



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**LEONARDO MARÇAL SIQUEIRA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO AQUECIMENTO E CHOQUE TÉRMICO NA  
FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS**

ARAXÁ/MG  
2018

**LEONARDO MARÇAL SIQUEIRA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO AQUECIMENTO E CHOQUE TÉRMICO NA  
FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Me Tamiris Fonseca de Souza

**ARAXÁ/MG**

**2018**

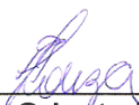
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

LEONARDO MARÇAL SIQUEIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO AQUECIMENTO E CHOQUE TÉRMICO NA  
FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 29 de Junho de 2018



---

**Presidente e Orientador:** Prof. Me. Tamiris Fonseca de Souza  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá



---

**Membro Titular:** Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá



---

**Membro Titular:** Prof. Francisco de C. Valente Neto  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

Aos meus pais, namorada e amigos,  
que sempre acreditaram na minha capacidade.

Dedico também a mineração,  
pois, nem sempre aperfeiçoar o que temos é suficiente para resolver os nossos  
problemas, criar novas soluções é sempre preciso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelas bênçãos em minha vida, por me proteger e me guiar pelos caminhos da vida e, por sempre me fazer enxergar que a vida não é um caminho linear e único, mas sim, cheio de curvas e opções de novos caminhos.

Em seguida, agradeço aos meus familiares, em especial, meus pais. Com eles eu aprendi que a vida não nos dá nada, se queremos algo, temos que batalhar muito para conquistarmos. Obrigado por sempre acreditarem na minha capacidade de mudar a vida.

A minha namorada Camila, por ser uma companheira maravilhosa, e por sempre me apoiar a continuar batalhando para conquistar meus objetivos.

A Mineradora Santa Helena, por disponibilizar as amostras de Granito Gnaiss utilizadas neste trabalho e que foram cedidas pelo ex-aluno de graduação Emerson Henrique Fischer Birro após o uso em seu trabalho de conclusão de curso.

A Crusader do Brasil Mineração Ltda, por disponibilizar as amostras de Itabirito para a realização deste trabalho.

Ao professor Mestre Leandro Henrique Santos e a professora Mestre Tamiris Fonseca de Souza, por me orientar e apoiar durante todo neste trabalho. Obrigado por tudo!

A Ana Carolina Rocha Borges, companheira de projeto de Iniciação Científica, pela ajuda na realização da parte prática do presente trabalho.

Ao João Vitor da Silva Alves (Técnico do Laboratório de Tratamento de Minérios) e também ao João Antônio da Silva Neto (Estagiário do Laboratório de Tratamento de Minérios), pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos colegas de curso, pela força e ajuda prestadas durante essa etapa de minha vida.

De coração eu agradeço a todos!!!

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”  
(Chico Xavier)

## RESUMO

Diante do cenário atual, em que os minérios apresentam teores cada vez menores e composição mais complexa, a otimização das operações de beneficiamento se apresenta como um desafio para indústria mineral. Logo, torna-se indispensável a pesquisa de novas trajetórias para o aproveitamento e adequação dos diversos minérios às especificações do mercado. Dentre algumas possibilidades de beneficiamento pode-se destacar a redução energética durante a fragmentação de partículas com características mais abrasiva, etapa que demanda maior consumo de energia durante a rota. Dentro deste conceito, esse trabalho visa avaliar o efeito do aquecimento e do choque térmico sobre partículas minerais de granito gnaisse e itabirito e a respectiva fragmentação destas, visando maior economia de energia. Para alcançar esses objetivos foram elaboradas algumas situações de aquecimento e choque térmico. Para o aquecimento foram utilizadas duas metodologias: aquecimento convencional (utilizando a mufla) e aquecimento utilizando o micro-ondas. Posteriormente foram obtidos os valores da relação de redução e também foram confeccionados os gráficos das curvas granulométricas dos produtos da britagem dos minérios itabirito e granito gnaisse. Com o aquecimento do minério espera-se que ocorra uma expansão de sua estrutura cristalina ampliando as famílias de trincas pré-existentes. Também é possível que novas famílias de trincas surjam causando o aumento de pontos de fraquezas que facilitaram a fragmentação destas partículas minerais. Alguns resultados foram promissores, como por exemplo, o aquecimento em mufla a 500°C por 15 minutos para o granito gnaisse e, para o itabirito, o aquecimento em micro-ondas na potência de 900 W por 15 minutos seguido de choque térmico. Ambas metodologias obtiveram bons resultados de relação de redução e também foi possível observar, nas curvas granulométricas, uma melhor distribuição granulométrica entre as peneiras utilizadas.

**Palavras-chave:** Britagem, aquecimento/choque térmico, relação de redução, minério de ferro, granito.

## ABSTRACT

In view of the current scenario, which minerals present increasingly lower grades and complex composition, the optimization of beneficiation operations presents itself as a challenge for the mineral industry. Therefore, it is indispensable to search for new means for the use and adequacy of the various minerals to the specifications of the market. Among some possibilities of beneficiation, it can be highlighted the energy reduction during the fragmentation, which demands greater proportion of energy during the route. Within this concept, this work aims to evaluate the effect of heating and thermal shock on mineral particles of granite gneiss and itabirite and their respective fragmentation, aiming at greater energy savings in the comminution stage. In order to achieve these objectives, some situations of heating and thermal shock were elaborated so that it could evaluate the behavior of the mineral particles in the fragmentation. For the heating, two methodologies were used: conventional heating (using the muffle) and heating using the microwave. Subsequently, the values of the reduction ratio were obtained and the graphs of the particle size size curves were also plotted. With the heating of the ore, an expansion of its crystalline structure to expand the families of pre-existing cracks and even new families of cracks arising causing the increase of points of weakness that would facilitate the fragmentation of these mineral particles were expected. Some results were promising, for instance, the heating in muffle at 500 ° C for 15 minutes for gneiss granite and, for itabirite, microwave heating at 900 W for 15 minutes and then subjected to shock thermal. Both methodologies obtained effective results of the reduction ratio and it was also possible to observe, in the particle size curves, a better mass distribution between the sieves used.

**Keywords:** Crushing, heating/thermal shock, reduction ratio, iron ore, granite.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. 1- Deformação de um cristal sujeito a compressão e tensão.....  | 19 |
| Figura 2. 2 - Concentração de esforços numa fenda. ....   | 20 |
| Figura 2. 3 – Fratura por britagem.....   | 21 |
| Figura 2. 4 - Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado. ....                    | 22 |
| Figura 2. 5 - Movimento dos blocos durante a fragmentação no Britador de Mandíbulas.....  | 30 |
| Figura 2. 6 - Britador de Mandíbulas de um eixo “Dodge”.....  | 31 |
| Figura 2. 7 - Britador de Mandíbulas de dois eixo “Blake”.....  | 31 |
| Figura 2. 8 - Exemplo de uma curva granulométrica.....  | 33 |
| Figura 3. 1 - A) Amostra de Itabirito na alimentação; B) Amostra de Granito Gnaisse na alimentação. ....                              | 39 |
| Figura 3. 2 - Amostras padrão (não submetida ao aquecimento nem ao choque térmico) – itabirito e granito gnaisse.....                 | 39 |
| Figura 3. 3 - Amostras aquecidas em forno convencional (mufla) - itabirito e granito gnaisse.....                                     | 40 |
| Figura 3. 4 - Amostras aquecidas em forno de micro-ondas - itabirito e granito gnaisse. ....  | 40 |
| Figura 3. 5 - Choque térmico após o aquecimento no forno convencional (mufla) – itabirito e granito gnaisse.....                      | 41 |
| Figura 3. 6 - Choque térmico após o Aquecimento em Micro-ondas.....   | 41 |
| Figura 4. 1 – Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecidas em mufla. ....                   | 46 |
| Figura 4. 2 - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do granito gnaisse para aquecimento em mufla.....            | 47 |
| Figura 4. 3 - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecidas em micro-ondas. ....             | 49 |
| Figura 4. 4 - Curvas granulométricas das amostras do produto do granito gnaisse para aquecidas em micro-ondas. ....                   | 49 |
| Figura 4. 5 - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecimento seguido do choque térmico..... | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4. 6 - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do granito gnaisse para aquecimento seguido de choque térmico. .... | 54 |
|--|----|

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2. 1 – Classificação do material quanto ao seu índice de abrasividade. ....   | 25 |
| Tabela 2. 2 – Classificação dos estágios de fragmentação. ....   | 27 |
| Tabela 2. 3 - Principais tipos de britadores e suas características. ....  | 29 |
| Tabela 2. 4 – Distribuição do consumo de energia na Erie Mining Co. ....   | 34 |
| Tabela 3. 1 – Condições que as amostras foram submetidas. ....   | 37 |
| Tabela 4. 1 – Resultados das análises químicas dos elementos, realizadas com o itabirito e granito gnaisse. ....                 | 42 |
| Tabela 4. 2 – Resultados das análises químicas dos óxidos, realizadas com o itabirito e granito gnaisse. ....                    | 43 |
| Tabela 4. 3 - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento em mufla. ....                  | 45 |
| Tabela 4. 4 - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento em micro-ondas. ....            | 48 |
| Tabela 4. 5 - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento seguido de choque térmico. .... | 51 |

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |   |
|-------|---|
| CEFET | Centro Federal de Educação Tecnológica  |
| DEMAT | Departamento de Engenharia de Materiais |
| FRX   | Fluorescência de raios X                |
| GGG   | Gates-Gaudin-Schumann                   |
| Ai    | Índice de abrasividade                  |
| LTM   | Laboratório de Tratamento de Minérios   |
| MG    | Minas Gerais                            |
| APA   | Posição aberta                          |
| RR    | Relação (grau) de redução               |
| ROM   | Run-of-mine                             |
| RRB   | Rosin-Rammler-Bennet                    |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                       | <b>17</b> |
| 2.1      | Beneficiamento .....   | 17        |
| 2.2      | Cominuição .....   | 18        |
| 2.2.1    | Fundamentos.....   | 18        |
| 2.2.2    | Considerações para as operações de cominuição .....                      | 23        |
| 2.2.3    | Britagem .....   | 27        |
| 2.2.3.1  | Fundamentos .....  | 27        |
| 2.2.3.2  | Britadores de mandíbulas .....   | 30        |
| 2.2.4    | Curva granulométrica .....   | 32        |
| 2.3      | Relação (grau) de redução - RR .....                                     | 33        |
| 2.4      | Consumo energético .....   | 34        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>  | <b>35</b> |
| 3.1      | Preparação das amostras .....  | 35        |
| 3.2      | Caracterização das amostras.....   | 35        |
| 3.3      | Ensaio de britagem.....  | 36        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                     | <b>42</b> |
| 4.1      | Caracterização das amostras.....   | 42        |
| 4.2      | Ensaio de britagem.....  | 44        |
| 4.3      | Análise do produto da britagem após o aquecimento em mufla.....          | 44        |
| 4.4      | Análise do produto da britagem após o aquecimento em micro-ondas.....    | 47        |
| 4.5      | Análise do produto da britagem após o aquecimento e choque térmico ..... | 50        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>56</b> |
|          | <b>APÊNDICE A.....</b>   | <b>58</b> |
|          | <b>APÊNDICE B . .....</b>  | <b>60</b> |

**APÊNDICE C .....61**  
**APÊNDICE D .....62**  
**APÊNDICE E .....63**

## 1 INTRODUÇÃO

Independentemente do tipo de minério beneficiado, este passa por uma etapa essencial que é a cominuição, visando diminuir o tamanho das partículas. Esta etapa emprega equipamentos de britagem e moagem, com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas, visando a liberação das partículas minerais em ganga e mineral-minério. (XAVIER, 2012).

A cominuição pode ser identificada como a etapa do beneficiamento do minério na qual se gasta a maior quantidade de energia. É natural como em qualquer outro processo que os equipamentos utilizados na cominuição sofram desgaste devido ao tempo de uso, tipo de minério fragmentado (característica abrasiva), reação química (oxidação) e falta de lubrificação. Os custos desse desgaste e da energia gasta no processo podem ser previstos através do dimensionamento dos equipamentos utilizados (FIGUEIRA *et al*, 2010).

Segundo Xavier (2012), a maioria dos minerais são materiais cristalinos, com estrutura organizada dos átomos, que possuem ligações físicas e químicas responsáveis por manterem os átomos unidos. Porém, elas são eficientes à pequena distância e podem ser quebradas se houver tensões externas.

Adicionar energia a um sistema de partículas promove um afastamento entre elas podendo provocar o aumento de pontos de fraqueza que são defeitos pontuais na estrutura cristalina. O método mais utilizado atualmente para a fragmentação de partículas corresponde à adição de energia na forma de trabalho, induzida pelos equipamentos de britagem e moagem, através de compressão, impacto e cisalhamento.

Para Shackelford (2008), os defeitos pontuais podem ocorrer também devido a oscilações periódicas ou vibração térmica dos átomos da estrutura cristalina. Esses defeitos podem ser intensificados com o aumento da temperatura, uma vez que a intensidade da vibração térmica provocada pelo aquecimento é proporcional à temperatura, e elevando a temperatura pode-se também aumentar a probabilidade de rompimento da estrutura cristalina.

Yasnó (2013) cita o uso de micro-ondas como uma fonte de aquecimento alternativo que possui vantagens em relação a meios convencionais devido ao baixo

consumo de energia, considerável redução de tempo no processo de aquecimento e, altas taxas de aquecimento, limitadas apenas pela potência do aparelho. Cunha (1996) defini a energia de micro-ondas como sendo um tipo de radiação eletromagnética com propriedades semelhantes a luz visível, ondas de rádio e raio-X, que se diferem pelo comprimento de onda e pela frequência da radiação. Engelder e Buffler (1991) ressaltam que a radiação por micro-ondas é capaz de se mover através dos espaços presentes no material e até mesmo através dos objetos, podendo sofrer reflexão, transmissão e absorção. Uma das diferenças entre o aquecimento convencional e o proporcionado por micro-ondas que chama a atenção de Cunha (1996), é uma alta capacidade de penetração da radiação de micro-ondas que possibilita gerar calor uniformemente em todo o material, enquanto que o método convencional promove a condução de energia, na forma de calor, da superfície do material para seu interior promovendo um aquecimento maior na superfície. Portanto, mostra-se mais eficiente e econômica a utilização de micro-ondas no aquecimento do material.

Há uma grande necessidade de se desenvolver formas para otimizar e reduzir o consumo de energia em todas as operações e processos no qual o minério é submetido no beneficiamento. Na operação de cominuição, o dimensionamento dos equipamentos é utilizado para diminuir gastos com energia e revestimentos dos equipamentos, porém não garante uma grande redução dos gastos energéticos. Portanto, o presente estudo visa desenvolver um método alternativo que aumente a eficiência do processo reduzindo os gastos.

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito do aquecimento e do choque térmico sobre o desempenho da operação de fragmentação de partículas de itabirito e granito gnaisse, visando potencializar a eficiência na fragmentação e reduzir os custos da etapa. Os objetivos específicos foram a caracterizar das amostras de itabirito e de granito gnaisse. Submeter as amostras serão submetidas a cinco condições distintas de preparação para posterior fragmentação, visando avaliar a variação do produto da operação de britagem das partículas, são elas:

- amostra padrão na ausência de aquecimento;
- aquecimento convencional utilizando a mufla;



- aquecimento por micro-ondas;
- aquecimento convencional seguido de choque térmico;
- aquecimento em micro-ondas seguido de choque térmico;

A seguir este trabalho é composto por quatro capítulos, sendo que o primeiro aborda a revisão bibliográfica apresentando os principais aspectos conceituais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. O segundo capítulo apresenta a metodologia experimental aplicada para realização da caracterização dos dois minérios utilizados. E também, a metodologia para determinar a densidade e, os procedimentos para as diferentes condições na qual as amostras foram submetidas antes da britagem. E por fim, o último capítulo apresenta os resultados obtidos e uma discussão dos mesmos seguidos de uma conclusão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Beneficiamento

Tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações aplicadas aos bens minerais tendo como objetivo modificar a granulometria e separar o mineral sem valor econômico, denominado ganga, do mineral que possui valor econômico, conhecido como mineral-minério, porém, sem que se modifique a identidade física e/ou química dos minerais.

A separação seletiva, também conhecida como concentração, baseia-se nas diferenças das propriedades físicas e químicas que possam ser exploradas a fim de separar o mineral-minério da ganga. Essa etapa é planejada utilizando propriedades diferenciadoras como: massa específica, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades químicas de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. No entanto a separação só é possível se as partículas minerais de interesse estiverem fisicamente separadas, ou seja, tiverem passado pelas operações de cominuição (LUZ e LINS, 2010).

Segundo Luz e Lins (2010), para o beneficiamento do minério bruto, conhecido como ROM (Run-of-mine), de forma geral, é necessário que o mesmo passe por cinco etapas essenciais, também conhecida como operações unitárias, que são classificadas da seguinte forma:

- ✓ Britagem e moagem: para a adequação da granulometria das amostras;
- ✓ Peneiramento (separação por tamanho) e classificação (ciclonação, classificação em espiral);
- ✓ Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.
- ✓ Desaguamento: espessamento e filtração;
- ✓ Disposição de rejeito.

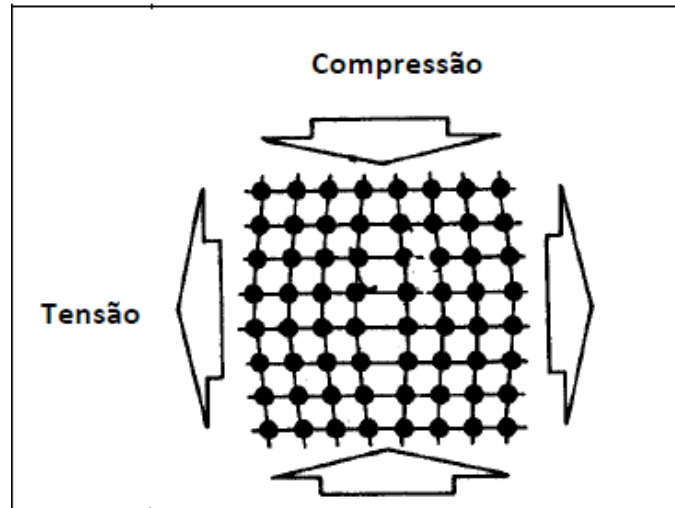
Por fim, após as etapas do beneficiamento do minério, obtém-se o produto final para ser comercializado (concentrado), dentro das especificações exigidas pelo cliente e o rejeito é transportado para ser armazenado em locais adequados, conforme designação de cada empresa.

## **2.2 Cominuição**

Uma fragmentação eficiente das partículas minerais é capaz de promover a liberação das partículas de mineral-minério da ganga, mas essa eficiência depende muito das operações de cominuição. São nestas etapas que é possível obter uma das características que permitem a diferenciação das partículas minerais, que é o tamanho da área superficial de contato. A área superficial é explorada para a interação entre a superfície da partícula e o reagente usado na concentração dos minerais de interesse. Essa interação permite diferenciar o mineral-minério da ganga. Essas características são essenciais para as operações e/ou processos de concentração do mineral de interesse e também na adequação do produto final que será usado na indústria (ROSA; LUZ, 2011).

### **2.2.1 Fundamentos**

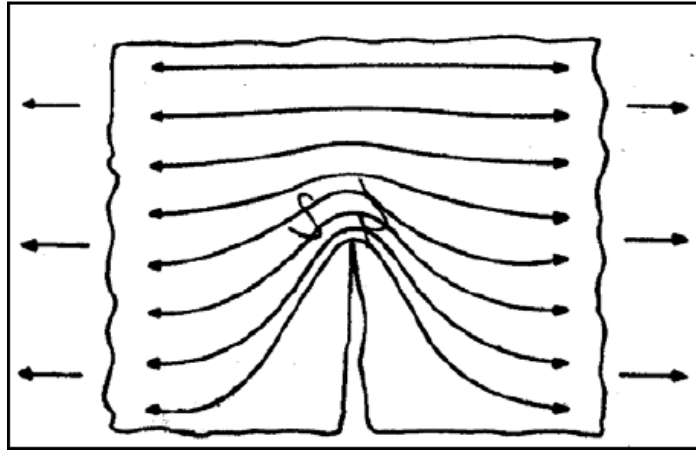
Teoricamente, para um material considerado ideal (composição homogênea e estrutura cristalina bem definida) pode-se calcular de forma precisa a força necessária para romper todas as ligações atômicas de um certo plano. Para a análise das forças necessárias para a ruptura são realizados ensaios de compressão da rocha em laboratório. A ruptura da rocha ocorre quando uma força aplicada em um certo material ultrapassa o limite de ruptura suportado por ele. Para rochas e minerais esse princípio não se aplica com tanta precisão, pois se trata de materiais heterogêneos, anisotrópicos e que contém falhas, fraturas, tanto em escala micro como macroscópica. A Figura 2.1 mostra as forças de compressão e tensão (tração) agindo em uma partícula cristalina homogênea causando uma deformação (XAVIER, 2012).



**Figura 2. 1-** Deformação de um cristal sujeito a compressão e tensão.

**Fonte:** Figueira *et al*, 2010.

As rochas são formadas por um ou mais minerais e sua resistência depende dos minerais que a compõe. Mesmo quando elas são sujeitas às forças uniformes, as pressões internas não são distribuídas igualmente em seu interior, isso ocorre devido a uma variedade de minerais dispersos em sua estrutura com grãos de tamanhos variados, dessa forma, a resistência mecânica da rocha pode variar dependendo do ponto que é analisado. A presença de gretas e falhas no corpo mineral, que agem como sítios de concentração de forças, vão diminuir a resistência da rocha, desse modo, quanto mais gretas e falhas mais frágil será a rocha. Quando uma rocha é submetida a uma força as tensões se concentram nas pontas das fraturas pré-existentes aumentando o seu comprimento e, criando novos pontos de fraqueza na rocha, permitindo que a rocha se rompa formando fragmentos (FIGUEIRA *et al*, 2010). A Figura 2.2 mostra como essas tensões se concentram nas falhas.



**Figura 2. 2** - Concentração de esforços numa fenda.

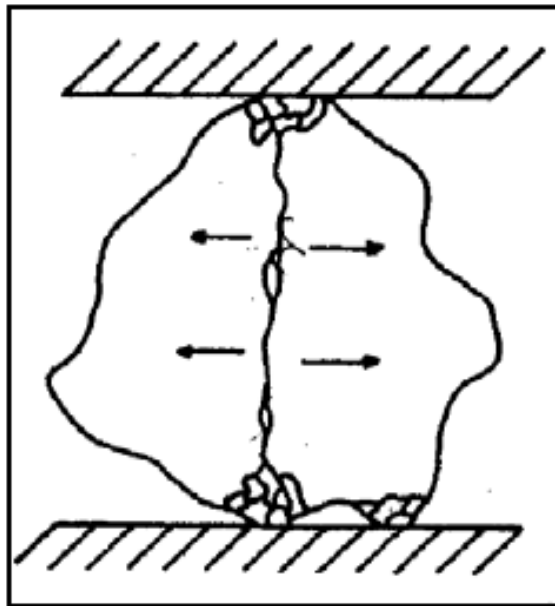
**Fonte:** Figueira *et al*, 2010.

Segundo Griffith (1921) os materiais quebram pela propagação de gretas quando aplicado uma energia superior a suportada pelo material. Cada material se comporta de forma diferente ao esforço exercido sobre ele. Se o material for resistente a fratura, um pequeno esforço poderá causar uma deformação elástica, ou seja, quando cessada a força aplicada o material volta a sua forma de origem. Quando o material é menos resistente e a força aplicada excede a suportada, o material devolve a energia aplicada através da propagação das gretas (fraturas). Enquanto materiais mais dúcteis podem devolver a energia aplicada, por um mecanismo de fluxo plástico, onde os átomos e moléculas deslizam uns sobre outros e a energia é consumida na deformação do sólido. As rochas compostas de grãos finos são geralmente mais resistentes que as de grãos grossos, por não apresentarem tantos espaços intersticiais entre os grãos.

Segundo Figueira *et al* (2010), existem três principais meios de aplicação da energia mecânica na fragmentação de partículas são: esmagamento ou compressão, impacto e atrito. Ele também cita a abrasão, considerada por alguns autores, sendo um mecanismo importante em alguns casos especiais de moagem.

A fragmentação das partículas através da compressão é o mecanismo mais comum e é usada tanto em blocos de grandes dimensões como para partículas micrométricas. Ela ocorre quando forças de compressão são aplicadas de maneira lenta e progressiva, permitindo-se que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Em geral, as forças aplicadas por esse mecanismo são pouco superiores à

resistência dos blocos rochosos ou partículas, gerando um número reduzido de fragmentos homogêneos de tamanho intermediário (FIGUEIRA *et al*, 2010; XAVIER, 2012). Para partículas irregulares que são sujeitas a fragmentação por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: partículas grossas resultantes da fragmentação induzida pela tensão, e partículas finas proveniente da fragmentação por compressão local onde a carga é aplicada. Abaixo na Figura 2.3 é representada uma partícula sofrendo ruptura devido à compressão.



**Figura 2. 3 –** Fratura por britagem.

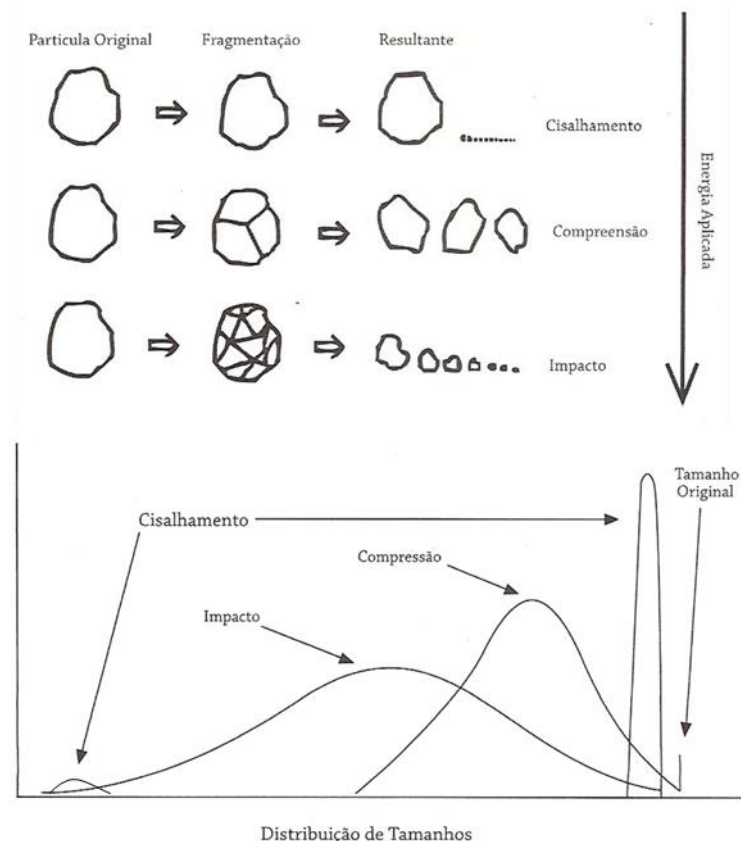
**Fonte:** Figueira, 2010.

A fragmentação por impacto se inicia com uma força sendo aplicada de forma intensa, a partícula sofre uma pressão elevada, e como resultado, absorve mais energia do que necessário para fragmentar-se e a fratura ocorre principalmente pelo excesso de tensão, não havendo deformação antes da ruptura. O produto dessa fragmentação é uma ampla faixa granulométrica (FIGUEIRA *et al*, 2010; XAVIER, 2012).

A fragmentação por atrito gera um produto fino, o que geralmente não é o ideal. Esse evento ocorre principalmente pela interação partícula-partícula, mas, também ocorre em equipamentos como o britador, se este é alimentado rapidamente, o que aumenta a interação entre partículas causando a atrição (FIGUEIRA *et al*, 2010; XAVIER, 2012).

Lembrando que, numa fragmentação, sempre que os esforços são aplicados lentamente, a velocidade de deformação do material também é lenta e se produz menos deformação plástica antes da ruptura e, portanto, menos gasto energético. Entretanto quando a velocidade de aplicação dos esforços é muito grande, como no impacto de alta velocidade, a energia gasta na fragmentação excede a energia necessária. (FIGUEIRA *et al*, 2010; XAVIER, 2012).

Para Mazzinghy (2009) com exceção em casos extremos de velocidade de aplicação das forças, o consumo de energia para fragmentar uma rocha aumenta com a velocidade de aplicação das forças. A Figura 2.4 mostra qualitativamente os mecanismos de fragmentação de partículas e a distribuição granulométrica dos produtos proveniente de cada tipo de aplicação de energia.



**Figura 2. 4** - Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado.

**Fonte:** Modificada de Valadão e Araujo, 2007.

### 2.2.2 Considerações para as operações de cominuição

Para maior eficiência das operações envolvidas na cominuição de um minério é necessário conhecer algumas características físicas da matéria-prima que vão influenciar de forma indireta ou direta nessas operações (FIGUEIRA *et. al*, 2010; MAZZINGHY, 2009). A seguir, serão citadas as várias características que podem ser correlacionadas com a fragmentação de partículas, e onde poderão influenciar nessas operações tais como tamanho máximo da partícula, densidade, forma da partícula, dureza, abrasividade, entre outras características que foram mencionadas nos trabalhos realizados por Mazzinghy (2009), Figueira *et. al* (2010) e Xavier (2012).

O tamanho da partícula influencia diretamente na seleção do equipamento adequado para a cominuição da mesma e deve ser considerado juntamente com a relação de redução. Para a escolha de um britador primário, é levado em consideração a capacidade de produção da operação de desmonte e o tamanho máximo dos blocos contidos no ROM, com essas informações pode-se escolher um equipamento que possua uma boca de entrada que comporte o material que está chegando do desmonte.

A quantidade de fino que chega ao equipamento define a importância de haver um escalpe prévio da alimentação, geralmente usado antes do britador primário. Esse escalpe pode contribuir para a diminuição de minério que contém uma granulometria inferior a de saída do britador, dessa forma, com diminuição do material na alimentação, o britador poderá trabalhar com maior eficiência. Por outro lado, blocos de grandes dimensões podem prejudicar muito a capacidade de britadores de rolos e aumenta muito o desgaste em britadores de impacto, principalmente se eles operarem como britadores primários.

A densidade é importante para o cálculo da capacidade volumétrica de produção de um equipamento de cominuição é levado em consideração a alimentação em toneladas/hora, que é proporcional à densidade do minério, em geral usa-se a densidade  $2,7 \text{ g/cm}^3$  quando não se tem a informação da densidade do minério, pois 2,7 é a densidade média dos silicatos presentes na maioria das rochas, como ele é abundante utiliza-se esse parâmetro e, caso tenha a densidade do minério, é feito o



cálculo da capacidade real volumétrica para materiais com outras densidades utilizando a equação 3.1.

$$\text{Capacidade Real} = \text{Capacidade Nominal} \times \text{densidade real} / 2,7 \quad (3.1)$$

A forma das partículas é importante na definição da abertura da boca de entrada do britador, que é chamada de *gape*, que é a distância entre as duas mandíbulas na extremidade superior do britador de mandíbulas. Um dos problemas enfrentados tanto no peneiramento como na britagem é a alimentação do equipamento com partículas lamelares. Especificamente no caso do britador, exige-se uma relação entre a boca de entrada e o tamanho máximo das partículas maior do que a especificada para minérios não lamelares, isso deve ser levado em consideração pelo fato de uma das dimensões ser muito maior que as demais.

Os minérios que apresentam alto conteúdo de argila e elevada umidade são prejudiciais as operações de peneiramento e britagem, no peneiramento vão causar o entupimento da tela pelo acúmulo de material, com isso, diminuindo a eficiência dessa operação. No caso da britagem, esse material vai se acumular na carcaça podendo tanto impedir o acesso das partículas ao britador, quanto proporcionar um amortecimento (dispersão da força) da energia aplicada na fragmentação das partículas, dificultando a fragmentação e diminuindo a eficiência dessa operação.

A dureza é um parâmetro usado para representar a resistência que uma superfície oferece quando atritada a outra, essa resistência é ligada ao tipo de estrutura cristalina do minério ou mineral. Um material pode ser definido como duro (que risca outro material) e resistente a abrasão, em uma das faces, e considerado frágil em outra face, essa também é uma característica que é justificada pelo tipo de estrutura cristalina. Uma das formas para classificar a dureza de um mineral é a utilização da escala de Mohs, na qual são atribuídos valores de 1 a 10, sendo o valor 1 indicado para o material menos duro, representado pelo talco, e o valor 10 dado ao material mais duro conhecido na natureza, o diamante.

A tenacidade é a capacidade de um material resistir ao rompimento por tração, compressão ou impacto. Também pode ser compreendido como a medida da quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. A tenacidade também é associada a outros termos como: friável (frágil, quebradiço), maleável, dúctil, flexível e elástico. A dureza e tenacidade são maneiras de entender como se comporta o minério ou mineral frente as forças de fragmentação a que são submetidos.

A abrasividade é uma propriedade diretamente associada as características dos minérios e minerais como: mineralogia, textura, estruturação, alteração, entre outros. Ela corresponde a capacidade que um material possui de arranhar ou desgastar, por fricção, outro material menos resistente. Normalmente o índice de abrasividade (Ai) é associado a quantidade de sílica e quartzo livre presente no material. Esse parâmetro é muito importante na escolha das características que um equipamento deve possuir para diminuir o alto custo na manutenção, devido a fricção do minério na carcaça do equipamento proporcionando o desgaste. A classificação da abrasividade está descrita na Tabela 2.1 (Metso, 2005):

| <b>Abrasividade</b> | <b>Índice de abrasão</b> | <b>Exemplos de materiais</b> |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>Alta</b>         | 0,5                      | granito, quartzo e gnaisse   |
| <b>Média</b>        | 0,2 a 0,4                | diabásio e basalto           |
| <b>Não abrasivo</b> | 0,1                      | calcários e dolomitas        |

**Tabela 2. 1** – Classificação do material quanto ao seu índice de abrasividade.

**Fonte:** Autoria própria.

A definição de coesão, segundo Ferreira (2000), é a união íntima das partes de um todo, a força de atração entre átomos e moléculas que constituem um corpo, que por sua vez, é responsável por manter ambos unidos, impedindo que se quebre. A fragmentação das partículas ocorre quando as forças de coesão são rompidas permitindo que as partículas se separem, para que isso ocorra, é necessário que a

força aplicada seja maior que a força de coesão. As características do produto da fragmentação dependem não só da natureza das forças de coesão interna das partículas como também do tipo de aplicação da energia e sua intensidade.

As forças de compressão aplicadas pelos equipamentos na fragmentação das partículas, são amplamente estudadas para que possa produzir equipamentos cada vez mais eficientes nesse quesito. São essas forças as responsáveis por provocar a deformação da partícula gerando tensões internas de cisalhamento e sendo distribuídas pelo grão concentrando-se principalmente nas regiões de maior fraqueza estrutural. Os principais pontos de fraquezas na estrutura são em regiões de trincas pré-existentes ou pré-condicionadas em alguma operação de fragmentação anterior. Nessas regiões as ligações químicas se encontram sob tensão máxima e, quando essa tensão é superada, as energias de ligação química se rompem e a trinca se propaga de forma acelerada liberando essa energia para que a estrutura cristalina possa voltar a estado de equilíbrio de forças.

Já a velocidade de propagação de onda em um minério depende da sua capacidade de absorver energia e da intensidade da energia aplicada no mesmo. Quando é aplicado uma força ao minério e ele não consegue dissipar imediatamente toda a energia, ela se propaga pelas trincas e suas ramificações causando ruptura em diversos fragmentos. Se a energia aplicada for por impacto de alta intensidade, a propagação da trinca atinge a velocidade máxima, e a propagação da onda de choque provoca a ramificação da trinca em alta velocidade, produzindo vários fragmentos de forma aleatória com uma ampla distribuição granulométrica. Mesmo em casos que a aplicação de uma força compressiva, exercida pelo movimento da mandíbula do britador, não seja capaz de provocar fraturas no minério, os reflexos das ondas compressivas provocadas por uma região diferente do local de aplicação dessa força, pode gerar tracionamento suficiente para causar ruptura nas trincas presentes no material que se propagam em ramificações sucessivas.

A corrosividade é um parâmetro importante na escolha dos materiais e equipamentos que vão entrar em contato com minérios corrosivos que impõe condições especiais de manuseio, operações e processo de beneficiamento.

## 2.2.3 Britagem

### 2.2.3.1 Fundamentos

A fragmentação da rocha inicia-se no desmonte, através de métodos com explosivos ou de forma mecânica com equipamentos apropriados. A primeira etapa de fragmentação na usina é a britagem, o intuito dessa operação é adequar a granulometria do minério para as etapas subsequentes, que é a moagem ou outros estágios de britagem. A britagem também pode ser usada para a adequação da granulometria do produto final, que é o caso da produção de brita, que neste caso, é o produto final a ser comercializado. As operações de britagem podem ser divididas em várias etapas, de acordo com a granulometria desejada ou devido as dificuldades encontradas na fragmentação do minério, segundo suas características físicas (XAVIER, 2012). A Tabela 2.2 traz os estágios de fragmentação de acordo com o tamanho máximo das partículas na alimentação e no produto, e a relação de redução de cada etapa.

| Estágio                     | Tamanho máximo (mm) |           | Relação de redução |
|-----------------------------|---------------------|-----------|--------------------|
|                             | Alimentação         | Produção  |                    |
| <b>Britagem primária</b>    | 500 a 2000          | 100 a 305 | 8:1                |
| <b>Britagem secundária</b>  | 100 a 635           | 19 a 102  | 6:1 a 8:1          |
| <b>Britagem terciária</b>   | 10 a 100            | 1 a 25    | 4:1 a 6:1          |
| <b>Britagem quartenária</b> | 5 a 76              | 0,8 a 1,5 | Até 20             |
| <b>Moagem grossa</b>        | 9,5 a 19            | 0,4 a 3,5 | Até 20             |
| <b>Moagem fina</b>          | 13                  | fino      | 100:1 a 200:1      |

**Tabela 2. 2** – Classificação dos estágios de fragmentação.

**Fonte:** Xavier, 2012.

Essa classificação é importante na escolha do equipamento a ser utilizado e, para cada estágio, um tipo de equipamento é escolhido com base nas características do minério, de acordo com sua capacidade operacional e eficiência na execução dessa operação. Em geral, o equipamento da etapa de britagem primária é o de maior

porte, devido as grandes dimensões dos blocos de rochas que são alimentados nessa etapa. O minério que chega ao britador primário proporciona um grande desgaste do revestimento do equipamento, que por sua vez, são equipamentos mais robustos e possuem uma estrutura mais reforçada para suportar o peso desses blocos e os esforços exercidos por eles. Os demais equipamentos das etapas subsequentes são escolhidos com base na necessidade particular de cada empresa, em relação a produção, no produto que se quer obter de cada etapa e no capital disponível para investimentos (FIGUEIRA *et al*, 2010).

Como a alimentação do britador primário vem do ROM, para maior economia em transporte, a localização do equipamento deve ser próxima ou até mesmo dentro da cava. Os britadores empregados nessa etapa trabalham em circuito aberto, com ou sem grelha de escalpe para o descarte da fração fina do material que vem da alimentação. Uma característica dessa etapa é a realização a seco e possuem, em geral, uma relação de redução em torna de 8:1 (FIGUEIRA *et al*, 2010).

É interessante salientar que o emprego de escalpe, antes das operações de britagem, pode reduzir consideravelmente a quantidade de material na alimentação dos britadores. O minério com granulometria abaixo da especificada de saída daquele equipamento, não necessita passar por ele e, neste caso, pode ser redirecionado para as etapas subsequentes evitando também que o equipamento trabalhe acima de sua capacidade de alimentação (ROSA; LUZ, 2011).

A britagem secundária tem como alimentação um material já fragmentado na etapa anterior com granulometria variando de 15 a 30 cm. Normalmente essa operação também é realizada a seco, podendo ser em um circuito aberto ou fechado. Os equipamentos utilizados geralmente são: os britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de martelos e os de rolos (XAVIER, 2012).

As britagens posteriores a secundária tem como propósito adequar a granulometria das partículas para a moagem ou, até adequar a granulometria do produto final. Os equipamentos mais utilizados nessas etapas são os britadores cônicos, estes equipamentos, por sua vez, possuem um maior controle de operação e geralmente trabalha em circuito fechado (FIGUEIRA *et al*, 2010). Na Tabela 2.3 são listados alguns dos principais tipos de britadores e suas respectivas características.

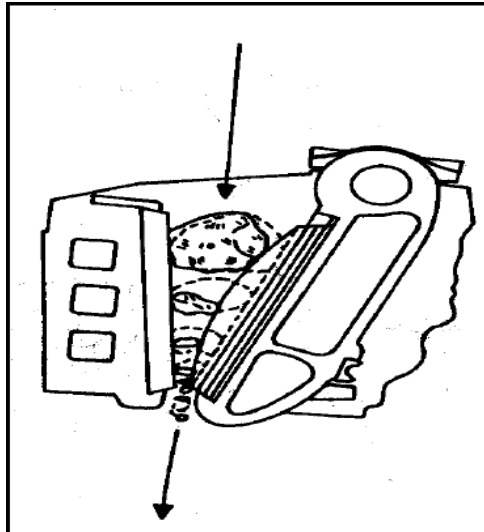
| Tipo de britador                 | Mandíbulas   | Giratório  | Cônico  | Impacto  | Martelos   | Sizer  | Rolos Dentados   |
|----------------------------------|--|--|---|--|--|--|--|
| Serviço                          | Britagem 1ª e 2ª   | Britagem 1ª  | Britagem 2ª, 3ª e 4ª  | Britagem 1ª, 2ª, 3ª e 4ª   | Britagem 1ª, 2ª e 3ª   | Britagem 1ª, 2ª e 3ª   | Britagem 1ª e 2ª   |
| Grau de Redução                  | 5:1 (4:1 a 9:1)  | 8:1 (3:1 a 10:1)   | 3:1 a 7:1   | 6:1 a 40:1   | 20:1 a 100:1   | 3:1 a 6:1  | 2:1 a 6:1  |
| Capacidade Processamento (t/h)   | Baixa a média (até 1300)   | Média a alta (até 10000)   | Baixa a média (até 2400)  | Baixa a média (até 2400)   | Baixa a média (até 2800)   | Média a alta (até 10000)   | Média a alta (até 12000)   |
| Tamanho máx. da alimentação (mm) | Grandes tamanhos (até 1500)  | Grandes tamanhos (até 1600)  | até 500   | até 1500   | até 1500   | até 2000   | Limitado a distância entre rolos (até 2500)  |
| Granulometria do Produto         | Poucos finos. Top size alto p/ lamelares   | Poucos finos. Top size menor que mandíbulas  | Distrib. granulo m. uniforme, formato cúbico                            | Muitos finos, formato cúbico ou arredondado.   | Muitos finos e formas cúbicas  | Poucos grossos e teor de finos menor quando comparado c/ outros equip.         | Tamanho médio a fino (baixa porcentagem), uniforme.  |
| Aplicação                        | Duro e abrasivo, c/ sílica <30% e umidade <10%. Pouco indicado p/ minerais coesivos e c/ tendência a produzir partículas lamelares | Abrasivo, umidade <5% e c/ tendência a produzir partículas lamelares. Pouco indicado p/ minerais coesivos. | Duro e abrasivo e p/ umidade < 8%. Pouco indicado p/ minerais coesivos. | Abrasivo c/ sílica+óx. metálicos <15%, umidade <8%, alto teor de argila, c/ tendência a produzir partículas lamelares. Limitado a rochas frágeis ou elásticas. | Dureza baixa a moderada, pouco abrasivo c/ sílica <3-8% e umidade <15-20%. | Dureza média, c/ sílica <10%, p/ umidade <30% e minerais coesivos e pegajosos. | Dureza baixa e média, pouco abrasivo c/ sílica <10%, umidade <30%, minerais coesivos, c/ tendência a produzir partículas lamelares |
| Resist. a Compressão (Mpa)       | < 500  | < 400  | < 400   | < 300  | < 200  | < 130  | < 180  |

Tabela 2. 3 - Principais tipos de britadores e suas características.

Fonte: Xavier, 2012.

### 2.2.3.2 Britadores de mandíbulas

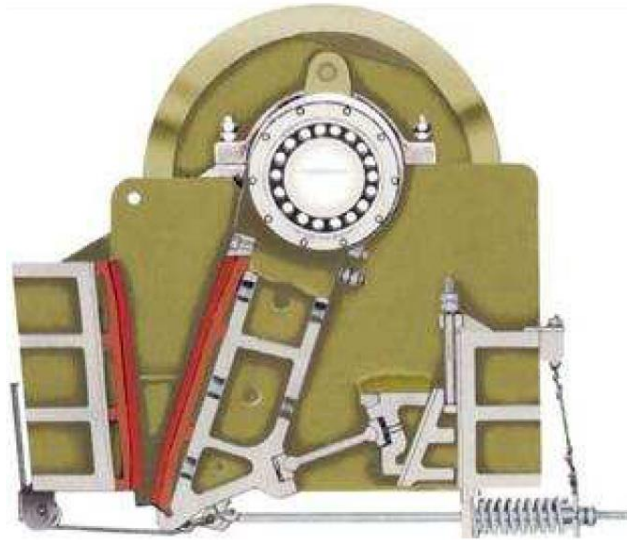
Os Britadores de Mandíbulas são equipamentos robustos comumente utilizados na britagem primária em blocos de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho na alimentação. São compostos basicamente de uma mandíbula fixa, e uma móvel ligada ao excêntrico (está ligação pode ser feita direta ou indiretamente), fornecendo o movimento de aproximação e afastamento entre as mandíbulas. O britador é alimentado na parte superior (boca do britador) e o material vai descendo entre as mandíbulas, enquanto recebe o impacto responsável pela fragmentação, como mostrado na Figura 2.5 (FIGUEIRA *et al*, 2010).



**Figura 2. 5** - Movimento dos blocos durante a fragmentação no Britador de Mandíbulas.

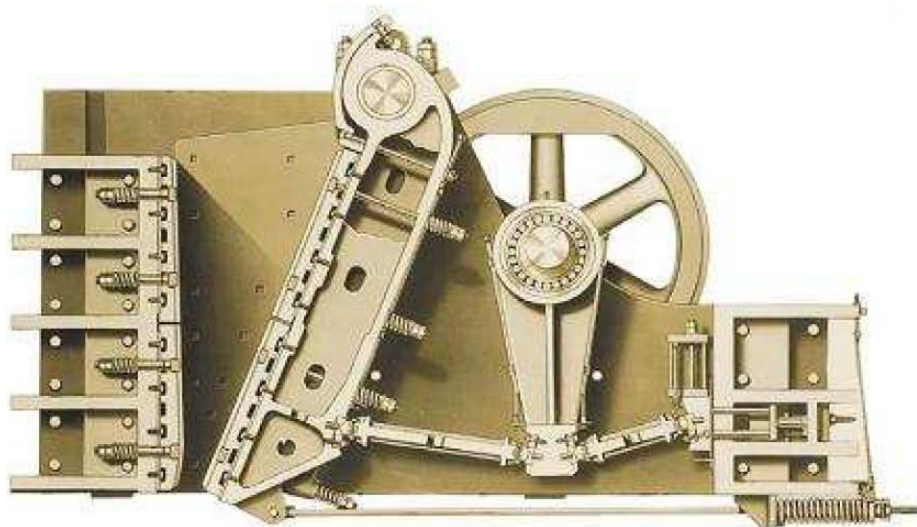
**Fonte:** Figueira *et al*, 2010.

Os britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos de acordo com o mecanismo de acionamento da mandíbula móvel, um eixo - tipo Dodge (Figura 2.6) e dois eixos - tipo Blake (Figura 2.7).



**Figura 2. 6** - Britador de Mandíbulas de um eixo "Dodge".

**Fonte:** Metso, 2005.



**Figura 2. 7** - Britador de Mandíbulas de dois eixo "Blake".

**Fonte:** Metso, 2005.

Os britadores de um eixo possuem o queixo apoiado num eixo excêntrico na parte superior. Na parte inferior, o queixo é mantido na mesma posição por uma placa de articulação. Esta placa possui uma oscilação mínima em forma de um pequeno arco. O movimento excêntrico da parte superior somado com a oscilação da parte inferior dá ao queixo um movimento semelhante ao da mastigação por toda a superfície de britagem (METSO, 2005).



Os britadores de mandíbulas de dois eixos possuem duas placas de articulação, o primeiro eixo é pivotado onde o queixo se apoia, enquanto que o outro é excêntrico e aciona as duas placas. A mandíbula móvel executa um movimento simples de vai-e-vem em direção a mandíbula fixa (METSO, 2005).

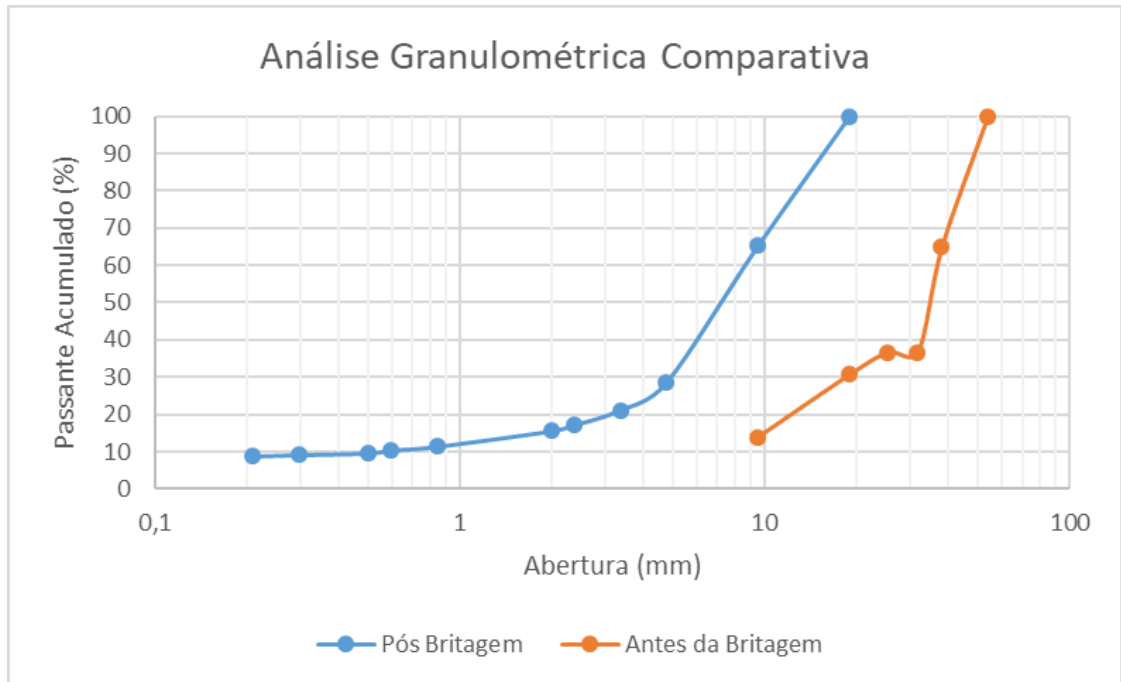
Nos britadores de mandíbulas a granulometria do produto da fragmentação é estabelecida pelo ajuste da descarga, sendo definida pelo grau de redução em torno de 5:1 (FIGUEIRA *et al*, 2010).

Segundo os catálogos da Metso (2005), o movimento de “mastigação” do britador de um eixo confere melhor capacidade de entrada na alimentação de material em comparação com o britador de dois eixos, ambos possuindo tamanhos correspondentes. Os britadores de dois eixos são mais indicados para materiais abrasivos e de difícil fragmentação, esses materiais exigem uma melhor estrutura e revestimento do equipamento. O britador de dois eixos, em geral, custa cerca de 50% mais que os de um eixo e isso indica um maior custo de investimento inicial para trabalhar com o equipamento de dois eixos (FIGUEIRA *et al*, 2010).

A desvantagem do britador de mandíbulas, em relação aos demais britadores, é a largura relativamente pequena de saída do material fragmentado, limitando assim a sua capacidade de produção. Além disso, devido ao tipo de movimento empregado na fragmentação, ocorre um desgaste constante do revestimento do equipamento e precisam ser substituídos regularmente (METSO, 2005).

#### **2.2.4 Curva granulométrica**

As curvas granulométricas são representações gráficas da distribuição por tamanho das partículas minerais que compõem o produto da fragmentação. Independente da ordem de tamanho do produto da fragmentação, sua distribuição granulométrica obedece a uma curva mais ou menos característica, levando em consideração o tipo de equipamento usado e o material fragmentado (OLIVEIRA, 2017). A Figura 2.8 traz um exemplo de curva granulométrica.



**Figura 2. 8** - Exemplo de uma curva granulométrica.

**Fonte:** Autoria própria.

### 2.3 Relação (grau) de redução - RR

A relação de redução ou grau de redução máxima é um parâmetro usado para avaliar o quão eficiente foi a operação de fragmentação do minério. Ele é definido como sendo a razão entre o maior tamanho de partícula presente na alimentação e o maior tamanho de partícula presente no produto. O termo maior tamanho refere-se a abertura da malha que deixa passar 80% das partículas (VALADÃO, 2007 apud XAVIER, 2012). A equação 3.2 abaixo demonstra essa relação.

$$GR = \frac{A_{80}}{P_{80}} \quad (3.2)$$

GR = grau de redução ou relação de redução;

$A_{80}$  = malha que deixa passar 80% das partículas na alimentação;

$P_{80}$  = malha que deixa passar 80% das partículas no produto.

## 2.4 Consumo energético

Segundo Tavares (2009), a maior parte dos custos operacionais e gasto energético no beneficiamento do minério está nas operações de fragmentação, devido à grande quantidade de energia despendida para a redução da granulometria das partículas de mineral-minério nessas operações. O alto consumo energético também está relacionado a baixa eficiência operacional e a grande quantidade de energia necessária para a fragmentação dessas partículas. Em geral, a cominuição representa em média 50 a 75% dos custos diretos de produção da maior parte das usinas de concentração na indústria mineral, e esses gastos são vinculados ao alto gasto energético.

Figueira *et al* (2010) cita um bom exemplo que ilustra o consumo energético em uma mineradora, Erie Mining Co, em Minnesota (EUA), que beneficia o minério de ferro taconíticos. O mineral-minério de interesse fica disseminado na rocha e necessita ser reduzido a uma granulometria com 90% abaixo da malha de 325 mesh. A Tabela 2.4 especifica a distribuição do consumo energético da empresa.

| <b>Operação</b>              | <b>kWh/t</b> | <b>Consumo (%)</b> |
|------------------------------|--------------|--------------------|
| <b>Fragmentação</b>          | 17,2         | 80,0               |
| <b>Concentração</b>          | 1,5          | 7,0                |
| <b>Eliminação de rejeito</b> | 1,2          | 6,0                |
| <b>Abastecimento de água</b> | 1,5          | 7,0                |
| <b>Total</b>                 | 21,4         | 100,0              |

**Tabela 2. 4 –** Distribuição do consumo de energia na Erie Mining Co.

**Fonte:** Figueira *et al*, 2010.

Ainda segundo Figueira *et al* (2010), observando as informações da Tabela 3.4, nota -se que o maior consumo energético de uma mina está concentrado nas etapas de cominuição (80%). Dessa maneira é fácil compreender o interesse que existe no estudo da fragmentação, pois, qualquer otimização nessas operações significa uma importante economia nos custos operacionais da indústria mineral.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas para a caracterização mineral e para a realização dos testes de fragmentação nas diferentes condições de aquecimento/choque térmico. Os testes foram realizados no laboratório de Tratamento de Minério do CEFET/MG em Araxá, utilizando os equipamentos e materiais presentes no laboratório.

#### **3.1 Preparação das amostras**

O minério utilizado neste trabalho correspondeu ao minério de ferro em granulometrias referente a amostras de mão que se encontravam no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Unidade Araxá, proveniente da Mina de Posse, administrada pela empresa Crusader do Brasil Mineração Ltda, localizada na região do município de Caeté, Minas Gerais. Além deste, foi empregado o material fornecido pela empresa Mineradora Santa Helena, localizada na região do município de Ibiá, Minas Gerais, sendo oriundos de uma rocha composta por granito gnáissico em granulometria passante em 2". O minério primitivo passou por operações de homogeneização e quarteamento para que posteriormente fosse capaz de ser submetido aos testes. O material deveria ser passante em 2", para isso, o mesmo foi peneirado (manualmente) usando uma peneira de 2". Após ser homogeneizado e quarteado em frações de aproximadamente 1 kg, essas frações foram armazenadas em sacos plásticos e identificadas, de acordo com sua massa, para posterior análise.

#### **3.2 Caracterização das amostras**

Para obter a densidade da amostra foi realizado um experimento de densidade relativa utilizando uma proveta de 1000 mL. A proveta foi pesada vazia, logo após foi colocado 100g de minério, pesada novamente, e após isso, completado o seu volume com água, e novamente realizada a pesagem, e também foi pesada a proveta com água, com um volume de 1000 mL. Posteriormente foi calculado a densidade, através da equação 4.1. Esse ensaio foi realizado para cada uma das amostras de minério e

a média aritmética entre os valores obtidos foi considerada como a densidade de cada amostra.

$$ds = \frac{(A2)-(A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad (4.1)$$

Onde:

ds = densidade dos sólidos;

A1 = massa da proveta;

A2 = massa da proveta + amostra.

A3 = massa da proveta + amostra + água;

A4 = massa da proveta + água.

Também foram realizadas as análises químicas do itabirito e do granito gnaisse. A análise química foi realizada através de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o equipamento da marca *Shimadzu*, modelo EDX-720 do Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET MG (Campus I), situado em Belo Horizonte (MG). A amostra utilizada na FRX foi triturada utilizando almofariz e pistilo de porcelana até a obtenção de 50g de amostra passante em 200# (0,074mm).

### 3.3 Ensaios de britagem

Inicialmente todas as amostras escolhidas para os testes foram submetidas a uma operação de peneiramento por um tempo de 10 minutos, usando o peneirador suspenso, seguindo a sequência de peneiras estabelecidas de acordo com a série de Tyler: 2", 1 1/2", 1 1/4", 1", 3/4", 3/8". As massas retidas em cada peneira foram quantificadas em uma balança semi-analítica e os valores obtidos anotados em uma

tabela devidamente confeccionada para este fim, para posterior realização das curvas granulométricas da alimentação.

Em seguida, as amostras foram submetidas às preparações distintas de aquecimento/choque térmico. Posteriormente, cada amostra era britada no britador de mandíbulas de um eixo, que foi regulado para 1/2" na APA para a realização dos testes. Os produtos da britagem de todos os testes foram submetidos a uma sequência de peneiramento, utilizando as peneiras de 3/4", 3/8", 4#, 6#, 8#, 10#, 20#, 30#, 35#, 48# e 65#, por um tempo de 15 minutos. As condições de realização dos testes estão apresentadas na Tabela 3.1 abaixo:

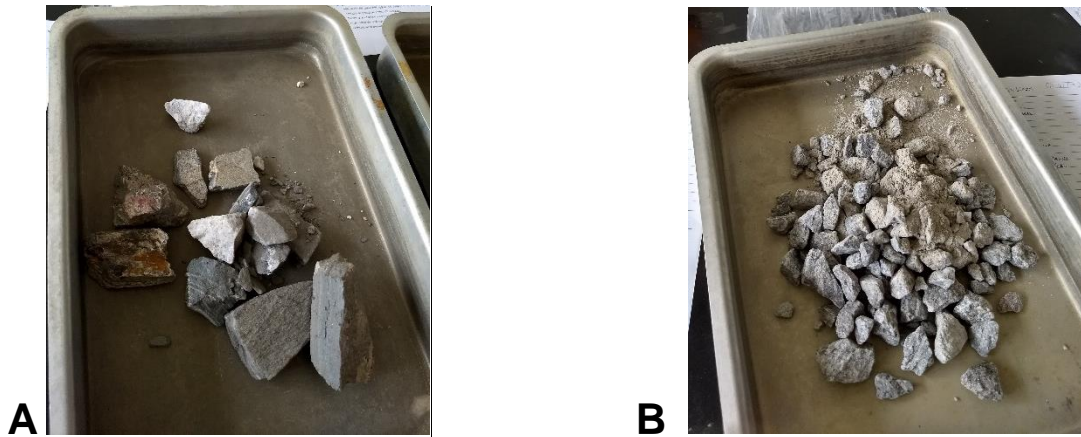
| <b>Amostra</b>                                       | <b>Tipo de preparação</b>                      | <b>Temperatura do aquecimento (°C)</b> | <b>Potência (W)</b> | <b>Tempo de aquecimento (minutos)</b> |
|--|--|--|---------------------|---------------------------------------|
| <b>Branco do granito e do ferro</b>                  | -  | -                                      | -                   | -                                     |
| <b>Granito</b>                                       | Aquecimento em mufla                           | 300                                    | -                   | 10                                    |
|  |  | 300                                    | -                   | 15                                    |
|  |  | 500                                    | -                   | 10                                    |
|  |  | 500                                    | -                   | 15                                    |
|  | Aquecimento em micro-ondas                     | -                                      | 900                 | 10                                    |
|  |  | -                                      |                     | 15                                    |
|  | Aquecimento em mufla seguido de choque térmico | 300                                    | -                   | 10                                    |
|  | <b>Itabirito</b>                               | Aquecimento em mufla                   | 300                 | -                                     |
| 300  |  |  | -                   | 15                                    |
| 500  |  |  | -                   | 10                                    |
| 500  |  |  | -                   | 15                                    |
| Aquecimento em micro-ondas                           |  | -                                      | 900                 | 10                                    |
|  |  | -                                      |                     | 15                                    |
| Aquecimento em mufla seguido de choque térmico       |  | 300                                    | -                   | 10                                    |
|  |  | 500                                    | -                   | 15                                    |
| Aquecimento em micro-ondas seguido de choque térmico |  | -                                      | 900                 | 15                                    |

**Tabela 3. 1 – Condições que as amostras foram submetidas.**

Para as amostras submetidas ao choque térmico o seguinte procedimento foi adicionado: ao término do tempo de aquecimento, a amostra foi retirada e, imediatamente despejada em um balde com água, a temperatura ambiente, para que ocorresse o choque térmico, depois disso, foi retirado o excesso de água do balde e a amostra foi colocada na estufa a temperatura de 100°C por 24 horas para a retirada do excesso de umidade da amostra.

Para maior confiabilidade e representatividade na análise dos dados obtidos, foram escolhidos dois modelos matemáticos para descrever a distribuição de tamanho de partículas: Gates-Gaudin-Schumann (GGS) e Rosin-Rammler-Bennet (RRB). Esses modelos foram usados para a obtenção de uma equação linearizada representativa do comportamento da distribuição granulométrica das partículas e também um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) que nos permitiu avaliar qual modelo representou melhor cada tipo de amostra. O grau de redução foi calculado através da Equação 3.2.

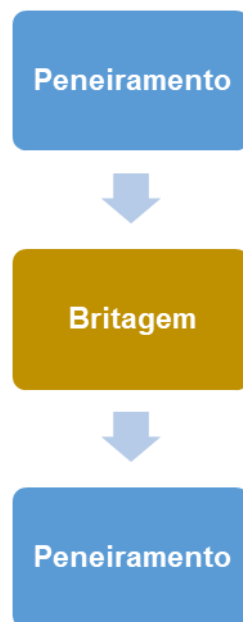
Para o cálculo de relação de redução do granito gnaisse foi adotado o valor do  $A_{80}$  médio, da alimentação de todos os testes, pois o desvio padrão dos valores de  $A_{80}$  foi menor que 5% para os ensaios realizados. Já para o itabirito, foi escolhido o  $A_{80}$  da alimentação de cada teste por conta do alto valor do desvio padrão (> 5%), este fato pode ter ocorrido devido ao alto grau de heterogeneidade das amostras que apresentavam fragmentos com uma das dimensões até 3 vezes maior que as demais, dessa forma, era passante em 2" mas ficava retido nas peneiras de 1 ½" e 1 ¼". A Figura 3.1 deixa evidente a diferença da granulometria de cada amostra usada na alimentação dos testes realizados.



**Figura 3. 1** - A) Amostra de Itabirito na alimentação; B) Amostra de Granito Gnaiss na alimentação.

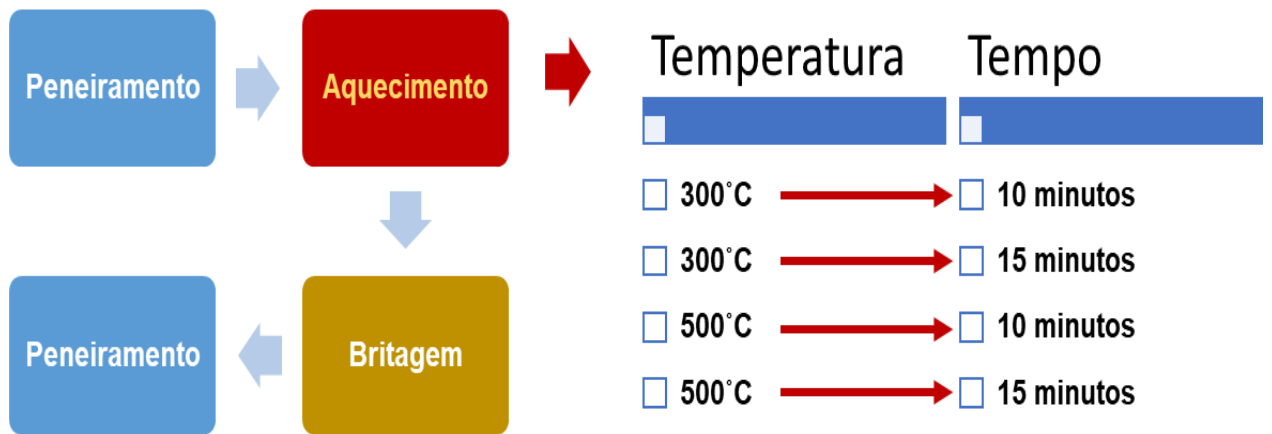
Os ensaios que apresentaram os melhores valores de relação de redução foram repetidos com o intuito de avaliar a reprodutividade da técnica.

A seguir serão apresentados os esquemas que ilustram as condições de preparação de cada amostra, através das Figuras 3.2 até a 3.6.

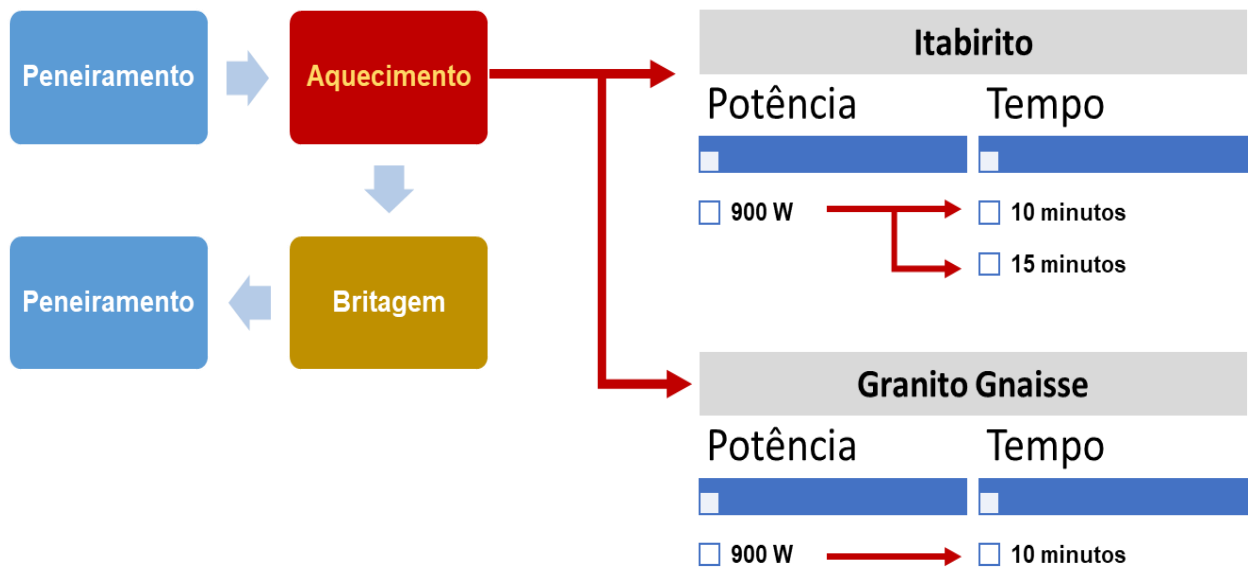


**Figura 3. 2** - Amostras padrão (não submetida ao aquecimento nem ao choque térmico) – itabirito e granito gnaiss.



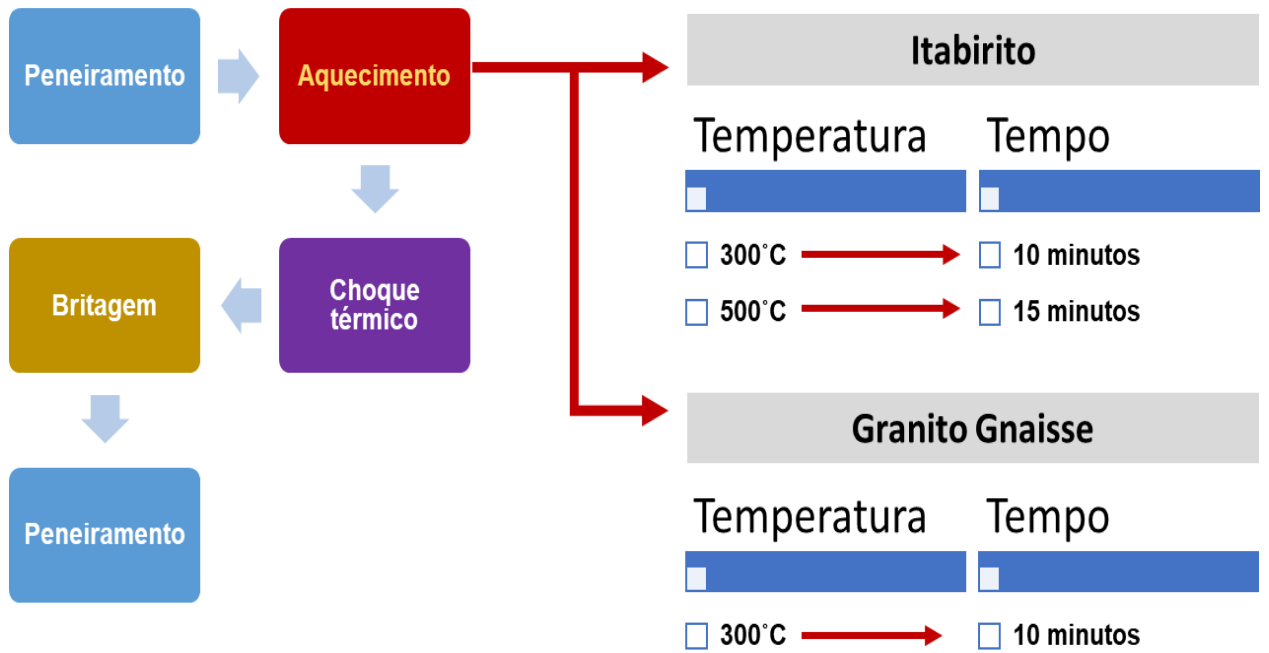


**Figura 3. 3** - Amostras aquecidas em forno convencional (mufla) - itabirito e granito gnaisse.



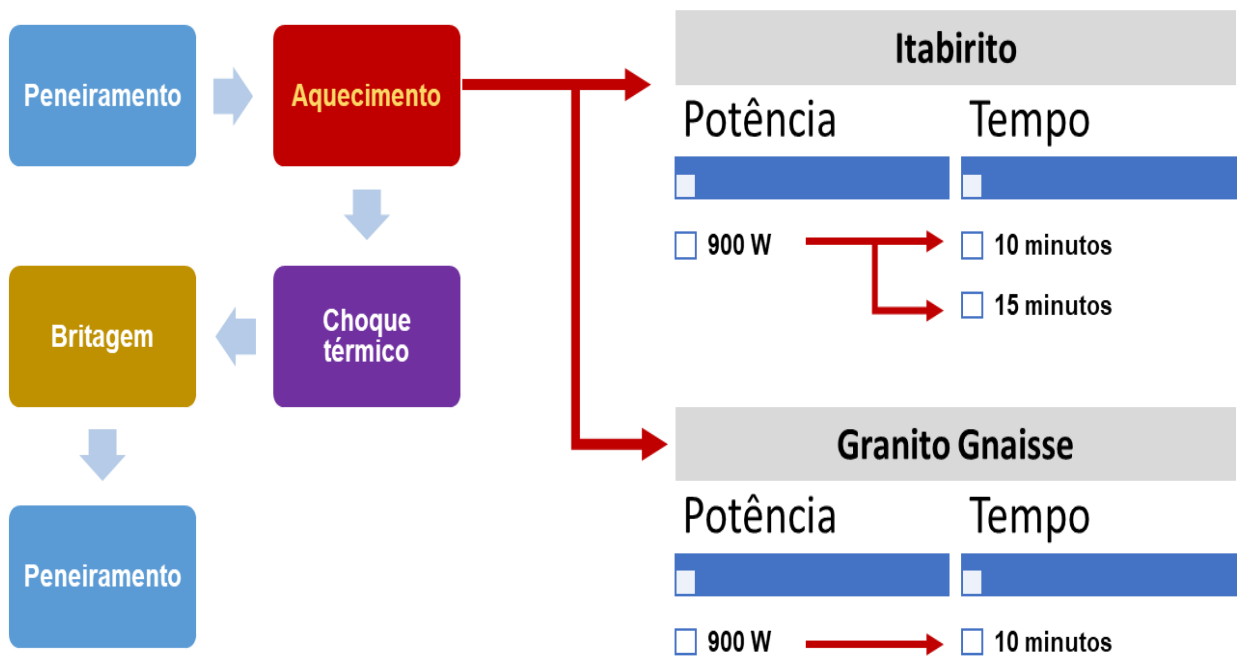
**Figura 3. 4** - Amostras aquecidas em forno de micro-ondas - itabirito e granito gnaisse.

Inicialmente as amostras de itabirito e granito gnaisse escolhidas para esta etapa, são aquelas que passaram pela mesma condição de aquecimento, que foram de aquecimento a 300°C por um tempo de 10 minutos, para que pudessem ter os seus resultados comparados também entre si. Depois a condição escolhida foi a de maior tempo e temperatura, para que fosse possível comparar a influência do choque térmico com o aumento da temperatura.



**Figura 3. 5** - Choque térmico após o aquecimento no forno convencional (mufla) – itabirito e granito gnaiss.

Para a escolha das amostras a serem submetidas ao choque térmico, foram seguidos os mesmos critérios descritos no parágrafo anterior.



**Figura 3. 6** - Choque térmico após o Aquecimento em Micro-ondas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo discorre sobre a interpretação e a discussão dos ensaios de caracterização das amostras de itabirito e granito gnaisse e sobre os dados obtidos através dos testes de britagem.

### 4.1 Caracterização das amostras

O resultado da análise química dos elementos de ambos os minérios está apresentado na Tabela 4.1.

| Granito gnaisse |                | Itabirito |                |
|-----------------|----------------|-----------|----------------|
| Minerais        | Resultados (%) | Minerais  | Resultados (%) |
| Si              | 59,104         | Fe        | 64,178         |
| k               | 14,307         | Si        | 32,651         |
| Al              | 12,197         | Al        | 2,299          |
| Fe              | 9,483          | Tm        | 0,354          |
| Ca              | 2,319          | Mn        | 0,183          |
| Mn              | 0,789          | Cs        | 0,137          |
| Rb              | 0,641          | K         | 0,103          |
| S               | 0,296          | S         | 0,094          |
| Nb              | 0,199          | -         | -              |
| Zn              | 0,183          | -         | -              |
| Zr              | 0,117          | -         | -              |
| Ag              | 0,099          | -         | -              |
| Cu              | 0,079          | -         | -              |
| Ac              | 0,071          | -         | -              |
| Ir              | 0,70           | -         | -              |
| Y               | 0,027          | -         | -              |
| Pt              | 0,018          | -         | -              |

**Tabela 4. 1** – Resultados das análises químicas dos elementos, realizadas com o itabirito e granito gnaisse.

Também foram analisados os óxidos presentes nas amostras de itabirito e granito gnaisse, os resultados da análise química estão apresentados na Tabela 4.2.

| Granito gnaisse                |                | Itabirito                      |                |
|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| Minerais                       | Resultados (%) | Minerais                       | Resultados (%) |
| SiO <sub>2</sub>               | 70,146         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 50,416         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,930         | SiO <sub>2</sub>               | 46,000         |
| K <sub>2</sub> O               | 7,339          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,938          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,023          | Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,199          |
| CaO                            | 1,277          | SO <sub>3</sub>                | 0,147          |
| MnO                            | 0,382          | MnO                            | 0,135          |
| SO <sub>3</sub>                | 0,330          | Cs <sub>2</sub> O              | 0,088          |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0,232          | K <sub>2</sub> O               | 0,077          |
| ZnO                            | 0,077          | -                              | -              |
| NbO                            | 0,076          | -                              | -              |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,051          | -                              | -              |
| Ag <sub>2</sub> O              | 0,035          | -                              | -              |
| CuO                            | 0,034          | -                              | -              |
| Ir <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,026          | -                              | -              |
| Ac                             | 0,023          | -                              | -              |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,011          | -                              | -              |
| PtO <sub>2</sub>               | 0,007          | -                              | -              |

**Tabela 4. 2** – Resultados das análises químicas dos óxidos, realizadas com o itabirito e granito gnaisse.

Como já era esperado o granito gnaisse apresenta uma alta quantidade do elemento silício (59,1%) que é o elemento que se junta com o oxigênio para formar a sílica, que por sua vez, é o óxido mais abundante presente no granito gnaisse, que representa 70.1% de sua composição. O itabirito é um minério de ferro composto, basicamente, por ferro e sílica. Os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 comprovam que ambos os elementos ferro (64,1%) e sílica (32,6%) apresentam as maiores concentrações, o mesmo acontece com os óxidos com concentrações de ferro (50.4%) e sílica (46%).

Após a preparação das amostras foram realizados os cálculos de densidade e foi encontrado para o itabirito o valor de  $3,04 \text{ g/cm}^3$  e para o granito gnaisse foi de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Como pode ser observado nos resultados apresentados, a presença de ferro, em uma grande quantidade, na composição, do itabirito confere a ele uma densidade superior à do granito gnaisse, que apresenta em sua composição apenas pequenas quantidades de metais.

## **4.2 Ensaio de britagem**

O modelo matemático GGS foi o que melhor descreveu a distribuição granulométrica da alimentação e dos produtos da britagem. Por isso, esse modelo foi considerado para os cálculos de  $A_{80}$  e  $P_{80}$  em todos os testes.

## **4.3 Análise do produto da britagem após o aquecimento em mufla**

A Tabela 4.3 traz os valores de  $A_{80}$ ,  $P_{80}$  e relação de redução dos ensaios realizados com aquecimento em mufla em diferentes condições de temperatura e tempo de aquecimento.

| Condição Analisada                                 | Itabirito            |                      |             | Granito gnaisse      |                      |             |
|--|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|
|  | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          |
| <b>Branco</b>                                      | 49663,8              | 24400,7              | <b>2,04</b> | 34565,0              | 28754,5              | <b>1,20</b> |
| <b>Aquecimento mufla 300 °C /10min</b>             | 58305,4              | 24563,2              | <b>2,37</b> | 34565,0              | 26541,4              | <b>1,30</b> |
| <b>Aquecimento mufla 300 °C /15min</b>             | 71275,5              | 19082,5              | <b>3,74</b> | 34565,0              | 16526,8              | <b>2,09</b> |
| <b>Aquecimento mufla 500 °C /10min</b>             | 60091,4              | 18828,1              | <b>3,19</b> | 34565,0              | 16061,5              | <b>2,15</b> |
| <b>Aquecimento mufla 500 °C /15min</b>             | 54711,1              | 16380,8              | <b>3,34</b> | 34565,0              | 15886,1              | <b>2,18</b> |
| <b>(Duplicata) Aquecimento mufla 500 °C /15min</b> | 56165,4              | 18688,2              | <b>3,01</b> | 34565,0              | 15053,0              | <b>2,30</b> |

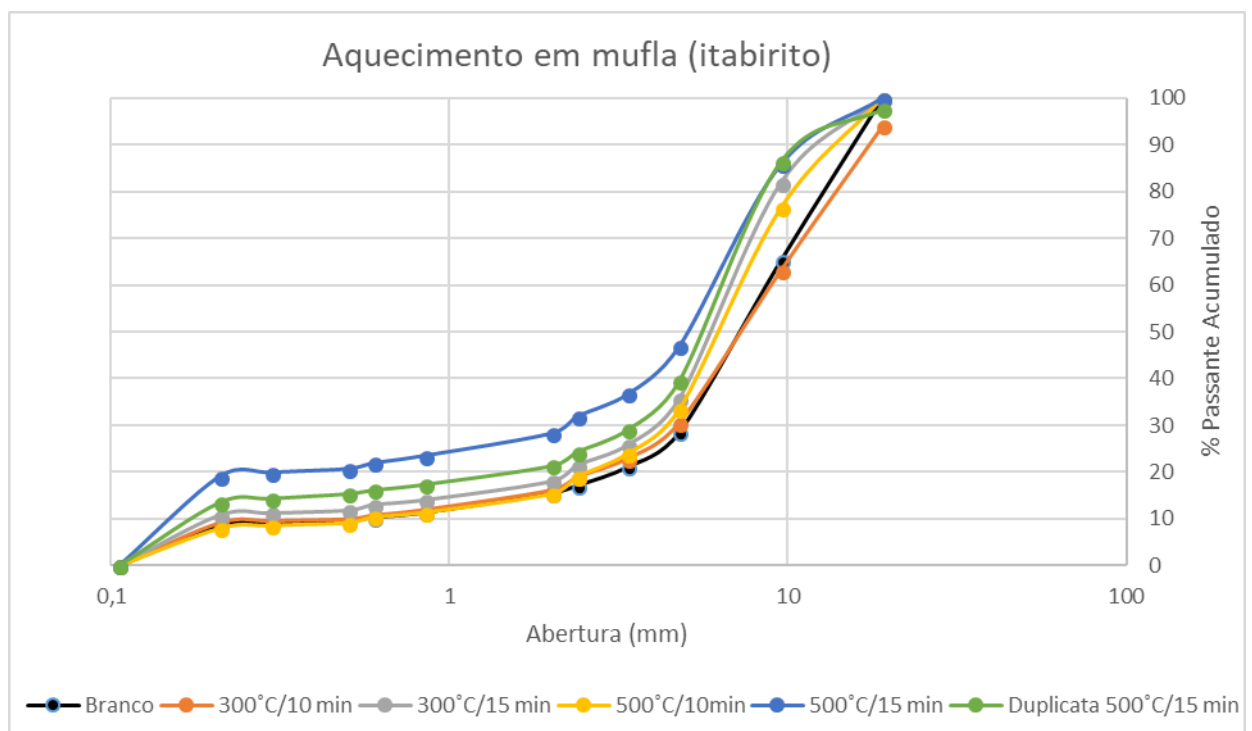
**Tabela 4. 3** - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento em mufla.

Com os resultados apresentados na Tabela 4.3, foi possível observar como o aquecimento e o tempo influenciaram na relação de redução de cada etapa. No presente teste foi empregado apenas a metodologia de aquecimento utilizando a mufla. Para a condição de aquecimento em 300°C durante 10 minutos, o itabirito, obteve uma relação de redução de 2,37, quando aumentado o tempo para 15 minutos, houve um aumento significativo na relação de redução chegando a 3,74. O mesmo foi observado utilizando o granito gnaisse, nas mesmas condições, a relação de redução foi de 1,30 para 2,09. Um tempo maior de exposição ao calor pode ter contribuído para um aumento da absorção de energia, na forma de calor, para que ocorresse a formação de novas trincas no minério e também a ampliação geométrica das já existentes. Em contrapartida, para ambos os minérios, o mesmo não ocorreu na etapa de aquecimento a 500°C durante 10 minutos, e 15 minutos de exposição. Era esperado que com o aumento da temperatura e também do tempo, houvesse um aumento ainda mais significativo na relação de redução. Portanto não ficou claro haver

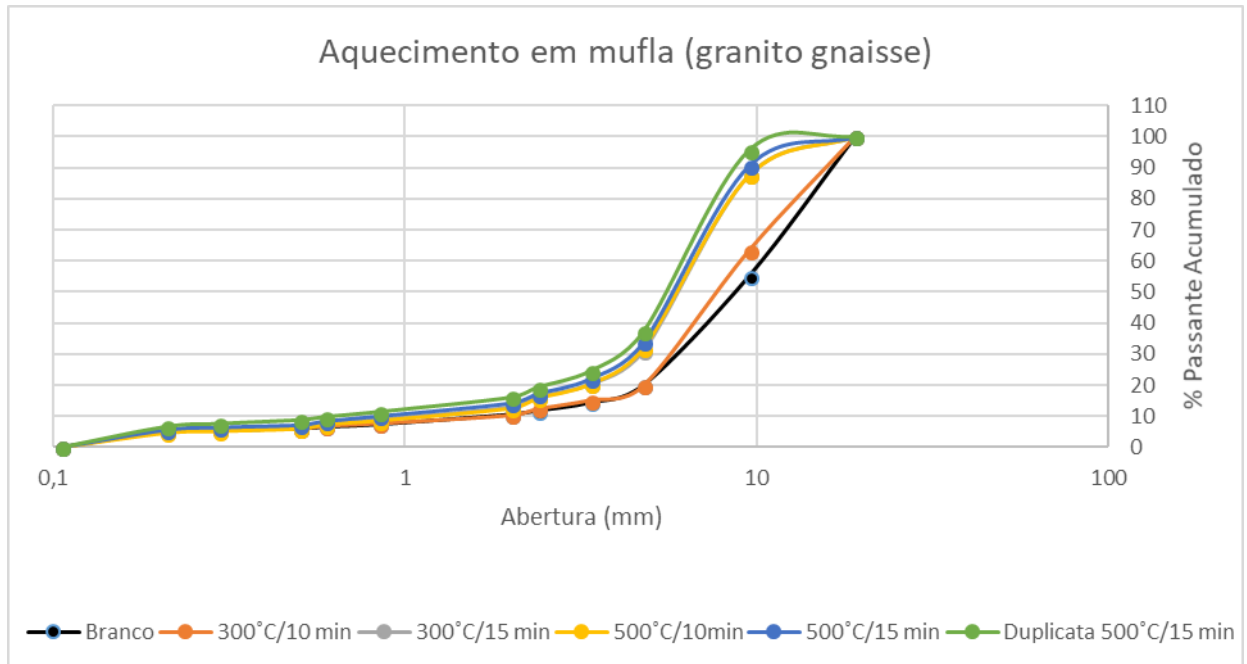
uma relação de proporcionalidade entre o aumento da temperatura com o aumento da relação de redução, e essa observação foi confirmada para a duplicata.

Segundo Shackelford (2008), a expansão térmica é resultado direto do distanciamento dos átomos em resposta a vibração térmica, causada pela transferência de energia entre os átomos em diferentes temperaturas, e a capacidade de absorver energia está relacionada a composição química do material, a massa e a sua estrutura cristalina. Portanto, o comportamento do granito gnaisse na temperatura de 500°C, para os dois tempos de exposição, é justificado pela competência do mesmo, por ser um minério que se forma em altas temperaturas e resfriado lentamente, logo, ocorre uma melhor organização dos átomos de sua estrutura cristalina e maior estabilidade química que é uma das causas da menor necessidade de absorver energia para sua estabilização química e estrutural, sendo assim, sofre poucas mudanças com o aquecimento.

Pelas Figuras 4.1 e 4.2 é possível observar a distribuição granulométrica do produto da britagem para o itabirito e para o granito gnaisse, respectivamente.



**Figura 4. 1** – Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecidas em mufla.



**Figura 4. 2** - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do granito gnaisse para aquecimento em mufla.

Analisando os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, já é possível observar com clareza que o itabirito e granito gnaisse tiveram uma variação significativa entre a curva granulométrica do teste na ausência de aquecimento e choque térmico em relação aos demais testes submetidos ao aquecimento. Através dos gráficos é possível observar uma tendência da maior parte da massa das amostras se concentrarem entre as peneiras de 3/8" (9,51 mm) e 6# (3,36 mm) para as amostras submetidas ao aquecimento, em quanto que a massa do teste na ausência de aquecimento e choque térmico encontra-se em maior quantidade concentrada entre as peneiras de 3/8" (9,51 mm) e 4# (4,76 mm). Portanto, com as representações dos gráficos, é seguro afirmar que o aquecimento também é capaz de gerar um produto com uma distribuição granulométrica mais ampla das partículas.

#### 4.4 Análise do produto da britagem após o aquecimento em micro-ondas

A Tabela 4.4 apresenta os valores de  $A_{80}$ ,  $P_{80}$  e relação de redução dos ensaios realizados com aquecimento em micro-ondas.

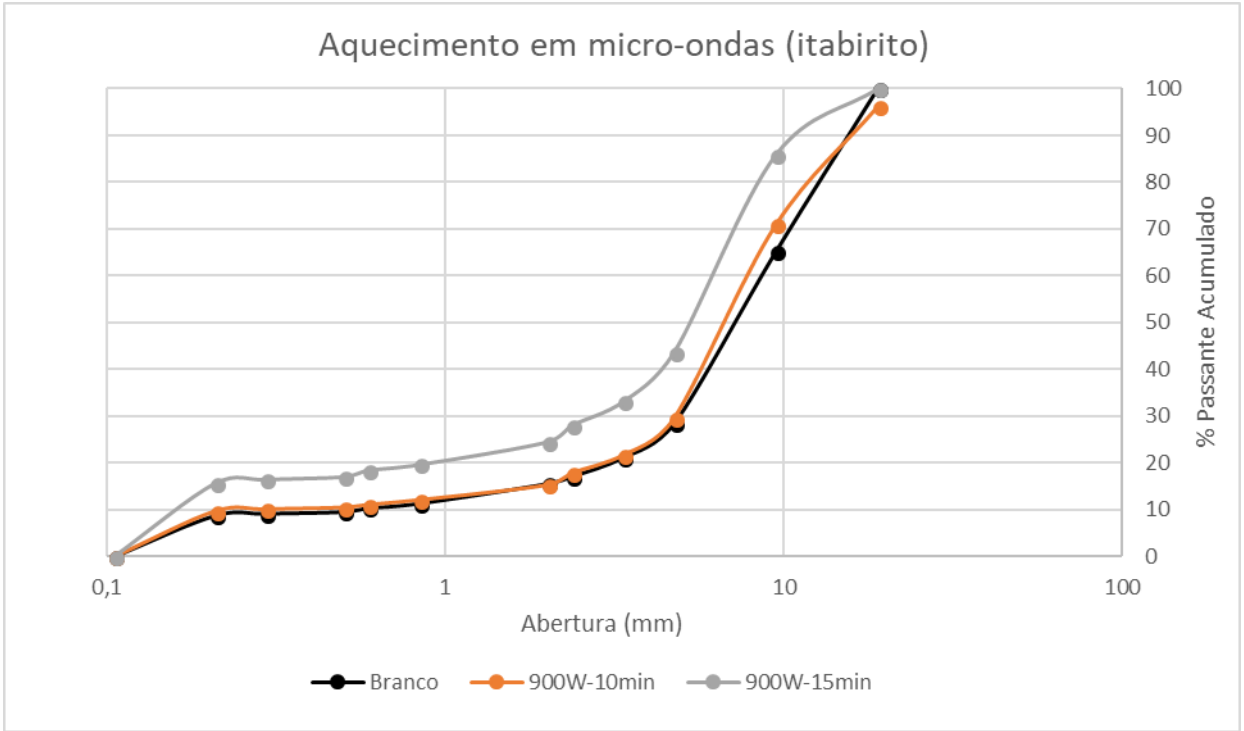


| Condição Analisada                                    | Itabirito            |                      |             | Granito gnaisse      |                      |             |
|---|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|
|   | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          |
| <b>Branco</b>   | 49663,8              | 24400,7              | <b>2,04</b> | 34565,0              | 28754,5              | <b>1,20</b> |
| <b>Aquecimento micro-ondas 900W/10min</b>             | 72806,1              | 24877,9              | <b>2,93</b> | 34565,0              | 21306,2              | <b>1,62</b> |
| <b>(Duplicata) Aquecimento micro-ondas 900W/10min</b> | -                    | -                    | -           | 34565,0              | 21402,9              | <b>1,61</b> |
| <b>Aquecimento micro-ondas 900W/15min</b>             | 55769,0              | 16822,7              | <b>3,32</b> | -                    | -                    | -           |
| <b>(Duplicata) Aquecimento micro-ondas 900W/15min</b> | 47794,7              | 25086,0              | <b>1,91</b> | -                    | -                    | -           |

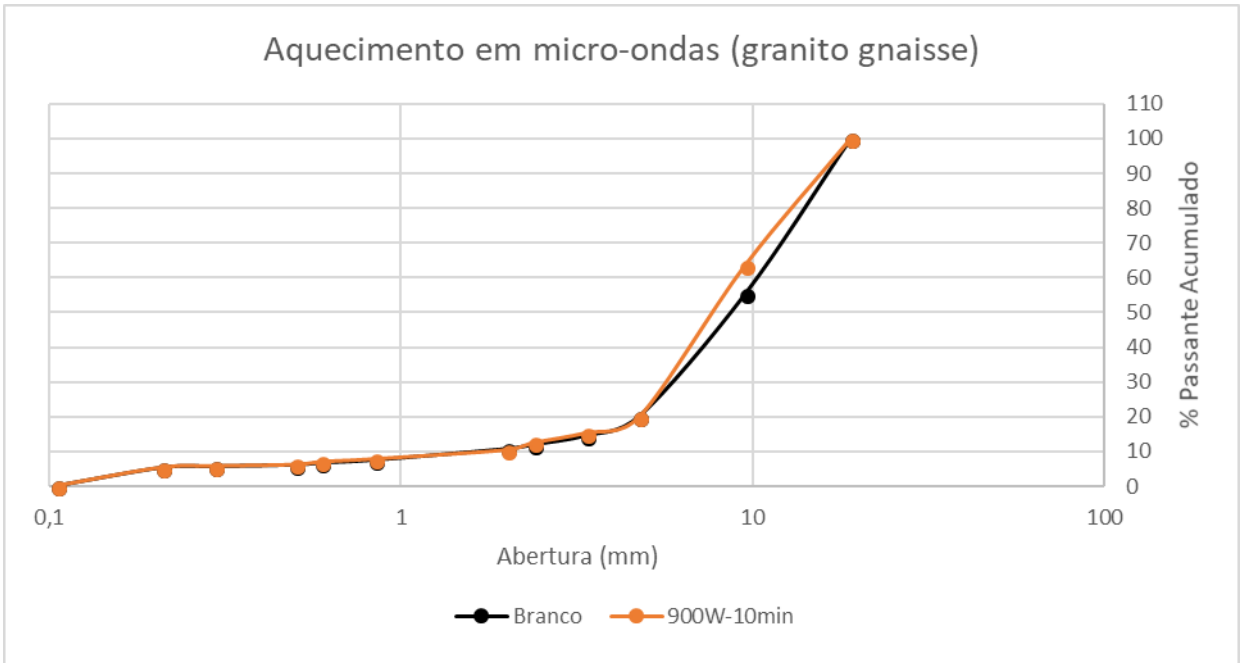
**Tabela 4. 4** - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento em micro-ondas.

Com os resultados apresentados na Tabela 4.4 também é observado o mesmo comportamento das partículas na fragmentação em relação ao aquecimento em mufla, ou seja, a metodologia de aquecimento em micro-ondas também é capaz de facilitar a fragmentação e ainda obter bons resultados para a relação de redução. Quando a amostra de itabirito ficou por um tempo de 15 minutos expostas ao aquecimento em micro-ondas, foi obtido um valor da relação de redução de 3,32, esse valor é muito próximo ao valor obtido na metodologia de aquecimento em mufla a 500 °C, utilizando o mesmo tempo, que obteve o valor de 3,34. Foi obtido um valor de relação de redução de 1,91 quando realizado a duplicata do teste submetido ao aquecimento micro-ondas com a potência de 900W por um tempo de 15 minutos. Infelizmente não foi possível realizar a triplicata, por falta de amostras, para comprovar qual dos dois valores está mais próximo do real.

As Figuras 4.3 e 4.4 trazem a distribuição granulométrica do produto da britagem para o itabirito e para o granito gnaisse, respectivamente.



**Figura 4. 3** - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecidas em micro-ondas.



**Figura 4. 4** - Curvas granulométricas das amostras do produto do granito gnaisse para aquecidas em micro-ondas.

Pelas Figuras 4.3 e 4.4 pode ser observado que as curvas das amostras de granito gnaisse e itabirito aquecidas em micro-ondas durante 10 minutos representam uma pequena mudança na distribuição granulométrica dos produtos. Essa mudança na distribuição granulométrica fica ainda mais evidente na amostra de itabirito que foi aquecida por um tempo maior, 15 minutos, demonstrando o efeito positivo do aquecimento prévio em micro-ondas no produto da britagem. Nesta situação, podemos observar uma ampla distribuição granulométrica entre todas as peneiras.

#### **4.5 Análise do produto da britagem após o aquecimento e choque térmico**

A Tabela 4.5 apresenta os valores de A80, P80 e relação de redução dos ensaios realizados com aquecimento seguido de choque térmico.

| Condição Analisada  | Itabirito            |                      |             | Granito gnaisse      |                      |             |
|---|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|
|   | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          | A <sub>80</sub> (μm) | P <sub>80</sub> (μm) | RR          |
| <b>Branco</b>   | 49663,8              | 24400,7              | <b>2,04</b> | 34565,0              | 28754,5              | <b>1,20</b> |
| <b>Aquecimento mufla 300 °C /10min seguido de choque térmico</b>                | 79657,7              | 29175,6              | <b>2,73</b> | 34565,0              | 21306,2              | <b>1,62</b> |
| <b>Aquecimento mufla 500 °C /15min seguido de choque térmico</b>                | 53436,1              | 13992,3              | <b>3,82</b> | -                    | -                    | -           |
| <b>Aquecimento micro-ondas 900W/10min seguido de choque térmico</b>             | 59518,9              | 24190,5              | <b>2,46</b> | 34565,0              | 26083,1              | <b>1,33</b> |
| <b>Aquecimento micro-ondas 900W/15min seguido de choque térmico</b>             | 80595,8              | 17070                | <b>4,72</b> | -                    | -                    | -           |
| <b>Aquecimento mufla 300 °C /10min seguido de choque térmico</b>                | -                    | -                    | -           | 34565,0              | 20574,3              | <b>1,69</b> |
| <b>(Duplicata) Aquecimento mufla 500 °C /15min seguido de choque térmico</b>    | 60763,0              | 22429,3              | <b>2,71</b> | -                    | -                    | -           |
| <b>(Duplicata) Aquecimento micro-ondas 900W/10min seguido de choque térmico</b> | -                    | -                    | -           | 34565,0              | 21969,3              | <b>1,57</b> |
| <b>(Duplicata) Aquecimento micro-ondas 900W/15min seguido de choque térmico</b> | 78711,4              | 15264,5              | <b>5,16</b> | -                    | -                    | -           |

Tabela 4. 5 - Resultados da relação de redução do itabirito e granito gnaisse após o aquecimento seguido de choque térmico.

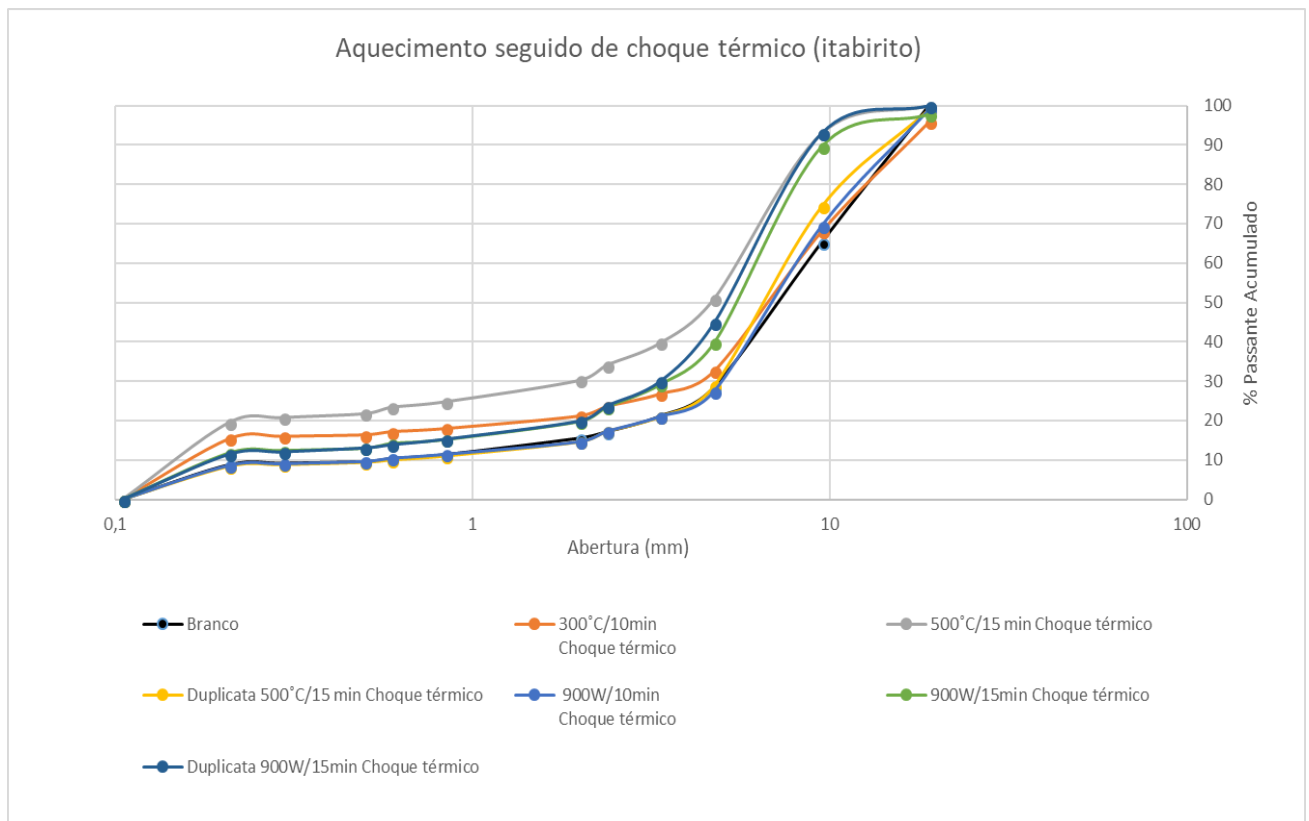
Como observado na Tabela 4.5, fica evidente a influência positiva do choque térmico na fragmentação de ambos os minérios, quando comparada com o valor da relação de redução do material sem aquecimento e choque térmico, que é de 2,04 para o itabirito e 1,20 para o granito gnaisse. Houve diferenças significativas nos valores da relação de redução para o itabirito, apresentando valores de relação de redução superiores para todos os testes submetidos ao aquecimento seguidos ou não de choque térmico (Tabela 4.3 a 4.5), quando comparados como valor obtido no teste branco. Para o granito gnaisse também houve alteração na relação de redução, isto é, todos os valores de relação de redução das amostras aquecidas que foram submetidas ou não ao choque térmico apresentaram valores superiores ao da amostra sem aquecimento e choque térmico. No geral, pouca alteração da relação de redução do granito gnaisse em relação aos valores obtidos para o itabirito. Isso já era esperado, pois, materiais diferentes absorvem energia de forma diferente. O granito gnaisse, como demonstrado na Tabela 4.2 da análise química realizada, é rico em  $\text{SiO}_2$ , que por sua vez, é a base da composição do quartzo presente no granito gnaisse. Segundo Souza (2014), o quartzo possui algumas características interessantes que devem ser consideradas como: ele possui uma estrutura cristalina organizada, estabilidade química e resistência a altas temperaturas. Por isto, o quartzo não necessita absorver mais energia, através do aquecimento, para se tornar estável, dessa forma, era esperado que a temperatura e o tempo utilizados no aquecimento não seriam suficientes para causar grandes mudanças nesta etapa de testes da fragmentação deste minério.

É interessante observar que as amostras de itabirito quando submetidas a metodologia com o choque térmico apresentou valores da relação de redução superiores aos valores dos testes onde só ocorreram o aquecimento. No aquecimento em mufla à  $500^\circ\text{C}$  por 15 minutos seguido de choque térmico, apresentou um valor para a relação de redução de 3,82, enquanto que nas mesmas condições, mas sem o choque térmico o valor da relação de redução era de 3,34. Já no aquecimento em micro-ondas por 15 minutos e seguido de choque térmico, apresentou um valor de 4,72, comparando o a mesma metodologia, porém sem o choque térmico, o valor foi de 3,32, ou seja, foi ainda mais expressivo.

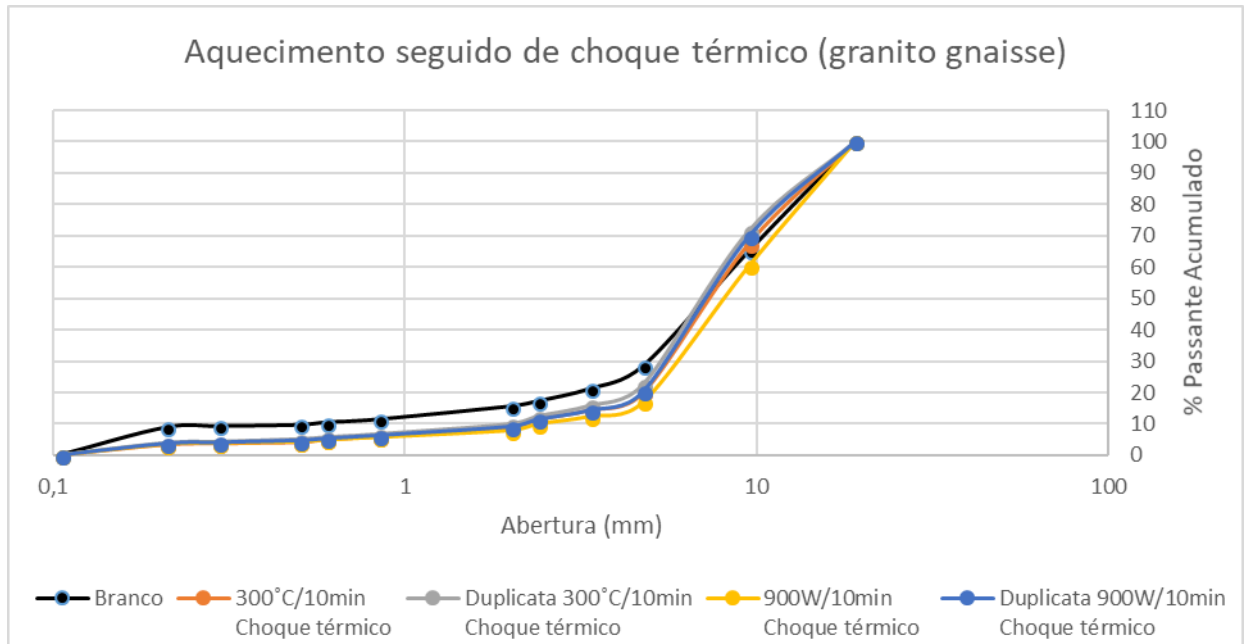
Quando avaliado o comportamento de ambos os minérios na britagem, após o aquecimento e também ao choque térmico, foi observado que as partículas minerais

eram fragmentadas sem nenhum problema, porém, as partículas quando não aquecidas e/ou submetidas ao choque térmico, algumas delas travaram o britador a ponto de parar a operação.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a distribuição granulométrica do produto da britagem para o itabirito e para o granito gnaisse, respectivamente.



**Figura 4. 5 -** Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do itabirito para aquecimento seguido do choque térmico.



**Figura 4. 6** - Curvas granulométricas das amostras do produto da britagem do granito gnaissé para aquecimento seguido de choque térmico.

Observando os gráficos da curva granulométrica apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, também fica evidente a influência do aquecimento e do choque térmico na fragmentação de partículas minerais. Nos testes realizados para o granito gnaissé, foi observado uma variação discreta da curva granulométrica do teste na ausência de aquecimento/choque térmico para as demais curvas dos outros testes que foram submetidos ao aquecimento e choque térmico. Já para o itabirito, mais uma vez fica evidente uma melhora na distribuição granulométrica causada pelas metodologias de aquecimento/choque térmico no qual as amostras foram submetidas.

## 5 CONCLUSÃO

Com a caracterização foi possível constatar que o granito gnaissé possui uma grande quantidade de  $\text{SiO}_2$  em sua composição, enquanto que o itabirito possui o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como o mais abundante em sua composição seguido de  $\text{SiO}_2$ . A diferença de densidade entre os dois minérios pode ter influência direta com a quantidade de metais presentes na composição de cada um.

De forma geral, ficou comprovado que aquecer as amostras trouxe resultados positivos na operação de fragmentação de partículas minerais, ou seja, facilitou a fragmentação e proporcionou uma melhor distribuição granulométrica do produto. Também ficou evidente que o emprego do choque térmico nas amostras aquecidas aumentou ainda mais a eficiência da fragmentação das partículas minerais. Vale ressaltar que o aumento da temperatura e/ou o tempo de exposição dos minérios, itabirito e granito gnaissé, ao calor, influenciaram diretamente no aumento dos valores da relação de redução, porém, aparentemente, este aumento não foi proporcional ao aumento da temperatura em nenhuma das metodologias usadas.

As metodologias que apresentaram os melhores resultados na fragmentação das amostras de itabirito e granito gnaissé foram: a amostra aquecimento na mufla a  $300^\circ\text{C}$  durante 15 minutos, aquecimento em micro-ondas durante 15 minutos seguido de choque térmico e aquecimento na mufla a  $500^\circ\text{C}$  por 15 minutos seguido de choque térmico. Portanto, estas amostras foram as mais promissoras e devem ser adaptadas para a utilização em escala industrial, que na prática, poderá ser uma boa otimização de plantas de beneficiamentos já existentes. Desta forma poderá obter uma melhor fragmentação do minério de interesse e uma melhor distribuição granulométrica do mesmo. Se com essas metodologias foi possível facilitar a fragmentação de partículas minerais, também é pertinente acreditar que com elas pode-se diminuir gastos com energia utilizada pelos equipamentos envolvidos nas operações de cominuição, bem como a redução dos desgastes dos revestimentos do equipamento.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUNHA, M. L. Estudo da secagem do café cereja descascado pelo processo a ar quente assistido por micro-ondas. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1996. 74p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Alimentos).

ENGELDER, D.S; BUFFLER, C.R. Measuring Dielectric Properties of Food Products at Microwave Frequencies. *Microwave World* 12(4): 15-23, 1991.

FERREIRA, A. B. de H. Dicionário Aurélio Século XXI. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 2000.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B.; LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C.A. Tratamento de minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2010. Capítulo 4, páginas 143-210.

GRIFFITH, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, vol. 221 (1921), 163-198.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. Introdução ao Tratamento de Minério. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5º Edição. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010. Capítulo 1, páginas 3-18.

MAZZINGHY, D. B. Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2009. 128p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Minas).

METSO. Manual de Britagem Metso. 6ª Edição. 2005. 501p.

OLIVEIRA, M.S; SOUZA, M.D. Apostila de tratamento de minérios. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá. 2017. Apostila.

ROSA, G. M; LUZ, J. A. M. da. Cominuição a seco de mesclas de quartzo e dolomita. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 64(1), p.097-104, Janeiro-Março. 2011.

SHACKELFORD, J. F. Ciência dos Materiais; Introdução a Ciência dos Materiais para Engenheiros; Produção térmica de defeitos pontuais. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 546p.

SOUZA, M. T. et al. Caracterização de areias de quartzo do estado de Mato Grosso do Sul para aplicações industriais. *Cerâmica* [online]. 2014, vol.60, n.356, pp.569-574. ISSN 0366-6913.

TAVARES, L.M.M., Apostila Processamento de Recursos Minerais I, 2009.

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

XAVIER, M. S. de C. Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 70p. (Monografia).

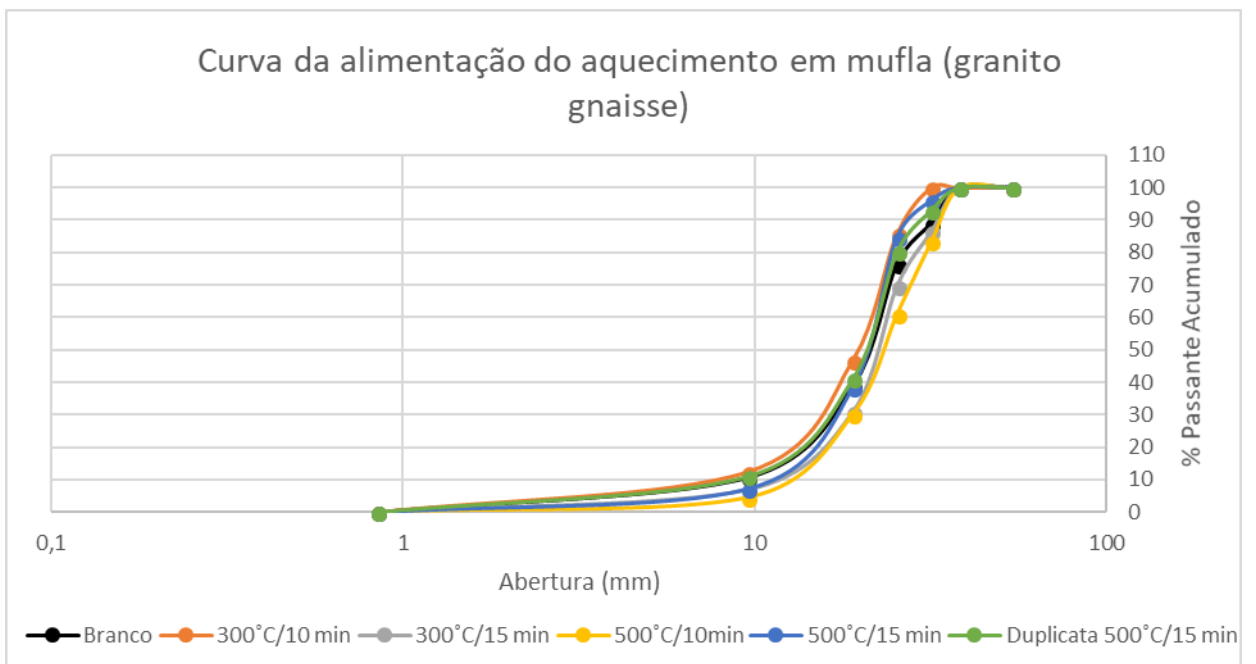
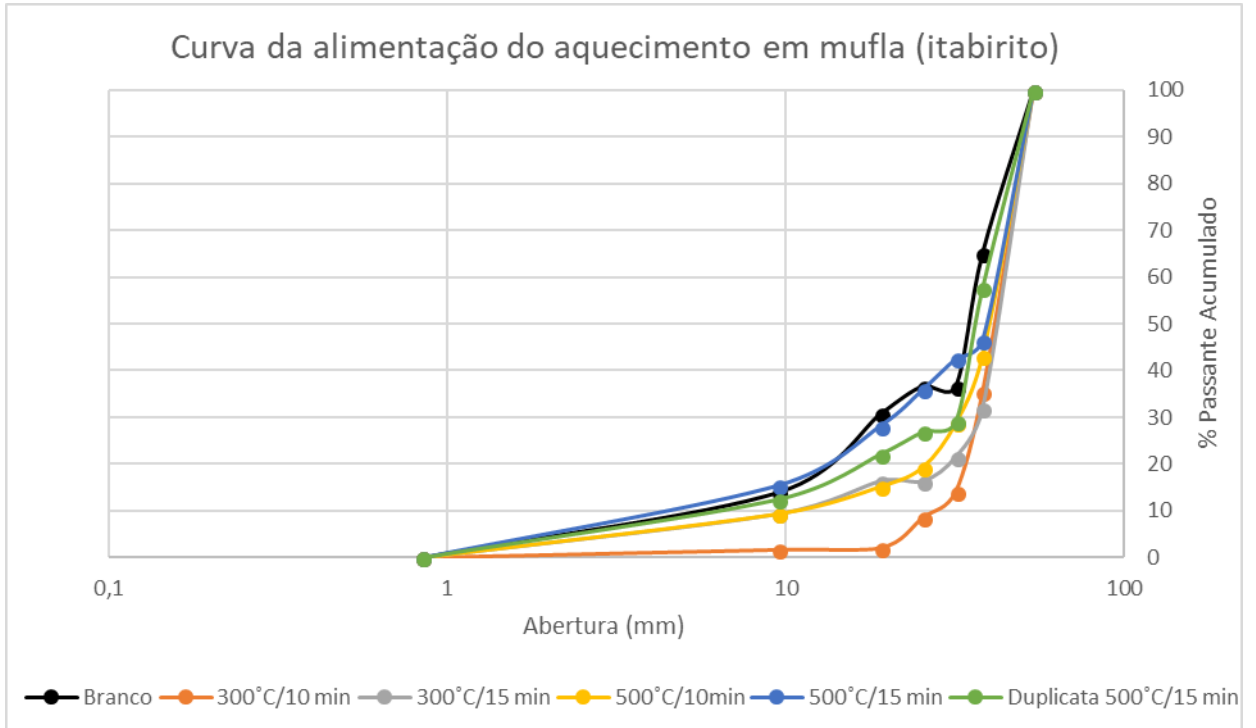
YASNÓ, J. P. G. Síntese por Redução Carbotérmica Assistida por Micro-ondas de Carbetos de Zircônio. São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, 2013. 75p. (Dissertação, Mestrado, Ciência e Engenharia de Materiais).

**APÊNDICE A** - Dados dos cálculos de GGS e RRB para o granito gnaisse e itabirito.

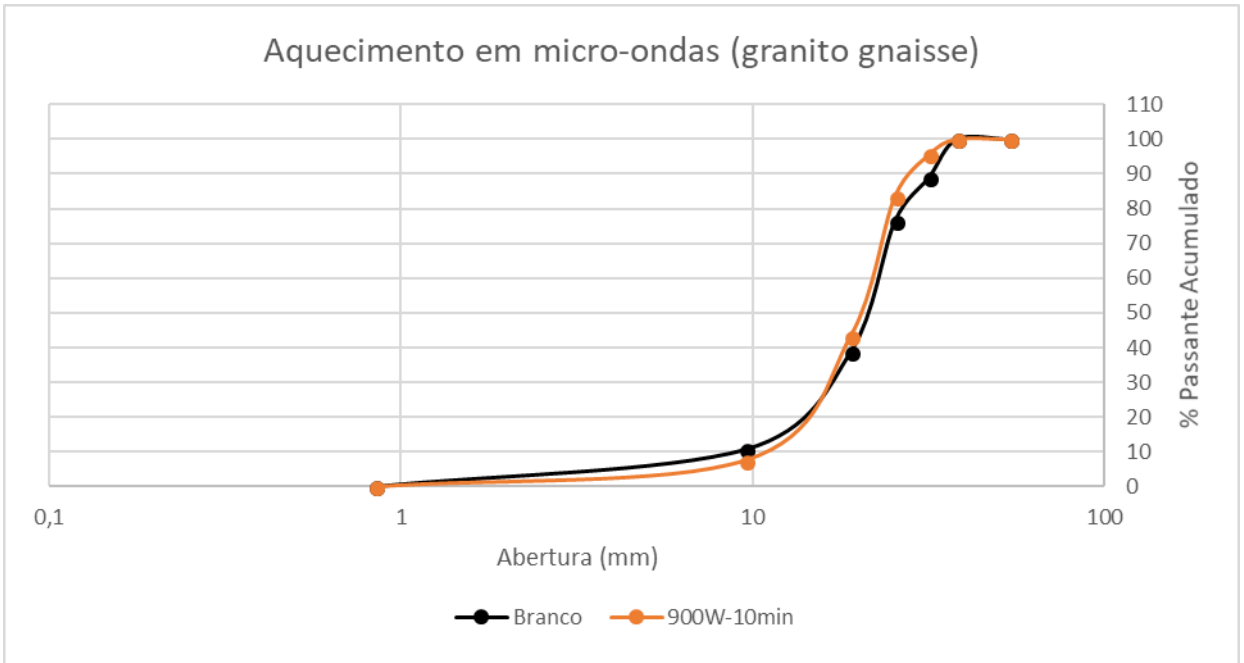
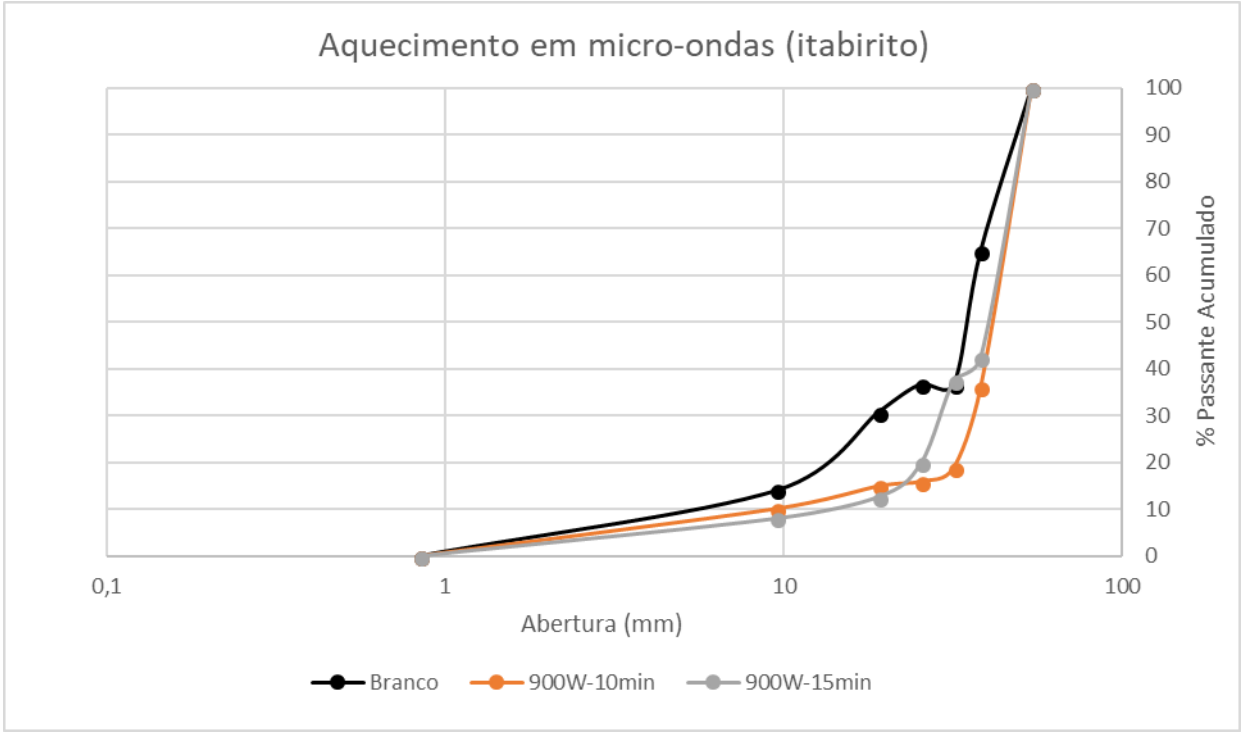
| Amostras  | Granito Gnaisse               |                           |                               |                           |
|---|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|   | GGS                           |                           | RRB                           |                           |
|   | R <sup>2</sup><br>alimentação | R <sup>2</sup><br>produto | R <sup>2</sup><br>alimentação | R <sup>2</sup><br>produto |
| <b>Padrão</b>   | 0,8927                        | 0,8960                    | 0,6460                        | 0,8903                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla<br/>300°C/10min</b>                        | 0,8554                        | 0,8919                    | 0,6035                        | 0,8745                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla<br/>300°C/15min</b>                        | 0,9007                        | 0,9443                    | 0,7240                        | 0,8782                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla<br/>500°C/10min</b>                        | 0,8996                        | 0,9496                    | 0,7749                        | 0,8858                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla<br/>500°C/15min</b>                        | 0,8540                        | 0,9433                    | 0,5877                        | 0,8634                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla<br/>300°C/10min<br/>Choque<br/>térmico</b> | 0,9404                        | 0,9367                    | 0,8453                        | 0,9137                    |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/10min</b>                   | 0,8803                        | 0,9085                    | 0,6973                        | 0,8897                    |

| Amostras   | Itabirito                     |                           |                               |                           |
|--|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|  | GGS                           |                           | RRB                           |                           |
|  | R <sup>2</sup><br>alimentação | R <sup>2</sup><br>produto | R <sup>2</sup><br>alimentação | R <sup>2</sup><br>produto |
| <b>Padrão</b>  | 0,9458                        | 0,9006                    | 0,9163                        | 0,8845                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/10min</b>                             | 0,8838                        | 0,9189                    | 0,8827                        | 0,8582                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/15min</b>                             | 0,8026                        | 0,9046                    | 0,8445                        | 0,8449                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/10min</b>                             | 0,8999                        | 0,9284                    | 0,9263                        | 0,8878                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/15min</b>                             | 0,9423                        | 0,9066                    | 0,9959                        | 0,8129                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/10min<br/>Choque térmico</b>          | 0,7116                        | 0,8517                    | 0,7518                        | 0,7746                    |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/15min<br/>Choque térmico</b>          | 0,9603                        | 0,9182                    | 0,9804                        | 0,7722                    |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/10min</b>                    | 0,7611                        | 0,8816                    | 0,7927                        | 0,8172                    |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/15min</b>                    | 0,9279                        | 0,9091                    | 0,9385                        | 0,8233                    |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/10min<br/>Choque térmico</b> | 0,9087                        | 0,8935                    | 0,9563                        | 0,8066                    |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/15min<br/>Choque térmico</b> | 0,7314                        | 0,9091                    | 0,7723                        | 0,8410                    |

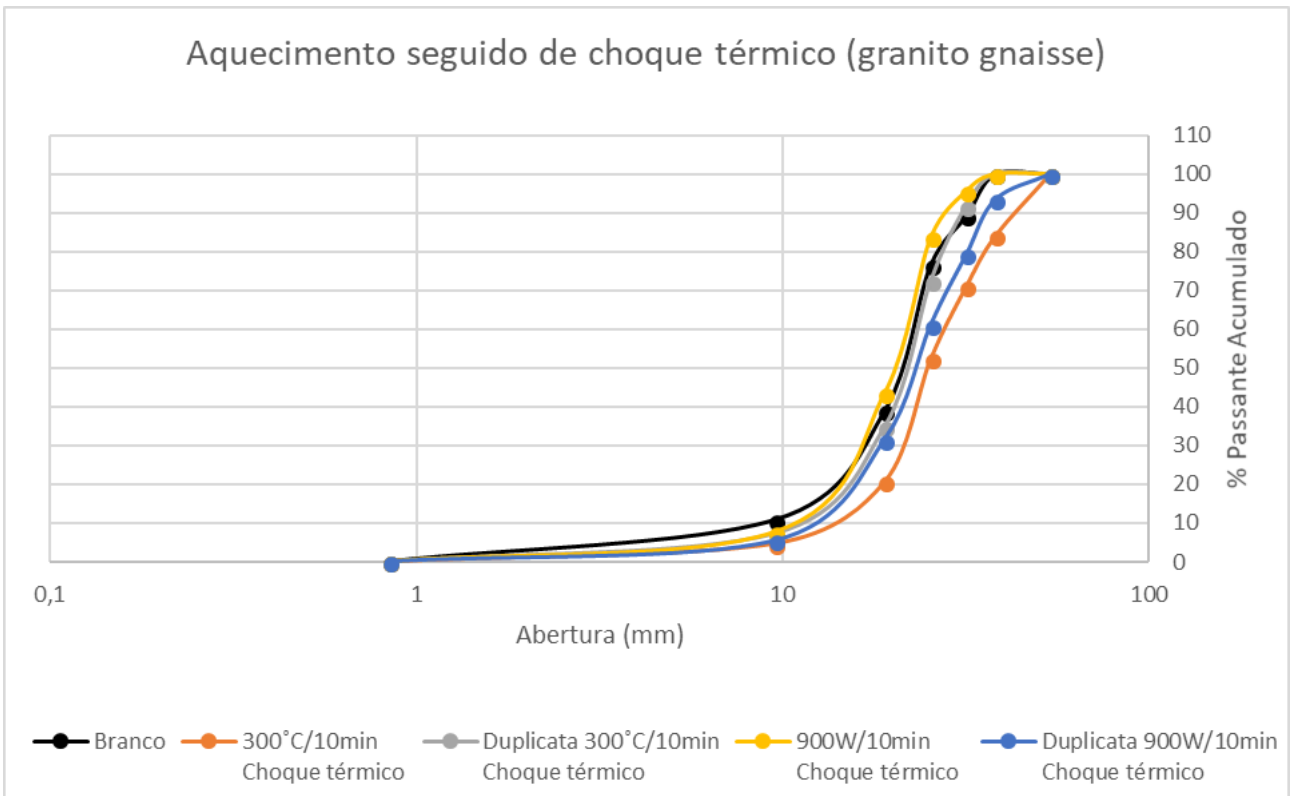
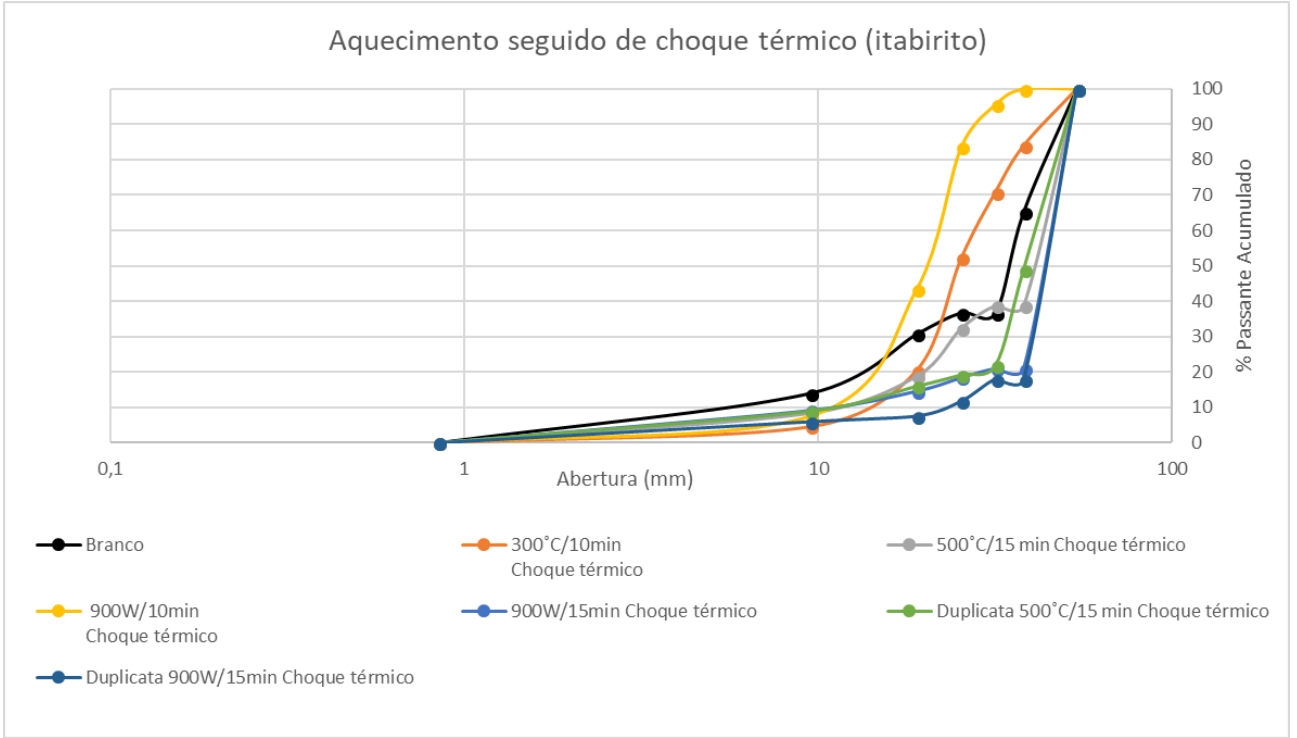
**APÊNDICE B** – Gráficos da alimentação das amostras submetidas ao aquecimento em mufla do granito gnaiss e itabirito.



**APÊNDICE C – Gráficos da alimentação das amostras submetidas ao aquecimento em micro-ondas do granito gnaisse e itabirito.**



**APÊNDICE D – Gráficos da alimentação das amostras submetidas ao choque térmico do granito gnaiss e itabirito.**



**APÊNDICE E - Massas utilizadas em cada teste.**

| <b>Massa da alimentação dos testes (g)</b>                           |                         |                        |                   |                        |
|--|-------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Amostras</b>  | <b>Primeiros testes</b> |                        | <b>Duplicatas</b> |                        |
|  | <b>Itabirito</b>        | <b>Granito gnaisse</b> | <b>Itabirito</b>  | <b>Granito gnaisse</b> |
| <b>Padrão</b>  | 1002                    | 1006                   | X                 | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/10min</b>                             | 1002                    | 1002                   | X                 | 1000                   |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/15min</b>                             | 1000                    | 1002                   | X                 | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/10min</b>                             | 1002                    | 1004                   | X                 | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/15min</b>                             | 1006                    | 1000                   | 1004              | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 300°C/10min<br/>Choque térmico</b>          | 1006                    | 1004                   | X                 | 1000                   |
| <b>Aquecimento<br/>Mufla 500°C/15min<br/>Choque térmico</b>          | 1002                    | X                      | 1000              | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/10min</b>                    | 1008                    | 1000                   | 1000              | 1004                   |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/15min</b>                    | 1002                    | X                      | X                 | X                      |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/10min<br/>Choque térmico</b> | 1002                    | 1000                   | X                 | 1002                   |
| <b>Aquecimento<br/>Micro-ondas<br/>900W/15min<br/>Choque térmico</b> | 1000                    | X                      | 1000              | X                      |