

ARON DENÓFRIO MUNIZ

**ANÁLISE PARA OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE BRITAGEM E
PENEIRAMENTO DA MINERAÇÃO JURUAÇU**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo
2006**

ARON DENÓFRIO MUNIZ

**ANÁLISE PARA OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE BRITAGEM E
PENEIRAMENTO DA MINERAÇÃO JURUAÇU**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo
2006**

EPMI
TF-2006

M925a

Ligado 1574579

ARON DENÓFRIO MUNIZ

ANÁLISE PARA OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE BRITAGEM E
PENEIRAMENTO DA MINERAÇÃO JURUAÇU

M2006k

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005927

FICHA CATALOGRÁFICA

Muniz, Aron Denófrio

**Análise para otimização do circuito de britagem e peneira-
mento da Mineração Juruaçu / A.D. Muniz. – São Paulo, 2006.
53 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.**

**1.Britagem 2.Pedreiras – São Paulo 3.Rochas (Material de
construção) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. **Homero Delboni Jr.**, pelo apoio, atenção e dedicação não só a este trabalho como a todo o nosso aprendizado.

Aos Engenheiros **Adélio Martins** e **Leonardo Motta** da empresa Embu S. A. por possibilitarem a realização deste trabalho através de inúmeras sugestões, longas discussões e caprichosas informações.

A toda a empresa Embu S. A. por muito contribuir com a minha formação profissional através de constante aprendizado.

À minha **família** pelo incentivo e apoio não só durante a faculdade como em toda a minha vida.

À minha querida **Luciana Francisco** por imensurável auxílio e compreensão nos momentos mais difíceis.

A toda a **Turma XXT Minas: Bruno Panachão, Daniel Capovila, Edis Nunes, Gustavo Simões, Luiz Felipe Laudari e Marcos Bueno**. Sozinhos jamais chegaríamos a lugar algum.

RESUMO

A Mineração Juruaçu, pedreira da empresa Embu S. A. localizada em Perus (Grande São Paulo) opera com certas restrições no seu circuito de britagem e classificação. Atualmente tais restrições se iniciam já na britagem primária. Com o objetivo de aumentar o nível de produção desta pedreira, a empresa recentemente investiu na substituição do britador primário existente por um equipamento de maior porte. O presente trabalho descreve os estudos conduzidos pelo autor sobre as implicações e as necessidades de uma análise dos equipamentos posteriores que aponte possíveis modificações necessárias para efetivar o aumento de produção desejado pela empresa. Outro aspecto envolvido no problema diz respeito à implicação econômica destas modificações.

O circuito em questão é complexo pois permite desvios de fluxo de materiais em várias instâncias. Por este mesmo motivo é uma operação extremamente flexível, podendo absorver com facilidade a flutuação da demanda de mercado por determinados produtos. Todas as modificações apontadas foram analisadas também sob enfoque operacional.

Os modelos de simulação empregados se mostraram bastante aplicáveis para a verificação da viabilidade das alterações propostas, atingindo as metas esperadas. Além disso, disponibilizados à empresa, configuram uma ferramenta muito útil para novas análises de modificações que possam surgir futuramente.

Palavras-chave: beneficiamento de minérios; otimização; britagem; peneiramento; pedreira.

SUMÁRIO

1. Introdução e Objetivos	07
2. Revisão Bibliográfica	09
2.1. Britagem	09
2.1.1. Britagem Primária	10
2.1.2. Britagem Secundária	11
2.1.3. Britagens Terciária e Quaternária	13
2.2. Peneiramento	15
3. A Empresa	17
4. O Software Utilizado: Bruno	18
5. Simulação Computacional do Circuito	19
5.1. Considerações Iniciais	19
5.2. Primeiro Bloco de Simulação – Britagem Primária	22
5.2.1. Alimentador A1	22
5.2.2. Peneira P1	22
5.2.3. Britador Primário	23
5.3. Segundo Bloco de Simulação – Britagem Secundária	24
5.3.1. Britador Secundário	24
5.3.2. Peneira P2	25
5.3.3. Britador Terciário	26
5.4. Terceiro Bloco de Simulação	26
5.4.1. Peneira P3	26
5.4.2. Britador Quaternário	27
5.4.3. Peneira P4	28
5.4.4. Peneira P5	29
5.4.5. Britador VSI	29
6. Simulação e Análise de Alterações Propostas no Circuito	32
6.1. Considerações Iniciais	32
6.2. Alteração 1 – Substituição do Britador Primário	32
6.3. Alteração 2 – Eliminação do Britador Secundário	33
6.4. Alteração 3 – Aumento da Carga da Britagem Secundária	33
6.5. Alteração 4 – Modificações das Malhas das Peneiras P3, P4 e P5	34
6.6. Alteração 5 – Substituição do Britador Quaternário	34

6.6.1. Análise para HP200	35
6.6.2. Análise para HP300	35
6.6.3. Análise para HP400	35
6.6.4. Avaliação Comparativa Geral	36
7. Conclusões	37
8. Referências Bibliográficas	38
9. Apêndices	39
9.1. APÊNDICE 1 – Simulação do Circuito Real: Bloco 1	40
9.2. APÊNDICE 2 – Simulação do Circuito Real: Bloco 2	41
9.3. APÊNDICE 3 – Simulação do Circuito Real: Bloco 3 (Configuração 1)	42
9.4. APÊNDICE 4 – Simulação do Circuito Real: Bloco 3 (Configuração 2)	43
9.5. APÊNDICE 5 – Alteração 1: Bloco 1 (Situação 1)	44
9.6. APÊNDICE 6 – Alteração 1: Bloco 1 (Situação 2)	45
9.7. APÊNDICE 7 – Alteração 2: Bloco 2 (Situação 1)	46
9.8. APÊNDICE 8 – Alteração 2: Bloco 2 (Situação 2)	47
9.9. APÊNDICE 9 – Alteração 3: Bloco 2	48
9.10. APÊNDICE 10 – Alteração 3: Bloco 3	49
9.11. APÊNDICE 11 – Alteração 4: Bloco 3	50
9.12. APÊNDICE 12 – Alteração 5 (HP200): Bloco 3 (Situação 1)	51
9.13. APÊNDICE 13 – Alteração 5 (HP200): Bloco 3 (Situação 2)	52
9.14. APÊNDICE 14 – Alteração 5 (HP300): Bloco 3	53
9.15. APÊNDICE 15 – Alteração 5 (HP400): Bloco 3	54

1. Introdução e Objetivos

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos conduzidos pelo autor para auxiliar a empresa Embu S.A. Engenharia e Comércio a solucionar uma questão operacional em uma de suas unidades, qual seja, Mineração Juruaçu, pedreira localizada no bairro de Perus, na Grande São Paulo.

Atualmente esta unidade opera com a britagem primária próxima ao seu limite de capacidade devido ao tamanho do britador instalado, um britador de mandíbulas Metso modelo 100x80. Em contrapartida, na britagem secundária o equipamento imediatamente posterior, um britador Metso 100x60, opera consideravelmente abaixo de sua capacidade, pois o material que o alimenta já vem, em sua maior parte, em tamanhos reduzidos.

O objetivo inicial do trabalho foi analisar as possíveis alternativas de substituição deste equipamento por outros de maior porte, analisando a possibilidade de inclusive eliminar o britador posterior. No entanto, devido a antecipações na programação de gastos e urgência, a diretoria da empresa solicitou que a determinação de um novo britador primário fosse acelerada. Um novo equipamento já foi adquirido pela empresa, que atualmente aguarda sua entrega, prevista para janeiro de 2007.

Desta forma, os objetivos iniciais deste trabalho foram modificados, enfatizando mais a análise do circuito de rebitagem, britagem secundária em diante, e peneiramento para sua otimização, permitindo o aumento real da produção. O objetivo deste estudo foi analisar as implicações da nova britagem primária, visando aumentar os níveis de produção da unidade de Perus.

Dentre as possibilidades inicialmente cogitadas, além da exclusão do britador secundário, estão a substituição de um britador cônico modelo 120RS por um mais novo da linha HP (procedimento já realizado em uma segunda unidade da empresa), modificação de malhas de algumas peneiras do circuito, entre outras a serem estudadas detalhadamente.

Além da substituição de equipamentos foram avaliadas as alterações decorrentes de simples trocas de malhas de peneiramento em alguns estágios de classificação sem, contudo, alterar as faixas granulométricas de classificação dos produtos finais, determinadas por normas técnicas específicas. Tais alterações são frutos de estudos e análises dos engenheiros da empresa, com quem foram amplamente discutidas para elaboração deste trabalho. Delas surgiram várias novas idéias.

A primeira etapa para a execução deste trabalho foi o acompanhamento pelo autor da operação de britagem da unidade para assimilação e compreensão de suas características funcionais e particularidades. Em seguida, com embasamento teórico respaldado pela revisão bibliográfica sobre o tema, iniciou-se a simulação computacional do referido circuito. O processo de obtenção de dados e informações sobre a operação e desempenho do circuito foi de suma importância para subsidiar a etapa de modelagem.

A etapa seguinte foi modelar o circuito através da seleção de um programa, calibrar os modelos e comparar os resultados aos obtidos e/ou observados na etapa anterior, ou seja, construir um modelo robusto e fiel à operação atual.

Para tal simulação foi utilizado o programa Bruno, desenvolvido pela Metso, grande fabricante de equipamentos para beneficiamento de minérios. Tal programa foi eleito dentre alguns outros inicialmente pelo motivo da maioria dos equipamentos instalados na unidade serem fabricados por esta empresa. Um segundo motivo foi sua interação simples e completa, aliada à sua grande capacidade de cálculos iterativos sobre o circuito desenvolvido. Apesar de suas qualidades o programa não consegue representar exatamente o circuito real.

Com este programa foram simuladas diversas alternativas de modificação na operação do circuito, de forma a melhorar índices de desempenho ou ainda aumentar a produção da unidade. Os resultados das simulações foram avaliados criticamente como forma de consolidar o modelo integrado desenvolvido. Por fim, através destas simulações foram possíveis melhorias no entendimento dos equipamentos e processos do circuito de britagem da Mineração Juruaçu como um todo.

Vale ressaltar que o objetivo principal deste trabalho foi simular o circuito e verificar a aplicabilidade das alterações propostas e/ou decorridas do mesmo. Este trabalho contempla apenas os aspectos técnicos de operação do circuito referido e modificações propostas, não envolvendo fatores financeiros e/ou econômicos a elas relacionados.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Britagem

A britagem é geralmente a primeira etapa do processo de beneficiamento a que se submete o material resultante do processo de lavra ("Run Of Mine", ou ROM). É uma das técnicas de fragmentação de materiais com a finalidade de reduzir, por ação mecânica externa um sólido de determinado tamanho em fragmentos de tamanhos menores. A fragmentação de materiais heterogêneos visa liberar os minerais valiosos dos minerais de ganga. No caso de materiais homogêneos, como rochas para produção de brita para construção civil, sua função é reduzi-lo até a dimensão requerida para utilização.

Pode-se definir britagem como o conjunto de operações com o objetivo de fragmentar blocos de minério vindos da mina, levando-os a granulometrias compatíveis com sua utilização direta ou posterior processamento (LUZ, 2004). Existe uma série de tipos de equipamentos de britagem e esta operação é repetida diversas vezes, inclusive em circuitos fechados com peneiras, mudando-se o equipamento até que se obtenha um material de tamanho adequado à alimentação da moagem ou ao uso desejado.

A britagem depende de forças de compressão e assim é necessário um tamanho de partícula onde estas possam atuar, ficando restrita a tamanhos de rochas maiores. Pode-se submeter a britagem fragmentos de diferentes tipos de minérios e de distintos tamanhos, desde rochas de 1000 mm até 10 mm, em média (LUZ, 2004). Não existe um circuito padrão para britar diferentes tipos de minério, sendo a operação geralmente feita dentro dos estágios que o projeto mostrar convenientes.

No material a fratura se desenvolve segundo as tensões principais de cisalhamento, de inclinação constante em relação à direção das tensões de compressão. Em consequência, as partículas tendem a apresentar certa cubicidade e faces relativamente planas. As relações de redução empregadas na britagem são necessariamente pequenas, já que as forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental.

Os britadores empregados na britagem primária, ou seja, no primeiro estágio de cominuição, são os de grande porte, que sempre operam em circuito aberto e normalmente são precedidos de grelhas que eliminam a fração fina contida no material proveniente da mina. A britagem primária é realizada a seco e tem uma razão de redução de cerca de 8:1 (CHAVES, 2003). São empregados neste estágio britadores de mandíbulas, giratórios, de impacto ou ainda de rolos dentados.

O tamanho dos equipamentos é sempre referido a uma ou duas dimensões características dos mesmos. Para os britadores de mandíbulas utilizam-se as duas dimensões da abertura de entrada, o gape e a largura da mandíbula móvel. O primeiro número está associado ao tamanho máximo de partícula que o britador pode receber e processar. O segundo número está associado à capacidade de produção do equipamento. Para britadores giratórios utilizam-se parâmetros semelhantes, a abertura de passagem entre o manto e a aranha (se relaciona ao tamanho máximo de alimentação) e o diâmetro da base do cone (se relaciona à capacidade do equipamento).

As capacidades dos britadores de mandíbulas e giratórios variam com o tamanho do equipamento e, para um mesmo equipamento, também variam consideravelmente em função da abertura de saída do material.

A seleção de um equipamento para uma determinada aplicação deve atender a uma série de exigências, cada qual independente das demais. Inicialmente deve-se observar a condição de recepção, já que o britador deve ter uma abertura de alimentação (“gape”) suficientemente grande para permitir a passagem do maior fragmento alimentado (“top size”). A máquina deve não só permitir sua passagem como também fazê-lo chegar até uma posição dentro da câmara de britagem em que haja condição de ser britado.

O procedimento normal de seleção de britadores consta de algumas etapas. Inicialmente deve-se consultar tabelas de especificações técnicas, definindo alguns equipamentos que estejam dentro das condições exigidas. Em seguida deve-se verificar as capacidades de produção de cada equipamento selecionado, observando se estão dentro das condições especificadas. Durante este processo, há vários fatores de correção das capacidades calculadas que devem ser aplicados. Outro ponto importante é analisar as curvas granulométricas do tipo de equipamento a fim de definir as condições de operação. Outra forma de dimensionar estes equipamentos é empiricamente. Neste caso, pode-se relacionar produção ao ajuste de saída através de uma constante, que será determinada através de diversas aferições durante a operação da máquina.

Neste trabalho o dimensionamento dos britadores segue o primeiro procedimento descrito.

2.1.1. Britagem Primária

Os britadores de mandíbulas são empregados em blocos de rocha de elevadas dimensões e alta dureza, com grandes variações de tamanho na alimentação. O processo de cominuição ocorre pela compressão do material entre uma mandíbula fixa e outra móvel. Há dois tipos básicos de britadores de mandíbulas, os de um ou dois eixos.

No britador de mandíbulas de um eixo o queixo se apóia em um eixo excêntrico na parte superior. Na parte inferior o queixo é mantido em posição por uma placa de articulação, a qual oscila somente em forma de um pequeno arco (MANUAL METSO, 2005). Assim, a mandíbula móvel descreve um movimento elíptico. O eixo excêntrico aciona uma biela que está ligada a duas placas rígidas de metal, chamadas “abanadeiras”. A abanadeira da direita tem sua extremidade da direita fixa. A extremidade da esquerda sobe e desce com o movimento da biela, percorrendo um arco de círculo e empurrando a ponta inferior da biela para frente, retornando com ela em seguida. O movimento da abanadeira da esquerda é mais complexo. Sua ponta direita sobe, desce, se desloca para frente e retorna, transmitindo estes movimentos para a mandíbula, à qual está presa pela sua extremidade esquerda. Como a mandíbula móvel está presa pelo eixo, descreve um movimento de arco de círculo, aproximando e afastando sua extremidade inferior da mandíbula fixa (CHAVES, 2003).

Os britadores de mandíbulas são ainda dotados de volantes, que têm função de armazenar energia cinética durante sua operação (CHAVES, 2003). O volante acumula energia nos períodos em que o equipamento opera vazio, ou seja, instantes em que não é necessário transmitir esta energia sob forma de esforços para fragmentar rochas. Tal energia será despendida no momento em que o britador for alimentado e tiver que quebrar as

partículas entre as mandíbulas. Desta maneira o motor do equipamento é aliviado consideravelmente. Outra função de um dos volantes é trabalhar como uma grande polia, acionada por correias em V a partir do motor. A Figura 1 mostra um esquema do funcionamento destas máquinas.



Figura 1 – Britador de mandíbulas de 1 eixo. (fonte: MANUAL METSO, 2005)

O outro tipo de britador tem dois eixos e duas placas de articulação. O primeiro é um eixo pivotado onde o queixo se apóia, enquanto o outro é excêntrico, acionando as duas placas. Neste caso a mandíbula móvel faz um movimento pendular puro em direção à mandíbula fixa. Os britadores de dois eixos custam cerca de 50% mais que os de um eixo de tamanho equivalente, sendo indicados pra materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação (LUZ, 2004). A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões da abertura da alimentação. A granulometria de produto é estabelecida pelo ajuste da descarga, definida pela razão de redução.

Os britadores giratórios são os equipamentos de britagem utilizados quando as taxas de alimentação de material a ser fragmentado são altas. Em outras palavras, são máquinas empregadas em circuitos de alta produção, pois são capazes de receber grande quantidade de material. Seu princípio de funcionamento consta do movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida. Este movimento circular faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao equipamento a grande capacidade de operação citada.

Nos britadores de impacto a fragmentação é feita por impacto ao invés de compressão. Por meio do movimento das barras parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação. Há também os britadores primários de rolos dentados, que consistem de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa. O movimento giratório do rolo provoca compressão e cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara.

Este trabalho concentra-se nos britadores de mandíbulas de 1 eixo, pois são os equipamentos utilizados no caso analisado.

2.1.2. Britagem Secundária

Compreende-se por britagem secundária todas as etapas de britagem imediatamente posteriores à primária. O objetivo desta operação é a redução granulométrica do material para

a moagem ou outras operações de britagem posteriores. É comum na britagem secundária o descarte prévio da fração fina na alimentação, denominado “escalpe”.

A principal finalidade desta prática é diminuir a vazão alimentada ao britador. Os finos menores que a APF do britador passam direto por ele. No entanto, passam desgastando as superfícies com as quais certamente entram em contato e contribuem consideravelmente para seu desgaste. Conforme a partícula é mais fina, sua área de superfície aumenta. A umidade das frações granulométricas é proporcional à área de superfície disponível e assim é mais elevada para partículas mais finas. Desta forma, esta fração contribui para empastar ou “embuchar” as mandíbulas, podendo até eliminar sua capacidade de processar o material.

Os equipamentos normalmente utilizados nesta fase são britadores de mandíbulas secundários, britadores giratórios secundários, britadores cônicos, de impacto e britadores de rolos. Os britadores secundários de mandíbulas, giratórios e de impacto são semelhantes aos primários, contanto apenas com menores dimensões.

O britador cônico opera segundo os mesmos princípios do britador giratório, porém no primeiro, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um maior tempo de retenção das partículas nesta região. Nos britadores giratórios a descarga se dá por gravidade, enquanto no cônico, esta é condicionada ao movimento do cone (LUZ, 2004). A abertura de saída da máquina é determinada pelo movimento vertical do cone, controlado por dispositivos hidráulicos. Um esquema deste tipo de equipamento é mostrado na Figura 2.

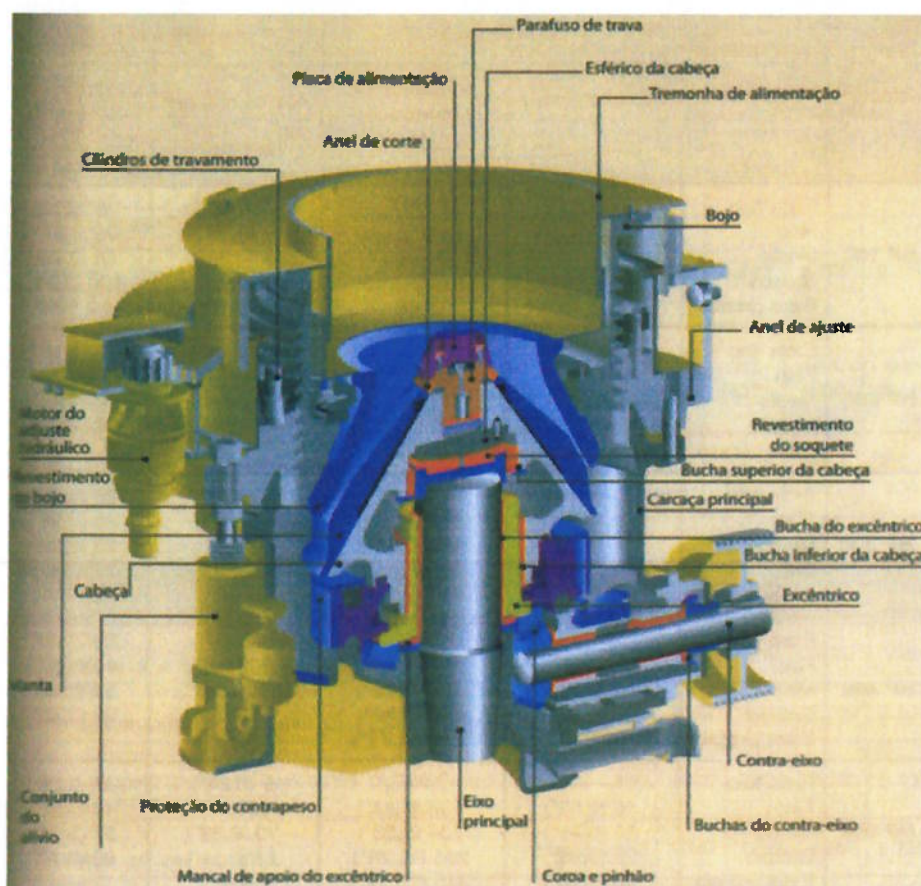


Figura 2 – Ilustração esquemática de corte de um britador cônico da linha Metso HP, destacando principais componentes. (fonte: MANUAL METSO, 2005)

2.1.3. Britagens Terciária e Quaternária

Em geral, as britagens terciária ou quaternária representam a última etapa de britagem, apesar de não faltarem exemplos de usinas com mais estágios. Os equipamentos normalmente utilizados são os britadores cônicos, cuja granulometria máxima do produto obtido está compreendida na faixa de 3 a 25 mm, com uma razão de redução de 4 a 6:1 (LUZ, 2004). Esta etapa de britagem é normalmente executada em circuito fechado com peneiras, para um maior controle de operação.

A operação em circuito fechado é feita principalmente para garantir que todo o produto da britagem seja limitado superiormente. Este procedimento raramente é necessário nos estágios primário e secundário da britagem. Existem duas formas possíveis de fechar o circuito: na peneira (circuito normal) ou no britador (circuito reverso). O material que é retido na peneira e retorna é chamado “carga circulante”.

No circuito normal o material produto de circuitos anteriores de britagem, somado à carga circulante, constitui a alimentação desta etapa, sendo despejado no britador. O produto deste britador é alimentado em uma peneira. O material passante segue para a continuação do processo, enquanto o material retido retorna ao britador, ou seja, a carga circulante que vai se somar a uma nova alimentação.

O circuito reverso funciona de maneira semelhante, porém a carga circulante somada à nova alimentação passa primeiro pela peneira. O material passante segue na continuação do processo, enquanto o retido é alimentado ao britador. Todas as frações resultantes desta britagem constituem então a carga circulante.

Além dos britadores cônicos um outro tipo de equipamento vem sendo instalado nas usinas de beneficiamento, principalmente em pedreiras e em outras que requerem controle de forma de partículas e geração de finos. Trata-se dos impactores de eixo vertical (vertical shaft impactor, VSI).

Estes equipamentos combinam diversas ações de fragmentação em uma única máquina, para processar praticamente qualquer tipo de material, seja ele abrasivo ou friável, sendo mais tolerável aos materiais aderentes que outros tipos de britador. São empregados largamente em pedreiras, pois são comprovadamente produtores de agregados de alta qualidade, especialmente no que se refere à cubicidade do produto, processando inclusive rochas de alta abrasividade. A cominuição por impacto de alta velocidade obtida em um VSI melhora a resistência e o formato da pedra, reduzindo o teor de umidade do produto e facilitando o peneiramento, gerando ao mesmo tempo produtos de maior qualidade e a custos inferiores (MANUAL METSO, 2005).

Outra razão para o amplo emprego do VSI em pedreiras é sua excelente capacidade de produção de areia de brita. “Pela ação de cominuição rocha contra rocha produz areia com partículas altamente cúbicas com arestas arredondadas, conferindo ao concreto alta trabalhabilidade e bombeabilidade. Sua tolerância à alimentação de finos e umidade torna seu uso interessante em instalações onde existe excesso de geração de pó de pedra e grande passivo de finos de pedra, transformando estes materiais em areia de excelente qualidade” (MANUAL METSO, 2005).

Os britadores VSI são capazes de produzir modificações bem controladas na forma das partículas, dando-lhes formato cúbico ou arredondado. Essa forma das partículas é atribuída aos mecanismos que ocorrem no rotor e na câmara de britagem: impacto, abrasão e atrição. Parte do material alimentado vai para um rotor, que o projeta a altas velocidades contra as paredes da câmara revestida com o próprio material, onde as partículas colidem entre si e são fragmentadas (LUZ, 2004). O equipamento é ilustrado pelo esquema apresentado na Figura 3.

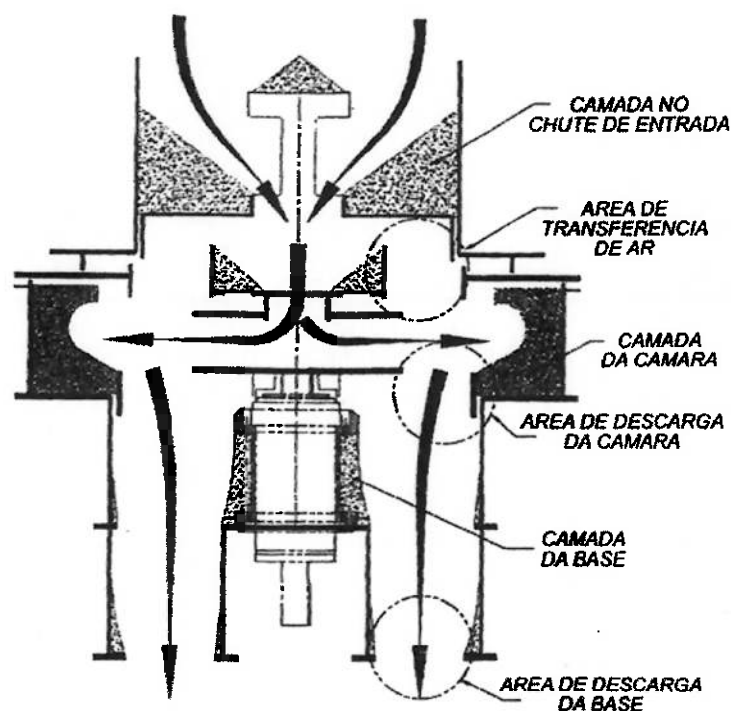


Figura 3 – Desenho esquemático do corte de um britador do tipo VSI. (fonte: Manual de Operação e Manutenção – Britadores VSI OmniRemco)

Este material que se acumula nas paredes da câmara (“morto”) não é indesejado, pois além de ajudar na fragmentação, ainda protege as superfícies internas do equipamento, que têm sua vida útil aumentada por consequência. Outra parte do material passa por fora do rotor, na forma de cascata, colidindo contra as partículas que passaram por seu interior, caracterizando um processo autógeno de cominuição.

O cascadeamento das partículas auxilia na redução do consumo de energia do processo, redução do consumo de peças de desgaste, aumento da capacidade de processamento do britador e controle na distribuição granulométrica. Este tipo de equipamento é conhecido também como “impactor rocha-contra-rocha” (LUZ, 2004).

Os britadores VSI têm sua operação controlada por variáveis como a variação da velocidade do rotor, dosagem da alimentação da cascata e do rotor e, para alguns modelos, até a seleção de diferentes diâmetros do rotor ou tipos de carcaça interna. São projetados para baixo requerimento de manutenção, facilidade de lubrificação e operação contínua.

2.2. Peneiramento

O objetivo do processo de peneiramento é a separação de um material em duas ou mais frações granulométricas, com tamanhos distintos, através de um gabarito físico (telas) que as classificam segundo seu tamanho geométrico. O material retido na tela da peneira é denominado “oversize” e o passante, “undersize”. Os gabaritos podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, retangulares, alongadas, de fios paralelos, chapas perfuradas ou placas fundidas (CHAVES, 2003).

Estes gabaritos mantêm entre si uma relação constante. A faixa de tamanhos submetidos aos peneiramento vai desde blocos de cerca de 0,5 m a frações extremamente finas de até 130 μm (CHAVES, 2003). Os equipamentos capazes de executar este serviço são classificados em peneiras estáticas (fixas), peneiras vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias horizontais, grelhas e trômeis (peneiras rotativas).

O peneiramento pode ser feito a seco, quando o material é classificado na sua umidade natural (que não pode ser muito elevada) ou a úmido, quando é alimentado na forma de polpa ou recebe água adicional através de aspersores dispostos sobre os decks.

Os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser divididos em três tipos. As grelhas, primeiro tipo, são constituídas por barras metálicas dispostas paralelamente entre si, mantendo um espaçamento regular. O segundo tipo, os crivos, são equipamentos formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensão determinada. As telas, por sua vez, são equipamentos constituídos por fios metálicos trançados, geralmente em duas direções ortogonais, de forma a deixarem entre si malhas ou aberturas de dimensões determinadas, podendo estas ser quadradas ou retangulares.

Atualmente muitas usinas vêm substituindo telas metálicas por telas de borracha, que trazem consigo diversas vantagens operacionais, como maior vida útil devido ao menor desgaste, facilidade de substituição devido ao menor peso e melhor manuseabilidade, redução de ruído, entre outros.

Estes equipamentos podem ser classificados também de acordo com o tipo de movimento que executam. Nas peneiras estáticas a única força atuante é a gravidade e, por isso, estes equipamentos possuem superfície inclinada. Nos equipamentos vibratórios, eixos excêntricos e contrapesos fornecem impulsos rápidos à estrutura dos mesmos. Há ainda as peneiras trommel, que possuem a superfície de peneiramento cilíndrica ou ligeiramente cônica, que gira em torno do eixo longitudinal. Este, por sua vez, é inclinado, forçando o movimento das partículas.

Nas peneiras vibratórias, mais especificamente, o movimento vibratório é caracterizado por impulsos rápidos, normais à superfície, de pequena amplitude (1,5 a 25 mm) e de alta frequência (600 a 3.600 movimentos por minuto), sendo produzidos por mecanismos mecânicos ou elétricos (MANUAL METSO, 2005). As peneiras vibratórias podem ser classificadas quanto ao seu tipo de movimento. Há aquelas em que o movimento vibratório é praticamente retilíneo, em um plano normal à superfície de peneiramento (peneiras vibratórias horizontais) e aquelas em que o movimento é circular ou elíptico neste mesmo plano (peneiras vibratórias inclinadas).

Existe uma linha de peneiras vibratórias de múltipla inclinação, ou peneiras tipo banana. Estes equipamentos têm decks com inclinação gradualmente variável. O declive inicial maior aumenta a velocidade de transporte do material e, como resultado, a capacidade de manuseio e a consecutiva redução da inclinação ao longo do percurso proporcionam superior eficiência de classificação (MANUAL METSO, 2005).

As peneiras banana destinam-se principalmente ao mercado de agregados e às aplicações de separação intermediária e final, em peneiramento a seco ou em via úmida. O limite do tamanho máximo de material alimentado deve ser inferior a 250 mm (10") e a classificação pode ser dentro da faixa de 100 a 3 mm. A Figura 4 traz um esquema do princípio de funcionamento destes equipamentos (MANUAL METSO, 2005).

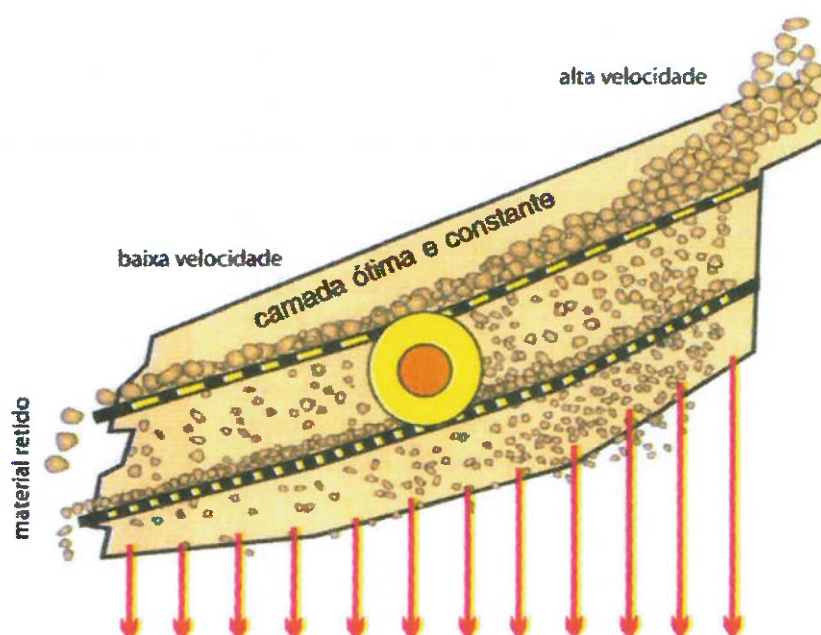


Figura 4 – Princípio de funcionamento das peneiras com inclinação variável. (fonte: MANUAL METSO, 2005)

Um equipamento de peneiramento é definido inicialmente pelas suas dimensões e pelo tipo de abertura (quadrada, retangular, circular, elíptica ou alongada), havendo uma relação entre o tamanho máximo dos fragmentos lançados sobre a tela e sua abertura. No caso das grelhas, o tamanho máximo da menor dimensão da partícula que atravessa as barras paralelas é determinado pelo afastamento entre estas.

Para o dimensionamento de peneiras são necessárias algumas informações importantes. É importante conhecer características do material a ser peneirado, tais como densidade, umidade, tamanho máximo da alimentação, distribuição granulométrica, presença de materiais argilosos, forma das partículas, entre outros. Além disso, é importante saber a capacidade necessária à peneira, as faixas de separação do produto desejadas, a eficiência desejada e o tipo de serviço a que servirá (lavagem, classificação final, intermediária, etc.).

O dimensionamento de peneiras deve abranger duas condições independentes e igualmente importantes para o seu devido funcionamento, a área da tela necessária e a espessura do leito. Há diversos métodos para dimensionar peneiras. Neste trabalho será empregado o método apresentado no MANUAL METSO, 2005 (6a. Edição).

3. A Empresa

O Grupo Embu S. A. atua no mercado brasileiro desde 1964, fornecendo agregados para construção civil e concreto. Além do pioneirismo no investimento e aplicação de modernas técnicas de extração de rocha e de material agregado, a empresa também busca a qualidade e eficiência no desenvolvimento de novas tecnologias no concreto.

O grupo é hoje composto por quatro pedreiras, localizadas em Embu das Artes, Mogi das Cruzes e Perus, no Estado de São Paulo e em Vila Velha, Espírito Santo. Todas as unidades empregam modernas técnicas de lavra e beneficiamento de rocha, possibilitando a produção de produtos finais de qualidade e dentro das normas técnicas atuantes.

Em todas as suas unidades, no processo de lavra, as bancadas são preparadas para desmonte com a utilização de perfuratrizes hidráulicas e pneumáticas, equipamentos de otimização de desmonte baseados em planejamento de lavra, instrumentação com estação total e GPS para nivelamentos, escaneamento das faces e perfilagem dos furos. O desmonte é controlado, evitando vibrações excessivas, ultra lançamentos e impactos de ar, respeitando todas as normas técnicas oficiais de operação.

Após o desmonte o material é transportado para o beneficiamento, onde se destaca o moderno sistema de britagem quaternária implantado em todas as pedreiras do Grupo. Trata-se da aplicação de britadores VSI (Vertical Shaft Impactor), que proporcionam melhor produção e melhorias nas formas dos materiais em diversas faixas granulométricas.

São produtos da empresa todas as classificações granulométricas de brita, além de vários tipos de areia, pedrisco, bica corrida e concreto.

4. O Software Utilizado: Bruno

O software Bruno é uma ferramenta computacional para simulação especificamente de circuitos de britagem, desenvolvida pela Metso, fabricante de equipamentos para mineração de presença e atuação mundial. O programa possui uma ampla base de dados contendo características de desempenho nominais da maioria dos britadores, peneiras e alimentadores fabricados pela empresa.

O programa realiza basicamente o mesmo trabalho requerido em um cálculo manual com base em catálogos impressos, exceto pelo fato de que considera efeitos de diversos parâmetros relacionados ao desempenho dos equipamentos. Esta consideração afeta diretamente os resultados relativos a granulometria e fluxos calculados dos produtos de cada máquina do circuito.

Os algoritmos de cálculo usados pelo programa são calibrados empiricamente, através de informações de diversos circuitos industriais que operam os equipamentos dele constantes. O programa Bruno não determina se o circuito é prático ou não, mas pode ser um bom meio para indicar a presença de sérios problemas no processo.

A operação do programa é relativamente simples e prática. A área de trabalho permite a inclusão de equipamentos, dispostos em uma barra de ferramentas específica, e a ligação entre eles por meio de linhas de fluxo. As máquinas estão divididas por tipo em: alimentadores, britadores giratórios, britadores de mandíbulas, britadores cônicos, britadores HSI, britadores VSI, peneiras, silos e pilhas. Há ainda um módulo para simulação de britadores específicos que permite a inclusão no circuito de equipamentos de britagem não constantes do banco de dados do programa ou ainda, não fabricados pela Metso.

Uma vez inserido no processo e definido o modelo da máquina, pode-se definir as várias condições de operação do equipamento, como ajustes de abertura, fatores de capacidade e de carga, malhas de peneiras, entre muitos outros. Quanto mais informações sobre a operação real estiverem à disposição do usuário, maior será a acurácia e a representatividade da simulação gerada pelo Bruno.

Uma vez completo o circuito, com alimentação, máquinas e fluxos, executa-se o módulo de cálculo, do qual podem resultar mensagens indicativas de erros no processo. Corrigidos estes erros, um novo cálculo traz resultados relativos a granulometrias dos diversos fluxos existentes (inclusive em forma de curvas gráficas comparativas), vazões, partições de peneiras, além de uma folha de dados completa descrevendo o circuito e cada equipamento e fluxo dele constantes, individualmente.

Neste trabalho o programa em questão foi utilizado extensamente, como ferramenta principal para a execução das análises e simulações propostas nos objetivos. Apesar de mostrar-se ligeiramente limitado no que diz respeito à presença de equipamentos antigos fabricados pela empresa (principalmente britadores de mandíbulas), o Bruno foi essencial para o bom desenvolvimento do trabalho.

5. Simulação Computacional do Circuito

5.1. Considerações Iniciais

O primeiro passo para a representação computacional do circuito de britagem da Mineração Juruaçu foi a compreensão e assimilação integral de seu funcionamento. Trata-se de um processo consideravelmente extenso e complexo, com muitas variantes e características peculiares. Por este mesmo motivo é extremamente flexível, permitindo produção maior ou menor dos produtos desejados, conforme a característica praticamente diária da demanda de mercado. O fluxograma detalhado do circuito é apresentado na Figura 5.

EMBU S.A.



Figura 5 - Fluxograma de Britagem da Mineração Juruacu

Este circuito opera integrado a um circuito de produção de areia, fornecendo-lhe parte de sua alimentação. Outra característica do circuito é a presença de muitos equipamentos, principalmente britadores que, além de fragmentar os produtos, ainda conferem a alguns deles formato de partículas adequado às suas aplicações.

Por ser bastante extenso, para a simulação optou-se por subdividir o circuito em quatro grandes blocos. O primeiro compreende a britagem primária, desde a alimentação de ROM até a pilha pulmão primária, incluindo o sistema de lavagem e separação de finos para produção de areia. O segundo bloco representa as britagens secundária (circuito aberto) e terciária (circuito aberto, com escalpe). O terceiro bloco inclui a britagem quaternária (com escalpe), o fechamento do circuito (retorno a um britador VSI), além de duas grandes peneiras de classificação final. O quarto e último bloco inclui muitos equipamentos, como peneiras (classificação intermediária e final), britador VSI, espiral classificadora e peneira desaguadora.

O enfoque do estudo proposto neste trabalho está em equipamentos constantes do segundo e terceiro blocos. O primeiro foi simulado devido à sua importância para o prosseguimento do processo no que diz respeito a granulometria do material. O quarto bloco, no entanto, não foi considerado neste trabalho por não representar a área de interesse proposta.

O terceiro bloco merece atenção especial, não só devido à sua maior complexidade, mas também por ser uma etapa que gera cinco diferentes produtos, que podem retornar individualmente por circuito fechado à britagem ou serem armazenados em silos, já como produtos finais. Esta flexibilidade permite 32 diferentes combinações de circuito. Além disso, há ainda outra ferramenta utilizada para adequar a produção à demanda periódica. Trata-se da variação do ajuste da posição fechada do britador terciário cônico, que pode ser maior quando se deseja produção mais elevada de produtos grossos, como pedra 4 ou pedra 3.

A simulação de todas as possíveis combinações de produção e retorno de material se mostrou injustificável, já que para todos os casos os equipamentos são os mesmos. Desta forma foram avaliados os casos extremos, em que há exigências máximas ou mínimas dos equipamentos. Como forma de mediar esta avaliação e também como meio de se obter mais fontes de comparação com a situação real foram simuladas situações intermediárias às extremas.

Como não há no programa representações equivalentes a todos os equipamentos existentes no circuito real, alguns deles foram simulados através do módulo de inserção manual de características e curvas operacionais. Em uma segunda instância, a solução adotada para simular grande parte das máquinas não constantes do programa foi a utilização de equipamentos presentes, mas de modelos similares. Para isto uma atenção especial foi despendida às características funcionais, construtivas e operacionais das máquinas reais e das disponíveis no software, equiparando-as o máximo possível para garantir a representatividade do modelo.

Para a calibração dos modelos desenvolvidos foram considerados diversos dados reais como granulometrias obtidas a partir de amostragens de produtos finais e intermediários, modelos e configurações de todos os equipamentos, taxas de alimentação e de fluxo, motorizações, entre outros. Alguns dados foram medidos e amostrados, porém grande parte foi fornecida caprichosamente pelos engenheiros Adélio Martins (Gerente de Beneficiamento)

e Leonardo Motta (Gerente Geral da Unidade).

O ROM de todo o processo é transportado por caminhões fora de estrada até o início da britagem. Limitações de tempo e recursos impediram amostrá-lo e analisá-lo adequadamente quanto à sua granulometria, por se tratar de material excessivamente grosso. Seria necessária amostragem de várias toneladas deste material para garantir a representatividade em seus ensaios. No entanto, as características físicas e geomecânicas da rocha da jazida são bem conhecidas e o principal ponto de interesse relativo à sua granulometria se refere ao tamanho máximo de material presente (“top size”).

A solução encontrada para a obtenção do tamanho do top size foi uma avaliação direta do produto das detonações, bem como do material submetido à ação do rompedor hidráulico, que originalmente constituía rochas não britáveis devido às suas grandes dimensões (matacões). Foram acompanhados alguns turnos de carregamento e medidos fragmentos de rochas que se destacavam entre a carga por seu tamanho. Através destas análises foi possível determinar o top size do ROM, fixado em cerca de 700 mm.

A taxa de alimentação do ROM foi tomada com base nas médias diárias de operação da pedreira e fixada em 400 t/h.

5.2. Primeiro Bloco de Simulação – Britagem Primária

A simulação deste bloco com equipamentos, configurações e valores está ilustrada no APÊNDICE 1.

5.2.1. Alimentador A1

O processo de beneficiamento nesta unidade se inicia com a descarga da rocha em um alimentador vibratório dotado de grelha de escalpe, que retira os finos e a areia eventualmente presente para aliviar o britador primário.

O equipamento real é um alimentador Metso, modelo AV6'x22', com área de peneiramento de 12,3 m², capacidade para 900 t/h de material e abertura de 4” entre os trilhos da grelha. O equipamento simulado no Bruno é um alimentador modelo HREF76”x20', com área de 11,6 m², capacidade para 1000 t/h, abertura de 4” entre os trilhos e capacidade de recepção de material de até 1100 mm.

A simulação deste equipamento foi bem sucedida e apontou uma carga de 31% de sua capacidade original, condizente com a operação real.

5.2.2. Peneira P1

O material passante por entre as aberturas da grelha em A1 é transportado por correia à peneira P2. A função desta peneira é lavar o material, retirando a areia e terra a ele agregadas. Isso é feito através de jatos de água com alta pressão dirigidos ao material peneirado. A água contendo areia cai em um sistema de coleta e é encaminhada ao um sistema de armazenagem (caixa de sedimentação), enquanto o material retorna ao circuito, somando-se ao produto do britador primário. A tela do deck superior tem como função proteger a do inferior contra choques de blocos maiores de rocha que possam eventualmente

cair sobre a mesma.

O equipamento real instalado é uma peneira vibratória Metso modelo XH8'x20'DD, com área de peneiramento de 14,9 m². O peneiramento é feito a úmido em dois decks, o primeiro com malha metálica de 12,5 mm e o segundo, com telas também metálicas, de abertura 4,8 mm. O equipamento simulado no Bruno é o modelo XH2438x6096II, com dimensões idênticas às reais, mesmas malhas de telas e capacidade para receber 750 t/h de material.

5.2.3. Britador Primário

O material retido na grelha do alimentador A1 é encaminhado, por movimentos vibratórios e gravidade, ao britador primário. Esta britagem é feita com material com sua umidade natural e é a primeira etapa de cominuição a que este é submetido.

O equipamento instalado é um britador de mandíbulas Metso modelo 100x80, dimensões da boca de 1,00 x 0,80 m, operando com ajuste na posição aberta de 7" (178 mm). Nesta configuração, tem capacidade de em média 200 m³/h de alimentação, correspondente a cerca de 440 t/h de material. Como descrito anteriormente, o top size de sua alimentação foi considerado igual a 0,70 m. Do produto, 80% é passante em 165 mm (6,5").

Da observação visual da operação deste equipamento pode-se inferir que seu fator de carga é alto, pois ela opera com a câmara sempre cheia, como ilustrado na Figura 6. O fluxo de sua alimentação é constantemente controlado pelo operador através de alterações na velocidade do dispositivo vibratório do alimentador A1. Para que a caixa do alimentador não fique muito cheia, muitas vezes os caminhões têm que aguardar para descarregar.



Figura 6 – Britador primário 100x80 em situação operacional usual.

Por este motivo, foi feita uma análise detalhada deste britador no sentido de substituí-lo por outro maior. A empresa, após estudos e análises junto a fabricantes optou pela compra de um britador Sandvik 1208 Jawmaster, o qual deverá ser entregue no início de 2007.

A simulação deste equipamento considerou inicialmente o modelo 100x80, com o

objetivo de representar a situação atual do circuito, sendo calibrada de acordo com a mesma. O modelo maior será analisado mais adiante, neste trabalho.

Como no programa só há britadores da série C, foi selecionado um modelo com dimensões da boca e capacidades para ajuste APF de 6" (150 mm), resultando no modelo C110 como representante mais fiel da máquina real (boca de 1,10 x 0,85 m). Sua capacidade nominal é de 231 m³/h (370 t/h para material com densidade aparente de 2,2 t/m³).

A simulação foi bem sucedida, representando inclusive o alto carregamento desta máquina (fator de carga de 88%). De seu produto, 80% é passante em 160 mm (6,3"), valor bem próximo ao real. Assim, esta foi considerada satisfatória.

5.3. Segundo Bloco de Simulação – Britagem Secundária

Ao produto do britador primário soma-se o material passante na grelha do alimentador A1 e retido nas malhas da peneira P1. Esta composição é armazenada em uma pilha pulmão dotada de uma abertura de alimentação em sua base. Este alimentador despeja o material em uma correia que o transporta para o britador secundário.

A transição entre os blocos de simulação foi feita através da equiparação das granulometrias do produto final do primeiro bloco e da alimentação do segundo. Tal processo consistiu na inserção de dados de curvas do primeiro bloco fornecidos pelo Bruno no módulo "Insert My Fraction" na alimentação do segundo.

A simulação deste bloco com equipamentos, configurações e valores está ilustrada no APÊNDICE 2.

5.3.1. Britador Secundário

O equipamento instalado é um britador de mandíbulas Metso, modelo 100x60 (boca de 1,00 x 0,60 m), operando com ajuste em posição fechada de 102 mm (4"). O top size da alimentação desta máquina foi determinado através da curva de produto do britador primário e também por amostragem física de material. Foi considerado igual a 230 mm (aproximadamente 9").

A observação visual da operação deste equipamento indica fator de carregamento baixo, pois sua câmara está normalmente vazia e a maior parte do material alimentado passa direto pela mesma. Eventualmente algum fragmento maior é cominuído por este equipamento. A Figura 7 ilustra tal situação.



Figura 7 – Britador secundário 100x60 operando com câmara vazia (esquerda).

A simulação deste britador foi mais complexa que a dos anteriores. A primeira tentativa foi sua representação através de um britador C100 (boca de 1,00 x 0,76 m), com ajuste APF de 102 mm (4") e capacidade para 134 m³/h de material. Porém esta configuração resultou em um fator de carregamento alto, o que não corresponde à situação real. Além disso, a capacidade deste modelo é ligeiramente inferior à requerida.

A segunda tentativa de simulação contou com a aplicação de um modelo maior, o C105 (boca de 1,06 x 0,70 m), com mesmo ajuste APF e capacidade suficiente para atender à alimentação requerida. Esta resultou em uma situação muito mais próxima à real e, por isso, foi considerada aceitável.

5.3.2. Peneira P2

O produto da britagem secundária é disposto em uma segunda pilha pulmão que, a exemplo da primeira, também tem sua base dotada de uma abertura com alimentador vibratório. O material é transportado por correia até a etapa de britagem terciária.

Tal processo inicia-se com o escalpe de material, feito na peneira vibratória inclinada P2. O equipamento instalado é um modelo XH5'x12'DD, fabricado pela Metso. A área de peneiramento é de 5,6 m² e as telas instaladas são de borracha e têm malhas de 115 e 75 mm, para primeiro e segundo decks, respectivamente. O processo é realizado a seco. O material retido nestas telas é usualmente encaminhado para britagem terciária. Há ainda a alternativa de desviá-lo já como produto, pois está na granulometria de rachão. Esta configuração foi desconsiderada pois elimina o restante do circuito e também porque configura uma operação eventual.

A primeira tentativa de simulação deste equipamento foi a utilização do equipamento XH1529x3658II, com área de 5,6 m² e mesmas malhas. Porém esta se mostrou infrutífera, pois as malhas máximas de catálogo para esta máquina são de 75 e 67 mm para deck superior e inferior, respectivamente.

A segunda tentativa foi a utilização do modelo N5'x12'DD, que aceita as malhas desejadas. A alimentação desta máquina é de 300 t/h de material, das quais 115 t/h (38%) são material retido e seguem para britagem terciária.

5.3.3. Britador Terciário

No circuito opera um rebritador de mandíbulas Metso 120x40 (boca de 1,20 x 0,40 m), ajustado para posição fechada de 46 mm (cerca de 2") e com capacidade para 170 t/h de material.

A primeira tentativa de simulação foi a utilização do modelo C80, com capacidade para 80 t/h em ajuste 46 mm. No entanto, já era esperada uma carga muito alta, confirmada pela simulação em cerca de 130%.

Outro esboço de tentativa foi utilizar o britador C100. Porém esta foi logo descartada por simples verificação no catálogo impresso (manual de britagem), pois tal equipamento não permite ajuste de posição fechada de 46 mm.

Devido à ausência de outros equipamentos possíveis no acervo do software, utilizou-se seu módulo "My Crusher", que permite simulação específica de praticamente qualquer máquina mediante inserção das frações granulométricas de produto, capacidade nominal, entre outros. Tais valores foram tomados de curvas e tabelas de especificações técnicas presentes no manual de britagem (MANUAL FAÇO, 1994). Tal simulação se mostrou bastante aceitável devido aos resultados obtidos, fornecendo fator de carregamento de 67%.

5.4. Terceiro Bloco de Simulação

O produto do britador terciário se soma ao material passante na peneira P2 e alimenta o terceiro bloco de simulação. A transição do segundo para o terceiro bloco foi feita segundo os mesmos critérios da primeira transição descrita, ou seja, foi tomada a granulometria do produto final do segundo bloco e esta foi inserida no módulo "Insert My Fraction" da alimentação do terceiro.

Neste terceiro bloco, como já descrito, há várias possíveis combinações de produção e, desta forma, foram desenvolvidas as duas configurações extremas e duas intermediárias. A primeira configuração é a que representa a menor carga usualmente alimentada ao VSI (ilustrada no APÊNDICE 3). Para o desenvolvimento da simulação computacional deste circuito foi tomada como base a configuração extrema de maior carga sobre o britador VSI, na qual todos os produtos de peneiramento retornam a este e para a qual o mesmo foi dimensionado (configuração ilustrada no APÊNDICE 4). As demais configurações desenvolvidas tiveram como objetivo auxiliar na calibração dos parâmetros deste bloco de simulação.

5.4.1. Peneira P3

O primeiro equipamento deste terceiro bloco é a peneira vibratória P3, fabricada pela Metso. É o modelo XH4'x13', com área de peneiramento de 4,8 m² e um só deck com tela de borracha e de abertura 45 mm. Esta peneira recebe alimentação de 300 t/h. Ela atua como escalpe do equipamento posterior, um britador cônico.

A simulação deste modelo foi feita através do uso da peneira XH1219x3658, com área de 4,5 m². Os resultados se mostraram bons apontando partição de cerca de 44% de material retido.

5.4.2. Britador Quaternário

A alimentação desta máquina é o material retido na peneira P3 (de escalpe). O modelo em operação é um rebritador cônico 120RS, fabricado pela Metso. Seu ajuste em posição fechada pode ser alterado quando maiores produções de frações mais grossas (pedra 4 e pedra 3) são desejadas. Para este trabalho foi utilizado o ajuste mantido em operação normal, de 17 mm (5/8"). O top size de sua alimentação é de 92 mm, determinado a partir da curva de sua alimentação. Na Figura 8 o par peneira P3 e britador quaternário são vistos em operação.



Figura 8 – Britador cônico quaternário operando em conjunto com peneira de escalpe P3.

Tal equipamento não está presente no software e, por isso, foi feita uma análise do catálogo para verificação de qual modelo se aproximava mais dele. A primeira máquina cogitada foi o rebritador cônico HP200, capaz de receber até 113 m³/h de material com ajuste APF de 16 mm. Porém o mesmo foi descartado pois esta capacidade é muito pequena.

Seria até possível tentar simular o britador real com a utilização de uma máquina maior (HP300 ou HP400), porém uma das tentativas de otimização do circuito envolve exatamente a substituição desta máquina por outra da família HP. Desta forma, tal alternativa foi descartada.

Nenhum outro modelo do programa aproxima-se das condições e especificações necessárias para simular este rebritador. Portanto, mais uma vez foi utilizado o módulo “My Crusher” disponível. Os dados operacionais e granulométricos do produto desta máquina foram tomados do manual de britagem antigo e inseridos na simulação. O fator de carregamento resultante foi de 78%, considerado aceitável por sua proximidade ao valor real.

5.4.3. Peneira P4

Esta é uma máquina de grande porte, com capacidade de recepção de grande quantidade de material. O equipamento instalado é uma peneira vibratória inclinada Metso, modelo MN50020, com dimensões de aproximadamente 5 x 2 m (7' x 17'), configurando área de peneiramento de cerca de 10 m². Esta grande peneira consiste na primeira etapa de classificação final de produto no circuito, contando com três decks, sendo o primeiro de tela metálica com malha 60 mm, o segundo com tela de borracha de malha 30 mm e o terceiro com tela também de borracha e de malha 23 mm.

O material retido no primeiro deck tem granulometria de pedra 4 e é considerado rejeito do processo, eventualmente retornando ao britador secundário via transporte por caminhões. O material passante no primeiro deck e retido no segundo corresponde à granulometria de pedra 3 e é depositado em silo específico. O material passante no segundo deck e retido no terceiro tem granulometria de pedra 2 e é depositado em outro silo específico. Já o material passante no terceiro deck segue via correia transportadora para a peneira seguinte (P5), onde sofrerá nova classificação. Há a possibilidade física no circuito de retorno dos três primeiros produtos descritos que, neste caso, sofrem nova cominuição no britador VSI.

No software, o modelo que mais se assemelha à máquina real é o N7'x18"TD, o qual foi utilizado para simulação e calibração do circuito, contando com as mesmas telas e malhas reais. Sua alimentação é a soma do material passante na peneira de escalpe P3 com o produto do britador cônico e ainda com o produto do britador VSI.

Por tratar-se de uma etapa importante do circuito, o autor realizou uma amostragem na alimentação desta peneira. Foram coletados cerca de 260 kg de material (correspondendo a comprimento de 2 m da correia transportadora), posteriormente dispostos em uma pilha de homogeneização da qual se retirou uma alíquota para análise granulométrica. O resultado desta análise foi comparado à curva granulométrica apontada pelo software. Tal comparação é mostrada na Figura 9.

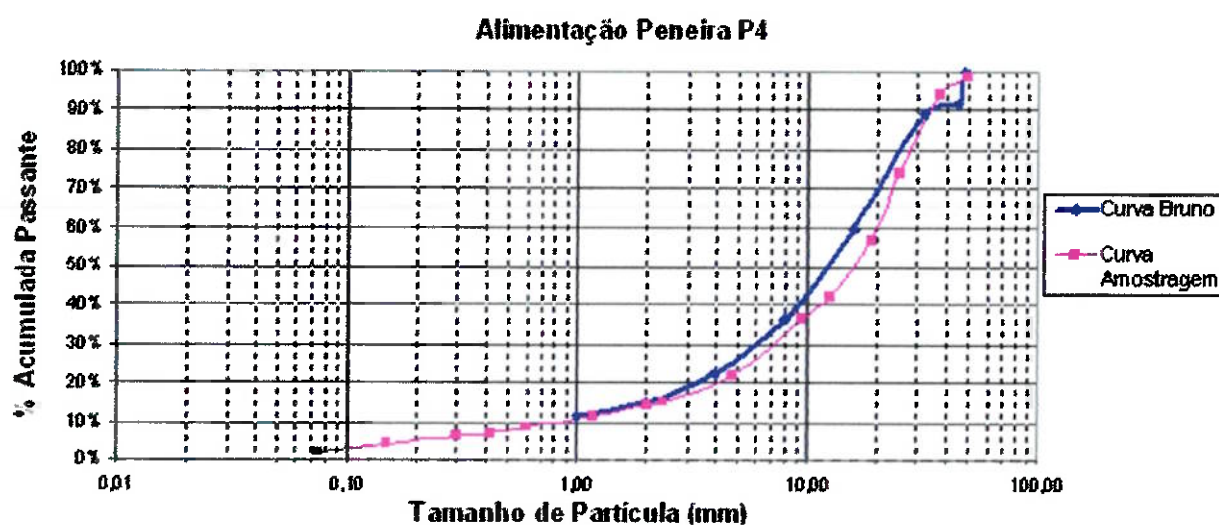


Figura 9 – Comparação entre granulometrias da alimentação da P4, obtidas por amostragem física de material e através da simulação do software.

Através da mesma amostragem foi possível calcular a taxa de alimentação da peneira P4, igual a cerca de 850 t/h. Na simulação o valor obtido foi de 860 t/h consistente, portanto, com a situação real.

5.4.4. Peneira P5

Esta peneira representa um segundo estágio de classificação final, recebendo o passante no terceiro deck da peneira P4 e separando-o através de seus 2 decks. Trata-se de uma peneira de inclinação variável, tipo “banana”, modelo CBS50020, de dimensões aproximadas de 5 x 2 m, área de peneiramento total de cerca de 10 m². Em seus dois decks estão instaladas telas de borracha sendo a primeira, com malha 14 mm e a segunda, com malha 12 mm.

O material retido no primeiro deck tem granulometria de pedra 1 e é depositado em silo específico, já como produto final. O material passante no primeiro deck e retido no segundo assume granulometria de pedra 1/2. Este último é retornado ao britador VSI continuamente, salvo pequenas exceções, quando surge eventual demanda de mercado por material nesta faixa. A pedra 1 também pode ser retornada ao VSI quando se deseja maior produção de materiais finos. O material passante no segundo deck segue para o restante do circuito de classificação.

No Bruno o modelo que mais se adequou ao real foi o TS302, segundo os critérios de tipo de equipamento, dimensões e, por consequência, área de peneiramento assim como condições operacionais (malhas mínimas, entre outras). A simulação mostrou bons resultados mediante o emprego de telas idênticas às reais.

5.4.5. Britador VSI

A principal função deste equipamento no circuito estudado é a geração de finos e controle sobre a forma das partículas do material. O modelo instalado é um britador REMCO 9500 Sandmax, operando potência total de 600 cv, dois motores de 300 cv cada. Não há opção por cascadeamento de material neste modelo de máquina.

Para a simulação deste equipamento, de fabricante diferente da Metso, o manual operacional que o acompanha foi estudado detalhadamente para verificação das condições necessárias à simulação. Inicialmente foi cogitada a necessidade de utilização do módulo “My Crusher” para tal, porém uma análise posterior do manual de britagem da Metso, principalmente no que se refere a curvas granulométricas de produto, porte e potência dos equipamentos, mostrou a possibilidade de adequação do modelo Barmac B9100.

Desta forma o circuito incluindo este modelo foi montado no software e simulado, mostrando resultados bastante satisfatórios. A ausência da opção de cascadeamento na máquina real foi simulada através da fixação do valor zero para a opção de porcentagem de material em regime de cascata no Barmac.

A alimentação deste equipamento é constante ao longo do turno operacional, porém tem uma gama grande de variações, pois é resultado direto das combinações de retorno de material possíveis a partir das peneiras P4 e P5. A situação de menor alimentação ocorre quando apenas o material classificado como pedra 1/2 retorna ao VSI e a oposta, de maior carga, quando todos os produtos retidos em todos os decks destas duas peneiras voltam ao

britador.

Através de análise da Figura 10 pode-se verificar as diferenças entre os materiais de alimentação e produto do britador VSI



Figura 10 – Alimentação (esquerda) e produto (direita) do britador VSI.

Da mesma forma que na peneira P4, o autor pessoalmente executou uma amostragem desta alimentação na última configuração descrita. Foram coletados cerca de 160 kg de material, correspondendo a comprimento de 2 m na correia transportadora, dispostos em pilha de homogeneização, da qual foi retomada e peneirada alíquota de cerca de 23 kg. O resultado desta amostragem, junto ao apontado para o fluxo correspondente pelo Bruno, é mostrado na Figura 11.

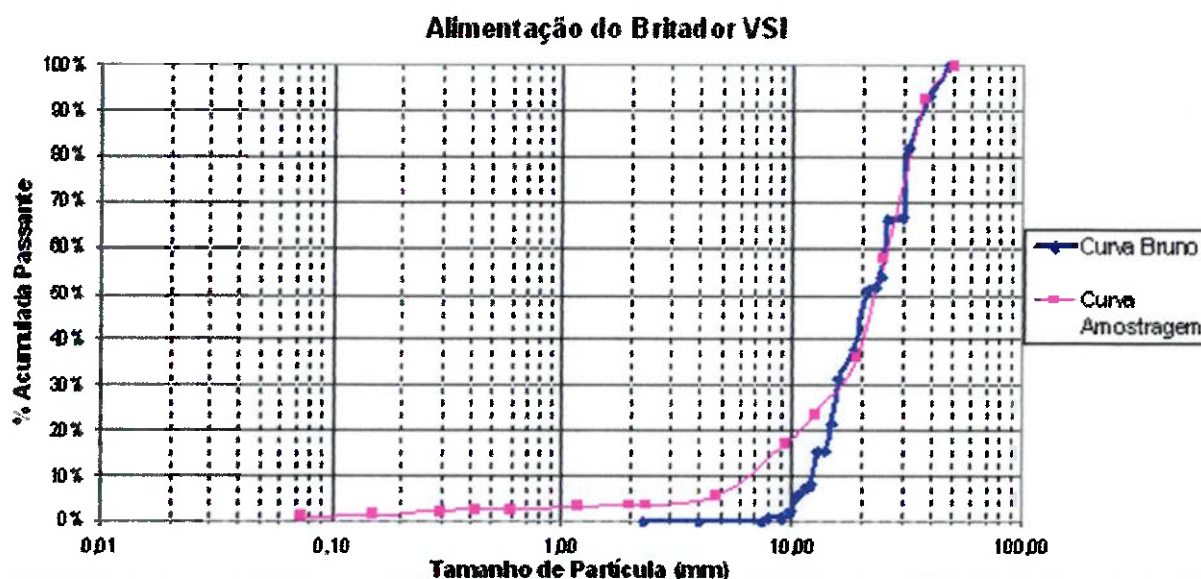


Figura 11 – Comparação entre granulometrias da alimentação do britador VSI, obtidas por amostragem física de material e através da simulação do software.

As curvas da Figura 10 mostram boa concordância até a malha de aproximadamente 12 mm, sendo que para tamanhos menores a simulação resultou em produto mais grosso. Esse fato, no entanto não prejudica o modelo simulado deste equipamento, pois o material com tal granulometria já é produto final de qualquer maneira, não retornando ao circuito de rebitagem.

A amostragem determinou fluxo de aproximadamente 450 t/h, enquanto o valor resultante do software foi de cerca de 510 t/h.

6. Simulação e Análise de Alterações Propostas no Circuito

6.1. Considerações Iniciais

Nesta parte do trabalho estão descritas as principais modificações apontadas como passíveis de aplicação ao circuito de britagem e classificação da Mineração Juruaçu. Tais alterações são resultados de estudos dos engenheiros responsáveis por sua operação, destacando-se o eng. Adélio Martins, gerente de beneficiamento da empresa, com quem elas foram diversas vezes discutidas e analisadas.

As simulações tiveram como referência o assim chamado Caso Base, resultante da modelagem do circuito industrial pelo programa computacional selecionado. Muito embora fossem necessárias aproximações entre os dados e informações do circuito industrial e aqueles obtidos nas etapas de ajuste dos modelos, os resultados foram considerados satisfatórios para os objetivos estabelecidos. Os resultados das simulações devem ser, portanto, analisados de forma relativa, ou seja, em relação ao Caso Base.

6.2. Alteração 1 – Substituição do Britador Primário

Esta modificação do circuito corresponde à solução encontrada para alívio do limite operacional que hoje é imposto devido à capacidade limitada do britador modelo 100x80 instalado.

O equipamento adquirido, um Sandvik Jawmaster 1208, não é de fabricação da Metso e, portanto, não consta como opção do software. Desta forma foi feita uma análise de similaridade entre este e os modelos disponíveis da série C de britadores primários de mandíbulas. Informações do modelo JM1208 foram tomadas de catálogos e contatos com seu fabricante.

Através de tal avaliação, concluiu-se que pode ser considerado modelo equivalente ao JM1208, o britador Metso C125. Ressalta-se que tal equivalência corresponde a capacidades e a curvas granulométricas de produtos, não se estendendo às aberturas de alimentação das máquinas, que são consideravelmente diferentes. No entanto, ambas têm gape suficientemente maior que o top size do material alimentado, 950 mm no C125 e 830 mm no JM1208, contra top size de 700 mm.

Como resultados verifica-se um alívio na carga do britador que passou de 90 para 79%, mantida a mesma taxa de alimentação total do circuito, igual a 400 t/h de ROM, conforme ilustrado no APÊNDICE 5. As curvas granulométricas dos produtos são muito semelhantes, uma vez que o ajuste em posição fechada é o mesmo, 178 mm ou 7".

A simulação foi estendida para verificação da máxima alimentação de ROM possível, calculada em 500 t/h. Como referência à situação real, estima-se que este valor possa ser um pouco maior, pois a capacidade do britador JM1208 é um pouco superior à do C125, 315 m³/h contra 294 m³/h, respectivamente. Tal situação é ilustrada no APÊNDICE 6.

6.3. Alteração 2 – Eliminação do Britador Secundário

Da análise dos dados do britador secundário 100x60, somada à observação visual de sua condição operacional e ainda ao modelo computacional criado no software Bruno, justificam-se os motivos da tentativa de exclusão do mesmo do circuito.

Para verificação da viabilidade desta operação esta máquina foi excluída do circuito simulado. Desta maneira, o material produto da pilha pulmão do britador primário seria despejado diretamente na pilha correspondente ao antigo pulmão do britador secundário. Esse procedimento permitiria um controle adicional da taxa de alimentação do restante do circuito. Não precisaria ser então necessariamente idêntica à de saída da primeira pilha, ou seja, a massa de material armazenado nos pulmões.

Após os cálculos computacionais, os resultados mostraram sobrecarga do britador terciário 120x40, mantidos todos os parâmetros originais. A carga apontada pela simulação passou de 78 para 109% para a mesma alimentação de 350 t/h, sem alterações granulométricas. Esta situação está mostrada no APÊNDICE 7.

Como tentativa de viabilizar a presente alteração modificou-se as malhas da peneira P2, que faz escalpe antes do britador 120x40. Alterando-as de 115 para 130 mm no primeiro deck e de 75 para 90 mm no segundo, a carga do britador diminui para 96%, ainda elevada. Esta situação está ilustrada no APÊNDICE 8.

Apesar de operacionalmente possível, tal situação não permite aumento da taxa de alimentação em relação à atual, ou seja, o ganho em produção com o novo britador primário é eliminado nesta etapa. Por outro lado, merece uma análise mais profunda, pois a desativação de um equipamento deste porte representa redução de custos operacionais. Isso ocorre porque além de ser responsável por certa parcela no consumo energético do circuito, ainda requer gastos com desgaste de mandíbulas, mão de obra de operação e manutenção, além de demais peças de reposição.

6.4. Alteração 3 – Aumento da Carga da Britagem Secundária

Esta alternativa é fruto dos resultados observados da análise dos dois casos anteriores. A substituição do britador primário mostrou que um aumento na alimentação geral do circuito é possível. Porém a simulação anterior apontou que tal incremento não se viabiliza para a rebitagem se o britador secundário 100x60 for retirado do circuito. Desta maneira, a presente alteração analisa a manutenção da máquina 100x60 no circuito aliada à elevação efetiva da alimentação de todo o circuito.

Da Alteração 1 verificou-se ser possível elevar a taxa de alimentação da britagem secundária para pelo menos 500 t/h sem ônus à pilha pulmão primária. Por este motivo, tal vazão foi considerada.

Efetuada os cálculos computacionais, verificou-se que o britador secundário suporta sem problemas esta vazão de material, com fator de carga de 55%. Porém, o mesmo não se aplica ao terciário, que assume carga maior que 120%. Assim, a vazão de saída da pilha pulmão do secundário deve ser distinta da vazão de alimentação do britador 100x60. Testes com o programa mostraram que a vazão de alimentação do britador 120x40 pode chegar a um

máximo de 430 t/h. A situação do bloco 2 com estas modificações está ilustrada no APÊNDICE 9.

Este é um ponto importante, pois as simulações posteriores à presente consideram este aumento de vazão em relação à situação real. Na situação atual a alimentação geral do terceiro bloco é de 350 t/h, podendo chegar com estas alterações a pelo menos 430 t/h, sem alterações na granulometria dos materiais. Testes no terceiro bloco demonstraram que na condição de maior carga no VSI, este suporta uma vazão correspondente a alimentação geral do bloco de até 410 t/h. Em configurações diferentes, quando menos material retorna a este equipamento, vazões maiores podem ser utilizadas. Para as demais modificações a vazão máxima de 410 t/h foi considerada. Tal situação do bloco 3 de simulações é mostrada no APÊNDICE 10.

6.5. Alteração 4 – Modificações das Malhas das Peneiras P3, P4 e P5

Este caso tem como principal objetivo aliviar a carga circulante do circuito, diminuindo a vazão alimentada ao britador VSI. O procedimento testado foi a modificação de algumas malhas das peneiras P3 (escalpe do britador cônico), P4 (primeiro estágio de classificação final) e P5 (segundo estágio de classificação final). Estas alterações são, no entanto, limitadas, principalmente no caso da P4 e P5, pois não pode comprometer a granulometria do material que em parte já é produto final.

Uma primeira tentativa foi diminuir a malha da P3 de 45 para 32 mm. Porém esta modificação teve influência apenas sobre o britador cônico e não interfere na carga do VSI. Além disso, com ela ainda há o risco de sobrecarga do primeiro já para a vazão atual de 350 t/h, ou seja, não é possibilitado um incremento de produção. Outra tentativa foi o aumento da mesma malha para 52 mm, que resultou em diminuição da carga do cone, porém em sensível aumento da do VSI, impossibilitando sua operação na configuração de retorno total para vazão alimentada ao bloco de 410 t/h, conforme visto no APÊNDICE 11.

Diminuições nas malhas das peneiras P4 e P5 também foram estudadas, porém o resultado foi o aumento da carga do VSI e não sua desejada diminuição. Aumentos nestas malhas comprometeriam a classificação final dos produtos.

Desta forma, não parece ser viável a alteração de malhas no circuito. Esta questão mereceria uma análise operacional mais detalhada, com execução de testes, ensaios granulométricos e avaliações para determinação empírica de sua aplicabilidade. A simulação computacional mostra fatores que a tornam impraticável.

6.6. Alteração 5 – Substituição do Britador Quaternário

Em uma segunda unidade da empresa (Pedreira Itapeti, em Mogi das Cruzes – SP) foi feita recentemente a substituição de um britador cônico Metso, modelo 120RA por um cone HP300, da mesma fabricante, com ótimos resultados. As atenções voltaram-se então para o cone 120RS instalado na unidade de Perus. Esta alteração se propõe a avaliar os resultados de simulações da troca desta máquina por outra também da linha de cones HP da Metso.

O britador cônico 120RS instalado opera com ajuste em posição fechada de 17 mm, o que lhe confere capacidade de cerca de 200 t/h para material com densidade aparente de 2,2

t/m³. Sua abertura de entrada tem tamanho de 152 mm (6"), tem peso de 18 t e seu motor opera com potência de 200 HP (150 kW). O equipamento recebe alimentação com *top size* de aproximadamente 92 mm e recebe fluxo correspondente a alimentação global do bloco de 350 t/h.

Vale ressaltar que as modificações estudadas neste item consideram a situação de operação em que todos os produtos das peneiras P4 e P5 (exceto o passante no segundo deck desta última) retornam ao britador VSI para rebitagem, ou seja, situação em que há exigência máxima desta máquina.

6.6.1. Análise para HP200

Como um primeiro candidato, esta máquina tem capacidade para cerca de 250 t/h com ajuste APF de 16 mm. Sua abertura de alimentação com câmara para médios é de 125 mm, tem peso de 10,4 t e seu motor opera com potência de 200 HP (150 kW).

Os resultados da simulação mostraram que, para este APF a carga sobre este britador é de 90% máxima para alimentação global de 350 t/h, aliviando consideravelmente a carga do VSI, que passou de 80% com o 120RS para 61% com o HP200. A máxima alimentação global possível para aplicação deste equipamento é de 380 t/h (carga no cone de 100% e no VSI de 67%). Esta situação está ilustrada no APÊNDICE 12.

Uma segunda configuração de operação foi estudada neste caso. O ajuste APF foi alterado para 19 mm e foi verificado um aumento na capacidade de produção para alimentação global de até 400 t/h. Porém esta prática eleva a carga sobre o VSI para 77% e a operação do cone seria em seu limite extremo de capacidade, como mostrado no APÊNDICE 13.

6.6.2. Análise para HP300

A substituição do equipamento atual por um HP300 resulta em uma operação muito mais tranqüila, com carga sobre o cone de 72% e sobre o VSI de 61%, para alimentação global de 350 t/h. A carga sobre o cone chega a um máximo se esta for elevada para 440 t/h, ou seja, a instalação deste equipamento permite um considerável incremento de produção nesta fase do circuito. A situação descrita é ilustrada no APÊNDICE 14. Este uso praticamente mantém o fator de carga atual do VSI (80% com o 120RS contra 79% com o HP300), para uma alimentação muito maior. O produto do HP300 é mais fino que o do cone atual.

O HP300 é um britador com capacidade para 300 t/h (material com densidade aparente de 2,2 t/m³) em ajuste APF de 16 mm, com abertura de entrada de 150 mm (câmara para médios), tem peso de 15,8 t e motor de 268 HP (200 kW).

6.6.3. Análise para HP400

O britador cônico HP400 é uma máquina maior, mais robusta e conseqüentemente mais pesada. Sua capacidade em ajuste APF de 16 mm é de recepção de pouco mais de 380 t/h e seu gape com câmara para finos tem dimensão de 111 mm. Pesa cerca de 23 t e seu motor tem potência de 422 HP (315 kW).

De acordo com a simulação se esta máquina operar nas condições atuais (alimentação global de 350 t/h), seu fator de carga será de 57%, muito pequeno para uma máquina deste tipo, que deve operar com a câmara sempre cheia para garantir boa eficiência. Ainda neste mesmo caso, o fator do VSI cai para 61%.

Seguindo as análises anteriores, a alimentação global foi elevada até que a carga no cone fosse máxima. Quando isto ocorreu, o fluxo era de 530 t/h, configurando operação de porte muito maior que a atual. Porém o britador VSI e as peneiras P4 e P5 não acompanham este incremento tão acentuado, ficando sobrecarregados nesta situação (o VSI operaria com carga de 99%), como ilustrado no APÊNDICE 15. Em média, as novas taxas de alimentação global que vêm se mostrando aplicáveis estão na faixa de 430 t/h. Para este valor as cargas no cone e no VSI são de 75 e 77%, respectivamente.

6.6.4. Avaliação Comparativa Geral

A substituição do britador cônico 120RS por qualquer uma das três máquinas estudadas, HP200, HP300 e HP400, indica boas vantagens operacionais principalmente no que diz respeito à elevação da produção e geração de materiais mais finos. A seleção entre os três equipamentos apontados depende de vários outros fatores a serem considerados como, por exemplo, o econômico.

O britador HP200 é uma máquina menor, mais leve e mais barata que as demais. Porém tem capacidade também inferior, limitando maiores incrementos nas taxas de produção. No entanto permite operação com um ajuste APF variável até certo ponto, para não sobrecarregar o VSI.

O HP300 parece ser um meio termo entre o equipamento anterior e o HP400. Com peso um pouco inferior ao do cone 120RS, e dimensões parecidas, não exigiria obras civis de reforço de fundações ou para aumento de espaço em sua instalação. Assim poderia ser substituído com facilidade. Em questões operacionais permite funcionamento do circuito com alimentação consideravelmente mais elevada ou idêntica à atual, caso incrementos não sejam desejados. Para ajuste APF de 16 mm, produz material mais fino que o cone atual.

Já o HP400, por ser maior, provavelmente exigiria obras civis de reforço estrutural. Além disso, é um equipamento mais caro e que consome mais energia. Operacionalmente, permitiria um aumento muito grande na capacidade deste setor do circuito de rebritaagem, ou operaria tranquilamente para o incremento médio que vem sendo apontado como resultado. No entanto não configura operação desejável no caso atual por resultar em cargas excessivamente baixas para este tipo de equipamento, influenciando em sua eficiência. Por este motivo, apesar de permitir maior capacidade, o HP400 não seria tão flexível quanto o HP300 neste circuito.

7. Conclusões

A etapa mais complexa de todo o trabalho foi a calibração do programa computacional para obtenção de resultados os mais próximos possíveis da operação do circuito. Nesta foram utilizados dados de amostragens realizadas durante o processo, curvas granulométricas de análises periódicas de produtos, dados de catálogos comerciais e operacionais de equipamentos, além de informações obtidas através dos engenheiros da empresa e de observações da operação usual do circuito.

Apesar de requerer algumas simplificações o software Bruno se mostrou bastante útil e muito importante para a continuidade do trabalho, com um bom grau de aproximação. Talvez outros programas mais complexos e poderosos possam até representá-lo com mais acurácia, porém estes demandam análises e estudos muito mais profundos do processo, inclusive com a execução de testes empíricos para sua calibração, o que não só não era justificável para este caso como dificilmente seria possível.

Além de fundamental para o trabalho proposto, uma vez que foi bem calibrado, o modelo computacional do circuito representa uma ferramenta útil à empresa para novas avaliações de futuras tentativas de alterações e otimizações que possam vir a surgir, apesar das simplificações feitas.

As simulações dos diversos cenários para melhoria de desempenho e/ou aumento de produção do circuito indicaram resultados considerados coerentes com a operação do circuito. Assim, a plataforma de simulação desenvolvida no presente trabalho mostrou-se útil tanto em aspectos qualitativos da operação como também para estabelecer vazões e desempenhos dos equipamentos selecionados. Trata-se, portanto, de um recurso confiável para auxílio na tomada de decisões técnicas.

Em função do sucesso alcançado no desenvolvimento do recurso de simulação computacional e aplicação às várias etapas do circuito, recomenda-se estender os trabalhos ao quarto bloco do circuito da pedreira de Perus. Neste caso, seriam necessárias amostragens detalhadas do circuito para simular com fidelidade as muitas alternativas de operação e geração de produtos diferenciados. Esse trabalho, em particular, seria de grande utilidade à Empresa, pois consistiria em um recurso de planejamento de produção e, conseqüentemente, de geração de receita.

8. Referências Bibliográficas

Livros

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C.; **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem**. 2ª Edição. São Paulo: Signus Editora, 2003. Volume 3.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M.; **Tratamento de Minérios**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J.; **Introduction to Mineral Processing**. New York: Wiley-Interscience, 1982.

Manuais

Manual de Britagem METSO. 6ª Edição. São Paulo: Metso Minerals, 2005.

Manual de Britagem FAÇO. 5ª Edição. São Paulo: Fábrica Paulista de Aço, 1994.

Manual de Operação e Manutenção: Britadores de Impacto VSI OmniRemco Modelos ST & A/R. Sorocaba: Omni Crushing & Screening Ltda.

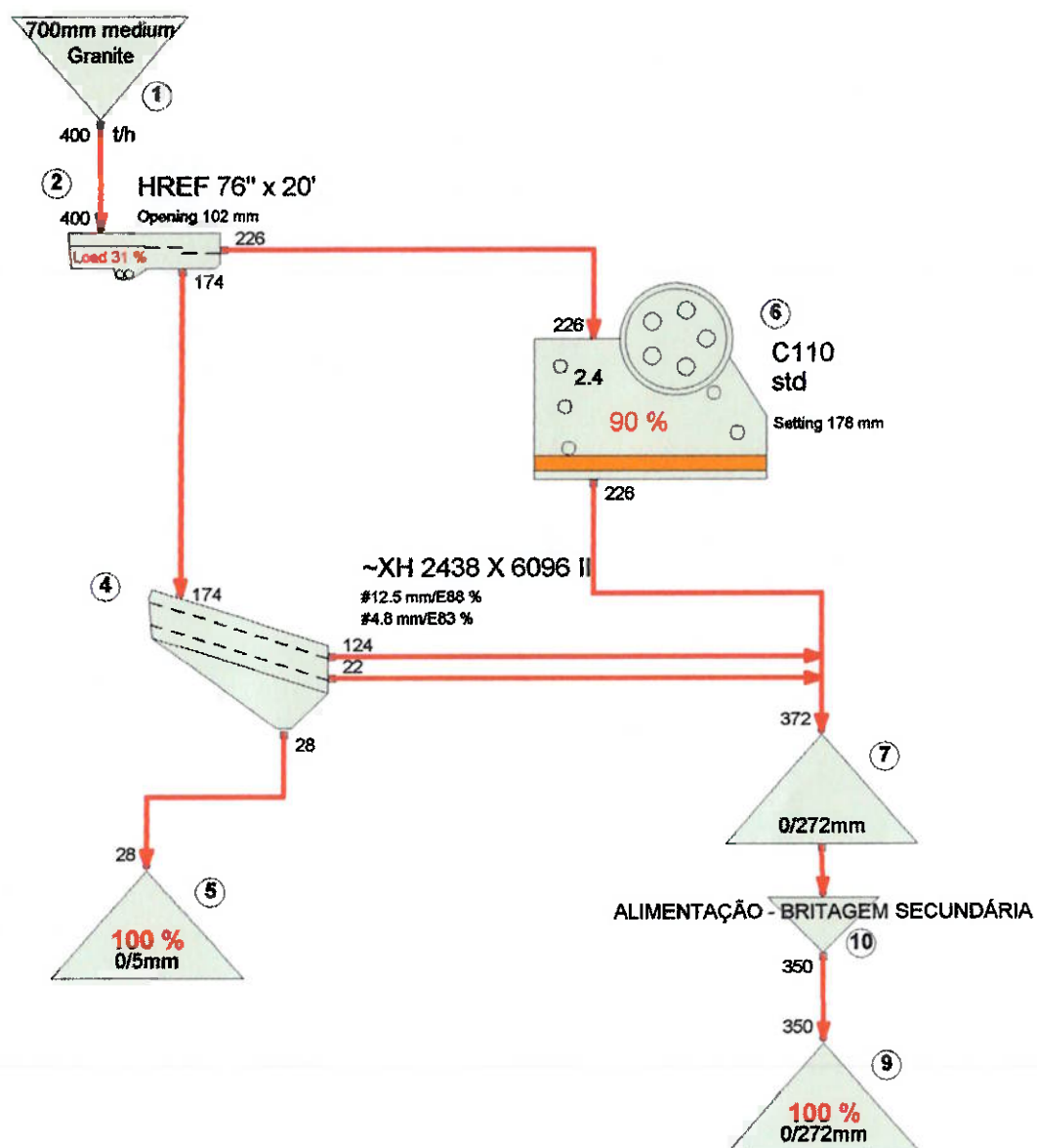
Manual de Operação: Barmac Britador VSI Rocha-Contra-Rocha. Svedala Britagem & Peneiramento.

Homepage

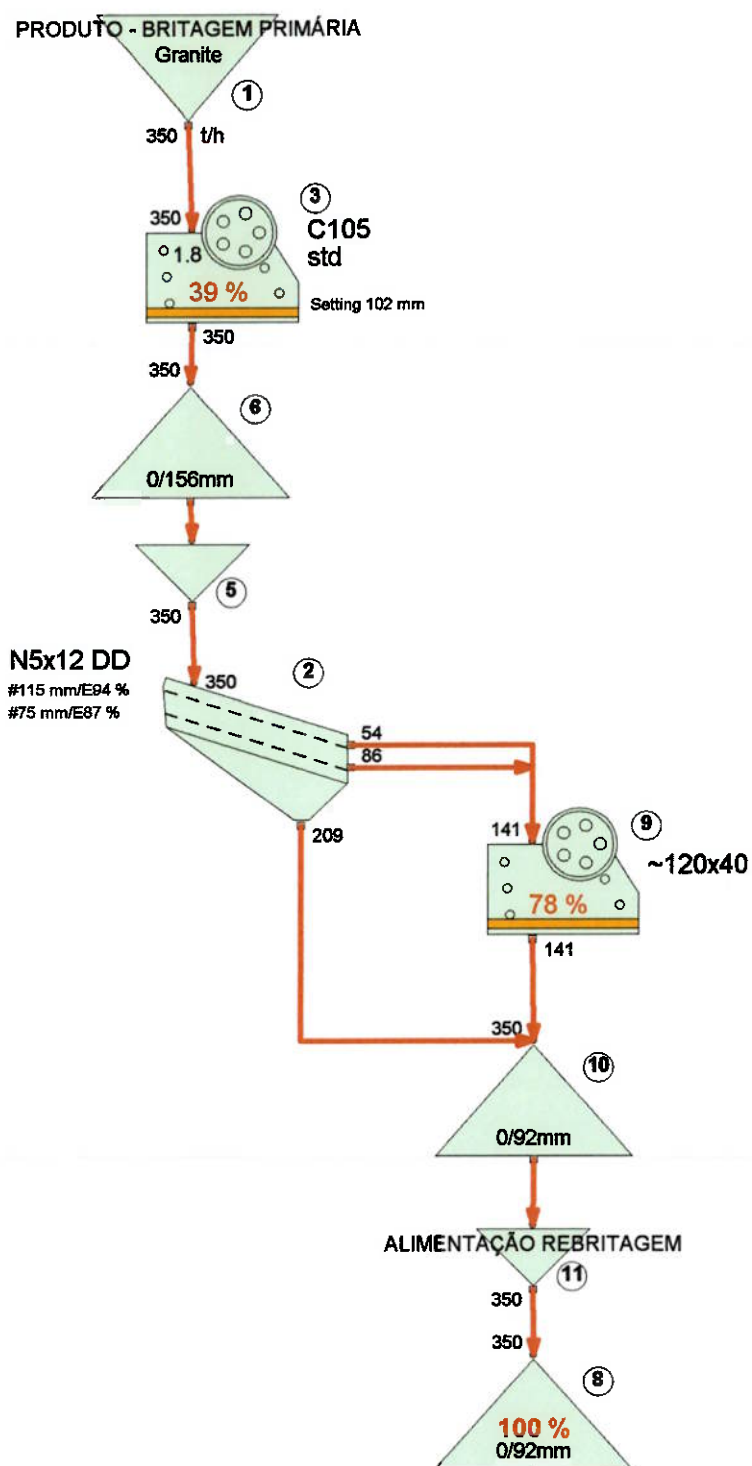
EMBU S. A. ENGENHARIA E COMÉRCIO. São Paulo. Apresenta informações sobre a empresa, suas atividades e produtos. Disponível em: <http://www.embusa.com.br>. Acesso em outubro de 2006.

9. Apêndices

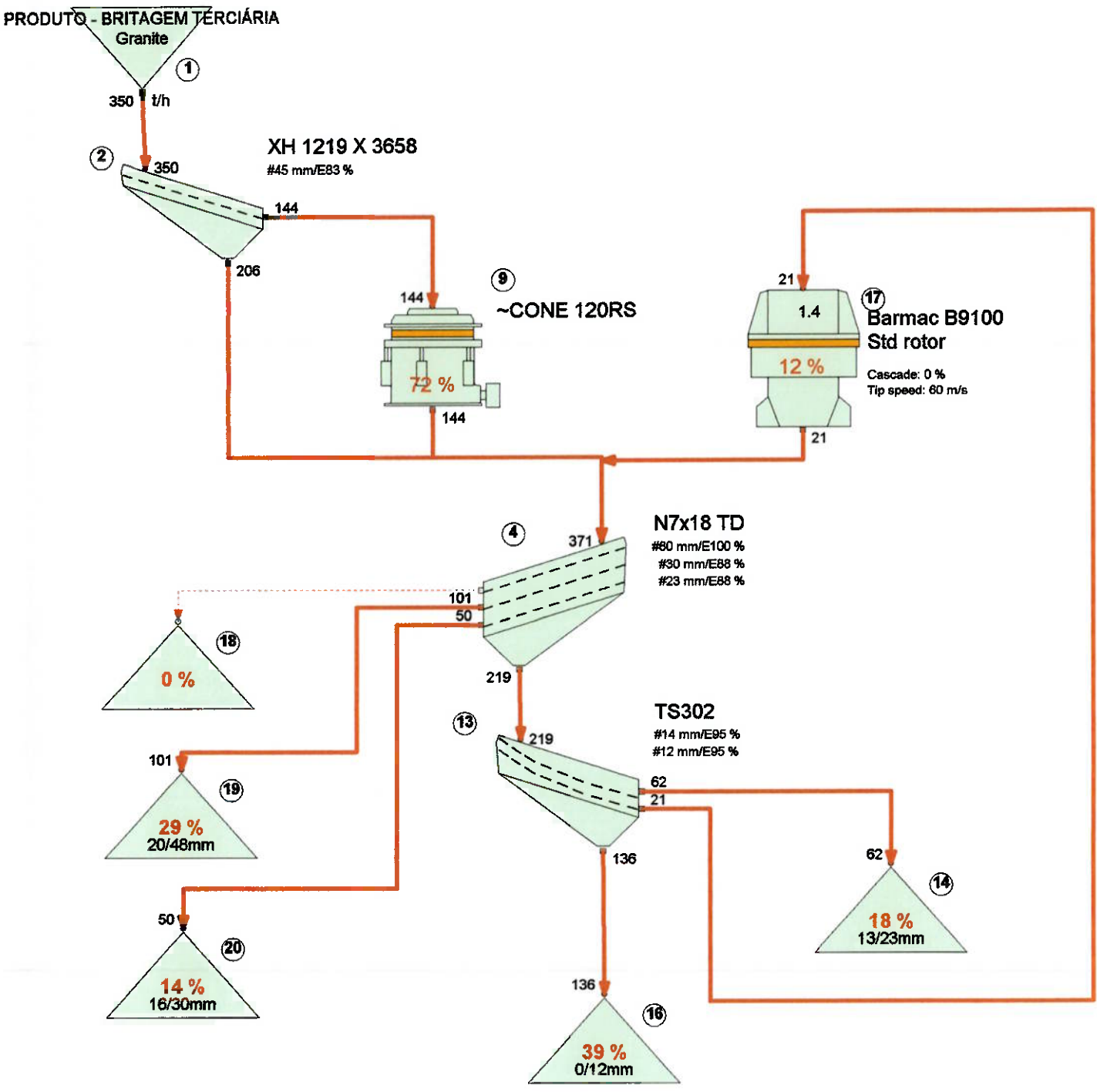
9.1. APÊNDICE 1 – Simulação do Circuito Real: Bloco 1



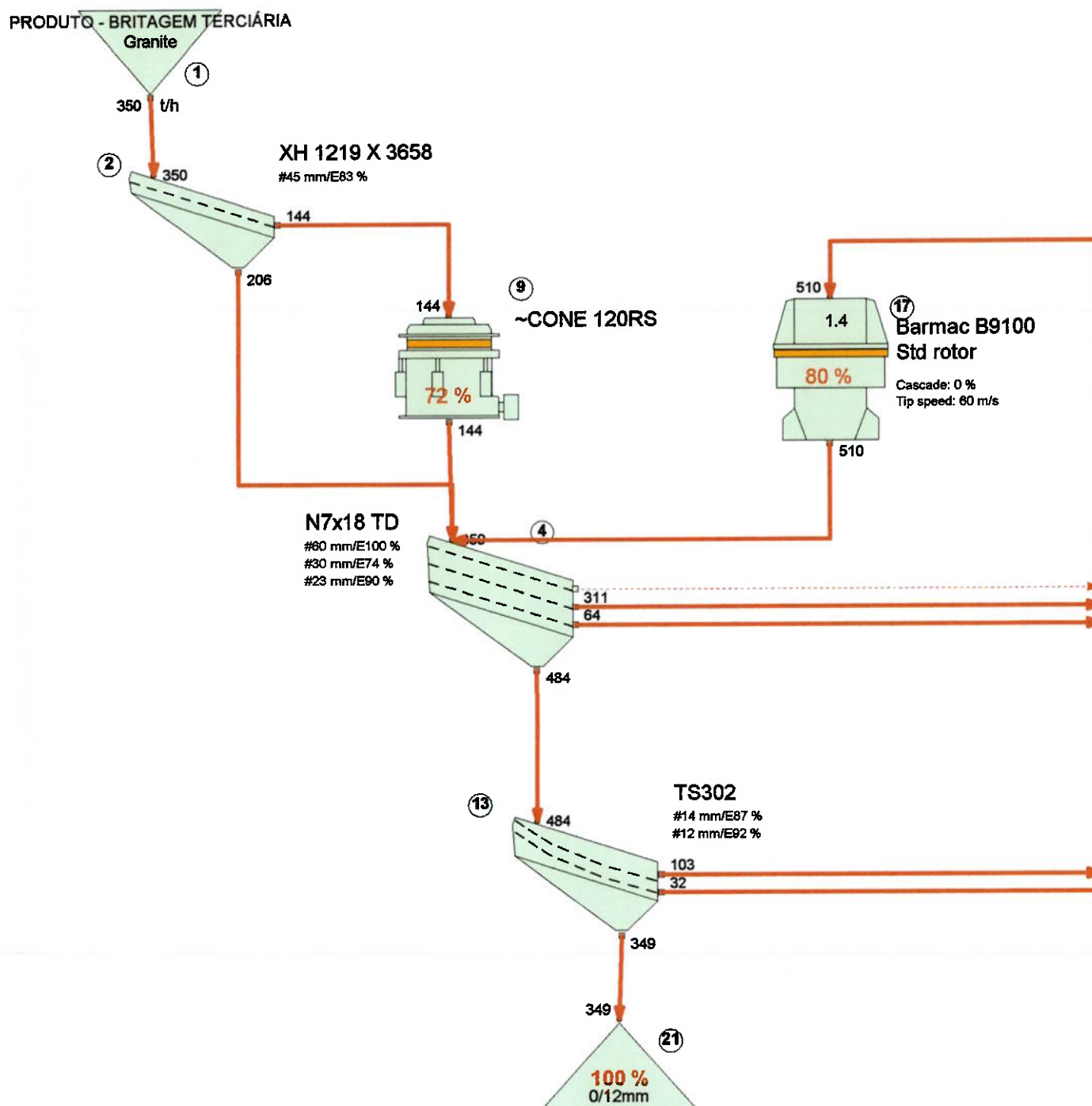
9.2. APÊNDICE 2 – Simulação do Circuito Real: Bloco 2



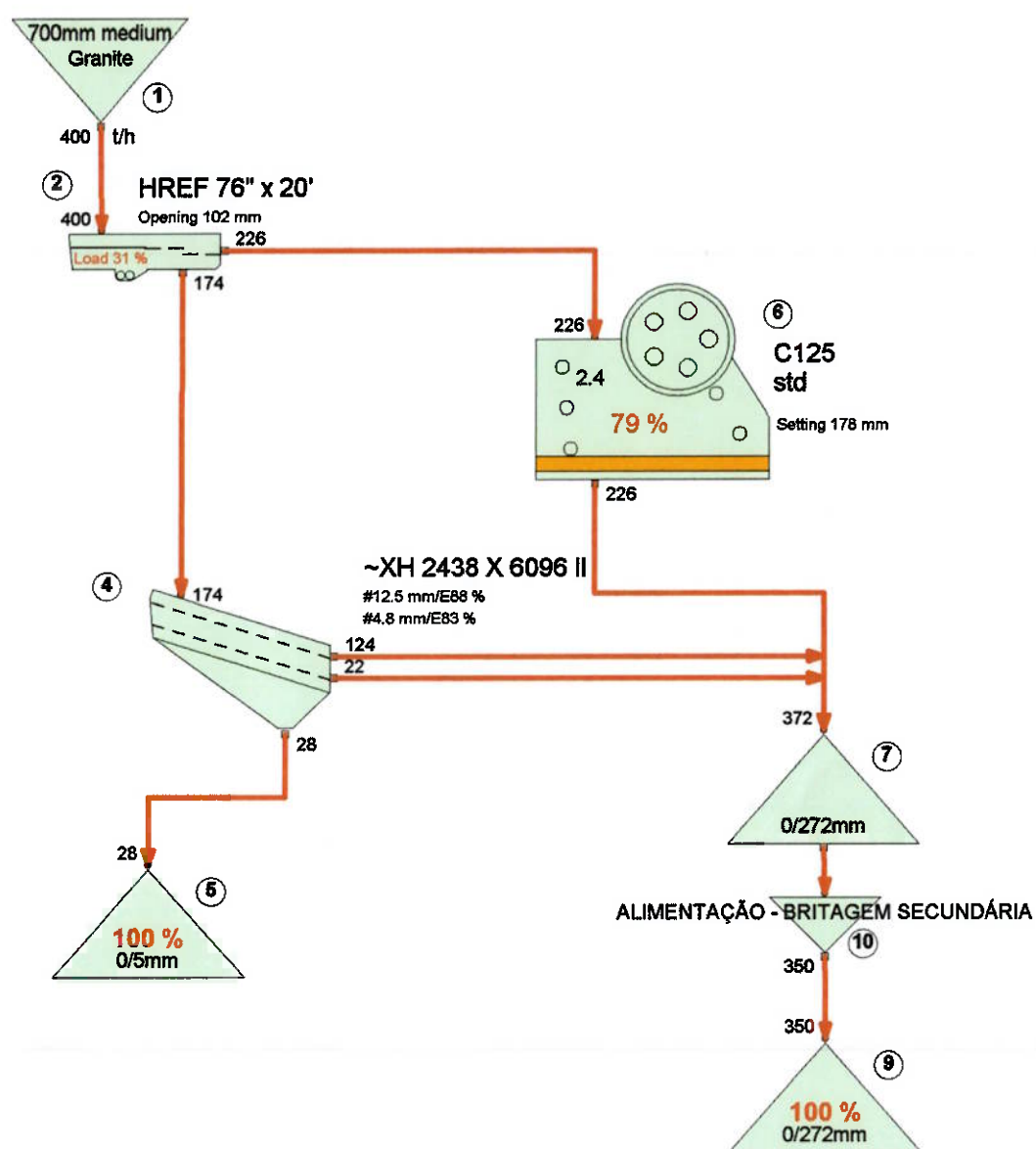
9.3. APÊNDICE 3 – Simulação do Circuito Real: Bloco 3 (Configuração 1)



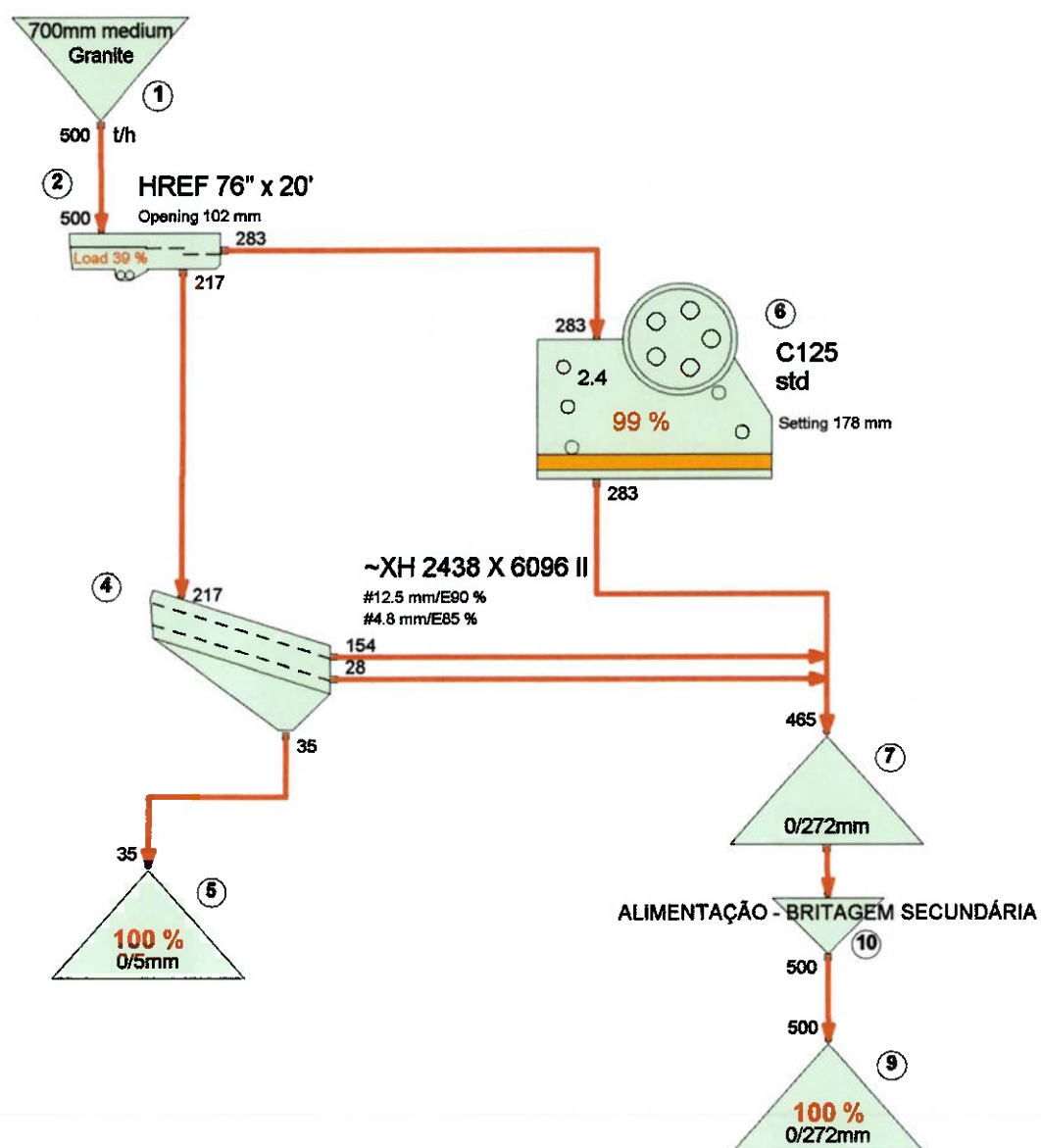
9.4. APÊNDICE 4 – Simulação do Circuito Real: Bloco 3 (Configuração 2)



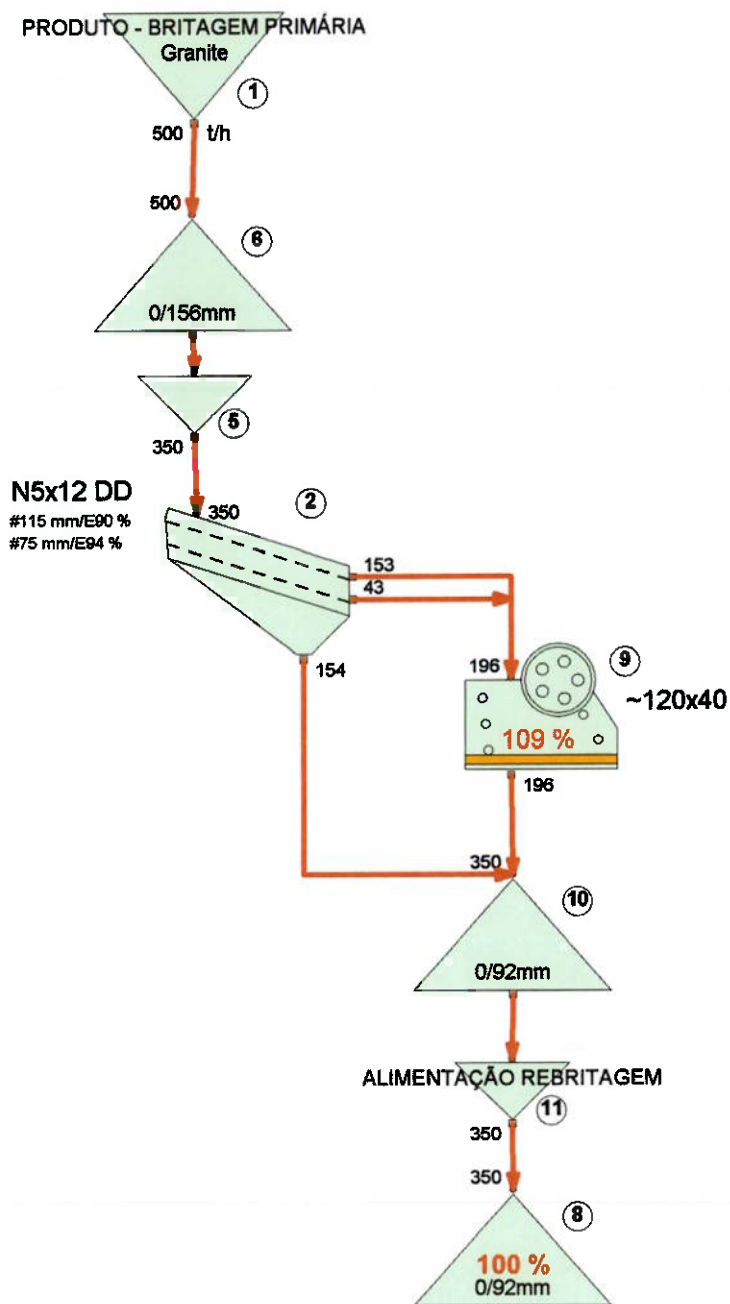
9.5. APÊNDICE 5 – Alteração 1: Bloco 1 (Situação 1)



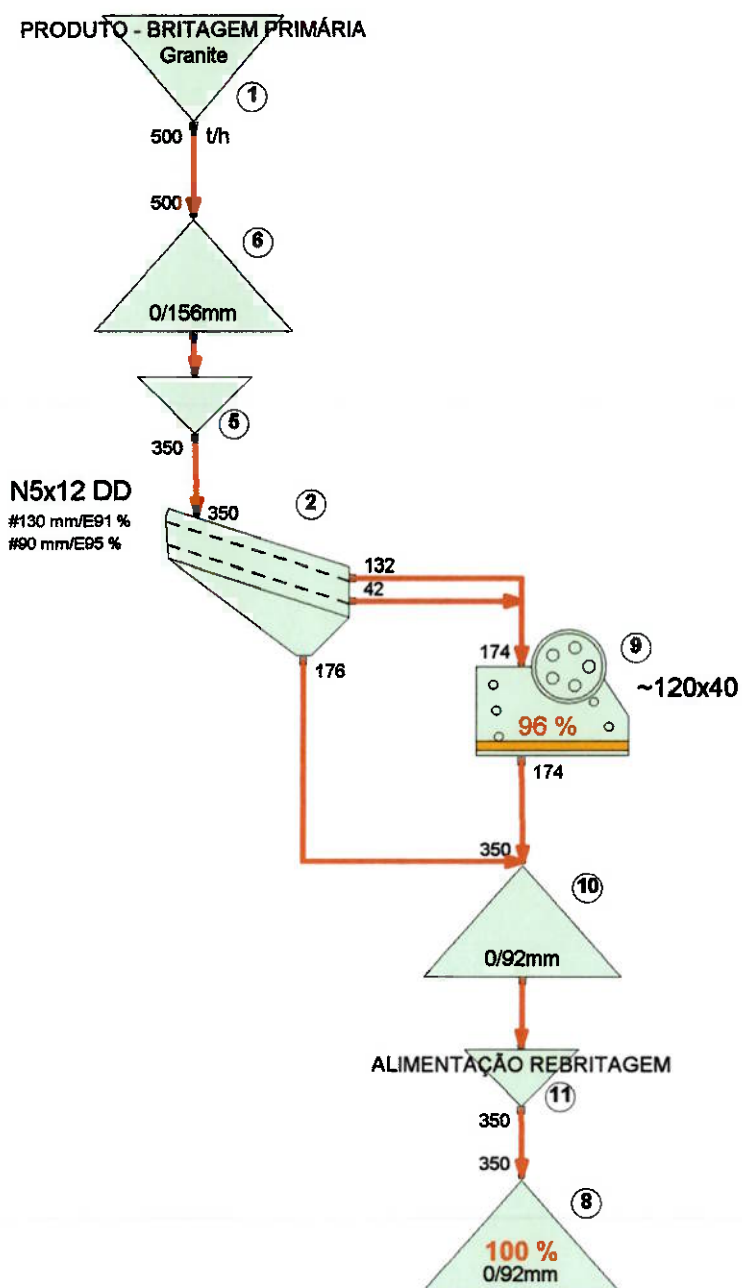
9.6. APÊNDICE 6 – Alteração 1: Bloco 1 (Situação 2)



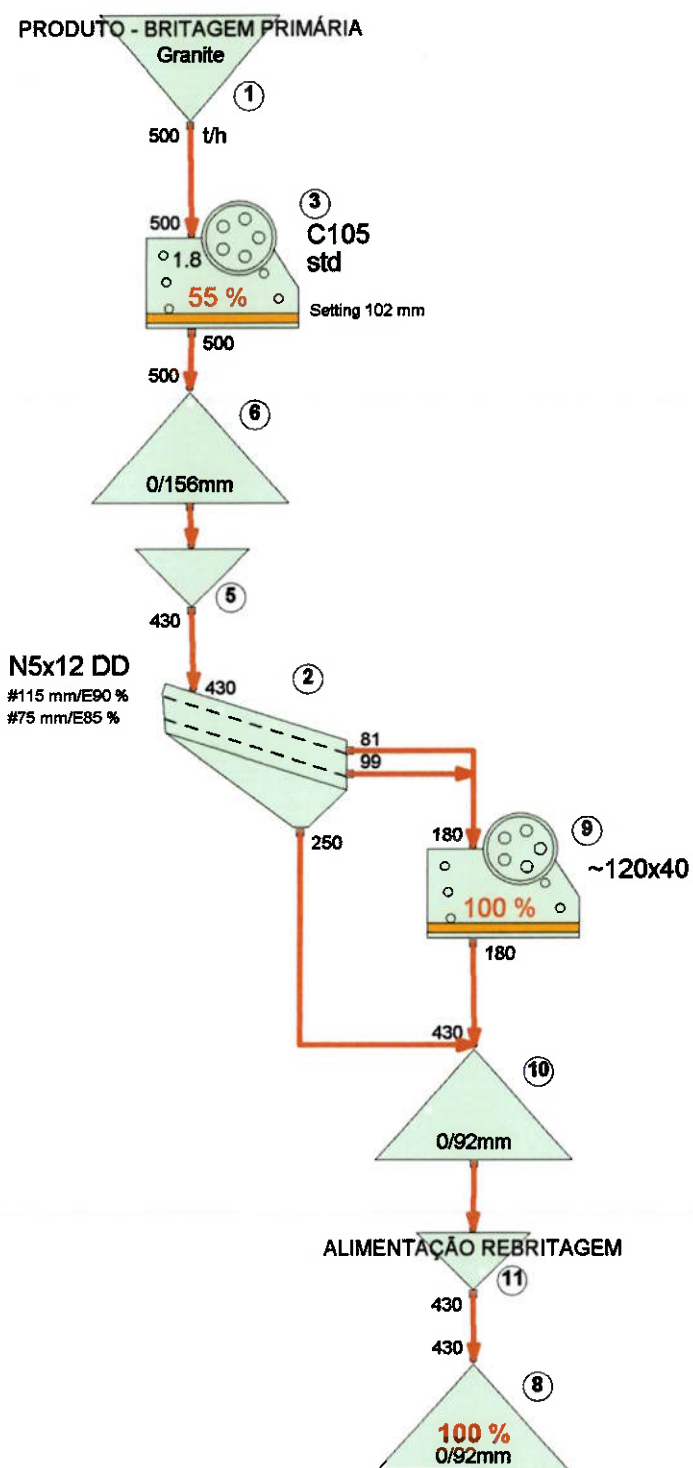
9.7. APÊNDICE 7 – Alteração 2: Bloco 2 (Situação 1)



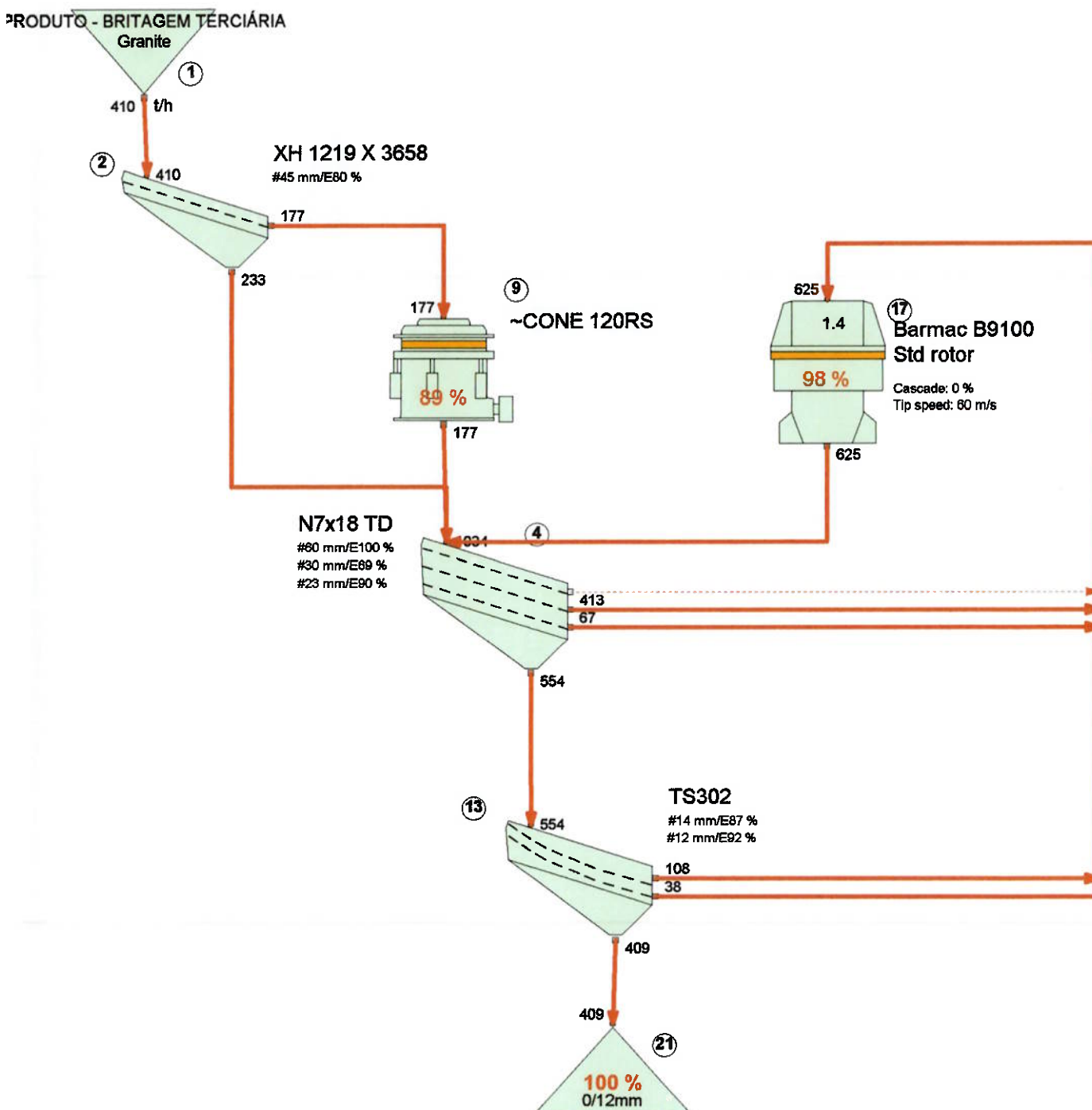
9.8. APÊNDICE 8 – Alteração 2: Bloco 2 (Situação 2)



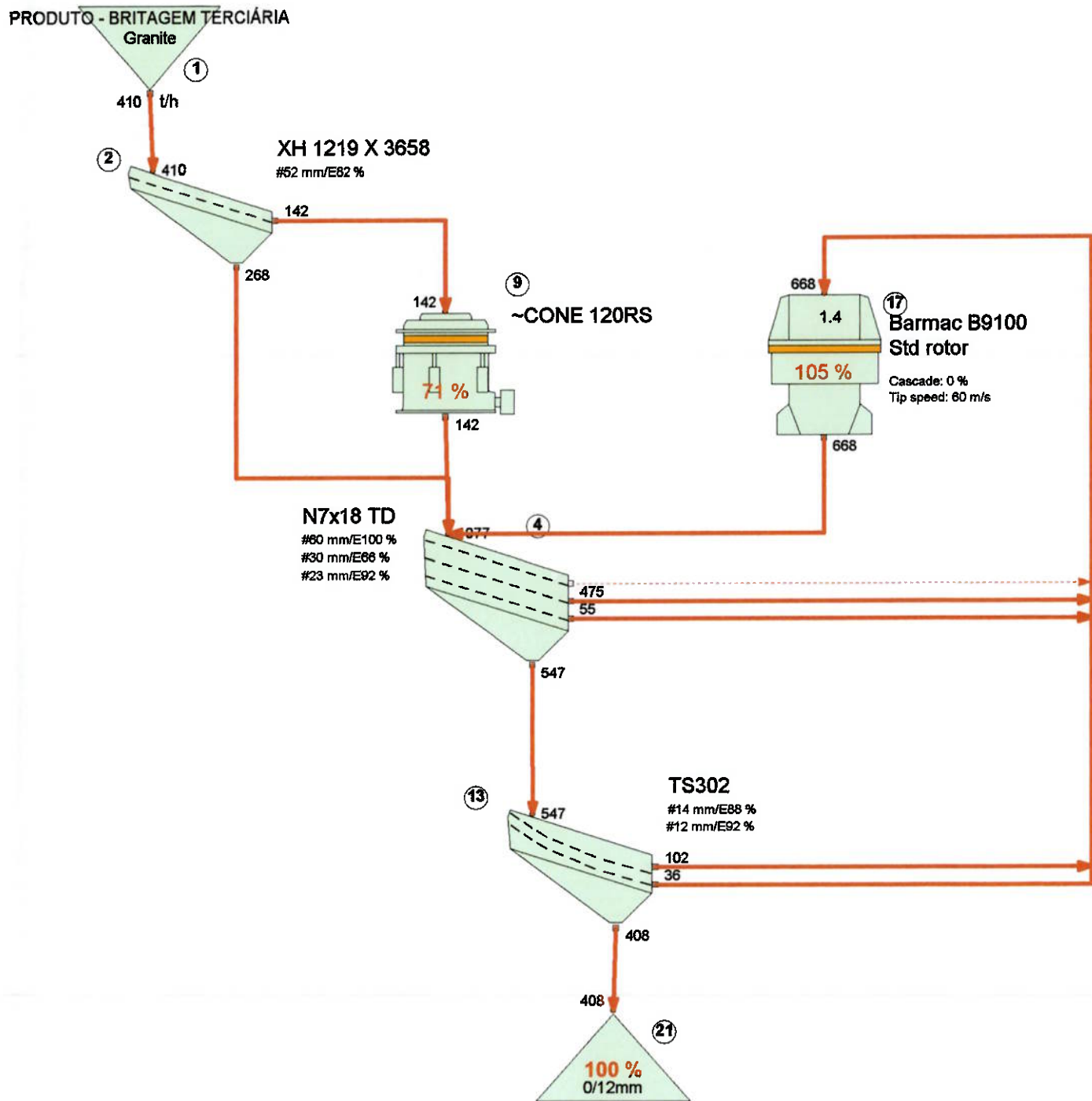
9.9. APÊNDICE 9 – Alteração 3: Bloco 2



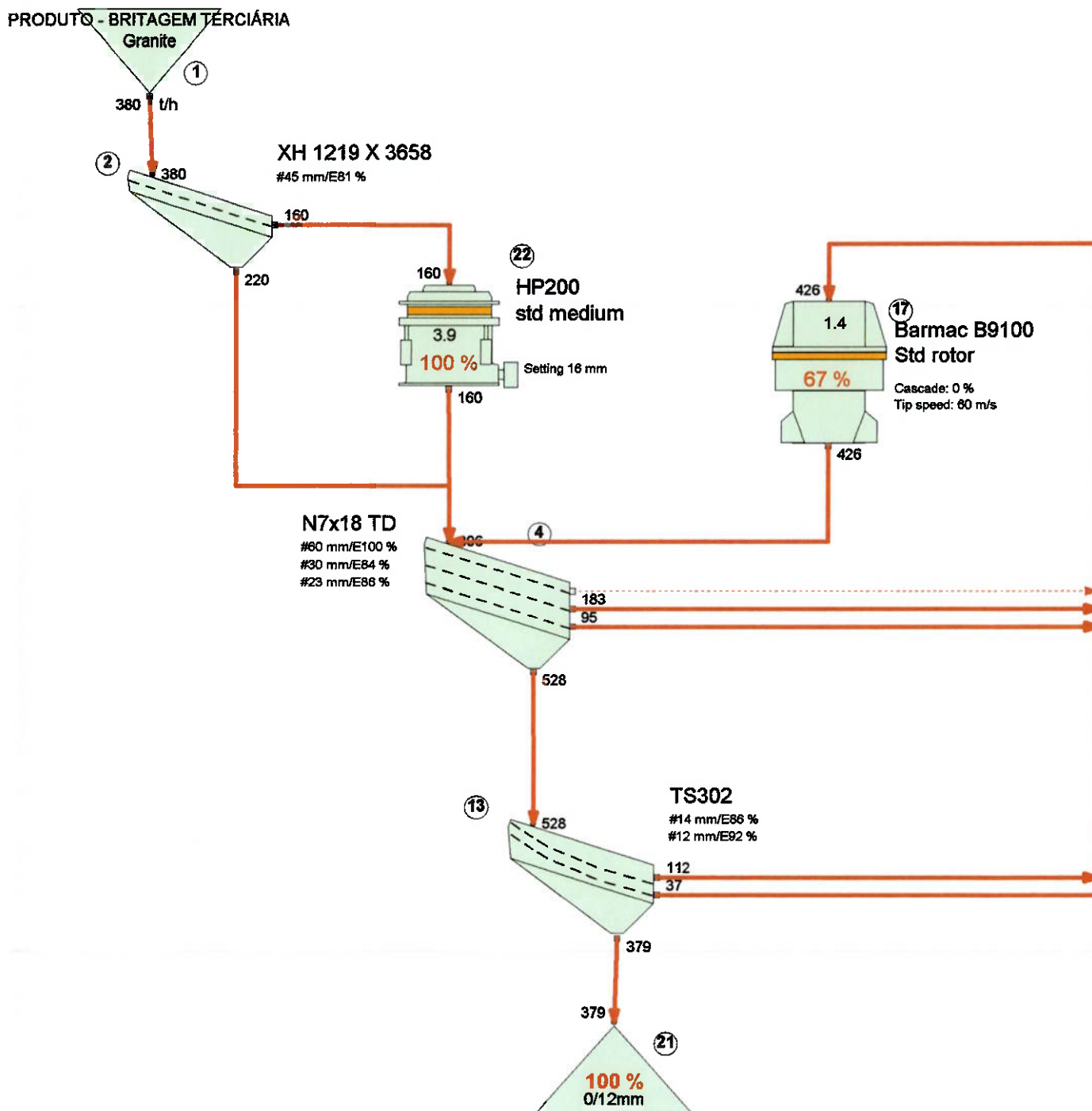
9.10. APÊNDICE 10 – Alteração 3: Bloco 3



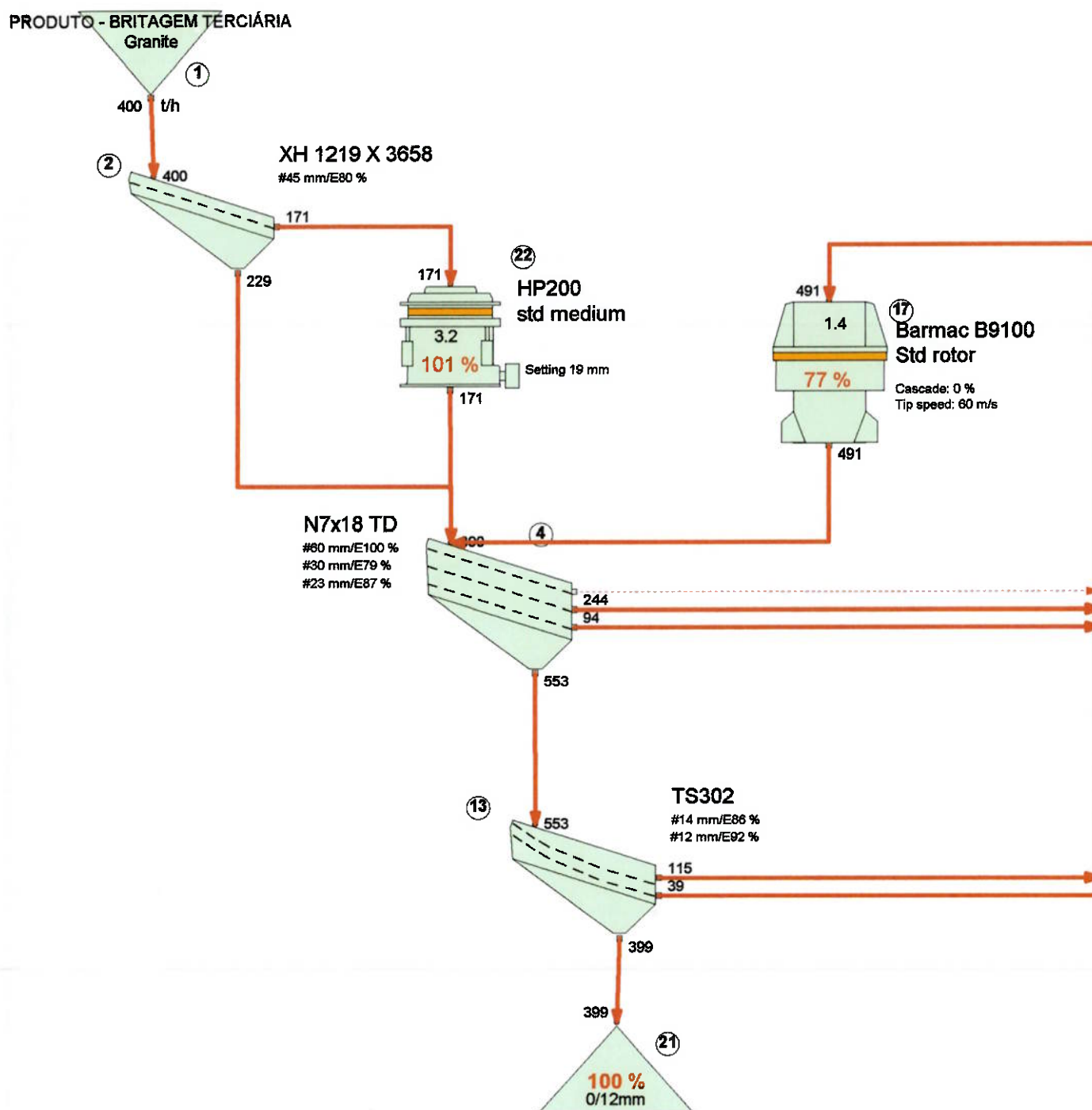
9.11. APÊNDICE 11 – Alteração 4: Bloco 3



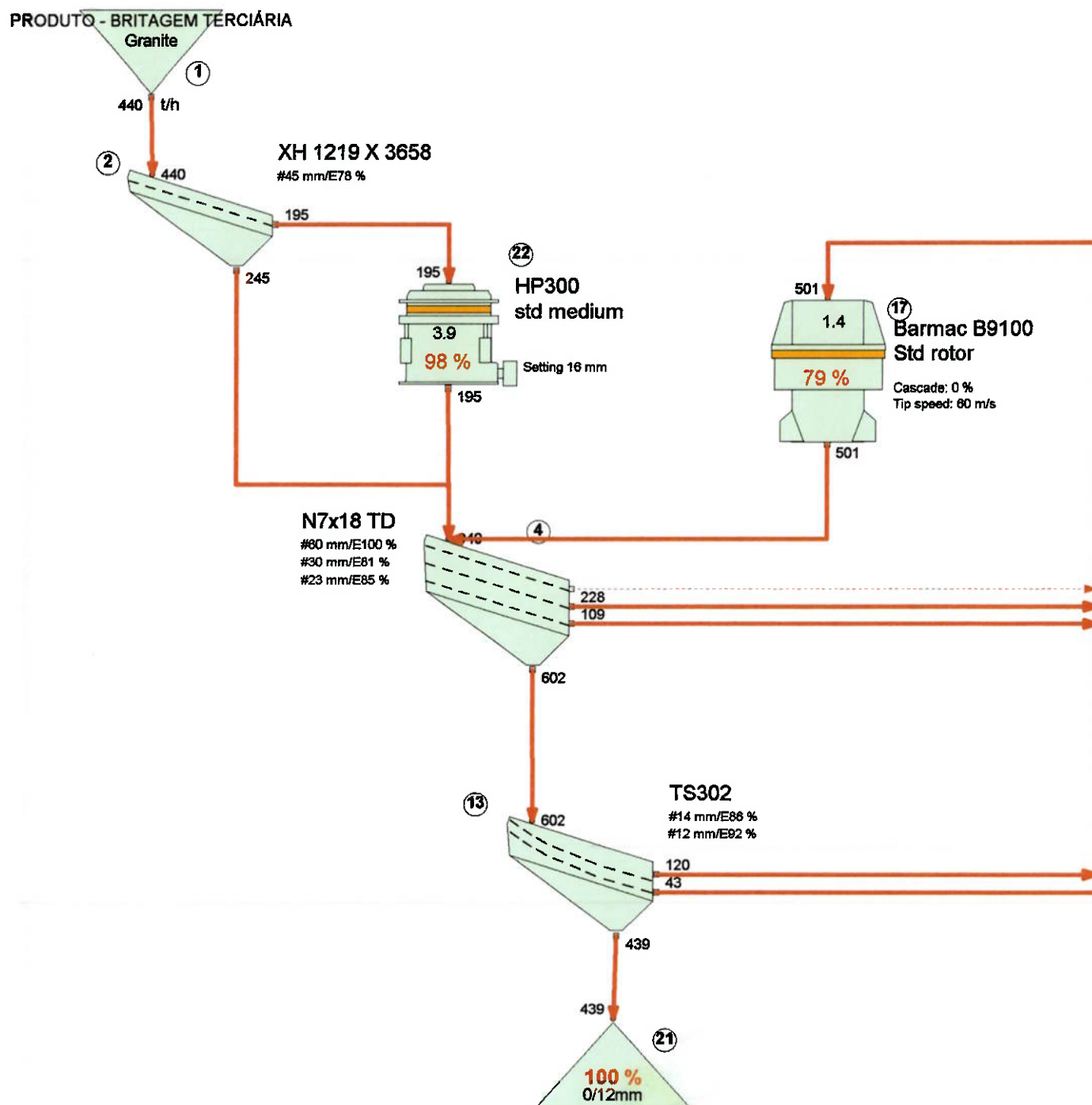
9.12. APÊNDICE 12 – Alteração 5 (HP200): Bloco 3 (Situação 1)



9.13. APÊNDICE 13 – Alteração 5 (HP200): Bloco 3 (Situação 2)



9.14. APÊNDICE 14 – Alteração 5 (HP300): Bloco 3



9.15. APÊNDICE 15 – Alteração 5 (HP400): Bloco 3

