimensões entre 4,75 mm e 0,15 mm. O agregado pode, também, ser classificado, conforme o modo de obtenção, em *naturais* (cascalho e areia natural) e *artificiais* (pedra britada e areia de britagem) (LA SERNA e REZENDE, 2009).

A definição de “agregado miúdo”, é claramente estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2022, p2):

“Agregado miúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 1704, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.”

Já a NBR 9935 (ABNT, 2011, p.3) define “areia” como:

“Agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, ou proveniente de processos industriais. É chamada de areia natural quando resultante de ação de agentes naturais, de areia artificial quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha conforme normas específicas.”

Na construção civil a areia é utilizada na composição de argamassa e concretos, tendo a função de diminuir a retração dessa composição, aumentar sua resistência mecânica e ao desgaste natural, bem como reduzir o volume de aglomerante (cimento), com consequente redução de custos (ROCHA, 2015).

Tannús et al. (2007) mencionam que a utilização de areia de britagem está se tornando um processo irreversível nas regiões mais desenvolvidas e, portanto, maiores consumidoras de agregados para construção.

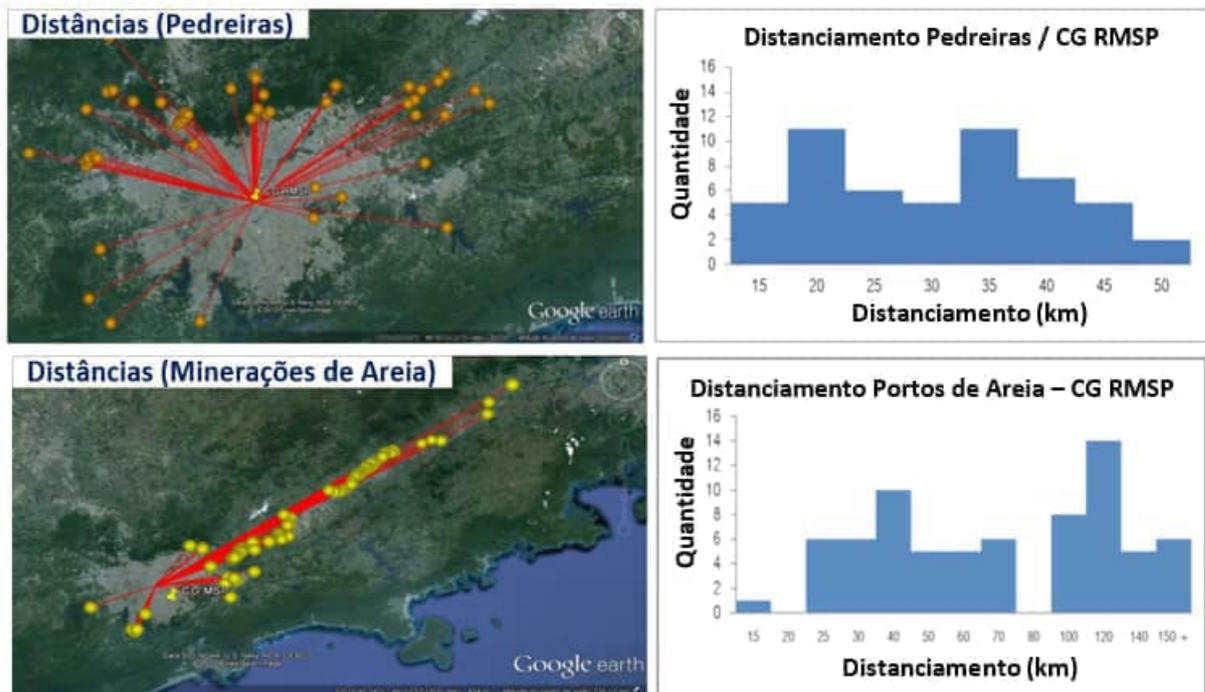
Conforme Nogueira (2016) destaca, os impactos ambientais gerados pelo uso de areia retirada de rios podem alterar a calha natural, provocando a erosão nas margens dos mesmos, além de alterar o equilíbrio hidrológico, destruir as áreas de várzeas e diminuir suporte do meio para a fauna silvestre.

Conforme Ulsen (2011) pontua, a britagem de rochas para geração de areia manufaturada tem sido uma fonte alternativa de produção de agregados miúdos para utilização em concreto e argamassa, impulsionado pela crescente escassez de areia natural e às restrições ambientais e bloqueios de jazidas, principalmente nas maiores metrópoles brasileiras.

Um outro aspecto que impulsiona o uso da areia manufaturada é o custo do transporte do agregado para construção civil. Segundo La Serna e Rezende (2009), o custo de transporte para areia natural pode representar cerca de dois terços do preço final do produto.

O caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) exemplifica essa realidade que também pode ser observada em outras regiões do Brasil. No caso da RMSP, uma vez que grande parte dos areeiros que abastecem essa região estão localizados no Vale do Paraíba, o custo de transporte é bastante significativo. A Figura 1 ilustra a localização das principais pedreiras e areeiros na RMSP em relação ao centro de São Paulo.

Figura 1 - Localização das principais pedreiras e minerações de exploração de areia na RMSP.



Fonte: Falcão et. al., (2013). Modificado pelo autor.

Destaca-se que a areia manufaturada pode ser produzida em qualquer local que tenha o material que possa ser utilizado nessa finalidade (muitas vezes pedreiras próximas aos grandes centros), diminuindo assim as distâncias entre o mercado consumidor e produtores.

Diante desse cenário, Almeida e Silva (2005) pontuam três grandes vantagens para indicação do uso da areia manufaturada como alternativa ao uso da areia natural:

- Redução dos impactos ambientais ocasionados pelo processo convencional de extração de areia, principalmente, das áreas mineradas nos leitos dos rios.
- Melhoria da qualidade do produto, uma vez que a areia manufaturada é mais uniforme que a areia natural, facilitando sua utilização junto a argamassa e ao concreto.
- Redução dos custos de transporte, uma vez que a produção da areia manufaturada pode ser realizada próxima aos grandes centros e mercado consumidor.

Em relação a esse último ponto, destaca-se que com a redução da distância entre o produtor de areia e o consumidor final, há também uma consequente redução da

emissão de CO₂ gerada no transporte desse material, contribuindo portanto, com a redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa.

As premissas acima reforçam que as vantagens na indicação do uso da areia manufaturada como alternativa ao uso da areia natural, abrangem aspectos técnicos, econômicos e principalmente ambientais.

3.1.1 Agregado miúdo – Norma e requisitos para classificação dos materiais

A norma NBR 7211 (2022) apresenta conceitos e estabelece critérios para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland.

No que tange aos agregados miúdos, a distribuição granulométrica e módulo de finura se apresentam como um dos principais parâmetros a serem observados na avaliação da qualidade desse agregado.

Segundo a mesma NBR 7211, módulo de finura é a soma das porcentagens retidas (acumuladas) em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Já a série normal e série intermediária de peneiras é o conjunto de peneiras sucessivas, que atendem à ABNT NBR NM ISO 3310-1. Os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo são apresentados na Tabela 1 e no gráfico da Figura 2.

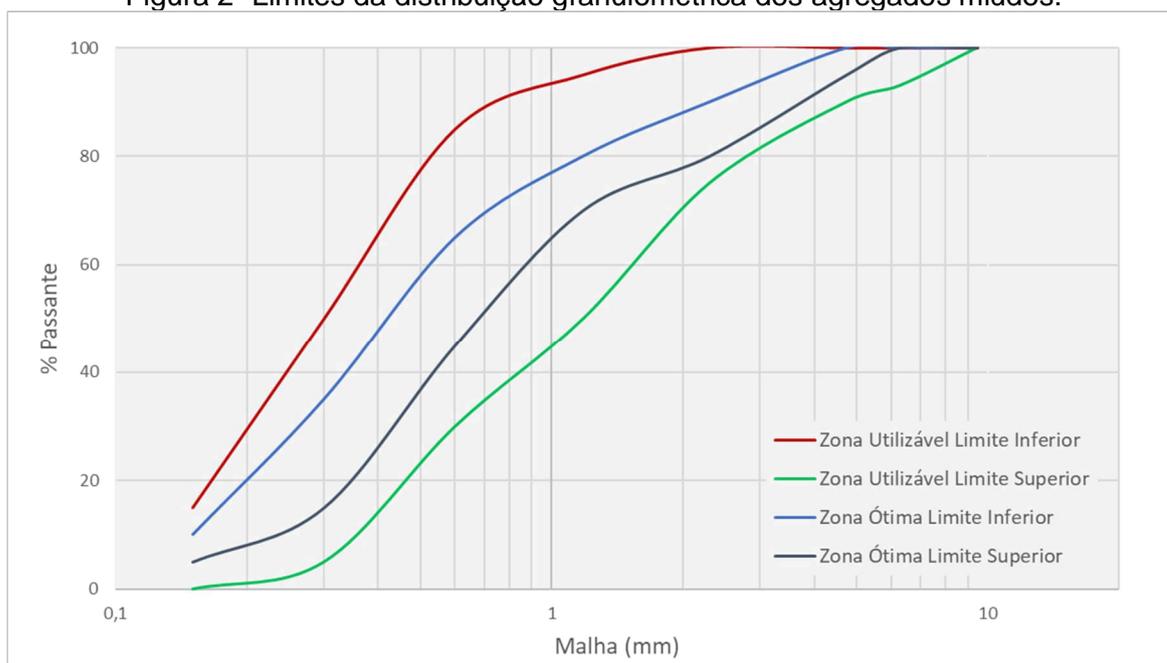
Tabela 1- Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
600	15	35	55	70
300	50	65	85	95
150	85	90	95	100

Notas
 1 - O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 2 - O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 3 - O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2022, p. 5). Modificado pelo autor.

Figura 2- Limites da distribuição granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2022). Modificado pelo autor (2021).

Segundo Catoia (2007), a faixa ótima estabelecida pela norma apresenta a busca por uma proporção em relação ao tamanho das partículas que promova maior empacotamento das partículas, de forma que as partículas menores preencham os vazios entre partículas maiores.

A norma NBR 7211 também estabelece o limite de material pulverulento contido no agregado miúdo (3 a 5%). O material pulverulento representa a fração passante no peneiramento a úmido na malha de 0,075 mm.

A norma ABNT NBR NM 46 destaca que quando o material fino que passa através da peneira 0,075 mm por lavagem for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem de rocha, os valores constantes nesta mesma Norma podem ter seus limites alterados de 3% para 10% (para concreto submetido a desgaste superficial) e de 5% para 12% (para concreto protegido do desgaste superficial), desde que seja possível comprovar, por apreciação petrográfica realizada de acordo com a ABNT NBR 7389, que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto.

Apesar da Norma NBR 7225 (Materiais de Pedra e agregados) estabelecerem três produtos diferentes: Areia grossa, Areia fina e Areia média, a Norma NBR 7211 considera quatro tipos de areia, quais sejam, Areia grossa, Areia média, Areia fina e

Areia muito fina. As definições apresentadas por essas normas são conflitantes e não apresentam correspondência entre si (CHAVES e WHITAKER, 2012).

Muitas vezes a areia é classificada conforme prática do mercado consumidor local. ITAMBÉ (2020) classifica a areia pelo Módulo de Finura:

- Areia Fina: Módulo de Finura 1,55 a 2,20
Na faixa da Zona utilizável inferior
- Areia Média: Módulo de Finura 2,20 a 2,90
Na faixa da Zona ótima
- Areia Grossa: Módulo de Finura 2,90 a 3,50
Na faixa da Zona utilizável Superior

Já a ANEPAC (2020), classifica os diferentes tipos de areia pela faixa granulométrica das partículas:

- Areia grossa (-2,0 mm +1,2 mm)
- Areia, média (-1,2 mm +0,42 mm)
- Areia fina (-0,42 mm +0,075 mm)

Já para os casos das areias utilizadas como material filtrante, a norma NBR 11799 que regulamenta esse tipo de areia especial, estipula que essa areia deve ser:

- Constituída de material silicoso, com a maior dimensão menor ou igual a 4,8 mm;
- Visualmente livre de pó, barro, argila, mica e matéria orgânica;
- Tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade e os tamanhos limites devem atender os valores especificados pelo comprador.

3.1.2 Equipamentos utilizados na produção de agregados miúdos

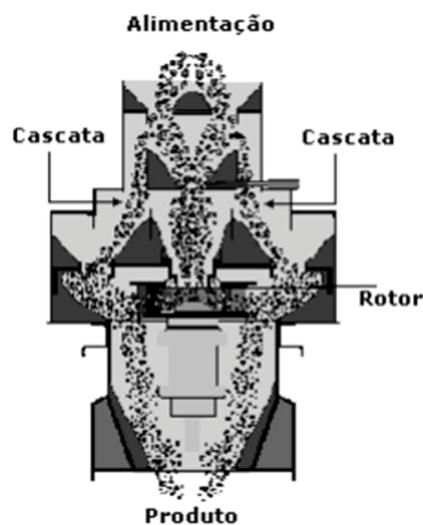
A exploração de areia natural em várzeas e leitos de rio vem sofrendo restrições das agências de meio ambiente, principalmente em regiões metropolitanas. Nesse cenário, a produção de areia manufaturada e uso desse agregado na construção civil, tem sido estudada por diferentes autores como alternativa a areia natural (ALMEIDA

et. al., 2004; CEPURITIS et al., 2015; PETIT et al., 2018). Com os desafios estabelecidos por esse cenário, diferentes produtores de areia têm investido em novos equipamentos de cominuição e tecnologias para produção de agregados miúdos (HICKEL et al.; 2018).

Com a finalidade de gerar produtos com características que atendam os requisitos técnicos estabelecidos pelas normas e/ou mercado consumidor, diferentes tipos de britadores têm sido empregados no processo cominutivo desses materiais. Dentro desse contexto de produção de agregados, observa-se o uso do britador de Impacto Vertical (*Vertical Shaft Impact – VSI*) (WEIDMANN, 2006).

O britador de impacto vertical (VSI) é conhecido como o equipamento capaz de produzir modificações nas partículas, dando-lhes formato cúbico ou arredondado. Essa forma das partículas é atribuída aos mecanismos que ocorrem no rotor e na câmara de britagem do britador: impacto, abrasão e atrição. Parte do material alimentado no britador vai para o interior de um rotor, que projeta esse material a altas velocidades contra as paredes da câmara revestida com o próprio material onde as partículas colidem entre si e são cominuídas. Parte do material passa por fora do rotor, na forma de cascata e colide contra as partículas que passaram pelo interior do rotor, caracterizando-se como um processo autógeno de cominuição (LUZ et al., 2010).

Figura 3– Desenho esquemático do funcionamento do britador tipo VSI.

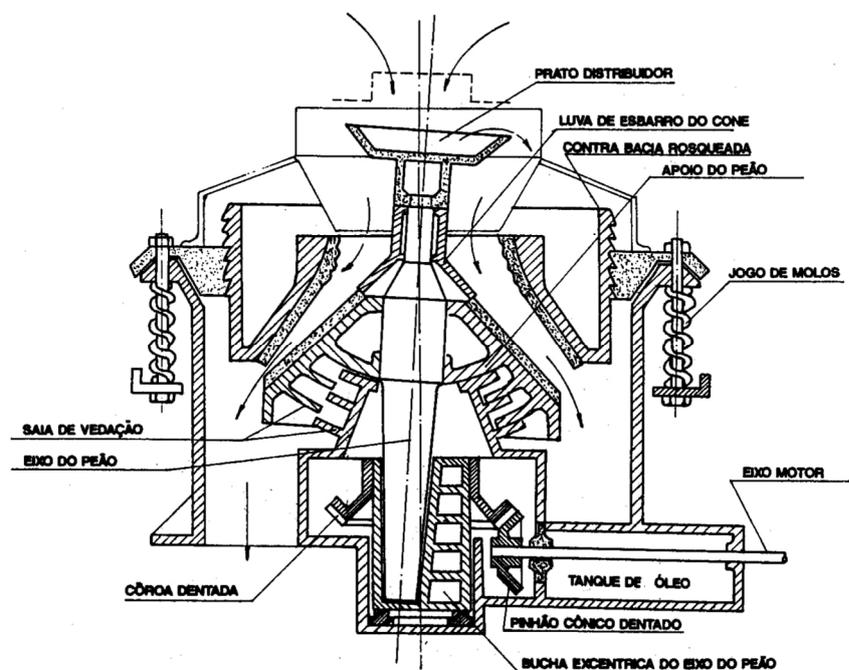


Fonte: LUZ et al., 2010.

Em linhas gerais, a redução das partículas ocorre devido à colisão da rocha contra a rocha, gerando um agregado com formato mais cúbico quando comparado aos agregados obtidos nos britadores cônicos. Normalmente os britadores VSI são empregados em pedreiras como britadores terciários, para a produção exclusiva de agregado miúdo britado (BENGTSSON e EVERTSSON, 2008). Porém, atenta-se que uma das características desse tipo de britador é a maior geração de finos quando comparado a outros equipamentos de britagem, tais como os de compressão (BRYAN, 1992). Tal resultante pode ser indesejada, dependendo da aplicação e características requeridas para o produto.

Outro tipo de equipamento comumente encontrado em usinas industriais de cominuição como britadores secundários e terciários é o britador cônico. Esse britador possui um eixo central oscilante, que, em movimentos circulares, ora se afasta e ora se aproxima da carcaça lateral do britador. O esmagamento propriamente dito ocorre pela compressão da rocha entre os revestimentos do eixo (manta) e da carcaça, ou entre as partículas efetivamente prensadas (CHAVES et al., 2006; ITÄVUO et al., 2013; HUANG et al., 2007).

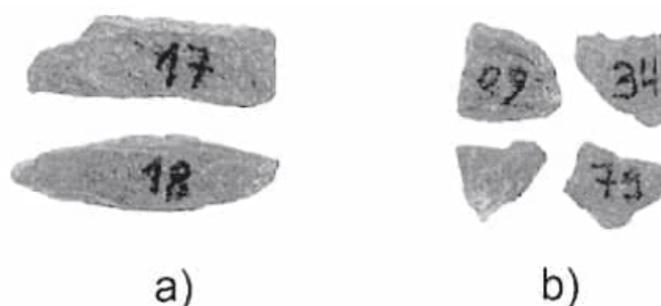
Figura 4– Desenho esquemático do funcionamento do britador tipo cônico.



Fonte: LUZ et al., 2010.

Porém, Weidmann (2008) destaca que a fratura das partículas nos britadores cônicos obedece, em muitos casos, aos planos preferenciais das rochas, devido às suas constituições mineralógicas, podendo gerar agregados com formas não tão favoráveis para a produção de agregados para concretos, conforme mostrado na Figura 5:

Figura 5– Forma de agregados de origem basáltica produzidos nos britadores tipo cônico (a) e nos britadores tipo VSI (b).



Fonte: HICKEL et al., 2008.

Bengtsson e Evertsson (2008), avaliaram a influência do britador cônico e do britador VSI em diferentes configurações operacionais, na forma dos agregados miúdos de rocha tonalítica. Esses autores demonstraram que razões de aspecto (relação entre a menor e a maior dimensão da partícula) dos agregados finos gerados no britador cônico são menores do que os agregados produzidos no britador VSI. Porém, quando a velocidade operacional do VSI é baixa, a relação de aspecto do produto resultante desse britador fica próxima da relação do aspecto do agregado produzido com o uso do britador cônico.

Hickel et al., (2018) conduziu estudos comparando as características dos agregados miúdos produzidos em um britador cônico e no britador tipo VSI. Esse autor também concluiu que o tipo de britador exerce influência na forma das partículas (razão de aspecto e na esfericidade), tendo o VSI apresentando resultados melhores se comparado os resultados dos produtos gerados no britador cônico. No entanto, esse autor destaca que a melhora dessas características parece diminuir com a redução do tamanho das partículas.

Cepuritis et al., 2015 pontua que o VSI é comumente utilizado para melhorar a forma da areia manufaturada, enquanto a maior vantagem dos britadores cônicos é sua capacidade de gerar pouca quantidade de finos. Por outro lado, esse mesmo autor

pondera a forma da partícula como uma desvantagem do britador cônico, enquanto destaca que a alta geração de finos é uma desvantagem para o VSI.

Muitas vezes, o alto teor de finos gerados na britagem VSI tem sido resolvido por meio do emprego do peneiramento à úmido. No entanto, esta abordagem nem sempre é viável devido a problemas como falta de espaço, disponibilidade de recursos hídricos e questões ambientais (CEPURITIS et al., 2015).

A Metso, fornecedora de britadores tipo VSI, cônicos e britadores de rolos de alta pressão, sendo esse último britador apresentado na seção 3.2 desse trabalho, indica que a seleção de britadores para a produção de areia manufaturada deve também considerar características da rocha (como dureza e abrasividade), granulometria da alimentação e os parâmetros requeridos para o produto (METSO, 2023).

Em aplicações em que a alimentação é fina (ou seja, faixas granulométricas entre 19 e 4 mm ou 12 e 3 mm), a britagem de alta velocidade ou por compressão, como britadores VSI e HRC™ (britador de rolo de alta pressão) pode ser utilizada, mas deve ser configurada adequadamente para cada aplicação. Tipicamente, a relação de redução nessas aplicações é muito menor e o processo precisa ser ajustado para atingir o objetivo final de forma eficiente. Sugere-se que o emprego de tais tipos de equipamentos possam ter bom desempenho na produção de areia manufaturada, especialmente se a aplicação demandar que o produto atenda um valor baixo de Módulo de Finura, boa forma das partículas e atenda uma especificação de graduação para o produto (METSO, 2023). A Tabela 2 apresenta um comparativo preparado por esse fornecedor, entre as tecnologias utilizadas na produção de diferentes tipos de areia manufaturada.

Tabela 2- Opções de tecnologias de britagem empregados na produção de areia manufaturada.

Tipo de Britador	Tipo de Areia Manufaturada			
	Areia para Concreto	Areia Industrial	Areia para Asfalto	Areia para Agricultura
Cone	X	X	XX	
HSI Série NPXX	X	X		X
VSI	XX	XXX	X	XX
HRC™	XXX	XX	XXX	XXX

X - Bom, XX - Muito Bom, XXX-Melhor Tecnologia para a Aplicação.

Fonte: Adaptado Metso (2023).

Com base na Tabela 2, a Metso também indica que o VSI tem potencial de produzir uma boa areia para concreto, principalmente pela capacidade desse equipamento em gerar partículas com forma adequada. Por outro lado, dependendo da aplicação, o VSI pode produzir quantidades altas de finos ($< 0,063$ mm), o que seria indesejado nesse tipo de areia. Já a tecnologia HRC™ tem potencial em produzir partículas com forma adequada, com uma curva de produto com boa graduação e atendendo o módulo de finura requerido na areia para concreto. Considera-se também que o HRC™ tem potencial em gerar menores quantidades de finos ($< 0,063$ mm) em relação ao VSI (METSO, 2023).

3.2 HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR)

3.2.1 Equipamento e Principais Conceitos

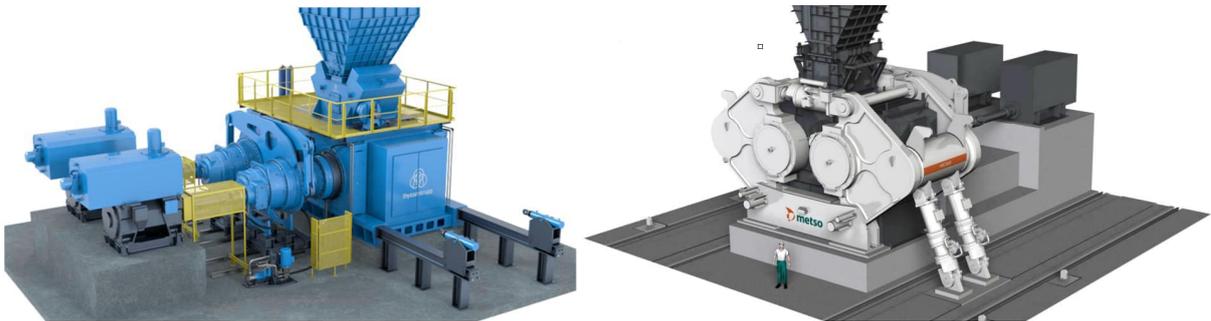
O britador de rolos de alta pressão, HPGR (*High Pressure Grinding Rolls*), foi desenvolvido na década de 1980 pelo Prof. Klaus Schönert na Alemanha como resultado de estudos fundamentais do seu grupo na área de fratura de partículas individuais e em leitos. O HPGR é um equipamento de dois rolos paralelos, alimentado e operado de modo que um leito de partículas se forma entre os rolos, produzindo pressões superiores a 50 MPa. O produto do HPGR apresenta-se como “torta” ou flocos (*flakes*), cuja consistência irá depender do material. No HPGR um rolo é fixo e o outro é pressurizado (ou flutuante) de modo que ambos comprimem o leito de partículas (TAVARES, 2005b).

Conforme Ribeiro, Russo e Costa (2010) resumem, as prensas de rolos são equipamentos de cominuição que consistem em um par de rolos girando em sentidos opostos, montados em um quadro rígido. Um rolo gira sobre eixo fixo no quadro, enquanto o outro eixo se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos. A alimentação é introduzida na abertura entre rolos, onde a diminuição de tamanho ocorre pelo efeito da cominuição interparticular.

Inicialmente o HPGR foi aplicado na moagem de cimento na Europa, com pouca aplicabilidade na indústria mineral. Posteriormente, o desenvolvimento de revestimentos especiais resultou no emprego em circuitos industriais de britagem,

inclusive para rochas muito tenazes e abrasiva, devido ao seu potencial para elevar a capacidade e reduzir o consumo energético. As altas tensões geradas no leito de partículas resultam em uma maior geração de finos em comparação à britagem convencional. Além disso, têm sido reportados alguns estudos que evidenciam a capacidade do HPGR de fragilizar diferentes tipos de materiais, entre eles minérios de estanho e carvão, além de clínqueres (TAVARES, 2005a). A Figura 6 apresenta exemplos de prensas de rolos:

Figura 6 - Exemplos de prensa de rolos de alta pressão.



Fonte: Equipamento à esquerda, Thyssenkrupp (2023). Equipamento à direita, Metso (2020).

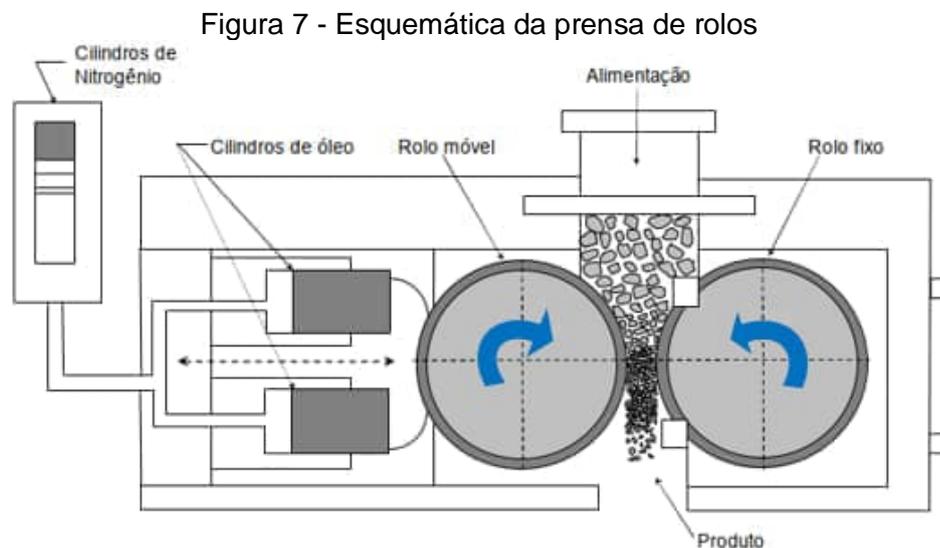
Em geral, a motivação para a utilização de prensas de rolos está relacionada à sua maior eficiência energética, se comparada com a eficiência dos britadores e dos moinhos convencionais, pois, nas prensas de rolos ocorre aplicação de carga de forma lenta sobre as partículas, causando a quebra entre grãos, de modo que a energia perdida em calor e ruído é minimizada (RIBEIRO, RUSSO e COSTA, 2010). Valadão (2007) destaca a eficiência energética dos HPGR, cuja diminuição no consumo de energia específica pode chegar, em muitos casos, a valores da ordem de 80%. Pedrosa (2019) apresenta os principais circuitos de cominuição onde a tecnologia HPGR é aplicada, assim como os ganhos potenciais de cada uma dessas aplicações, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Principais Aplicações HPGR

Aplicação	Minérios / Materiais	Ganhos Potenciais	Equipamento Concorrente	Referência
Estágio terciário de britagem	Clínquer, cobre, ouro, ferro, platina	Eficiência energética, aumento do desempenho metalúrgico (flotação)	Britadores cônicos, moinhos semi-autógenos e moinhos de barras	Aydodnga, Ergün e Hakan (2006), Benzer et al. (2017), Mazzinghy et al. (2015), Godoy et al. (2010), Burchardt et al. (2011), Van der Meer e Gruendken (2010)
Rebritagem de <i>pebbles</i> da moagem semi-autógena	Cobre e ouro	Eficiência energética e vazões mássicas elavadas	Britadores cônicos	Van der Meer e Gruendken (2010)
Preparação para lixiviação em pilha	Cobre e ouro	Aumento do desempenho metalúrgico (lixiviação)	Britadores cônicos	Morley (2006), Burchardt et. al. (2011)
Britagem terciária e quaternária	Basalto, calcário, diabásio, dolomito, feldspato, silicato	Especificações de granulometria do produto, flexibilidade operacional e aumento da vida útil dos revestimentos	Britadores cônicos, britadores de martelo, britadores de impacto vertical	Ito (2017), Almeida et.al., 2023
Preparação de <i>pellet feed</i>	Concentrado de minério de ferro	Aumento da área superficial e maior geração de finos	Moinho de bolas	Van der Meer (2015)
Moagem de liberação de diamantes	Diamantes	Aumento de liberação, preservação das gemas	Britadores cônicos	Daniel e Morley (2010)

Fonte: Pedrosa (2019). Modificado pelo autor.

Conforme Alves (2012) ressalta, o princípio de funcionamento do HPGR é de fácil compreensão. Um dos rolos na prensa gira em um eixo fixo enquanto o outro pode se mover horizontalmente, reagindo à expansão do leito de partículas na zona de compressão, proporcionalmente à força aplicada horizontalmente. A força é aplicada ao rolo móvel a partir de um sistema hidráulico de óleo. A pressão do óleo atua a partir de dois ou quatro cilindros (dependendo do fabricante) e transmitindo a força de moagem para a secção da superfície do rolo onde o leito de compressão é formado. A Figura 7 apresenta de forma simplificada o funcionamento da prensa de rolos.



Fonte: Daniel, M. e Morrell, S. (2004); Napier-Munn et al., (1996). Adaptado pelo autor.

Schumacher e Theisen (1997) e Oliveira (2015) destacam que as aplicações no processamento de minérios mais tenazes e abrasivos tornaram-se viáveis após a introdução, a partir da década de 1990, de novas tecnologias na confecção da superfície dos rolos.

Uma inovação de grande relevância para as prensas de rolos foi a adição de pinos de alta resistência à superfície dos rolos. Essa alteração permite que uma camada autógena formada pelo próprio material proteja a superfície dos rolos (OLIVEIRA, 2015; SCHUMACHER e THEISEN, 1997).

Destaca-se a utilização de revestimentos compostos por pinos cilíndricos de carbeto de tungstênio prensados ou colados em um material de base de aço endurecido e temperado (PEDROSA, 2019). A Figura 8 apresenta um rolo montado com pinos de carbeto de tungstênio.

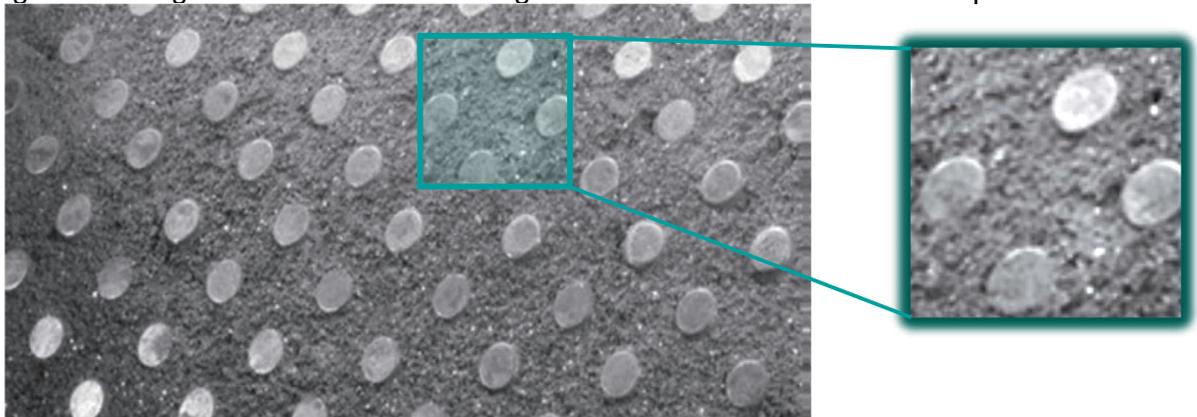
Figura 8 - Rolo montado com pinos de carbeto de tungstênio.



Fonte: Ribeiro, Russo e Costa (2010).

O topo dos pinos é alguns milímetros mais alto do que a superfície dos rolos, de modo que o material mais fino fica retido entre os pinos. Esta camada de material fino impede o desgaste adicional do material da base dos rolos (PEDROSA, 2019), conforme ilustra a Figura 9.

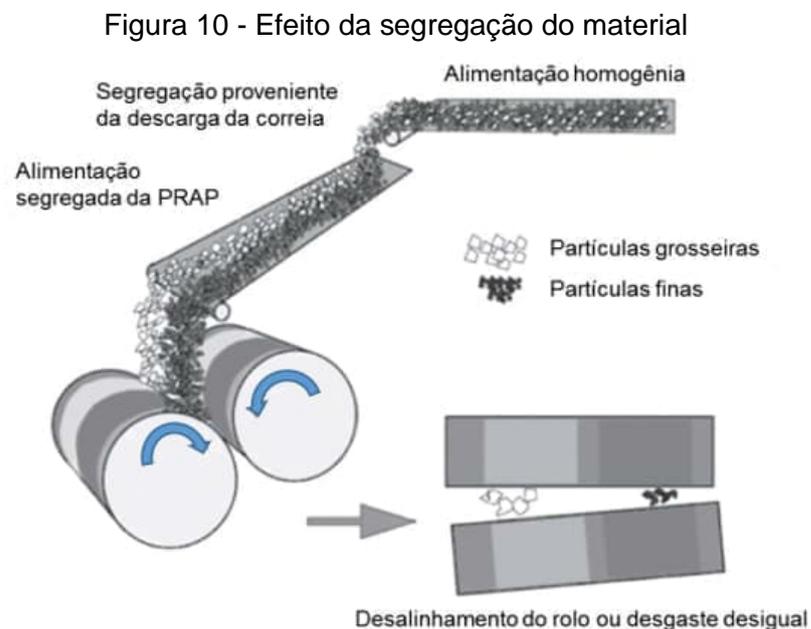
Figura 9 - Imagem de uma camada autógena de material formada entre os pinos do rolo



Fonte: Van der Meer e Maphosa (2012). Modificado pelo autor.

Um efeito importante e deletério a operação do HPGR é o desalinhamento dos rolos ou *skewing*, definido por Van der Meer e Maphosa (2012) como uma condição em que os rolos não estão paralelos entre si.

Herman et al., (2015) complementam que o *skewing* é uma condição em que os eixos dos rolos não ficam paralelos devido à distribuição de alimentação irregular. Já Oliveira (2015) indica que essa segregação da alimentação influencia negativamente a eficiência do equipamento, uma vez que resulta em diferentes distribuições granulométricas ao longo da largura dos rolos, conforme mostram a Figura 10 e a Figura 11.



Fonte: Van der Meer e Maphosa (2012) e Pedrosa (2019). Modificado pelo autor.

Figura 11 – Exemplo de distribuição irregular da alimentação na prensa.



Fonte: Herman, Harbold, Mular e Biggs (2015).

Van der Meer e Maphosa (2012) ressaltam que em outros equipamentos, como britadores cônicos ou de impacto e moinhos, esse efeito não é tão significativo como no HPGR. O *skewing* pode gerar resultados indesejáveis como desgaste dos rolos e relação de redução desigual ao longo do rolo, além do desalinhamento do rolo.

Oliveira (2015) destaca que o desalinhamento dos rolos pode fazer com que os rolamentos sejam submetidos a esforços que os danifiquem. Muitas vezes essa ocorrência gera paradas indesejadas do equipamento devido à quebra dos rolamentos.

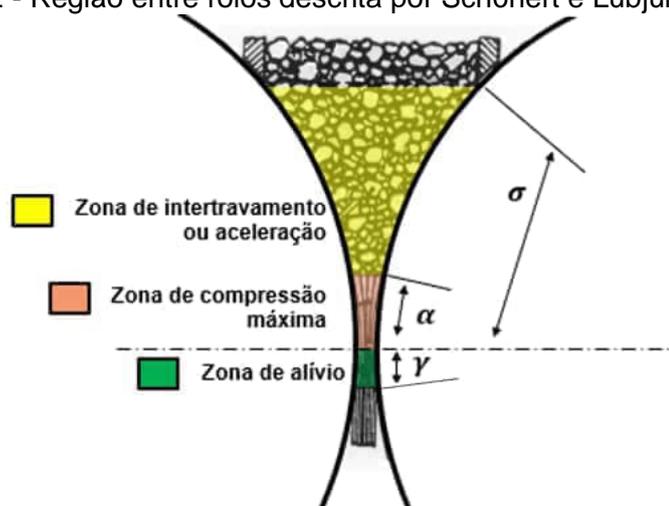
3.2.2 Processo Cominutivo

Schönert (1988) afirma que o processo cominutivo em HPGR se inicia com a alimentação do material por meio de um chute montado diretamente acima do vão entre os rolos. O material flui por gravidade, desde que o ângulo crítico de fricção entre a partícula e os rolos e/ou a fricção interna do material particulado sejam suficientes para puxá-lo para a zona de compressão entre os rolos, de forma contínua.

Chaves e Peres (2006) destacam que, embora da mesma família dos britadores de rolos, as prensas de rolos operam de forma diferente: os britadores quebram rocha contra metal - cada fragmento é comprimido pelos rolos, fraturando-se. Na prensa, uma camada de partículas é comprimida entre os rolos. A cominuição ocorre principalmente partícula contra partícula (interparticular).

Schönert e Lubjuhn (1992) definem a região entre rolos em três importantes zonas: aceleração/intertravamento das partículas, compressão máxima e alívio, conforme mostra o diagrama da Figura 12.

Figura 12 - Região entre rolos descrita por Schönert e Lubjuhn (1992).



Fonte: Schönert e Lubjuhn (1992); Oliveira (2015). Adaptado pelo autor.

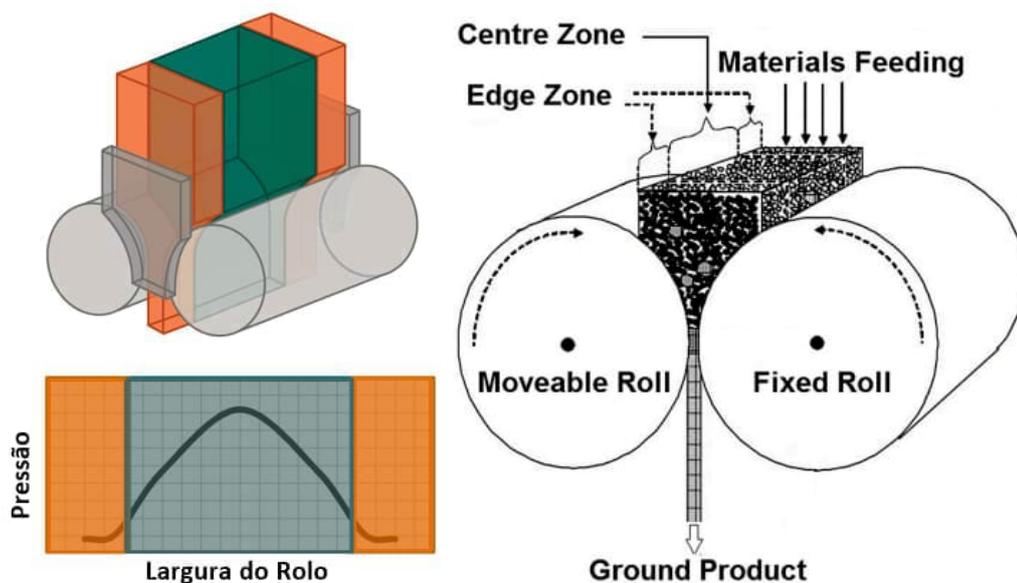
Conforme Oliveira (2015) pontua, as partículas são aceleradas na parte superior do rolo em consequência da aceleração da gravidade e da força de atrito, até atingir a velocidade da superfície do rolo. As partículas, cujos diâmetros são maiores que a abertura operacional da máquina, são cominuídas nessa região (definida pelo ângulo σ da Figura 12), apesar de a zona de compressão máxima, delimitada pelo ângulo α , ser a principal responsável por fragmentá-las.

Ainda segundo OLIVEIRA (2015), a última região, denominada zona de alívio, é definida entre a linha que une o eixo dos rolos e a posição em que não há mais força normal aplicada às superfícies dos rolos, esta última delimitada pelo ângulo de alívio γ .

Uma importante característica a ser mencionada no processo cominutivo do HPGR é o efeito de borda. O efeito de bordas ou *edge effect* é decorrente do gradiente de pressão que se forma ao longo do comprimento dos rolos e da ausência de confinamento na região de suas bordas (MORRELL et al., 1997). Este fenômeno determina a fração relativamente grosseira frequentemente verificada nos produtos HPGR (PEDROSA, 2019).

Gomes (2010) destaca que o efeito de bordas é um problema mecânico com consequências de processo, que ocorre em função da descompressão das bordas dos rolos, por causa da concentração de material no centro dos mesmos, conforme ilustram os diagramas da Figura 9.

Figura 13 - Representação do efeito borda e o gradiente de pressão ao longo do rolo.



Fonte: Herman et al., (2013) e Abazarpoor et al., (2017). Modificado pelo autor.

Herman, Knorr e Whalen (2013) destacam diversos efeitos negativos no processo causados pelo efeito borda, quais sejam: produto da borda mais grosso em relação à região central dos rolos, desgaste não uniforme dos rolos e redução da eficiência energética do processo.

Pedrosa (2019) ressalta que o efeito de bordas é uma consequência indesejável do processo e deve ser minimizado, uma vez que influencia o desempenho da operação, inclusive quanto ao principal atrativo do equipamento que é maior eficiência energética em relação aos equipamentos convencionais de cominuição.

Oliveira (2015) destaca que algumas iniciativas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de minimizar ou eliminar o efeito borda. Destaca-se projetos que consideram a utilização de pinos diferenciados na região das bordas e o uso de rolo fixo com flanges, que aumentam o intertravamento das partículas na região das bordas.

3.2.3 Variáveis de Processos de HPGR

3.2.3.1 Vazão Mássica

A vazão mássica do HPGR é determinada principalmente pelas dimensões dos rolos, pela velocidade periférica e perfil dos rolos, além das características do material, conforme mostra a Equação 1 (SCHÖNERT; LUBJUHN, 1992).

$$M = L \cdot s \cdot u \cdot \rho_f \cdot 3,6 \quad (1)$$

Onde:

- M: Vazão mássica de alimentação do HPGR (t/h)
- L: Largura do rolo (m)
- s: Abertura operacional do equipamento (mm)
- u: Velocidade periférica dos rolos (m/s)
- ρ_f : Densidade do material no vão entre os rolos (t/m³)

Morley (2010) ressalta que a abertura do HPGR é uma variável não controlável, sendo dependente das características do minério, principalmente granulometria de alimentação e tenacidade, além do diâmetro e tipo de superfície dos rolos. A pressão operacional influencia inversamente a abertura operacional, ou seja, quanto maior a pressão, menor a abertura (OLIVEIRA, 2015).

3.2.3.2 Vazão mássica específica

Klymowsky et al., (2006) indicam que a vazão mássica específica pode ser calculada por meio de duas maneiras distintas: a partir da relação entre a abertura operacional e o diâmetro dos rolos (m_{flocos}), ou então, por meio da vazão mássica de alimentação (m_f).

Cálculo a partir da relação s/D

A vazão mássica específica (Equação 2), calculada a partir da relação entre abertura da máquina (s) e o diâmetro do rolo (D), é função da densidade do produto (flake) (KLYMOWSKI, 2002; OLIVEIRA, 2015):

$$mfloco = \frac{s}{D} \cdot \rhoflake \cdot 3,6 \quad (2)$$

Onde:

mflake: Vazão mássica específica obtida a partir da relação entre a abertura operacional e o diâmetro dos rolos – s/D (t.s/m³h);

s: Abertura de trabalho entre os rolos (mm);

ρflake: Densidade do material na abertura da prensa (t/m³)

D: Diâmetro do rolo (m)

Cálculo a partir da alimentação

Morley (2006a) indica que a vazão mássica específica, denominado m-ponto ou *m-dot*, também pode ser calculada a partir da alimentação, sendo função do diâmetro, da largura e da velocidade periférica dos rolos, conforme a Equação 3.

$$mdot = \frac{M}{D \cdot L \cdot u} \quad (3)$$

Onde:

mdot: Vazão mássica específica (t.s/m³h)

M: Vazão mássica de alimentação (t/h)

D: Diâmetro dos rolos (m)

L: Largura dos rolos (m)

u: Velocidade periférica dos rolos (m/s)

Em um HPGR, a pressão de cominuição aplicada ao leito de partículas controla a granulometria do produto (PEDROSA, 2019). Esta variável é quantificada pela pressão específica de moagem, definida por SCHÖNERT (1988) como a força aplicada aos rolos (kN), dividida pelo diâmetro (m) e pela largura (m) dos rolos, conforme a Equação 4.

$$P_{esp} = \frac{F}{1000.D.L} \quad (4)$$

Onde:

<i>P_{esp}</i> :	Pressão específica (N/mm ²)
F:	Força aplicada nos rolos (kN)
D:	Diâmetro dos rolos (m)
L:	Largura dos rolos (m)

Valores típicos de pressão específica de operação de HPGR com superfícies pinadas estão na faixa entre 1,0 e 4,5 N/mm², atingindo 8 N/mm² em aplicações na indústria cimenteira (OLIVEIRA, 2015).

3.2.4 Desempenho

A análise do desempenho da operação do HPGR é de grande importância, pois permite a definição da melhor condição de processo para atender uma determinada demanda, sendo avaliado com base em três aspectos importantes: vazão mássica, consumo de energia e granulometria do produto (PEDROSA, 2019).

Adiciona-se também o desgaste dos rolos como uma variável importante para avaliação do desempenho do HPGR, devido a influência desse componente na determinação da disponibilidade e custos operacionais do equipamento (KLYMOWSKI et al., 2002).

3.2.4.1 Parâmetros que influenciam a vazão mássica específica

A capacidade específica, frequentemente denominada de vazão mássica específica, é um dos principais aspectos de desempenho de HPGR, sendo influenciada por diversos fatores (OLIVEIRA, 2015), conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores que influenciam a capacidade específica da prensa

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

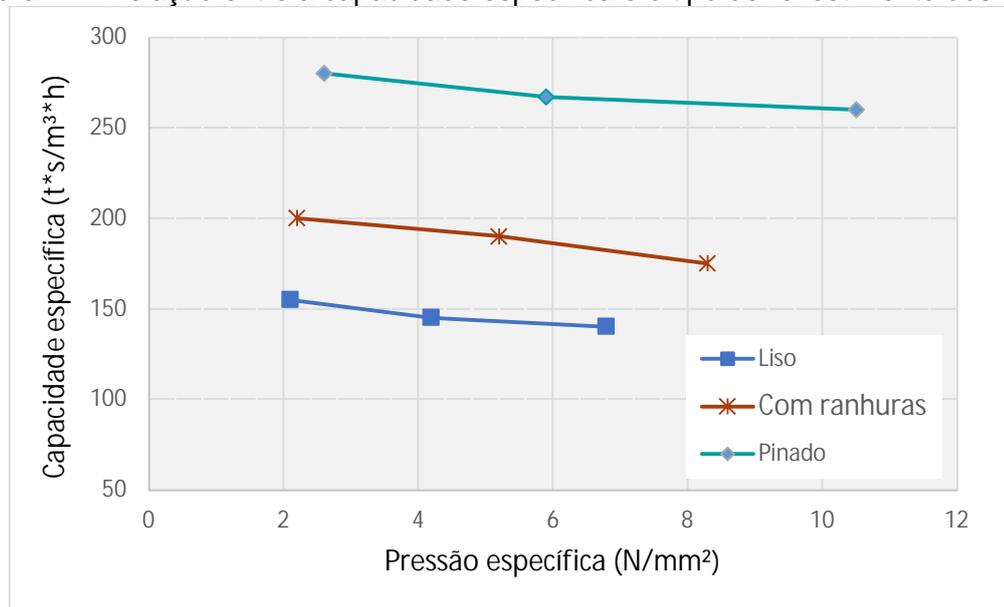
Fonte: Oliveira, 2015; Klymowsky, 2006. Adaptado pelo autor.

Klymowsky et al. (2006) destacam que o fator de maior influência na capacidade específica de HPGR é o tipo de superfície dos rolos. Os rolos pinados apresentam capacidades de 50 a 100% maiores do que rolos lisos ou com ranhuras.

Fatores como o tipo de revestimento dos rolos, as condições e distribuição granulométrica de alimentação, a densidade e a resistência à compressão do minério, exercem elevada influência na vazão mássica específica da prensa. Enquanto a capacidade específica é influenciada moderadamente pela velocidade dos rolos e pela umidade do minério, esse parâmetro apresenta uma fraca relação com a pressão específica de moagem e a razão L/D (KLYMOWSKY et al., 2002).

A Figura 14 apresenta a relação entre a capacidade específica e o tipo de revestimento dos rolos.

Figura 14 - Relação entre a capacidade específica e o tipo de revestimento dos rolos.



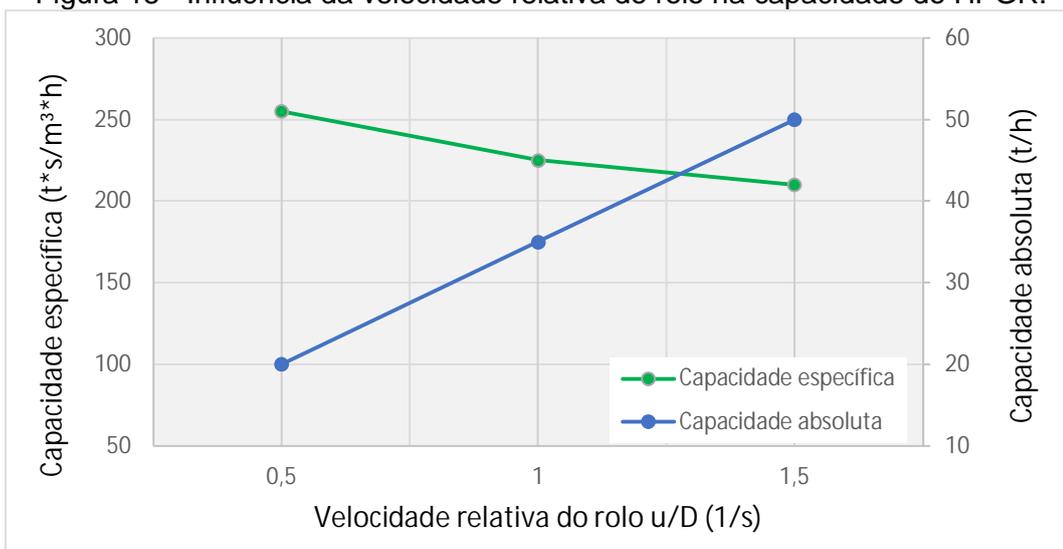
Fonte: Klymowsky et al., 2002. Modificado pelo autor.

Observa-se que a variação da pressão específica de operação tem influência baixa na capacidade do HPGR, com exceção de alimentações finas e úmidas, como é o caso de concentrado de minério de ferro (KLYMOWSKIY, 2006).

A velocidade de rotação dos rolos influencia moderadamente a capacidade do HPGR, uma vez que a capacidade absoluta (vazão mássica) aumenta linearmente com elevação da velocidade relativa (u/D), apesar de a capacidade específica (vazão mássica específica) ser reduzida nas mesmas condições (KLYMOWSKIY, 2006; OLIVEIRA, 2015).

No entanto, destaque-se que o aumento da vazão mássica não é proporcional ao aumento da velocidade dos rolos (OLIVEIRA, 2015; PEDROSA, 2019; KLYMOWSKY et al., 2002; VAN DER MEER, 2018). A Figura 15 ilustra a influência da velocidade relativa do rolo na capacidade do HPGR.

Figura 15 - Influência da velocidade relativa do rolo na capacidade do HPGR.

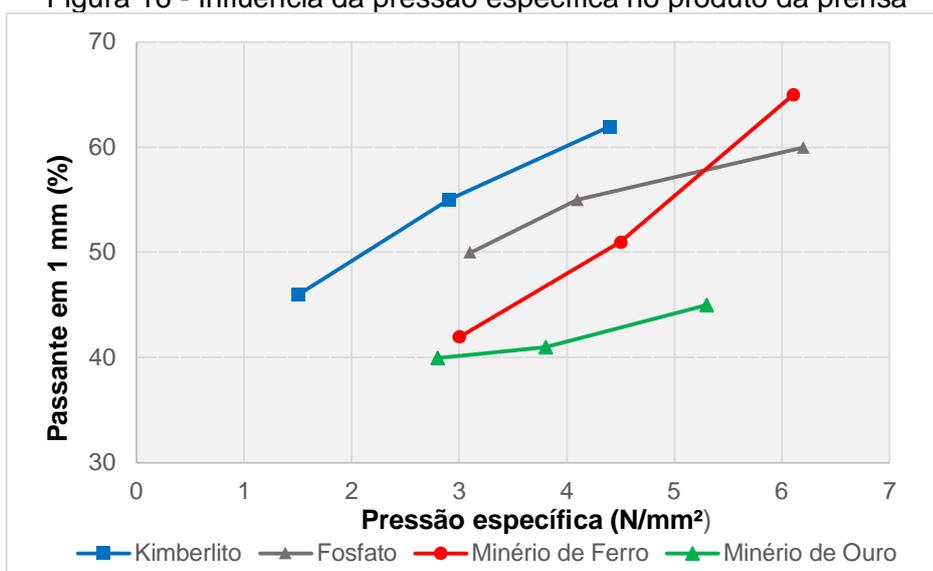


Fonte: Klymowsky et al., 2002. Modificado pelo autor.

3.2.4.2 Parâmetros que influenciam a granulometria do produto

As propriedades do minério e as condições operacionais do equipamento são fatores que definem diretamente na granulometria do produto. Schönert (1985) destaca a importância da força específica de moagem na redução de tamanho. A Figura 16 ilustra a influência da pressão específica de moagem na granulometria do produto para diferentes tipos de minérios.

Figura 16 - Influência da pressão específica no produto da prensa



Fonte: Klymowsky et al., (2006). Modificado pelo autor.

Oliveira (2015) classifica como alto grau de influência na distribuição granulométrica do produto parâmetros como: pressão específica, abertura operacional, relação entre material na zona central de borda/*by-pass* do rolo, *top size* da alimentação e granulometria da alimentação, além das propriedades do minério.

Segundo Oliveira (2015), Klymowsky et al., (2002) e Pedrosa (2019), enquanto a pressão específica influencia significativamente a geração de material fino, a abertura operacional causa maior impacto na fração mais grossa do produto. Isso se justifica pelo mecanismo de quebra de partículas individuais presentes na zona de pré-britagem e de efeito de bordas.

A maior partícula encontrada no produto pode apresentar a dimensão da abertura operacional (caso a alimentação seja mais grosseira que a abertura operacional) ou o tamanho da maior partícula contida na alimentação (caso a alimentação seja mais fina que a abertura operacional) (OLIVEIRA, 2015).

Diferentes autores destacam que a força específica de cominuição influencia a granulometria do produto até um certo limite, a partir do qual não se observa qualquer ganho na redução de tamanho com um aumento da energia aplicada (SCHONERT, 1988; PEDROSA, 2019). Segundo Tondo (1997), há um ponto de saturação de energia, que representa a máxima quantidade de energia que pode ser efetivamente aplicada na fragmentação de partículas.

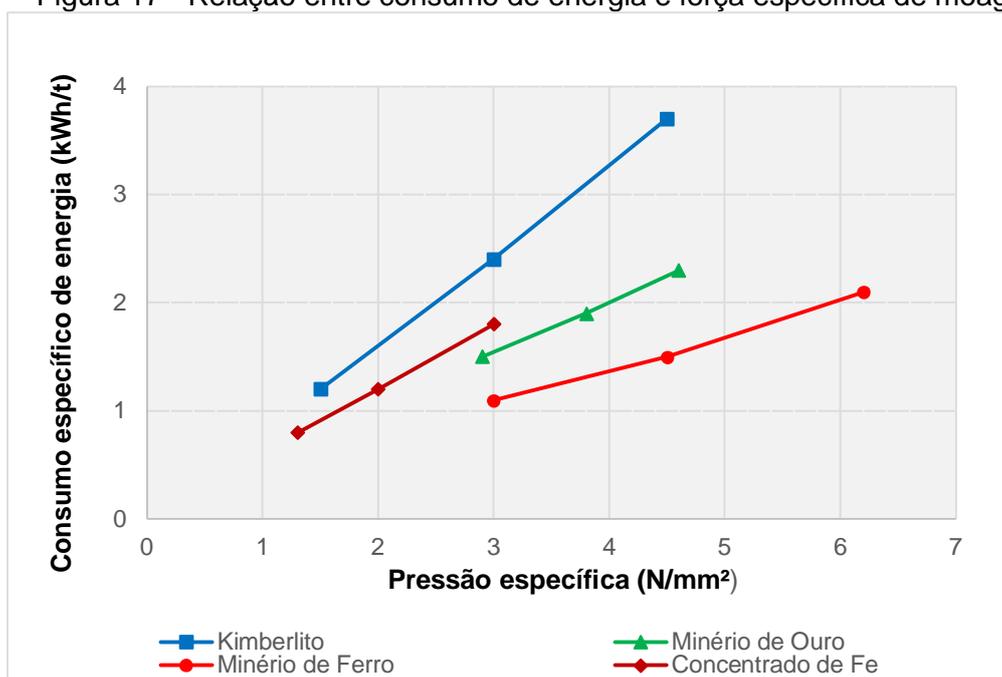
Daniel (2002) destaca que compreender esse ponto de saturação de energia, permite definir a melhor condição de operação que promova os maiores ganhos de redução de tamanho com um consumo mínimo de energia.

3.2.4.3 Parâmetros que influenciam o consumo específico de energia

Compreender o consumo específico de energia de cominuição é de grande importância para dimensionamento e avaliação de desempenho do equipamento.

Klymowsky et al., (2002) apresentam uma relação entre o consumo específico de energia e a força específica de moagem para diferentes tipos de minérios, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Relação entre consumo de energia e força específica de moagem



Fonte: Klymowsky et al., (2002). Modificado pelo autor.

3.2.5 HRC™HPGR

3.2.5.1 Conceitos e características de projeto do HRC™ HPGR

Historicamente destacaram-se alguns grandes fornecedores de prensa de rolos industriais: Metso, KHD Humboldt Wedag International (Weir), Koppern (Outotec), FLSmidth A/S, Thyssenkrupp, CITIC e Polysius (OLIVEIRA, 2015). Em 2020 a Metso e a Outotec se fundiram e tornaram-se uma única empresa denominada recentemente como Metso.

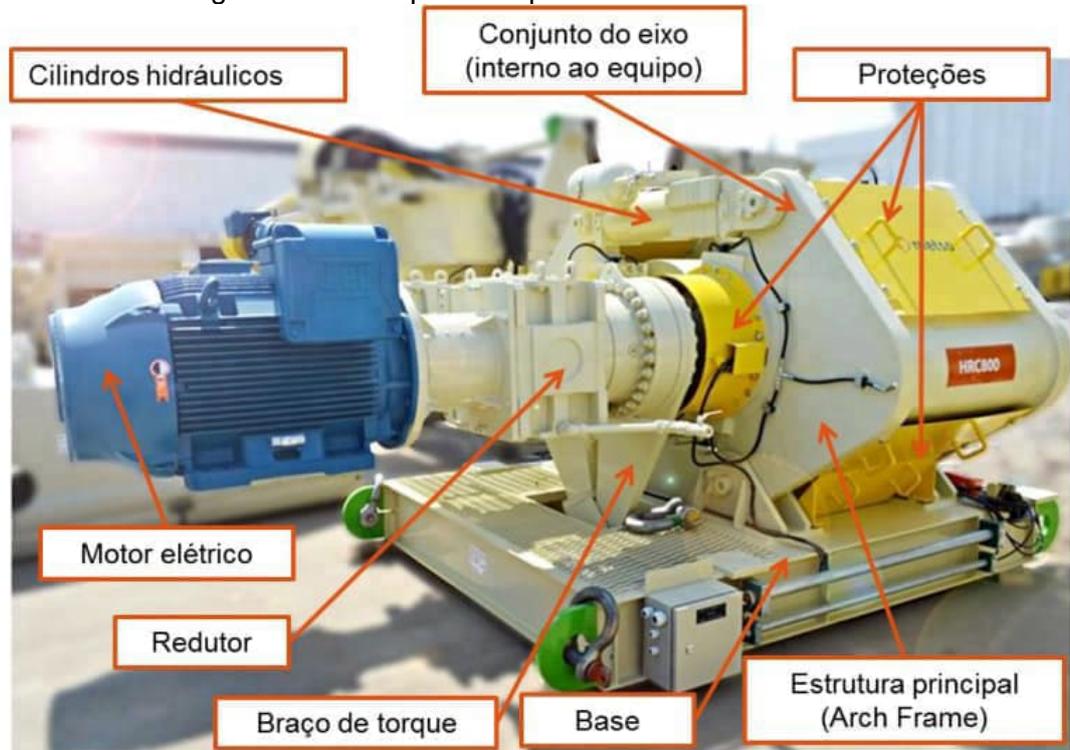
Desde a primeira produção comercial do HPGR em 1985 até meados da década de 2000, os projetos desenvolvidos pelos diferentes fabricantes eram relativamente similares, basicamente com alterações na relação L/D. O desenvolvimento era restrito às características dos rolos (PEDROSA, 2019). Porém na década de 2010, a Metso desenvolveu um novo conceito de HPGR, denominado HRC™, que trouxe importante inovações, que são inclusive, patenteadas (OLIVEIRA, 2015; PEDROSA, 2019).

Pedrosa (2019), descreve as inovações dos HRC™ da Metso:

- *Arch frame*: estrutura em arco, caracterizada por um mecanismo de conexão entre os mancais através de um tubo de torção. Esta particularidade mantém o alinhamento dos rolos e, conseqüentemente, minimiza as paradas pelo desalinhamento destes componentes;
- Posicionamento dos pistões hidráulicos acima da região onde estão instalados os rolos. Conforme descrito anteriormente, esta particularidade, juntamente com a estrutura *Arch frame* impacta positivamente no projeto do sistema hidráulico de pressão, uma vez que implica na redução do tamanho e do número de cilindros hidráulicos;
- Flanges instalados nas extremidades do rolo fixo, que melhoram a distribuição da pressão ao longo do rolo, reduzindo assim o efeito de bordas.

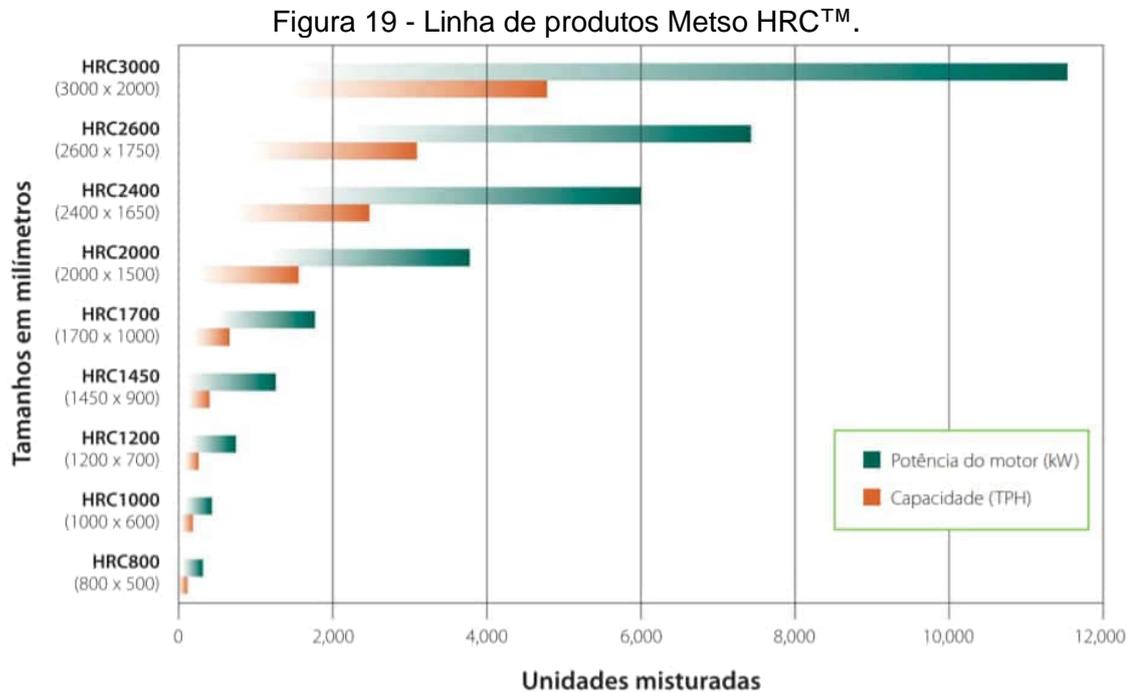
A Figura 18 apresenta os principais componentes do HRC™.

Figura 18 - Principais componentes do HRC™



Fonte: Oliveira (2015).

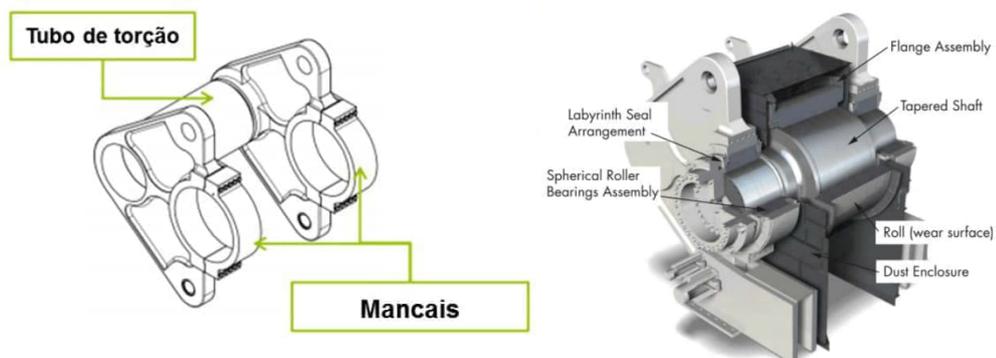
A Metso denomina a sua linha de produtos de prensa de rolos como “HRC™”. Conforme Oliveira (2015), o HRC™ é comercializado em diferentes tamanhos, com denominações que se referem ao diâmetro dos respectivos rolos (OLIVEIRA, 2015), conforme mostra a Figura 19.



Fonte: Metso (2020).

A estrutura *arch frame* é patenteada e os principais componentes são: base, carcaça lateral, tudo de torção e mancais, conforme mostram as Figura 20 e Figura 21 (OLIVEIRA, 2015; ROBERT et al., 2019).

Figura 20 - Representação da estrutura *Arch Frame*. Imagem à esquerda, estrutura simplificada. Imagem à direita, estrutura detalhada.



Fonte: Imagem à esquerda, Oliveira (2015). Imagem à direita, Robert et al., (2019).

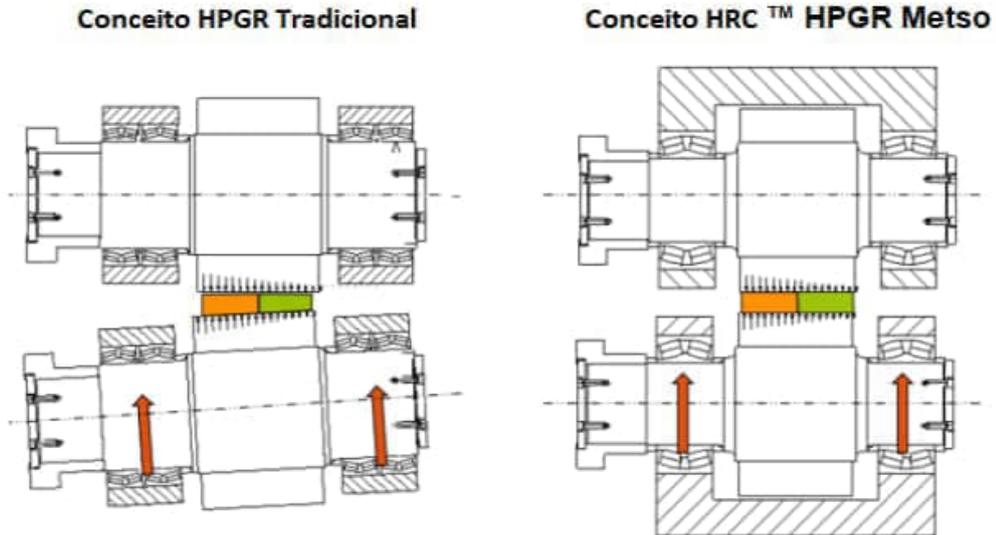
Figura 21 - Rolo sendo montado na estrutura *Arch Frame*.



Fonte: Acervo do autor. Cedido pela Metso (2020).

A partir dos componentes do *arch frame*, o equipamento da Metso mantém uma abertura operacional mais uniforme por toda a largura dos rolos, mesmo com uma alimentação não uniforme ao longo da largura dos rolos. Dessa forma, a reação à abertura de um dos lados resulta no alinhamento do lado oposto. A torção exercida pela camada de partícula no equipamento é absorvida pela base, em função do ponto de pivotamento entre o *arch frame* e base, sendo, o restante absorvido pelos cilindros hidráulicos, em decorrência do aumento da pressão (OLIVEIRA, 2015; ROBERT et al., 2019). A Figura 22 compara um HPGR tradicional e o HRC™ em situação de *skewing*.

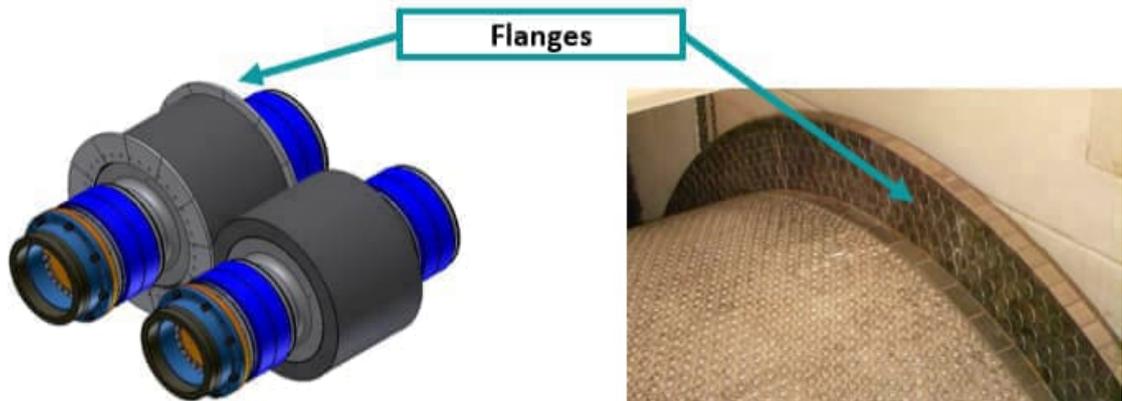
Figura 22 - Diferenças entre um HPGR tradicional e o HRC™.



Fonte: Knorr et al.; (2013) e Oliveira (2015).

Robert (2019) et al., destacam que a presença do *Arch Frame* minimiza o tempo de parada causado pelo efeito de desalinhamento dos rolos. Além disso, a abertura uniforme entre os rolos possibilita que os flanges sejam instalados que, ao rotacionarem junto com o rolo fixo, minimizam a passagem do minério pelas bordas, consequentemente as paradas por desgaste e melhoram a distribuição de forças ao longo da largura do rolo (OLIVEIRA, 2015). A Figura 23 apresenta o uso dos flanges nos rolos do HPGR da Metso.

Figura 23 - Uso dos flanges no projeto de prensas da Metso.

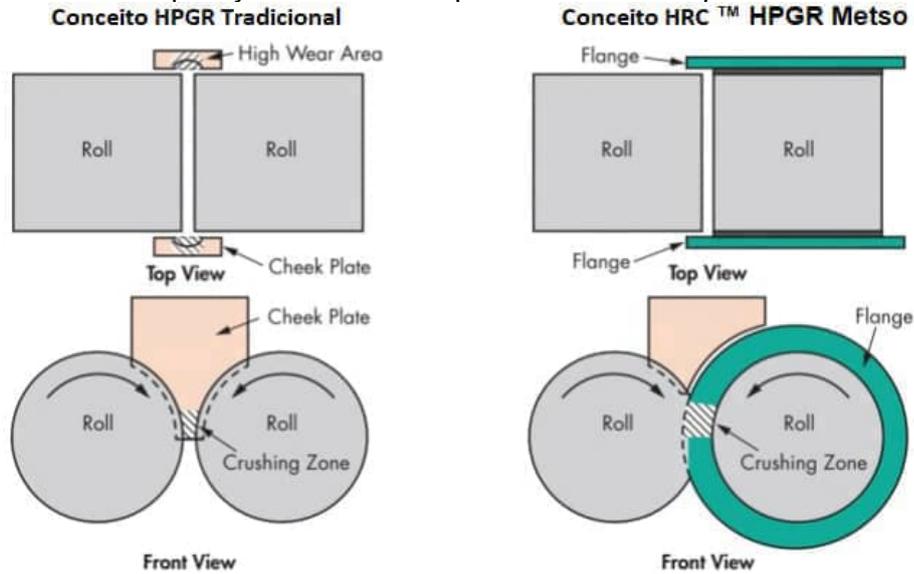


Fonte: Knorr et al., 2015. Modificado pelo autor.

A instalação dos flanges só é possível em equipamentos que garantam a abertura uniforme dos rolos pois, caso contrário, quando ocorresse um desalinhamento, os flanges se chocariam com o rolo à sua frente e ficariam danificados (OLIVEIRA, 2019).

A Figura 24 ilustra uma comparação entre o HPGR com o uso de *cheek plates* e o uso dos flanges.

Figura 24 - Comparação entre HPGR prensa com *cheek plate* e com flanges.

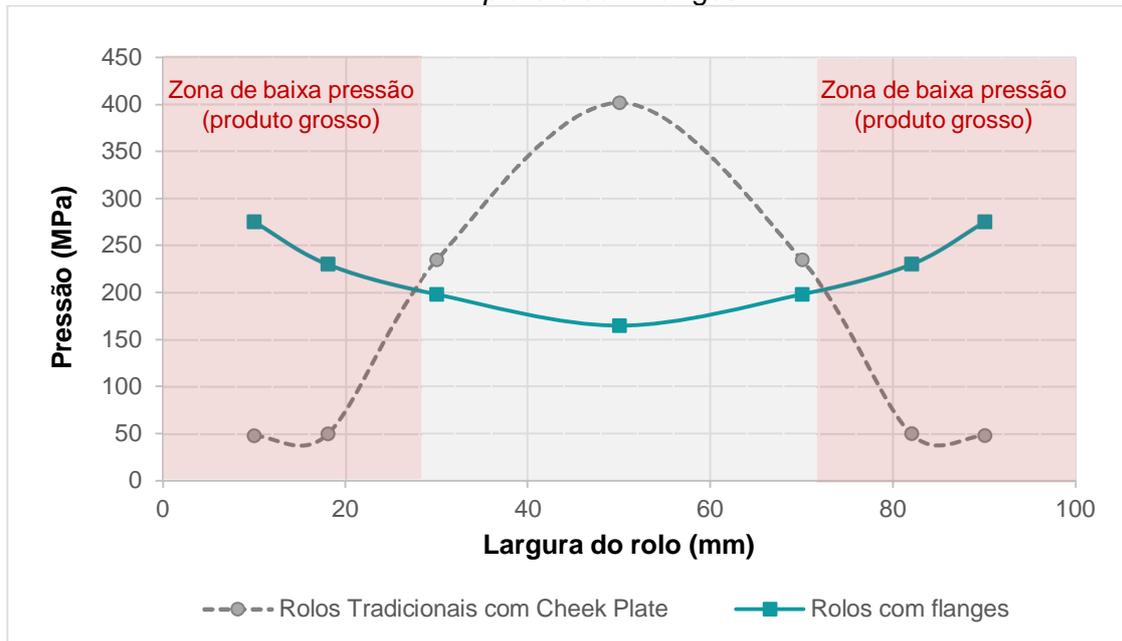


Fonte: Knorr et al., (2013). Modificado pelo autor.

Conforme Herman (2013) observou em seus estudos, ao operar com os *cheek plates* tradicionais, a pressão nas bordas era muito menor que a pressão no centro. Isso corresponde à região do rolo que geralmente gera um produto mais grosso. Por outro lado, quando os flanges foram instalados, foi observada uma pressão muito mais consistente em toda a largura do rolo, indicando que a largura total do rolo é utilizada para a cominuição.

A Figura 25 ilustra um comparativo entre as distribuições de pressão ao longo do rolo para um equipamento dotado de *cheek plates* e um equipamento com flanges.

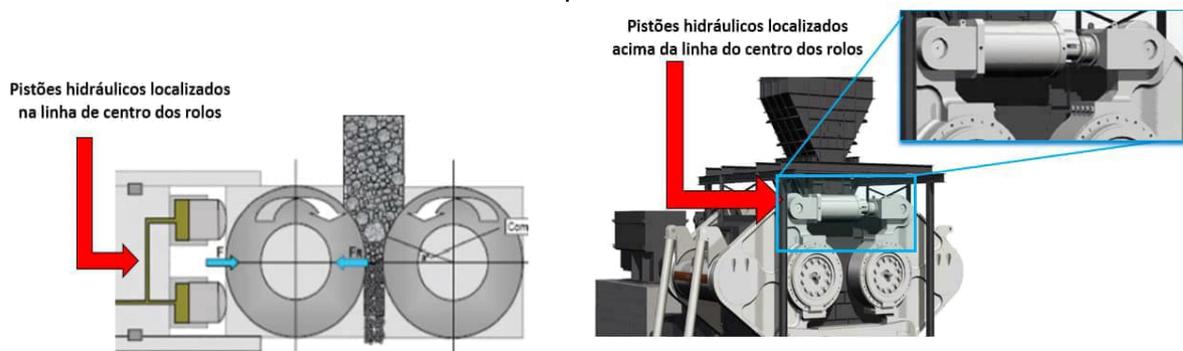
Figura 25 - Comparação da distribuição da pressão ao longo do rolo para HPGR com *cheek plate* e com flanges.



Fonte: Herman et al., (2013). Modificado pelo autor.

No equipamento da Metso, os cilindros hidráulicos são localizados acima da linha de centro dos rolos. Devido a sua posição, a força exercida pelos pistões é metade da força de compressão exercida na zona de britagem pela função de braço de forma que a estrutura principal exerce, enquanto nas demais prensas, a força dos pistões é igual a força de compressão (OLIVEIRA, 2015). Segundo Robert et al., (2019), essa ideia foi baseada no conceito de como um quebrador de nozes usa uma alavanca mecânica para multiplicar forças. A Figura 26 ilustra a diferença entre o esquema tradicional e o sistema hidráulico criado pela Metso.

Figura 26 - Posicionamento do sistema hidráulico de pressão: sistema tradicional e sistema criado pela Metso.



Fonte: Morley (2006a); Metso (2020). Modificado pelo autor.

Recentemente a Metso atualizou sua linha de produtos HRC™ para as prensas com rolos de mais de 1200 mm de diâmetro, conforme mostra a Figura 27. Essa nova linha de produtos denomina-se HRC™e. Apesar de algumas alterações no projeto em relação às prensas anteriormente comercializadas, o conceito do uso de flanges e o sistema *Arch Frame* permanecem nessa nova linha de produtos. Segundo esse fornecedor, um dos objetivos dessa nova linha é proporcionar um equipamento com operação e manutenção mais simplificadas, além da redução dos custos para instalação (METSO, 2022).

Figura 27 - HPGR Metso linha HRC™e



Fonte: Cedido pela Metso.

3.2.5.2 Uso do HRC™ HPGR na área de Agregados e minerais industriais

Através da redução dos custos de fabricação das prensas e devido à uma característica de projeto capaz de minimizar os problemas operacionais causados pelo desalinhamento dos rolos, a Metso desenvolveu a aplicação da prensa de rolos para o mercado de agregados.

Pedrosa (2019) destaca a importante contribuição desse fornecedor com a difusão do HRC™ em operações de menor porte e na cominuição de minérios e materiais de baixo valor agregado. Esse mesmo autor pontua que este fabricante, ao identificar um potencial de utilização do HPGR no setor de minerais industriais, rapidamente

desenvolveu uma linha específica para atender este segmento, denominada de HRC™ *Aggregates*.

Conforme Pedrosa (2019) indica, inicialmente o modelo Metso HRC™800 foi aplicado em diversos circuitos de cominuição de agregados para construção civil, cerâmica e agromineral. Em seguida, desenvolveu-se um equipamento de baixo custo, o HRC™ 8, que é ainda mais atrativo do que o HRC™800 para as aplicações em circuitos de cominuição de minérios e materiais de baixo valor agregado. A Figura 28 ilustra os HPGR da Metso dedicados para o mercado de agregados, enquanto a Tabela 5 apresenta informações técnicas sobre os modelos de prensa da Metso utilizadas nesse segmento.

Figura 28 - Metso HRC™ HPGR para a aplicação em agregados.



Fonte: Metso (2020) e Metso (2023). Adaptado pelo autor.

Tabela 5 - Modelos de prensas Metso utilizadas no mercado de agregados.

Modelo do equipamento	HRC™800	HRC™8
Peso da máquina (t)	16	11
Potência instalada (hp)	2 x 150	2 x 100
Diâmetro e comprimento dos rolos - D x L (mm)	800 x 500	800 x 500
Limite de força de específica de moagem (N/mm ²)	4,5	2,5
Velocidade nominal com 60 Hz de frequência (rpm)	32	32
Velocidade nominal periférica dos rolos (m/s)	1,21	1,21
Vazão mássica nominal para minério com densidade de 1,5 t/m ³ (t/h)	100	100
Limite de top size de alimentação (mm)	32	32
Limite de desgaste do diâmetro do rolo (mm)	680	680
Dimensões externas - comprimento x largura x altura	2,6 x 4,3 x 2,5	2,4 x 3,5 x 1,6

Fonte: Pedrosa (2019) e Almeida et. al., 2023.

Pedrosa (2019) resume as principais diferenças entre o HRC™ 8 em relação ao modelo HRC™ 800:

- Menor peso;
- Menor potência instalada;
- Menor limite máximo de força específica de moagem
- Menores dimensões externas;
- Menor custo dos componentes mecânicos;
- Menor custo de investimento (representa 30 a 35% do custo do HRC™ 800).

Tais características de projeto resultaram em uma redução considerável de custos de fabricação no modelo HRC™ 8, tornando esse equipamento mais atrativo e viável para as indústrias com investimentos mais modestos.

Desde o lançamento em 2011 da primeira unidade comercial do HRC™, a Metso vem aplicando na indústria de minerais industriais os modelos HRC™ 800 e HRC™ 8 para diferentes fins comerciais e condições de materiais. Destaca-se aplicações comerciais para areia manufaturada, corretivo agrícola, finos para cerâmica e brita (Pedrosa, 2019).

Pedrosa (2019) ressalta também que diante das diferentes aplicações e crescente demanda por utilização desse equipamento em segmentos com investimentos mais modestos, demonstra a quebra do paradigma de que HPGR, devido ao seu elevado custo, é restrito a empreendimentos de grande porte.

3.3 PROCESSO PRODUTIVO DE AREIA DA MINERAÇÃO ITAQUAREIA

O Grupo Itaquareia é uma empresa atuante na indústria de produção de agregados e mineração. O escritório principal da empresa está localizado no município de Itaquaquecetuba, SP, contando com cerca de 500 colaboradores nas diferentes unidades. O grupo atua na área de construção civil, fornecendo produtos como: areia, pedra, asfalto, cimento, concreto e argamassa (ITAQUAREIA, 2022).

A Mineração Itaquareia é uma das empresas pertencentes ao grupo, e através de diferentes filiais de Itaquaquecetuba, Bofete, Mogi das Cruzes, Guararema e Suzano, dedica-se a extração e produção de areia diferentes tipos, além da produção de agregados para a construção civil.

A Mineração Itaquareia da unidade de Mogi das Cruzes, que é dedicada à lavra e beneficiamento para produção de areia.

A lavra é realizada a céu aberto, através de desmonte por meio de jatos hidráulicos, contando muitas vezes com suporte de uma pá carregadeira para manuseio do material. Esse material é acumulado em uma pequena bacia de decantação, a partir da qual a polpa é transportada para a usina industrial de beneficiamento por meio de bombas centrífugas.

Figura 29 - Cava da Mineração Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Na usina, a polpa flui para uma peneira estática dotada de tela com abertura de 15 mm. Além do material grosseiro, essa peneira tem a função de impedir que materiais orgânicos maiores que 15 mm sejam enviados para as próximas etapas do processo.

O material retido em 15 mm é acumulado próximo da peneira e utilizado para pavimentação das vias de acesso da unidade. Já o material passante pela peneira é depositado em um grande tanque de armazenamento. A Figura 30 ilustra a peneira estática instalada no circuito da Itaquareia.

Figura 30 - Peneira Estática.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

O material contido no tanque é bombeado para uma peneira vibratória dotada de três *decks*, com aberturas de 7 mm, 3 mm e 1,5 mm, que assim separa os produtos em diferentes frações granulométricas. As massas retidas nos diferentes *decks* são consideradas produtos e são armazenadas em silos de recepção, onde os sólidos sedimentam naturalmente. A Figura 31 ilustra a peneira vibratória da Mineração Itaquareia.

Figura 31 - Peneira Vibratória da Mineração Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

As polpas excedentes dos silos, assim como a polpa oriunda do *undersize* do último *deck* da peneira vibratória são retornadas para o tanque de armazenamento, para posterior reaproveitamento no processo.

Os produtos armazenados nos silos são enviados para pilhas de estoque em caminhões, para posterior envio aos clientes.

Em função da faixa granulométrica, os produtos retidos em cada *deck* da peneira vibratória são assim denominados:

- Pedrisco Grosso (-15 + 7 mm)
- Pedrisco Fino (-7 + 3,5 mm)
- Areia Grossa (- 3,5 + 1,5 mm)
- Areia Média (- 1,5 mm)

A Figura 32 ilustra o silo de armazenamento e carregamento do caminhão com um dos produtos finais.

Figura 32: Silo de armazenamento e caminhão sendo carregado com um dos produtos finais.



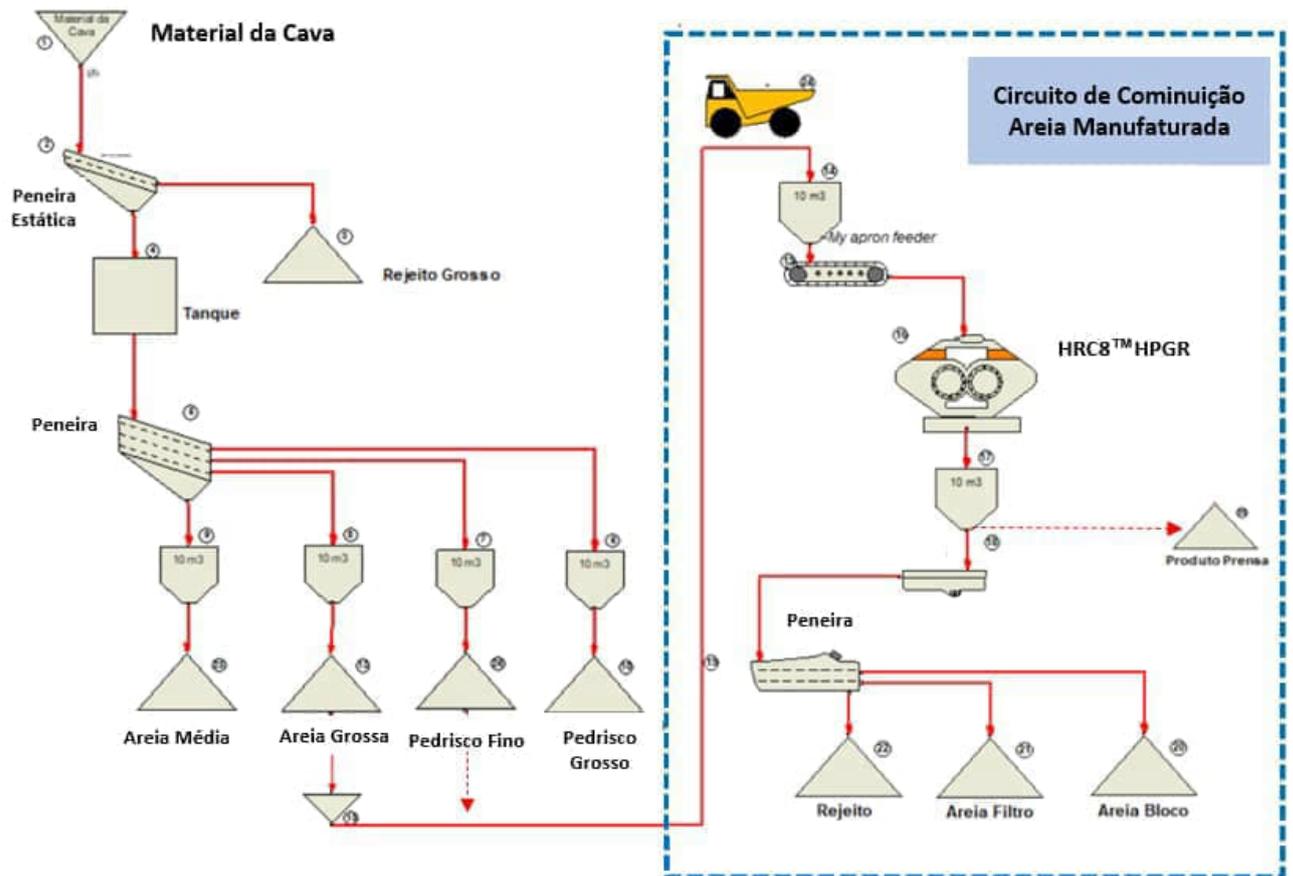
Fonte: Arquivo pessoal do autor.

No passado, todos esses produtos eram comumente considerados pela Itaquareia como produtos finais. Porém, em função de uma baixa demanda de mercado, o produto “Areia Grossa” foi sendo acumulado na unidade ao longo dos anos, tornando a “Areia Grossa” um passivo para essa operação. Tal situação somente foi revertida quando esse material começou a ser processado no circuito HPGR e seu produto vendido como areia especial.

A etapa de cominuição da “Areia Grossa” no circuito HPGR se inicia com carregamento do material de um silo, cujo produto alimenta a prensa de rolos de alta pressão, que opera em circuito aberto, cujo produto segue para um novo silo de armazenamento. Há a possibilidade do produto tal qual da prensa ser comercializado. Para isso, é necessário usar um acesso localizado abaixo do silo de produto que permite direcionar esse material diretamente para a caçamba de um caminhão.

Caso não seja comercializado diretamente, o produto da prensa armazenado no silo é enviado para uma peneira de lavagem de dois decks que separa o material em duas novas frações granulométricas. O material retido no primeiro deck (+1,18 mm) é direcionado para uma pilha denominada “Areia Bloco”, enquanto que o material retido no segundo deck (-1,18 mm + 0,600 mm) é enviado para uma pilha denominada “Areia filtro”. Já o *undersize* dessa peneira (- 0,600 mm) é considerado rejeito, porém esse material pode ser enviado ao tanque de armazenamento, para posterior recirculação no processo de beneficiamento. A Figura 33 apresenta o fluxograma geral do processo da Itaquareia.

Figura 33 - Fluxograma Geral do Processo – Itaquareia Unidade de Mogi das Cruzes



Fonte: Elaborado pelo autor.

O “Produto Prensa” e “Areia Filtro” são comercializados como produtos especiais, pois segundo a Itaquareia, esses produtos possuem boa limpeza, boa graduação, constância na curva granulométrica, quantidade de finos controlada, entre outras características que valorizam esse produto perante o mercado consumidor. O “Produto Prensa” é comercializado para aplicações diversas na construção civil. Já o produto “Areia Filtro”, é utilizado como areia filtrante para filtros e demais aplicações nesse segmento. Já a “Areia Bloco” está sendo introduzido no mercado para aplicações na fabricação de blocos e demais produtos utilizados na construção civil. A Figura 34 e a Figura 35 apresentam imagens do circuito de cominuição da Itaquareia, assim como o HPGR instalado nesse circuito.

Figura 34 - Circuito de cominuição - Unidade de Mogi das Cruzes.



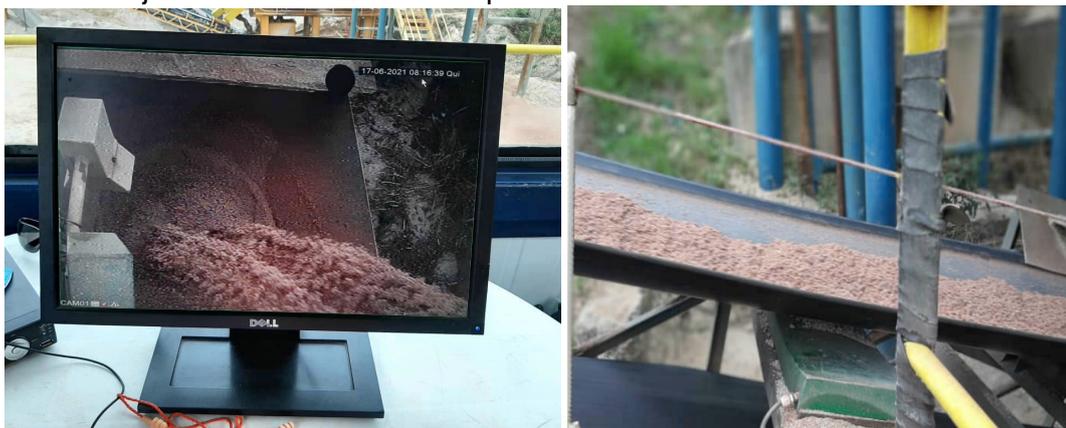
Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Figura 35 - Equipamento Metso HRC™8 instalado no circuito de cominuição da Itaquareia - Unidade de Mogi das Cruzes.



A usina de cominuição da Itaquareia de Mogi das Cruzes conta com dois dispositivos de suporte à operação do HPGR: detector de metal e conjunto sensor-câmera, ambos instalados no fluxo de alimentação da prensa. A Figura 32 ilustra esses dispositivos em operação.

Figura 36 - Conjunto sensor-câmera à esquerda e à direita detector de metais.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

O detector de metais tem como principal função prevenir que contaminações metálicas sejam enviadas indevidamente para o HRC™, o que poderia danificar os rolos e demais componentes do equipamento. Quando o detector de metal identifica algum componente metálico no transportador de correia que alimenta a prensa, essa correia é parada automaticamente e o operador retira manualmente esse material. A câmera permite que o operador visualize em tempo real as condições do chute que alimenta a prensa.

Já o sensor de nível identifica o nível do chute de alimentação, bem como atua automaticamente no alimentador para que o mesmo mantenha um fluxo que permita o chute estar continuamente cheio.

A interface de automação para operação do HRC™ é bastante simples e de grande utilidade para os operadores. Essa interface é apresentada em uma tela sensível ao toque, localizada na sala de operação, sendo possível operar e acompanhar parâmetros de processo e manutenção em uma única tela.

Além dos comandos básicos do equipamento, é possível através dessa interface controlar a pressão específica do equipamento, velocidades dos rolos e velocidade do alimentador que alimenta a prensa. Além disso, é possível monitorar dados como potência dos motores, temperatura do óleo lubrificante, nível do silo de alimentação, etc. A Figura 37 apresenta uma foto da interface de operação do HRC™ da Itaquareia.

Figura 37 - Interface de operação do HRC™ da Mineração Itaquareia – Unidade de Mogi das Cruzes.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Em suma, essa interface permite ao operador configurar as condições de operação do equipamento em função das características do material alimentado e das necessidades de produção.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.4.1 Prensa de bancada D1000

A Metso possui atualmente, nas dependências de seus laboratórios em Sorocaba, SP, uma prensa de bancada denominada D1000, dotada de flanges laterais. Conforme Pedrosa (2019) destaca, a prensa de bancada da Metso foi projetada para execução de ensaios em escala de bancada quando a disponibilidade de amostra é limitada. Este equipamento permite a obtenção da granulometria do produto, simulando a operação de ¼ de volta de uma unidade industrial com diâmetro de rolo de 1 m.

O fato da prensa de bancada D1000 representar o funcionamento de um equipamento com rolos de 1 m de diâmetro é um aspecto extremamente positivo, uma vez que essas dimensões se aproximam das dimensões de unidades industriais. A Figura 38 apresenta fotos da prensa de bancada Metso D1000.

Figura 38 - Prensa de bancada Metso D1000.



Fonte: Pedrosa (2019). Adaptado pelo autor.

A massa de amostra para os ensaios realizados na prensa de bancadas D1000 varia em função da densidade aparente e da granulometria do material. Para cada ensaio é utilizada uma quantidade de massa suficiente para preencher o volume ocupado entre as seções cilíndricas que representam os rolos (PEDROSA, 2019). A quantidade de amostra necessária para o teste está geralmente entre 7 e 10 kg.

A Metso utiliza uma abordagem própria para interpretar os resultados do D1000, uma vez que se trata de um ensaio de bancada e realizado em condições controladas de operação.

Pedrosa (2019) menciona que um outro aspecto positivo do D1000 é que ele minimiza o efeito da variação da granulometria de alimentação no escalonamento, caso este seja baseado no banco de dados da Metso. Isso se deve ao fato das superfícies que representam os rolos possuírem um diâmetro relativamente compatível com os das unidades industriais. Portanto, dado a relação entre o diâmetro dos rolos e o máximo *top size* de alimentação, tais valores podem se aproximar de valores operacionais próximos de uma aplicação industrial.

A Metso possui diferentes ensaios com o objetivo de levantar parâmetros chave de operação de um HPGR. Nas mesmas instalações da unidade de Sorocaba, SP há também um HPGR piloto denominado HRC™300, que consiste em uma prensa piloto com 300 mm de diâmetro. É possível obter no teste piloto, resultados como vazão mássica específica, energia específica e granulometria do produto (PEDROSA, 2019).

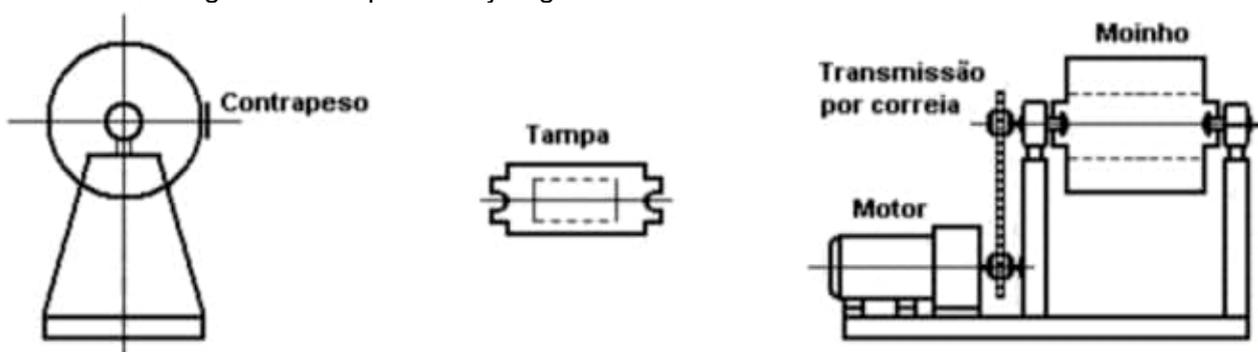
3.4.2 *Wi de Bond*

O teste para determinação do *Work Index* de moinho de bolas – *Wi* foi criado por Bond (BOND, 1961), sendo largamente empregado para mensurar a moabilidade de minérios. Segundo Bond, o *Wi* corresponde à energia total, expressa em kWh por tonelada curta (907 kg), necessária para reduzir o minério, desde um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em uma malha determinada (BOND, 1961).

O *Wi* corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/t) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria, além de ser um parâmetro importante para o dimensionamento de moinhos de bolas (HERBST et al., 2003).

Para o ensaio de *Wi* utiliza-se um moinho de bolas com diâmetro e comprimento iguais a 12”, conforme mostram os desenhos da Figura 39. A velocidade de rotação do moinho deve ser de 70 rpm e a carga moedora padronizada composta de 285 bolas de aço, pesando 20,125 kg. A moagem é conduzida em bateladas, a seco, em ciclos de moagem e peneiramento, com retorno ao moinho da fração retida e recomposição da massa da carga com a alimentação nova. Os ciclos são repetidos até que a carga circulante atinja e se estabilize 250% (BOND, 1961).

Figura 39 - Representação gráfica do moinho utilizado nos testes.



Fonte: Barbato e Sampaio (2007). Modificado pelo autor.

A Figura 40 ilustra um exemplo de moinho utilizado no teste de Bond.

Figura 40 - Moinho tipicamente usados no teste de Wi de Bond.



Fonte: Almeida et al., (2018).

O Wi de moagem em moinho de bolas é calculado usando-se a equação 5:

$$BWi = \frac{44,5}{A m^{0,28} \cdot M o b^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} \frac{10}{\sqrt{F}}\right)} \cdot 1,102 \quad (5)$$

Onde:

BWi: é o Wi para moinho de bolas (kWh/t)

Am: é a abertura da malha do ensaio - malha teste (μm)

Mob: é a média dos últimos três valores de gramas por revolução no estado de equilíbrio (g/rev)

P: é a abertura da peneira pela qual passam 80% da massa do produto (μm)

F: abertura da peneira pela qual passam 80% da massa da alimentação (μm)

1,102: fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica

3.4.3 Índice de abrasão de Bond

Bond criou também um teste para determinação do assim denominado Índice de Abrasão – Ai (BOND, 1961). O Ai é usualmente utilizado para estimar o desgaste de revestimentos, corpos moedores, e demais elementos de desgaste, em função da energia consumida considerando diferentes condições operacionais. Para possibilitar o uso prático do Ai, Bond conduziu estudos de desgaste de peças como: mandíbulas, mantos, bolas, barras, e revestimentos de moinhos (METSO, 2005; ALMEIDA, 2018).

O ensaio padrão é conduzido em um tambor com 12” de diâmetro e 4,5” de profundidade, o qual contém um rotor concêntrico em seu interior, de 4,5” de diâmetro. Uma placa de aço com dureza de 500 Brinell e dimensões de 3” de comprimento, 1” de largura e 0,25” de espessura, é fixada no rotor. A Figura 41 ilustra a placa utilizada no teste de abrasão de Bond.

Figura 41: Exemplo de placa utilizada no teste de Abrasão de Bond



Fonte: Almeida et al., (2018).

O ensaio consiste em introduzir 400 g de amostra com granulometria entre $\frac{3}{4}$ ” e $\frac{1}{2}$ ” e girar o tambor girar por 15 minutos a 70 rpm. Após essa etapa, esse processo é repetido por 4 vezes. A diferença de massa da placa metálica antes e depois do ensaio é numericamente igual ao Ai (BOND, 1961; PERES E BERGERMAN, 2017).

3.4.4 LCPC

O ensaio LCPC desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* na França é uma alternativa ao ensaio de abrasão de Bond. O ensaio é também denominado de *Macon*, sendo padronizado pela norma francesa NFP18-579 (1990) (GUZMÁN E BERGERMAN, 2019).

O material empregado no teste, com granulometria entre 6,3 mm e 4,0 mm e massa de 500 g, é inserido em um recipiente com a placa de desgaste fixa a um rotor, mantido a 4.500 rpm por 5 minutos. Após este período, a massa de material é retirada, peneirada para análise da geração de finos e a placa pesada. A placa utilizada no ensaio fica fixada no eixo vertical do rotor e deve ser de aço C1015 com dureza Rockwell de B 60-75 (THURO et. al., 2007). A placa é pesada antes e após o ensaio, sendo o índice de abrasividade do material calculado pela equação 7:

$$LAC = (m_0 - m_j) / M \quad (7)$$

Onde:

LAC: Índice de abrasividade (g/t);

m_0 : massa da placa antes do ensaio (g);

m_j : massa da placa após do ensaio (g);

M: massa da amostra (t)

O coeficiente de britabilidade do material (LBC) é definido conforme a equação 8 (THURO et. al., 2007).

$$LBC = \frac{M_{1,6}}{M} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

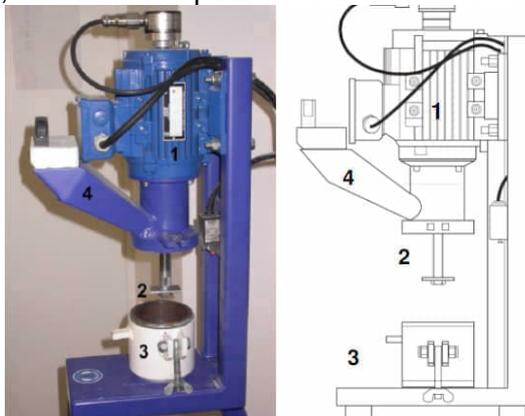
LBC: Índice de Britabilidade (%)

$M_{1,6}$: Massa do produto passante na malha de 1,6 mm (g)

M: Massa da amostra (g)

A Figura 42 ilustra o equipamento utilizado no teste LCPC:

Figura 42: Equipamento LCPC, 1- Motor, 2- Rotor e fixador da placa, 3- recipiente da amostra, 4-funil usado para colocar amostra no recipiente.



Fonte: Thuro et. al., (2007).

3.4.5 Ensaio de Compressão de Leito de Partículas (CLP)

O ensaio de Compressão de Leito de Partículas (CLP) visa obter uma relação entre a energia aplicada na compressão de um leito de partículas e a fragmentação resultante (KALALA, et. al., 2011; OLIVEIRA, 2015).

HAWKINS, 2007 destaca que a compressão de leitos de partículas no sistema de prensa e pistão é o ensaio mais amplamente usado para caracterizar a quebra interparticular e os parâmetros dos modelos matemáticos da prensa de rolos. A quebra de leitos por compressão é a base dos modelos de Morrell et al. (1997), bem como do modelo de Dundar et al. (2013) para obter a função de aparecimento ou quebra, a qual relaciona a energia aplicada com a fragmentação do leito (CAMPOS, 2018).

Ao contrário de outros testes, o CLP não possui um procedimento experimental padronizado, pois o diâmetro da câmara de compressão é em função do tamanho máximo da partícula testada (OLIVEIRA, 2015). A Figura 43 apresenta o dispositivo tipicamente utilizado no teste de leito de partículas (CLP).

Figura 43: Exemplo de dispositivo utilizado no ensaio de leite de partículas (CLP)



Fonte: Oliveira (2015).

Ao término da aplicação da força, a amostra é peneirada para determinação da fragmentação ocorrida. Os resultados do teste CLP são valores A e b obtidos a partir da equação (9), bem como da matriz de quebra do material. Esses valores são utilizados para a simulação do modelo do HPGR (LEITE, 2016).

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (9)$$

Onde:

t_{10} : porcentagem passante do produto na malha igual a um décimo do tamanho da partícula

A, b: Parâmetros característicos do minério quanto à resistência a compressão

E_{cs} : Energia específica aplicada (kWh/t)

3.4.6 Point Load Test

O *Point Load Test* – PLT é empregado para avaliação da resistência de materiais rochosos à carga pontual. Através de correlações, esse teste pode ser usado para estimar resistência à tração e compressão (ISRM, 1985).

O PLT tem custo relativamente baixo, de rápida e fácil execução, resultando em ampla utilização em ensaio de campo.

O PLT envolve a compressão de uma amostra entre ponteiros de aço cônicas até que ocorra a fragmentação da partícula. O dispositivo usado no teste consiste em uma estrutura rígida, duas ponteiros responsáveis por aplicar a pressão e um sistema hidráulico para acionamento e controle da pressão. Além disso, um manômetro é utilizado para registrar a pressão no momento da fragmentação da partícula (RUSNAK e MARK, 2000). A Figura 44 apresenta um dispositivo utilizado no teste de PLT.

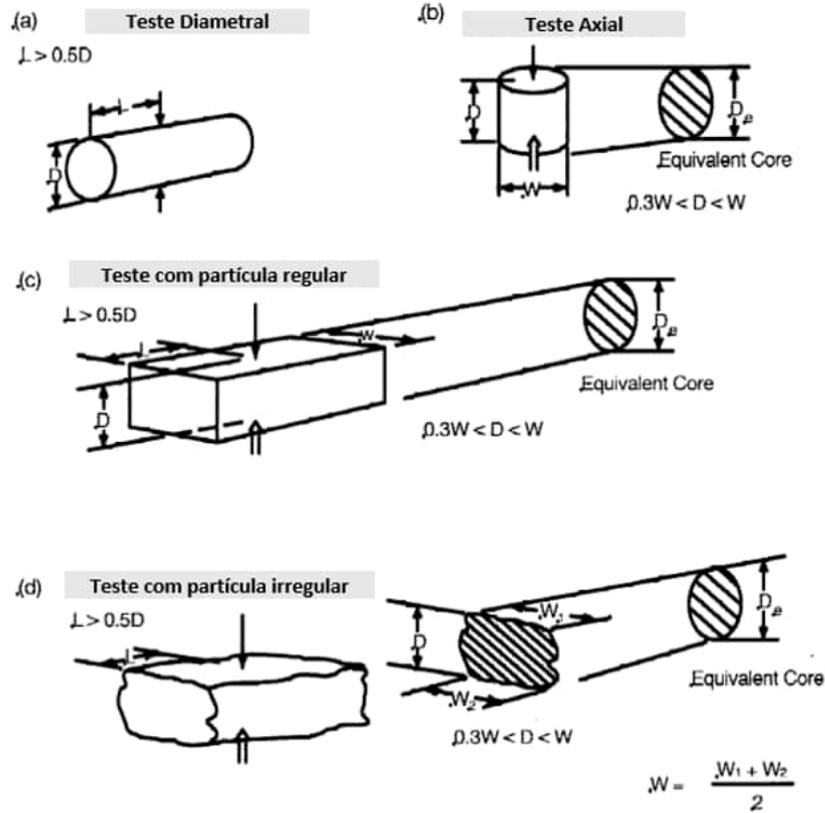
Figura 44: Exemplo de dispositivo utilizado no ensaio de Point Load Test



Fonte: Rusnak e Mark, 2000.

A *International Society of Rock Mechanics (ISRM)* descreve as especificações das partículas para serem utilizadas no PLT, conforme mostram os esquemas da Figura 45:

Figura 45 - Exemplo partículas usadas no teste de PLT



Note 1 – Legend: L = length, W = width, D = Depth or diameter, and D_e = Equivalent core diameter

Fonte: ISRM (1985). Modificado pelo autor.

O índice é calculado pela Equação 10.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (10)$$

Onde:

I_s (50): Índice de compressão à carga pontual, corrigido para diâmetro equivalente de 50 mm (MPa)

P: Força aplicada no equipamento no momento da ruptura da partícula (kN)

D: Diâmetro equivalente da partícula testada (mm)

A ISRM (1985) indica que diâmetros diferentes de 50 mm ou em forma de bloco (regular ou não), deve-se aplicar um fator de correção apresentado na Equação 11:

$$I_{S(50)} = I_S \times F \quad \text{com } F = \left(\frac{D^*}{50}\right)^{0,45} \quad (11)$$

$$D^* = \sqrt{\frac{4LC}{\pi}} \quad \text{para corpo de prova com formato de bloco}$$

$$D^{x*} = D_C$$

Onde:

- F Fator de correção para partículas com diâmetro diferente de 50 mm
- D^* Diâmetro de partículas diferente de 50 mm ou diâmetro equivalente
- L Largura de seção de ruptura da partícula (mm)
- C Comprimento da seção de ruptura da partícula (mm)

3.4.7 Análise de forma da partícula

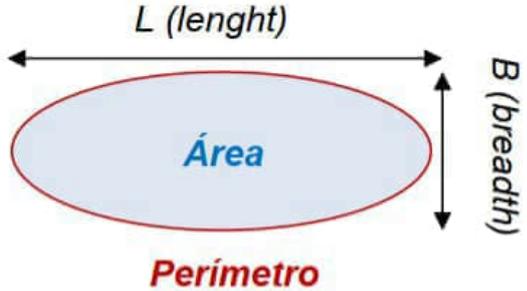
Apesar da Norma NBR 7211 que aborda o uso de agregados para concreto não estabelecer a forma da partícula como requisito para o uso de agregado miúdo nesse tipo de aplicação, diferentes autores mencionam a importância desse parâmetro, uma vez que este influencia o comportamento reológico de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUART et al., 2000).

Swift (2007) cita que a esfericidade e a relação de aspecto são os principais parâmetros para caracterizar a forma da partícula. A esfericidade pode ser compreendida como a relação entre a área e o perímetro da partícula, enquanto a relação de aspecto é determinada pela relação entre a menor e a maior dimensão da partícula (OLIVEIRA, 2011).

A Figura 46 apresenta as considerações utilizadas para determinação da morfologia da partícula:

Figura 46 - Determinação da morfologia da partícula

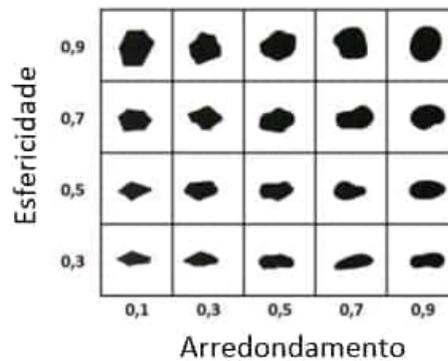
$$ES = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (\text{esfericidade})$$

$$B/L = \frac{X_{max}}{X_{min}} \quad (\text{relação de aspecto})$$


Fonte: Oliveira (2011).

Inicialmente, a morfologia das partículas era avaliada muito mais de maneira qualitativa, por meio da comparação visual das partículas com gabaritos pré-estabelecidos, conforme ilustra a Figura 47 (HAWLITSCHKEK, 2014).

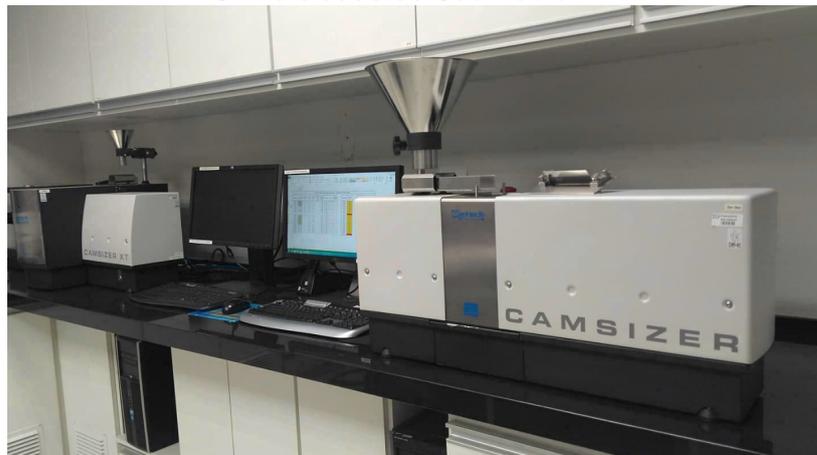
Figura 47 - Determinação da morfologia da partícula conforme proposto por Krumbein e Sloss (1963).



Fonte: Krumbein e Sloss (1963).

Recentemente, métodos e equipamentos mais avançados foram desenvolvidos para identificar tais parâmetros. O equipamento Camsizer é empregado nesse tipo de atividade. Esse sistema identifica distribuições de granulometria e formato da partícula através do processamento de imagens. A Figura 48 apresenta o Camsizer instalado no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo.

Figura 48 - Equipamento Camsizer do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo



Fonte: Cedido pelo LCT.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para a análise de desempenho do HRC™ como equipamento dedicado para a produção de areia manufaturada, foram realizadas amostragens em uma planta industrial alternando duas variáveis que influenciam diretamente as características do produto da prensa: pressão específica e tipo de alimentação.

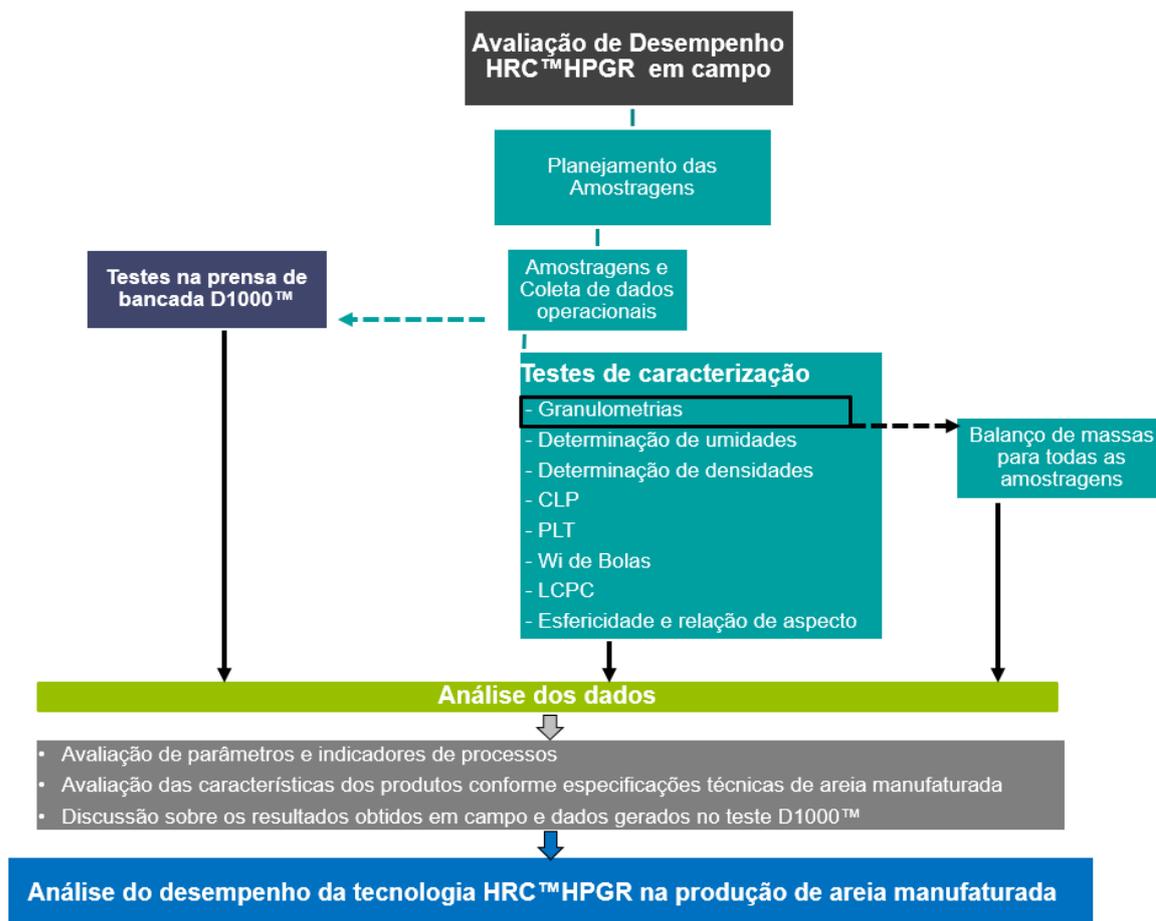
As amostras obtidas durante as amostragens foram submetidas a análises granulométricas e ensaios de caracterização. Os dados levantados na etapa de amostragem foram submetidos a balanços de massas.

Adicionalmente, amostras obtidas na operação industrial foram utilizadas em ensaios na prensa de bancada D1000, seguindo as mesmas condições operacionais da prensa industrial amostrada. Portanto, nessa etapa foram comparados os produtos das amostragens industriais com os produtos gerados nos testes na prensa de bancada.

Por fim, todos os dados gerados ao longo da pesquisa foram discutidos e avaliados. A análise do desempenho do equipamento consistiu na avaliação de parâmetros como capacidade específica e consumo energético específico, assim como características

dos produtos obtidos, este último em comparação às especificações técnicas de areia manufaturada. A síntese das principais etapas do trabalho desenvolvido é apresentada na Figura 49.

Figura 49 - Síntese do trabalho desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.2.1 Amostragens no Circuito de Cominuição da Itaquareia

O trabalho experimental foi realizado no circuito de cominuição da Mineração Itaquareia – Unidade de Mogi das Cruzes.

Várias amostragens foram realizadas nesse circuito e amostras de diferentes pontos foram coletadas em cada amostragem. Apesar da Areia Grossa ser a alimentação principal desse circuito, amostragens adicionais desse circuito processando o material Pedrisco Fino também foram realizadas visando assim comparar o desempenho desse

equipamento no processamento de diferentes tipos de alimentação. A Tabela 5 apresenta as condições estabelecidas para cada amostragem, considerando os diferentes tipos de alimentação e pressão específica de prensagem:

Tabela 6 - Condições estabelecidas para cada amostragem

Amostragens	Tipo de Alimentação	Pressão (N/mm²)
1	Pedrisco Fino	1,0
2	Pedrisco Fino	1,8
4	Areia Grossa	1,8
5	Areia Grossa	1,8
6	Areia Grossa	2,1

Fonte: Criado pelo autor.

Conforme mostra a Tabela 6, duas amostragens foram realizadas enquanto o circuito era alimentado com o material Pedrisco Fino e três amostragens com alimentação de Areia Grossa. A pressão específica do HPGR nas amostragens foi alternada entre 1,0 e 2,1 N/mm². A amostragem 4 foi realizada nas mesmas condições da amostragem 5, de forma a verificar a repetibilidade e reprodutibilidade das amostragens. Em um ambiente industrial, 2 amostragens podem ser consideradas suficientes para verificação da reprodutibilidade.

Amostragens em circuitos industriais demandam sempre um sólido planejamento prévio, pois considera-se nessa atividade, a participação de uma série de recursos, assim como a parada do circuito para obtenção de amostras. No planejamento do trabalho experimental, foram definidos os recursos que seriam utilizados nas amostragens, pontos amostrados e massa mínima para obtenção de amostras representativas.

Os recursos mobilizados nas amostragens exemplificam a complexidade dessa atividade. Uma pá carregadeira, dois caminhões basculante, ferramentas como pás, sacos e trenas, além de mão de obra foram utilizados nas amostragens. Além disso, o circuito de cominuição da Itaquareia foi mobilizado durante um dia inteiro para a execução dessas atividades.

Os pontos amostrados foram definidos com base no acesso físico da planta e também com base nos objetivos estabelecidos para esse estudo.

A Figura 50 apresenta o fluxograma do circuito de cominuição da Itaquareia da unidade de Mogi das Cruzes dedicado à produção de areia manufaturada, assim como os pontos de tomada de amostras utilizados nas amostragens, este últimos listados na Tabela 7.

Figura 50 - Circuito de cominuição da Itaquareia Mogi das Cruzes para areia manufaturada e pontos amostrados

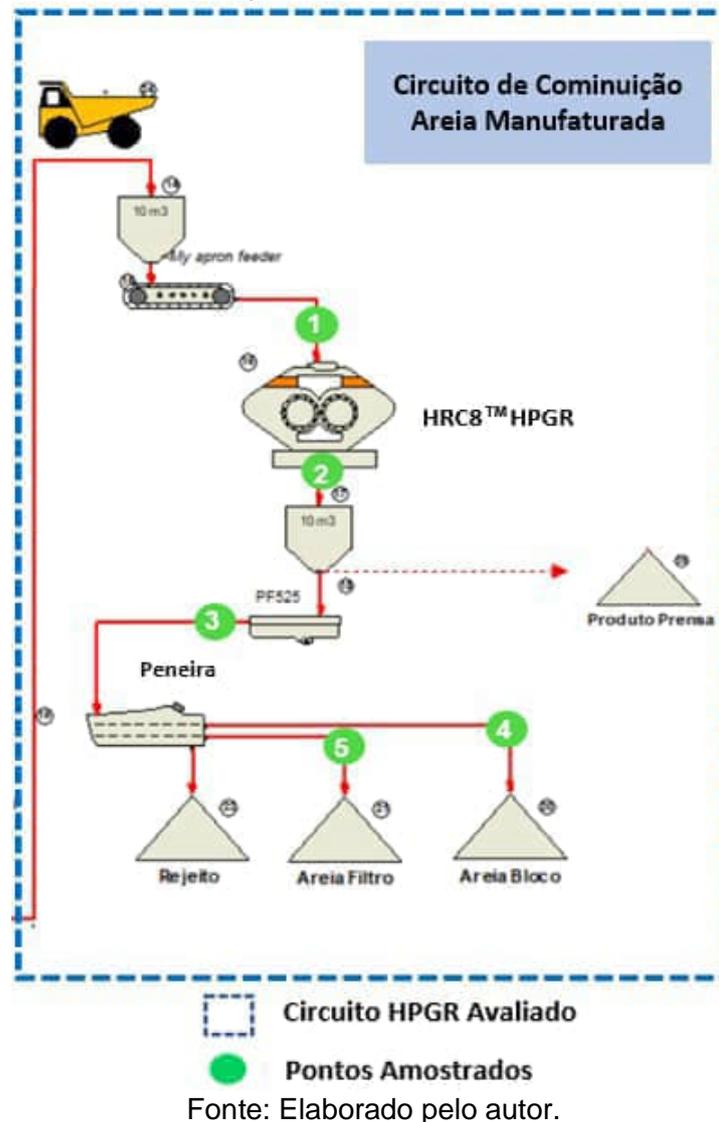


Tabela 7 - Descrição dos pontos definidos para coleta das amostras

Identificação dos Pontos Amostrados	Descrição dos Pontos
1	Alimentação HRC
2	Produto HRC
3	Alimentação Peneira
4	Retido Primeiro Deck
5	Retido Segundo Deck

Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento adotado como padrão foi inicialmente estabelecido e replicado para todas as amostragens. Essa iniciativa buscou garantir uma consistência adequada ao trabalho experimental, assim como a representatividade das informações coletadas durante as amostragens. As principais etapas desenvolvidas para cada amostragem foram:

- **Limpeza do Circuito**

O material residual no circuito era processado até que o circuito ficasse totalmente vazio. Os silos eram limpos e todo o circuito era esvaziado até que estivesse habilitado a receber uma nova alimentação. Esse procedimento foi estabelecido para garantir que os pontos seriam amostrados sem o risco de coletar amostras residuais da amostragem anterior.

Uma câmera instalada no chute de alimentação do HPGR auxiliava a avaliação das condições de limpeza desse compartimento, conforme mostra a fotografia da Figura 51. Caso o chute não estivesse limpo, a limpeza era feita manualmente com ajuda de uma pá e vassoura.

Adicionalmente, inspeções visuais foram realizadas em diferentes pontos do circuito para se certificar das respectivas adequações.

Figura 51 - Observação da limpeza do silo através da câmera



Fonte: Acervo do autor.

Além disso, um caminhão basculante foi mobilizado para retirar o material remanescente no silo que alimentava a peneira. Essa atividade foi estabelecida para certificar que esse silo também estaria completamente limpo para a amostragem posterior, conforme mostra a fotografia da Figura 52.

Figura 52 - Caminhão basculante retirando o material remanescente no silo



Fonte: Acervo do autor.

- **Ajuste da pressão de operação do HPGR**

Uma vez que o circuito estava pronto para receber uma nova alimentação, o HRC™ era configurado com a pressão estipulada e o circuito era colocado em operação.

O ajuste de pressão era feito diretamente na sala de controle, através do uso da interface de automação do equipamento.

- **Estabilização do processo, coleta de dados e parada do circuito**

Uma vez que o circuito estava processando o material de interesse e com o HRC™ configurado conforme o estipulado, os parâmetros de processos eram monitorados a fim de certificar que o circuito estava estável e apto para ser amostrado.

Momento antes da parada do circuito, dados do equipamento eram coletados na interface de automação. Parâmetros como potência do equipamento, velocidade dos rolos e pressão específica, foram coletados para todas as amostragens.

Após o levantamento dessas informações, todos os transportadores de correia eram simultaneamente parados para coleta das amostras.

- **Tomada de amostras**

As amostras foram coletadas nos pontos previamente estabelecidos. O material de cada correia era retirado com auxílio de pás e vassouras e armazenado em sacos plásticos previamente identificados com a descrição de cada ponto. As imagens apresentadas na Figura 53 mostram a atividade de coleta de amostras da correia.

Figura 53 - Exemplo de retirada do material de um ponto de amostragem



Fonte: Acervo do autor.

Ao final das amostragens as amostras foram catalogadas e despachadas para o Laboratório da Metso localizado em Sorocaba, SP, para realização de ensaios de caracterização, conforme mostra a Figura 54. Posteriormente parte das amostras foi enviada ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) e Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM) da Universidade de São Paulo para realização de ensaios complementares de caracterização.

Figura 54 - Parte das amostras separadas para envio ao Laboratório da Metso.



Fonte: Acervo do autor

4.2.2 Ensaio realizados

Uma série de ensaios laboratoriais foram realizadas com as amostras geradas nas amostragens. O objetivo desses ensaios foi identificar características das amostras processadas em campo, para posterior avaliação de desempenho do HRC™.

Para todas as amostragens foram realizadas as pesagens das amostras geradas em cada fluxo amostrado. Em seguida, tais amostras foram quarteadas individualmente e alíquotas de 2 kg foram geradas para posterior análise granulométrica.

Para as amostras do Ponto 1 (alimentação) de cada amostragem, foram realizadas adicionalmente ensaios para determinação de umidade e densidade aparente. Os ensaios de umidade foram realizados através da secagem do material à 105°C em uma estufa de laboratório. Após essa secagem, os materiais foram esfriados à temperatura ambiente e sua massa seca foi determinada. Após essa etapa, a massa do material antes da secagem era comparada com a massa após a secagem e a umidade em porcentagem era calculada.

Para os ensaios de granulometria, um peneirador vibratório suspenso foi utilizado. Nesse ensaio, uma série de peneiras de 8" de diâmetro eram dispostas uma sob as outras em ordem decrescente de tamanho de abertura da malha. O material era colocado nas peneiras e o peneirador realizava a agitação das partículas por um período de 20 minutos. Após esse período, a série de peneiras era retirada do peneirador e a massa do material retido em cada malha era pesado individualmente. A Figura 55 mostra um exemplo de peneira utilizada nos ensaios granulométricos, enquanto a Figura 56 apresenta as malhas utilizadas nesses ensaios.

Figura 55 - Exemplo de peneira utilizada nos ensaios granulométricos.



Fonte: Acervo do autor

Figura 56 – Malhas utilizadas nos ensaios granulométricos.

Mesh	mm
0,53	13,50
3/8	9,50
1/4	6,35
4,00	4,75
6	3,36
8	2,38
12	1,68
16	1,19
18	1,00
20	0,84
30	0,59
40	0,42
50	0,30
70	0,21
100	0,15
140	0,10
200	0,07
Fundo	

Fonte: Preparado pelo autor.

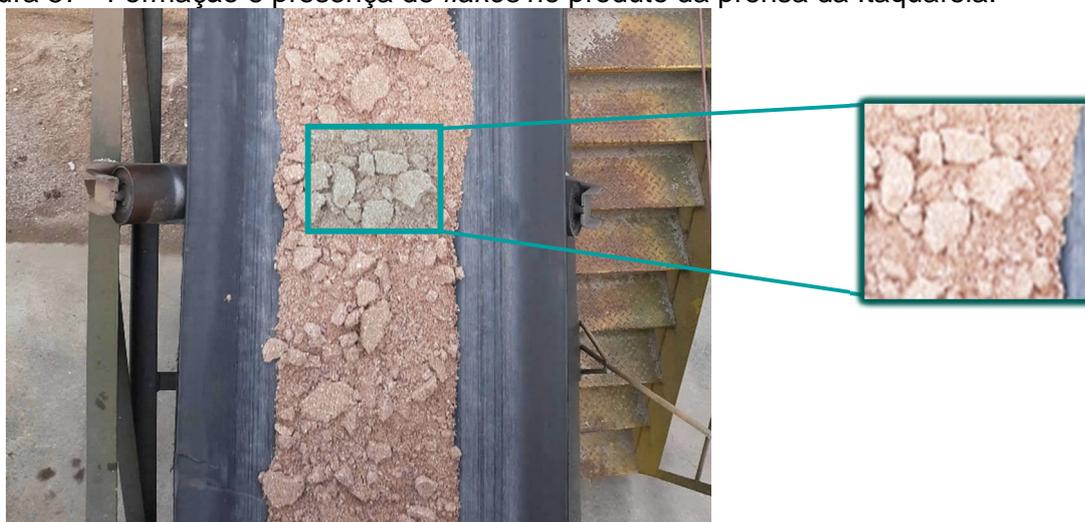
O ensaio de densidade aparente foi conduzido para a alimentação de todas as amostragens. O método utilizado considera a utilização de uma proveta graduada de 1 L e um bastão para golpear levemente a amostra e reduzir os espaços gerados pelo empolamento. O volume preenchido pela amostra na proveta foi medido e em seguida a massa dessa amostra foi determinada através da utilização de uma balança de precisão.

Uma vez que esta versão do modelo HRC™8 da Itaquareia não possuía o sistema de monitoramento de abertura entre rolos habilitado, as amostras dos flocos (*flakes*) contidos na descarga do HRC™ foram cuidadosamente separados para medição da abertura operacional HRC™ por meio do uso de um paquímetro.

Os *flakes*, conforme mostrados na Figura 56, não eram compactos o suficiente para exigir uma etapa de desaglomeração, uma vez que esta desaglomeração ocorria apenas com o manuseio natural desse material ao longo das etapas posteriores do processo. Essa premissa foi confirmada diversas vezes por meio de visitas em campo, discussões com operadores e o manuseio desse material durante os testes.

Além da medição da espessura desses materiais, foram realizados ensaios para aferir a densidade dos *flakes* dos produtos da prensa coletados em cada amostragem.

Figura 57 - Formação e presença de *flakes* no produto da prensa da Itaquareia.



Fonte: Acervo do autor

A espessura do *flake* coletado em campo foi medida com o auxílio de um paquímetro e a medição para cálculo da densidade desse material foi realizado conforme procedimento sugerido por Oliveira (2015). Nesse procedimento, considerou-se a imersão dos *flakes* em uma camada fina de parafina derretida antes da imersão em água contida em uma proveta. Tal imersão na parafina confere uma camada de proteção às partículas a serem medidas, minimizando a absorção de água por essas partículas durante a medida do seu volume em uma proveta.

Assim como também observado por Oliveira (2015), através de testes iniciais foi possível verificar que a influência de massa e volume da parafina no teste de densidade era mínima. Isso ocorre, pois a camada de parafina aplicada na partícula é extremamente fina. A Figura 58 mostra os *flakes* antes e depois de serem revestidos com parafina.

Figura 58 - Aparência dos *flakes* antes e após o teste com a parafina



Fonte: Acervo do autor.

4.2.3 Dados gerados em cada amostragem

Os principais dados gerados em amostragem estão apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Principais dados gerados nas amostragens

Origem	Parâmetro	Unidade
Instrumentação do Equipamento	Pressão específica dos rolos	(N/mm ²)
	Potência dos motores	kW
	Capacidade do alimentador	porcentagem da capacidade máxima
	Nível do Silo	
	Velocidade dos rolos	
Parâmetros de Processo	Vazão de sólidos	t/h
	Capacidade específica	ts/hm ³
	Consumo energético	kWh
	Energia específica	kWh/t
Dados Laboratoriais	Densidade aparente da alimentação	t/m ³
	Densidade do <i>flake</i>	t/m ³
	Espessura do <i>flake</i>	mm
	Granulometria	-
	Umidade da alimentação	%

Fonte: Elaborado pelo autor

As granulometrias dos fluxos amostrados foram utilizadas para desenvolvimento de balanço de massas e os resultados das granulometrias dos produtos foram comparados com as especificações técnicas da areia manufaturada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

5.1.1 Composição Química

As composições químicas das amostras Areia Grossa e Pedrisco Fino foram determinadas em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração ROC-1 (Rochas), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 9 – Resultados Análises químicas

Amostra	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	PF (%)
Pedrisco Fino	88,3	5,97	1,55	0,11	0,13	<0,10	0,23	3,5	0,11	<0,10	0,58
Areia Grossa	91,3	4,65	1,34	0,14	<0,10	<0,10	0,21	3,14	<0,10	<0,10	<0,10

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mostra a Tabela 9, os materiais têm composição química similares. Os resultados da análise química mostram altos teores de SiO₂ para ambas as amostras, neste caso superiores a 88%, indicando produtos de alta qualidade. (SOUZA et. al., 2014).

5.1.2 Abrasão de Bond

Em virtude das condições naturais do material processado na Itaquareia, houve considerável dificuldade em obter material no tamanho requerido para o teste de Abrasividade de Bond (-19,1 +12,7 mm). Neste caso, realizou-se o teste de Abrasividade de Bond com o material retido na peneira estática (rejeito Grosso).

O resultado do teste indicou um índice de Abrasividade de Bond de 0,295 que segundo o Manual de Britagem (METSO, 2005) indica abrasividade média.

Figura 59 – Tabela de referência para Abrasividade de Bond

Baixa Abrasividade	Calcário	0,001 – 0,030
	Dolomita	0,030 – 0,10
Média Abrasividade	Basalto	0,20 – 0,30
	Hematita	0,20 – 0,35
Alta Abrasividade	Granito	0,40 – 0,65
	Quartzito	0,65 – 0,90

Fonte: Metso, 2005. Modificado pelo autor.

O valor de abrasividade obtido foi considerado inferior àquele correspondente ao Pedrisco Fino ou Areia Grossa, já que estes são previamente lavados e classificados não apresentando, portanto, grande quantidade de argila, como a amostra submetida ao teste. Sendo assim, entende-se que o teste de LCPC possa indicar a classificação de abrasividade com maior assertividade.

5.1.3 LCPC - Abrasividade e Britabilidade

O teste de abrasividade foi realizado com uma amostra combinada de Areia Grossa e Pedrisco Fino. O resultado desse teste indicou uma abrasividade (LAC) de 1184 g/t e uma britabilidade (LBC) de 87,2%, indicando assim (THURO et al., 2009), material “Muito Abrasivo” e com uma britabilidade “Alta”. Conforme esse autor indica, quanto maior a britabilidade, mais fácil esse material pode ser fragmentado.

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam valores de referência para a classificação desses resultados. De acordo com esse autor, o resultado obtido para abrasividade está de acordo com os valores de referência indicados para areia de quartzo.

Tabela 10 - Referência de classificação para resultados de abrasividade - LAC

LAC (g/t)	Classificação Abrasividade	Exemplos
0-50	Não abrasivo	Materiais orgânicos
50-100	Não muito abrasivo	Lamito
100-250	Ligeiramente abrasivo	Ardósia, Calcário
250-500	Abrasividade média	Xisto, Arenito
500-1250	Muito Abrasivo	basalto
1250-2000	Extremamente Abrasivo	anfíbolito, quartzito

Fonte: Thuro et al., (2009). Modificado pelo autor.

Tabela 11 - Referência de classificação para resultados de britabilidade - LBC

LBC (%)	Classificação Britabilidade
0-25	Muito Baixa
25-50	Baixa
50-75	Média
75-100	Alta
>100	Muito Alta

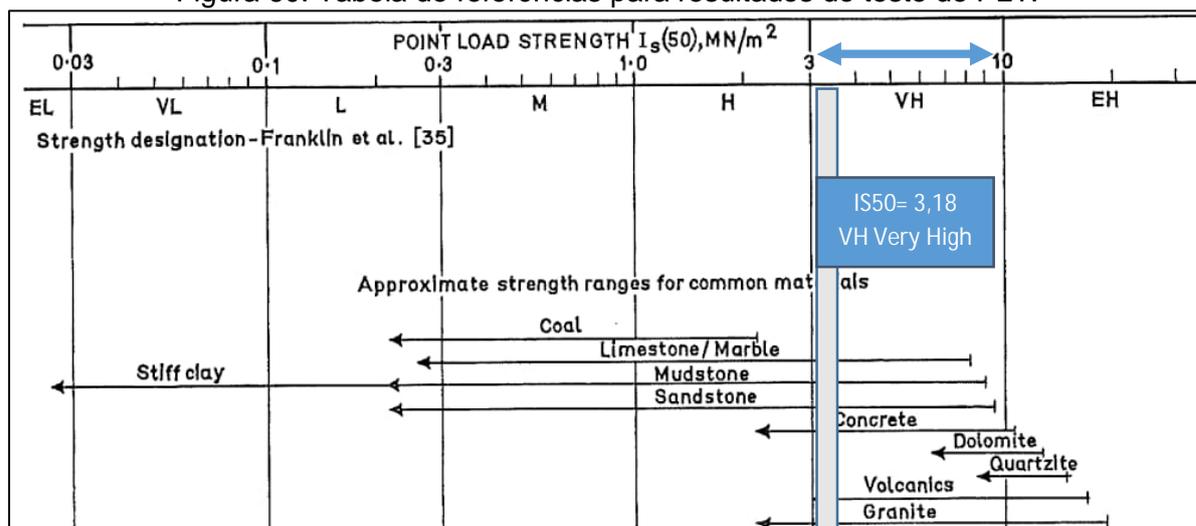
Fonte: Thuro et al., (2009). Modificado pelo autor.

5.1.4 Point Load Test (PLT)

O PLT foi realizado com uma amostra oriunda do material retido na peneira estática. Em virtude das condições naturais do material processado na Itaquareia, não foi possível obter partículas para o ensaio do PLT de acordo com o tamanho de partículas sugerido pela ISRM (1985) de aproximadamente ~30 mm. Diante dessa condição, o teste foi realizado apenas de maneira orientativa, considerando a utilização de partículas com tamanho aproximado de 18 mm.

O resultado (I_{s50}) indicou uma resistência à compressão de 3,18 MPa. De acordo com Franklin et al., (1970), a resistência à compressão de um material com resultado nessa faixa, pode ser classificado como “Muito Alta” (Very High - VH). A Figura 60 apresenta resultados de referência para o teste de PLT:

Figura 60: Tabela de referências para resultados do teste de PLT.



Fonte: Franklin et. al (1970).

5.1.5 Prensa de Bancada D1000

Os testes na prensa de bancada D1000 foram realizados com a mesma alimentação e pressão operacional registrada durante as amostragens em campo. A ideia de realizar os testes na prensa de bancada com as mesmas condições operacionais no momento das amostragens foi verificar uma possível correlação entre os resultados encontrados em campo, assim como entender os benefícios e limitações do teste de bancada. A Tabela 12 ilustra as condições amostradas em campo e as reproduzidas nos ensaios com a prensa de bancada.

Tabela 12 – Condições empregadas no teste de bancada.

ID Teste	Tipo de Alimentação	Pressão (N/mm ²)	ID Amostragem de Referência
1	Pedrisco Fino	1,0	1
2	Pedrisco Fino	1,8	2
4	Areia Grossa	1,8	4
6	Areia Grossa	2,1	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que a Amostragem 5 foi realizada nas mesmas condições da Amostragem 4, somente para efeitos de verificação de reprodutibilidade das amostragens, esse teste não foi realizado na prensa de bancada. Os testes foram realizados seguindo as etapas abaixo descritas:

Preparação de Pilha Alongada de Homogeneização

Formação de uma pilha alongada de homogeneização com a amostra que alimentaria a prensa de bancada. Após realização da pilha, uma alíquota era retirada para verificação da umidade da amostra. Uma vez verificada essa umidade, esse valor era comparado aos valores de umidade encontradas nas amostras da alimentação coletadas durante a amostragem. Caso esses valores fossem próximos, dava-se seguimento ao teste. A Figura 61 apresenta uma ilustração da realização da pilha de homogeneização.

Figura 61: Realização da pilha de homogeneização.



Fonte: Acervo do autor.

Os valores de umidades encontrados na amostra de alimentação para o teste na prensa foram próximos aos valores observados nas amostras de alimentação das amostragens. Credita-se isso ao correto armazenamento das amostras coletadas nas amostragens.

Granulometria da Alimentação da Prensa

Uma análise granulométrica foi realizada com a amostra de alimentação após a execução do ensaio de umidade. Uma vez determinada a granulometria da amostra que alimentaria a prensa de bancada, a prensa era ajustada com a pressão específica previamente definida.

Alimentação da Prensa de Bancada

Após o ajuste da pressão específica na prensa de bancada, esse equipamento estava apto para receber a amostra a ser testada. Através de uma bandeja, a amostra selecionada para o teste era alimentada na câmara de alimentação do equipamento até o preenchimento do material no nível estipulado para o teste. A Figura 62 ilustra a câmara de alimentação do equipamento.

Figura 62: Câmara de alimentação do equipamento.



Fonte: Acervo do autor.

Execução do teste e coleta do produto

Após o preenchimento da câmara de alimentação, o equipamento estava pronto para execução do teste. A prensa de bancada era então ligada, o processo de cominuição realizado e o produto era despejado em uma bandeja que ficava na parte inferior do

equipamento. Após esse processo, a bandeja com o produto era retirada e esse material submetido a peneiramento.

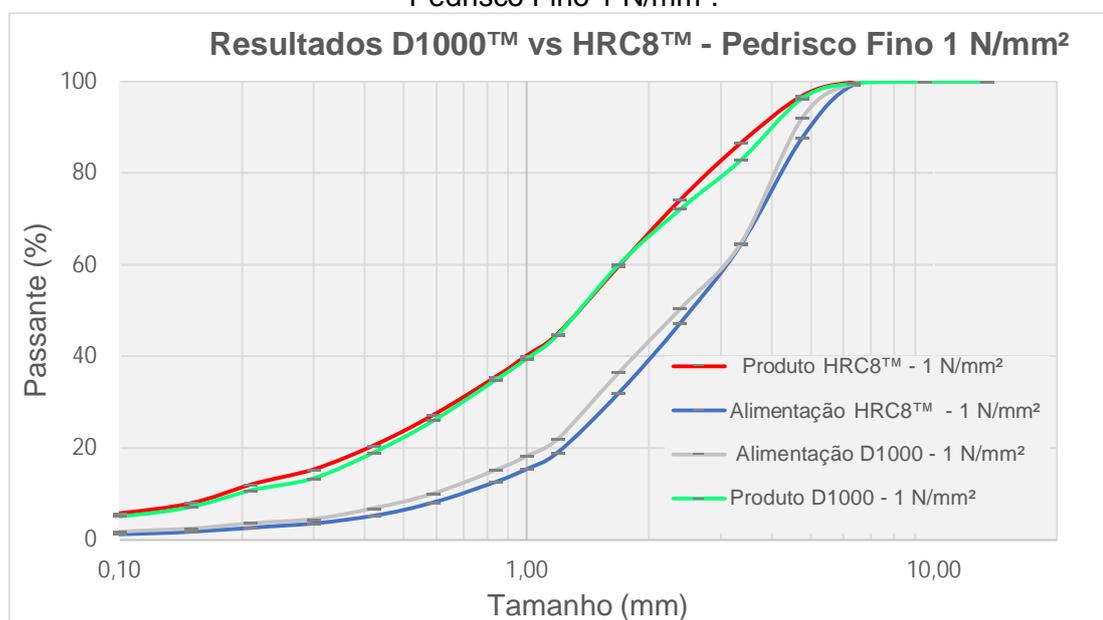
Resultados e Discussões

As distribuições granulométricas da alimentação e produtos dos testes da prensa de bancada foram comparadas como se segue.

Teste 1: Alimentação com Pedrisco Fino, Pressão Específica de 1N/mm²

O Teste 1 foi realizado com a alimentação com Pedrisco Fino e com uma pressão específica para a prensa de 1 N/mm². Os resultados indicaram boa similaridade entre as distribuições granulométricas das alimentações da amostra testada na prensa de bancada e da amostra que alimentou o HPGR industrial (HRC8™). A Figura 63 apresenta os resultados.

Figura 63: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Pedrisco Fino 1 N/mm².



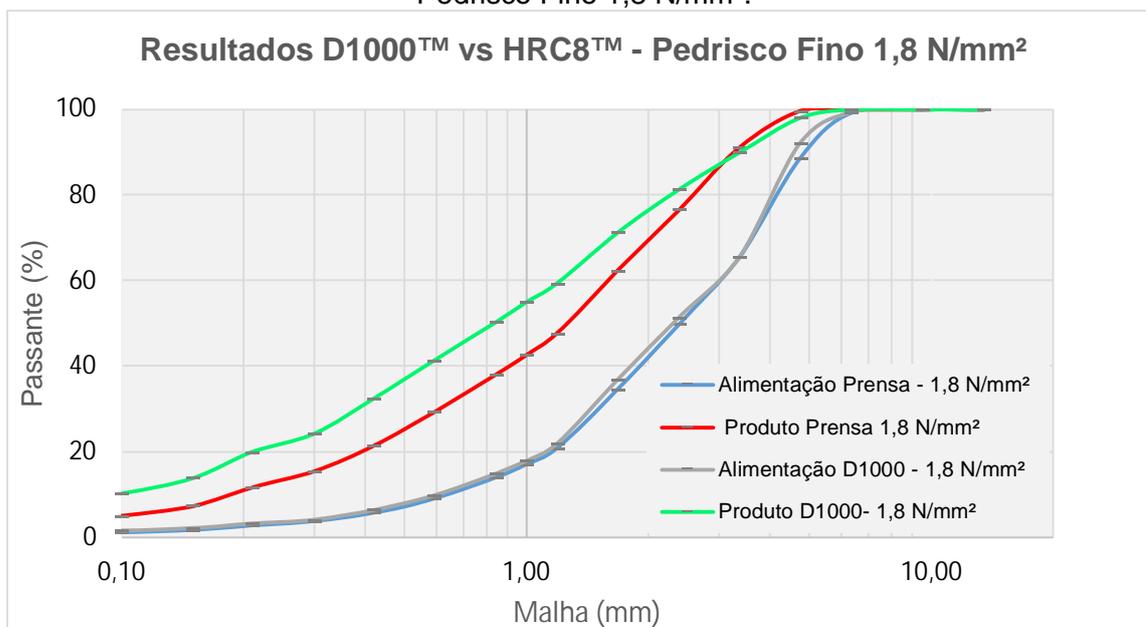
Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas praticamente sobrepostas indicaram nesse teste de baixa pressão, uma aderência alta entre o produto gerado na prensa industrial e o produto gerado na prensa de bancada.

Teste 2: Alimentação com Pedrisco Fino, Pressão Específica de 1,8 N/mm²

O Teste 2 foi realizado com a alimentação com Pedrisco Fino e com uma pressão específica para a prensa de 1,8 N/mm². Os resultados indicaram novamente boa similaridade entre as distribuições granulométricas das alimentações da amostra testada na prensa de bancada e da amostra que alimentou o HPGR industrial (HRC8™). Conforme apresentado na Figura 64, embora os P₈₀ obtidos na prensa de bancada e prensa industrial fossem próximos, respectivamente 2,28 mm e 2,60 mm, o produto da prensa de bancada foi significativamente mais fino que o da prensa industrial.

Figura 64: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Pedrisco Fino 1,8 N/mm².



Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que o teste na prensa de bancada possui flanges e o HPGR instalado em campo não possuía esse dispositivo em seus rolos no momento das amostragens. Os estudos conduzidos por Knorr et. al. (2013), testaram os efeitos do uso do conceito de flanges da Metso em um HPGR de 750 mm x 400 mm. Esses autores testaram diversos cenários operacionais, que incluíam alteração da alimentação e pressão específica da prensa, avaliando os benefícios do uso dos flanges em relação aos tradicionais *cheek plates*.

Os resultados encontrados por esses autores indicaram que a distribuição de pressão ao longo do rolo foi mais uniforme com o uso das flanges. Como consequência, foi possível observar um produto até 20% mais fino (KNORR et al., 2013).

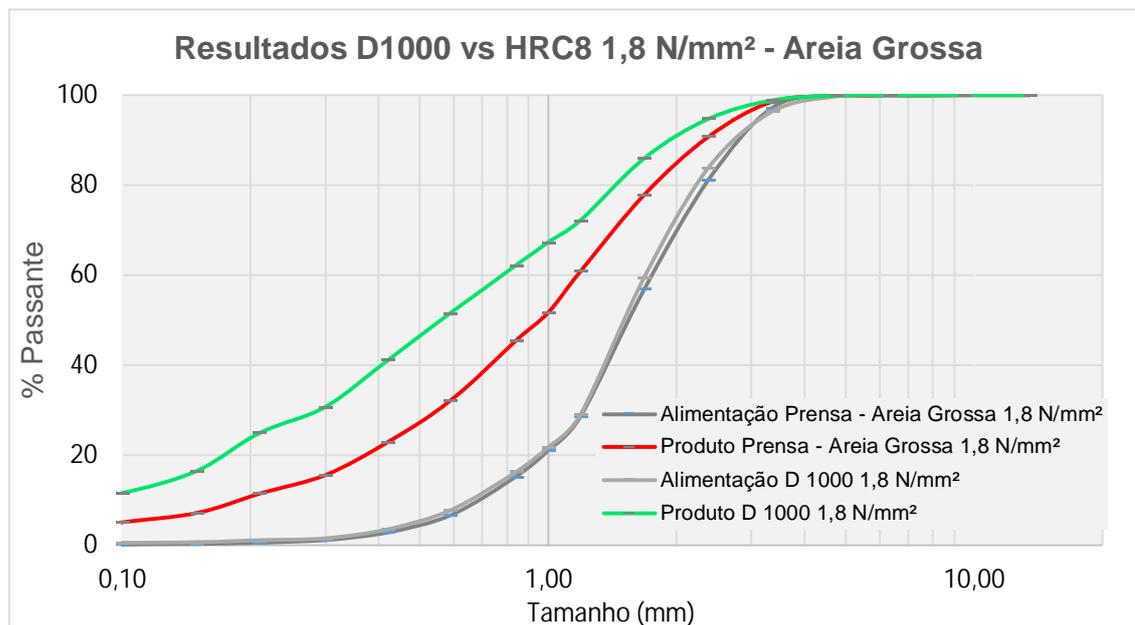
Levanta-se, portanto, a hipótese de que a distribuição mais fina do produto da prensa de bancada poderia assim ser atribuída a presença de flanges para pressões consideradas médias.

Teste 4: Alimentação com Areia Grossa, Pressão Específica de 1,8 N/mm²

O Teste 4 foi realizado com a prensa de bancada sendo alimentada com Areia Grossa e operando com uma pressão específica de 1,8 N/mm², similar à correspondente amostragem em campo. Conforme apresentado na Figura 65, os resultados indicaram novamente boa similaridade entre as distribuições granulométricas das alimentações da amostra testada na prensa de bancada e da amostra que alimentou a prensa industrial (HRC8™) durante a respectiva amostragem (Amostragem 4).

Assim como observado no Teste 2, para uma condição operacional de pressão, tipo de alimentação e granulometria de alimentação, o produto gerado na prensa de bancada se apresentou significativamente mais fino que o produto gerado na prensa industrial. Neste caso, endossa a hipótese de que a distribuição mais fina do produto da prensa de bancada poderia assim ser atribuída a presença de flanges para pressões consideradas médias.

Figura 65: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Areia Grossa 1,8 N/mm².



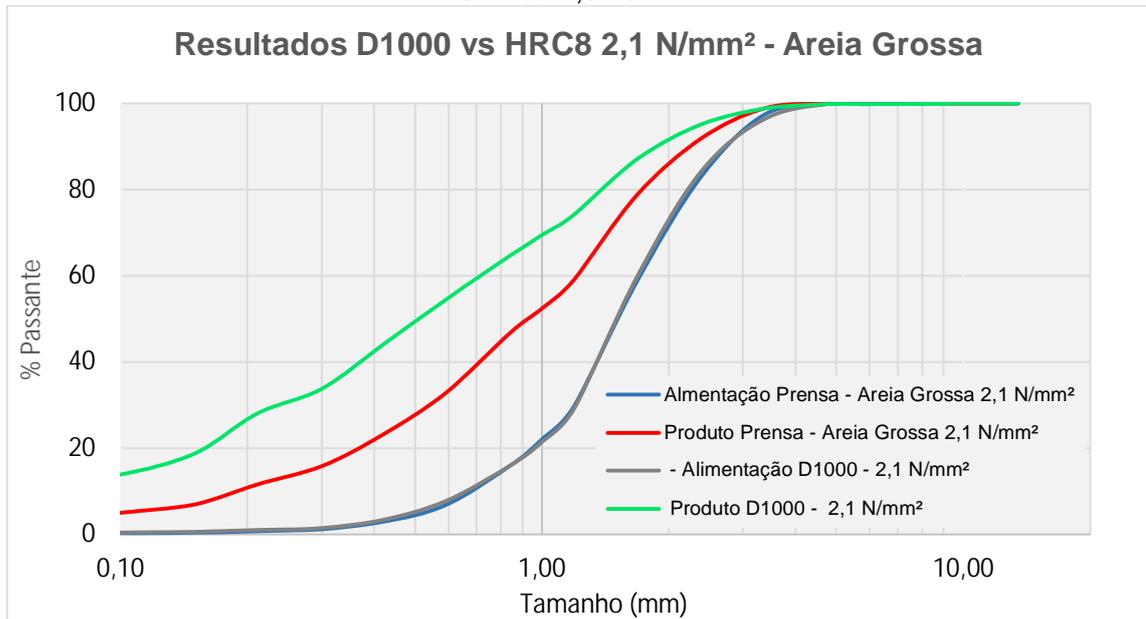
Fonte: Elaborado pelo autor.

Teste 6: Alimentação com Areia Grossa, Pressão Específica de 2,1 N/mm²

O Teste 6 foi realizado com a prensa de bancada sendo alimentada com Areia Grossa e operando com uma pressão específica de 2,1 N/mm². Conforme apresentado na Figura 66, a granulometria de alimentação da prensa de bancada se apresentou bastante similar à granulometria de alimentação observada na sua respectiva amostragem.

Assim como observado nos demais testes de média pressão, o produto gerado na prensa de bancada nesse teste de alta pressão se apresentou mais fino que o produto gerado na prensa industrial para uma mesma condição operacional. Reitera-se aqui a hipótese de que a distribuição mais fina do produto da prensa de bancada poderia assim ser atribuída a presença de flanges para pressões, neste caso, consideradas altas.

Figura 66: Comparação dos resultados da Prensa de Bancada vs Prensa Industrial – Areia Grossa 1,8 N/mm².



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sumário - Comparação entre a prensa industrial e a prensa de bancada

A Tabela 13 e a Figura 67 descrevem as condições dos testes e os resultados obtidos na prensa industrial e na prensa de bancada.

Tabela 13: Condições operacionais e resultados das campanhas realizadas na prensa industrial e na prensa de bancada

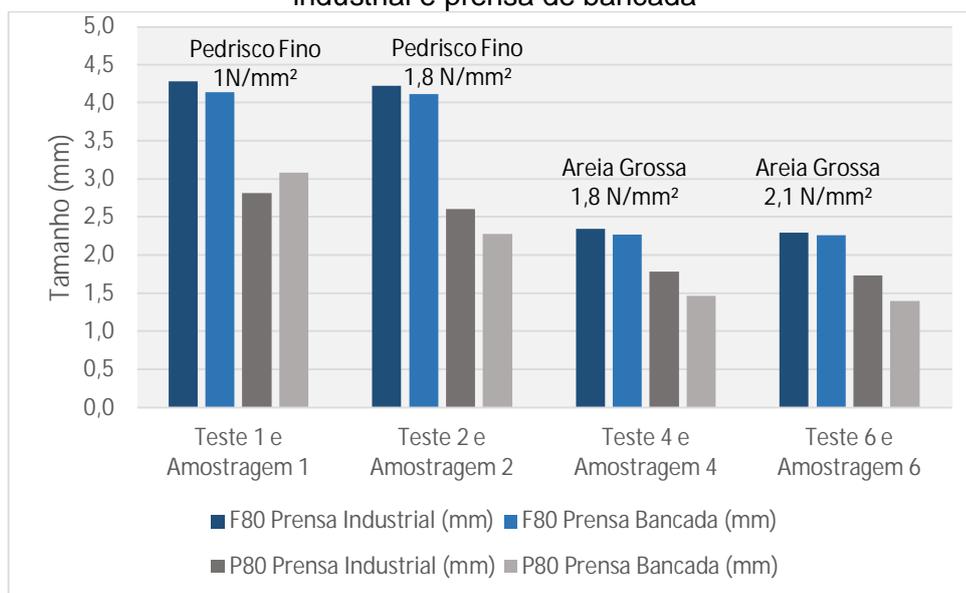
ID Teste D1000	ID Amostragem de Referência	Tipo de Alimentação	Pressão Específica (N/mm ²)	F ₈₀ Prensa Industrial (mm)	F ₈₀ Prensa Bancada (mm)	P ₈₀ Prensa Industrial (mm)	P ₈₀ Prensa Bancada (mm)	Variação do P ₈₀ do produto (%)
1	1	PF	1,0	4,28	4,14	2,81	3,08	-9,6
2	2	PF	1,8	4,22	4,11	2,60	2,28	12,3
4	4	AG	1,8	2,34	2,27	1,78	1,46	17,9
6	6	AG	2,1	2,29	2,26	1,73	1,40	19,1

*PF – Pedrisco Fino

** AG – Areia Grossa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67: Condições operacionais e resultados das campanhas realizadas na prensa industrial e prensa de bancada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostra a Tabela 13, os resultados dos testes de baixa pressão específica (1 N/mm^2) realizado com o Pedrisco Fino resultaram em distribuições granulométricas de produtos praticamente coincidentes, para alimentações também praticamente coincidentes.

Nos cenários de média e alta pressão, respectivamente $1,8$ e $2,1 \text{ N/mm}^2$, as distribuições granulométricas do produto das prensas de bancada e industrial apresentaram variação de até 20% no P_{80} . No entanto, as curvas granulométricas do produto da prensa de bancada foram significativamente mais finas.

Com base nos resultados obtidos por Knorr et.al. (2013), a hipótese levantada foi de que a presença de flanges laterais poderia ser a causa destes resultados. Ou seja, como os flanges laterais propiciam melhor distribuição da pressão ao longo dos rolos, o resultado seria distribuições granulométricas mais finas de produto, se comparadas à operação com rolos dotados das tradicionais *cheek plates*.

5.1.6 Testes CLP

Os testes de CLP foram realizados com amostras do Pedrisco Fino e Areia Grossa. Para ambos os testes, foi utilizado uma amostra da alimentação do circuito HPGR

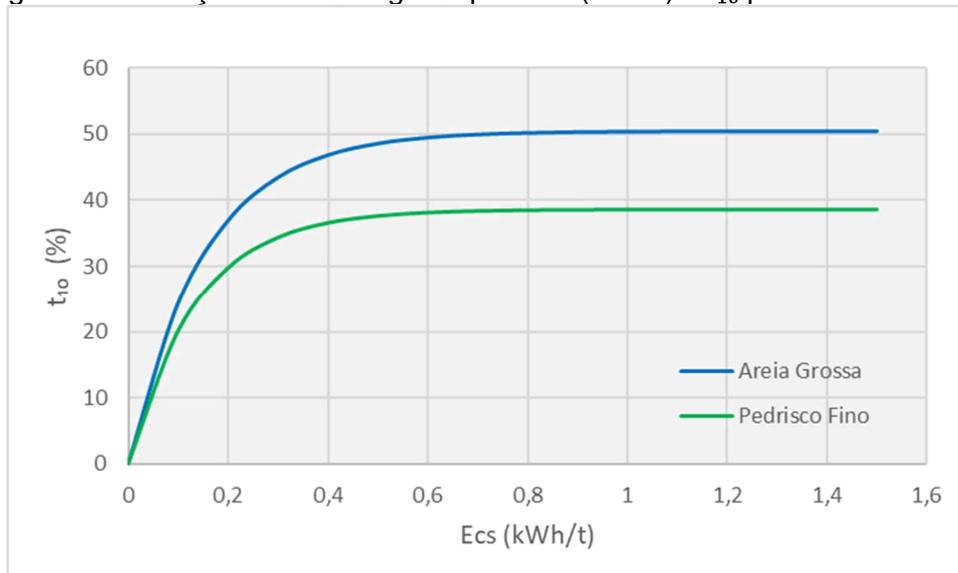
tomada durante as amostragens. Os resultados obtidos estão sumarizados nas Tabela 14 e Figura 68.

Tabela 14 – Parâmetros A, b e Índice de Quebra (Axb).

Amostra	A	b	Axb
Areia Grossa	50,4	6,59	332
Pedrisco Fino	38,6	7,36	284

Fonte: Elaborado pelo autor.

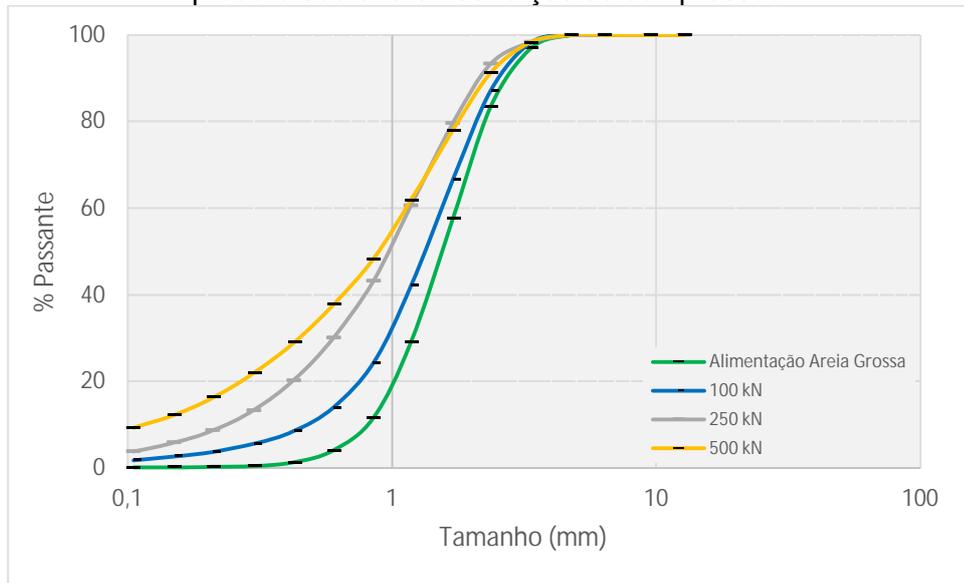
Figura 68 - Relação entre Energia Específica (kWh/t) e t_{10} para o ensaio CLP.



Fonte: Elaborado pelo autor

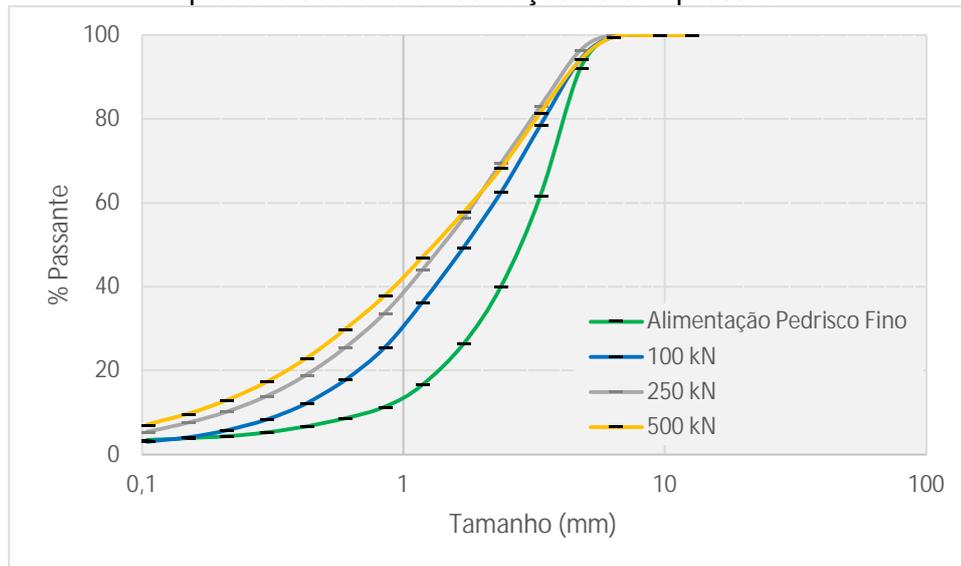
A Figura 69 e a Figura 70 apresentam, respectivamente, as distribuições granulométricas do produto dos testes CLP realizados com Areia Grossa e Pedrisco Fino.

Figura 69: Testes CLP realizados com a Areia Grossa - Distribuição granulométrica do produto sob diferentes forças de compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70: Testes CLP realizados com Pedrisco Fino - Distribuição granulométrica do produto sob diferentes forças de compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 69 mostra distribuições granulométricas progressivamente mais finas, conforme o aumento da força de compressão aplicada ao leito de partículas. É possível observar que para todos os testes realizados com a Areia Grossa, o P_{80} diminui e a quantidade de finos passante na malha de 0,10 mm aumenta com a elevação da força de compressão utilizada no teste.

A Figura 70 mostra que para os testes realizados com Pedrisco Fino, o P_{80} também diminuiu com o aumento da força de compressão aplicada ao leito de partículas. Porém o aumento da quantidade de finos passante em 0,10 mm não é observado no teste conduzido com 100 kN.

5.1.7 Análise de Forma da Partícula

Apesar da forma da partícula não ser um parâmetro requerido pela norma que apresenta os requisitos da produção e uso agregados para concreto (NBR ABNT 7211, 2022), ensaios para determinação da forma das partículas foram realizados de maneira complementar em amostras geradas nas amostragens. Os ensaios foram executados utilizando-se o equipamento CAMSIZER. A Figura 71 ilustra parte da realização desse ensaio.

Figura 71: Ensaio da forma das partículas.



Fonte: Acervo do autor.

Os ensaios resultaram em dois parâmetros para avaliação morfológica das partículas: a relação de aspecto e a esfericidade. A definição dos parâmetros obtidos foi apresentada anteriormente na Figura 46. Quanto menor a relação de aspecto, mais alongadas são as partículas, enquanto o valor 1 indica uma esfera perfeita. Já a interpretação do parâmetro de esfericidade, não é tão trivial. A esfericidade está relacionada à angulosidade da partícula, estimado pela irregularidade do perímetro projetado, ou seja, com o arredondamento da partícula (HAWLITSCHKEK, 2014).

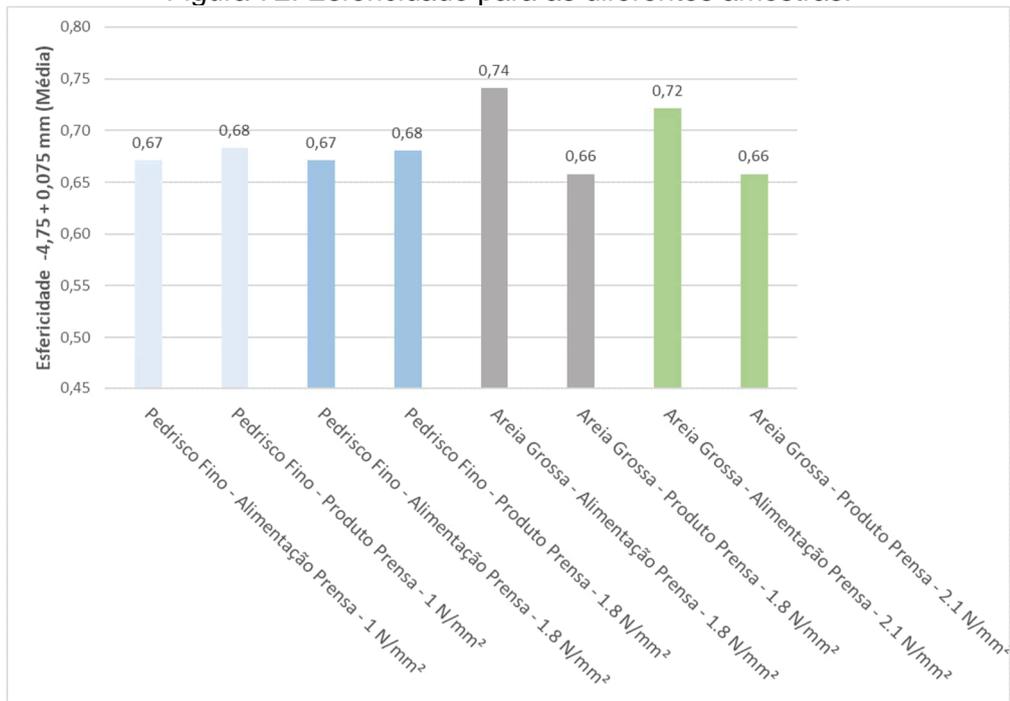
Os ensaios foram realizados com amostras da alimentação e produto da prensa de todas as amostragens. A Tabela 15 apresenta os valores médios de esfericidade e relação de aspecto obtidos na fração de interesse (-4,75 +0,075 mm) para as diferentes amostras, enquanto a Figura 72 e a Figura 73 apresentam os gráficos desses mesmos resultados.

Tabela 15: Esfericidade e Razão de Aspecto.

ID Amostragem	Pressão Operacional do HRC no momento da amostragem	Tipo de Alimentação	ID Pontos amostrados	Esfericidade (Médio) -3 mm +0,075 mm	Razão de Aspecto (médio) -3 mm + 0,075mm
Amostragem 1	1 N/mm ²	Pedrisco Fino	Pedrisco Fino - Alimentação Prensa - 1 N/mm ²	0,67	0,67
			Pedrisco Fino - Produto Prensa - 1 N/mm ²	0,68	0,69
Amostragem 2	1,8 N/mm ²	Pedrisco Fino	Pedrisco Fino - Alimentação Prensa - 1.8 N/mm ²	0,67	0,68
			Pedrisco Fino - Produto Prensa - 1.8 N/mm ²	0,68	0,69
Amostragem 4	1,8 N/mm ²	Areia Grossa	Areia Grossa - Alimentação Prensa - 1.8 N/mm ²	0,74	0,68
			Areia Grossa - Produto Prensa - 1.8 N/mm ²	0,66	0,68
Amostragem 6	2,1 N/mm ²	Areia Grossa	Areia Grossa - Alimentação Prensa - 2.1 N/mm ²	0,72	0,68
			Areia Grossa - Produto Prensa - 2.1 N/mm ²	0,66	0,67

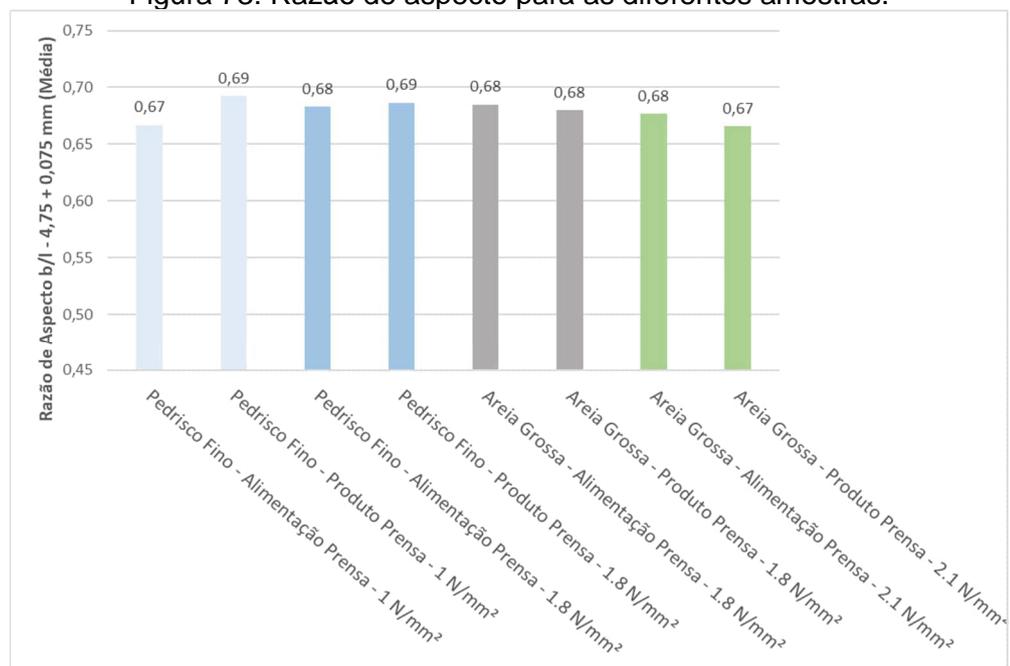
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72: Esfericidade para as diferentes amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73: Razão de aspecto para as diferentes amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostra a Tabela 17, houve pequenos aumentos nos parâmetros de esfericidade e razão de aspecto no produto em relação à alimentação da Amostragem 1 (Pedrisco Fino e 1 N/mm²). Já para a Amostragem 2 (Pedrisco Fino e 1,8 N/mm²) os aumentos foram menores.

Para a Amostragem 4 e 6 (Areia Grossa e 1,8 e 2,1 N/mm², respectivamente) houve um decréscimo nos valores de esfericidade, enquanto o parâmetro razão de aspecto se manteve-se praticamente constante para os produtos de ambas as amostragens. Destaca-se que as amostras de alimentação para Areia Grossa já indicaram um valor relativamente alto de esfericidade.

Com base nos resultados nessa campanha, entende-se que a variação de pressão específica para um mesmo tipo de alimentação não resultou em mudança significativa na esfericidade e razão de aspecto dos produtos.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com a alimentação de Pedrisco Fino vão de encontro com os estudos conduzidos por Oliveira (2011) que indicam que a prensa é capaz de gerar agregados miúdos de boa qualidade morfológica. Nesses estudos, Oliveira (2011) observou que no aspecto morfológico (esfericidade e razão de aspecto) o produto da prensa teve desempenho superior em relação ao produto do britador cônico e em relação a sua própria alimentação, melhorando assim as características desse material após o processamento nesse equipamento. Destaca-se que os estudos experimentais conduzidos por Oliveira (2011), foram realizados com material com F₈₀ próximo a 7 mm, enquanto que no presente trabalho as amostras de Pedrisco Fino apresentaram F₈₀ de 4,3 mm.

5.1.8 *Wi de Bolas*

Uma amostra de alimentação de Areia Grossa foi empregada para a realização de um ensaio de Wi de moinho bolas. Os resultados estão apresentados Tabela 16.

Tabela 16: Resultados do teste de WI de Bolas.

Amostra	Malha Teste (µm)	F80 (mm)	P80 (mm)	WI (kWh/t)
Areia Grossa	149	2,217	0,119	15,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

O W_i de 15,73 kWh/t indica que a amostra testada apresentou alta tenacidade, conforme a classificação listada na Tabela 17 proposta por Napier-Munn et al., (1999).

Tabela 17: Classificação qualitativa do W_i .

Intervalo	Classificação
7-9	Baixa
9-14	Média
14-20	Alta
>20	Muito Alta

Fonte: Napier-Munn et al., 1996. Adaptado pelo autor.

5.2 BALANÇO DE MASSAS

Os balanços de massas foram desenvolvidos com base nos dados gerados nas amostragens, com objetivo de se obter consistências entre vazões e distribuições granulométricas para todos os fluxos do circuito, em cada amostragem.

Destaque-se que, apesar da alimentação da peneira (Ponto 3) ter sido amostrado, o acesso físico a este fluxo foi bastante limitado durante as amostragens. Essa restrição refletiu-se no balanceamento, gerando assim maiores diferenças entre distribuições calculadas e experimentais, muito embora tais diferenças não fossem consideradas elevadas. É interessante notar que essas diferenças foram menores para as amostragens com processamento da Areia Grossa em relação as amostragens com Pedrisco Fino.

Embora se reconheça para efeito de balanço que a melhor medida seja o produto do silo, neste caso adotou-se o produto da prensa como sendo a alimentação da peneira. Este critério se deve a baixa qualidade da amostra de alimentação da peneira em relação ao produto da prensa. Ou seja, o ponto de tomada de amostra de alimentação da peneira apresentava dificuldades de acesso do amostrador.

Diante dessa condição, foi adotada uma simplificação no balanceamento, que consistiu em considerar a granulometria do Ponto 3 igual ao do Ponto 2, conforme destacados anteriormente na Figura 50.

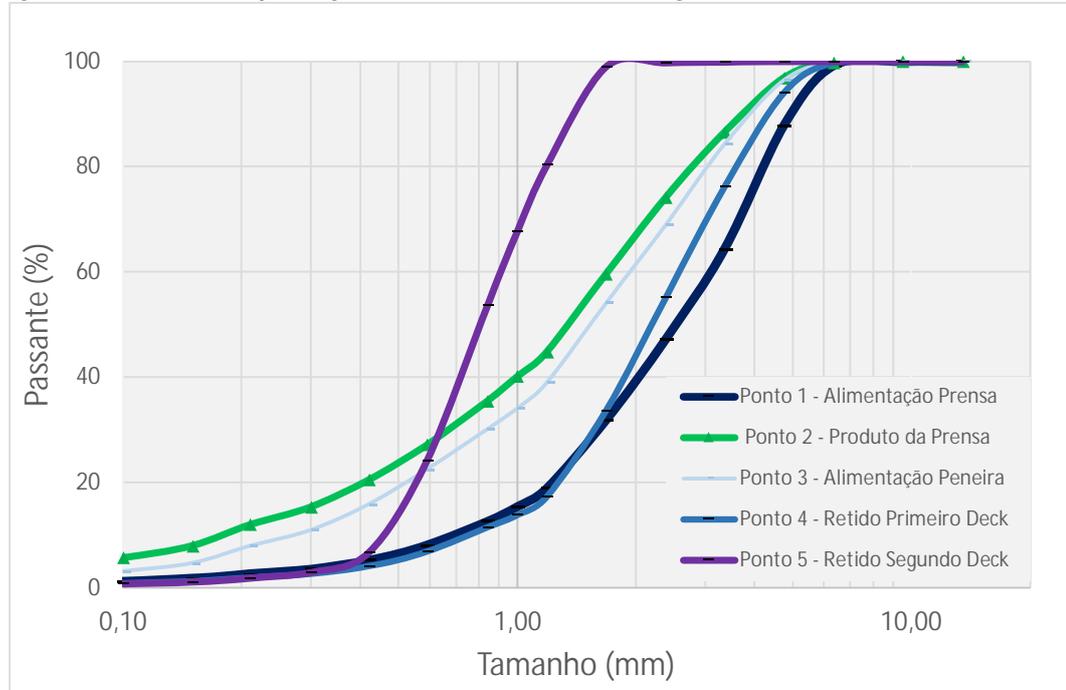
Destaca-se também que devido às limitações físicas da instalação, não foi possível tomar amostras do *undersize* da peneira. Como este fluxo é essencial para o

fechamento dos balanços de massas, adotou-se o critério de que toda a fração mais grossa do que a abertura da tela da peneira fosse encaminhada ao fluxo de *oversize* da mesma. Embora reconheça-se que na prática haja material mais grosso do que a abertura da tela no *undersize* da peneira, tal fração é geralmente pequena, o que torna a premissa razoavelmente realista.

5.2.1 Granulometrias

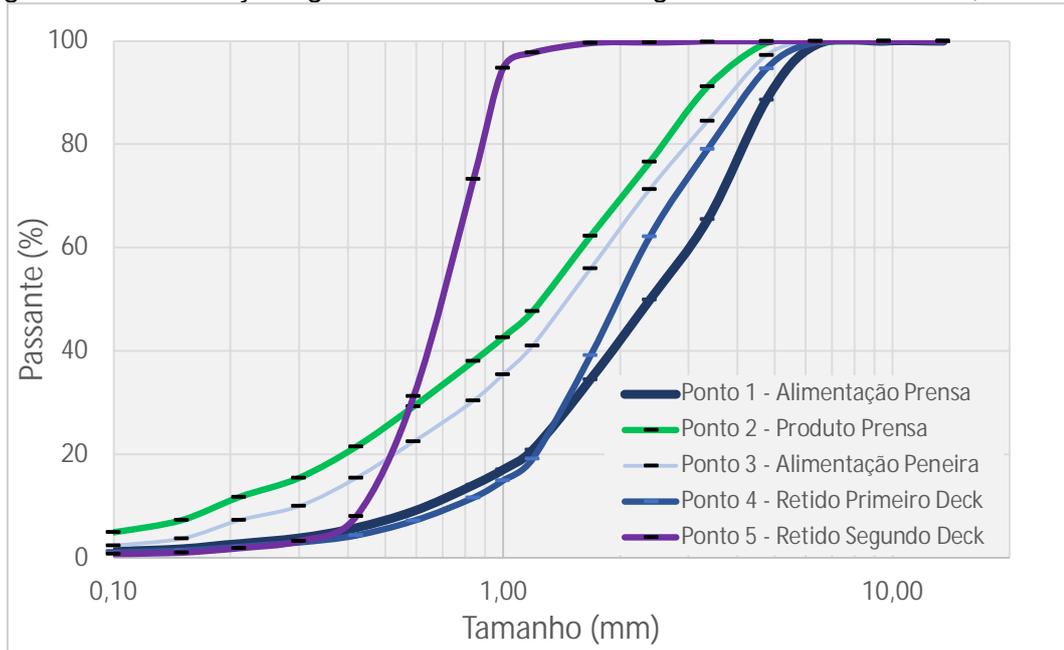
As Figura 74, Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78, apresentam as distribuições granulométricas balanceadas obtidas para cada uma das amostragens.

Figura 74 – Distribuições granulométricas - Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm²



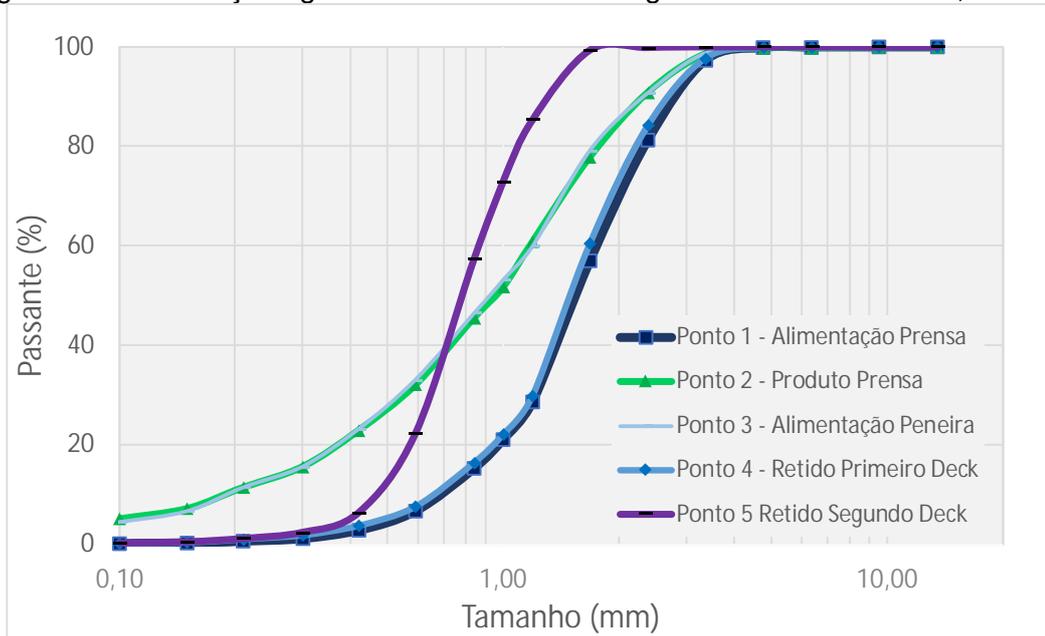
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 75 - Distribuições granulométricas - Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm²



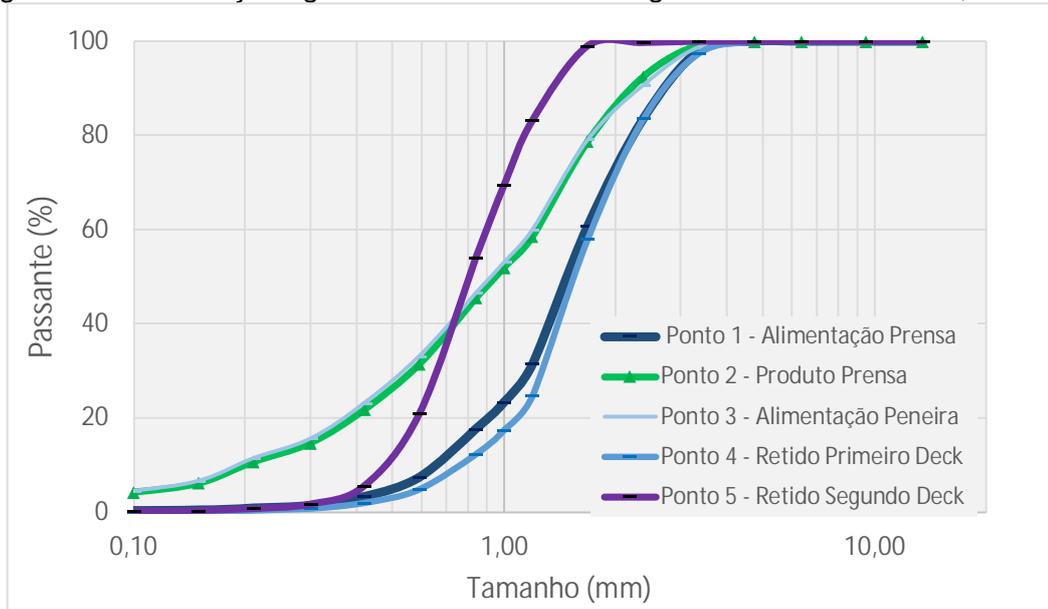
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 76 - Distribuições granulométricas - Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm²



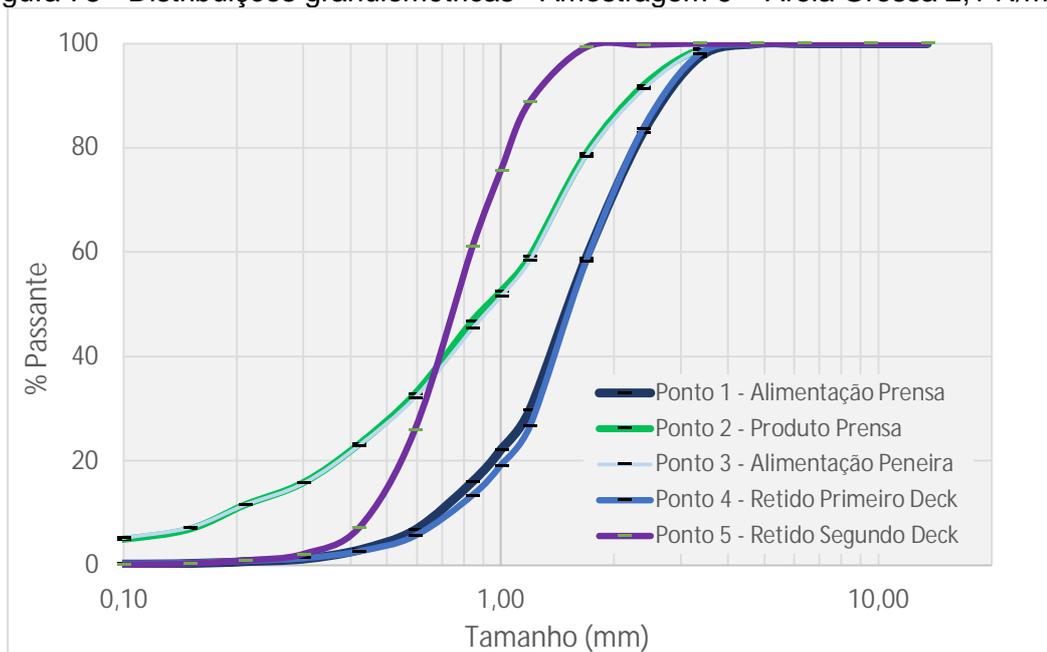
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 77 - Distribuições granulométricas - Amostragem 5 – Areia Grossa 1,8 N/mm²



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 78 - Distribuições granulométricas - Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm²



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Vazões

Devido à ausência de balanças nos fluxos amostrados, a vazão de alimentação de sólidos do HRCTM foi calculada com base na equação da continuidade de Morrell, et al., (1997), reproduzida na Equação 15.

$$M = 3600 \cdot U \cdot L \cdot \rho_g \cdot x_g \quad (15)$$

onde

M	vazão de alimentação do HRC (t/h)
U	velocidade tangencial dos rolos (m/s)
L	comprimento dos rolos (m)
ρ_g	densidade dos flakes (t/m ³)
x_g	abertura operacional dos rolos (m)

A velocidade utilizada foi aquela registrada durante as amostragens, de 16,2 rpm, que corresponde a 50,7% da velocidade nominal dos rolos (velocidade nominal de 32 RPM).

A Tabela 18 apresenta a vazão (t/h) de cada fluxo do circuito resultante dos respectivos balanços de massas, considerando a vazão de alimentação do HRC como referência.

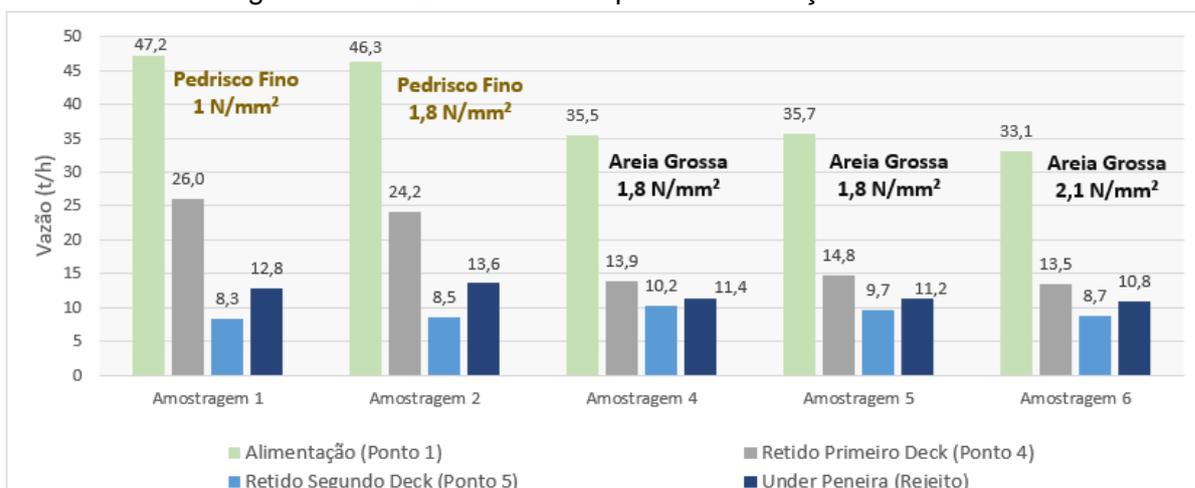
Tabela 18 – Vazões de sólidos obtidas pelos balanços de massas

Amostragens	Alimentação (Ponto 1) (t/h)	Produto da Prensa (Ponto 2) (t/h)	Alimentação da Peneira (Ponto 3) (t/h)	Retido no Primeiro Deck (Ponto 4) (t/h)	Retido no Segundo Deck (Ponto 5) (t/h)	Undersize Peneira (Rejeito) (t/h)
1	47,2	47,2	47,2	26,0	8,3	12,8
2	46,3	46,3	46,3	24,2	8,5	13,6
4	35,5	35,5	35,5	13,9	10,2	11,4
5	35,7	35,7	35,7	14,8	9,7	11,2
6	33,1	33,1	33,1	13,5	8,7	10,8

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 79 apresenta em forma de gráfico os resultados descritos na Tabela 18.

Figura 79 – Vazões obtidas a partir do balanço de massas



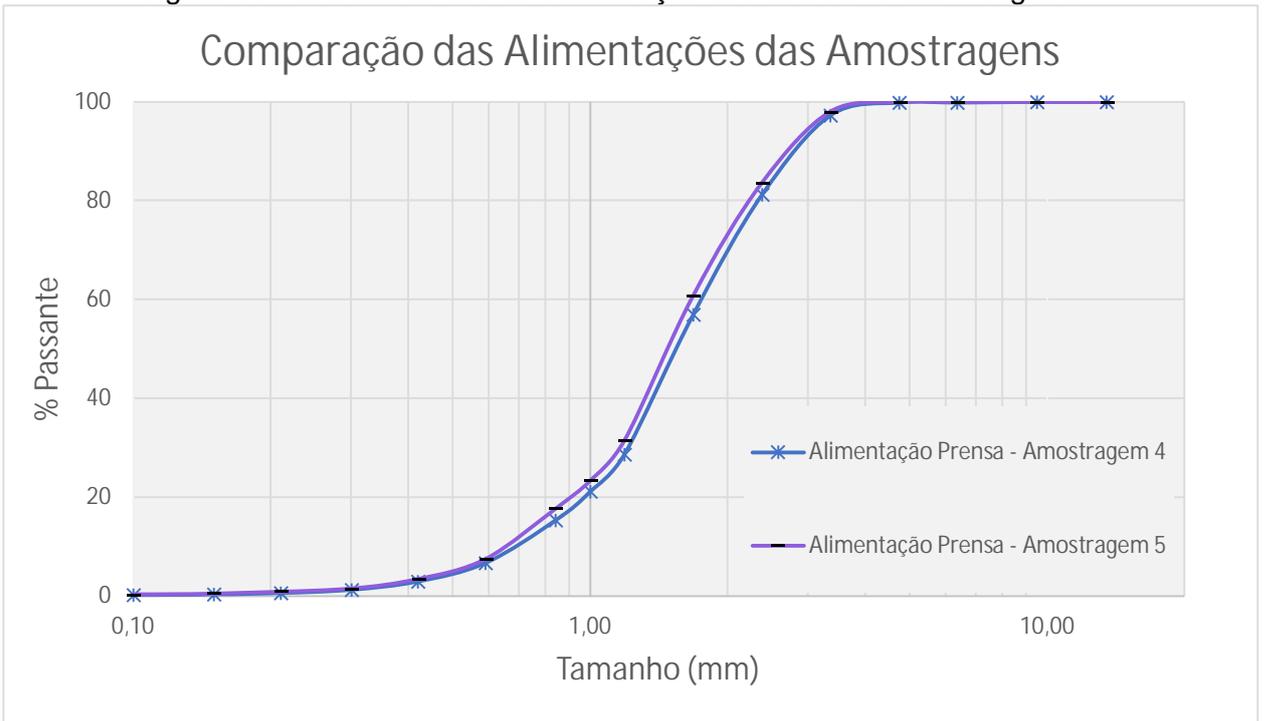
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicaram maior vazão de sólidos do HRC™ associado à alimentação com Pedrisco em comparação com a Areia Grossa, embora o primeiro tenha apresentado granulometria de alimentação mais grosseira em comparação com o último. Os resultados também indicaram que para o cenário onde a prensa foi alimentada com Pedrisco Fino, a variação da pressão específica resultou em um pequeno aumento na vazão do produto Areia Filtro (Retido Segundo Deck – Ponto 5). Por outro lado, para o cenário onde a prensa foi alimentada com Areia Grossa, o aumento da pressão específica de 1,8 N/mm² para 2,1 N/mm² significou uma redução na vazão desse produto.

5.2.3 Reprodutibilidade

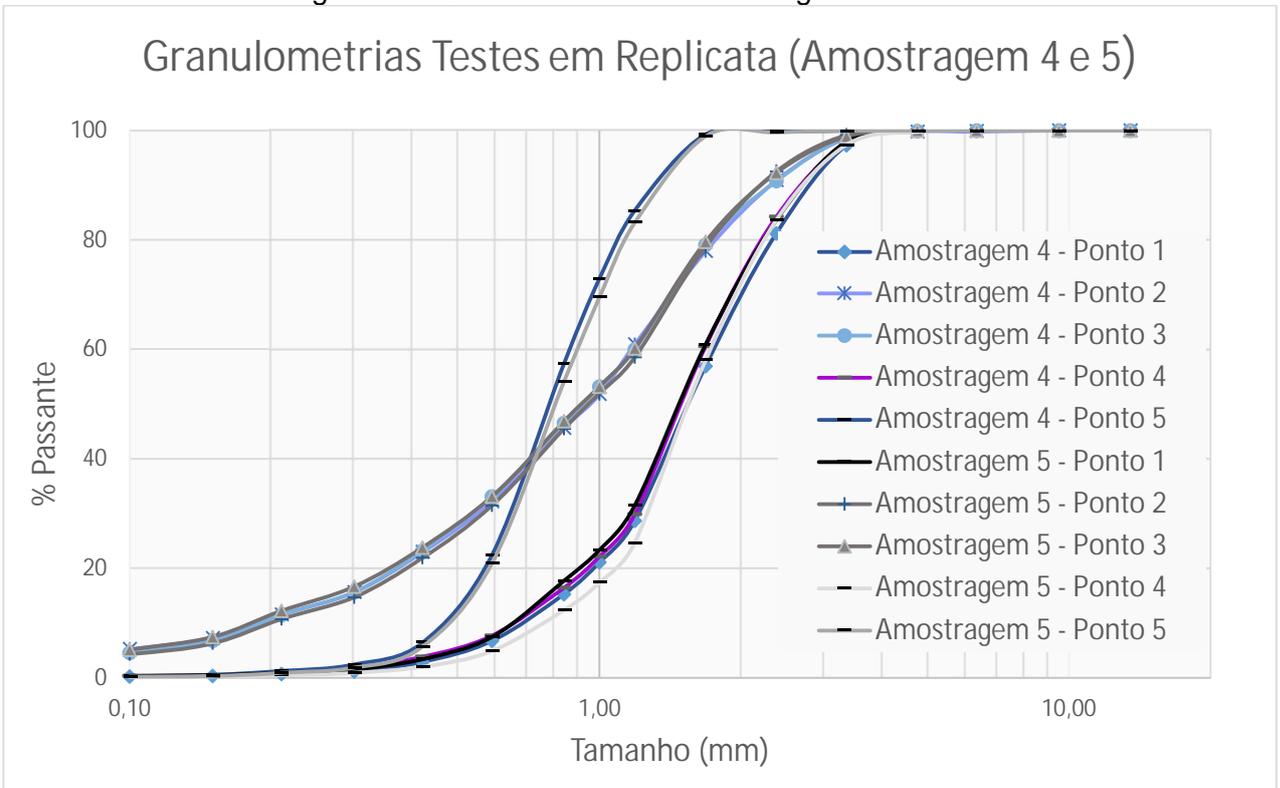
A reprodutibilidade de resultados das amostragens realizadas foi avaliada em função das distribuições granulométricas obtidas a partir das Amostragens 4 e 5, esta última realizada especificamente para este fim. A Figura 80 e a Figura 81 apresentam, respectivamente, os gráficos das distribuições granulométricas das alimentações e dos pontos do circuito obtidas a partir da Amostragem 4 e Amostragem 5.

Figura 80 - Granulometrias de alimentação das diferentes amostragens.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 81 - Granulometrias da amostragem 4 e 5.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 80 e Figura 81 mostram distribuições granulométricas praticamente coincidentes, indicando assim boa reprodutibilidade das amostragens realizadas.

5.3 ÍNDICES DE DESEMPENHO

A Tabela 19 apresenta os valores dos índices selecionados para avaliar comparativamente o desempenho do HRC™ em cada uma das amostragens realizadas. Os índices de desempenho foram obtidos a partir das variáveis de processos e dados gerados em ensaios de bancada e de laboratório.

Tabela 19: Condições de operação e principais índices de desempenho de cada amostragem

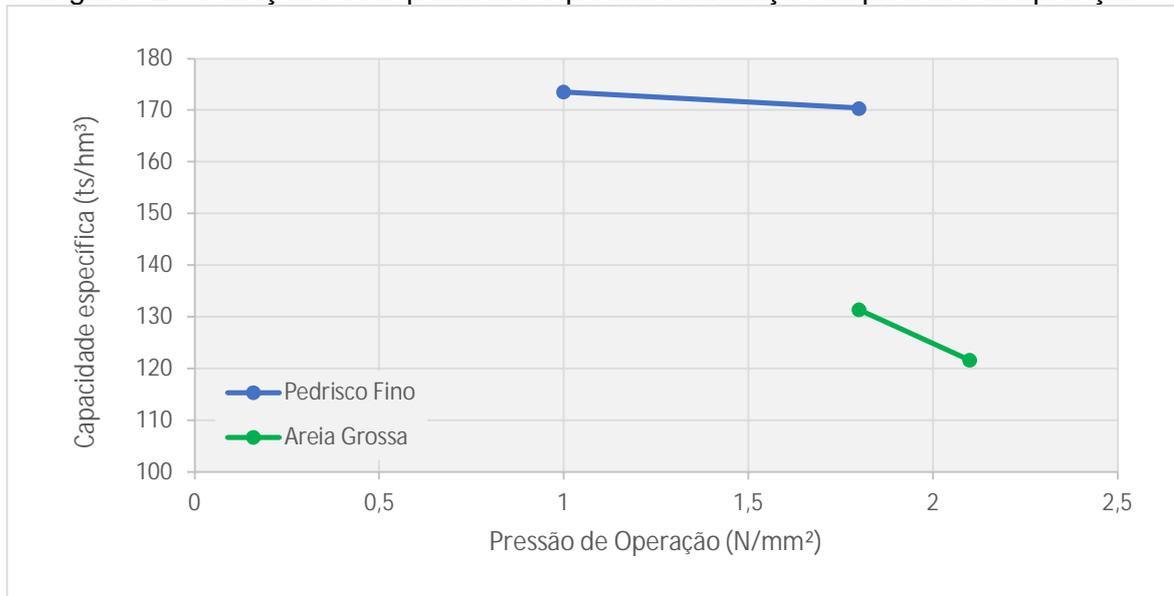
Amostragens	Tipo de Alimentação	Pressão (N/mm ²)	Umidade Alimentação (%)	Vazão de sólidos de Alimentação (t/h)	Capacidade específica, "m-dot" (ts/hm ³)	Consumo energético (kWh)	Consumo energético específico (kWh/t)	Densidade do flake (g/cm ³)	Densidade Aparente Alimentação (g/cm ³)	Abertura Operacional (mm)	Distribuições Granulométricas				Relação de Redução	
											F ₈₀ (mm)	P ₈₀ (mm)	F ₅₀ (mm)	P ₅₀ (mm)	(P ₈₀)	(P ₅₀)
1	Pedrisco Fino	1,0	7,9	47,2	174	154,4	3,27	2,06	1,73	18,7	4,28	2,81	2,53	1,36	1,52	1,87
2	Pedrisco Fino	1,8	7,9	46,3	170	161,5	3,49	2,14	1,72	17,7	4,22	2,60	2,39	1,27	1,63	1,89
4	Areia Grossa	1,8	4,6	35,5	131	125,2	3,53	2,03	1,65	14,3	2,34	1,78	1,57	0,95	1,31	1,65
5	Areia Grossa	1,8	4,5	35,7	131	125,3	3,51	2,02	1,63	14,4	2,27	1,74	1,52	0,95	1,30	1,60
6	Areia Grossa	2,1	4,7	33,1	122	118,4	3,58	2,06	1,65	13,1	2,29	1,73	1,55	0,93	1,32	1,67

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados listados na Tabela 19 foram agrupados conforme o aspecto e estão apresentados na forma de gráficos assim como de análises específicas.

A Figura 82 apresenta as variações de capacidade específica em função da pressão de operação.

Figura 82 - Variações da capacidade específica em função da pressão de operação

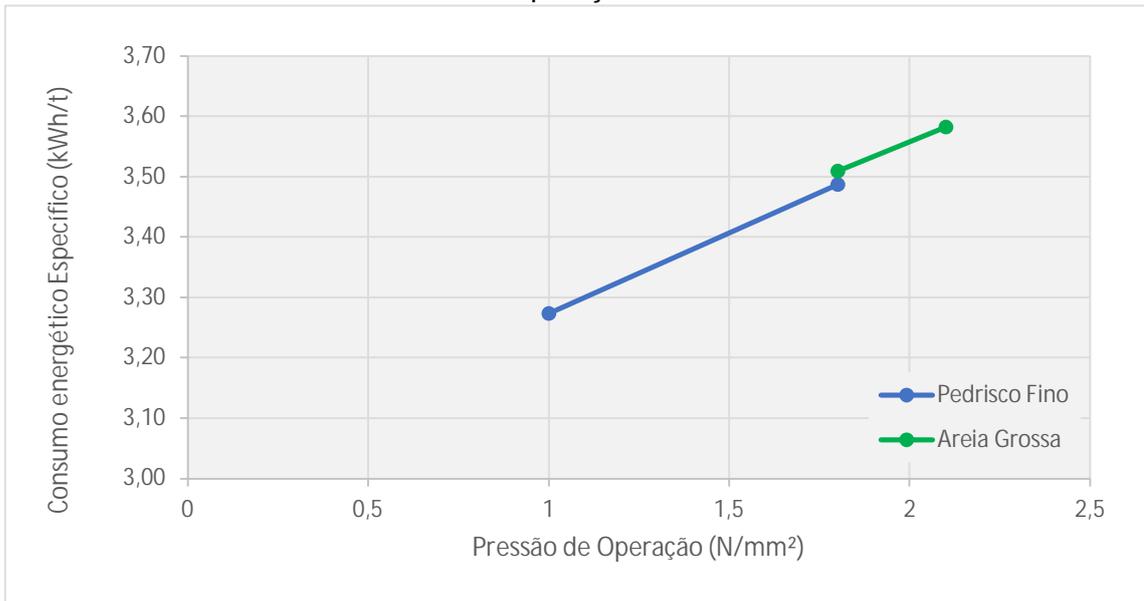


Fonte: Elaborado pelo autor

Neste caso, observa-se um decréscimo da capacidade específica para ambos os materiais conforme o aumento da pressão de operação. Esse comportamento é interpretado como consequência da redução da abertura operacional do equipamento.

A Figura 83 apresenta as variações do consumo energético específico em função da pressão de operação.

Figura 83 - Variações do consumo energético específico em função da pressão de operação

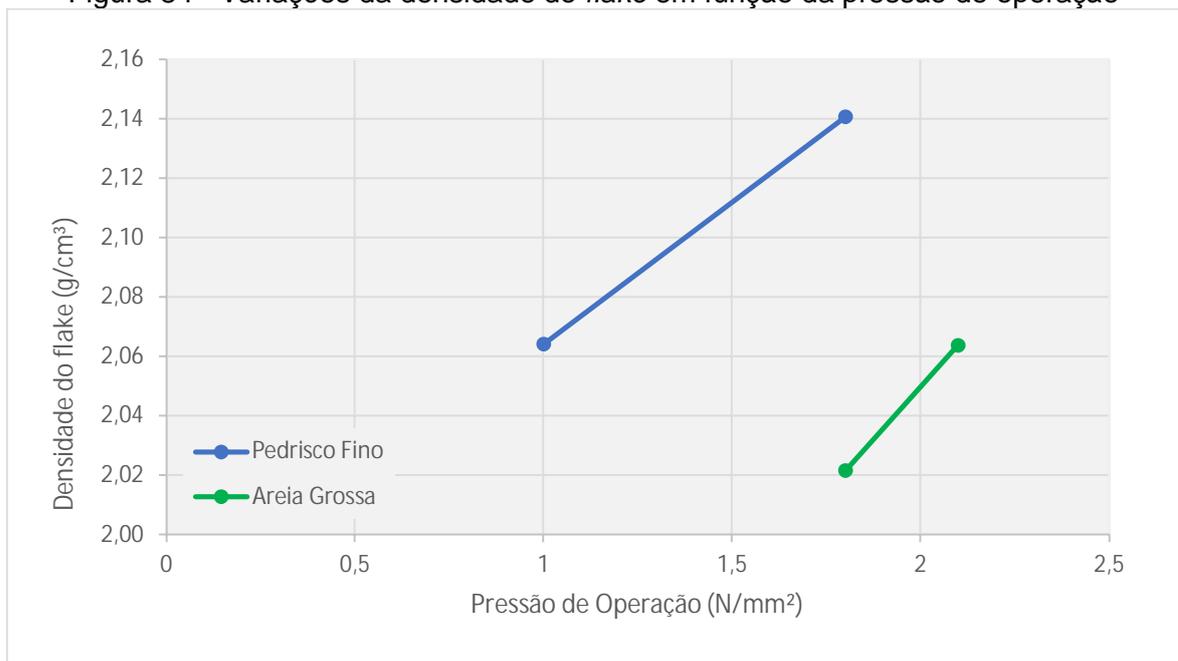


Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento do consumo energético específico observado no gráfico da Figura 73 é resultado do incremento de potência necessária para prover o aumento da pressão de operação.

A Figura 84 apresenta as variações de densidade do *flake* em função da pressão de operação.

Figura 84 - Variações da densidade do *flake* em função da pressão de operação

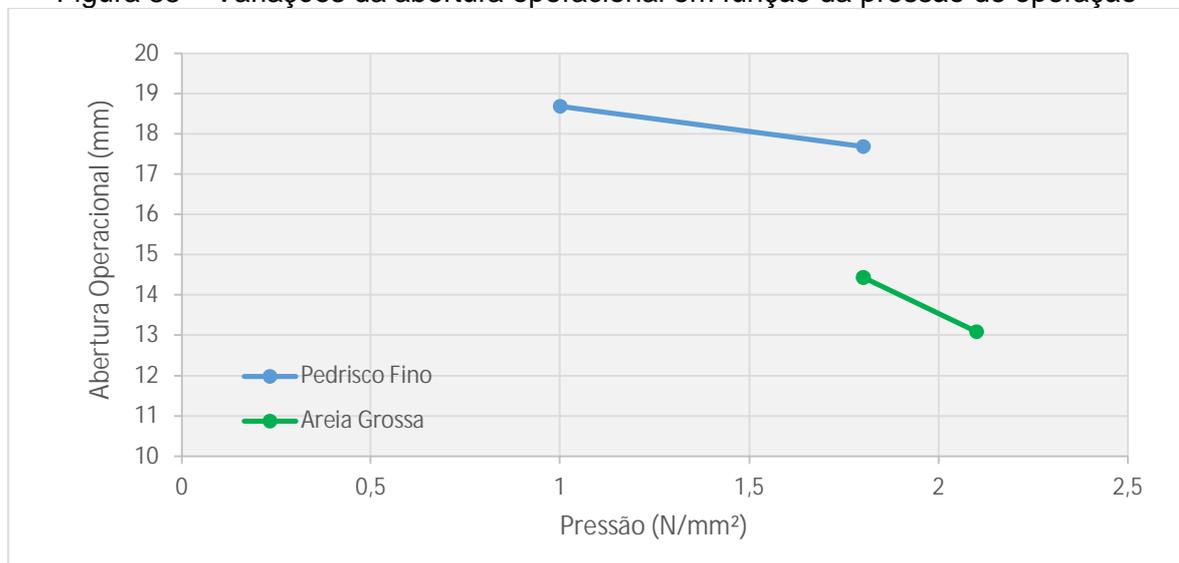


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 84 indica aumento da densidade do *flake* como consequência do aumento da pressão de operação. Assim, o aumento da pressão de operação resulta em redução da abertura operacional, gerando consequentemente maior adensamento do produto do HRC™, comprovando assim a afirmação de Morley (2010), que a pressão operacional influencia inversamente a abertura operacional.

Conforme mencionado anteriormente, a partir da medição da espessura dos *flakes* obtidos nas amostragens foi calculada a abertura operacional (*gap*) do HRC™ em cada amostragem. A Figura 85 apresenta as variações da abertura operacional em função da pressão de operação.

Figura 85 – Variações da abertura operacional em função da pressão de operação



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 85 comprova a diminuição da abertura operacional em função do aumento da pressão de operação do HRC™.

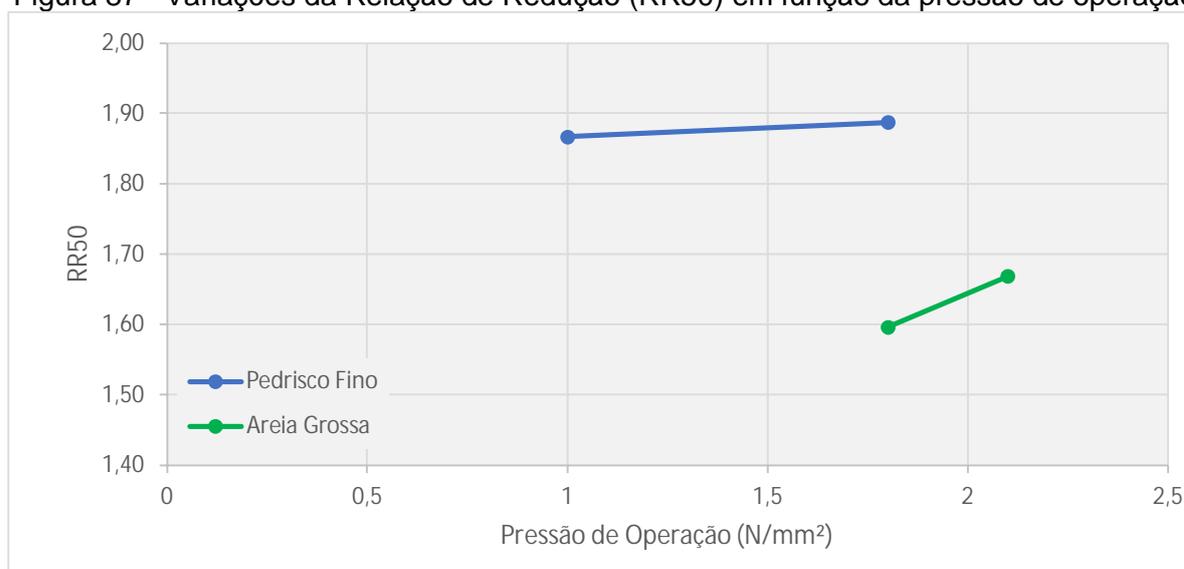
A Figura 86 e a Figura 87 mostram as variações das relações de redução – RR, respectivamente para P_{80} (RR80) e P_{50} (RR50), em função da pressão de operação do HRC™ durante as amostragens.

Figura 86 - Variações da Relação de Redução (RR80) em função da pressão de operação



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 87 - Variações da Relação de Redução (RR50) em função da pressão de operação

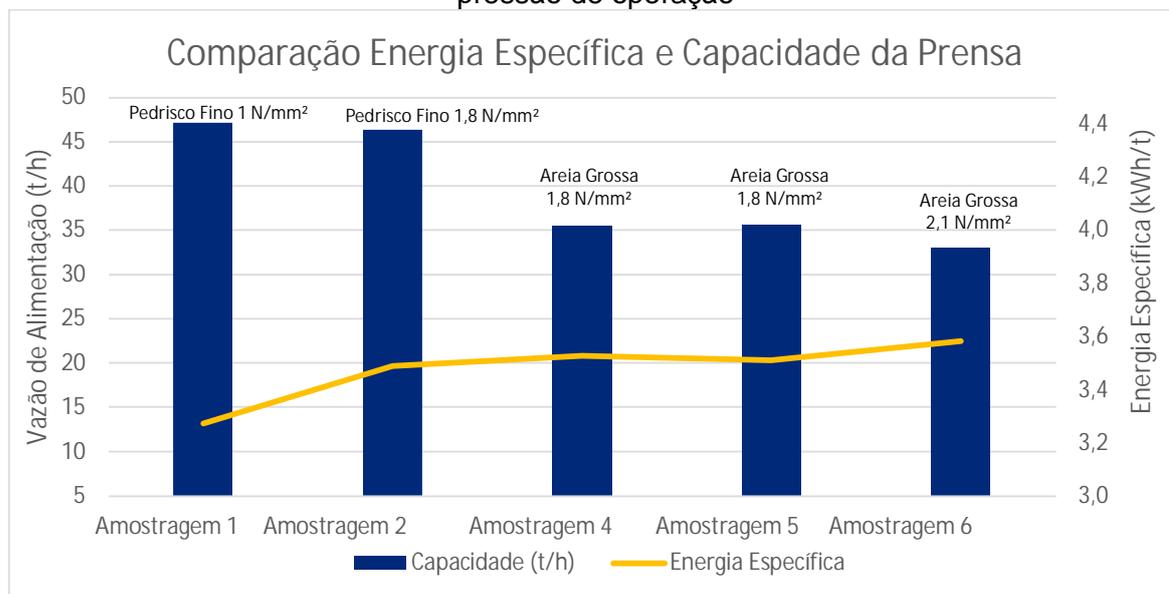


Fonte: Elaborado pelo autor

Em ambos os casos, as relações de redução aumentaram em função do aumento da pressão de operação, ou seja, os produtos tornaram-se mais finos com o aumento da pressão de operação.

A Figura 88 apresenta as variações de vazão de alimentação e energia específica do HRC™ em função da pressão de operação.

Figura 88 – Variações das vazões de alimentação e de energias específicas em função da pressão de operação



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se no gráfico da Figura 88 que, para ambos os tipos de alimentação, a energia específica aumentou à medida que a capacidade da prensa diminuiu. Trata-se de um efeito combinado, ou seja, o aumento de pressão aumenta a demanda de potência e, concomitantemente, uma redução na abertura entre rolos e, conseqüentemente, redução na vazão de alimentação.

Uma forma mais abrangente de avaliar a eficiência do processo de cominuição é integrar a granulometria ao consumo específico de energia. Neste caso, o Wi operacional foi selecionado, conforme descrito por Rowland (1983) para estabelecimento da eficiência do processo.

Oliveira (2015) pontua algumas observações relacionadas ao uso do Wi operacional como índice para avaliação de desempenho em circuitos que utilizam HPGR. Entre essas observações, destaca-se que a prensa de rolos situa-se em uma faixa de operação entre moagem e britagem. Além disso, uma condição para aplicação do Wi é o paralelismo entre a distribuição granulométrica da alimentação e produto do circuito, muito embora nem sempre seja verificada, pois a equação de Bond considera F_{80} e P_{80} , e não a curva granulométrica completa.

Mesmo sob tais restrições, os resultados e análises aqui descritos foram considerados apenas orientativos para comparações entre as diferentes amostragens. A Equação 14 foi utilizada nessas análises.

$$W_{iop} = \frac{E_{cs}}{\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)} \quad (14)$$

Onde:

W_{iop} Wi operacional (kWh/t)

E_{cs} Energia específica do HRC (kWh/t)

P_{80} Abertura da peneira pela qual passam 80% do produto do HRC™ (μm)

F_{80} Abertura da peneira pela qual passam 80% da alimentação do HRC™ (μm)

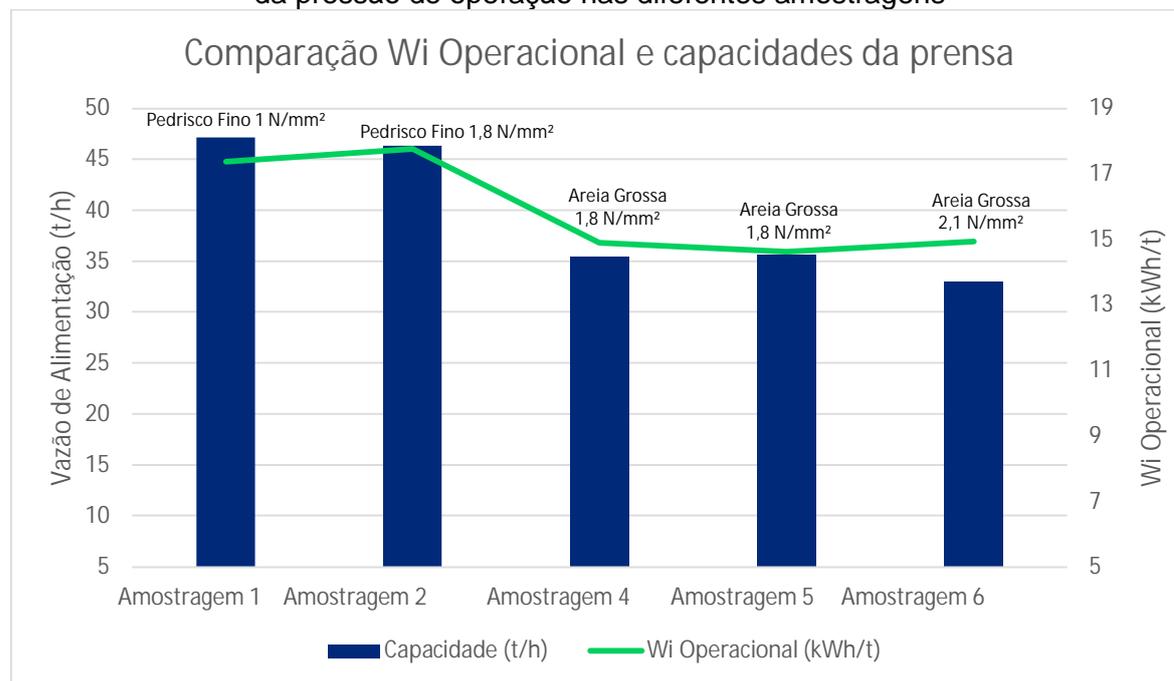
Tabela 20 apresenta os resultados de Wi operacional calculados para as diferentes amostragens, enquanto a Figura 89 apresenta as variações do WI operacional e das vazões de alimentação do HRC™ em função das diferentes pressões de alimentação.

Tabela 20: Wi Operacional calculados para as diferentes amostragens.

Amostragem	Wiop (kWh/t)
1	17,4
2	17,8
4	14,9
5	14,6
6	14,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 89 – Variações do Wi Operacional e das vazões de alimentação do HRC em função da pressão de operação nas diferentes amostragens



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicaram variações aqui consideradas muito pequenas do Wi operacional em função do aumento da pressão específica, para cada um dos dois tipos de alimentação. Entretanto, nota-se uma elevação do Wi operacional no processamento do Pedrisco Fino em relação aos valores obtidos para a Areia Grossa, demonstrando assim a influência do tipo de material processado nesta variável.

5.4 INDICADORES PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS EM RELAÇÃO ÀS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA AREIA MANUFATURADA

As características dos produtos obtidos nas amostragens foram comparadas àquelas descritas nas respectivas Normas Brasileiras de produção e uso de areia.

A primeira comparação foi realizada com a descarga do HRC™ e o produto Areia Bloco, o primeiro representando o produto direto do HRC™, enquanto o último correspondia ao material retido no primeiro deck da peneira (Ponto 4). Esses dois produtos foram então comparados com a Norma ABNT NBR7211 (NBR7211, 2022) relativa a agregado miúdo utilizado em concreto, que indica que esse material deve atender aos seguintes parâmetros:

- Granulometrias - zona utilizável, bem como limites inferior e superior;
- Módulo de finura - referido como a soma das porcentagens acumuladas nas malhas 9,5, 6,3, 4,75, 2,36, 1,18, 0,600, 0,300 e 0,150 mm divididas por 100;
- Limite de 5% do material passante por uma abertura de tela de 0,075 mm;
- Presença de argila e/ou materiais friáveis.

Além dos parâmetros citados na norma ABNT NBR7211, diversos autores destacam a criticidade e a influência de tais parâmetros na qualidade da areia para concreto (MIRANDA e SELMO, 2006; MONTIJA, 2007; GAUHAR et al., 2016).

A segunda comparação foi realizada com o produto Areia Filtro, correspondente ao retido no segundo deck da peneira (Ponto 5). Neste caso o produto de cada amostragem foi comparado com a Norma ABNT NBR11799, que aborda os materiais filtrantes (areia de filtro), indicando que esses materiais devem atender aos seguintes requisitos:

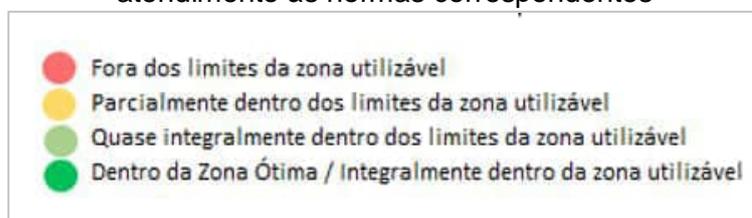
- 100% do material passante por uma malha de 4,78 mm ;
- Livre de poeira, argila e materiais orgânicos;
- Tamanho efetivo - referido como tamanho onde 10% do material é passante, em mm;
- Coeficiente de uniformidade - referido como a razão entre o tamanho onde 60% do material é passante e o tamanho onde 10% do material é passante.

A Norma ABNT NBR11799 não indica os valores específicos do tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade, mencionando apenas que os valores requeridos para esses parâmetros devem ser estabelecidos pelo mercado consumidor, ou seja, o cliente final (ABNT NBR11799; 1990).

A análise granulométrica dos produtos das amostragens foi descrita a seguir por meio de um gráfico contendo os limites inferior e superior de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR7211 (2022) para agregados miúdos (areia) utilizados em concreto. Uma tabela adicional foi incluída em cada caso para avaliar, por meio de uma escala de cores, cada um dos aspectos listados nas normas ABNT NBR7211 e ABNT NBR11799. Conforme apresentado na Figura 90, a escala de cores indica se os

materiais estão fora, parcialmente, quase totalmente ou totalmente dentro dos padrões.

Figura 90 - Escala de cores utilizada para classificação dos produtos de acordo com atendimento às normas correspondentes

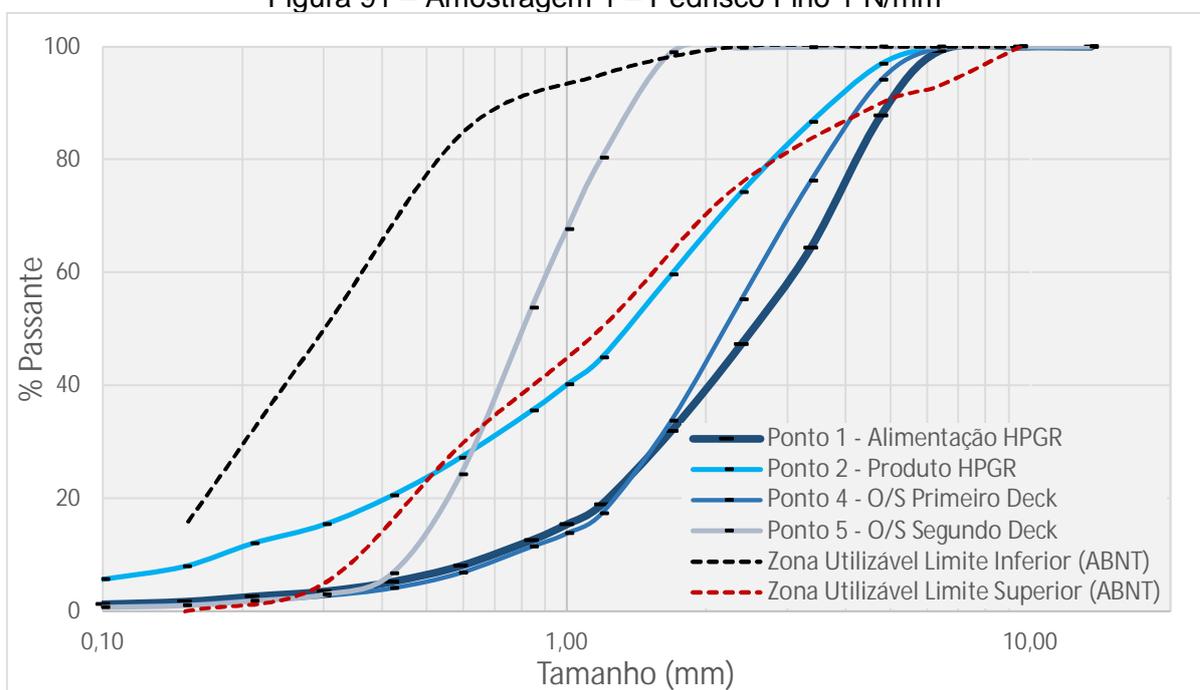


Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.1 Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1,0 N/mm²

A Figura 91 e a Tabela 21 apresentam, respectivamente, as distribuições granulométricas e as verificações de adequações dos produtos gerados na Amostragem 1.

Figura 91 – Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm²



Fonte: Almeida et al.; 2023. Modificado pelo autor.

Tabela 21 - Resultados Amostragem 1 – Pedrisco Fino 1 N/mm²

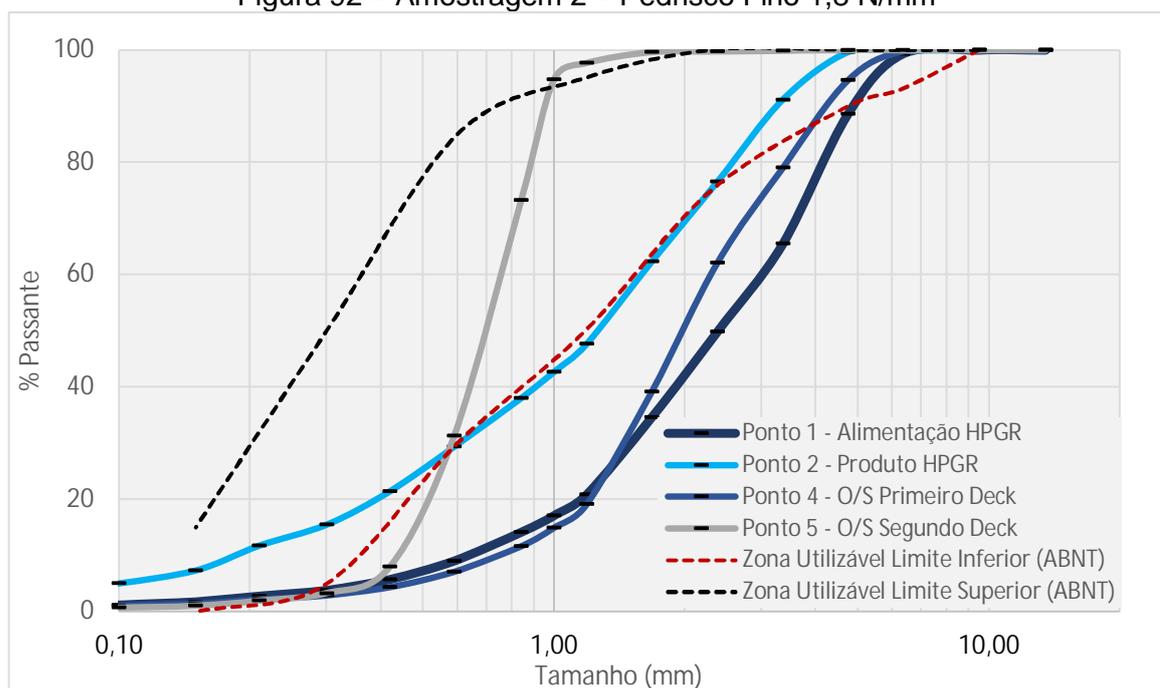
Amostragem 1 -Pedrisco Fino 1N/mm ²								
Norma NBR 7211 - Agregado para concreto (Agregado Miúdo)						Norma NBR 11799 - Material Filtrante (Areia para filtro)		
Amostras	Módulo de Finura	Classificação módulo de finura	- 0,075mm (%)	Presença de argila e materiais friáveis	Distribuição Granulométrica	100% do material - 4,8 mm	livre de pó, argila, matéria orgânica	Tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade
Ponto 1 (Alimentação)	3,81	Fora da zona utilizável	0,93	não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	87,83	Sim	Atende
Ponto 2 (Produto Prensa)	3,08	Dentro da zona utilizável	4,29	não identificado	Parcialmente Dentro dos limites da zona utilizável	96,91	Sim	Atende
Ponto 4 (Areia bloco)	3,78	Fora da zona utilizável	0,57	não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	94,09	Sim	Atende
Ponto 5 (Areia Filtro)	2,91	Dentro da zona utilizável	0,55	não identificado	Quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável	100	Sim	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 21 mostra que o Pedrisco Fino alimentado ao HRC™ na Amostragem 1 é inadequado tanto como areia para concreto como para filtro. A mesma Tabela 21 indica que a granulometria do produto HRC™ (Ponto 2) está parcialmente dentro dos limites da zona utilizável como areia em concreto, assim como inadequado como areia para filtro. O oversize do primeiro deck da peneira (Ponto 4) é inadequado para as duas aplicações, enquanto o oversize do segundo deck da peneira (Ponto 5) é adequado para as duas aplicações.

5.4.2 Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm²

A Figura 92 e a Tabela 22 apresentam as distribuições granulométricas e a verificação de adequações dos produtos gerados na Amostragem 2.

Figura 92 – Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm²

Fonte: Almeida et al.; 2023. Modificado pelo autor.

Tabela 22 - Resultados Amostragem 2 – Pedrisco Fino 1,8 N/mm²

Amostras	Amostragem 2 - Pedrisco Fino, Pressão 1,8 N/mm ²						Norma NBR 11799 - Material Filtrante (Areia para filtro)		
	Norma NBR 7211 - Agregado para concreto (Agregado Miúdo)					Distribuição Granulométrica	100% do material - 4,8 mm	livre de pó, argila, matéria orgânica	Tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade
	Módulo de Finura	Classificação módulo de finura	- 0,075mm (%)	Presença de argila e materiais friáveis					
Ponto 1 (Alimentação)	3,77	Fora da zona utilizável	0,90	Não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	88,63	Sim	Atende	
Ponto 2 (Produto Prensa)	3,01	Dentro da zona utilizável	3,69	Não identificado	Quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável	99,57	Sim	Atende	
Ponto 4 (Areia bloco)	3,38	Fora da zona utilizável	0,80	Não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	94,6	Sim	Atende	
Ponto 5 (Areia Filtro)	2,68	Dentro da Zona Ótima	0,53	Não identificado	Quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável	100	Sim	Atende	

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 22 mostra que o Pedrisco Fino alimentado ao HRCTM na Amostragem 2 também era inadequado como areia para concreto e filtro. Essa mesma tabela indica uma melhora na granulometria do produto do HRCTM (Ponto 2) resultante do aumento da pressão específica. Ao operar com a pressão específica de 1,8 N/mm², esse produto apresentou uma granulometria quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável, enquanto esse mesmo material quase atendeu integralmente o requisito granulométrico estabelecido na areia para filtro (100 % do material – 4,8 mm).

Apesar do *oversize* do primeiro deck da peneira (Ponto 4) ser inadequado para as duas aplicações, o *oversize* do segundo deck (Ponto 5) é adequado para as duas

aplicações. Observa-se também uma melhora no parâmetro módulo de finura desse material em relação ao resultado obtido na Amostragem com 1 N/mm².

5.4.3 Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm²

A Figura 93 mostra as distribuições granulométrica para a Amostragem 4, enquanto Tabela 23 mostra a verificação das adequações dos produtos obtidos nessa amostragem.

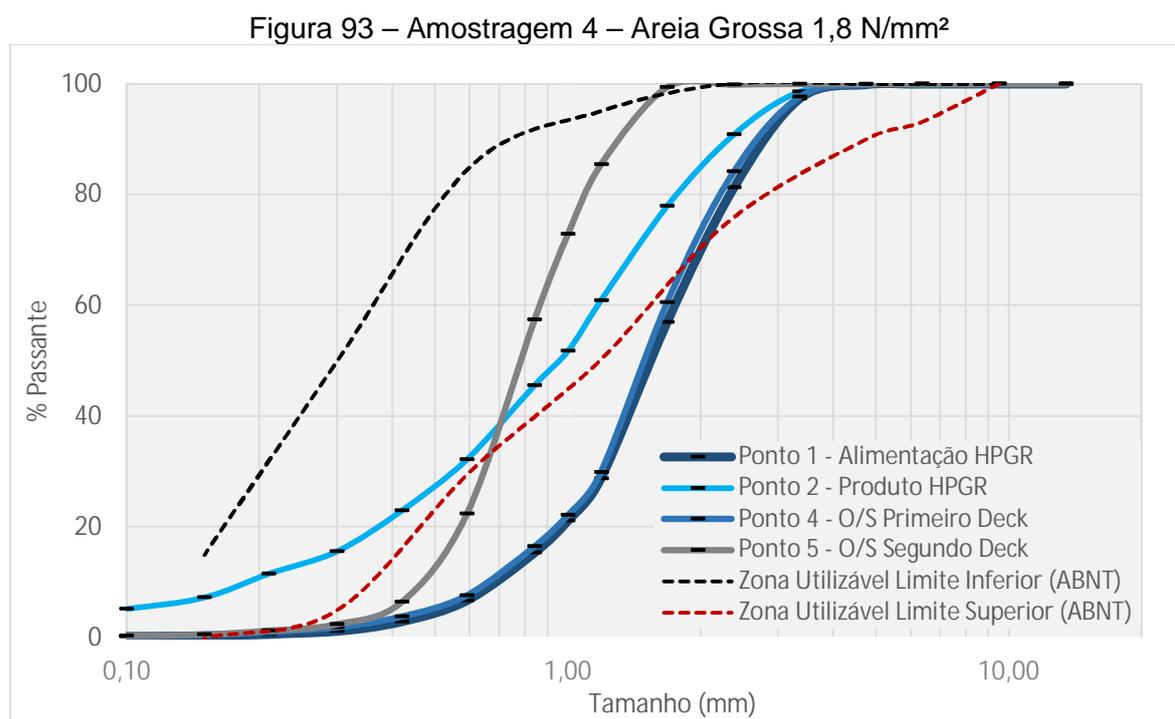


Tabela 23 - Resultados Amostragem 4 – Areia Grossa 1,8 N/mm²

Amostras	Amostragem 4 - Areia Grossa, Pressão 1,8 N/mm ²					Norma NBR 11799 - Material Filtrante (Areia para filtro)		
	Módulo de Finura	Classificação módulo de finura	-0,075mm (%)	Presença de argila e materiais friáveis	Distribuição Granulométrica	100% do material - 4,8 mm	livre de pó, argila, matéria orgânica	Tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade
Ponto 1 (Alimentação)	3,63	Fora da zona utilizável	0,17	Não identificado	Foras dos limites da zona utilizável	99,9	Yes	Attend
Ponto 2 (Produto Prensa)	2,84	Dentro da zona ótima	3,64	Não identificado	Integralmente dentro da zona utilizável	99,82	Yes	Attend
Ponto 4 (Areia bloco)	3,60	Fora da zona utilizável	0,21	Não identificado	Foras dos limites da zona utilizável	99,89	Yes	Attend
Ponto 5 (Areia Filtro)	2,89	Dentro da zona ótima	0,22	Não identificado	Quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável	100	Yes	Attend

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 23 mostra que a Areia Grossa alimentada ao HRCTM na Amostragem 4 é inadequada como areia para concreto. A granulometria e módulo de finura são os

principais parâmetros que indicam que esse material está fora da zona utilizável para essa aplicação. Por outro lado, o produto do HRC™ (Ponto 2) está integralmente dentro da zona utilizável como areia para concreto, enquanto é quase integralmente apropriado como areia para filtro.

O *oversize* do primeiro deck da peneira (Ponto 4) é inadequado como areia para concreto, porém quase integralmente adequado como areia para filtro. Já o *oversize* do segundo deck da peneira (Ponto 5), é adequado para as duas aplicações.

Em suma, a utilização da pressão de 1,8 N/mm² na condição em que a prensa é alimentada com Areia Grossa se apresenta bastante eficiente, pois os produtos gerados nessa condição atendem aos principais parâmetros requeridos pelas normas correspondentes.

5.4.4 Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm²

A Figura 94 mostra as distribuições granulométricas para a Amostragem 6, enquanto a Tabela 24 apresenta a verificação das adequações dos produtos gerados nessa amostragem.

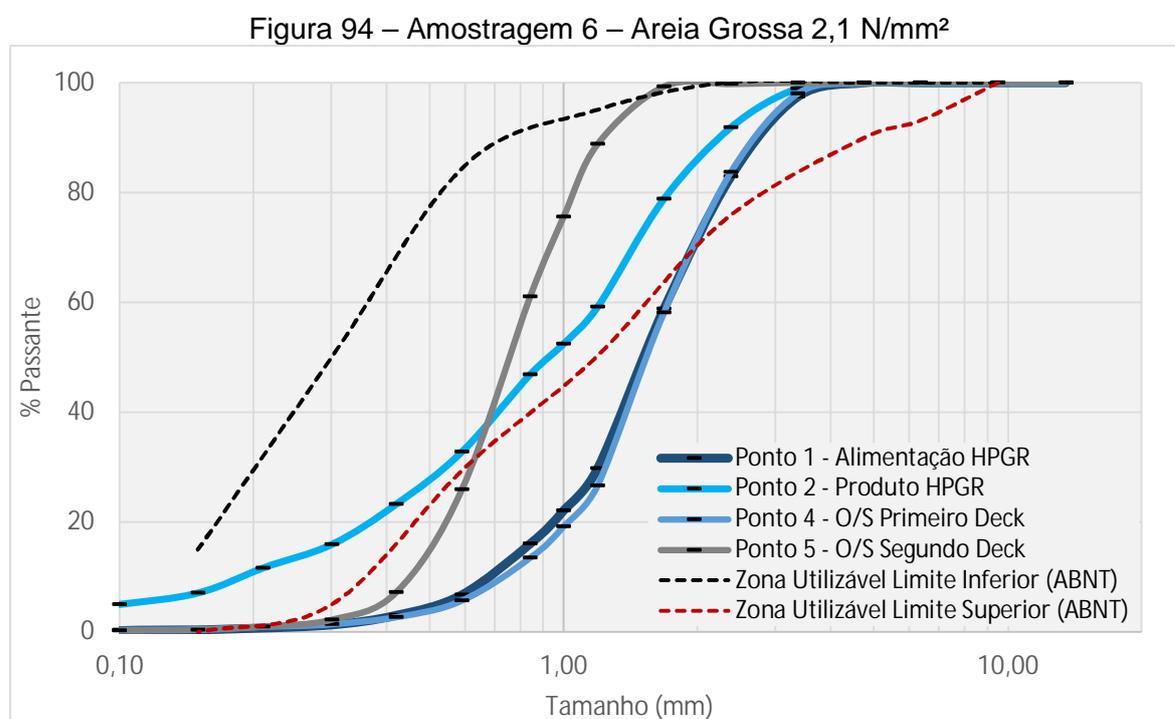


Tabela 24 - Resultados Amostragem 6 – Areia Grossa 2,1 N/mm²

Amostragem 6 - Areia Grossa, Pressão 2,1 N/mm ²								
Sampling Points	Norma NBR 7211 - Agregado para concreto (Agregado Miúdo)					Norma NBR 11799 - Material Filtrante (Areia para filtro)		
	Módulo de Finura	Classificação módulo de finura	- 0,075mm (%)	Presença de argila e materiais friáveis	Distribuição Granulométrica	100% do material - 4,8 mm	livre de pó, argila, matéria orgânica	Tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade
Ponto 1 (Alimentação)	3,62	Fora da zona utilizável	0,21	Não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	99,97	Yes	Atende
Ponto 2 (Produto Prensa)	2,85	Dentro da zona ótima	3,55	Não identificado	Integralmente dentro dos limites da zona utilizável	100	Yes	Atende
Ponto 4 (Areia bloco)	3,66	Fora da zona utilizável	0,27	Não identificado	Fora dos limites da zona utilizável	99,92	Yes	Atende
Ponto 5 (Areia Filtro)	2,83	Dentro da zona ótima	0,14	Não identificado	Quase integralmente dentro dos limites da zona utilizável	100	Yes	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como para as demais amostragens, os resultados apresentados na Tabela 24 e Figura 94 indicam que a Areia Grossa alimentada ao HRC™ na Amostragem 6 também é inadequada como areia para concreto. Por outro lado, a mesma Tabela 24 indica que a granulometria do produto HRC™ (Ponto 2) está integralmente dentro dos limites da zona utilizável como areia para concreto e areia para filtro. O *oversize* do primeiro deck da peneira (Ponto 4) é inadequado como areia para concreto, porém quase integralmente adequado como areia para filtro. Já o *oversize* do segundo deck da peneira (Ponto 5), é adequado para as duas aplicações.

Aumentar a pressão específica para 2,1 N/mm² resultou em resultados ainda melhores em comparação com a Amostragem 4, onde se utilizou a pressão de específica de 1,8 N/mm². Nesse caso, a alimentação com Areia Grossa também resultou em um produto do HRC™ totalmente adequado para uso como areia para concreto ou filtro.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou o desempenho do HRC™HPGR na produção de areia manufaturada com base em amostragens conduzidas em um circuito industrial em operação para este mesmo fim. O desempenho foi avaliado não apenas em termos de índices específicos do equipamento, como capacidade específica e consumo energético específico, mas também nas características do produto obtido, este último em função das especificações técnicas de areia manufaturada.

Os resultados obtidos indicaram os valores mais adequados de pressão específica operacional do HRC™HPGR para diferentes tipos de alimentação, neste caso Areia

Grossa e Pedrisco Fino, de acordo com as características técnicas requeridas para os produtos do circuito. Concluiu-se que para alimentação com Areia Grossa, a pressão específica mais adequada foi de 1,8 N/mm², pois:

- A vazão de alimentação e capacidade específica foram maiores para 1,8 N/mm² em relação à 2,1 N/mm²;
- O consumo energético específico foi menor para 1,8 N/mm² em relação a 2,1 N/mm²;
- A vazão de um dos principais produtos (Areia Filtro, Ponto 5) foi maior para 1,8 N/mm²;
- As especificações técnicas dos produtos foram atingidas já na pressão de 1,8 N/mm², não havendo assim necessidade de pressão operacional maior, evitando-se assim maior consumo energético.

Já para a condição em que a prensa foi alimentada com o Pedrisco Fino, não houve diferenças significativas na capacidade específica entre as operações com a pressão de 1,0 N/mm² e 1,8 N/mm². Porém, destaca-se que com pressão específica de 1,8 N/mm², a prensa gerou produtos com granulometrias mais adequadas conforme os requisitos estabelecidos pelas normas de referência.

Em suma, o uso do HRC™ nessa modalidade de aplicação apresentou-se como alternativa viável para a produção de areia manufaturada, pois os produtos gerados em condições operacionais selecionadas atenderam as especificações técnicas das normas correspondentes para produção de areia para uso em concreto e areia para filtro. Requisitos técnicos como granulometria, módulo de finura e quantidade de finos são alguns dos índices exigidos por essas normas e que foram atendidos integralmente em determinadas condições operacionais, mesmo com a alimentação da prensa apresentando relativa umidade (4,5 e 8%) e granulometrias fora das especificações requeridas.

Destaca-se também a baixa quantidade de material pulverulento (<0,075 mm) encontrados nos produtos do HRC™ para as diferentes condições avaliadas. Tal característica pode ser um atrativo para a utilização desse equipamento nessa modalidade de aplicação, uma vez que os britadores VSI, frequentemente utilizados

na produção de areia manufaturada, tendem a apresentar como característica indesejada, grandes quantidades de finos nessa mesma faixa granulométrica.

O presente trabalho apresenta uma nova modalidade de aplicação para HPGR, indicando uma alternativa técnica para produção de areia manufaturada. No caso da operação industrial da Itaquareia, a utilização do HRC™HPGR trouxe não apenas benefícios econômicos, mas também aspectos ambientais positivos, pois os antigos rejeitos, principalmente Areia Grossa, são hoje convertidos em produtos dentro das especificações para uso tanto como areia para concreto quanto areia filtro.

Para continuidade dos estudos, recomenda-se avaliar a influência da velocidade de rotação dos rolos nos índices de desempenho selecionados. Outro aspecto importante para estabelecimento de índices comparativos e aplicabilidade do HRC™ na produção de areias manufaturadas é o desgaste dos rolos, que assim merece avaliações detalhadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAZARPOOR, ARMIN; HALALI, MOHAMMAD; HEJAZI, RASOOL; SAGHAEJAN, MAJID. HPGR effect on the particle size and shape of iron ore pellet feed using response surface methodology. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**. 127. 1-9. 10.1080/03719553.2017.1284414.

AYDOGAN, N.A.; ERGÜN, L.; BENZER, H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. **Minerals Engineering**, v. 19, p. 130-139, 2006

AGUIRRE, Alberto de Barros; HENNIES, Wildor Theodoro. **Logística para agregados (brita e areia) em grandes centros urbanos**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 63, n. 4, p. 639-644, Dec. 2010. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000400007&lng=en&nrm=iso>. access on 05 Feb. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000400007>.

ALMEIDA, J.; SOARES, A.; SALES, R. A importância da recharacterização mineral para adequação das estratégias operacionais da planta. p. 76-82. In: 19º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2018.

ALMEIDA, J.C.F.; DELBONI, H., Jr.; BENTO, R.; REGGIO, A.; CREMONESE, E. Performance Analysis of HRC™ HPGR in Manufactured Sand Production. **Minerals** 2023, 13, 222. <https://doi.org/10.3390/min13020222>.

ALMEIDA, S. L. M.; PEREIRA, A. F. R. Obtenção de areia artificial da pedra Vigné. **Comunicação Técnica do XII JIC - Jornada de Iniciação Científica - CETEM**, 07 e 08 de julho de 2004. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. Areia artificial: **Uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados**. In: II SUFFIB - SENINÁRIO: o Uso da Fração Fina da Britagem. 2005. São Paulo. Artigos em CDROM. São Paulo, (2005).

ALMEIDA, S.L.M.; DAVID.T.A. ; CUNHA, E.R.; TAVARES, L.M.M. Produção de areia artificial em usina piloto na Pedra Sul Mineração. XX ENTMME. Florianópolis – SC. 2004, v.1, pp.105-112.

ALVES, V. K. **Metodologia para simulação e escalonamento de prensas de rolos**; Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012; 140p.;

ANEPAC. Areia. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita/item/136-areia>. Acesso em: 12 de Agosto de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. NBR 11799: **Material filtrante – Areia, antracito e pedregulho**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS: **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AYDOGAN, N. A.; ERGÜN, L; BENZER, H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. *Minerals Engineering*, v. 19, p.130-139, 2006.

BASTOS, S. R. B. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2002. 118p. (Dissertação de Mestrado).

BENGTSSON, M.; EVERTSSON, C. M. Modelling of output and power consumption in vertical shaft impact crushers. **International Journal of Mineral Processing**, Volume 88, Issues 1–2, 1 August 2008, Pages 18-23.

BRYAN, A.B., 1992, High intensity autogenous impact breaking. In: *Comminution: Theory and Practice*, S. K. Kawatra (ed.), SME. pp. 381-391.

BUEST, G. T. **Study of the replacement of fine natural aggregates for fine aggregates crushed in Portland cement concrete**. In Postgraduate Program in Civil Construction; Federal University of Paraná: Curitiba, Brazil, 2022.

BUEST, G. T. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 164p. (Dissertação de Mestrado).

BURCHARDT, E.; PATZELT, N.; KNECHT, J.; KLYMOWSKY, R. HPGR's in minerals: what do existing operations tell us for the future? In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY*, 5., 2011, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: University of British Columbia, 2011. P. 1-17.

CAMPOS, T.M. Modelagem matemática da prensa de rolos aplicada a cominuição de minério de ferro. Projeto final de graduação, 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CATOIA, THIAGO. Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho. 2007. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2007.

CEPURITIS R.; JACOBSEN, S.; ONNELA, T. Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning. *Miner. Eng.* 2015, 78, 1–14.

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

CHAVES, A. P.; WHITAKER, W. **Operações de beneficiamento de areia**. In: **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed.Date of Public: 2012

DANIEL, M. J.; MORLEY, C. Can Diamonds Go All The Way With HPGRs? In: *THE 4TH COLLOQUIUM ON DIAMOND – SOURCE TO USE*, 4., 2010, Gaborone. **Proceedings...** Johannesburg: **The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, p. 201-214, 2010.

DANIEL, M., & MORRELL, S. (2004). **HPGR model verification and scale-up**. Minerals Engineering, 17(11-12) 1149-1161.

DRAGO, Cristina; VERNEY, José Carlos Krause de; PEREIRA, Fernanda Macedo. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 399-408, set. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672009000300021&lng=pt&nrm=iso> acesso em 02 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000300021>.

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

FALCÃO, C. M. B. B.; SOUZA, D. M. O. M.; FERREIRA, J. Z.; MATAR, M. R.; SOUZA, R. R. 2013. 188p. **Análise da qualidade do investimento e emissões de CO² associadas à produção de agregados reciclados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERREIRA, K. C. ; GALÉRY, R. ; MONTENEGRO, L. C. M. ; PERES, A. E. C.. Efeito do Escalpe no Work Index de Bond. HOLOS Environment (Online). v. 7, p. 59-64, 2015.

GAUHAR, S.; RAFIQU, A.T.; SYED, M.J. Optimization of Gradation and Fineness Modulus of Naturally Fine Sands for Improved Performance as Fine Aggregate in Concrete. Procedia Eng. 2016, 145, 66–73.

GODOY, M. L. S.; BERGERMAN M. G.; GODOY, P. H; ROSA, M. A. N. Development of Salobo Project. In: CIM CONFERENCE AND EXIBITION, 2010, Vancouver. **Proceedings...** Westmount: CIM, 2010.

GOMES, F. B. **A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG.

HAWKINS, R. A Piston and Die Test to Predict Laboratory-scale HPGR Performance. [s.l.] University of Queensland, 2007.

HAWLITSCHKE, G. Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas São Paulo, 2000. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HERBST, J. A.; Lo, Y. C. e FLINTOFF, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). **Principles of mineral processing**. SME, 2003, p.61-118.

HERMAN, V. KNORR, B. WHALEN, D. **HRCTM: taking HPGR efficiency to next level by reducing edge effect**. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONFERENCE, 10., Santiago, Chile. Proceedings...Santiago: Gecamin, 2013.

HERMAN, V. S.; HARBOLD, K. A.; MULAR, M. A.; BIGGS, L. J. **Building the world's largest HPGR – the HRC™3000 at the Morenci Metcalf concentrator**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 6., 2015, Vancouver. Proceedings...Vancouver: University of British Columbia, 2015. p. 1-21.

HICKEL, G.; BOAVENTURA, G; SOUZA, R; CALÇADA, L; CASALI, J. BETIOLI, A.; OLIVEIRA, A. Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem. **Ibracon de Estruturas e Materiais, Florianópolis**, v. 11, n. 4, p. 902-930, Agosto 2018.

HUANG, D.; FAN, X.; WU, D.; YAO, F. Multi-objective planning of cone crusher chamber, output and size reduction, **Minerals Engineering**, Volume 20, Issue 2, February 2007, Pages 163-172.

ITAMBÉ. Concreto. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/Palestra_Itambe_Concreto2018.pdf. Acesso em: 16 de Junho de 2020.

ITAQUAREIA. Quem somos. Disponível em: <http://itaquareia.com.br/quem-somos/> . Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

ITÄVUO, P.; VILKKO, M.; JAATINEN, A. Indirect Particle Size Distribution Control in Cone Crushers, IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 16, 2013, Pages 224-2.

KALALA J.T., DONG H., HINDE A.L., Using Piston-Die Press to Predict the Breakage Behaviour of HPGR, in: **Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology Conference**, Vancouver, 2011.

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

KLYMOWSKY, R., PATZELT, N., KNECHT, J., BURCHARDT, E. Selection and sizing of high pressure grinding rolls. In: MULAR, A.L., HALBE, D. N., BARRATT, D.J. Mineral processing plant design, practice, and control. Proceedings... Littleton: SME, 2002. p. 636-668.

KNORR, B.; HERMAN, V.; WHALEN, D. **A closer look at increasing HPGR efficiency via reductions in edge effect**. 2015. Disponível em: <http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/03/HRC-Edge-Effect-SME-2015-FINAL.pdf> . Acesso em: 24 de junho de 2020.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. **Stratigraphy and sedimentation**. 2nd ed. San Francisco: W.H. Freeman, 1963. 660 p.

LA SERNA, H. A; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais> . Acessado em 15 de julho de 2020.

LEITE, Thiago de Oliveira Nunan. Modelagem e simulação do circuito de moagem da Mineração Serra Grande. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) -

Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/D.3.2017.tde-20072017-162538. Acesso em: 2023-06-20

LODI, V. H.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC**. In: Workshop Desempenho de Sistemas Construtivos, Unochapecó, Chapecó, SC, novembro de 2006.

LUBJUHN, U.; SCHÖNERT, K. Material flow in the acceleration zone and throughput of high pressure roller mills. In Proceedings of the XVIII International Mineral Processing Congress (IMPC), Sydney, Australia, 23–28 May 1993; pp. 161–168

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios 5. ed Rio de Janeiro: CETEM / MCT, 2010.

MAZZINGHY, D. B.; URRER, H. G.D. RUSSO J.F.C. SCHNEIDER C. L. Ramp up da maior instalação de moinhos Vertimill do mundo. **Holos**, v. 7, p. 51-58, 2015.

METSO. Sorocaba, 2023. Crushing and Screening Handbook. Seventh Edition. Disponível em: <https://www.metso.com/insights/e-books/crushing-and-screening-handbook/>. Acesso em: 16 de Junho de 2023.

METSO. Sorocaba, 2020. Catálogo de Equipamento. Disponível em: https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/hrc_brochure_2865_pt_lr.pdf. Acesso em: 23 de Novembro de 2020.

METSO. Sorocaba, 2020. Disponível em: <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/hrc8-brochure-3443-en-lowres.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2020.

Mineral processing plant design, practice, and control. Proceedings... Littleton: SME, 2002. p. 636-668

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Part II—Analysis of the effect of materials finer than 75µm under accelerated aging performance. *Constr. Build. Mater.* 2006, 20, 625–633.

MONTIJA, A.F.C. Aspects of the experimental variability of the concrete strain modulus test. 2007. 261 f. In Post Graduate Program of Civil and Urban Engineering; University of São Paulo: São Paulo, Brazil, 2007.

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

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

MORRELL, S. et al. Modelling of the HPGR Crusher. *Comminution Practices*, p. 117–126, 1997.

MORRELL, S.; SHI, F.; TONDO, L. A. 1997. **Modelling and scale-up of high pressure grinding rolls**. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC), 20., Proceedings... Aachen, 1997. Clausthal-Zellerfeld: GMD, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff und Umwelttechnik, 1997. p. 129-140.

NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R., & KOJOVIC, T. (1996). **Mineral comminution circuits: Their operation and optimisation**. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2, 149.

NORMALISATION FRANÇAISE P18-579. 1990. Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité. AFNOR Association française de normalisation, Paris.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. (2.ed.). São Paulo: Pini, 1997.

NIÑO DE GUZMÁN, EDUARDO HENRIQUE MARSOLA e BERGERMAN, MAURÍCIO GUIMARÃES. Desenvolvimento de ensaio laboratorial para a previsão de desgaste em circuito de processamento mineral. 2019, Anais.. Sao Paulo: ABM, 2019. . Acesso em: 24 jun. 2022

NOGUEIRA, G. R. F. **A extração de areia em cursos de água e seus impactos: proposição de uma matriz de interação**. Trabalho Final de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, 2016.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico. Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, R. N. M. **Análise do desempenho do HRCTM HPGR em circuito piloto**. 2015. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, R. N. M. Caracterização de agregados miúdos de basalto produzidos por diferentes britadores / R.N.M. de Oliveira. -- São Paulo, 2011. 40 p.

PEDROSA, FRANCISCO JUNIOR BATISTA. **O High Pressure Grinding Rolls como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito** / F. J. B. Pedrosa -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 155p.

PEREIRA, G. L. **Avaliação do uso de areia de britagem em argamassas e concretos de cimento Portland**. Canoas: Curso de Engenharia Civil, Universidade Luterana do Brasil, 2008. 82 p. (Trabalho de Conclusão de Curso).

PERES, L. M. e MASSOLA, CAMILA PERES e BERGERMAN, M. G. Avaliação da abrasividade de minérios a partir do ensaio LCPC em alternativa ao método de Bond. 2017, Anais.. Belém, PA: UFPA, 2017. Disponível em: http://icongresso.pauta.itarget.com.br/arquivos/trabalhos_completos/pauta/4/210_17112017_180536.pdf. Acesso em: 24 jun. 2022

PETIT, A.; CORDOBA, G.; PAULO, C.I.; IRASSAR, E.F. Novel air classification process to sustainable production of manufactured sands for aggregate industry. J. Clean. Prod. 2018, 198, 112–120.

RASHIDI, S.; RAJAMANI, R. K.; FUERSTENAU, D. A Review of the modelling of high pressure grinding rolls. **Kona Powder and Particle Journal**, n. 134, p. 125-140, 2017.

RIBEIRO, Farley Santos; RUSSO, José Francisco Cabello; COSTA, Thiago. **Aplicação de prensas de rolos em minério de ferro**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro

Preto , v. 63, n. 2, p. 399-404, June 2010 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000200027&lng=en&nrm=iso>. access on 17 June 2020. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200027>.

ROBERT C. DUNNE, S. KOMAR KAWATRA, COURTNEY A. YOUNG. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook: Volumes One and Two - ISBN: 9780873353854, 2019.

ROCHA, LUCIANO. **Mineração oceânica: uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/T.3.2016.tde-14072016-105049. Acesso em: 2023-11-24.

ROWLAND JR, C.A. The tools of power power: the bond work index, a tool to measure grinding efficiency. In: Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin, 1983.

RUSNAK, J. and MARK, C. 2000. Using the point load test to determine the uniaxial compressive strength of coal measure rock. Proceedings of the 19th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia, 8-10 August 2000. West Virginia University. pp. 362-371.

SCHÖNERT, K., 1988. **A First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills**, International Journal of Mineral Processing, 22: 401-412.

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

SCHUMACHER, M. AND THEISEN, W., 1997. **HEXADUR, A novel wear protection of high pressure roller presses for comminution.** No 11.5. Kipper.

SOSA, M.; CHIRILLANO, A.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. (2020). Optimizing manufactured sand content in mortars and its influence on fresh and hardened state. DYNA. 87. 196-203. 10.15446/dyna.v87n214.84553.

SOUZA M.T.; CESCNETO, F.; ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; OLIVEIRA, A. Characterization of Quartz Sands from the State of Mato Grosso do Sul for Industrial Applications. Cerâmica 2014, 60, 569–574.

SWIFT, G.A. Characterization of coarse aggregate angularity using digital image processing. 2007. 70 p. Dissertação – Msc in Geological Engineering, University of Missouri-Rolla, Missouri.

TAKRAF TENOVA. **Grinding Technology.** Disponível em https://www.tenova.com/fileadmin/user_upload/takraf_pages/About_us/Brochure_Downloads/TAKRAF_Product_Brochures/Grinding_Technology-HPGR.pdf . Acesso em: 18 de junho de 2020.

TANNÚS (et al.) **Agregados para a construção civil no Brasil. Contribuição para a formulação de políticas públicas.** MG: MME/SGM/CETEC, 2007.

TAVARES, L. M. (2005a). **Particle weakening in high-pressure roll grinding.** *Minerals Engineering*, v. 18, 651-657.

TAVARES, L. M. (2005b). **Operações Unitárias em Processamento Mineral.** *Apostila do curso de Processamento de Recursos Minerais I do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro.*

THURO K, SINGER, J.; KAESLING, H.; BAUER, M.. Determining Abrasivity with the LCPC Test. In Proceedings of the 1st CanadaUS Rock Mechanics Symposium-Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demand, Vancouver, BC, Canada, 27–31 May 2007.

THYSSENKRUPP. São Paulo, 2023. HPGR PRO. Disponível em: <https://www.thyssenkrupp-brazil.com/company/corporate-structure/multi-tracks/hpgr-pro-high-pressure-grinding-rolls> . Acesso em: 17 de junho de 2023.

TONDO, L. A. **Phenomenological modelling of size reduction performed by a high pressure roll mill** 1997. 219 p. Brisbane: University of Queensland, 1997. Thesis (Master's degree).

ULSEN, CARINA. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição / C. Ulsen.** –ed.rev – São Paulo, 2011. 222p.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 234 p.

VAN DER MEER, F. P. Pellet feed grinding by HPGR. *Minerals Engineering*, v. 73, p. 21-30, 2015.

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. and MAPHOSA, W. **High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing.** *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* [online]. 2012, vol.112, n.7, pp.637-647. ISSN 2411-9717.

WEIDMANN, D. F. Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland. Florianópolis, 2008, Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 271 fls.

WEIDMANN, D. F. Contribuição para determinação de metodologia de avaliação da forma de agregados e análise da influência desta propriedade em argamassas. Florianópolis, 2006, Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 90 fls.

APÊNDICES

Tabela A1 - Distribuições granulométricas das Amostragem 1.

Amostragem 1 - Pedrisco Fino - 1N/mm²

MALHA		Ponto 1 - Alimentação Prensa		Ponto 2 - Produto da Prensa		Ponto 3 - Alimentação Peneira		Ponto 4 - Retido Primeiro Deck		Ponto 5 - Retido Segundo Deck	
		Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)
Mesh	mm										
0,53	13,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
3/8	9,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
1/4	6,35	16,2	99,3	2,6	99,9	3,3	99,9	5,9	99,7	0	100
4,00	4,75	247,3	87,8	58,0	96,9	79,2	96,5	122,0	94,1	0	100
6	3,36	506,5	64,4	201,4	86,6	284,6	84,4	386,1	76,2	0,8	99,9
8	2,38	370,3	47,3	242,8	74,2	361,2	69,0	454,3	55,2	1,7	99,8
12	1,68	332,8	31,9	285,4	59,7	348,8	54,2	465,9	33,7	8,4	99,0
16	1,19	280,9	19,0	290,0	44,9	355,4	39,1	353,5	17,4	203,0	80,3
18	1,00	76,9	15,4	92,0	40,2	115,0	34,2	76,2	13,9	137,3	67,7
20	0,84	59,8	12,7	91,0	35,6	93,4	30,2	51,4	11,5	151,7	53,8
30	0,59	98,7	8,1	162,9	27,2	180,0	22,5	99,5	6,9	321,6	24,2
40	0,42	61,9	5,2	131,6	20,5	156,1	15,9	60,2	4,1	190,5	6,7
50	0,30	36,6	3,5	100,5	15,4	114,3	11,0	29,7	2,7	40,7	3,0
70	0,21	19,3	2,7	65,9	12,0	71,9	8,0	16,6	2,0	12,5	1,8
100	0,15	19,1	1,8	79,1	8,0	75,7	4,7	15,7	1,2	8,4	1,1
140	0,10	11,1	1,3	44,2	5,8	37,4	3,1	8,2	0,9	3,2	0,8
200	0,07	7,2	0,9	28,7	4,3	24,7	2,1	6,1	0,6	2,3	0,6
Fundo		20,10		84,10		49,3		12,3		6,0	

Tabela A2 - Distribuições granulométricas das Amostragem 2.

Amostragem 2 - Pedrisco Fino - 1,8 N/mm²

MALHA		Ponto 1 - Alimentação Prensa		Ponto 2 - Produto da Prensa		Ponto 3 - Alimentação Peneira		Ponto 4 - Retido Primeiro Deck		Ponto 5 - Retido Segundo Deck	
		Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado
Mesh	mm										
0,53	13,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
3/8	9,50	1,4	100	0	100	0	100	0	100	0	100
1/4	6,35	20,9	99,2	3,4	99,9	2,1	99,9	6,7	99,7	0	100
4,00	4,75	302,8	88,6	7,0	99,6	72,7	97,2	122,0	94,6	0	100
6	3,36	660,3	65,5	202,6	91,1	336,6	84,5	370,7	79,1	1,8	99,9
8	2,38	447,4	49,9	350,8	76,5	352,0	71,3	403,7	62,1	2,7	99,7
12	1,68	438,0	34,6	342,6	62,3	406,8	56,0	547,9	39,2	1,5	99,6
16	1,19	391,1	20,9	351,2	47,7	398,4	41,1	477,1	19,1	28,6	97,7
18	1,00	107,2	17,1	120,0	42,7	146,9	35,5	99,3	15,0	43,9	94,7
20	0,84	85,8	14,1	111,1	38,1	136,5	30,4	78,8	11,7	318,7	73,2
30	0,59	144,3	9,1	209,9	29,3	210,7	22,5	107,9	7,1	621,3	31,3
40	0,42	93,8	5,8	188,8	21,5	186,3	15,5	66,1	4,4	345,2	8,1
50	0,30	55,3	3,9	142,9	15,5	145,2	10,0	34,1	2,9	70,5	3,3
70	0,21	29,9	2,8	91,3	11,7	73,4	7,3	17,9	2,2	20,1	1,9
100	0,15	29,0	1,8	104,5	7,4	93,6	3,8	17,8	1,5	12,9	1,1
140	0,10	15,8	1,2	56,4	5,0	35,9	2,4	8,9	1,1	4,9	0,7
200	0,07	9,7	0,9	32,4	3,7	25,2	1,5	6,6	0,8	3,2	0,5
Fundo		25,80		88,60		38,9		19,1		7,8	

Tabela A3 - Distribuições granulométricas das Amostragem 4.

Amostragem 4 - Areia Grossa - 1,8 N/mm²

MALHA		Ponto 1 - Alimentação Prensa		Ponto 2 - Produto da Prensa		Ponto 3 - Alimentação Peneira		Ponto 4 - Retido Primeiro Deck		Ponto 5 - Retido Segundo Deck	
		Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)	Massa (g)	Passante acumulado (%)
Mesh	mm										
0,53	13,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
3/8	9,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
1/4	6,35	1,7	99,9	2,5	99,8	1,0	100,0	1,0	99,9	0,0	100,0
4,00	4,75	0,6	99,9	0,2	99,8	1,5	99,9	1,1	99,9	0,0	100,0
6	3,36	57,9	97,3	18,7	98,6	24,9	98,8	43,2	97,7	0,5	100,0
8	2,38	358,4	81,3	117,4	90,9	175,3	90,8	260,0	84,2	1,3	99,8
12	1,68	543,0	57,0	196,6	77,9	254,0	79,2	458,7	60,5	5,4	99,3
16	1,19	631,6	28,7	258,3	60,9	419,9	60,0	593,3	29,9	153,9	85,4
18	1,00	169,6	21,1	139,0	51,8	149,9	53,2	149,8	22,2	138,0	72,9
20	0,84	129,1	15,3	93,8	45,6	145,1	46,6	110,1	16,5	170,9	57,5
30	0,59	192,4	6,7	203,7	32,2	294,2	33,1	170,5	7,7	387,5	22,4
40	0,42	84,9	2,9	140,2	23,0	216,8	23,3	74,4	3,8	175,8	6,5
50	0,30	38,3	1,2	111,1	15,7	165,7	15,7	37,5	1,9	44,3	2,5
70	0,21	12,5	0,7	62,5	11,5	92,0	11,5	15,7	1,1	13,1	1,3
100	0,15	6,8	0,4	65,0	7,3	103,5	6,8	11,3	0,5	7,6	0,6
140	0,10	2,4	0,3	31,1	5,2	48,0	4,6	3,7	0,3	2,4	0,4
200	0,07	1,9	0,2	24,0	3,6	30,9	3,2	2,3	0,2	1,5	0,2
Fundo		3,70		55,30		69,9		4,0		2,4	

Tabela A4 - Distribuições granulométricas das Amostragem 5.

Amostragem 5 - Areia Grossa 1,8 N/mm²

MALHA		Ponto 1 - Alimentação Prensa		Ponto 2 - Produto da Prensa		Ponto 3 - Alimentação Peneira		Ponto 4 - Retido Primeiro Deck		Ponto 5 - Retido Segundo Deck	
		Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado
Mesh	mm										
0,53	13,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
3/8	9,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
1/4	6,35	0	100	0	100	0,6	100,0	0	100	0	100
4,00	4,75	0,7	100	0	100	0	100	2,2	99,8	0	100
6	3,36	33,2	98,0	12,8	99,2	13,3	98,9	27,0	97,4	0,1	100
8	2,38	246,0	83,7	103,3	92,5	88,2	92,3	152,9	83,6	3,0	99,7
12	1,68	392,4	60,9	214,9	78,8	166,1	79,7	284,8	58,0	6,6	99,0
16	1,19	504,9	31,5	314,0	58,6	257,5	60,2	370,9	24,7	152,6	83,2
18	1,00	138,6	23,4	102,7	52,0	92,6	53,2	81,0	17,4	132,1	69,6
20	0,84	97,4	17,7	100,6	45,6	83,9	46,9	56,1	12,4	149,4	54,1
30	0,59	175,8	7,5	219,5	31,5	182,4	33,1	83,5	4,9	320,8	20,9
40	0,42	69,9	3,4	149,1	21,9	122,2	23,8	31,7	2,1	147,4	5,7
50	0,30	32,4	1,5	111,2	14,8	95,0	16,7	12,9	0,9	37,4	1,8
70	0,21	10,8	0,9	62,1	10,8	58,5	12,2	4,5	0,5	9,1	0,9
100	0,15	6,6	0,5	70,1	6,3	63,4	7,4	2,8	0,2	4,8	0,4
140	0,10	2,6	0,4	30,9	4,3	29,5	5,2	0,9	0,2	1,5	0,2
200	0,07	2,2	0,2	19,1	3,1	22,3	3,5	0,6	0,1	0,8	0,2
Fundo		4,1		47,8		46,5		1,1		1,5	

Tabela A5 - Distribuições granulométricas das Amostragem 6.

Amostragem 6 - Areia Grossa - 2,1 N/mm²

MALHA		Ponto 1 - Alimentação Prensa		Ponto 2 - Produto da Prensa		Ponto 3 - Alimentação Peneira		Ponto 4 - Retido Primeiro Deck		Ponto 5 - Retido Segundo Deck	
		Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado	Massa (g)	Passante acumulado
Mesh	mm										
0,53	13,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0,0	100
3/8	9,50	0	100	0	100	0	100	0	100	0,0	100
1/4	6,35	0	100	0	100	1,4	99,9	0	100	0,0	100
4,00	4,75	0,4	100	0	100	0	99,9	1,6	99,9	0,0	100
6	3,36	39,1	97,4	13,1	98,9	20,5	98,8	36,8	98,0	0,1	100
8	2,38	220,3	83,0	86,2	91,9	135,4	91,2	275,8	83,7	1,5	99,8
12	1,68	368,0	58,8	159,2	78,9	230,5	78,3	491,6	58,2	3,3	99,3
16	1,19	442,9	29,8	241,3	59,2	356,8	58,4	607,3	26,6	72,2	88,9
18	1,00	116,3	22,1	81,4	52,5	121,9	51,6	143,3	19,2	91,7	75,6
20	0,84	93,0	16,0	68,9	46,9	111,0	45,4	110,3	13,5	100,1	61,1
30	0,59	140,5	6,8	172,3	32,8	237,8	32,1	150,0	5,7	243,1	25,9
40	0,42	58,3	3,0	116,3	23,3	163,4	23,0	57,3	2,7	128,8	7,3
50	0,30	26,0	1,3	90,4	15,9	128,8	15,8	24,8	1,4	34,8	2,2
70	0,21	8,5	0,7	52,0	11,7	75,0	11,6	10,1	0,9	8,8	1,0
100	0,15	4,8	0,4	56,1	7,1	76,9	7,3	7,4	0,5	4,2	0,4
140	0,10	1,7	0,3	25,1	5,0	36,3	5,3	2,8	0,4	1,1	0,2
200	0,07	1,5	0,2	18,0	3,6	28,6	3,7	2,0	0,3	0,5	0,1
Fundo		3,13		43,45		66,3		5,2		1,0	

Imagem A1 – Resultados Wi de Bolas.

Bond Ball Mill Work Index

Client:	Itaquareia	Closing sieve:	100 [# Tyler]
Sample:	Areia Grossa	Closing sieve:	0,149 [mm]
Contact:		Initial Mass (C):	1029,00 [g]
Origin:	Brazil	IPP (Ideal Potencial Product):	294,00 [g]
Executed By:	Júlio Almeida	Material Density:	1,47 [t/m ³]
Local:		% of passing product of the initial mass:	1,02 [%]
Date:	23/06/2022		

Laboratory Sheet

Cycle	Feed Undersize	Product Undersize	Net Product	Deviation	Retained	Fresh Feed Added	Moability	Rotations
[#]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g/r]	[#]
	S	T = C - M	U = T - S	D = IPP - R	M = R - T	R = T	V = U/Q	Q = (IPP - S)/V
1	10,54	125,77	115,23	-735,00	903,23	1029,00	1,152	100
2	1,28	291,62	290,34	168,23	737,38	125,77	1,143	254
3	2,97	354,02	351,05	2,38	674,98	291,62	1,377	255
4	3,61	306,30	302,69	-60,02	722,70	354,02	1,435	211
5	3,12	312,14	309,02	-12,30	716,86	306,30	1,522	203
6	3,18	284,82	281,64	-18,14	744,18	312,14	1,475	191
7	2,91	301,88	298,97	9,18	727,12	284,82	1,515	197
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								

Moability

*Average of the last three moability numbers (GBP) [g/rotation]

(n-2)	1,522 [g/rotation]	Moability	1,504 [g/rotation]
(n-1)	1,475 [g/rotation]		
(n)	1,515 [g/rotation]		

Circulating Load

Fresh Feed	1029,00 [g]	Circulating Load	250,78 [%]
Passing Product	293,35 [g]		

Passing Product

*Average of the last 2 or 3 cycles passing product

	Passing Product	293,35 [g]
(n-1)	284,82 [g]	
(n)	301,88 [g]	

Work Index Evaluation

F ₈₀	2,217 [mm]	WI	15,73 [kWh/t]
P ₈₀	0,119 [mm]	WI	14,27 [kWh/st]

Size Distribution

Size [ASTM]	Size [mm]	Feed cum. % pass.	Product cum. % pass.
6	3,36	100,0	100,0
8	2,38	88,3	100,0
12	1,68	54,6	100,0
16	1,19	33,5	100,0
20	0,84	15,9	100,0
30	0,59	7,6	100,0
40	0,42	3,5	100,0
50	0,30	1,9	100,0
70	0,21	1,3	100,0
100	0,15	1,0	100,0
140	0,10	0,8	68,1
200	0,07	0,7	45,9

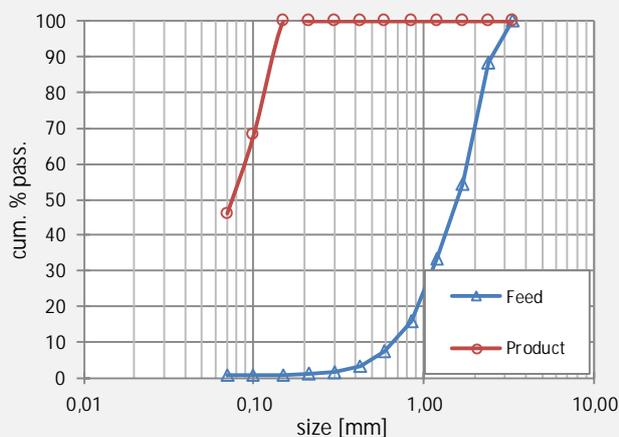


Imagem A2 – Resultados Testes CLP Areia Grossa.

Teste CLP - Itaquareia Areia Grossa

Malha (mm)	Passante (%)			
	Alim	100 kN	250 kN	500 kN
12,7	100	100	100	100
9,50	100,0	100,0	100,0	100,0
6,35	100,0	100,0	100,0	100,0
4,75	100,0	100,0	100,0	100,0
3,35	96,9	98,3	98,4	98,4
2,36	83,4	87,2	93,4	91,3
1,70	57,6	66,6	79,7	78,0
1,18	29,2	42,1	60,7	62,0
0,850	11,6	24,3	43,3	48,4
0,600	4,1	14,0	30,2	37,8
0,425	1,4	8,5	20,3	29,0
0,300	0,5	5,7	13,4	21,9
0,210	0,3	3,8	8,7	16,3
0,150	0,2	2,7	5,9	12,3
0,105	0,2	1,8	3,8	9,3

A	50,417
b	6,586
Axb	332
Energia (kWh/t)	t10 (%)
0	0,000
0,1	24,323
0,2	36,912
0,3	43,427
0,4	46,800
0,5	48,545
0,6	49,448
0,7	49,916
0,8	50,158
0,9	50,283
1	50,348
1,1	50,381
1,2	50,399
1,3	50,408
1,4	50,412
1,5	50,415

t10	t75	t50	t25	t4	t2
10	0,787	1,207	2,611	31,572	37,942
20	1,574	2,413	5,223	63,144	75,883
30	2,507	3,903	8,607	85,783	99,100
50	9,454	13,438	24,327	89,906	99,900

Imagem A3 – Resultados Testes CLP Pedrisco Fino.

Teste CLP - Itaquareia Pedrisco Fino

Malha (mm)	Passante (%)			
	Alim	100 kN	250 kN	500 kN
12,7	100	100	100	100
9,50	100,0	100,0	100,0	100,0
6,35	100,0	99,5	100,0	99,5
4,75	92,1	94,2	96,4	94,2
3,35	61,8	78,6	83,1	81,6
2,36	40,2	62,7	69,6	68,4
1,70	26,5	49,5	56,5	57,8
1,18	16,6	36,3	44,1	47,0
0,850	11,4	25,5	33,7	37,9
0,600	8,6	17,9	25,6	29,9
0,425	6,7	12,3	19,0	23,0
0,300	5,3	8,4	14,0	17,4
0,210	4,4	5,8	10,3	12,9
0,150	3,9	4,1	7,7	9,7
0,105	3,4	3,1	5,4	7,2

A	38,616
b	7,361
Axb	284
Energia (kWh/t)	t10 (%)
0	0,000
0,1	20,120
0,2	29,757
0,3	34,373
0,4	36,583
0,5	37,642
0,6	38,149
0,7	38,392
0,8	38,509
0,9	38,564
1	38,591
1,1	38,604
1,2	38,610
1,3	38,613
1,4	38,614
1,5	38,615

t10	t75	t50	t25	t4	t2
10	1,269	1,831	3,776	22,346	34,081
20	2,538	3,662	7,551	44,692	68,162
30	4,396	6,365	12,400	63,056	86,166
50	12,982	17,737	30,007	64,691	93,382

Imagem A4 – Resultados Teste Abrasividade e Britabilidade Macon.

		Abrasividade e Britabilidade (Macon) Padrão Nordberg	
Código:		Data:	10/05/2021
Cliente:			
Material:	Alimentação Planta		
Origem:	São Paulo		
Solicitante:			
Executado por:	Júlio Almeida		
DADOS DO TESTE			
Abrasividade	PESO INICIAL (PI)	47,292	gr
	PESO FINAL (PF)	46,700	gr
	DESGASTE (Ai = PI - PF)	0,592	gr
	ABRASÃO	1184	g/t
Britabilidade	RETIDO EM 1,6 mm	63,90	gr
	PASSANTE EM 1,6 mm	436,10	gr
	BRITABILIDADE	87,22	%

Imagem A5 – Resultados Teste Abrasividade de Bond.

Índice de Abrasão Pennsylvania (AI Bond)

Cliente: Itaquareia
Amostra: Alimentação Planta - Retido na Peneira Estática
Técnico: Júlio Almeida
Local: São Paulo
Data: 16/06/2022

Resultado do Teste

Desgaste da Palheta	Peso Inicial (PI)	96,185 g
	Peso Final (PF)	95,890 g
	Desgaste (AI = PI - PF)	0,295 g

Índice de Abrasão = **0,295 g**