



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

WHALEX JOSÉ PEREIRA MENDES

AVALIAÇÃO DE PLACAS DE POLIURETANO COMO REVESTIMENTO DE
HIDROCICLONE

ARAXÁ – MG

2015

WHALEX JOSÉ PEREIRA MENDES

AVALIAÇÃO DE PLACAS DE POLIURETANO COMO REVESTIMENTO DE
HIDROCICLONE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly Santos de Oliveira.

ARAXÁ – MG

2015

WHALEX JOSÉ PEREIRA MENDES

AVALIAÇÃO DE PLACAS DE POLIURETANO COMO REVESTIMENTO DE
HIDROCICLONE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 13/08/2015

Banca Examinadora:

msilm

Michelly Santos de Oliveira – Presidente da Banca Examinadora
Professora Doutora – CEFET-MG – Orientadora

Natal Junio Pires

Natal Junio Pires
Professor Doutor – CEFET-MG

Delma Pereira Caixeta

Delma Pereira Caixeta
Professora Doutora – CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades.

Ao CEFET-MG, seu corpo docente, direção, administração e demais colaboradores, que oportunizaram essa etapa de minha vida que se conclui.

À minha orientadora Michelly dos Santos Oliveira, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Ao meu amigo João Paulo Aparecido Arruda, pela ajuda, apoio e suporte.

Aos meus colegas de faculdade, pelo companheirismo.

Aos meus pais, minha noiva Silmara e meus irmãos Ítalo e João Pedro pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho se trata da análise do comportamento mecânico de materiais poliméricos, com ênfase em sua resistência à abrasão, a fim de avaliar a possibilidade de sua aplicação como revestimento de hidrociclones, equipamentos utilizados tanto para a classificação como para a separação sólido-líquido de materiais através da ação da força centrífuga. Seu objetivo principal foi a análise de placas de poliuretano com diferentes níveis de resiliência, propriedade que alguns corpos possuem de retornar à forma original após terem sido submetidos a uma deformação elástica, a fim de definir as características ótimas para sua aplicação como revestimento de hidrociclones, utilizando o material com melhor resistência ao desgaste por fricção. A análise foi feita através do jateamento destas placas com limalha de aço e posterior análise do desgaste provocado pelo procedimento. Como resultado, concluiu-se que a utilização do poliuretano em hidrociclones é possível, sendo o poliuretano com resiliência igual a 65% o material com melhor desempenho para tal.

Palavras-chave: Poliuretano. Revestimento. Hidrociclone. Abrasão.

ABSTRACT

This paper deals with the mechanical behavior analysis of polymeric materials, with emphasis on its abrasion resistance in order to evaluate the possibility of its application as coating in hydrocyclones, equipment used both for classification and for the solid-liquid separation of materials by the action of centrifugal force. Its main objective was to analyze polyurethane boards with different levels of resilience, property that some bodies have to return to their original shape after being subjected to an elastic deformation, in order to define the optimum characteristics for use as inner coating of hydrocyclones using the material with better resistance to abrasion. The analysis was made by blasting these plates with steel filings and subsequent analysis of wear caused by the procedure. As a result, it was found that the use of polyurethane as hydrocyclones inner coating is possible, and the polyurethane 65% resilient is material with the best performance to do it.

Keywords: Polyurethane. Coating. Hydrocyclone. Abrasion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema típico de um hidrociclone e suas dimensões projetadas.	10
Figura 02 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional.....	13
Figura 03 – Funcionamento do hidrociclone: vórtices.	15
Figura 04 – Tipos de descarga de hidrociclones.....	17
Figura 05 – Efeitos da porcentagem de sólidos no diâmetro de corte.....	19
Figura 06 – Grupo funcional uretano.....	23
Figura 07 – Reação de síntese de poliuretano.....	23
Figura 08 – Reagentes utilizados na síntese do poliuretano.....	24
Figura 09 – Consumo de poliuretano por segmento industrial no Brasil.	25
Figura 10 - Equipamento utilizado para o jateamento da limalha de ferro.....	26
Figura 11 – Placas de PU após o ensaio de abrasão.	28
Figura 12 - Imagem aproximada do PU após o ensaio abrasivo.....	28
Figura 13 – Gráfico comparativo do desgaste nas placas de poliuretano.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Demanda mundial de poliuretano por região.....	22
Tabela 02 – Demanda mundial de poliuretano por produto.	23
Tabela 03 – Resultados dos ensaios de abrasão.....	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1 Hidrociclone.....	13
3.1.1 Aplicabilidade	14
3.1.2 Funcionamento.....	15
3.1.3 Variáveis do Hidrociclone.....	16
3.1.4 Desgaste	19
3.2 Polímeros	20
3.2.1 Fibras	21
3.2.2 Elastômeros	21
3.2.3 Plásticos	21
3.3 Poliuretano	22
3.3.1 Química e processos de obtenção dos poliuretanos.....	23
3.3.2 Aplicações	24
3.3.3 Uso na mineração	25
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 Materiais.....	26
4.2 Métodos.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
6 CONCLUSÕES	31
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	32
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações aplicadas aos bens minerais visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo modificar a identidade química dos minerais. Há, no entanto, autores que defendem um conceito mais amplo para o tratamento, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer até alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor (LUZ e LINS, 2004).

O tratamento de minérios é dividido nas seguintes etapas:

- cominuição: britagem e moagem;
- peneiramento e classificação;
- concentração: flotação, gravítica, magnética etc;
- desaguamento: filtração e espessamento;
- secagem: secador rotativo, secador de leito fluidizado;
- deposição do rejeito.

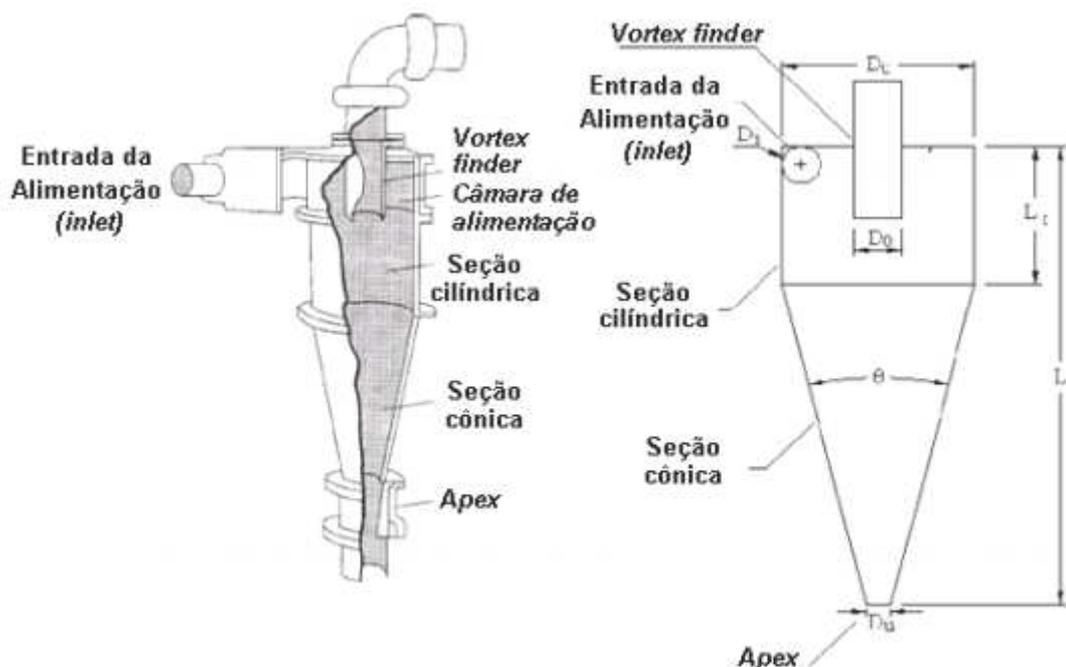
A classificação e o peneiramento têm como objetivo comum, a separação de um material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos distintos. No peneiramento, existe uma separação, segundo o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação, a separação é realizada tomando-se como base a velocidade que os grãos atravessam um meio fluido. No processamento mineral, o meio fluido mais utilizado é a água. A classificação a úmido é aplicada, habitualmente, para populações de partículas com granulometria muito fina, onde o peneiramento não funciona de forma eficiente (CARRISSO e CORREIRA, 2004).

O hidrociclone é um equipamento que se destaca como classificador nas usinas de beneficiamento e tem a sua maior aplicação em circuitos fechados de moagem. O princípio básico de separação empregado nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga. O desempenho desses é influenciado por suas dimensões, pelas variáveis operacionais e pelas propriedades físicas dos sólidos e da polpa alimentada.

Um hidrociclone convencional consiste em uma câmara cilíndrico-cônica com entrada tangencial e duas saídas, está apresentado na Figura 01. A polpa é injetada

sob pressão no aparelho, através de um duto situado na parte superior da câmara cilíndrica e, como resultado de sua entrada tangencial, é criado no seu interior um redemoinho. As partículas mais grossas e mais densas são arremessadas às paredes e descarregadas na abertura inferior, o apex, constituindo o underflow. Já as partículas mais finas, menos densas e grande parte da fase líquida são dirigidas para o centro do hidrociclone e saem por um cilindro na parte superior do aparelho, denominado vortex finder, constituindo o overflow (CARRISO e CORREIA, 2004).

Figura 01 – Esquema típico de um hidrociclone.



Fonte: TAVARES, 2002

As empresas mineradoras, devido ao elevado custo de manutenção dos hidrociclone, equipamento composto basicamente de aço, estão buscando um meio de aumentar a durabilidade da estrutura interna destes. A abrasão existente no interior do equipamento faz com que este desgaste aconteça rapidamente, ocorrendo a alteração nos diâmetros do apex e da seção cilíndrica, variáveis que tem influência direta no desempenho do hidrociclone. Uma solução encontrada foi revestir este equipamento com algum material, como a borracha e o cerâmico, por exemplo, de modo a aumentar a vida útil de utilização e evitar a alteração de suas dimensões.

O poliuretano possui alta resistência à abrasão, e com isso pode-se utilizá-lo como revestimentos para minimizar o desgaste dentro do equipamento, quando

entra em contato com a polpa de minério. Esse polímero é utilizado na mineração como revestimento de peneiras no peneiramento a úmido. Atualmente, estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de utilizar o poliuretano como revestimento do hidrociclone, evitando assim o desgaste do aço constituinte do mesmo.

Neste trabalho, ensaios de abrasão a seco foram utilizados para verificar a possibilidade, bem como a eficiência de placas de poliuretano e compará-los com uma placa de material cerâmico, visando sua utilização como revestimentos de hidrociclone.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a resistência à abrasão do poliuretano, através de experimentos que simularam a situação próxima a uma real de trabalho deste material no interior de um hidrociclone, de modo a reduzir os gastos com a manutenção deste equipamento.

2.2 Objetivos específicos

Realizar experimentos práticos avaliando o desgaste dos diferentes modelos de placas de poliuretano com diferentes porcentagens de resiliência.

Comparar o desgaste nas placas de poliuretano com o desgaste na placa de cerâmico.

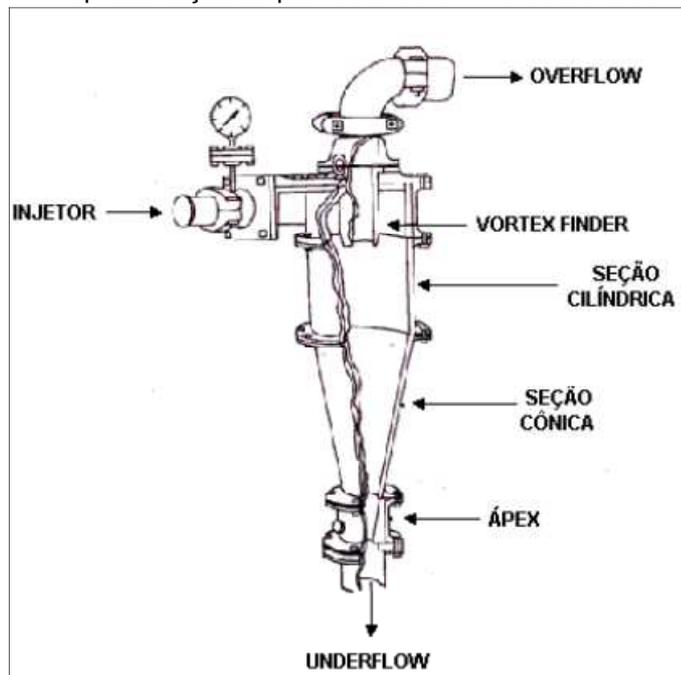
Indicar o modelo com a maior resistência à abrasão, com o intuito de aumentar a durabilidade deste quando utilizado como revestimento nos hidrociclones, evitando a abrasão do aço constituinte do equipamento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Hidrociclone

Os hidrociclones são constituídos de uma carcaça única, sem partes móveis, resultante do acoplamento de uma seção cilíndrica e outra cônica invertida (Figura 02). Assim, sua construção e manutenção é relativamente simples. Além disso, possui uma entrada, geralmente retangular, que insere o material no ciclone de forma tangencial; e duas saídas: uma, de diâmetro maior, na parte superior do ciclone, denominada *vortex finder*; e outra, de diâmetro menor, na parte inferior do ciclone, denominada *apex*. É considerado um equipamento de alta versatilidade e capacidade (LUZ *et al.*, 2010).

Figura 02 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional.



Fonte: LUZ *et al.*, 2010, p. 268.

A polpa é alimentada sob pressão em direção tangencial à seção cilíndrica, através do injetor, o que gera a rotação que imprime a ação centrífuga sobre o material. A separação da polpa em dois fluxos distintos gera os produtos: o *overflow*, partículas menores e menos densas que sai pelo *vortex finder*, e o *underflow* partículas maiores e mais densas, que sai pelo *apex* (SILVA e MACIEL, 2014).

Segundo Sampaio *et al.* (2007), apesar de que a utilização dos hidrociclones no tratamento de minérios data do final do século XIX, apenas a partir do período que sucedeu a Segunda Guerra Mundial é que sua fabricação e uso foram difundidos em escala industrial.

3.1.1 Aplicabilidade

Segundo Matos *et al.* (2012), os hidrociclones podem ser utilizados tanto no tratamento de minérios como em outras áreas que vão desde a mineração até o tratamento de água. No processamento mineral, suas principais aplicações constituem:

- fechamento de circuitos de moagem;
- classificação de minérios com granulometria fina (de 2 μm a 837 μm);
- espessamento;
- operações prévias de concentração;
- deslamagem (remoção de partículas menores que 10 μm), geralmente antes das etapas de flotação.

Além disso, os hidrociclones podem ser utilizados em áreas diversas, que vão desde uso na fabricação de bebidas alcoólicas até no tratamento de água. O trabalho de Soccol *et al.* (2005) aborda a utilização de hidrociclones para o tratamento de água destinada à irrigação, visando a remoção de areia, que danifica os equipamentos que compõem este processo.

Podem ser utilizados também no tratamento de efluentes líquidos. O trabalho de Alves (2012) apresenta a otimização da geometria de um hidrociclone com o objetivo de possibilitar sua aplicação na separação de óleo dos efluentes líquidos gerados por refinarias de petróleo. Moura *et al.* (2014) abordam o uso do hidrociclone como equipamento para espessamento de lodos provenientes dos processos produtivos de indústrias têxteis.

Como já citado anteriormente, o trabalho de Soccol *et al.* (2005) contempla a utilização de hidrociclones para a filtragem de água para irrigação. Já o trabalho de Vieira (2006), visa otimizar os processos executados por hidrociclones filtrantes, cuja parte cônica é constituída por material poroso.

Os hidrociclones também são usados na indústria. O trabalho de Alves (2006), aplica os hidrociclones à separação de leveduras de fermentação alcoólica

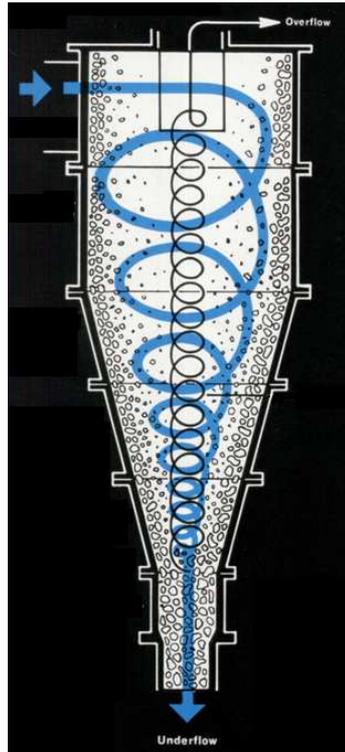
na indústria de bebidas. Amaral (2008), mostra a aplicação dos hidrociclones na separação de fluidos de perfuração de baixa densidade utilizados para perfuração de poços de petróleo em águas ultraprofundas. O trabalho de Anjos *et al.* (2014) mostra como os hidrociclones podem ser aplicados na separação de células animais nos processos produtivos de indústrias farmacêuticas. Tonin (2012) abordou em sua pesquisa, a otimização computacional da operação de hidrociclones na filtragem para irrigação pressurizada.

3.1.2 Funcionamento

Como consequência da direção tangencial na qual a polpa é alimentada no hidrociclone e da pressão a que é submetida, surge no interior do equipamento um movimento rotativo (MATOS *et al.*, 2012; OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

Assim, são gerados dois vórtices no interior do hidrociclone (Figura 03). O primeiro tem caráter descendente, localizando-se na parede do hidrociclone, um campo de força centrífuga é gerado pela energia cinética presente na polpa, e este atua sobre as partículas a serem classificadas. O segundo vórtice é ascendente, localizado no centro do mesmo e produzido pela queda de pressão criada pelo movimento rotativo. Por sua baixa pressão, o vórtice aspira ar pelo orifício do *apex*, formando um fluxo ascendente de polpa, sob o qual age uma força de arraste (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

Figura 03 – Funcionamento do hidrociclone: vórtices.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA e SOUZA, 2008, p. 127.

As partículas mais grossas, possuidoras de maior massa, são mais suscetíveis à força centrífuga e, portanto deslocadas para a parede do ciclone, encontrando o vórtice descendente e sendo descarregadas pelo *underflow*. As partículas mais finas, menos influenciadas pela massa, são arrastadas pelo vórtice ascendente e descarregadas pelo *overflow* (SAMPAIO *et al.*, 2007).

3.1.3 Variáveis do hidrociclone

Os fatores que determinam as características de operação de um hidrociclone são denominados variáveis. Estas podem ser classificadas como variáveis de projeto e variáveis operacionais.

3.1.3.1 Variáveis de projeto

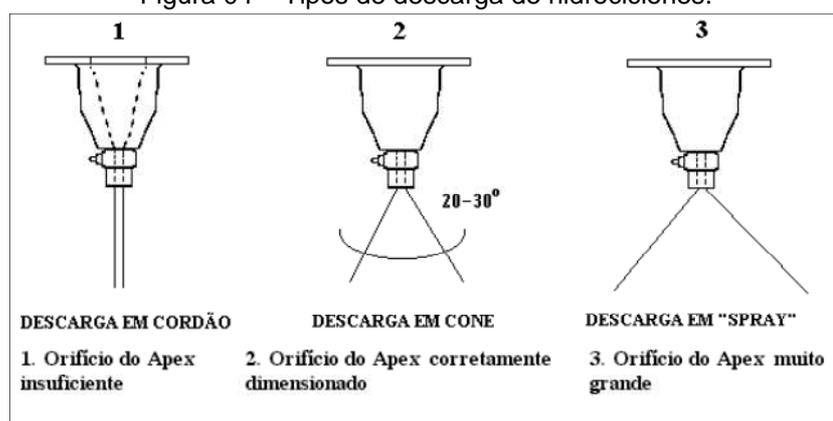
As variáveis de projeto são basicamente aquelas que definem a geometria do hidrociclone. Deve-se salientar que tais parâmetros possuem influência significativa na dinâmica interna do equipamento, sendo pontos passíveis de melhorias consideráveis no processo, se cuidadosamente analisados (SILVA *et al.* 2013).

Influenciam, principalmente, na capacidade de processamento e no diâmetro de corte do equipamento (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

Através da observação destes critérios, a seleção do melhor equipamento para cada tipo de processo pode ser otimizada. São variáveis de projeto dos hidrociclones:

- diâmetro do ciclone: o aumento do diâmetro do hidrociclone aumenta a capacidade, por possuir maior volume; e aumenta também o diâmetro de corte, pois a ação da força centrífuga se torna menos efetiva com o aumento do raio do equipamento;
- diâmetro do *vortex finder*: é uma variável muito importante, pois tem ação direta sobre o diâmetro de corte da separação, sendo proporcional ao mesmo;
- diâmetro do *apex*: regula, principalmente, o comportamento da água e dos finos no *underflow* do hidrociclone, afetando diretamente sua porcentagem de sólidos. Luz *et al.* (2010) propõem que os tipos de descargas dos hidrociclones são controlados pelo diâmetro do *apex*. A Figura 04 mostra tais tipos, avaliando-os quanto a uma operação de classificação. O diâmetro do *apex* pode ser manipulado para que os hidrociclones exerçam outras funções que não as de classificação. A situação 1 da Figura 04 descarga em cordão, onde o *ápex* é subdimensionado, é utilizado no processo de desaguamento, visto que a porcentagem de sólidos da polpa será consideravelmente aumentada. O contrário ocorre na situação 3 descarga em spray, onde o *ápex* é sobdimensionado, quando a deslamagem é o objetivo do equipamento. A situação 2 descarga em cone, o *ápex* é dimensionado proporcionalmente as estruturas do hidrociclone, usado na classificação;

Figura 04 – Tipos de descarga de hidrociclones.



Fonte: LUZ *et al.*, 2010, p. 270.

- área e forma do orifício de entrada: a área da entrada da alimentação é proporcional tanto à capacidade do hidrociclone como ao diâmetro de corte. Quanto à forma do orifício de entrada, a retangular é preferida por evitar turbulência nesta área, imprimindo melhores características ao escoamento interno e, conseqüentemente, melhor eficiência;
- altura da seção cilíndrica: seu aumento induz a um aumento na capacidade e a uma diminuição do diâmetro de corte;
- ângulo do cone (seção cônica): ângulos menores para a seção cônica tendem a diminuir o diâmetro de corte, embora a separação se torne menos eficiente, prevalecendo o efeito da densidade em relação à granulometria da partícula (LUZ *et al.*, 2010; OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

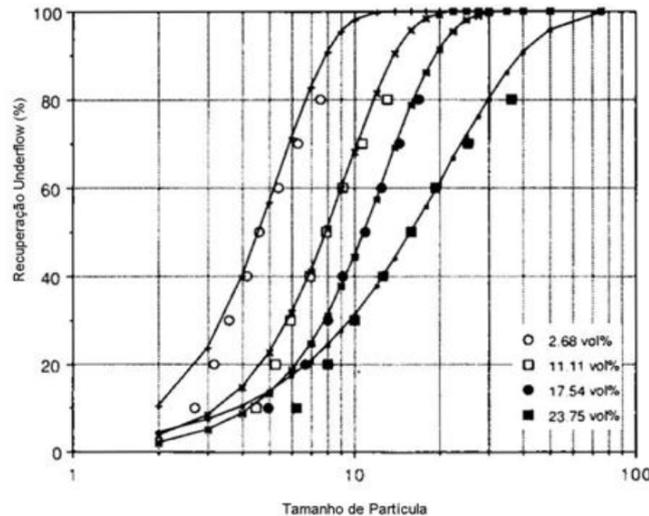
3.1.3.2 Variáveis Operacionais

As variáveis operacionais são aquelas passíveis de manipulação durante a operação no equipamento (MELO, 2010). Também influenciam diretamente o diâmetro de corte da classificação. São variáveis operacionais dos hidrociclones:

- densidade dos sólidos: um aumento nesta variável incrementa a ação do campo centrífugo. Partículas com densidades mais altas, mesmo que mais finas, poderão ser descarregadas no *underflow*, assim como partículas grosseiras com densidades menores. Desta maneira, um aumento na densidade dos sólidos induz a uma diminuição no diâmetro de corte da operação;
- viscosidade da polpa alimentada: está intimamente relacionada à força de arraste que surge no vórtice ascendente, que aumenta com o aumento na viscosidade. Assim, uma polpa mais viscosa faz com que haja aumento no diâmetro de corte, pois arrasta mais partículas grosseiras para o *underflow*;
- porcentagem de sólidos alimentada: tendo em vista que a viscosidade da polpa é afetada pela maior presença de sólidos, pode-se inferir que porcentagens de sólidos mais altas farão com que o diâmetro de corte seja aumentado. BROUN e BOHNET, 1990 *apud* MELO (2010) mostra através do gráfico mostrado pela Figura 05, que para uma recuperação de 60% no

underflow, para uma polpa com 2,68% de sólidos, tem-se partículas com 5,5 μm , para uma polpa com 23,75% de sólidos, tem-se partículas com 20 μm .

Figura 05 – Efeitos da porcentagem de sólidos no diâmetro de corte.



Fonte: BROUN e BOHNET, 1990 *apud* MELO, 2010, p. 40.

- pressão de admissão: é a variável operacional mais importante no manuseio dos hidrociclones. Um aumento na mesma amplia a velocidade angular das partículas que escoam no interior do equipamento, produzindo um campo centrífugo mais forte;
- granulometria da alimentação: o diâmetro de corte reflete a granulometria do material alimentado. Assim, quanto maior a granulometria da alimentação, maior será o diâmetro de corte (LUZ *et al.*, 2010; MELO, 2010; OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

3.1.4 Desgaste

O atrito das partículas minerais da polpa com as paredes do hidrociclone provocam desgaste nas mesmas, principalmente através do processo de abrasão. Deve-se atentar que a ação do desgaste sobre o equipamento pode desconfigurar a geometria predefinida pela produção/fabricante, alterando-se significativamente a dinâmica interna de escoamento da polpa e, conseqüentemente, a eficiência do processo.

Para maior durabilidade em sua utilização industrial, o equipamento é, geralmente, dotado de material de revestimento, que visa a prevenção do desgaste

de suas paredes. O estudo da aplicação de revestimento de poliuretano para prevenção do desgaste de hidrociclones é objeto deste trabalho.

3.2 Polímeros

O polímero é uma macromolécula formada pela agregação de moléculas menores denominadas monômeros. Canevarolo Jr. (2002) define polímero como um:

[...] material orgânico (ou inorgânico) de alta massa molar (acima de dez mil, podendo chegar a dez milhões de gramas por mol), cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente (CANEVAROLO JR., 2002, p. 23).

Os polímeros são formados pelo processo denominado polimerização, ou seja, a união dos monômeros através de uma reação química, gerando uma molécula maior: o polímero. O processo de polimerização pode se dar através de duas maneiras: a polimerização por adição, que constitui basicamente uma reação em cadeia para adição dos monômeros; e a polimerização por condensação, na qual os monômeros são agregados em diversas reações químicas, por etapas (MIRANDA, 2015).

São substâncias de grande ocorrência em nossa vida cotidiana, podendo ser considerados, ainda, como os compostos que são a base da vida, por sua grande presença na composição dos organismos vivos. Ocorrem tanto naturalmente como através de fabricação sintética. São exemplos de polímeros naturais as proteínas, a madeira, o algodão, a borracha, a celulose, o amido, etc. Os polímeros sintéticos são fabricados industrialmente, visando o controle de suas propriedades químicas e mecânicas, através dos processos de polimerização. São exemplos de polímeros sintéticos a fibra de vidro, os plásticos (polietileno, policloreto de vinila, poliuretano, etc.), as borrachas e os materiais fibrosos (nylon, poliéster, etc.) (CARRAHER, 2006).

A classificação dos polímeros entre plásticos, fibras e elastômeros (borrachas) é determinada, fundamentalmente, pela natureza das forças intermoleculares que formam a macromolécula; pelos grupos funcionais que compõem sua estrutura; e pelo tamanho do polímero, que possui grande influência

sobre a ação das forças inter e intramoleculares atuantes sobre o mesmo (CARRAHER, 2006).

De acordo com seu comportamento mecânico, são classificados como termoplásticos ou termostáveis. Um polímero termoplástico é aquele que, quando aquecido, pode ser moldado, através de um processo reversível, podendo ser reciclado. Tal moldabilidade é devida às características da molécula do mesmo, sendo, geralmente, cadeias lineares e ramificadas, com forças de interação moderadamente fracas. Constituem a maioria dos polímeros utilizados industrialmente. Um polímero termofixo é aquele que se mantém rígido independentemente de sua temperatura. Após moldado, não pode ser remoldado, não podendo, conseqüentemente, ser reciclado. Isto se dá porque, neste tipo de polímero, as ligações entre os monômeros tem características covalentes e ocorrem em alta densidade, impedindo o movimento das moléculas ao redor das ligações (MIRANDA, 2015).

3.2.1 Fibras

As fibras são polímeros termoplásticos, com resistência aumentada em um sentido longitudinal, que permite sua utilização na forma de fios. São exemplos de fibras o náilon e o poliéster (CANEVAROLO JR., 2002).

3.2.2 Elastômeros

Os elastômeros são polímeros fortemente elásticos, sendo capazes de sofrer deformações significativas e recuperar-se delas de forma completa e rápida. A deformação é possibilitada pela flexibilidade das ligações que unem as cadeias que compõem o polímero. O elastômero mais utilizado pela sociedade é a borracha vulcanizada (CANEVAROLO JR., 2002).

3.2.3 Plásticos

Os plásticos são polímeros que se apresentam no estado sólido em sua temperatura habitual de utilização. Podem ser termoplásticos, como o polipropileno e o polietileno, ou termofixos, como as resinas epóxi e a baquelite (resina de fenol-formaldeído) (CANEVAROLO JR. 2002).

3.3 Poliuretano

Os poliuretanos são compostos químicos da classe dos polímeros, tendo utilização amplamente distribuída em diversos segmentos, tais como o setor automobilístico, a área de saúde e, principalmente, o setor industrial (FIORIO, 2011). Oertel (1994) *apud* Fiorio (2011) expõe que:

[...] o termo geral “poliuretano” se tornou conhecido por designar diversos polímeros preparados a partir da reação em etapas ocorrida com isocianatos polifuncionais. Outros autores definem os poliuretanos como sendo o termo geral utilizado para denominar um polímero derivado de poliisocianatos e polióis contendo ligações uretano intramoleculares .

A tecnologia que permitiu o desenvolvimento do poliuretano vem desde o século XIX, com os trabalhos de Wurtz e Hoffman abrangendo reações entre isocianatos e compostos hidroxílicos. Porém, tais estudos foram restritos à escala laboratorial. As pesquisas que possibilitaram o uso industrial do poliuretano foram aquelas desenvolvidas pelo Dr. Otto Bayer, na Alemanha, na década de 1930. Seus trabalhos abordaram as utilizações dos isocianatos e o desenvolvimento de polímeros a partir dos poliésteres (VILAR, 2004). A partir de tal data, o mercado de poliuretano foi expandido a nível mundial. A evolução do mesmo no século XXI, é mostrada nas Tabelas 01 e 02.

Tabela 01 – Demanda mundial de poliuretano por região.

Região	2000	2005	2010
América do Norte	2946	3745	4114
América do Sul	475	470	568
Oriente Médio e África	491	796	1175
Ásia Pacífico	1143	1932	2300
China	1679	2910	4300
Europa Ocidental	2831	3295	3626
Europa Oriental	356	602	825
TOTAL	9923	13752	16907

Fonte: VILAR, 2004.

Tabela 02 – Demanda mundial de poliuretano por produto.

Produto	2000	2005	2010
Espumas flexíveis	3672	4944	5942
Espumas rígidas	2290	3423	4419
CASE*	3485	4792	5877
Ligantes	476	592	669
TOTAL	9923	13752	16907

*coberturas (revestimentos), adesivos, selantes e elastômeros.

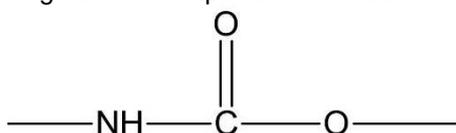
Fonte: VILAR, 2004.

Nota-se na Tabela 01 um crescimento acentuado na demanda do poliuretano nas regiões orientais, onde China, Europa Oriental, Oriente Médio e África a demanda de poliuretano dobrou na última década. A Tabela 02 mostrada que as Espumas flexíveis são o poliuretano que teve a maior demanda mundial na primeira década do século XXI. No Brasil, o poliuretano passou a ser produzido em escala industrial na década de 1960, visando o atendimento da demanda exigida pela indústria automobilística.

3.3.1 Química e processos de obtenção dos poliuretanos

Os poliuretanos são polímeros termofixos caracterizados pela presença do grupo funcional uretano, cuja fórmula estrutural é mostrada pela Figura 06.

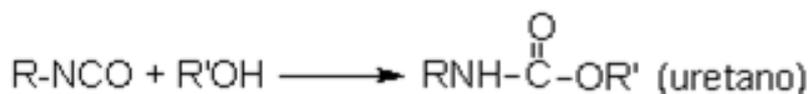
Figura 06 – Grupo funcional uretano.



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Grupo_uretano.jpg>.

Os poliuretanos são obtidos através de reações de isocianatos com compostos hidroxilados como os álcoois. A reação da qual o poliuretano é resultado é mostrada pela Figura 07.

Figura 07 – Reação de síntese de poliuretano.

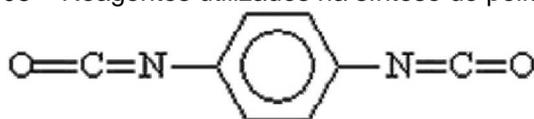


Fonte: VILAR, 2004.

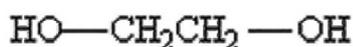
A reação apresentada é exotérmica, liberando aproximadamente 24 kcal/mol de uretano produzido. Apesar de possuir velocidade moderada, sua catálise é habitualmente realizada através da utilização de bases, na maioria das vezes aminas terciárias, e organometais (VILAR, 2004).

Os reagentes mais utilizados industrialmente para a obtenção de poliuretanos são o diisocianato de parafenileno e o etilenoglicol (ou etanodiol), cujas fórmulas estruturais são mostradas pela Figura 08 (CANGEMI *et al.*, 2009).

Figura 08 – Reagentes utilizados na síntese do poliuretano.



Diisocianato de *para*-fenileno



Etilenoglicol (etanodiol)

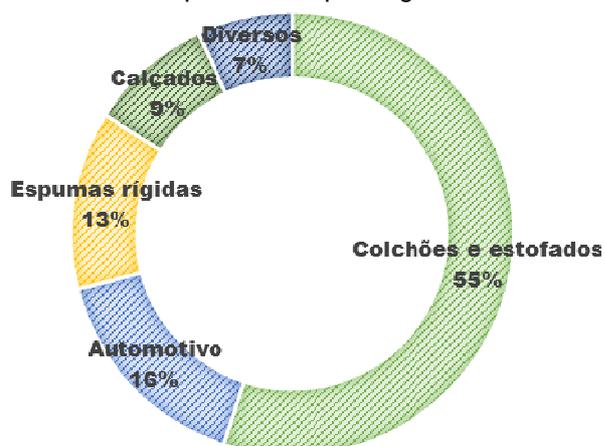
Fonte: CANGEMI *et al.*, 2009, p.160.

3.3.2 Aplicações

Atualmente, suas aplicações dentro do mercado brasileiro atendem a diversos segmentos, como mostrado pela Figura 09. Assim, as principais aplicações dos poliuretanos são:

- espumas flexíveis, aplicáveis à fabricação de colchões e estofados, embalagens, vestuário e calçados, dentre outros;
- espumas rígidas, utilizadas pelas indústrias moveleira, automotiva e aeronáutica para a confecção de assentos, além de seu uso para isolamento térmico;
- elastômeros de poliuretano, utilizados como biomateriais, tintas, revestimentos, selantes e encapsulantes;
- e outros usos diversos, como adesivos e fibras (VILAR, 2004).

Figura 09 – Consumo de poliuretano por segmento industrial no Brasil.



Fonte: Adaptado de VILAR, 2004.

3.3.3 Uso na mineração

A principal aplicação do poliuretano na indústria de mineração é como revestimento de peneiras, o qual constitui material de sacrifício que visa à conservação dos equipamentos. Também é utilizado na construção de equipamentos como hidrociclones, cones concentradores tipo Reichert, dentre outros (LUZ *et al.*, 2010).

Por seu uso na mineração, esse presente trabalho tem a finalidade de estudar o comportamento do poliuretano em revestimentos de hidrociclone colocando assim mais uma aplicabilidade no campo da mineração.

Seu emprego como revestimento é justificado por este material ser resiliente. A resiliência é definida por Callister (2012, p. 110) como “[...] a capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e, depois, com a remoção da carga, permitir a recuperação dessa energia”. Assim, o poliuretano resiste às variadas tensões que atuam no interior de um equipamento de beneficiamento de minério, atuando com eficiência e gerando economias ao processo.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

Para realização do trabalho foi utilizado um equipamento de jateamento que possui uma altura de 2 metros e massa de aproximadamente 900kg. A capacidade de carga do jateador é de 200kg de limalha, ele trabalha em conjunto com um compressor com capacidade de 300 litros e motor trifásico de 7HP. O equipamento jateia limalhas de aço a uma velocidade de 75 metros por segundos, que corresponde a capacidade de 150 kg de limalha por hora em direção à peça. A Figura 10 apresenta uma imagem ilustrativa do modelo do equipamento utilizado nos testes de abrasão.

Figura 10 - Equipamento utilizado para o jateamento da limalha de ferro.



Fonte: <<http://www.brasibras.com.br/wp-content/uploads/2011/11/Equipamento-de-Jateamento-Duplo.jpg>>. Acesso em 14 jul. 2015

Três placas de poliuretano moldadas em formato retangular com lado de 200 mm, comprimento de 250 mm, e espessura foi de 20 mm foram empregadas no estudo, com 60, 65 e 70% de resiliência, numa escala onde 0% corresponde a deformação totalmente plástica e 100% a uma deformação totalmente elástica.

Foi avaliado também o desgaste em uma placa de material cerâmico com 5 mm de espessura, 150mm de largura por 220mm de comprimento, utilizada como parâmetro de comparação.

Os poliuretanos analisados foram fornecidos pela Chentura, empresa especializada em polímeros, e o material cerâmico fornecido pela Cerâmica Pires Belo.

Um medidor laser para temperatura PCE-889 e um paquímetro.

As limalhas de aço empregadas no jateamento possuíam diâmetro médio de 0,063 mm.

4.2 Métodos

A metodologia utilizada para os ensaios baseada nas recomendações da fabricante das placas de poliuretano, consistiu na utilização do equipamento de jateamento de limalha de aço, que faz a sucção de limalha de aço e as libera em seu bico as limalhas com uma alta pressão que são direcionadas às placas de poliuretano.

Colocou-se a placa a uma distância de 150 mm do jato de limalha, para que assim os ensaios pudessem ser realizados. Os corpos de prova ficaram expostos ao jato de limalha durante 60 segundos. Posicionou-se o jato de limalha de forma que as limalhas chocassem contra a placa horizontalmente, ou seja, o ângulo entre as limalhas e as placas ensaiadas foi de 90°.

Realizaram-se os ensaios com as três placas de poliuretano e a placa de cerâmica, medindo-se a temperatura das placas no final dos testes de jateamento uti.

Após a realização do ensaio de abrasão, as placas foram encaminhadas ao laboratório para que fossem lavadas e retiradas todas as limalhas de aço que se encontravam retidas. Removeram-se os resíduos e mediu-se a espessura do desgaste provocado pela abrasão.

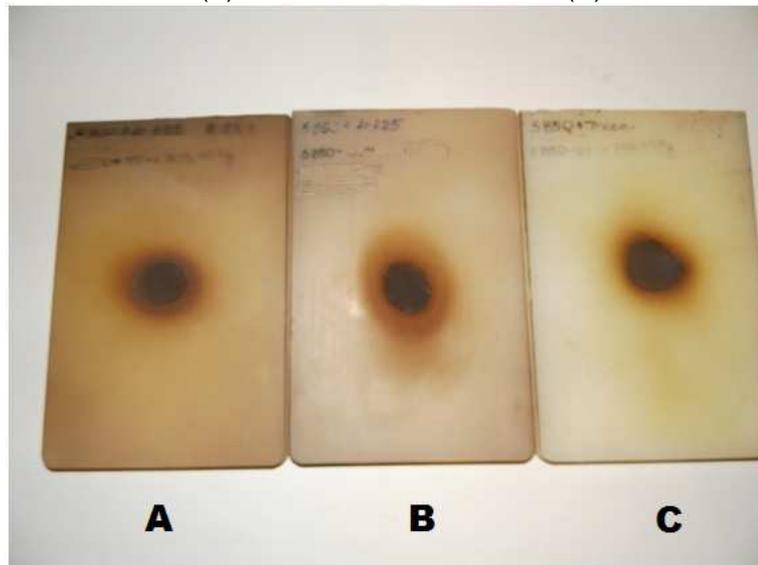
Fez-se dois ensaios, e os mesmos foram realizados fora do CEFET-Unidade IV.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 11 apresenta imagem dos três tipos de poliuretano (PU) analisados. Observa-se a impregnação do material no polímero. A partir da imagem mostrada na Figura 11, pode-se observar que o polímero de 65%, a cor da placa não se alterou nas proximidades de onde o jato foi direcionado.

Na Figura 12, nota-se que as partículas de limalha de aço aderiram ao poliuretano penetrando por alguns milímetros. Isso pode ter ocasionado a diminuição do desgaste nas placas, pois a partir desse momento ocorreu o choque entre as limalhas de aço primeiro para em seguida colidir com o material polímero.

Figura 11 – Placas de PU após o ensaio de abrasão.
(A) Placa de resiliência = 60% (B) Placa de resiliência = 70% (C) Placa de resiliência = 65%.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 12 - Imagem aproximada do PU após o ensaio abrasivo.



Fonte: Acervo do autor.

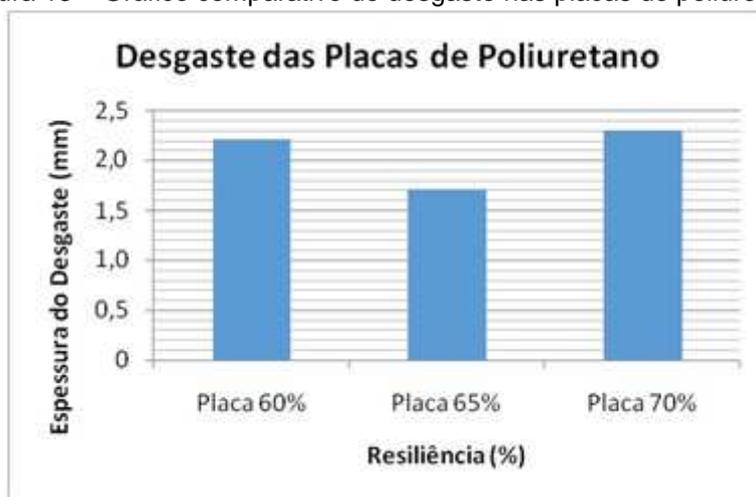
A Tabela 03 apresenta os valores das profundidades dos desgastes que o jato abrasivo provocou nas placas de PU e cerâmico. Além disso, mostra a espessura inicial das placas e o tempo de ensaio. O material cerâmico analisado perfurou durante o ensaio no tempo de 28 segundos de incidência do jato de limalha de aço, finalizando o teste. Observou-se que no material cerâmico não houve aumento de temperatura.

Tabela 03 – Resultados dos ensaios de abrasão.

Placa	Espessura	Tempo de ensaio (s)	Profundidade de corrosão (mm)
Placa PU 60%	20mm	60	2,2
Placa PU 65%	20mm	60	1,7
Placa PU 70%	20mm	60	2,3
Cerâmico	5mm	28	5,0

A Figura 13 apresenta uma comparação da espessura de desgaste nas placas empregadas. Observou-se que a placa de poliuretano com 65% de resiliência ofereceu o melhor desempenho entre os materiais, com uma erosão mínima de 1,7mm de profundidade.

Figura 13 – Gráfico comparativo do desgaste nas placas de poliuretano.



A temperatura das placas de polímeros no final dos ensaios de jateamento foi medida, obtendo-se um valor de 60 °C nas três placas. Mesmo com o aumento da temperatura, a placa de poliuretano 65% de resiliência não se deformou.

Os ensaios foram realizados em duplicata, e os resultados obtidos foram praticamente idênticos. Não foram realizados mais ensaios com novas placas, pois o

equipamento utilizado apresentou defeito em operação interna da empresa à qual pertence, o que impossibilitou a realização de ensaios com outras placas de poliuretano e materiais cerâmicos.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o poliuretano apresentou maior resistência à abrasão em relação ao material cerâmico utilizado no revestimento de tubulações, superando o desempenho do mesmo.

Apesar de ter-se notado o aquecimento do polímero devido ao choque abrasivo das partículas, este não é um fato preocupante, uma vez que os hidrociclones são utilizados em meio fluido (com água), no tratamento de minérios, o que atenua o efeito do aquecimento.

Outro aspecto positivo é que a maioria dos minérios apresenta dureza inferior a do material abrasivo utilizado nos testes, levando-se a acreditar que o desgaste será pequeno com a utilização de poliuretano como revestimento de hidrociclones.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para verificar o tempo que o poliuretano suportará como revestimento de hidrociclone faz-se necessário um ensaio mais detalhado, com a utilização de fluido estabilizante para que a placa não apresente aumento de temperatura como no caso analisado. Além disso, é necessário que o ensaio dure até que ocorra a perfuração total da placa o que acarretará um tempo maior.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. F. **Separação de leveduras de fermentação alcoólica em hidrociclones**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 154 p. (Tese, Mestrado, Engenharia Química). 2006.

ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. 108 p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia Química).

AMARAL, M. C. **Uso de Hidrociclones na Separação de Partículas de Baixa Densidade no Processo de Perfuração com Duplo Gradiente**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 86 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

ANJOS, R. O. MEDRONHO, R. A. FIGUEIREDO-CARDERO, A. Análise da tensão de cisalhamento em hidrociclones para a separação de células animais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2014, Florianópolis. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis: ABEQ, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8 ed. São Paulo: LTC, 2012

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002. 280 p.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**. São Paulo, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 159-154, ago. 2009.

CARRAHER, C. E. **Seymour/Carraher's polymer chemistry**. 7 ed. Boca Ratón – Flórida: CRC Press, 2006. 729 p.

CARRISSO, R. C. C.; CORREIRA, J. C. G. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, A. B. (Org). **Tratamento de minérios**. 4 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 197-238.

FIORIO, R. **Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contendo poss via extrusão reativa**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 135 p. (Tese, Doutorado, Ciências dos Materiais).

LUZ, A. B., LINS, F. F., **Tratamento de Minérios**, 4 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

- MATOS, J. D. V.; SILVA, A. C.; SILVA E. M. S. Modelo empírico para cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclones. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. São Paulo, v. 9, n. 4, p. 302-308, out.-dez. 2012.
- MELO, C. H. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 78 p. (Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação, Engenharia Metalúrgica), 2010.
- MIRANDA, P. E. V. **Polímero**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015. 51 p.
- MOURA, A. D.; MOURA, T. R.; ALMEIDA, A. R. F. Análise e projeto de hidrociclones para o Processamento de lodo provido da indústria têxtil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2014, Florianópolis. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis: ABEQ, 2014.
- OLIVEIRA, M. S. & SOUZA, M. D. **Tratamento de Minério I**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Araxá. 2008. 219 p.
- SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, O. A. Ensaio de classificação em hidrociclone. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. BRAGA, P. F. A. (Ed). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2007. p.139-54.
- SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G .M.; BARROZO, M. A. S. Otimização das relações geométricas de hidrociclones para aumentar a eficiência total de separação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 25, 2013, Goiânia. **Anais do XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Goiânia: UFG, 2013. p. 97-104.
- SILVA, H. M.; MACIEL, G. F. Desenvolvimento e Otimização de Hidrociclones Frente a Modificações de Variáveis Geométricas e de Processo. **Revista Pensar: Engenharia**. Belo Horizonte: v. 2, n. 2, jul. 2014.
- SOCCOL, O. J. *et al.* Avaliação de um hidrociclone de Rietema para remoção de areia da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 464-468, 2005.
- TAVARES, L. M. *et al.* Modeling classification in small diameter hydrocyclones under variable rheological conditions. **Minerals Engineering**, v.15, pp. 613-622, 2002.
- TONIN, P. C. **Otimização computacional de hidrociclone na irrigação pressurizada**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 92 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Agrícola), 2012
- VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006, 298 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Química).
- VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.