



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS - Unidade João Monlevade



REVISTA ENGENHARIA DE INTERESSE SOCIAL

Ano 2, Nº 2 - 2017

ISSN 2525-6041

UNIDADE
JOÃO MONLEVADE



UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



Pró-Reitoria de Extensão

2017



Equipe

- Contatos
 - Endereço Postal:
Unidade João Monlevade
Av. Brasília, 1304 - Bairro Baú
João Monlevade (MG) - Brasil
CEP: 35930-314
 - Contato Principal:
Robson Lima
Telefones: +55 31 3859-3201/3202
E-mail: robson.lima@uemg.br
 - Contato para Suporte Técnico:
Railton Barros
Telefone: +55 31 999380805
E-mail: revistafaenge2015@gmail.com

Equipe Editorial

- Editor Chefe
 - Robson Pereira de Lima,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG),
João Monlevade, MG, Brasil
- Editores Científicos
 - Gleícia Miranda Paulino,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil
 - Priscila Caroline Albuquerque da Silva,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil

- Coordenação Editorial
 - Maíke da Silva,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil
- Revisão de textos
 - Erivelton Brás,
Jornal A Notícia
João Monlevade, MG, Brasil
 - Shirlei Luana Chaves e Souza Pereira,
Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira (FUNCESI)
João Monlevade, MG, Brasil
- Editoração de textos
 - Railton Barros Fonseca,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil
 - Manuella dos Anjos Andrade,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil
- Assistentes de Editoração
 - Marco Antônio Guimarães dos Santos,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil
 - Aline da Luz Pascoal,
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)
João Monlevade, MG, Brasil

Conselho Editorial

- **Andreia Ribeiro Ayres**
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO
- **Arminda Eugenia Marques Campos**
Universidade Estadual Paulista – UNESP
- **Luis Henrique Abegão**
Universidade Federal Fluminense – UFF
- **Maurício César Delamaro**
Universidade Estadual Paulista – UNESP
- **Diogo Luna Moureira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Angel Rafael Arce Chilque**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Ivan Bursztyn**
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
- **Marcus Alvarenga Soares**
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM

Comitê Avaliadores

- **Adrielle Prisca de Magalhães**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Agostinho Ferreira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Alan Rodrigues Teixeira Machado**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Armando José Massucatto**
Avaliador ad hoc
- **Cassiano Souza Rosa**
Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM
- **Cecilia Silva Monnerat**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Daniele Cristina Gonçalves**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Denise Eliane Euzébio Pinto**
Avaliador ad hoc
- **Evaneide Nascimento Lima**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Fabiana de Ávila Modesto**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Fernanda da Fonseca Diniz**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Fernanda Tátia Cruz**
Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG

- **Fernando Neves Lima**
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
- **Gabriela Wakin Lucarelli**
Avaliador ad hoc
- **Geisla Teles Vieira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Geraldo Magela da Silva**
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
- **Gleicia Miranda Paulino**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Glelson Pereira Marques**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Graziela Fátima Pereira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Hygor Aristides Victor Rossoni**
Universidade Federal de Viçosa - UFV
- **Júnia Soares Alexandrino**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Juscelina Rosiane Ferreira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Jussara Aparecida de Oliveira Cotta**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Kelly Cristina Ferreira**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Ladir Antônio da Silva Junior**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG

- **Laura Cota Carvalho**
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
- **Luciano José Pontes de Souza**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Lucília A. Linhares Machado**
Universidade Federal de Ouro Preto- UFOP
- **Marcelo Silva Pinto**
Universidade Federal de Minas Gerais - UFM
- **Marcus Alvarenga Soares**
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
- **Marielle Hoalle Moreira Benevides Lage**
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET
- **Priscila Caroline Albuquerque da Silva**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Rafael Vital Januzzi**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Rieder de Oliveira Neto**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Rita de Cassia Monteiro Afonso**
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
- **Rita Elena Melian**
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
- **Rosenilson Pinto**
Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG
- **Savio Figueira Corrêa**
Universidade Federal de Ouro Preto- UFOP

- **Shisley Ramos Barcelos**

Colégio Universitário Padre de Man

- **Teresa Aparecida Soares de Freitas**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB

Editorial

O segundo número da **Revista Engenharia de Interesse Social** confirma que o Carvalho-roble vingou e que mais um passo foi dado na configuração desse importante veículo de difusão do conhecimento de interesse social capitaneado pelas Engenharias.

Dessa maneira, um tema importante para os estudiosos do campo da Metalurgia é apresentado como o primeiro texto: **Avaliação da resistência à corrosão no Aço SAE 1045 devido aos tratamentos térmicos** no qual é apresentada uma análise sobre corrosão e tratamento térmico do **Aço SAE 1045**.

No campo da Mineração, o beneficiamento do Minério de Ferro é examinado de maneira singular no texto **Estudo do processo de separação sólido-líquido por sedimentação no setor minero-metalúrgico** que trata dos Espessadores que são equipamentos que utilizam o método da sedimentação para auxiliar nesse processo de beneficiamento.

Dedicado a um dos maiores problemas ambientais, o texto **Recuperação de metais a partir de sucatas eletrônicas** trata de uma possibilidade de extração de Cobre de placas eletrônicas de computadores por meio de processos de pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia.

Voltado para o campo da Mineração, o texto **Uso do método de contenção tirante com resinas: estudo de caso da Mineração Turmalina Ltda** apresenta ao leitor uma experiência real com um dos métodos de suporte para manutenção das aberturas subterrâneas, o método suporte tirante com resinas.

Reconhecendo a importância do tratamento de gemas como forma de agregação de valor, o artigo **A irradiação com Cobalto-60 e o tratamento térmico no processo de beneficiamento do Quartzo Hialino**

apresenta um estudo da irradiação e do aquecimento em forno tipo mufla que foram medidos por análise dos espectros gerados pela Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com o uso da técnica de Transformada de Fourier.

Encerrando este número da REIS, o trabalho **Desenvolvimento de concreto enriquecido com fibras de aço** retoma a estreita relação das Engenharias com o Meio Ambiente. Esse texto trata de um estudo que aponta a viabilidade técnica de aproveitamento de fibras de aço extraídas de pneus descartados indevidamente para a composição de um concreto de maior resistência à compressão.

Tenham todos uma boa e crítica leitura!

Sumário

1. Avaliação da resistência à corrosão no aço SAE 1045 devido aos tratamentos térmicos
F. N. de J. Guedes; C. S. Monnerat;
reis004, p.1-9
2. Estudo do processo de separação sólido-líquido por sedimentação no setor minero-metalúrgico
K. S. Braz; L. F. Nunes; F. N. de J. Guedes
reis007, p.1-7
3. Recuperação de metais a partir de sucatas eletrônicas
T. A. Corsini; C. S. Monnerat; H. M. do Couto
reis009, p.1-9
4. Uso do método de contenção tirante com resinas: estudo de caso da Mineração Turmalina
M. A. S. de Freitas; R. P. de Lima
reis012, p.1-13
5. A irradiação com cobalto-60 e o tratamento térmico no processo de beneficiamento do quartzo hialino
B. L. A. de Oliveira; S. R. Barcelos; F. N. de J. Guedes
reis019, p.1-9
6. Desenvolvimento de concreto enriquecido com fibras de aço
I. A. G. Gomes; R. P. de Lima; M. da Silva
reis020, p.1-11

Avaliação da resistência à corrosão no aço SAE 1045 devido aos tratamentos térmicos

Corrosion resistance evaluation in SAE 1045 steel due to thermal treatments

F. N. de J. Guedes¹; C. S. Monnerat²

¹ Departamento de Ciências Exatas Aplicadas e dos Materiais, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

² Departamento de Química, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil.

¹fabriciajesus@gmail.com

Resumo

Como base para este trabalho, foi feito um estudo sobre corrosão e tratamento térmico, utilizando os melhores autores dessas áreas. Um estudo do efeito dos tratamentos térmicos na corrosão do aço SAE 1045 imerso em soluções ácidas e básicas durante um período de trinta dias foi realizado. Nas amostras foram realizados os tratamentos térmicos de normalização, recozimento, tempera e revenimento, utilizando soluções de H₂SO₄ e NaOH ambas com concentração de 2,5%, com o objetivo de obter diferentes taxas de corrosão. Os resultados nas amostras imersas em solução básica foram inconclusivos, enquanto para as amostras imersas em solução ácida mostram que não há variação na corrosão para os diferentes tratamentos térmicos.

Palavras-chave: Aço SAE 1045; Corrosão; Tratamento Térmico.

.....
As a basis for this work, a study on corrosion and heat treatment was done using the best authors of these areas. A study of the effect of heat treatments on SAE 1045 steel corrosion immersed in acidic and basic solutions for a period of thirty days was performed. All samples were performed standardization thermal treatment, annealing, quenching and tempering, using H₂SO₄ and NaOH solutions both with a concentration of 2,5% in order to obtain different corrosion rates. Results for samples immersed in the basic solution were inconclusive, while for the samples immersed in acid solution show no change in corrosion to various heat treatments.

Keywords: SAE 1045 steel; Corrosion; Heat Treatment.

1 INTRODUÇÃO

É conhecido que os tratamentos térmicos podem apresentar variabilidades em relação aos aspectos relacionados à dureza, fragilidade entre outras propriedades físicas do aço. Esses tratamentos são aplicados aos aços para obter propriedades físicas ideais para uso em construções civis, automóveis, peças mecânicas em geral.

As variações na composição química que os aços apresentam, podem proporcionar diferentes níveis de resistência, estando o preço do aço atrelado à liga que é responsável por essa modificação na resistência. Com isso, o preço de aços ligados, que são mais resistentes à corrosão, é muito alto e, em alguns casos, esses aços são usados em funções em que poderia ser utilizado algum aço mais barato e simples.

Com a crescente demanda por aços no mundo, é muito importante conhecer a resistência à corrosão do aço SAE 1045 visando ao interesse na aplicação desse aço, em novas áreas que exijam uma maior resistência à corrosão, e também uma determinada resistência mecânica, já que este aço é muito utilizado na construção civil, nas peças mecânicas e outros e está susceptível a ação corrosiva dos meios em que ele está exposto, fazendo com que sua vida útil diminua drasticamente devido à corrosão.

Desta forma, quantificar a diferença na resistência à corrosão no aço SAE 1045 com os diferentes tratamentos térmicos e avaliar o uso de aços mais baratos e simples como o aço SAE 1045 em novas aplicações mostra-se muito promissor.

Scheidemantel (2014) descreve que o valor máximo de dureza está associado ao teor de carbono (0,45%) do aço, na mesma faixa dos teores dos aços SAE 4340 e 4140 (0,39-0,42%). Essa dureza é associada à dureza da martensita, que depende apenas do teor de carbono. A ausência de elementos de liga nesse aço altera a transformação austenita – ferrita / perlita, diminuindo portanto a sua temperabilidade do aço.

Reed-Hill e Abbaschian (1994), conceitua tratamento térmico como uma operação ou conjunto de operações realizadas no estado sólido compreendendo o aquecimento, a permanência em determinadas temperaturas e o resfriamento, realizados com a finalidade de alterar as microestruturas e como consequência as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas dos metais e suas ligas.

Existem vários fatores que afetam os tratamentos térmicos, entre eles, ressalta-se a taxa de aquecimento que considera as velocidades de aquecimento, considerando que as taxas de aquecimento máximas dependem da condutividade térmica do aço, do tamanho e forma do componente. Outro fator relevante é o tempo de permanência na temperatura de tratamento que compreende a soma do tempo para a homogeneização da temperatura no componente e o tempo da transformação de fase. Já a Taxa de resfriamento é o fator mais importante do ciclo térmico, pois determina a microestrutura final obtida no tratamento térmico.

Para cada tipo de material, temos as taxas de resfriamento ideais para cada tratamento térmico, e desrespeitar essas taxas pode causar defeitos como a formação de trincas, a obtenção de características indesejadas, entre outros.

Para Chiaverini (2012), alguns parâmetros também devem ser considerados na análise da resistência do aço à corrosão. Podem ser citados: recozimento, normalização, tratamento de têmpera e revenimento, dentre outros.

O recozimento consiste em aquecer a peça em um forno a uma temperatura

acima do limite superior da zona crítica (A3), manter o tempo suficiente para que toda a estrutura transforme-se em austenita e resfriar lentamente (por exemplo, desligando o forno e mantendo a peça no interior durante o resfriamento do mesmo). O objetivo do recozimento é a eliminação de efeitos de tratamentos aplicados anteriormente, levando o aço a uma estrutura semelhante a que seria obtido em transformações em equilíbrio.

Chiaverini (2012) também faz outra consideração em relação à normalização, que consiste em aquecer a peça em um forno à uma temperatura acima do limite superior da zona crítica (A3), manter o tempo suficiente para que toda a estrutura transforme-se em austenita e resfriar ao ar (mais rapidamente que no caso do recozimento).

O tratamento de têmpera consiste em aquecer a peça em um forno a uma temperatura acima do limite superior da zona crítica (A3), manter o tempo suficiente para que toda a estrutura transforme-se em austenita e resfriar muito rapidamente (em água ou óleo, por exemplo) (SCHEIDEMANTEL, 2014).

O revenido consiste em aquecer a peça temperada a uma temperatura abaixo do limite inferior da zona crítica (A1) e mantê-la por certo tempo nessa temperatura. Como a martensita é uma fase metaestável supersaturada de carbono, o aquecimento aumenta a possibilidade de difusão de carbono para fora da estrutura provocando a decomposição parcial da martensita em ferrita deformada (com teor de carbono acima do limite) e agregados finos de carbonetos (Fe_3C).

A austêmpera já é um tratamento isotérmico que tem como objetivo obter uma estrutura bainítica uniforme e portanto resistência mecânica e dureza altas. Por fim, o último tipo de tratamento térmico, a martêmpera, consiste em aquecer o aço a uma temperatura acima do limite superior da zona crítica e manter até a completa austenitização, resfriar posteriormente até uma temperatura pouco acima da temperatura de início da formação de martensita (M_i), manter até que toda a peça atinja essa temperatura e resfriar rapidamente até a temperatura ambiente para que a austenita transforme-se em martensita.

Gentil (2011) define corrosão como a deterioração de um material, que pode ser por ação química ou eletroquímica do meio ambiente juntamente ou não com esforços mecânicos. A corrosão causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio onde está sendo empregado representa alterações prejudiciais e indesejáveis ao material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso.

Para Callister e Rethwisch (2012), a corrosão ocorre de diferentes formas para os três tipos de materiais sendo que nos metais tem-se uma perda de material que pode ser por incrustação, dissolução ou por um filme não metálico. Os cerâmicos o processo de deterioração do material acontece geralmente sob temperaturas elevadas ou em ambientes extremos, e também é chamado de corrosão. Já no caso dos polímeros, o termo usado é a degradação. Eles são dissolvidos quando expostos a um solvente líquido, podendo absorver o líquido e inchar, e também o calor pode alterar sua estrutura molecular juntamente com a radiação eletromagnética.

A corrosão pode ocorrer de várias formas e é muito importante seu estudo, pois o processo corrosivo varia, dependendo da morfologia, causas ou mecanismos, fatores mecânicos e meios corrosivos. As formas de corrosão podem ser classificadas como: uniforme, por placas, alveolar, por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, gráfitica, dezincificação, empolamento pelo hidrogênio, como mostrado na Figura 1.

Deve-se ressaltar a importância da natureza do meio corrosivo que se encontra

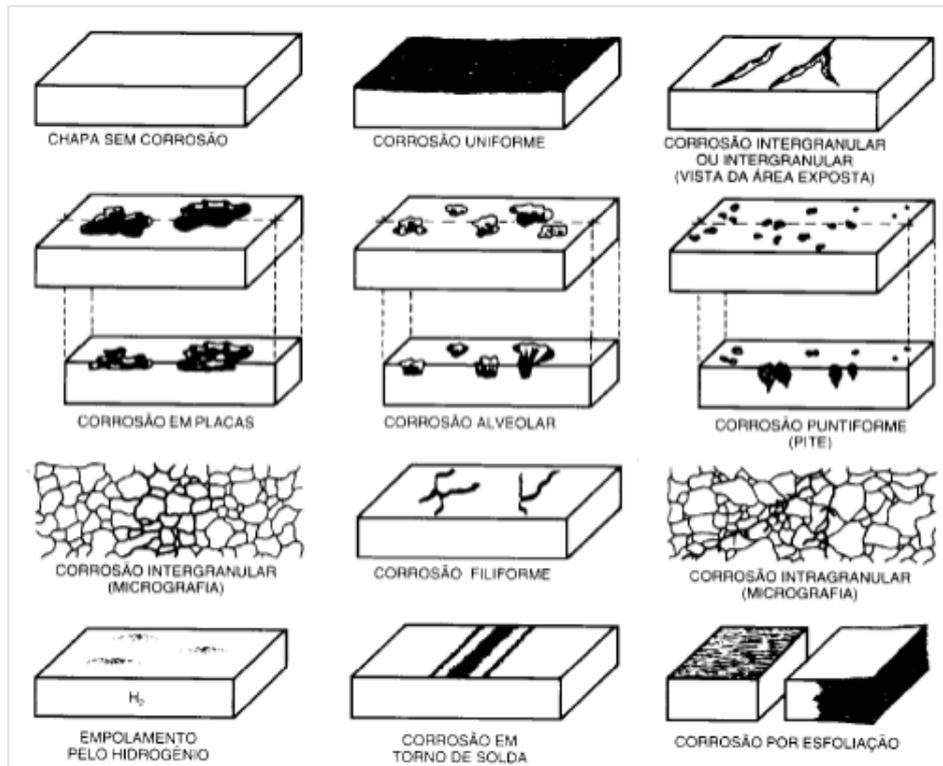
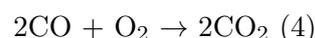
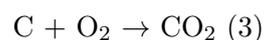
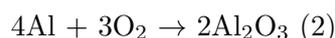
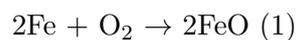


Figura 1 – *Classificação dos tipos de corrosão. Fonte: Gentil (2011).*

juntamente à superfície metálica. Assim por exemplo, no caso de trocadores ou permutadores de calor, a temperatura elevada do meio corrosivo na parte do contato imediato com a superfície metálica dos tubos. Os meios corrosivos mais frequentemente encontrados são: atmosfera; águas naturais; solo; produtos químicos; alimentos; substâncias fundidas; solventes orgânicos; madeira; plásticos.

De acordo com [Gentil \(2011\)](#) corrosão é definida por reações químicas e eletroquímicas em um processo espontâneo, no qual acontece a oxidação da superfície do metal. Quando o metal já está oxidado pode formar uma barreira entre o metal e o meio corrosivo diminuindo assim a velocidade da corrosão no metal.

A oxidação é caracterizada pela perda de elétrons de uma espécie química, processo sempre associado à redução, resultante do recebimento de elétrons de outra espécie química, conforme mostrado nas equações a seguir:



Na análise da corrosão, deve-se sempre levar em consideração as variáveis dependentes do material metálico, do meio corrosivo e das condições operacionais, pois para saber o material adequado a ser utilizado diversas variáveis precisam ser avaliadas, como:

tipo de material metálico, meio corrosivo, condições operacionais, dentre outros (GENTIL, 2011).

Os problemas de corrosão são comuns e ocorrem em vários tipos de atividades, como por exemplo, nas indústrias químicas, petrolíferas, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transporte aéreo, ferroviário, metroviário, marítimo, rodoviário e entre várias outras atividades.

Por apresentar-se como um fator relevante para os diferentes segmentos industriais, o estudo da corrosão faz-se muito necessário, visto que os custos com os desgastes ocorridos, gerando até mesmo a substituição dos materiais, são elevados, fator que merece atenção já que envolve perda de lucratividade por parte das empresas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foram utilizadas amostras do aço SAE 1045, cuja composição química é 0,45618% de carbono, 0,20512% de silício, 0,55030% de manganês, 0,02658% de fósforo e 0,01522% de enxofre.

Os ensaios estudados neste trabalho (o tratamento térmico de recozimento, normalização e o de tempera e revenimento) foram realizados no Laboratório de tratamento térmico da Faculdade de Engenharia de João Monlevade (FaEnge), sendo empregados o forno tipo mufla (para tratamento térmico) SPLABOR (SP-1200), a cortadora metalográfica, METALPIRSMA (CM70); lixadeira, AROTEC (AROPOL 2V), balança de precisão, Bioprecisa (FA2104N) e água para o resfriamento.

Freitas (2014) orienta que a temperatura máxima ideal que deve ser utilizada para os tratamentos térmicos (temperatura de austenitização) é definida por uma série de fatores, como: a porcentagem de carbono presente no aço; A presença de ligas; entre outros. Para o tratamento térmico no aço SAE1045, é ideal que se utilize a temperatura de 900°C, pois à essa temperatura, temos a fase austenítica e uma menor chance de ocorrerem problemas como a descarbonetação pela superfície do material.

O tempo de exarque (tempo em que a amostra fica na temperatura de austenitização) é definido por uma equação simples, que diz que a cada uma polegada de diâmetro da sessão transversal, deve-se deixar uma hora dentro do forno, deste modo foi definido o tempo de 30 minutos para as amostras utilizadas no experimento (REED-HILL; ABBASCHIAN, 1994).

O ensaio de tratamento térmico de normalização foi realizado a uma temperatura de 900°C, com uma taxa de aquecimento de aproximadamente 9,0°C/min e foi mantido nessa temperatura por 30 minutos, o que proporcionou a homogeneização da estrutura interna da amostra seguido de resfriamento ao ar.

O recozimento foi realizado utilizando os mesmos parâmetros da normalização até homogeneização da amostra que foi submetida a resfriamento dentro do forno à uma taxa de resfriamento de 38,0°C/h.

Para realizar o tratamento térmico de tempera e revenimento, foi utilizada a temperatura de 900°C, com uma taxa de aquecimento de aproximadamente 10°C/min. A amostra foi mantida nessa temperatura por 30 minutos, o que proporcionou a homogeneização da sua estrutura interna, seguido de um resfriamento brusco em água, buscando a formação da martensita.

Em seguida, foi submetido a aquecimento até a temperatura de 415°C e mantida pelo tempo de 2 horas para a realização do ensaio de revenimento.

Os ensaios de corrosão foram realizados no laboratório de química da FaEnge. Utilizou-se dois tipos de soluções, ácida e básica, com o intuito de verificar se para meios com diferentes valores de pH haveria também uma alteração no comportamento da corrosão nos tratamentos térmicos.

Para a solução ácida, foi utilizado H_2SO_4 , por ser um ácido muito forte, e para a solução básica, foi utilizado NaOH, também por ser uma base forte, e a concentração de ambas as soluções foi de 2,5%, essa concentração foi a considerada ideal pelos autores, levando em consideração o tempo de experimento, e a quantidade de corrosão esperada.

Semanalmente, foi feita a troca das soluções, a fim de evitar que o processo de corrosão se estagnasse, devido à saturação delas. O volume utilizado semanalmente foi de 330mL de cada solução (55mL por amostra, e seis amostras em cada solução).

As amostras utilizadas tinham perfil redondos laminados com diâmetro de 0,5 pol, cortados da mesma barra, garantindo uma maior uniformidade da composição química e maior confiabilidade dos dados obtidos, sendo lixadas e limpas após o tratamento térmico para a retirada de toda camada oxidada oriunda das etapas anteriores e, que poderiam afetar o ensaio de corrosão.

Foram utilizados para o experimento 12 (doze) amostras, sendo as amostras “1” e “2” de cada tratamento térmico inseridas na solução ácida e as “3” e “4” na solução básica. Suas massas estão listas na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – *Número, massa(g) e tratamento térmico das amostras.*

Amostra	Normalizado	Recozido	Temperado e revenido
1	26,2922	28,0774	25,5372
2	27,3449	24,6215	26,7846
3	25,7164	24,4641	22,7877
4	27,8444	30,9951	25,5621

As amostras foram completamente imersas nas soluções, para que toda sua superfície estivesse susceptível à ação corrosiva. Para as medições, que foram feitas periodicamente durante 30 dias, todas as amostras foram lavadas, secas em estufa a baixa temperatura (aproximadamente 50 °C), e então, para avaliar a perda por corrosão, pesadas em uma balança de precisão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a coleta de dados fornecidos pelo experimento, pode-se observar que as amostras submetidas à imersão em solução básica não apresentaram variação significativa em suas massas. Esses resultados indicam que a solução de NaOH a 2,5% ocasionou uma corrosão muito branda no período em que foi exposto, não sendo possível avaliar o efeito corrosivo da mesma nas diferentes amostras. A literatura consultada permite inferir que o meio básico pode ser bastante corrosivo, entretanto o tempo de exposição é fundamental para que o efeito seja visualizado (GENTIL, 2011).

A [Figura 2](#) mostra a perda de massa absoluta sofrida pelas amostras imersas na

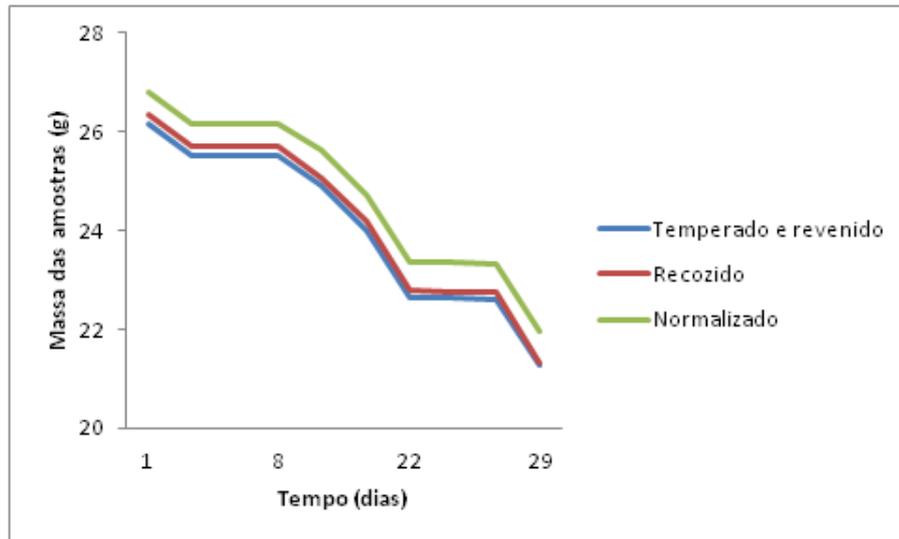


Figura 2 – *Variação da massa média das amostras submetidas ao meio ácido.*

solução ácida durante todo o período de exposição do material ao meio corrosivo. Foi considerada a média da massa das amostras em cada tratamento.

Diferentemente das amostras imersas em solução básica, pode-se observar na [Figura 2](#) que houve uma severa redução de massa das amostras estudadas. Interessante observar que o processo de corrosão apresentou relativa estagnação, provavelmente ocorrido pela saturação das soluções. Observa-se que o processo de corrosão foi acelerado sempre que ocorria a troca das soluções que aconteceu no oitavo e décimo dia do experimento.

Conforme exposto pelos trabalhos de [Buerger et al. \(2009\)](#) e [Cruz \(2005\)](#), era esperado que no tratamento térmico de Têmpera e Revenimento, houvesse uma taxa de corrosão diferente dos outros tratamentos, já que sua estrutura interna era formada por uma fase metaestável. Os outros tratamentos térmicos resultaram em fases estáveis em temperatura ambiente, e também parecidas, variando apenas o tamanho do grão. Entretanto, pode-se observar na [Figura 2](#) que todas as amostras imersas em solução ácida tiveram uma alta taxa de corrosão, e que diferente do esperado, as curvas de todas as amostras seguiram o mesmo padrão, não evidenciando diferença na resistência à corrosão entre os tratamentos térmicos.

A fim de avaliar a taxa de corrosão relativa, traçou-se o gráfico ilustrado na [Figura 3](#), utilizando a variação percentual da massa das amostras, uma vez que elas apresentavam massas e tamanho diferentes, e que o processo de corrosão depende da área de contato entre a amostra e o meio corrosivo para ocorrer.

Sendo assim, a [Figura 3](#) ilustra a perda de massa percentual sofrida pelas amostras imersas na solução ácida durante todo o período do experimento. Esse gráfico foi traçado levando-se em consideração a média da massa entre as amostras de cada tratamento térmico.

A análise da [Figura 3](#), revela que, como descrito anteriormente, ocorreu um aumento acentuado no processo corrosivo das amostras imediatamente após a troca da solução, chegando ao valor máximo seguindo de um decaimento que pode ser explicado pela saturação da solução que acarretou uma diminuição do processo corrosivo. Observa-se também, que

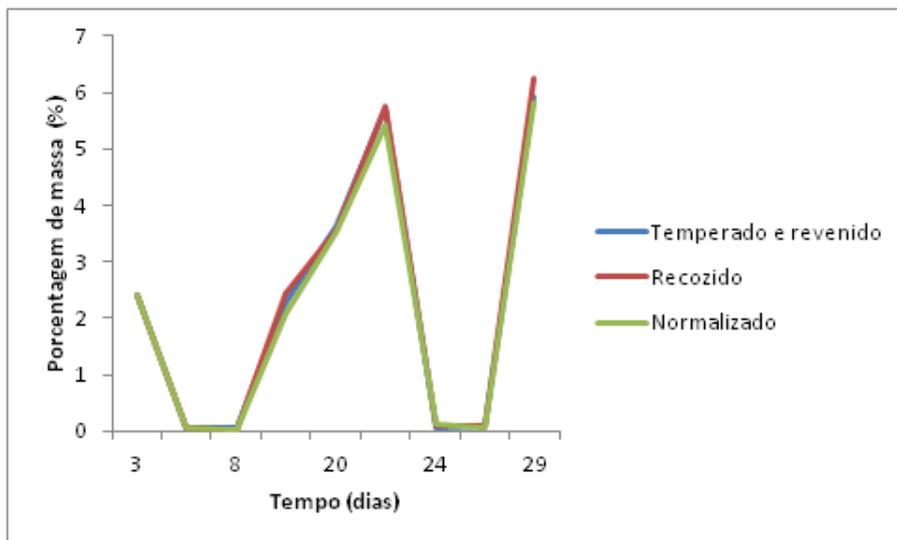


Figura 3 – *Variação relativa da média da massa das amostras.*

as curvas de corrosão nos tratamentos térmicos seguiram o mesmo padrão, corroborando com os resultados mostrados na [Figura 3](#), ou seja, não houve variação palpável entre as curvas de corrosão. Isso demonstra que os tratamentos térmicos no aço SAE 1045 não afetam na resistência à corrosão, quando submetidos às condições utilizadas no presente trabalho.

4 CONCLUSÃO

Nos ensaios realizados era esperado que houvesse diferença na taxa de corrosão entre as amostras submetidas aos diferentes tratamentos térmicos, principalmente, no tratamento de tempera e revenimento, visto que a fase predominante presente era de martensita, como descreveu [Picon et al. \(2010\)](#), diferente dos tratamentos de normalização e recozimento que apresentavam fase de ferrita e cementita. No experimento realizado, os tratamentos térmicos no aço SAE 1045 não afetaram a resistência à corrosão, pois embora a composição química fosse idêntica, os ensaios alteraram a estrutura interna, o que poderia ter ocasionado processos corrosivos distintos. Entretanto, outros fatores como o tamanho de grão diferente também poderiam ter influenciado a corrosão avaliada.

O presente estudo indicou que, independente do tratamento térmico aplicado, o efeito corrosivo em meio ácido sulfúrico a 2,5% foi o mesmo das amostras do aço SAE 1045 empregadas nas análises. Entretanto, novos estudos devem ser feitos em condições diversas para confirmar a irrelevância do tratamento térmico frente ao efeito corrosivo.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à faculdade de Engenharia de João Monlevade - FAENGE, pela cessão dos laboratórios necessários à condução da pesquisa, à nossa orientadora do projeto que sempre nos auxiliou, Professora Fabrícia Nunes de Jesus Guedes e ao nosso colega colaborador Matheus, que nos auxiliou em todos os testes feitos no laboratório.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUERGER, G. R. et al. **Estudo Do Tratamento Térmico Sobre a Conformação do aço 1045**. 2009.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1. ed. São Paulo: Tec. Art Editora Ltda, 2012.

CRUZ, L. C. **Avaliação da capacidade do processo de fabricação em atender especificação de temperabilidade para o aço SAE 1584M**. 2005. Dissertação (Mestrado) — UFMG, 2005.

FREITAS, P. S. **Tratamento Térmico Dos Metais**. 1. ed. [S.l.]: Senai, 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.

PICON, C. A. et al. Estudo do mecanismo de corrosão por pites em água do mar de aços inoxidáveis supermartensíticos microligados com Nb e Ti. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 1, p. 65–69, jan. mar 2010.

REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. The hardening of steel. In: _____. **R. Physical Metallurgy Principles**. 3. ed. Boston: PWS Puablisshing Company, 1994. cap. 19, p. 632–687.

SCHEIDEMANTEL, R. H. **Utilização de métodos teóricos para avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições químicas**. 2014. UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Trabalho de conclusão de curso.

Estudo do processo de separação sólido-líquido por sedimentação no setor minero-metalúrgico

Separation process of study solid-fluid in the sedimentation mining-metallurgical sector

K. S. Braz^{1,*}; L. F. Nunes²; F. N. de J. Guedes³

¹ Engenheira Metalurgista, Autônoma, João Monlevade - MG, Brasil.

² Mestranda em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

³ Departamento de Ciências Exatas Aplicadas e dos Materiais, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

¹kennyasilvab@yahoo.com.br

Resumo

Espessadores são equipamentos que utilizam o método da sedimentação para auxiliar no beneficiamento do minério de ferro. Este trabalho visa estudar o método do dimensionamento do espessador, através de testes de laboratório, que são realizados em pequenas escalas, mas que podem ser utilizados com base na construção do equipamento. Utilizou-se amostras de diferentes minas e o primeiro teste realizado foi o teste “ao natural”. Este ensaio visa sedimentar a polpa sem adição de nenhum interferente para avaliar suas propriedades físico-químicas. Por meio deste teste, foi possível visualizar a clarificação da água e a velocidade de sedimentação. Após este primeiro experimento, foram realizados testes com adição de diferentes quantidades de floculantes e diferentes faixas de pH sempre com a finalidade de melhorar a clarificação da água e a velocidade de sedimentação. Ao final desses testes, foi possível simular com precisão o dimensionamento de um espessador.

Palavras-chave: espessador, velocidade de sedimentação, dimensionamento.

.....

Thickeners are equipment using the sedimentation method to assist in iron ore processing. This work aimed at studying the thickener sizing method through laboratory tests which are conducted on a small scale but may be used based on the construction of the equipment. Samples of different mines were collected and the first test was the test "natural". This test aims to settle the pulp without adding any interfering to evaluate their physic-chemical properties. At the end, it was possible to visualize the water clarification and sedimentation speed. After this first experiment were performed test with the addition of different quantities of flocculants and different pH ranges always with the purpose of improving water clarification and sedimentation speed. At the end of these tests it was possible to simulate the scaling of a thickener.

Keywords: thickener, sedimentation speed, scaling.

1 INTRODUÇÃO

A mineração pode ser definida como a extração de minerais existentes nas rochas/solo. Trata-se de uma atividade que não escolhe o local para se implantar, pois a localização é obra da natureza, conceituado de rigidez locacional (CARVALHO, 2009).

Essa atividade provoca variados efeitos não desejáveis, como poluição da água, do ar, sonora entre outros. Por isso cada vez mais se vê a busca de adequar o processo ou medidas para que seja um trabalho sustentável (CARVALHO, 2009).

Grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. Existem dois principais tipos de resíduos sólidos, os estéreis e os rejeitos. O primeiro trata-se de materiais escavados, oriundos das atividades de extração no decapeamento da mina, não possuem valor econômico e ficam dispostos em pilhas (SILVA et al., 2011).

Já o rejeito é todo o material sem valor econômico que resulta do processo de concentração de um minério. As partículas que constituem o rejeito são encontradas na faixa de partículas de areia fina (LOZANO, 2006 apud LARA, 2011).

O descarte dos rejeitos gerados pode ser realizado com na forma sólida (pasta ou granel) ou na forma de polpa. A maior parte dos sistemas de disposição de rejeitos é produzida na forma de polpa que é transportada por via hidráulica (LARA, 2011).

Antes de ser descartada, a polpa contendo rejeitos, passa por alguns processos, onde se separa água e materiais de diferentes granulometrias em função dos métodos de disposição. Esses processos são o espessamento (deslamagem), filtragem e cicloneagem. Esses têm como objetivo a separação das fases sólidas e líquidas da polpa, aumentando assim o teor de material sólido (LARA, 2011).

A disposição dos rejeitos tem se tornado um grande problema ambiental, devido ao aproveitamento crescente de jazidas de baixos teores, tendo como consequência o aumento do volume de rejeitos gerados exigindo áreas maiores para sua deposição. Daí dá-se a importância desses processos, pois quanto mais material puder ser aproveitado e não descartado mais sustentável e econômico será (ARAÚJO, 2005 apud LARA, 2011).

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-líquido baseada na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão; a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional. A larga utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos com a finalidade de melhorar a sua utilização e eficiência no atendimento dos objetivos operacionais (FRANÇA; MASSARANI, 2004).

Os sedimentadores são equipamentos projetados para promover a separação das fases sólida e fluída em suspensões cujo interesse comercial varia desde a purificação ou clarificação de uma corrente líquida ao processo de concentração de materiais particulados (AROUCÁ, 2007).

Na literatura, costuma-se classificar os sedimentadores em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos. Industrialmente os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente,

em regime contínuo (FRANÇA; MASSARANI, 2004).

Segundo Oliveira et al. (2004, p. 44) “o espessamento é o método preferido para desaguamento de polpas devido ao seu custo relativamente baixo e simplicidade de operação”. O espessador é essencialmente um tanque ou reservatório onde a suspensão de sólidos é colocada para permitir a sedimentação das partículas. Sua operação pode ser realizada tanto em bateladas, semicontinuamente ou continuamente. A operação em batelada só é aplicada em instalações de pequena capacidade. Para instalações de grande porte os espessadores contínuos são a melhor solução para o desaguamento de polpas. Nesse caso, o espessador é alimentado continuamente com a suspensão a uma taxa suficientemente baixa para permitir o tempo necessário a sedimentação da fase sólida e a limpeza da fase líquida (OLIVEIRA; LUZ, 2007).

A grande utilização destes equipamentos desperta um interesse de pesquisa no estudo do dimensionamento e otimização com o objetivo de melhorar a eficiência nos processos produtivos minimizando os custos operacionais. Tanto o dimensionamento, quanto a otimização, tem como base os dados gerados nos ensaios de bancada que visam mostrar o comportamento do sólido existente na suspensão durante o processo de sedimentação (REIS, 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas nas análises foram obtidas das minas do Cauê e de Corumbá. Estas chegaram ao laboratório com a granulometria de 15 μm . Iniciaram-se os testes de bancada realizando a homogeneização das amostras. Posteriormente as mesmas foram quarteadas até a obtenção de aproximadamente 50g para realização do teste de umidade. Em seguida, foram levadas à chapa de aquecimento na temperatura média de 180°C e mantidas por um tempo em torno de 5 minutos. Após alcançarem a temperatura ambiente foram medidas suas massas. Esse processo foi repetido até que se obtivesse uma massa constante confirmando assim seu real peso com ausência total de umidade. Depois de conhecido o valor da umidade, pesou-se a massa necessária para realização dos testes posteriores. Os primeiros testes foram realizados em béckeres de 600 mL. Antes de iniciar os procedimentos efetuou-se os cálculos referentes a quantidade de água necessária para atingir o percentual de sólidos desejados na polpa (30%).

a) Primeiro teste (ao natural)

Esse foi realizado sem adição de nenhum reagente afim de observar o comportamento das amostras. Modo de preparo das polpas: para a primeira, pesou-se 203,73g do material e 453,26g de água e para a segunda pesou-se 202,14g do material e 454,89g de água. Colocou-se a polpa formada pelo minério de ferro e água nos béckeres e em seguida agitou-se o sistema até que o mesmo se tornasse visivelmente homogêneo. Após esse processo, observou-se a sedimentação, mediu-se a interface sedimentada e cronometrou-se o tempo;

b) Segundo teste (dosagem ótima)

Realizou-se o teste de dosagem de floculante. Modo de preparo: pesou-se 0,5g de floculante para 499,5g de água. Em seguida, transferiu-se para um bécker e agitou-se com o auxílio do agitador automático. A mistura foi agitada por aproximadamente 20 minutos (tempo necessário para dissolução completa). Após esse processo retirou-se 99 mL dessa mistura e adicionou-se 200 mL de água na mesma para obter uma

concentração de 0,033% de floculante. As dosagens selecionadas foram 2, 4, 6, 8, 10 (g/t) sendo padronizadas conforme a dosagem de 2 g/t equivalente a massa de 0,83 g. Dessa maneira, adicionou-se ao bécker 0,83 g de floculante (com auxílio de uma seringa) referente a primeira dosagem, em seguida acrescentou-se mais 0,83 g (dosagem de 4 g/t). Repetiu-se esse processo até alcançar a dosagem de 10 g/t. Em cada adição do reagente as amostras foram agitadas, o tempo de sedimentação cronometrado e a medida da interface sólido/líquido foi verificada. Através deste teste verificou-se a dosagem que conferia a melhor velocidade de sedimentação.

c) Terceiro teste (pH ótimo)

Preparou-se as polpas como descrito anteriormente no item do teste ao natural e colocou-se as mesmas em quatro béckeres. Ajustou-se os pHs nas faixas de 7,5; 8,5; 9,5; e 10,5 adicionando-se solução de NaOH a 5%. Em seguida, adicionou-se a melhor dosagem de floculante observando a velocidade de sedimentação juntamente com a altura da interface de cada polpa.

d) Quarto teste (teste em proveta)

Após a finalização dos testes em béckeres, foram realizados os testes em provetas de 1 L avaliando a velocidade de sedimentação, empregando, para tal, a melhor dosagem de floculante e o melhor pH já determinados anteriormente. Preparo das polpas com 30% de sólidos: para a primeira, pesou-se 410,02 g de minério de ferro para 904,03g de água e para a segunda pesou-se 404,28 g de minério de ferro e 909,77g de água. Após a adição das polpas nas provetas, fixou-se papel milimetrado nas mesmas, modificou-se o pH, adicionou-se floculante, agitou-se até que as mesmas se tornassem homogêneas e contabilizou o tempo de sedimentação de 2 em 2 segundos (marcou-se no papel milimetrado a posição da interface de acordo com o tempo). Logo após, o tempo contabilizado foi de 5 em 5 segundos. Essa alteração ocorreu devido ao fato da velocidade inicial de sedimentação ser mais acelerada do que no final.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os termos (1º amostra e 2º amostra) a serem discutidos a seguir referem-se a respectivamente: Amostra da Mina de Corumbá e Amostra da Mina do Cauê. Os resultados estão dispostos em ordem cronológica de execução:

Tabela 1 – *Determinação da umidade.*

Amostra	Massa Úmida(g)	Amostra Seca(g)	% de Umidade
1º	47,364	45,817	3,266
2º	49,125	47,902	2,29

O teste de umidade referente a [Tabela 1](#), teve por finalidade auxiliar na preparação da polpa. Sabendo-se o percentual de água no minério foi possível utilizar a massa real em porcentagem de sólidos do mesmo.

O cálculo da velocidade de sedimentação ao natural presente na [Tabela 2](#) foi o primeiro a ser realizado. Através dele, identificou-se algumas propriedades do minério tais como velocidade de sedimentação e clarificação da água. Quando a amostra apresenta ótima velocidade de sedimentação e ótima clarificação da água, é provável que não seja necessária

Tabela 2 – Velocidade de sedimentação da amostra ao natural.

Amostra	Altura da Interface(m)	Tempo de Sedimentação(s)	Velocidade de Sedimentação(m/h)
1º	0,048	32,28	5,35
2º	0,020	20,05	3,59

a adição de reagentes. Mas caso contrário, os reagentes serão adicionados em diferentes concentrações a fim de encontrar os melhores resultados. Na [Tabela 3](#) estão apresentados os valores da dosagem de floculante adicionados na primeira e segunda amostra.

Tabela 3 – Dosagem de floculante adicionada.

Dosagem (g/t)	Massa de floculante – 1º amostra (g)	Massa de floculante – 2º amostra (g)
2	0,83	0,82
4	1,65	1,64
6	2,48	2,17
8	3,31	3,29
10	4,13	4,11

A velocidade de sedimentação foi calculada para cada amostra. A [Tabela 4](#) e [Tabela 5](#) mostram os resultados obtidos.

Tabela 4 – Efeito da dosagem de floculante na velocidade de sedimentação da 1ª amostra.

Dosagem (g/t)	Altura da interface (m)	Tempo (h)	Velocidade (m/h)
2	0,054	$1,1416 \times 10^{-3}$	47,30
4	0,068	$1,4333 \times 10^{-3}$	47,44
6	0,067	$1,6166 \times 10^{-3}$	41,44
8	0,066	$1,6111 \times 10^{-3}$	40,97
10	0,065	$1,6166 \times 10^{-3}$	40,21

Pôde-se analisar através dos cálculos acima que a melhor velocidade foi alcançada com a dosagem de 4 g/t de floculante.

Tabela 5 – Efeito da dosagem na velocidade de sedimentação da 2ª amostra.

Dosagem (g/t)	Altura da interface (m)	Tempo (h)	Velocidade (m/h)
2	0,025	$8,8027 \times 10^{-3}$	2,84
4	0,026	$2,7833 \times 10^{-3}$	9,34
6	0,027	$3,7138 \times 10^{-3}$	7,27
8	0,029	$3,6361 \times 10^{-3}$	7,97
10	0,030	$3,3083 \times 10^{-3}$	9,07

Analisou-se a interferência da dosagem de floculante na velocidade. Chegou-se à conclusão que a melhor velocidade de sedimentação encontrada foi coincidentemente alcançada na dosagem de 4 g/t.

Após a determinação da dosagem ideal de floculante em relação a velocidade de sedimentação das polpas, analisou-se a interferência do pH nas mesmas. Para tal, adicionou-se solução de NaOH a 5% nas duas amostras a fim de verificar em qual pH ocorreu a melhor velocidade de sedimentação. Os resultados obtidos podem ser observados na [Tabela 6](#) e [Tabela 7](#).

Tabela 6 – Interferência do pH na velocidade de sedimentação da 1ª amostra.

pH	Altura da interface (m)	Tempo (h)	Velocidade (m/h)
7,5	0,024	$1,3888 \times 10^{-3}$	17,28
8,5	0,025	$1,6305 \times 10^{-3}$	15,33
9,5	0,025	$1,4388 \times 10^{-3}$	17,37
10,5	0,023	$3,5722 \times 10^{-3}$	6,44

Após a análise da ?? é possível concluir que a melhor velocidade de sedimentação foi obtida na faixa de pH de 9,5 sendo a dosagem de floculante igual a 4 g/t.

Tabela 7 – Interferência do pH na velocidade de sedimentação da 2ª amostra

pH	Altura da interface (m)	Tempo (h)	Velocidade (m/h)
7,5	0,026	$4,8083 \times 10^{-3}$	5,41
8,5	0,025	$2,3388 \times 10^{-3}$	11,37
9,5	0,024	$2,1111 \times 10^{-3}$	10,68
10,5	0,023	$2,175 \times 10^{-3}$	10,57

Os dados obtidos na [Tabela 7](#) permitem concluir que a melhor velocidade foi alcançada com a faixa de pH de 8,5 sendo que a dosagem de floculante foi de 4 g/t em todas as análises. É importante realizar os testes e avalia-los em diferentes condições, para que o espessador seja construído de maneira eficaz para sua função. Cada amostra tem uma particularidade, como pôde-se observar nos resultados acima obtidos a dosagem de floculante foi a mesma nas duas amostras, porém a condição de melhor velocidade em relação ao pH se difere entre as duas. Esse fato mostra a importância do teste de proveta em diferentes condições, evitando transtornos futuros, como o mau funcionamento do equipamento para determinado mineral, gerando um elevado custo.

4 CONCLUSÃO

O estudo conduzido neste trabalho foi bastante satisfatório, uma vez que através dos experimentos puderam-se simular ensaios de bancadas tais como os realizados em grandes mineradoras para avaliar as características do produto que as mesmas extraem e comercializam. Tais testes são extremamente importantes para o controle de qualidade dos minérios, o que corrobora para a realização destes ensaios. Além disso, a avaliação das variantes interferentes no processo de separação sólido-líquido por sedimentação permitiram entender a totalidade do mesmo, mesclando conhecimentos teóricos à prática. Outro aspecto importante neste trabalho foi que o ponto ótimo de sedimentação pôde ser determinado por meio da velocidade de sedimentação em diferentes condições, como valor de pH e concentrações de floculante.

Conclui-se, desta forma, que o presente estudo apresenta grande relevância, pois a realização dos testes em bancada proporcionou entendimento de como se dá a sedimentação em pequena escala. Ainda, os resultados orientam, por exemplo o dimensionamento e desenvolvimento de um espessador, equipamento de grande escala. Ademais, o estudo endossa a importância do setor minero-metalúrgico e sua relevância social, uma vez que busca o desenvolvimento e aprimoramento de serviços e produtos, fazendo isto de maneira sustentável, e por conseguinte, trazendo benefícios à comunidade e às futuras gerações.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à faculdade de Engenharia de João Monlevade - FAENGE, pela cessão dos laboratórios necessários à condução da pesquisa, à nossa orientadora do projeto que sempre nos auxiliou, Professora Fabrícia Nunes de Jesus Guedes e ao nosso colega colaborador Matheus, que nos auxiliou em todos os testes feitos no laboratório.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AROUCA, F. O. **Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado) — PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2007.

CARVALHO, F. F. A engenharia de produção e o desenvolvimento sustentável: Integrando tecnologia e gestão. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, Salvador. **Resumos...** Salvador: Instituição organizadora do evento, 2009. p. quantidade páginas. Disponível em: <<http://goo.gl/t2Rlnx>>. Acesso em: 30 set. 2015.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: _____. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 579.

LARA, A. F. M. **Espessamento e transporte de pasta mineral**. 2011. Curso de Especialização Em Engenharia De Recursos Minerais CEERMIN. Disponível em: <<http://goo.gl/tKMEQ4>>. Acesso em: 1 out. 2015.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M. **Curso de espessamento e filtragem**. 2007.

OLIVEIRA, M. L. M. et al. **Espessamento e Filtragem**. 2004. Disponível em: <<http://migre.me/sHJrv>>. Acesso em: 29 set. 2015.

REIS, K. M. **Dimensionamento de espessadores**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2010. Disponível em: <<http://migre.me/sHKfY>>.

SILVA, A. P. M. et al. **Caderno de Diagnóstico: Resíduos sólidos da atividade de mineração**. 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/LeV0Of>>. Acesso em: 30 set. 2015.

Recuperação de metais a partir de sucatas eletrônicas

Recovery of metals from electronic scraps

T. A. Corsini^{1,*}; C. S. Monnerat²; H. M. do Couto³

¹ Engenheira Metalúrgica/Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

² Departamento de Química, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil.

³ Departamento de Recursos Naturais, Ciências e Tecnologias Ambientais, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

*thatycorsini@yahoo.com.br

Resumo

Para a adaptação diária ao mercado e suas exigências, a população demanda grande quantidade de eletrônicos, como celulares, computadores, tablets e demais dispositivos eletrônicos atuais, que por sua vez, apresentam tempo de vida útil curto. Esses aparelhos caso sejam descartados de forma incorreta, podem provocar inúmeros problemas, tanto para a saúde humana, quanto para o meio ambiente. São resíduos que possuem materiais tóxicos e não biodegradáveis que causam contaminação do solo, do ar e dos recursos hídricos. O processo de reciclagem ou recuperação de metais é uma opção de grande importância, pois geram benefícios sociais e econômicos para a sociedade, além de contribuir para o descarte correto desses resíduos. Este trabalho visou o estudo da possibilidade de recuperação de metais através de sucatas eletrônicas, tais como placas de circuito de computadores, usando processos mecânicos e metalúrgicos. Baseado em pesquisas que determinam o estágio atual do lixo eletrônico e focando especificamente em processos de reciclagem e esgotamento de insumos naturais foi feita a coleta de placas de computadores em lojas de informática, e posteriormente foi realizado o desmanche e sequenciada a separação. Em seguida, as placas passaram por processos como a pirometalurgia (incineração), hidrometalurgia (ataque com soluções ácidas) e eletrometalurgia (transferência de íons metálicos usando eletricidade) para recuperar o cobre contido nas mesmas.

Palavras-chave: Reciclagem, Metais, Eletrônicos.

.....

For everyday adapt to the market and its demands, the population demands a great amount of electronics such as mobile phones, computers, tablets and other current electronic devices, which in turn present time short life. These devices if they are disposed of incorrectly can cause numerous problems for both human health and for the environment. Are residues that have toxic materials and non-biodegradable causing contamination of soil, air and water resources. The process of recycling or recovery of metals is an option of great importance because they generate social and economic benefits to society, and contribute to the proper disposal of such waste. This work aimed to study the possibility of recovering metals through electronic scraps, such as computer circuit boards, using mechanical and metallurgical processes. Based on research to determine the current status of e-waste and specifically focusing on recycling processes and depletion of natural inputs has made the collection of computers boards in computer stores, and was later carried out the dismantling and sequenced separation. Then, the plates have undergone processes such as pyrometallurgical (incineration), hydrometallurgy (attack by acid solutions), and electrometallurgy (transfer of metal ions using electricity) to recover the copper contained in them.

Keywords: Recycling, Metals, Electronics.

1 INTRODUÇÃO

O acesso cada vez mais fácil aos produtos modernos, aliado ao aumento do poder econômico da população, tem incentivado o descarte dos aparelhos obsoletos, gerando grande acúmulo de resíduos eletrônicos. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos também conhecidos como sucata eletrônica, contemplam computadores, aparelhos telefônicos, eletrodomésticos, televisores, impressoras e também partes desses equipamentos, como baterias, placas de circuito impresso, dentre outros.

Esses equipamentos são constituídos de um grande número de metais, que apresentam elevado valor agregado, e que poderiam ser recuperados. Dessa forma, em função do volume de lixo eletrônico gerado, diversos estudos estão sendo realizados a fim de que se possa reutilizar novamente esta gama de elementos, como matéria-prima.

Há um grande interesse na recuperação dos metais que compõem tais equipamentos, pois dessa forma se economiza tempo e energia, visto que não necessitarão passar pela etapa de extração da forma mineral (*in natura*), trazendo uma alternativa viável de reutilização da matéria-prima que seria desperdiçada. Essa crescente necessidade global de se obter matérias-primas secundárias de alta qualidade é a mola propulsora para a reciclagem.

Atualmente, o lixo eletrônico constitui um grande problema para as empresas, para o governo e para os consumidores, pois ainda não existem políticas públicas que obriguem as empresas a recolher os aparelhos descartados. Apesar de existirem instituições especializadas na reciclagem de sucata eletrônica, onde as mesmas recolhem os produtos e realizam o processo chamado de manufatura reversa, onde desmontam, separaram as partes e extraem diferentes elementos de cada componente dos equipamentos. Por sua vez, os consumidores por não terem essas informações sobre o descarte correto acabam descartando estes materiais em lixões, que posteriormente, vão para os aterros sanitários causando contaminação do meio ambiente.

O descarte destes aparelhos, em locais inapropriados, apresenta grande impacto ambiental, como contaminação da água, do solo, do subsolo, da atmosfera, quando queimados, e também podem causar danos à saúde humana e dos animais. Algumas medidas e estudos foram realizados ao longo dos últimos anos, com a intenção de minimizar a geração de resíduos nocivos, priorizando mudanças nos processos produtivos e a redução de equipamentos eletroeletrônicos usados com as suas possíveis reciclagens.

A reciclagem não é tarefa fácil. Mesmo para a simples reciclagem de plásticos, tem de se gerenciar meios para o recolhimento e para o transporte destes produtos, até os locais de reprocessamento, além de se ter os custos de tal processo. Porém, a reciclagem ainda é a alternativa, de certa forma mais barata e um dos meios da destinação correta de artigos obsoletos e danificados.

Frente ao exposto, este trabalho teve como principal objetivo o estudo da possibilidade de recuperação de metais por meio de sucatas de aparelhos eletrônicos, tais com placas de circuito impresso (PCI) de celulares e computadores, através de processos mecânicos e metalúrgicos. O tratamento adequado de resíduos gerados por produtos eletrônicos, além de vantagem de evitar o descarte de substâncias tóxicas para o ambiente apresenta um adicional econômico de alta relevância, tendo em vista que um grande número dos metais que constituem esse tipo material apresenta elevado valor agregado e são de grande interesse do ponto de vista econômico.

De acordo com [Moraes \(2010, p. 11\)](#), os metais que compõem uma PCI são divididos

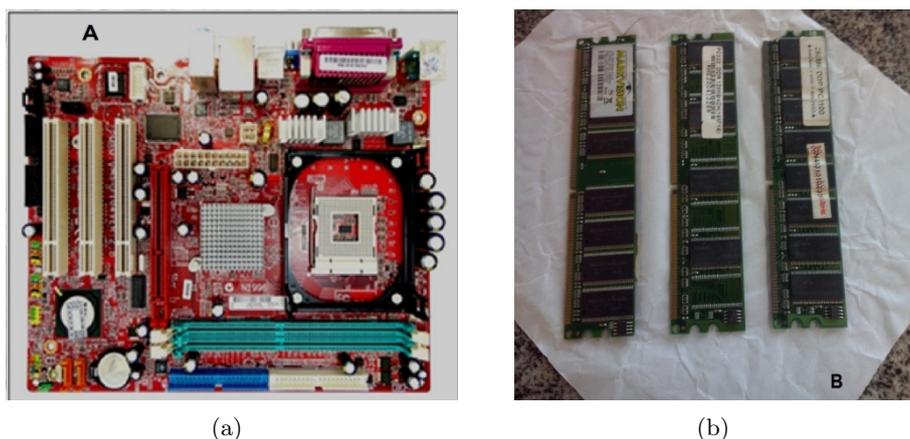


Figura 1 – Placa-mãe e pente de memória, respectivamente. a) Placa-mãe; b) Pente de memória. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 33).

em: “metais preciosos (prata, ouro, paládio, platina), metais de base (cobre, alumínio, níquel, estanho, zinco, ferro) e metais tóxicos (arsênio, antimônio, berílio, cádmio, chumbo, mercúrio)”.

Dessa forma, a questão que envolve esse estudo é encontrar a melhor maneira de transformar os resíduos eletrônicos em matéria-prima para outros itens de consumo, evitando assim, uma destinação incorreta. O estudo dessas placas tem como objetivo caracterizar o resíduo, assim como o tipo de metais existente nelas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas do processo de reciclagem e recuperação de metais existentes na sucata consistem no processamento mecânico (cominuição, separação granulométrica e magnética) e em processos metalúrgicos (hidro, eletro e pirometalúrgico).

Para a elaboração da pesquisa experimental, foi usada uma placa mãe MSI (Modelo PM8M-V), pentes de memória, descartados pela assistência técnica por chegar ao fim de sua vida ou por estarem com defeito. A Figura 1 mostra o material que foi usado no experimento, coletados em lojas de informática no município de João Monlevade/MG.

Em um primeiro momento, a placa foi lavada com água e detergente neutro e, em seguida, deixada para secagem ao sol. Os componentes instalados na placa mãe, como unidade de resfriamento, conectores e slots de memória foram retirados com o auxílio de um ferro de solda e alicates.

A placa passou pelo processo de cominuição, ou seja, foi cortada em partes menores com a ajuda de uma tesoura para corte de chapas. O trabalho de corte teve início pelas bordas. Houve medição da sua massa de duas partes da placa e posteriormente levadas também ao Forno Mufla até a temperatura de 800°C. A memória também foi cortada ao meio, sendo que uma das metades da mesma foi dividida em quatro partes. Foi realizada a medição de massa de duas partes da memória e posteriormente levadas ao Forno Mufla até atingida a temperatura de 800°C, permanecendo por 10 minutos. “A temperatura de 800°C foi escolhida, devido a fato de que as resinas presentes no material sofre degradação química a 750°C” (MORAES, 2010, p. 45).

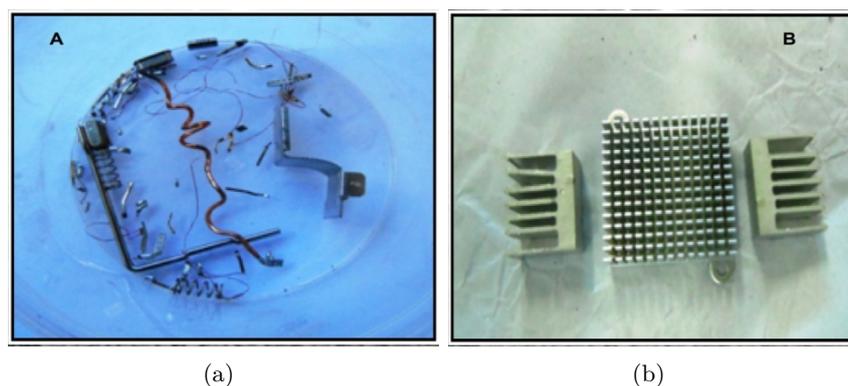


Figura 2 – Metais retirados da placa-mãe durante o processo de desmanche. a) Metais diversos; b) Alumínio usado na refrigeração do sistema. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 36).

Após o procedimento de incineração foram retiradas as lâminas de cobre com uma pinça. O material magnético foi separado com o auxílio de um imã. O restante do material foi macerado, ou seja, foi feita uma moagem manual do resíduo através de um almofariz e um pistilo. O processo de peneiramento foi feito através de uma peneira comum (uso doméstico), com abertura de aproximadamente 0,6 mm (medição realizada através de um paquímetro digital), sendo o material passante (menor que 0,6 mm) e o retido (maior que 0,6 mm).

Para o ataque ácido foram usados seis tubos de ensaio, cada tubo com uma amostra de aproximadamente 0,10 g de resíduo passante e 1 mL de ácido concentrado. Utilizou-se o ácido sulfúrico, clorídrico e nítrico. Os tubos foram separados em dois grupos, sendo três tubos para a amostra da memória e três para a placa-mãe.

Para a realização da eletrodeposição foi usado um béquer com capacidade para 50 mL, uma fonte de corrente contínua, uma solução de sulfato de cobre II (10%) dissolvida em água deionizada, lâminas de cobre (ânodo) e um eletrodo de cobre (cátodo). A solução final foi obtida com a adição de 15 mL de solução de sulfato de cobre II (10%) e 15 mL de água deionizada. A solução foi filtrada em um filtro de papel quantitativo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de separação mecânica caracterizado em desmanchar, separar os diferentes materiais, assim como reduzir a placa de circuito em partículas menores permitiu detectar a presença de vários tipos de materiais, tais como, metais (alumínio, cobre, ferro), polímeros (componentes plásticos), cerâmica (fibra de vidro). A figura abaixo mostra os metais retirados após o processo de desmanche da placa de circuito (PCI), é possível visualizar a presença de cobre na [Figura 2\(a\)](#) e de alumínio na [Figura 2\(b\)](#).

Durante o processo de incineração, houve uma redução de 30% do total da amostra da placa de circuito (placa-mãe). E no caso da amostra da memória, houve uma porcentagem de redução de 26% do total analisado. Do total da massa inicial em comparação com a final, houve uma redução da massa em ambas, conforme mostra a [Tabela 1](#) a seguir.

As amostras após serem incineradas a 800°C para retirada de metais passaram por um resfriamento lento até atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). É

Tabela 1 – Comparação das porcentagens de redução de massa. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 37), (adaptado).

Redução de massas		
	Placa-mãe	Memória
Massa Inicial (g)	11,5804g (100%)	15,9874g (100%)
Massa após a Incineração (g)	8,1063g (70%)	11,8307g (74%)
Massa Perdida (g)	3,4741g (30%)	4,1567g (26%)

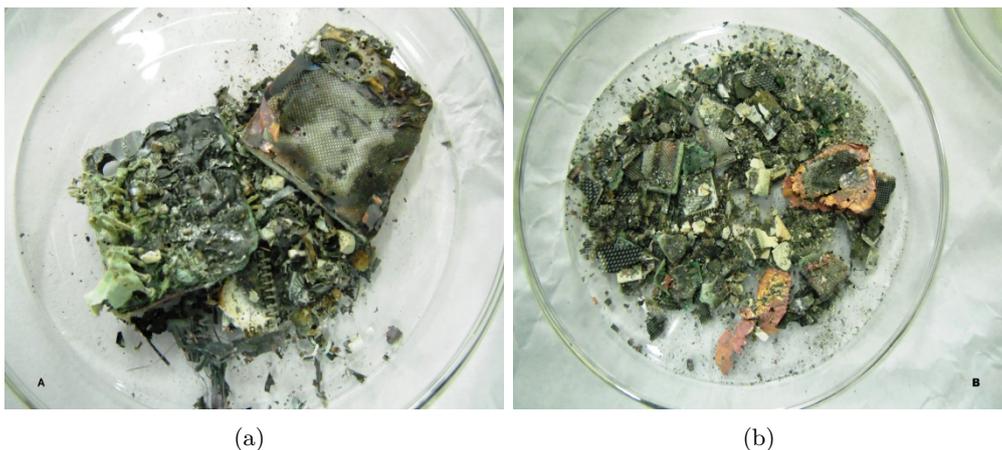


Figura 3 – Partes da placa-mãe e da memória resultante do aquecimento. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 38).

possível visualizar a presença de cobre nas amostras das figuras abaixo (Figura 3).

O cobre foi retirado com o auxílio de uma pinça e o ferro com o uso de um imã. As figuras abaixo mostram o cobre (Figura 4(a)) e o ferro (Figura 4(b)) encontrados nas amostras da placa-mãe e da memória. Após a retirada das laminas de cobre e o ferro, as amostras foram maceradas e peneiradas. O material de granulometria menor (passante) foi usado no ataque com ácidos, para identificar a presença de metais existentes.

Na placa-mãe, de um total de 100%, tem-se 8,3% de ferro e 11,9% de cobre. Já na memória encontrou-se 4,5% de ferro e 5,6% de cobre. Na Tabela 2 abaixo, observa-se que a porcentagem de cobre encontrado em ambas é maior que a de ferro.

Tabela 2 – Total de massa de ferro e cobre encontrado. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 40).

Porcentagens de cobre e ferro		
	Placa-mãe (10,1373g)	Memória (15,987 g)
Ferro	0,8432g (8,3%)	0,7468g (4,5%)
Cobre	1,2052g (11,9%)	0,916 g (5,6%)

Foi executado um ataque com diferentes tipos de ácidos concentrados para avaliar a reatividade na presença de metais (Cu).

O ataque ácido, com ácido sulfúrico, apresentou uma solução que permaneceu

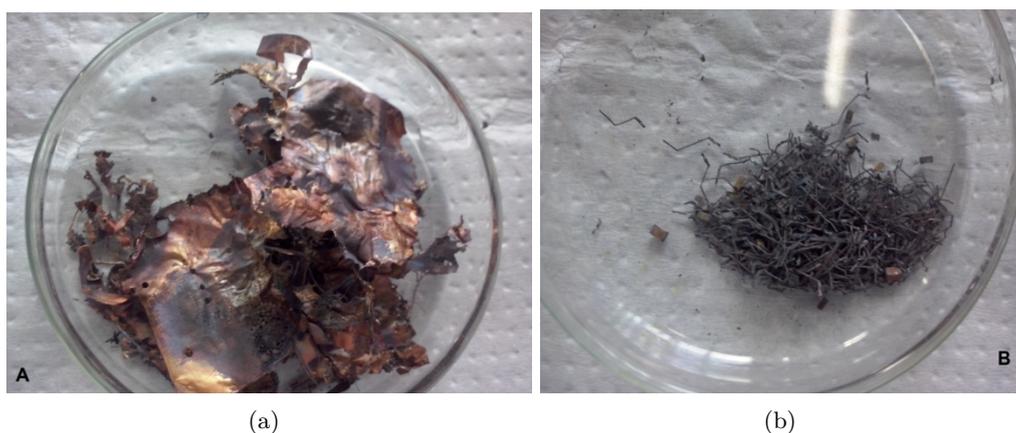
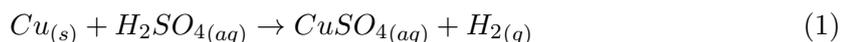


Figura 4 – Cobre e ferro retirados da placa-mãe e da memória. a) Cobre; b) Ferro. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 40).



Figura 5 – Ataque com ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. A) Material da memória; B) Material da placa-mãe. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 43).

incolor, não houve liberação de calor, mas é possível observar a presença de um corpo de fundo na parte inferior do tubo em maior quantidade na placa (Figura 5(a)) que no material da memória (Figura 5(b)). A maioria dos metais reage com o ácido sulfúrico, com formação de hidrogênio gasoso e sulfato do metal em reação. Já para o Cu, a reação só ocorreu com ácido concentrado a quente, segundo a equação 1. O cobre é mais nobre que alguns metais, ele não reagem com H_2SO_4 diluído e nem com o concentrado na temperatura ambiente, portanto não houve liberação de gás.



No ataque com ácido clorídrico (Figura 6), a solução ficou com coloração amarela esverdeada, indicando a presença de cobre em ambos os tubos pela formação do íon complexo $CuCl_4^{2-}$ resultante da reação. Porém no tubo que contém o material da memória (Figura 6(a)), a coloração verde é mais intensa (presença de maior quantidade de cobre) do que no tubo que contém material da placa (Figura 6(b)). Houve liberação de hidrogênio gasoso em ambos os tubos de ensaio, conforme mostra a equação 2.

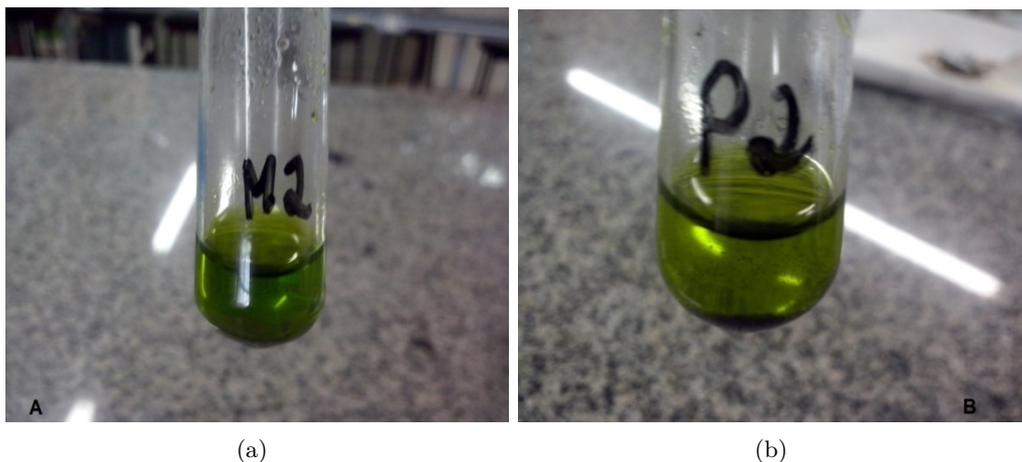
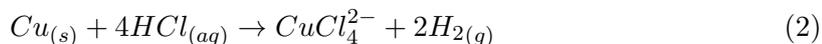


Figura 6 – Ataque com ácido clorídrico (HCl) concentrado. a) Material da memória; b) Material da placa-mãe. Fonte Corcini e Gonzaga (2015, p. 44).



Figura 7 – Ataque com ácido nítrico (HNO₃) concentrado. a) Material da memória; b) Material da placa-mãe. Fonte Corcini e Gonzaga (2015, p.44).



Nos tubos onde foi adicionado ácido nítrico (Figura 7), a solução ficou com uma tonalidade azul, indicando que há grande quantidade de cobre na solução. No tubo que contém material da memória (Figura 7(a)), observa-se uma coloração mais azulada e com menor formação de um corpo de fundo escuro. O tubo que continha o material da placa (Figura 7(b)) apresentou uma maior quantidade de corpo de fundo escuro e houve liberação de gás NO₂ em ambos os tubos de ensaio, segundo as equações 3 e 4. A reação entre o cobre e o ácido nítrico é traduzida pelas seguintes equações químicas:



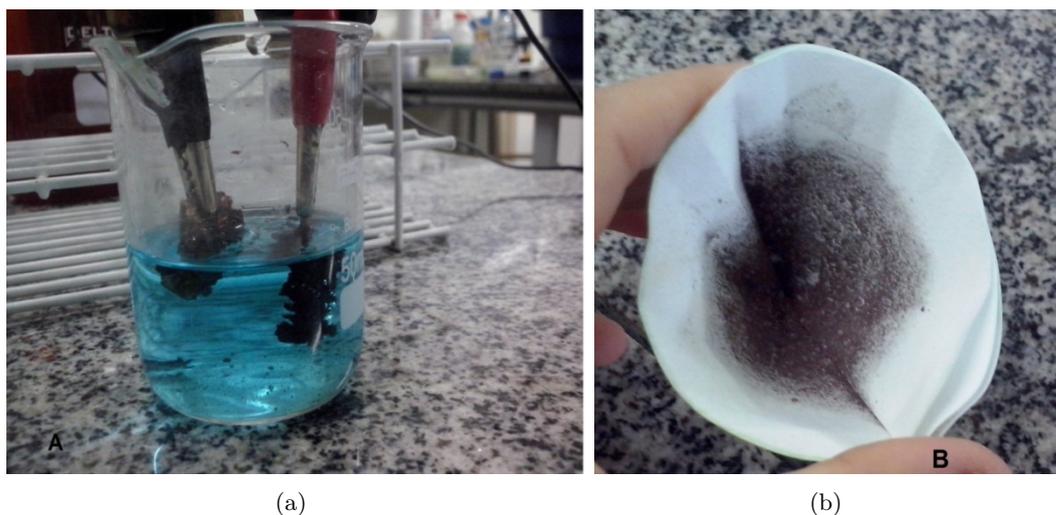
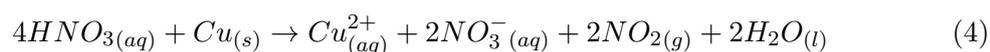


Figura 8 – Eletrodeposição do cobre. a) Eletrodeposição do cobre; b) Filtro com o cobre recuperado. Fonte: Corcini e Gonzaga (2015, p. 46).



As águas de lavagem das pipetas apresentou pH=3, mas para ser descartada foi necessário fazer a neutralização, ou seja, o pH foi neutralizado (pH=7). Para tal, foi usado hidróxido de sódio (NaOH) e sabão líquido, que funcionou como um indicador ácido-base. Ao atingir o pH=7, houve formação de espuma e clareamento da solução, tendo o descarte em seguida.

Na eletrorrecuperação do cobre (Figura 8(a)) foi montando um circuito eletroquímico com as placas retiradas, uma fonte de corrente contínua e uma solução de sulfato de cobre II. O material recuperado foi filtrado e depois passou por uma secagem em estufa a 50°C (Figura 8(b)).

De acordo com a tabela a seguir (Tabela 3), a massa inicial do eletrodo era de 0,8965g, após passar pela secagem, foi medida novamente a massa, que apresentou um aumento de 3,6%. Já a placa de cobre colocada no ânodo tem uma redução de 82,7%. O filtro de papel (Figura 8(b)) cuja massa inicial era de 1,0985g passou para 1,2646g, com uma massa de 0,1661g de Cu formada, ou seja, apresentou um aumento de 15,1% resultante do cobre depositado.

Tabela 3 – Eletrodeposição do cobre. Fonte Corcini e Gonzaga (2015, p. 45).

Eletrodeposição do cobre		
	Massa inicial (g)	Massa final (g)
Eletrodo	0,8965g (100%)	0,9285g (103,6%)
Placa de cobre	0,2515g (100%)	0,0435g (17,3%)
Filtro de papel	1,0985g (100%)	1,2646g (115,1%)

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que há métodos para a retirada de metais das placas de circuito impresso, através de processamentos mecânicos e metalúrgicos, tais como eletrodeposição, processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

Foi encontrada uma quantidade significativa de metais como ferro, cobre e alumínio (processo mecânico). A porcentagem encontrada de ferro, cobre e alumínio é satisfatória. Os resíduos resultantes do processamento de moagem e peneiramento podem servir como ferramentas a serem utilizadas em novos estudos e desenvolvimento de pesquisas.

A natureza, ou seja, o meio ambiente encontra-se em desvantagens nesta corrida tecnológica, que teve início na Revolução Industrial. É importante frisar que a preservação ambiental é tão relevante quanto o desenvolvimento tecnológico. Faz-se necessário um maior incentivo para que novas pesquisas sejam realizadas a fim de viabilizar o processo de recuperação das matérias-primas presentes na sucata eletrônica, que são descartadas diariamente nos aterros, causando uma contaminação do solo e dos recursos hídricos.

Teoricamente, o uso de equipamentos eletrônicos facilita a vida das pessoas, economizando materiais como papel, tinta, combustível e tempo gasto para o deslocamento físico. No entanto, as pessoas devem se conscientizar em relação ao consumo desenfreado, repensando seus hábitos, como por exemplo, utilizar ferramentas ambientais como o 5Rs da sustentabilidade. O planeta é um só e futuras gerações dependeram dele para sobreviverem, portanto, faz-se necessário preservá-lo.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Professora Cecília Monnerat e ao Professor Huita Matozo pelas orientações e suporte técnico durante todo o trabalho de pesquisa. À Universidade do Estado de Minas Gerais (Uemg) pelo financiamento para a realização deste trabalho. E também às lojas “Info Tecnologia” e “Oficina do Micro” pelo material cedido para a realização da pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORSINI, T. A.; GONZAGA, E. A. C. **Recuperação de Metais a partir de Sucatas Eletrônicas**. 2015. Trabalho de conclusão de curso, FaEnge/UEMG, João Monlevade, Minas Gerais.

MORAES, V. T. **Recuperação de Metais Através do Processamento Mecânico e Hidrometalúrgico Utilizando Placas de Circuito Impresso de Celulares Obsoletos**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042011-100037/php>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

Uso do método de contenção tirante com resinas: estudo de caso da Mineração Turmalina

Application of the supporting method rod and resins: case study of Mineração Turmalina

M. A. S. de Freitas^{1,*}; R. P. de Lima²

¹ Geologia/Geotecnia e Mecânica das Rochas, Mineração Turmalina Ltda., Conceição do Pará-MG, Brasil

² Departamento de Ciências Sociais, Humanas, Letras e Arte, Universidade do Estado de Minas Gerais, idade João Monlevade - MG, Brasil.

*miguelsabinof@gmail.com

Resumo

Nos empreendimentos que realizam aberturas subterrâneas geralmente são aplicados métodos de suporte para mantê-las estáveis e seguras. Um desses é o método de **suporte tirante com resinas**, que tem como objetivo principal impedir a movimentação do maciço rochoso que envolve a galeria. O caso estudado neste trabalho foi o da Mineração Turmalina, empresa do grupo Jaguar Mining inc., no qual foram identificadas algumas falhas de capacidade de carga a partir das quais foram realizadas análises para o aprimoramento da eficiência de carga do método de contenção. Foram analisadas várias aplicações desse método, em três aberturas e testado um percentual representativo dessas aplicações. Nas amostras foram constatados possíveis erros relacionados aos procedimentos de instalação de tirantes permitindo encontrar a principal causa das falhas de resistência do método, o tempo de operação.

Palavras-chave: Tirantes com resina, métodos de suporte, capacidade de carga.

.....

The enterprises that have make underground openings usually have to applicate methods of contention to keep it stable and safe. One of these methods is the support rod with resin, whose the main purpose is preventing movement of the rock mass that wrap the gallery. In the Turmalina's mine, Group Company Jaguar Mining inc., this method showed some failures in its load capacity. In order to analyze it, this study was proposed by several applications of this method that had analysed in three slots. A representative percentage of these applications were tested and possible errors were noticed, eventually, related to how some rods have been installed. It allowed to figure out the root cause of failures resistance of this method, the uptime.

Keywords: Rod and resins, support method, load capacity.

1 INTRODUÇÃO

Na mineração subterrânea, um dos fatores mais críticos é a manutenção da estabilidade da escavação e a segurança de seus colaboradores. Grande parte das aberturas é realizada em espaços confinados compostos por rochas, fraturas e água, denominados maciços rochosos. O fato destes serem formados a partir de fatores naturais impede o conhecimento pleno de sua composição material e seu comportamento ao receber influência de fatores externos.

Por esse motivo a geotecnia, principalmente quando relacionada à mecânica das rochas, constitui uma área da mineração muito complexa e exige do profissional uma atenção maior para garantir a vida útil do projeto e a integridade de seus colaboradores. O fenômeno principal tratado por essa área em escavações subterrâneas é o comportamento dos maciços rochosos que se traduz nas modificações ocorridas no local após a realização da abertura.

Para controlar as movimentações e mudanças num maciço rochoso são utilizados vários métodos de contenção e suporte. Neste trabalho foi analisado um dos métodos de suporte mais usados, denominado **Tirante com Resinas**. Este método tem como objetivos de fixar as porções de rocha em torno da galeria, gerar um estado de tensão no maciço rochoso e evitar o colapso da estrutura da abertura subterrânea. Esse método de contenção consiste basicamente em um tirante (barra de aço laminado a quente com seção transversal oval) inserido na rocha com cartuchos de resina de poliéster que ao ser aplicado se integra ao maciço.

Após a realização da abertura e da contenção necessária, ao longo da vida útil de uma abertura subterrânea são feitos monitoramentos geotécnicos que estabelecerão se os meios de suporte estão atuando de maneira eficiente em cada local aplicado. Um tipo de monitoramento realizado são os testes de tração utilizando um macaco hidráulico. Este teste promove o tracionamento dos métodos de contenção e verifica sua real capacidade.

Este estudo teve como objeto de análise a experiência da Mineração Turmalina Ltda, pertencente ao grupo Jaguar Mining Inc. Nesta empresa, uma das contenções utilizadas na mina é o tirante com resinas. Após submeter vários tirantes a testes de tração, constatou-se que uma parte considerável deles cedeu com uma carga inferior à capacidade de 22 Toneladas força (Tf) definida pelo fabricante - DSI FosMinas.

Experimentalmente, foram realizados testes de capacidade em alguns tirantes já aplicados nas galerias da Mineração Turmalina. Por meio de tracionamento realizado com um macaco hidráulico, constatou-se que uma parte dos tirantes fixados rompia sua liga com o furo na rocha antes de alcançar a capacidade tolerável de 17 Tf. Esta ineficácia do método potencializa os riscos de acidentes nos trabalhos do ambiente subterrâneo.

Portanto, um dos objetivos desse estudo foi identificar os motivos que estariam gerando a ineficiência desse método e, para tanto, foram necessários monitoramentos na aplicação dos tirantes e testes de tração. Isto resultou na geração de dados que condicionam a realização do objetivo de identificar, entre outros, falhas humanas, erros no dimensionamento do método e nas atividades operacionais. E como resultado final, objetivou-se sugerir o aprimoramento na aplicação e utilização da contenção tirante com resinas.

2 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado como um estudo de caso da Mineração Turmalina Ltda, empresa pertencente ao grupo *Jaguar Mining Inc.*, localizada na cidade de Conceição do Pará (MG), de exploração subterrânea. Teve como objetivo principal colher dados e analisar as características geotécnicas particulares da mina que decorreu um trabalho aplicado de supervisão de todo o processo de perfuração da galeria, instalação do tirante com resinas, método utilizado pela empresa para contenção e suporte da galeria e testes de tração utilizando macaco hidráulico para a verificação da real capacidade de suporte do método tirante com resina.

Devido à fragilidade do método de tirante de resina para contenção e suporte da galeria da mina em estudo, constatada após alguns tirantes instalados na galeria terem sido submetidos a testes de tração e ter sido observado que uma parte considerável dos mesmos cedeu com uma carga inferior à capacidade definida pelo fabricante - 17 toneladas de rocha por tirante -, as análises tratadas neste trabalho ficaram concentradas no monitoramento da aplicação dos tirantes e nos testes de tração para a geração de dados que tornassem possível a identificação de falhas durante a operação da mina, decorrentes da conduta humana, de erros de dimensionamento do método e/ou de processos operacionais.

A partir de então, tornou-se possível apontar os motivos que estariam gerando a ineficiência desse método e propor possíveis soluções para os problemas.

Para realização desse trabalho foi necessária uma pesquisa bibliográfica em trabalhos de referência no campo de estudo de **Mecânica de Rochas** como, por exemplo, *Rock Mass Rating* de Z. Bieniawsky de 1969, (BIENIAWSKI, 1973), o *Q System* de N. Barton, R. Lien, e J. Lunde de 1974 (BARTON; LIEN; LUNDE, 1974), e o *Rock Quality Designation* de Don U. Deere de 1968 (DEERE, 1968). Estes estudos configuraram uma base científica para outros autores e estudiosos, como Diogo B. Brandani, B. H. G. Brady e G. E. T. Brown, além de E. R. Goodman que desenvolveu seu trabalho *Introduction to rock mechanics* (GOODMAN, 1989). Outro trabalho de referência adotado neste estudo é *Introdução à Mecânica das Rochas* de Izabel C. D. Azevedo e Eduardo A. G. Marques (AZEVEDO; MARQUES, 2002).

O método tirante com resinas, citado anteriormente, é um método de suporte imediato, ativo ou passivo, que se trata de uma ancoragem química, e tem como vantagem, alta flexibilidade, o que evita a perda de protensão causada pelas vibrações de detonação, alta resistência à corrosão e alta capacidade, acima de 17 Tf. Já como desvantagens, é um método oneroso, que necessita de treinamento para aplicação, estocagem adequada do material, como lembra (SILVA, 2010).

Na Mineração Turmalina Ltda o método usado resume-se em um suporte para galerias subterrâneas que consiste em um tirante de aço, fornecido pela empresa DSI FosMinas e denominado Sistema *Saferock*. Este sistema é introduzido ao furo, feito por jumbo e sua introdução é antecedida pela inserção de 2 cartuchos de resina fornecidos pela mesma empresa. Trata-se de um tirante helicoidal usado em galerias de desenvolvimento primário, que ocorre na rampa principal e acessos permanentes, ambos localizados fora do corpo de minério. Estes são alocados com espaçamento de 1,5 m x 1,5 m, em malha estagiada (pé de galinha). Cada tirante resiste à carga de ruptura de 22 Tf.

Ao ser rotacionada no furo, a barra de aço rompe o cartucho de resina e inicia a reação de enrijecimento desta, que resultará na liga entre o tirante e a parede do furo. Ao longo da secagem da resina realiza-se a protensão dos tirantes. Esse procedimento tem a

função de controlar os níveis de tensão do maciço, que foram reduzidos a zero ao realizar-se a abertura. Após sua secagem, essa operação tem o objetivo de conter a queda de blocos instáveis de rocha (choco), manter a estabilidade do maciço e segurança dos colaboradores que fazem parte do empreendimento.

2.1 Aplicação do Sistema *Saferock* e cartuchos de resinas

O Sistema *Saferock*, de acordo com a empresa distribuidora, é constituído por 3 componentes principais, um vergalhão com seção transversal oval de 22 - 24 mm de diâmetro e 1,8 m de comprimento e composto por aço laminado. Este é todo torneado como um parafuso e em sua extremidade externa ao furo possui uma porca soldada. Esta permite a rotação da barra usando uma parafusadeira pneumática. Após esse procedimento uma rosca é apertada prendendo uma chapa de aço à parede da galeria, como é demonstrado na [Figura 1](#). Esses dois últimos componentes resistem à tração realizada pelo bloco de rocha.

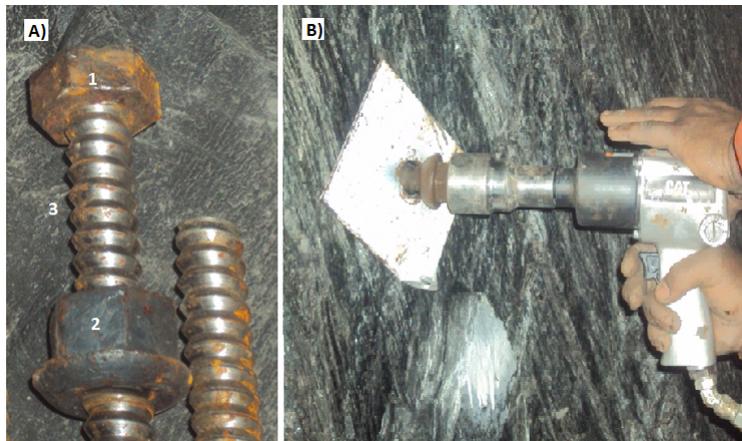


Figura 1 – Sistema *SafeRock* e método de aplicação. a) Extremidade externa do sistema *Saferock* (direita), composto por uma porca soldada (1), parafuso (2) e tirante helicoidal (3); b) Aplicação do tirante, rotacionando-o usando parafusadeira pneumática. Fonte: [MINERAÇÃO... \(2013\)](#).

A resina usada nesse processo de contenção é um produto embalado em um cartucho da mesma empresa. Ao secar englobando o tirante *SafeRock*, a resina atua como uma liga que o prende as paredes do furo ao qual foi introduzido. Essa ação faz com que ela atue como uma resistência contrária à tração da rocha, evitando a queda do bloco. Ou seja, a porca resiste ao esforço à tração em um sentido e a resina presa ao furo resiste ao sentido contrário ancorando o bloco de rocha ao maciço. A DSI Fosminas define que cada cartucho contém uma pasta de resina de poliéster e um catalisador pastoso, em quantidades balanceadas, separados por uma fina película que funciona como uma barreira físico-química e evita sua interação.

São utilizadas em cada furo 2 resinas com velocidade de pega rápida (PR) introduzidas no fundo do furo. Essa é assim denominada porque logo após o início do rotacionamento do sistema o cartucho é rompido e os catalisadores promovem o início de pega da resina em 30 segundos, seguindo pelo o início de endurecimento em 1,5 minutos. Também são posicionadas 2 resinas de pega lenta (PL), introduzidos na coluna, respectivamente com tempos de início pega em 1,5 min. e de endurecimento em 45 min. Após a introdução destas manualmente, o sistema *Saferock* é colocado sem que atinja os cartuchos de PR. Por

meio de uma porca soldada na extremidade externa do sistema, a haste é rotacionada e empurrada até o fundo do furo durante uma média de 30 segundos, como está demonstrado na Figura 1. Este tempo é definido com uma margem de tolerância em torno de 5s. s, sendo que a partir dos 30s começa o início de pega da resina, ou seja, se inicia o enrijecimento da resina no fundo do furo. A rotação é feita através de uma parafusadeira pneumática ou elétrica, no trabalho em questão foi usada uma pneumática.

Assim que a placa é parafusada até o limite da parte externa do tirante, deve-se fazer a protensão dele. A protensão consiste em introduzir um estado prévio de tensões, através de uma compressão prévia na peça de modo a melhorar o seu comportamento e sua resistência. Na aplicação do tirante com resinas esse estado de tensão é gerado ao se aplicar um torque neste de 3 a 12 minutos, depois da secagem da resina PR e enquanto a PL estiver ainda inconsolidada. Essa etapa tem grande importância, pois além de promover o confinamento dos blocos do maciço pode-se averiguar se a operação foi eficiente e o tirante está suportando a carga. A partir desta operação, o tirante se torna ativo, ou seja, passa a realizar uma tensão induzida no maciço.

O transporte e armazenamento dos materiais utilizados no atirantamento devem ser feitos de forma adequada, o sistema *Saferock* deve ser estocado em local onde não possa ocorrer a oxidação e demais danos físicos como sua quebra. Já nos cartuchos de resina, além do estoque, o transporte pode danificar a película que separa o catalisador da pasta de resina de poliéster, e este contato dos dois materiais inicia o processo de secagem, o que torna o cartucho inutilizável.

2.2 Testes da capacidade de tração

Nas contenções utilizadas na Mineração Turmalina são feitos testes de tração para atestar sua eficácia e comprovar que o tirante está correspondendo a sua função de ancoragem. Para isso, utilizando um macaco hidráulico os tirantes são tracionados e o equipamento é elevado a uma carga aceitável de resistência, 17 Tf.

Como procedimento de teste, o parafuso soldado à extremidade externa do tirante é serrado e é rosqueado um prolongador a este, com o intuito de fixar o macaco hidráulico ao tirante (Figura 2). Uma luva e calços realizam o apoio do sistema à parede da galeria. Com a instalação do sistema o macaco hidráulico é bombeado e traciona a contenção até alcançar a capacidade tolerável de 17 (Tf).

2.3 Definição da malha de tirantes

Na Mineração Turmalina a cada avanço da frente de desenvolvimento é realizada a instalação de duas fileiras de tirantes, com espaçamento de 1,5m entre eles. Este procedimento foi definido após detalhada análise geotécnica do maciço.

2.4 Classificação de Maciços Rochosos

A classificação dos maciços é realizada por vários parâmetros e técnicas que definirão os sistemas de contenções necessários, o tempo de vida útil da galeria, a resistência do maciço aos efeitos causadores de rupturas, as tensões existentes e necessárias para evitar movimentações inaceitáveis.

Segundo Lima (2006) “o maciço é composto pela rocha sã, descontinuidades (fraturas), água e os estados de tensão”. Cada um possui diferentes porções nas quais não

Ferramentas utilizadas no teste de arrancamento em Tirantes

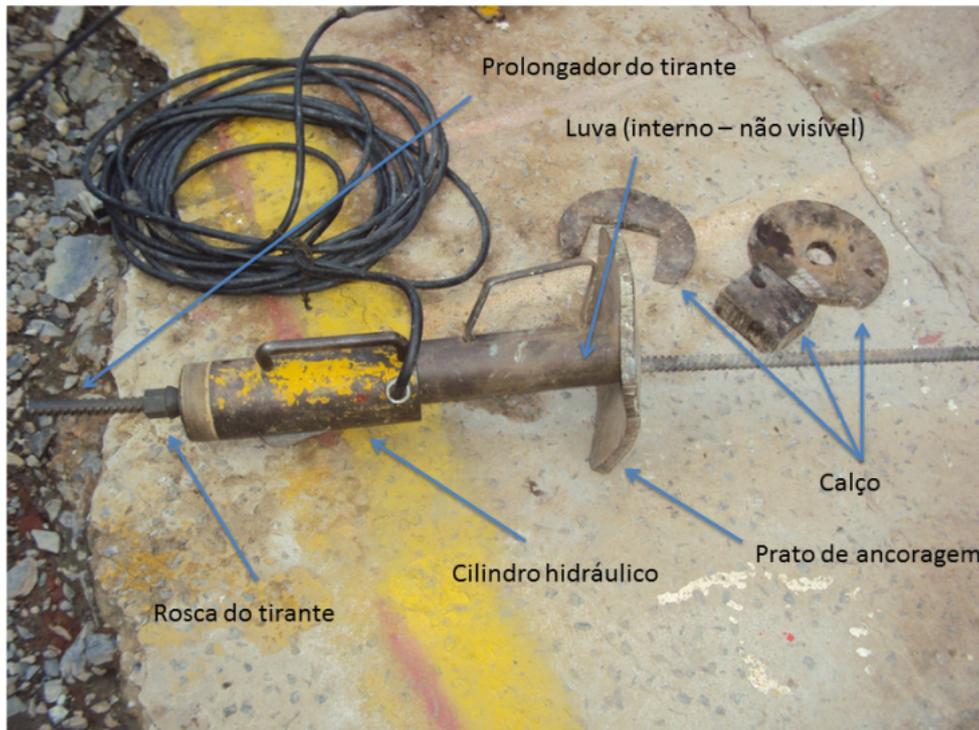


Figura 2 – Teste de tração utilizando macaco hidráulico. Fonte: MINERAÇÃO... (2013).

se pode definir como regra as características e classificação de uma determinada parte, havendo muitas variações quanto às famílias de descontinuidades, aos seus preenchimentos, a presença de água, à rugosidade, às tensões principais, aos modos comuns de ruptura etc.

Por essas variações a ideia principal na classificação de maciços é dividi-lo em blocos de rocha que possuem comportamento e características similares e aceitáveis ao serem expostos a esforços comuns como perfuração, desmonte e movimentações de equipamentos.

Há vários sistemas de classificação geomecânicas, mas para estudos de minas subterrâneas os mais utilizados são o *Rock Quality Designation* (RQD), o *Rock Mass Rating System* (RMR) e o *Rock Tunneling Quality Index* (*Q System*).

O *RQD* proposto por Deere (1968) é um sistema de classificação para maciços muito usado nos estudos de **Mecânica de Rochas**, principalmente por sua simplicidade e aplicabilidade. Ele consiste na análise de descontinuidades a partir do testemunho de sondagem, nas quais se considera apenas as interseções entre fraturas maiores que 10 cm para se calcular a porcentagem dessas em relação ao todo. O *RQD* é uma análise primária e simples já que leva em consideração apenas o espaçamento entre fraturas, deixando de lado muitas outras variáveis relacionadas à estabilidade do maciço, entretanto, muitas vezes essas são as únicas informações prontamente disponíveis em locais de mineração. (MILENE; HADJIGEORGIOU; PAKALNIS, 1998).

Os outros dois sistemas mais utilizados em minas canadenses, por exemplo, são o *Q System* do Instituto Norueguês de Geotecnia (BARTON; LIEN; LUNDE, 1974) e as diferentes versões do *RMR*, originalmente proposto por Bieniawski (1973). Ambos os

sistemas utilizam o *RQD* como um dos seus parâmetros constitutivos e têm evoluído ao longo do tempo para melhor consideração da influência de vários fatores do maciço rochoso na estabilidade da escavação. (MILENE; HADJIGEORGIOU; PAKALNIS, 1998).

O *RMR* é um sistema de classificação de maciços formulado por Bieniawski em 1969 com objetivo encontrar o *stand up time* da galeria, ou seja, o tempo que a abertura permanecerá estável sem que seja aplicados métodos de reforço. Foi criado, inicialmente, para ser usado em projetos de túneis, mas ao longo dos anos foi sofrendo modificações para ser utilizado em minas e passou a considerar alguns fatores como mudança de tensões, por exemplo.

No sistema *RMR* os parâmetros principais utilizados para classificação do maciço são a **resistência à compressão uniaxial da rocha**, os dados do *RQD*, os espaçamento e condição das descontinuidades e a presença de água.

O *RMR* é organizado em 4 etapas: na primeira são atribuídos valores fixados ao longo dos anos a cada característica analisada, esses valores são distribuídos de acordo com 5 parâmetros de classificação do maciço (resistência das rochas, dados do *RQD*, o espaçamento médio das descontinuidades, as condição das descontinuidades, e a presença de água). Na segunda etapa são feitos ajustes de acordo com a direção e o mergulho das fraturas em cada caso relacionado a utilização do teste, ou seja, para galerias, fundações ou taludes. Na terceira é gerada a classificação do maciço baseada em sua pontuação. E, por fim, na quarta etapa obtém-se o tempo de autossustentação do vão aberto com base na classe definida na terceira etapa.

Após a análise de *RMR*, considerando todos os demais parâmetros, relaciona-se a análise ao vão da abertura e se define o *stand up time*, de acordo com o ábaco da [Figura 3](#) a seguir.

O *Q System* foi umas das primeiras metodologias desenvolvidas para classificação de maciços e sofreu poucas modificações ao longo do tempo. Ela configura um sistema de classificação que tem o objetivo de identificar a instabilidade da galeria e o suporte a ser utilizado para diminuir as movimentações no maciço e preservar a abertura com segurança até o fim de sua vida útil.

O valor encontrado por meio do *Q System* será relacionado a um diâmetro equivalente para a definição do método de contenção a ser usado na abertura. Esse diâmetro é representado pelo D/ESR que, de acordo com [Brandani \(2011\)](#), “ D é o diâmetro ou vão da escavação (m) e ESR (*Equivalent Support Ratio*) é o fator de segurança em função do uso final da escavação”. A partir dessas definições pode-se relacionar o tamanho do vão da escavação considerando que quanto maior o diâmetro da abertura, menor a segurança e mais eficaz deve ser o suporte utilizado para manter a estabilidade.

A partir do diâmetro equivalente e valores de Q , através da utilização do ábaco proposto por [Brandani \(2011\)](#) ([Figura 4](#)), define-se a contenção necessária e seu espaçamento ou espessura. Essa análise é a base para todo sistema de suporte e reforço que apesar de ser muito criteriosa deve contar bastante com a expertise do profissional responsável, já que devem ser levados em consideração vários acontecimentos atípicos dos quais não se tem representação matemática como tratado em Barton, Bienawski e demais estudiosos.

No caso estudado da Mineração Turmalina, a classificação do maciço foi calculada por meio do *Q System* que o definiu como **regular** que corresponde aos valores de Q entre 4 e 10. Neste caso pode-se observar que com vãos medidos de 3,7 m a 5 m e considerando um $ESR = 1,6$, obteve-se um diâmetro equivalente a um intervalo de 1,9 m a 4 m, considerando

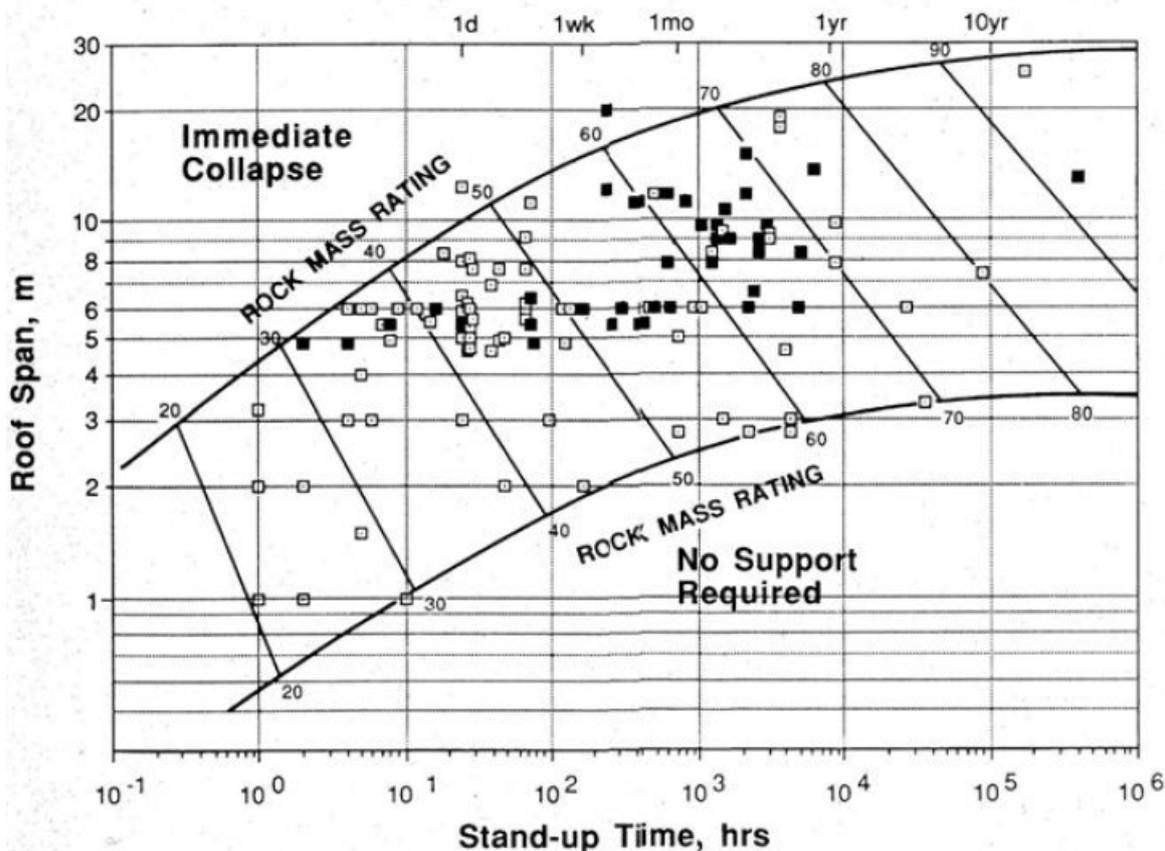


Figura 3 – Determinação de auto suporte para galerias, baseado no RMR, abertura do vão e stand up time. Fonte: Brandani (2011).

um Q estimado entre 4 e 10, o espaçamento entre tirantes seria de 1,5 m sem utilização de concreto projetado.

2.5 Testes experimentais

A partir da ocorrência de falhas na capacidade de carga no método de contenção, se iniciou, ao longo de 3 semanas, um trabalho na empresa a fim de monitorar e fazer um acompanhamento das aplicações e testes dos tirantes.

Sendo a instalação feita de modo manual e adotados os devidos procedimentos técnicos, o monitoramento consistiu em cronometrar o tempo de aplicação, observar o modo de aplicação, analisar as condições do material utilizado e a atitude dos operadores ao realizarem a tarefa. Ao longo do monitoramento de 32 aplicações, 12 foram analisadas por testes de tração, por motivos de segurança, já que as demais tinham altura superior a 1,5 m que impediu o procedimento do teste de tração.

Em cada aplicação foram observadas as ações e acontecimentos típicos, como um hábito do operador, e atípicos, como uma falha mecânica. Os eventos considerados inadequados pelo procedimento de aplicação do método podem ser classificados da seguinte maneira:

- **Alto, baixo tempo de aplicação:** a aplicação do tirante deve ser realizada em 30

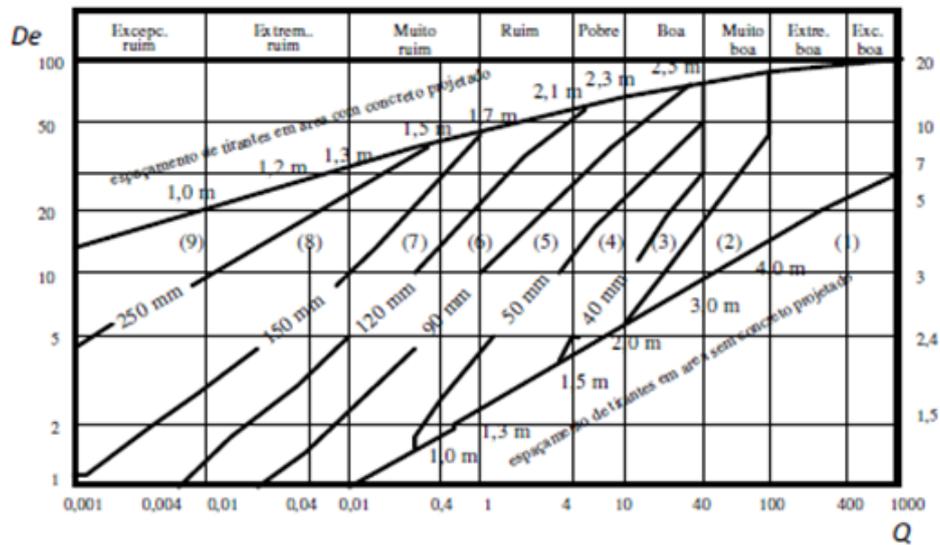


Figura 4 – *Categorias de suporte para aberturas subterrâneas: 1) Sem suporte; 2) Tirantes curtos localizados; 3) Sistema de tirantes; 4) Sistema de tirantes com concreto projetado de 40-100mm; 5) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 50-90mm, e com tirantes; 6) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 90-120mm, e com tirantes; 7) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura > 150mm, reforçado com arcos de concreto e tirantes. Fonte: Brandani (2011).*

segundos, tempo estabelecido pelo fabricante como o início de pega da resina de pega rápida (PR), por isso não deve ser ultrapassado, considerando-se uma tolerância de 5s em média, a partir desse tempo é considerado inaceitável. Já o baixo tempo de aplicação dificulta a homogeneização total das resinas com seus catalisadores e sua interação com o Sistema *Saferock*.

- **Falha na parafusadeira pneumática:** como a aplicação foi feita com a parafusadeira pneumática na Mineração Turmalina, uma falha dela diminuiu o tempo de rotação do sistema, conseqüentemente reduziu a homogeneização da resina.
- **Inserção da resina PR usando a extremidade do tirante:** ao se colocar o cartucho de pega rápida (PR) usando o tirante que possui uma das extremidades pontiagudas, pode-se perfurá-lo ou danificar a película que separa a resina do catalisador, iniciando o seu processo de enrijecimento e passando a ser contado a partir deste momento os 30s de aplicação e diminuindo seu tempo de rotação, sendo que o sistema não está completo para o procedimento.
- **Falha do cronômetro:** durante algumas aplicações houve falha no cronômetro, o que impediu o registro do tempo exato, mas inferido, no tirante 21 em, aproximadamente, 30s e no tirante 27 em, aproximadamente, 28s, com base no relógio do operador.
- **Instalação do tirante paralelo a foliação:** ao se aplicar o sistema paralelo à foliação da rocha, no caso o Xisto, este não atua como suporte, sendo indicada sua aplicação perpendicular a para que o método seja eficiente. Por não haver projeto individual de posicionamento dos tirantes, esse procedimento exige maior atenção do operador que realiza a perfuração.

- **Instalação incompleta de todo o comprimento da haste:** Em alguns procedimentos, por algum desvio na perfuração ou bloqueio no furo, após a checagem do mesmo, não foi possível introduzir todo o tirante, isso foi observado em alguns testes, como no caso do n° 32 que teve 50 cm de sobra da haste que mede 1,8 m, ou seja, mais de 25% da barra não foi aplicada, isso reduz a eficiência do sistema já que essa parte externa não atua como ancoragem.

Além do tempo de instalação e as observações feitas, uma grande variável desse processo de atirantamento é o volume do Sistema *Saferock* e resinas PR e PL, quando comparado ao volume do furo ao qual é introduzido. O preenchimento deste é um fator importantíssimo pois representa um dos determinantes do contato das resinas, tirante e superfície do furo. A relação entre esses 3 fatores é fundamental para a total eficiência do método. Essa comparação volumétrica está descrita na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – *Comparação Volumétrica.*

Componentes medidos	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Comprimento (mm)	Volume (mm ³)
Resina	25	490,9	450	220893,3
Tirante ovalizado	20 e 24	377,0	1800	678583,8
Furo Bit 38	38	1134,1	1900	2154818,5
Furo Bit 35	35	962,1	1900	1828014,7
Furo Bit 32	32	804,2	1900	1528071,2
Volume do sistema Saferock + 4 Resinas (mm ³)			1562157	
Diâmetro do furo	Volume dos furos (mm ³)	% Preechida pelo volume do tirante instalado		
Furo Bit 38	2154818,5	72,5		
Furo Bit 35	1828014,7	85,5		
Furo Bit 32	1528071,2	102,2		

Na [Tabela 1](#) foi feita uma comparação baseada nas dimensões especificadas pelo fornecedor do Sistema *Saferock* e resinas, DSI Fosminas, em relação às dimensões do furo com bit 38 mm realizado na Mineração Turmalina e outros dois, com os bits de diâmetros 35 mm e 32 mm.

Foi constatado que utilizando o bit 38, ao ser aplicado, o sistema ocupa apenas 72,5% do volume total do furo, o que corresponde a um baixo percentual. No bit 35 ocuparia 85,5% e no bit 32, o volume do sistema seria superior ao do furo, correspondendo a 102% do preenchimento. O cálculo é feito sem levar em consideração a existência de fatores que não foram considerados teoricamente, mas que na prática podem alterar o resultado da operação, como os parachutes, possíveis resíduos da perfuração, partes da embalagem, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 12 testes selecionados das 32 aplicações apresentam características diversas, tendo em cada um deles observações comuns no cotidiano da operação, como as descritas anteriormente e relacionadas na tabela 2 com as respectivas cargas de resistência. Por

estas, e o tempo de aplicação ser bem variado, o resultado dos testes se tornaram bastante representativos.

Tabela 2 – Resultados dos testes de tracionamento.

Tirantes	Observações	Tempo (s)	Carga (Tf)
1	Baixo tempo de aplicação	21	10
2	Baixo tempo de aplicação	16	2
3	Baixo tempo de aplicação	23	17
4	Sem observações relevantes	27	17
5	Parafusadeira falhando/ baixo tempo de aplicação	21	13
6	Parafusadeira falhando/ baixo tempo de aplicação	25	17
7	Parafusadeira falhando/ alto tempo de aplicação	37	17
8	Revolver falhando/ tempo acima do aceitável	54	4
9	Resina PR empurrada usando o tirante/ Cronômetro falhou, tempo aprox. 30 s	30	17
10	Resina PR empurrada usando o tirante/ Tirante paralelo a foliação s	47	13
11	Resina PR empurrada usando o tirante/ Cronômetro falhou, tempo aprox. 28 s	28	17
12	Resina PR empurrada usando o tirante/ Sobrou aprox. 50 cm de haste	44	7

A tabela [Tabela 2](#) demonstra que do total de 12 tirantes analisados, 50% cederam abaixo da capacidade e 1/3 do total rompeu com carga inferior a 11 toneladas. Considerando o tempo como determinante para a eficiência dos tirantes, foi gerado o *Gráfico da Figura 5* que contribui para tornar a experiência mais clara, já que nele são representados vários tempos inferiores e superiores a 30 segundos. Esse tempo de aplicação é determinado pelo fabricante como início de enrijecimento da resina e utilizado pela Mineração Turmalina como tempo de aplicação.

No gráfico acima pode-se observar que os tempos variaram de 16 a 54 segundos (eixo x), já a capacidade de carga a qual os tirantes resistiram variaram de 2 a 17 Toneladas força (eixo y), sendo o segundo valor o correspondente ao limite que comprova a eficiência do tirante. Observando a dispersão dos pontos na área do gráfico, pode-se notar que, em relação ao tempo, os tirantes aplicados entre 23 e 37 segundos resistiram a 17 toneladas no teste, já os demais seguiram relativamente uma tendência, considerando que quanto mais o tempo se afasta dos 30 segundos estabelecidos no procedimento, menor é a carga suportada em cada tirante. O único tirante que não seguiu esta tendência foi o número 32, no qual houve um erro de aplicação e, aproximadamente, 50 cm de haste ficou externa ao furo, o que pode agravar a eficiência do método. Nos demais, o fator determinante foi o tempo, pela análise dos resultados obtidos.

4 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Após expor possíveis variáveis responsáveis pela falha no sistema de suporte tirante com resinas ficou definido o tempo de aplicação como o problema principal. Entretanto, não podem ser desconsiderados os demais fatores irregulares observados nas aplicações dos tirantes testados. Pode-se inferir que erros de operação estejam ocorrendo nesse

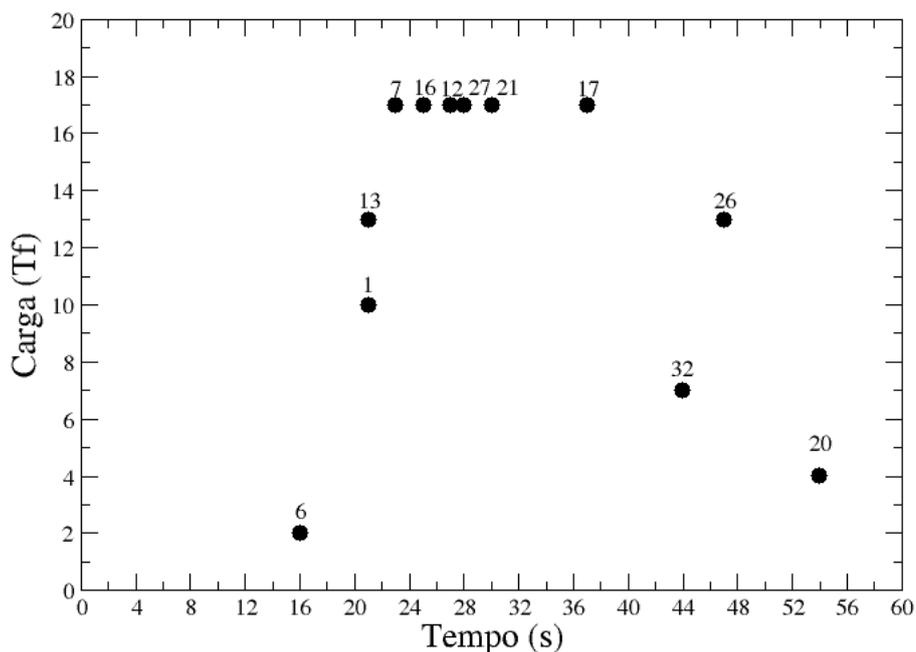


Figura 5 – Relação entre o tempo de aplicação da carga aplicada aos tirantes e a Carga de resistência dos tirantes. Fonte: elaboração própria (2013).

procedimento e que não estão apenas relacionados ao tempo de rotação do Sistema *Saferock* e cartuchos de resinas e, sim, as várias etapas do procedimento que abrangem desde falhas mecânicas dos equipamentos utilizados, como a parafusadeira, até o modo como o tirante é introduzido no furo.

Outro fator a ser considerado é a diferença volumétrica do furo comparado ao Sistema *Saferock* e os quatro cartuchos de resina, material usado em cada aplicação. Essa diferença foi analisada e permitiu que se observasse que com a utilização do bit 38, apenas 72,5% do furo foi preenchido quando o sistema foi instalado. Segundo [Silva \(2010\)](#) o método tirante com resinas é utilizado em furos de 26 a 34 mm, por essa relação e o baixo percentual de preenchimento, pode-se concluir que o furo de 38 mm pode ter volume e diâmetro excessivo para a instalação do sistema.

Ao se chegar a tais resultados e encontrar os possíveis erros na utilização desse método de suporte, foram sugeridas mudanças e novos procedimentos que terão o objetivo de otimizar esse processo e evitar que tais erros continuem a ocorrer.

Atestando a ocorrência de erros de operação, a primeira sugestão foi o treinamento das equipes de instalação dos tirantes, do operador da parafusadeira, da plataforma e dos auxiliares. Estes, após treinamento, devem seguir as normas do procedimento, como tempo e modo de aplicação. Como nem todas as equipes foram testadas neste estudo, as que estão precisando de treinamento, podem ser identificadas atribuindo uma cor a cada equipe, esta será marcada no tirante com spray. Ao se aplicar o método e ao longo da realização dos testes de tração, às equipes que executarem o atirantamento com baixa capacidade de

carga será proposto um treinamento com os procedimentos definidos pelos responsáveis da área mecânica de rochas da Mineração Turmalina.

Como foi possível ser observado neste trabalho, houve um tirante aplicado paralelo à foliação, o que gerou uma baixa capacidade do mesmo. Pode ser uma sugestão viável a complementação do curso de capacitação dos operadores de jumbo com conteúdos relacionados à geologia da mina, evitando a ocorrência de outros tirantes instalados da mesma forma e outros erros relacionados a questões geológicas. Esse complemento formalizaria o conhecimento que o operador agrega no cotidiano das atividades mineiras.

E em relação à diferença volumétrica, foi proposto à empresa que realizasse experimentos de aplicação do método de tirantes com furos de menor volume, utilizando bit 35, 34 e 33 mm, já que foi comprovado que o de 32 mm não comporta o sistema, tendo volume menor que este. Ao aplicá-los e levá-los a testes pode-se avaliar se essa diferença volumétrica pode ser a causa do rompimento de algumas aplicações.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução à mecânica das rochas**. Viçosa: Editora UFV, 2002.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for design of tunnel support. **Springer-Verlag**, Springer-Verlag, v. 6, p. 189–236, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. **The Civil Engineer in South Africa**, p. 335–343, 1973.

BRANDANI, D. B. **Estudo do comportamento geomecânico dos pilares esbeltos modelados em rocha dura na bacia do corpo 1, Mina Nova - Crixás/GO**. 2011. Tese (Tese de Doutorado) — UFOP, Ouro Preto - MG, 2011.

DEERE, D. U. **Geological considerations: rock mechanics in engineering practice**. 1968.

GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley e Sons, 1989.

LIMA, A. A. **Classificação de maciços rochosos: modos de ruptura em minas subterrâneas**. [S.l.], 2006.

MILENE, D.; HADJIGEORGIOU, J.; PAKALNIS, R. Rock mass characterization for underground hard rock mines. **Tunnelling Association of Canada Annual Publication**, 1998.

MINERAÇÃO TURMALINA LTDA. 2013. Relatórios da empresa.

SILVA, J. M. **Estabilidade de Escavações Subterrâneas**. 2010.

A irradiação com cobalto-60 e o tratamento térmico no processo de beneficiamento do quartzo hialino

The Green Gold: Irradiation with Cobalt-60 and Heat Treatment in Beneficiation Process of Hyaline Quartz

B. L. A. de Oliveira,^{1,*}; S. R. Barcelos²; F. N. de J. Guedes³

¹ Graduanda em Engenharia de Minas, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

² Colégio Universitário Padre de Man, Coronel Fabriciano - MG, Brasil.

³ Departamento de Ciências Exatas Aplicadas e dos Materiais, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil

*email@conta.com.br

Resumo

O Brasil é um importante exportador de gemas, no entanto parte dos minerais é comercializado em sua forma bruta, sem nenhum tratamento, tornando-as um produto de baixo valor econômico. Essas gemas recebem no exterior diversos tipos de tratamento e ao retornarem ao Brasil apresentam preços bem mais elevados. Os cristais de Quartzo, por exemplo, quando submetidos à irradiação, podem ter sua cor alterada para fumê devido à presença elevada de Alumínio e Lítio em sua composição. Após o processo de irradiação, com a exposição da gema a altas temperaturas é possível obter a tonalidade verde-amarelada, conhecida comercialmente como *green gold*. Esta variedade possui um valor muito mais elevado, no mercado de joias, do que gemas de quartzo hialino. Para este estudo foram irradiadas e aquecidas em forno tipo mufla, amostras de Quartzo Hialino, pertencentes a Santa Maria do Suaçuí, Corinto, Diamantina, região de Governador Valadares a Araçuaí. As doses de radiação e temperatura de aquecimento foram medidas através da análise dos espectros gerados pela Espectroscopia de absorção na região do infravermelho, utilizando a técnica de Transformada de Fourier – FTIR.

Palavras-chave: Tratamento de Gemas, Quartzo, Irradiação.

.....

The Brazil is an important exporter of gems, but parts of these minerals are sold in its raw form, without any treatment, making them a product of low economic value. These gems receiving outside many treatment and return to the Brazil with prices much higher. The quartz crystals, for example, when subjected to irradiation, can changed its color to smoky, due to the presence of lithium and aluminum. After the irradiation process, with the exposure of the gems to higher temperatures, it is possible to obtain the color green-yellowish, commercially known as green gold. This variety has a highter value ,on the jewelery market than Hyaline Quartz gems. For this study were irradiated and heated in a muffle furnace, Hyaline Quartz belonging to Santa Maria do Suaçuí, Corinth, Diamantina, Governador Valadares region and Araçuaí. Radiation doses and heating temperature were measured by analysis of spectra generated by absorption spectroscopy in the infrared, using the Fourier transform technique - FTIR.

Keywords: Treatment of Gemstones, Quartz, Irradiation.

1 INTRODUÇÃO

O Quartzo é um mineral muito simples e comumente encontrado na natureza. Composto, quando puro, de um átomo de Silício (Si) e quatro átomos de oxigênio (O), ele é incolor e recebe o nome de Quartzo Hialino, para esta variedade transparente. Sua coloração pode variar para verde, azul, rosa, branco e outras cores, devido a presença de impurezas, que são íons metálicos de elementos como: lítio, potássio, alumínio e ferro.

Atualmente, é possível modificar a coloração do quartzo hialino transparente para verde-amarelado variedade que é conhecida como *green gold*. Para isso, é necessário submeter as gemas do mineral a uma fonte de radiação gama com Cobalto-60 e em seguida expor a gema a uma temperatura por volta de 300 °C. Este processo é um método novo cujo objetivo, além de alterar a coloração do quartzo hialino, é elevar o seu preço no mercado, uma vez que gemas *green gold* possuem um valor muito superior a gemas incolores, no mercado de joias.

A alteração da cor do quartzo através da irradiação gama permite que gemas de quartzo hialino [incolor], após serem irradiadas adquiram a tonalidade fumê [preta]. A mudança de cor ocorre devido a alguns quartzos de regiões específicas portarem alguns elementos químicos em sua estrutura como a formação de centros de cor causada pela substituição da sílica (Si^{4+}), presente na amostra, pelo alumínio (Al^{3+}) e compensação de carga pelo lítio (Li^+) (CORREA, 2010). Após a irradiação as gemas passam por um tratamento térmico e tem sua cor alterada para verde-amarelada, variedade conhecida comercialmente como *green gold*.

A dose ideal de radiação que deve ser empregada no seu beneficiamento pode ser obtida pela Espectrografia de absorção na região do infravermelho utilizando a técnica de Transformada de Fourier – FTIR. O espectro gerado neste ensaio possui quatro bandas e sabe-se que a segunda banda, situada em 3483cm^{-1} é a responsável pelo aparecimento da cor amarelo – esverdeada [*green gold*] e acastanhada. Nesta banda o alumínio é compensado pelo lítio (ALKMIM, 2012). Quanto maior a segunda banda, maior a probabilidade da gema se tornar *Green Gold*.

Neste estudo foram coletadas gemas de Quartzo Hialino provenientes de diferentes cidades do estado de Minas Gerais: Corinto, Diamantina, Araçuaí, Santa Maria do Suaçuí e da região de Governador Valadares. O objetivo é realizar a irradiação e o tratamento térmico de gemas de Quartzo Hialino, na expectativa que essas gemas tornem-se *Green Gold*.

2 METODOLOGIA

2.1 Aquisição e separação dos cristais

As amostras, utilizadas neste trabalho, são provenientes de dois domínios geológicos presentes no estado de Minas Gerais: Serra do Espinhaço e da província pegmatítica oriental. As amostras da Serra do Espinhaço são oriundas das cidades de Diamantina e Corinto e seu modo de ocorrência consistem em depósitos hidrotermais. Já as amostras da Província Pegmatítica Oriental são oriundas das cidades de Araçuaí, Santa Maria do Suaçuí e da região de Governador Valadares e Peçanha. Seu modo de ocorrência é em depósitos pegmatíticos. A aquisição das amostras, utilizadas no experimento, foi realizada por meio de terceiros e algumas delas a partir de contato direto com depósitos. Após sua aquisição, estas foram separadas conforme sua origem e identificadas pelas numerações dos sacos. As

amostras de Araçuaí foram adquiridas de dois depósitos diferentes, por este motivo estão nomeadas de Araçuaí 1 e Araçuaí 2.

2.2 Espectrografia de absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier — FTIR

A Espectrografia de absorção foi utilizada com o objetivo de calcular a dose de radiação que seria empregada e, indiretamente, o tempo de exposição das gemas a altas temperaturas, uma vez que quanto maior a dose de radiação maior seria o tempo de exposição a temperaturas elevadas.

De acordo com Drumond, Mendes e Lameiras (2010), é possível calcular a dose de radiação e a temperatura de aquecimento com base em análises feita nos espectros, na região da segunda banda, situada em 3483cm^{-1} . Esta banda é a responsável pelo aparecimento da cor amarelo – esverdeada [*green gold*], nesta banda o alumínio é compensado pelo lítio (ALKMIM, 2012).

Os ensaios de espectrometria foram realizados no Laboratório de Espectrometria (LABESPEC) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). O aparelho utilizado foi o NIR MB Series Spectrometers ABB Bomem. Acoplado ao espectrofotômetro estava um computador com o programa United - GRAMS para o tratamento dos dados. A Figura 1 mostra o equipamento utilizado.



Figura 1 – Espectrofotômetro de infravermelho. Fonte: Arquivo pessoal.

2.3 Separação e preparação das amostras para serem irradiadas

As amostras foram separadas em 10 sacos plásticos, recobertos de papel alumínio e posteriormente enroladas em fita adesiva branca e nomeados de acordo com a localidade e a dose de radiação em: saco 1-10KGy, saco 2-10KGy, saco 2-70KGy, saco 3-10KGy, saco 3-70KGy, saco 4-70KGy, saco 4-400KGy, saco 5-70KGy, saco 5-400KGy e saco 6). Todos os sacos foram enviados ao Laboratório de Irradiação (LIG) da CDNT, com a finalidade de serem irradiadas com a dose estimada em cada saco.

2.4 Irradiação das amostras com raio gama

As doses de radiação aplicadas nas amostras das 6 localidades: Corinto, Diamantina, Santa Maria do Suaçuí, Araçuaí 1, Araçuaí 2 e da região de Governador Valadares, variou

de acordo com a análise, por um especialista, dos espectros gerados por cada mineral analisado. Algumas amostras da mesma localidade receberam doses diferentes de radiação, como mostrado na [Tabela 1](#). O tempo de exposição à radiação não foi fornecido pelo laboratório.

Tabela 1 – *Dose de Radiação. Fonte: elaborada pelas autoras.*

Localidade	Saco	Dose de Radiação	
Diamantina	1	10KGy	
Corinto	2	10KGy	70KGy
Araçuaí 1	3	10KGy	70KGy
Santa Maria do Suaçuí	4	70KGy	400KGy
Araçuaí 2	5	70KGy	400KGy
Próximo a Gov. Valadares	6	70KGy	

2.5 Tratamento térmico

O aquecimento das amostras foi realizado no laboratório de materiais do CDTN, no qual se utilizou um forno tipo Mufla. As amostras de Quartzo receberam o tratamento a temperaturas diferentes, de acordo com a prévia análise dos espectros gerados. As amostras que atingiram uma coloração fraca, isto é, levemente fumê, não foram tratadas termicamente uma vez que não alcançariam o objetivo de se tornar green-gold. As amostras de Santa Maria do Suaçuí (saco 4-70KGy e saco 4-400KGy) foram aquecidas a duas temperaturas diferentes, com a finalidade de se observar a influência das temperaturas na coloração das gemas aquecidas. As temperaturas de aquecimento estão apresentadas na [Tabela 2](#).

Tabela 2 – *Temperatura de aquecimento das amostras. Fonte: elaborada pelas autoras.*

Localidade	Saco	Temperatura	
Diamantina	1	Não foi aquecido	
Corinto	2	360 °C	
Araçuaí 1	3	360 °C	
Santa Maria do Suaçuí	4	200 °C	300 °C
Araçuaí 2	5	360 °C	
Próximo a Gov. Valadares	6	260 °C	

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Amostras de Diamantina

As amostras de Diamantina receberam uma dose de radiação de 10 KGy, entretanto, sua cor praticamente não foi alterada. O motivo da não variação da coloração é devido a sua “pureza”. Provavelmente o teor de alumínio e/ou lítio é baixo para estas amostras. Das doze amostras irradiadas, apenas duas delas adquiriram uma coloração levemente fumê. Por este motivo, não foi realizado o tratamento térmico nas mesmas.

3.2 Amostras de Corinto

As amostras de Corinto receberam doses diferentes de radiação, a fim de observar a influência da dosagem de radiação com a coloração obtida pela gema após a irradiação. Três amostras receberam 10 KGy e se tornaram levemente fumê (Figura 2). Como a coloração obtida foi clara, essas gemas não receberam o tratamento térmico.



Figura 2 – Amostras de Corinto irradiadas com 10 KGy. Fonte: Arquivo pessoal.

Cinco amostras de Corinto receberam 70KGy de radiação e tornaram-se fumê bem intenso. Dessas cinco amostras, três delas foram submetidas ao tratamento térmico, a 360 °C, por um período de 25 minutos e duas delas tornaram-se levemente fumê enquanto que a outra voltou a ser transparente. O fato das amostras diminuírem sua coloração e até mesmo voltar à cor original é devido ao íon Li^+ ter retornado ao centro do buraco eletrônico (ALKMIM, 2012). No espectro gerado pela espectrometria já era possível prever a não alteração de cor devido à baixa altura da segunda banda do espectro.

3.3 Amostras de Araçuaí 1

Sete amostras de Araçuaí 1 foram irradiadas, sendo que três delas receberam a dose de 10 KGy e as outras quatro receberam a dose de 70 KGy. As amostras irradiadas com 10 KGy obtiveram coloração levemente fumê, e podem ser utilizadas na indústria de joias. As amostras não tiveram tratamento térmico, pois a intensidade de cor adquirida foi baixa. As amostras que receberam a dose de 70 KGy, adquiriram uma coloração fumê escura e receberam tratamento térmico a temperatura de 360 °C. As amostras adquiriram coloração diferentes em diferentes intervalos de tempo. Com 15 minutos, duas amostras foram retiradas do forno e uma obteve coloração levemente fumê, enquanto a outra se tornou *green gold*, de excelente qualidade gemológica (Figura 3). Após 30 minutos, as demais amostras que estavam no forno viraram fumê bem clara.

3.4 Amostras de Araçuaí 2

Foram utilizadas apenas duas amostras da região de Araçuaí 2. A primeira amostra foi irradiada com 70 KGy e a segunda com 400 KGy. Ambas adquiriram coloração fumê, bem intensa. A amostra que foi irradiada com 70 KGy não recebeu tratamento térmico, para que pudesse comparar uma gema antes e uma após o tratamento térmico. A amostra que recebeu a dose de 400 KGy foi tratada termicamente à temperatura de 360 °C, só tornando-se *green gold* após duas horas e vinte e dois minutos.



Figura 3 – Amostras de Araçuaí 1, após 15 minutos no forno. Fonte: Arquivo pessoal.

O longo tempo de exposição da gema à temperatura de 360°C está relacionado à elevada dose de radiação. Quanto maior a dose, maior será o tempo que levará para a gema clarear (BARBOSA, 2009). Outro aspecto importante analisado nessa gema foi a não fixação da cor. Após 30 min. de resfriamento a cor foi alterada para verde - fumê. Já, após três dias de irradiação, a cor alterou novamente para fumê levemente esverdeado (Figura 4). A instabilidade da cor após a refrigeração é devida a difusão do Li^+ (ALKMIM, 2012). A coloração na amostra variou, pois, provavelmente, havia teores diferentes de alumínio e lítio distribuídos neste mineral.

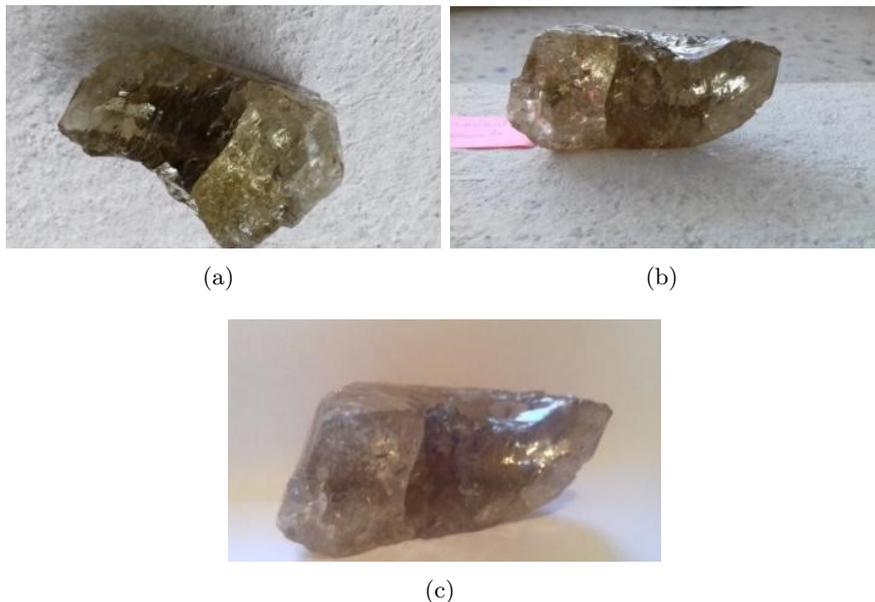


Figura 4 – Alteração de coloração do Quartzo de Araçuaí 2. a) fotografada no momento de retirada no forno murfla. b) fotografada após 30 minutos de resfriamento. c) após 3 dias de resfriamento. Fonte: arquivo pessoal.

3.5 Amostras de Santa Maria do Suaçuí

As amostras de Santa Maria do Suaçuí receberam doses de 70KGy e 400KGy . Ambas apresentaram coloração fumê bem intensa após a irradiação. As amostras que

receberam 70 KGy foram aquecidas a 200 °C e obtiveram colorações diversas em diferentes intervalos de tempo (Figura 5).



Figura 5 – Amostras de Santa Maria do Suaçuí após tratamento térmico. Fonte: Arquivo pessoal.

A cor final das amostras após 25 minutos e 45 minutos foram as mais satisfatórias, entretanto não alcançaram bem o objetivo de ser tornarem *green-gold*. Além disso, algumas amostras tornaram-se levemente fumê. Já no intervalo de 1 hora e 20 minutos, muitas amostras ainda estavam fumês. Entretanto, as amostras que foram irradiadas com dose de 400KGy, tiveram o tratamento térmico a temperatura de 300 °C e obtiveram resultados mais satisfatórios tornando-se *green gold*. As cores foram satisfatórias nos intervalos de 26 e 36 minutos (Figura 6).



Figura 6 – Amostras de Santa Maria do Suaçuí, após o tratamento térmico. Fonte: Arquivo pessoal.

Foi observado que os minerais da região de Santa Maria do Suaçuí sofreram muita fraturação no aquecimento. Uma alternativa para minimizar este problema, seria diminuir a temperatura do forno.

3.6 Amostras da Região de Governador Valadares

As amostras da região próxima a Governador Valadares receberam dose de 70 KGy obtendo coloração. Obtiveram fumê intenso. As amostras foram submetidas ao tratamento térmico à temperatura de 260 °C, obtendo resultados diferentes para diferentes faixas de tempo (Figura 7). Durante o aquecimento essas amostras quase não fraturaram o que é muito positivo para o processo, pois diminui as perdas do material e significa que a temperatura de aquecimento estava ideal para as gemas.



Figura 7 – Amostras da região de Governador Valadares. Fonte: Arquivo pessoal.

A partir dos resultados, com o tratamento térmico, pode-se afirmar que a melhor coloração foi alcançada aos 6 e aos 20 minutos, entretanto, a melhor faixa de tempo para o tratamento térmico foi aos 20 minutos, pois se obteve o maior volume de gemas, com excelente qualidade de cor. As amostras da região de Governador Valadares após um intervalo de tempo grande (1 hora), a temperaturas elevadas, tiveram sua intensidade de cor diminuída, isto ocorre porque o Li^+ , que possui certa mobilidade (difusão) retornou ao centro do “buraco eletrônico” (ALKMIM, 2012).

4 CONCLUSÃO

As amostras de Diamantina e Corinto, provenientes de veios hidrotermais da Serra do Espinhaço, não responderam bem à irradiação e ao tratamento térmico e consequentemente não atenderam ao objetivo de se tornarem *Green Gold*. As amostras apresentaram baixo teor de Lítio e Alumínio em sua estrutura. Já as provenientes de pegmatitos: Santa Maria do Suaçuí, Araçuaí 1, Araçuaí 2 e região de Governador Valadares, atenderam à expectativa de se tornarem *Green Gold*, enquanto que as de Santa Maria do Suaçuí obtiveram melhor coloração para doses mais altas, no caso 400KGy. As amostras da região de Governador Valadares apresentaram o menor tempo de exposição a temperaturas elevadas (6 minutos), obtendo ótimos resultados. Já as amostras de Araçuaí 1, não apresentaram uniformidade na concentração de lítio e/ou alumínio nas diversas gemas que foram irradiadas. Apenas uma amostra tornou-se *green gold*. Por fim a amostra de Araçuaí 2 apresentou instabilidade na coloração após o resfriamento.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, D. G. **Identificação do potencial de desenvolvimento de cor em quartzo natural incolor por meio da espectrometria RAMAN**. 2012. Dissertação (Mestrado) — CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2012.

BARBOSA, C. T. **A cor do citrino: efeitos de irradiação e tratamento térmico**. 2009. UNESP - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Trabalho de conclusão de curso.

CORREA, M. **Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor e técnicas de tratamento**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Geociência da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

DRUMOND, N. F.; MENDES, J. C.; LAMEIRAS, F. S. Caracterização de quartzo para obtenção de suas variedades gemológicas por irradiação gama e/ou tratamento térmico. **Revista Escola de Minas [online]**, v. 63, n. 3, p. 449–456, 2010.

Desenvolvimento de concreto enriquecido com fibras de aço

Development of enriched concrete with steel fibers

I. A. G. Gomes¹; R. P. de Lima^{2,*}; M. da Silva³

¹ Engenheiro Civil, Autônomo, João Monlevade - MG, Brasil.

² Departamento de Ciências Sociais, Humanas, Letras e Arte, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade - MG, Brasil.

* robson.lima@uemg.br

Resumo

A Engenharia Civil está em constante desenvolvimento de materiais que possam resistir aos esforços superiores aos que costumam estar expostos para resistir às necessidades das estruturas que podem ter suas dimensões reduzidas. A utilização de fibras metálicas no concreto tem se tornado uma solução para muitas exigências em projetos estruturais e viários devido ao seu potencial de resistência e inovação. O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um concreto enriquecido com tais fibras que implicasse na redução de um grande problema ambiental que é o descarte inadequado de pneus usados. Para tanto, foi realizada, de forma preliminar, a comparação das características técnicas do concreto convencional com o concreto enriquecido com fibras de aço de pneus descartados a fim de analisar os resultados de testes que indicassem o desempenho dos concretos quanto à resistência, aos esforços mecânicos e às fissuras. O estudo e a utilização dessas fibras podem ser traduzidos numa significativa contribuição para a sustentabilidade ambiental, uma vez que o acúmulo de pneus descartados é um grande problema em todo o mundo.

Palavras-chave: Concreto, fibras de aço, pneus descartados.

.....

The Civil Engineering is always developing new material which can resist higher efforts than that have been exposed to comply with stronger structures that can have a reduced size and therefore providing more spaced openings. The use of metallic fibers in concrete has become a solution to many requirements in structural design and roads due to their potential of resistance and innovation. The overall objective of this work was developing a concrete enriched with that fibers that could contribute to the reduce of a great environmental problem that is the improper discarded of used tires. Therefore, preliminarily was made the comparison between the technical characteristics of conventional concrete and enriched concrete with steel fibers of discarded tires to analyse the test results that should indicate the concrete performance by their load, mechanical efforts and cracks. The study and the use of that fibers can be translated into the great contribution to the environmental sustainability, because the accumulation of discarded tires is a big problem around the world.

Keywords: Concrete, steel fibers, discarded tires.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da indústria automobilística, os pneus, como elementos importantes em todo o processo produtivo, assumiram grande importância no transporte de mercadorias e pessoas, contudo, após esgotar sua vida útil, eles precisam ser descartados, fazendo com que os pneus inservíveis se tornem um problema ambiental, considerando que seu descarte cresce ano após ano em todo o mundo. De acordo com (COPAM, 2016) o passivo ambiental na natureza de um pneu é oneroso, pois ele demora ao todo 600 anos para se decompor e, ser descartado de forma incorreta, pode causar problemas ambientais e sociais sérios. Como é o caso da preocupação dos órgãos de saúde em relação à dengue, e os recentes Chikungunya e Zika vírus, que estão diretamente ligados ao descarte negligente de pneus, sendo estes, em variados locais, um dos principais centros de acumulação e propagação do mosquito *Aedes Aegypti*. Assim, promover uma destinação adequada para esse tipo de material é um grande desafio para todos os países, principalmente, o Brasil.

As alternativas possíveis de reutilização dos pneus descartados é uma das questões básicas deste estudo que reconhece, de imediato, que há uma grande variedade de fibras com potencial para reforço de compósitos usados na produção de argamassas e concretos para construção civil, assim, torna-se imprescindível o conhecimento das potencialidades desses materiais mediante sua caracterização para uma adequada aplicação.

As fibras de aço existem em abundância em diferentes produtos industrializados e têm sua reutilização motivada em meios diferenciados por questões ambientais, como o caso das que compõem os pneus que têm seu descarte extremamente oneroso ao meio ambiente.

Por sua disponibilidade abundante, as fibras de aço dos pneus descartados incorretamente, quando extraídas da maneira correta, podem ser reaproveitadas de forma a contribuir para a diminuição da dispersão desse material na natureza ou nos lixões. É uma das possibilidades de reuso de tais fibras é a produção de compósitos tecnicamente viáveis para a construção civil.

O presente trabalho apresenta uma breve revisão sobre as atuais pesquisas que vêm sendo desenvolvidas em termos de reaproveitamento da fibra de aço na construção civil, mais, especificamente, em concretos e argamassas e desenvolve ensaios com um concreto enriquecido com tais fibras para análise de suas características mecânicas.

Quando acrescenta-se fibras de aço ao concreto, elas dificultam a propagação das fissuras devido ao seu alto módulo de elasticidade (FIGUEIREDO, 2000). Pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando adicionada em baixas quantidades ao concreto.

Esse concreto pode ser utilizado para vários fins como, aplicação em pavimentos industriais, túneis e locais que recebam cargas de impacto. Até mesmo em obras que estão muito vinculadas a esforços dinâmicos, como é o caso das estruturas construídas em regiões sujeitas a abalos sísmicos ou mesmo sujeitas à fadiga por esforço cíclico, é viável a utilização de concretos reforçados com fibras para minimizar o dano causado por esses esforços e minimizar a fissuração da estrutura garantindo uma maior vida útil para o material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fundamentação teórica e conceitual do projeto em questão foi baseada em trabalhos de referência sobre concretos, descarte de pneus e a análise da melhoria das propriedades de resistência com a adição de fibras.

O estudo do material bibliográfico sobre concretos se baseou, principalmente, nas normas brasileiras onde é exemplificado o passo a passo da execução dos experimentos realizados neste trabalho contribuindo inclusive na padronização dos ensaios. Já em relação ao descarte de pneus, se desempenhou uma pesquisa mais recente possível sobre a situação desse descarte e dos possíveis meios de reutilização desses pneus.

2.1 Ferramentas e Materiais

Os materiais selecionados e adotados para a confecção dos traços e dos corpos de prova foram o Cimento Portland Composto - CP IV-32 RS -, amplamente comercializado devido a sua boa aceitação no mercado consumidor por seu uso em todos os tipos de construções e alvenarias, areia e Brita nº 1 como agregados graúdos e miúdos, e forma cilíndrica metálica das seguintes dimensões: 10(d) × 20(h) cm.

Para realização do ensaio de resistência à compressão – Slump Test -, foram utilizados moldes para corpos de prova de ensaio (Figura 1), atendendo à norma de referência NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABTN, 1998).

Os moldes para os corpos de prova de ensaio são confeccionados em metal resistente à pasta de cimento e com espessura igual ou superior a 1,5 mm. O molde tem a forma de um tronco de cone oco com as seguintes dimensões internas: 200 mm ± 2 mm - diâmetro da base inferior; 100 mm ± 2 mm - diâmetro da base superior; 300 mm ± 2 mm - altura. As bases superior e inferior devem ser abertas e paralelas entre si, formando ângulos retos com o eixo do cone. O molde deve ser provido, em sua parte superior, de duas alças posicionadas a 2/3 de sua altura e ter aletas em sua parte inferior para mantê-lo estável.

Além de tais moldes, para a realização do Slump Test é necessário também o uso de uma haste de compactação de seção circular, reta, feita de aço ou outro material adequado, com diâmetro de 16 mm, comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas.

Foi usada também uma placa de base como apoio do molde. Ela deve ser metálica, plana, quadrada ou retangular, com lados de dimensão não inferior a 500 mm e espessura igual ou superior a 3 mm.

2.2 Extração e corte das fibras de aço

As fibras adotadas para a composição dos corpos de prova são as que constituem os pneus de rodagem comum com barras retas Tipo R - Classe I, conforme a classificação do Figura 2.

O processo de extração e corte das fibras dos pneus teve como momento inicial a retirada dos arames de aço da bandagem de sustentação lateral dos pneus, por meio da retirada da borracha que cobre o conjunto de transposições de arames com uma ferramenta de corte para, em seguida, ser retirada toda malha do talão (Figura 3) e os fios serem extraídos com um alicate e cortados em medidas padronizadas com uma Turquesa, conforme ilustrado na Figura 4.

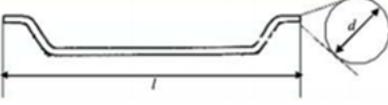
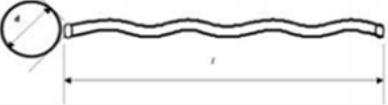
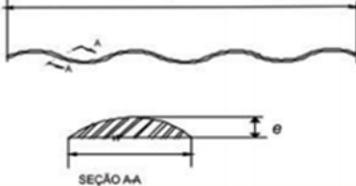
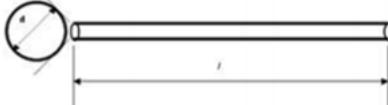
Tipo (Geometria)	Classe da Fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Figura 2 – Geometria e Classificação da fibra de aço. Fonte: NBR 15530 (ABTN, 2007).



Figura 3 – Malha de fios de aço. Fonte: acervo pessoal (2015).

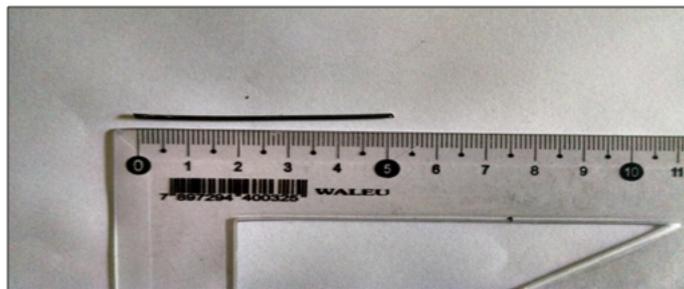


Figura 4 – Comprimento das fibras. Fonte: acervo pessoal (2015).

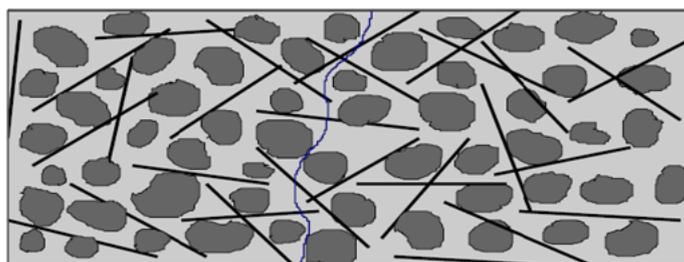


Figura 5 – Dimensionamento adequado das fibras. Fonte: [Figueiredo \(2000\)](#).

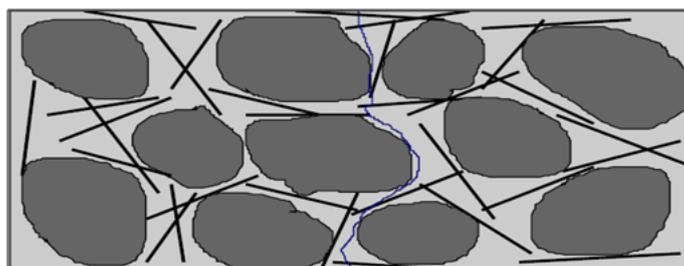


Figura 6 – Dimensionamento inadequado das fibras. Fonte: [Figueiredo \(2000\)](#).

compatibilidade ([Figura 6](#)).

2.3 Confeção dos traços de concreto e moldagem dos corpos de prova

Para comparar a usabilidade do concreto enriquecido com fibras de aço com a do concreto convencional, foram definidos 3 traços básicos de concreto enriquecido com fibras de Aço e uma amostra de concreto referencial. Com base no trabalho realizado por [Tasca et al. \(2010\)](#), os traços são divididos em concentrações de 30, 60 e 90 quilos de fibras de aço para cada metro cúbico de concreto, identificados respectivamente como F30, F60 e F90, e submetidos aos tempos de cura de 7, 14 e 28 dias.

Após estipulado o estudo do traço utilizado, realizou-se, manualmente, o processo de mistura dos materiais com o auxílio de uma bacia de latão e colher de pedreiro. A mensuração dos materiais foi feita a partir do traço básico de argamassa de 1: 3,02: 3,04: 0,6 a/c, vale observar que o traço básico só representa a proporção de cada material e que na construção civil é descrito dessa maneira. A [Tabela 1](#) apresenta o resultado dessas proporções para cada valor representativo de fibras.

Tabela 1 – Quantificação dos materiais utilizados. Materiais Utilizados (kg); Fonte: elaboração própria (2015).

Traço	Cimento	Areia	Brita	Fibra
F30	1,596	4,824	4,857	0,047
F60	1,596	4,824	4,857	0,297
F90	1,596	4,824	4,857	0,426
REF	1,596	4,824	4,857	0,000
Total	6,384	19,296	19,428	0,864



Figura 7 – Slump Test. Fonte: acervo pessoal (2015).

2.3.1 Ensaio de abatimento (Slump Test) e desmoldagem dos corpos de prova

O Slump Test ou ensaio de abatimento de concreto ou ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR NM 67 (ABTN, 1998) com objetivo de determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra. Constatou-se, após o abatimento e a remoção do molde, um decaimento de 0 a 10 mm da mistura em todos os outros ensaios, evidenciando a baixa proporção da água devido a adição das fibras (Figura 7). “Isto ocorre pelo fato de se ter uma elevada área específica, que demanda uma grande quantidade de água de molhagem aumentando o atrito interno do concreto e reduzindo a sua mobilidade” (FIGUEIREDO, 2000, p. 6).

Após a desmoldagem dos corpos de prova, observou-se que eles apresentavam algumas falhas devido à baixa trabalhabilidade, pelo motivo das fibras aumentarem a área molhada do concreto, fazendo com que, mesmo com a vibração, tenha surgido falhas decorrentes da falta de água junto os demais agregados.

Depois da análise visual, quando se constatou o aparecimento de brocas (Figura 8), os 12 corpos de prova moldados receberam as devidas identificações e foram direcionados ao tanque e submetidos à cura por imersão.

2.3.2 Cura por imersão

Foram aguardadas 24h desde o momento da moldagem para a realização do desmolde e o armazenamento das amostras em tanque de água (Figura 9) com a função de evitar a perda excessiva de água no processo de cura do concreto, o que poderia acarretar outros problemas.

Após o cumprimento dos tempos de cura, cada amostra foi submetida ao ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5739 (ABTN, 1994),



Figura 8 – Surgimento de brocas. Fonte: acervo pessoal (2015).



Figura 9 – Corpos de prova imersos. Fonte: acervo pessoal (2015).

proporcionando assim a geração de dados para análise.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para comparar o comportamento mecânico do concreto com adição de fibras de aço dos pneus descartados com o do concreto convencional, foram realizados os ensaios de compressão e apresentados os resultados de ganhos e perdas de resistência em Mpa e em percentuais, com descritos a seguir.

A incorporação das fibras na matriz cimentícia, em um primeiro momento, se mostrou eficiente (Figura 10) por apresentar um ganho de resistência inicial de 12% em relação ao concreto de referência. Com a realização dos outros ensaios, tornou-se possível verificar uma queda significativa dessas resistências nas matrizes com acréscimo mais elevado de fibras em seus traços. Esse fato pode ser vinculado diretamente às falhas provenientes da necessidade do aumento da área molhada como já abordado observado anteriormente, que reduziu demasiadamente a trabalhabilidade da argamassa.

Observou-se que a perda dessa porcentagem de resistência também pode ser referente à necessidade de maior vibração no momento da realização da moldagem dos corpos de prova agravada pela falta de água relacionada às fibras.

A partir da análise das resistências adquiridas pelos corpos de prova foi possível a determinação dos percentuais (Figura 11) de base, ganho e perda de resistência com a adição das fibras.

Essa queda de resistência foi inesperada ao se constatar que, por hipótese, a utilização do volume de fibras empregado por Tasca et al. (2010), que foi a base metodológica desta pesquisa, estaria de acordo com o estudo de Ferreira (2002) que comprovou a eficiência

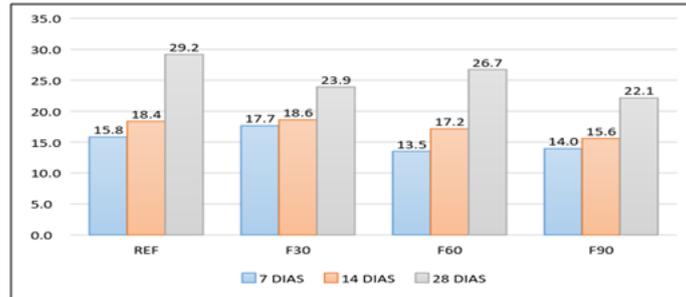


Figura 10 – Resistência à compressão em Mpa. Fonte: Elaboração própria (2015).

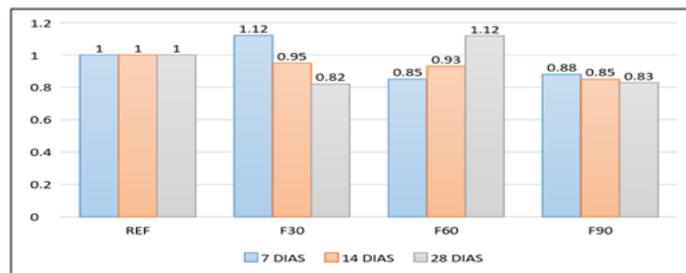


Figura 11 – Percentual de ganhos e perdas de resistência em Mpa. Fonte: Elaboração própria (2015).

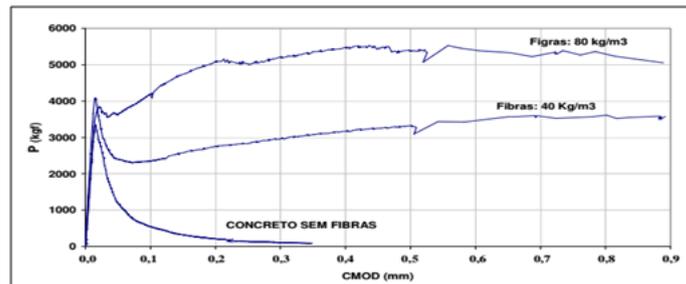


Figura 12 – Comparação do volume de fibras. Fonte: Ferreira (2002).

da curva Carga (P) × Deslocamento (CMOD), representada no [Figura 12](#).

Com respeito à viabilidade técnica do uso de fibras de aço de pneus descartados para o enriquecimento de concreto, pode-se afirmar que foi dado um passo significativo para sua constatação a partir dos ensaios Slump Test que proporcionaram a geração dos dados sobre resistência à compressão. Entretanto, os resultados obtidos teriam maior consistência se fossem complementados com dados resultantes de testes de resistência à tração e à fissuração.

Vale observar que estes dois últimos serão apresentados num futuro próximo, uma vez que a pesquisa que deu origem aos resultados apresentados neste trabalho está sendo continuada para análises mais ricas.

Com respeito a uma análise socioambiental, pode-se apontar que por meio da coleta de algumas informações sobre a quantidade de fibras que poderiam ser reaproveitadas dos pneus, pôde-se verificar que de 1 pneu podem ser retirados um mínimo de 200 gramas de

fibras somente dos arames de aço, apesar dele conter maior percentual do material nas cintas de aço localizadas abaixo de sua banda de rodagem. Essas informações se referem à extração dos arames de aço do Pneu Aro 13 Pirelli 165/70R13 Cinturato P1 79T, que foi tomado como base de pesos e quantidades.

A partir de uma comparação simples e por meio do relatório publicado por Cruz (2012) tem-se o cálculo de que em 9 anos se descartou um número médio de 350 milhões de pneus, de onde poder-se-ia ter retirado um volume básico de 70 mil toneladas de arame de aço.

Como o preço médio da fibra de aço é de R\$ 7,50 o quilo, isso poderia resultar no reaproveitamento dos 350 milhões de pneus e na geração de um valor aproximado de R\$ 500.000,00, além da contribuição para uma destinação produtiva dos pneus descartados indevidamente.

Já o processamento das fibras carece de um estudo mais específico, especialmente sobre a utilização de ferramentas e equipamentos adequados para a extração das fibras. Considerando o corte da borracha como um processo relativamente simples, a maior dificuldade para obtenção das fibras de aço se encontra na extração dos arames que requer mais força mecânica, energia e mecanismos de segurança.

4 CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados obtidos foi possível observar uma aplicação conveniente das fibras de aço, oriundas de pneus descartados, por apresentarem funcionalidades e resistências praticamente paralelas das geralmente utilizadas.

Considerando-se as falhas resultantes dos problemas ocorridos durante alguns testes que têm relação direta com a adição das fibras à argamassa, pode-se observar que a repetição e o aprimoramento dos ensaios proporcionariam, certamente, dados mais consistentes sobre a efetiva aderência da fibra ao concreto.

Como uma solução alternativa e imediata para alguns desses problemas observados, adotou-se a redefinição da mensuração dos materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova que resultou numa melhoria das amostras analisadas.

No âmbito do conhecimento científico adquirido, cabe registrar o aprendizado proporcionado ao estudante bolsista de iniciação científica ao longo do desenvolvimento desse projeto de pesquisa e a ampliação das possibilidades de futuros trabalhos como, por exemplo, o desenvolvimento de materiais inovadores para a construção civil, ratificando assim a perspectiva de inovação produtiva em atendimento às urgências de sustentabilidade de um setor produtivo marcado, no Brasil, por uma trajetória histórica de desperdício de recursos de produção.

Entretanto, para tal perspectiva futura, vale observar que, apesar do aço ser um material que apresenta uma ótima resistência à tração e à compressão, os testes realizados com os corpos de prova permitiram notar que as fibras não ajudaram de maneira significativa com o aumento da resistência a compressão do concreto. Portanto, como continuidade do trabalho de pesquisa, poder-se-á analisar e avaliar como as fibras de aço, extraídas dos pneus descartados, podem interferir em outras propriedades do concreto como a capacidade de deformação e a resistência à tração.

Analogamente, com respeito ao potencial de contribuição para a redução do

problema do descarte inadequado de pneus usados, tornar-se-ia necessário a extensão desse estudo para analisar e avaliar o impacto do uso das fibras de aço de tais pneus sobre o descarte dos mesmos, considerando a perspectiva da sustentabilidade que adota uma abordagem sistêmica de toda cadeia de descarte e reaproveitamento dos pneus em desuso.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15530**: Fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Tempo de decomposição de resíduos**. 2016. Disponível em: <www.copam.com.br/decomposicao.htm>. Acesso em: fev. 2016.

CRUZ, E. P. Brasil descartou em 9 anos 2,1 milhões de toneladas de pneus. **Exame**, Editora Abril, São Paulo, 2012.

FERREIRA, L. E. T. **Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçados com fibras de aço**. 2002. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. São Paulo: [s.n.], 2000. Dissertação de Livre Docência.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. São Paulo: [s.n.], 2011. Dissertação de Livre Docência.

PASA, F. V. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TASCA, M. et al. Estudo da viabilidade de adição de fibras de aço no concreto exposto ao ambiente marítimo: Análise da melhoria das propriedades de resistência. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 4., 2010, Rio Grande. **Anais...** Rio Grande: FURG, 2010. Disponível em: <<http://www.semengo.furg.br/2010/05.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.