

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MAPEAMENTO DE ZONAS DE DESGASTE EM  
HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE  
POLPA DE MINÉRIO**

**EDUARDO COSTA BRAVIM  
RENAN ALVES PEREIRA**

VITÓRIA  
2007

**EDUARDO COSTA BRAVIM  
RENAN ALVES PEREIRA**

**MAPEAMENTO DE ZONAS DE DESGASTE EM  
HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE  
POLPA DE MINÉRIO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. M.Sc. Flávio José da Silva.

**VITÓRIA  
2007**

**EDUARDO COSTA BRAVIM  
RENAN ALVES PEREIRA**

**MAPEAMENTO DE ZONAS DE DESGASTE EM  
HIDROCICLONES NA CLASSIFICAÇÃO DE  
POLPA DE MINÉRIO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 13 de Julho de 2007.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. M. Sc. Flávio José da Silva**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Antônio César Bozzi**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Eng. Mecânico Yordan Madureira de Almeida**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

**A DEUS, sobretudo.**

**Ao Professor Flávio José da Silva, que pacientemente nos prestou sua atenção e seu vasto conhecimento.**

**A Companhia Vale do Rio Doce, pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho na utilização e pesquisa, em suas usinas de pelotização.**

# RESUMO

Muitos são os processos que envolvem o tratamento de minérios. No caso do minério de ferro especificamente, estes abrangem um vasto universo de tecnologias e etapas, que vão desde a descoberta da mina, extração e disponibilização para as indústrias metalúrgicas. A aglomeração dos pós de minério de ferro gerados nas minas é o principal negócio de uma usina de pelletização, uma atividade economicamente viável que proporciona grandes lucros para os acionistas, e ainda é geradora de grandes oportunidades de trabalho. Para que o produto final seja atingido, pelotas de minério com características mecânicas e químicas desejáveis, um longo caminho é percorrido por pequenas partículas com dimensões menores que 0,1490 mm. No entanto os efeitos que essas microscópicas partículas têm sobre equipamentos e materiais de engenharia são devastadores do ponto de vista do desgaste. O efeito erosivo e abrasivo do minério de ferro são fontes interessantes para o estudo tribológico dos sistemas envolvidos, onde tais efeitos podem ser amenizados gerando uma maior vida útil dos equipamentos e materiais que fazem parte desse processo. O processo de classificação é uma das etapas de uma usina de pelletização, onde hidrociclones são responsáveis pela separação de partículas grossas e finas. O desgaste ocorrido nos revestimentos desses equipamentos é a motivação do trabalho que será apresentado, onde o principal objetivo é o mapeamento dos tipos de desgaste e mecanismos envolvidos nas diferentes regiões de um hidrociclone.

Palavras-chave: tribologia; hidrociclones; minérios de ferro; polímeros.

**Objetivo:** Mapear e caracterizar os principais pontos de desgaste de hidrociclones na usina de pelletização.

**Metodologia (Conhecimento científico/tecnológico empregado):**

- Visão geral sobre o beneficiamento de minério de ferro no cap. 1;
- Caracterização das partículas de minério de ferro quanto à forma e tamanho no cap. 2;
- Estudo de polímeros usados em revestimentos de hidrociclones no cap. 3;
- Estudo dos mecanismos de desgaste erosivo para o problema proposto no cap. 4;
- Determinação das características do escoamento de fluidos com sólidos em suspensão em hidrociclones como pressão, velocidade e ângulos de incidência no cap. 5.

# • SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>MINÉRIO DE FERRO.....</b>	<b>7</b>
1.1	MINERALOGIA.....	7
1.2	PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS.....	8
<b>2</b>	<b>PELOTIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO .....</b>	<b>10</b>
2.1	PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO .....	10
2.2	CLASSIFICAÇÃO POR CICLONAGEM.....	11
2.3	HIDROCICLONES.....	12
2.4	FUNCIONAMENTO DO HIDROCICLONE.....	14
<b>3</b>	<b>POLÍMEROS.....</b>	<b>18</b>
3.1	ESTRUTURA MOLECULAR .....	18
3.2	CLASSIFICAÇÃO .....	20
3.3	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS .....	20
3.4	APLICAÇÕES DIVERSAS .....	23
<b>4</b>	<b>TRIBOLOGIA EM POLÍMEROS.....</b>	<b>25</b>
4.1	ATRITO EM POLÍMEROS .....	26
4.2	FADIGA .....	27
4.3	DESGASTE EROSIVO .....	28
4.4	DESGASTE POR CAVITAÇÃO .....	34
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO – MAPEAMENTO DESGASTE EM HIDROCICLONES .....</b>	<b>35</b>
5.1	VARIÁVEIS IMPORTANTES DO PROCESSO DE MOAGEM / CICLONAGEM .....	35
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS CAUSADORAS DO DESGASTE .....	36
5.3	CÁLCULO DAS VELOCIDADES DAS PARTÍCULAS DE MINÉRIO .....	38
5.4	MAPEAMENTO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE DESGASTE.....	41
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

# 1 MINÉRIO DE FERRO

O ferro encontra-se entre os elementos de maior abundância na crosta terrestre, juntamente com o oxigênio, silício e alumínio. A crosta (parte externa consolidada da terra) pode ser de natureza continental, onde há o predomínio de rochas graníticas ricas em silício e alumínio, ou de natureza oceânica, rica em silicatos de ferro e magnésio. O oxigênio ocorre associado aos demais elementos químicos presentes na crosta formando os silicatos. A tabela 1 mostra a distribuição dos principais elementos químicos na crosta terrestre.

Tabela 1: Elementos químicos mais comuns na crosta terrestre. Adaptado de Klein e Hurlburt, 1985.

<b>Elementos</b>	<b>% peso</b>	<b>% atômico</b>	<b>% Volume</b>
O	46,60	62,55	93,8
Si	27,72	21,22	0,9
Al	8,13	6,47	0,5
Fe	5,00	1,92	0,4
Ca	3,63	1,94	1,0
Na	2,83	2,64	1,3
K	2,59	1,42	1,8
Mg	2,09	1,84	0,3
<b>Total</b>	<b>98,59</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

## 1.1 Mineralogia

Os minerais, com pouquíssimas exceções, possuem um arranjo interno ordenado que é uma característica dos sólidos cristalinos. Quando as condições de formação são favoráveis, eles são limitados por superfícies planas e lisas e assumem formas geométricas regulares conhecidas como cristais. De um ponto de vista mais amplo cristal pode ser definido como um sólido homogêneo que possui um arranjo interno tridimensional (Klein, 2002). A ciência que estuda os sólidos cristalinos e os princípios que governam seu crescimento, sua forma externa ou morfologia e sua estrutura interna é chamada de cristalografia.

## **1.2 Propriedades físicas, químicas e mineralógicas**

Serão descritos a seguir algumas das características dos principais óxidos e hidróxidos de ferro presentes nos minérios de ferro e outros minerais que também são constituintes destes minérios. A hematita, magnetita e a goethita são os principais minerais formadores de depósitos (os mais comumente explorados).

### **1.2.1 Hematita (a - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

Cristaliza-se no sistema hexagonal. Apresenta dureza entre 5,5 e 6,5 Mohs, e densidade 5,3. Os cristais possuem um brilho metálico azul do aço, e as variedades terrosas são opacas. A cor de transparência é vermelha de sangue. O minério maciço comum é a hematita vermelha.

A hematita é uma substância essencialmente pura, formada por 70% de Fe e 30% de O, embora pequenas quantidades de Mn e Ti possam existir. A presença de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é considerada como impurezas. Sua estrutura consiste em camadas de íons oxigênio dispostos espacialmente em um arranjo hexagonal ligeiramente distorcido, e em camadas de íons ferro. Todas as propriedades estruturais são fortemente dependentes das condições de formação.

### **1.2.2 Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )**

A magnetita é fortemente magnética, com brilho submetálico, cor preta com tons variados de marrom ou cinza, azul do aço em partes intemperizadas; é opaca em lâmina delgada. Apresenta dureza 6,0 Mohs e densidade de 5,2. Composta essencialmente por 72,4 % de Fe e 27,6% O. Entretanto, algumas análises podem mostrar consideráveis porcentagens de Mg e  $\text{Mn}^{2+}$  substituindo o  $\text{Fe}^{2+}$  e Al, Cr,  $\text{Mn}^{3+}$  e  $\text{T}^{4+}$  substituindo o  $\text{Fe}^{3+}$ . A magnetita é o óxido de ferro que, comparado com a hematita, é mais estável a alta temperatura e baixa pressão (Klein, 2002; Ramdhor, 1980; Deer et al., 1981).



### 1.2.3 Goethita ( $\alpha$ - $\text{FeOOH}$ )

Cristaliza-se no sistema ortorrômbico, com cristais aciculares, reniformes, maciços, estalactíticos e na forma de agregados fibrorradiais. Dureza: 5 a 5,5 Mohs e densidade 4,3. É composta por 62,9% de Fe, 27,0% de O e 10,1% de  $\text{H}_2\text{O}$ . A goethita é isoestrutural com o diásporo ( $\text{AlOOH}$ ). A lepidocrocita ( $\gamma$ - $\text{FeOOH}$ ), mineral placóide que é um polimorfo da goethita, pode estar associado a esta (Klein, 1985). Estrutura em conchas com camadas concêntricas e ritmicamente alternadas são observadas, formando a estrutura botrioidal (figura 1).

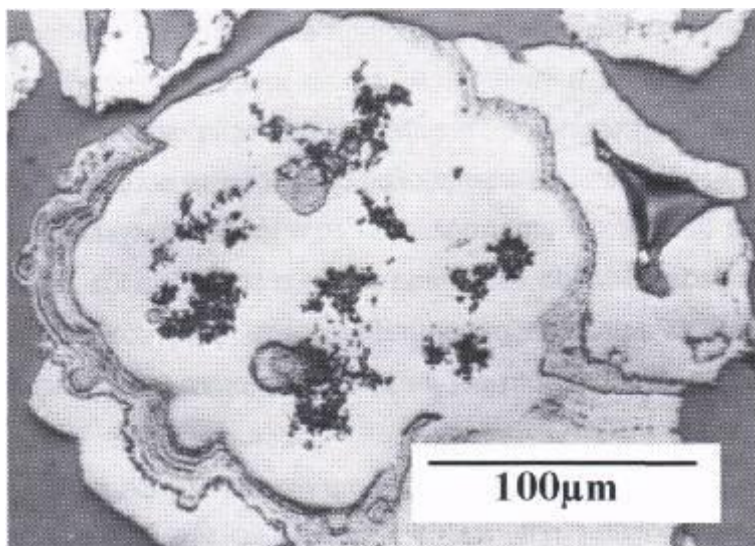


Figura 1 – Goethita mostrando seu hábito tipicamente botrioidal (Santos e Brandão, 1999).

Microscopia óptica de luz refletida (MOLR), apenas polarizador.

## 2 PELOTIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

As jazidas de minério de ferro contêm, naturalmente, uma parcela de finos de tamanho inferior a 6 mm. É unanimidade na siderurgia mundial que esta é a dimensão mínima aceitável em minérios granulados para a utilização em altos-fornos. Além disso, durante a lavra, processamento de concentração, classificação, manuseio e transporte minério, são geradas quantidades adicionais de partículas finas e ultrafinas, cuja aplicação direta nos reatores de redução é impraticável. A utilização do minério nesse estado tornaria a carga pouco permeável à passagem dos gases redutores, diminuindo a performance operacional.

A sinterização encarrega-se de uma parcela dos finos. Mostra-se, porém, imprópria à absorção de ultrafinos, com tamanho abaixo de 0,149 mm (100 mesh). Para aproveitá-los, foi então idealizada a pelotização. Com esses dois processos, todos os finos gerados na mineração podem ser aglomerados em tamanhos adequados à utilização nos reatores de redução das usinas siderúrgicas.

A pelotização é um processo de aglomeração que, através de um tratamento térmico, converte a fração ultrafina em esferas de tamanhos na faixa de 8 a 18 mm, possuindo características apropriadas para alimentação das unidades de redução.

### 2.1 Processo de Pelotização

As etapas envolvidas no processo de pelotização podem ser agrupadas em três estágios:

- Preparação das matérias primas;
- Formação das pelotas cruas;
- Processamento térmico.

A preparação das matérias primas tem por objetivo adequar as características do minério de ferro (pellet feed) às exigidas para a produção de pelotas cruas. Neste estágio é preparada a mistura a pelotizar, que pode comportar diferentes tipos de minério e aditivos, estes utilizados para modificar a composição química e as propriedades metalúrgicas das pelotas. Em geral, incluem-se neste estágio as seguintes etapas:

concentração / separação, homogeneização das matérias primas, moagem, classificação, espessamento, homogeneização da polpa, filtragem, adição de aglomerantes e mistura. A figura 2 mostra essas etapas.

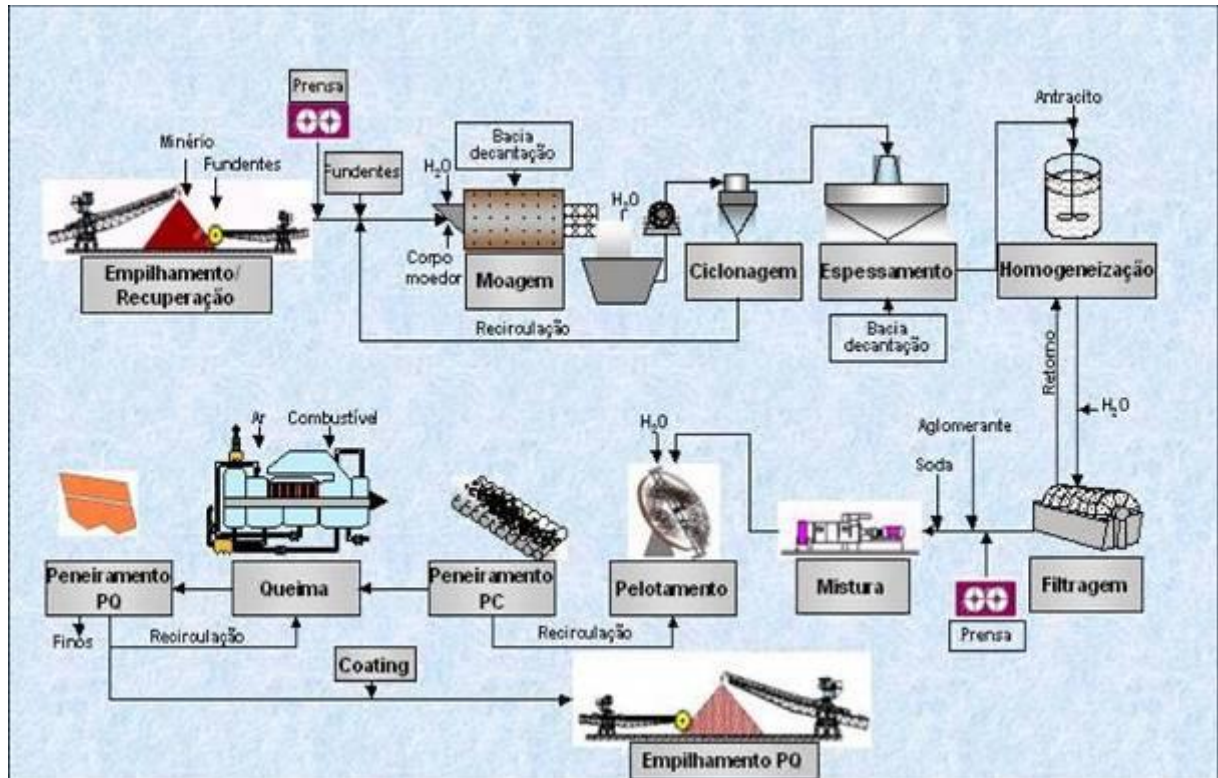


Figura 2 – Fluxograma do processo de pelotização.

A seguir um enfoque será dado no processo de classificação por ciclonagem, onde conceitos importantes devem ser compreendidos para prosseguimento do estudo e um melhor aproveitamento dos tópicos seguintes.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO POR CICLONAGEM

Em termos conceituais, classificação é a separação de uma população original (denominada "alimentação") em duas outras populações, que diferem entre si pela distribuição relativa dos tamanhos das partículas que as constituem:

- uma população grossa, que é composta predominantemente pelas partículas correspondentes às dimensões superiores presentes na alimentação;

- outra fina, que contém predominantemente as partículas de menores dimensões presentes na alimentação.

Em termos de processo, o classificador é um aparelho que recebe uma alimentação, composta de partículas de diferentes tamanhos, e a separa em duas frações ou produtos: o *underflow*, que contém maior proporção das partículas mais grosseiras, e o *overflow*, onde se concentram as partículas de menores dimensões.

**Ciclonação** é a operação de classificação executada em equipamentos denominados ciclones. No campo do tratamento de minérios, esta operação é sempre feita a úmido, ou seja, a alimentação é uma polpa - suspensão de partículas sólidas em água.. A denominação **hidrociclone** é utilizada com alguma frequência.

Toda operação de classificação é feita pela ação de um meio fluido em movimento dentro de um aparelho adequadamente construído, de tal modo que a fração grosseira afunde e seja retirada por baixo do aparelho (daí a razão do nome *underflow*) e que a fração fina seja arrastada pela corrente fluida e descarregada por cima do aparelho (razão do nome *overflow*).

A distinção conceitual entre fração grossa e fração fina é, pois, relativa: em cada uma das frações ou produtos estão presentes partículas de todos os tamanhos presentes na alimentação. A frequência relativa desses tamanhos é que é diferente: no produto grosseiro predominam partículas de tamanhos maiores e no produto fino, predominam os tamanhos menores.

Não é, portanto, o tamanho das partículas individuais que é diferente em cada produto, mas a distribuição relativa das partículas em 'tamanhos que distingue o *overflow* do *underflow*. Falando em termos probabilísticos, poderíamos afirmar que no produto grosseiro a probabilidade de encontrar tamanhos maiores é mais elevada que, correspondentemente, a probabilidade de encontrar os tamanhos menores é pequena.

## 2.3 Hidrociclones

Os hidrociclones são os equipamentos mais empregados na operação de classificação para fechamento do circuito de moagem. A polpa entra no hidrociclone, sob pressão, através do duto de entrada, no topo da câmara cilíndrica. Esta entrada pode ser feita tangencialmente ou em voluta, apresentando os hidrociclones com entrada em voluta maior capacidade e melhor desempenho. Entrando na câmara, a polpa adquire um movimento de rotação que, por

meio da aceleração centrífuga, arremessa as partículas maiores em direção à parede; as partículas finas são rejeitadas para o centro do hidrociclone, saindo pela abertura superior que é o vortex. As partículas mais grossas adquirem um movimento descendente e são descarregadas na abertura da parte inferior, o apex. . A figura 3 mostra esse funcionamento.

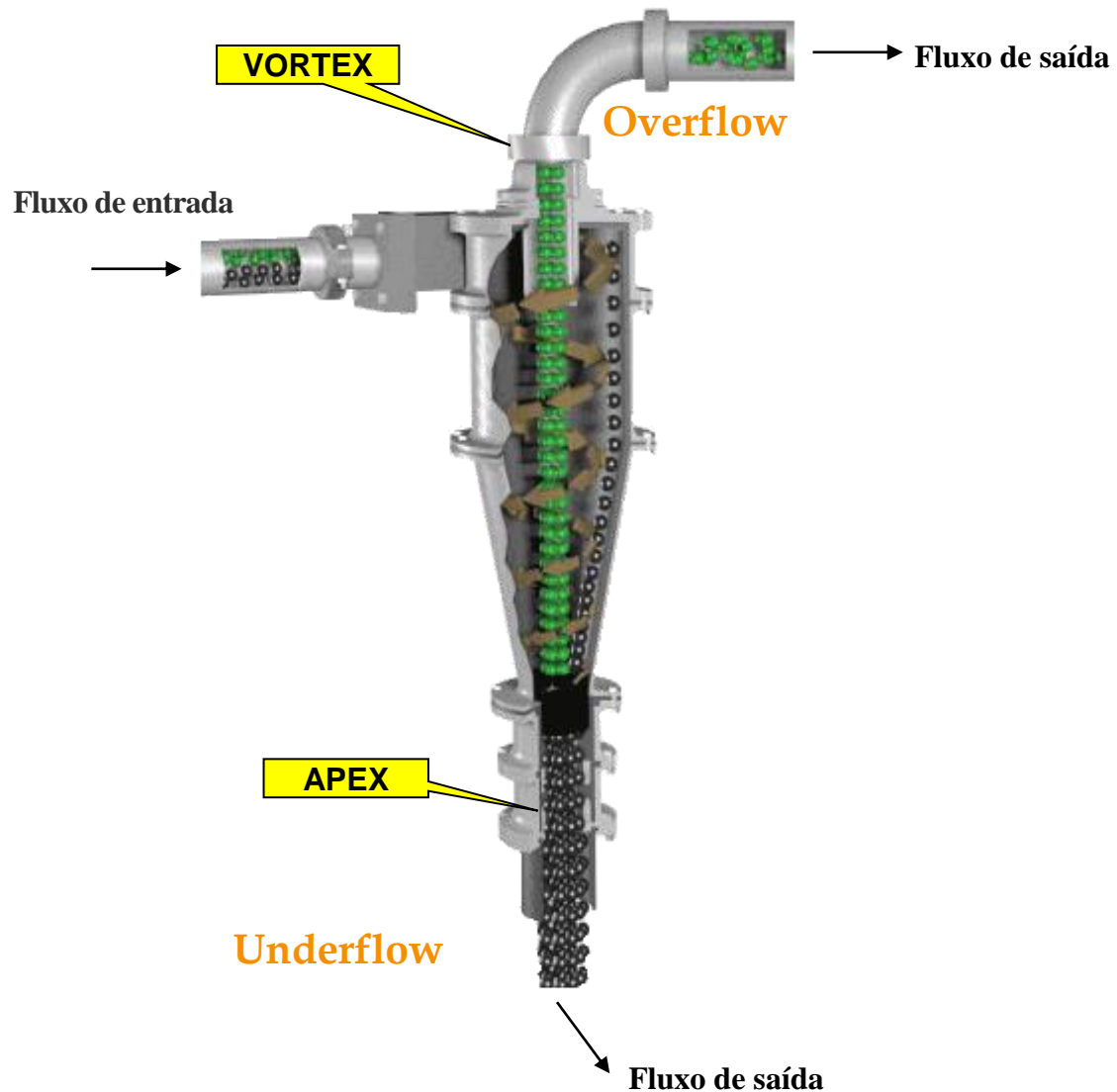
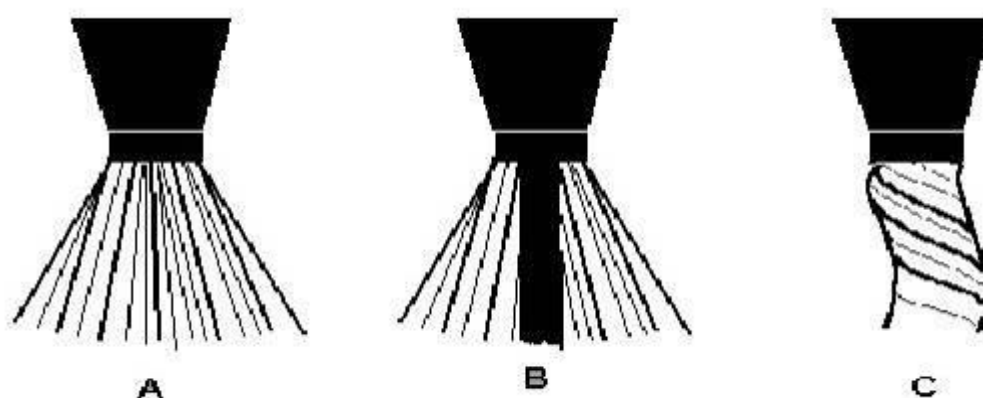


Figura 3 – Geometria do hidrociclone.

A área da abertura de entrada determina a velocidade tangencial da polpa, sendo assim um dos importantes fatores que afetam o processo de classificação.

Diâmetro do apex - O diâmetro do apex pouco afeta a capacidade de vazão do hidrociclone, determinando, porém, a capacidade de descarga de sólidos e a porcentagem de sólidos do *underflow*. Em operação normal, há uma região cilíndrica no eixo do hidrociclone que se acha vazia, e ela principia na abertura do apex; os sólidos descarregam por uma região anular, que envolve esse cilindro vazio chamado *air core*. Quando a vazão de *underflow* é

muito grande, há o desaparecimento do *air core* e o hidrociclone começa a operar de forma instável. Para a operação normal, diz-se que o hidrociclone está operando em spray e, em condição de sobrecarga, sua operação é em cordão. Deve ser evitada a operação em cordão, pois a sobrecarga do apex pode rejeitar partículas grosseiras para o overflow. Por outro lado, apex desnecessariamente grande provoca a obtenção de underflow muito diluído, que diminui muito a eficiência da classificação por um aumento da incorporação de finos ao *underflow*. (Figura 4).



- 
- |                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| ▪ Descarga em spray - | A | Diâmetro do Apex grande (acima do ideal)   |
| ▪ Descarga em cone-   | B | Diâmetro do Apex ideal                     |
| ▪ Descarga em cordão- | C | Diâmetro do Apex pequeno (abaixo do ideal) |

Figura 4 – Variação no fluxo do *underflow* em função do diâmetro

O desgaste que ocorre nos apex dos hidrociclones proporcionam o aumento do diâmetro, levando a troca pelo efeito do spray com diâmetro acima do ideal.

## 2.4 Funcionamento do hidrociclone

Do ponto de vista mecânico, o hidrociclone é um equipamento capaz de transformar a energia potencial do fluxo da alimentação (pressão) em energia cinética (movimento). Para compreender perfeitamente o funcionamento do hidrociclone, vamos considerar primeiramente como ele funciona com água apenas. A água, entrando no hidrociclone, adquire um movimento circular, ou mais precisamente um escoamento rotacional, dentro da porção cilíndrica do hidrociclone. Se entrou, a água tem que sair e só pode fazê-lo pelas duas aberturas existentes: o apex e o vortex finder. Como este último tem secção maior, é por ele que sai a maior porção da água alimentada ao hidrociclone.

É importante salientar que o caráter rotacional do escoamento continua nos dois fluxos que se dirigem ao vortex e ao apex. Assim, dentro do hidrociclone, toda a massa de água está girando num mesmo sentido, mas uma parte dela tem uma componente vertical de velocidade no sentido descendente e se dirige para o apex (vórtice descendente) enquanto a outra tem um sentido ascendente e se dirige para o vortex finder (vórtice ascendente). Devido ao projeto do hidrociclone o vórtice ascendente fica no centro do hidrociclone e o vórtice descendente na periferia. Devido ao tamanho da secção dos orifícios, a vazão do vórtice ascendente é maior que a do descendente.

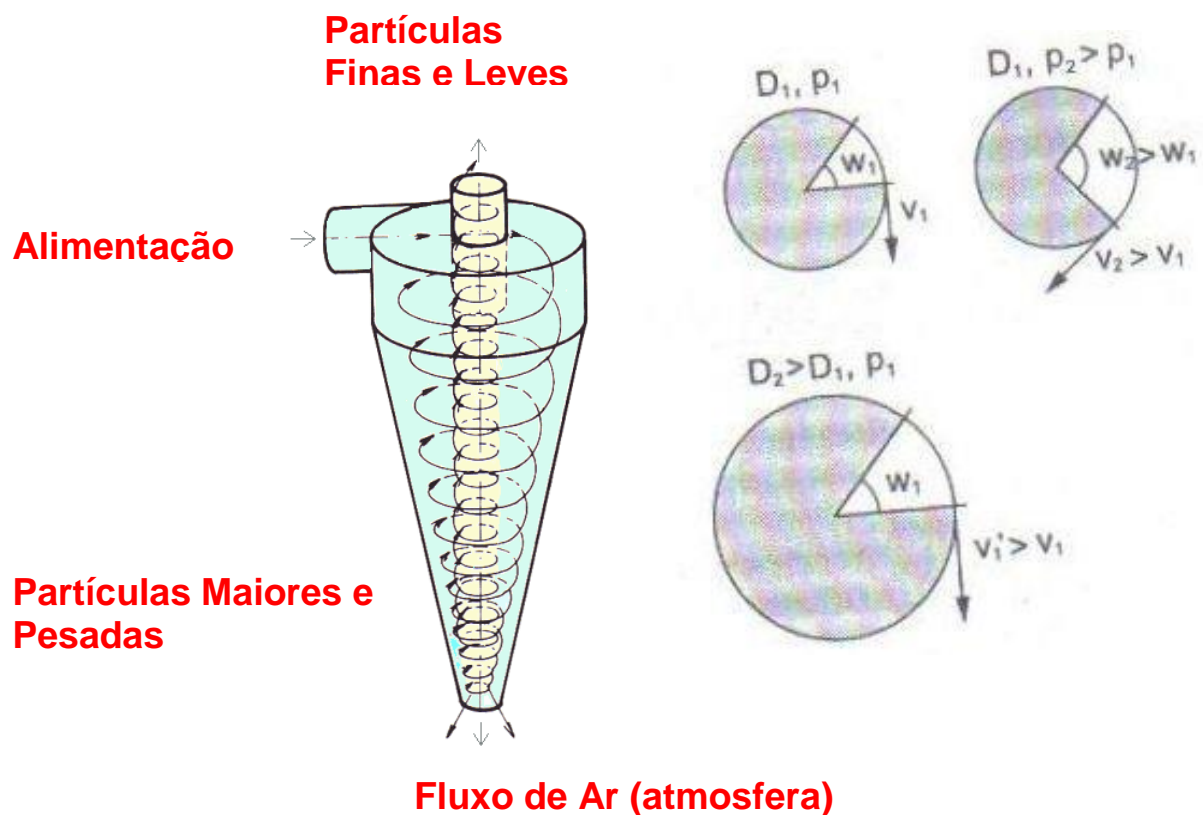


Figura 5 – Características do escoamento nos hidrociclones.

Este escoamento tem algumas outras características que também são importantes (ver figura 5)

- 1 A velocidade angular ( $w$ ) depende da pressão da alimentação ( $p$ ). Quanto maior for esta, maior será aquela;
- 2 A velocidade linear ( $v$ ) depende da velocidade angular ( $w$ ) para um determinado ciclone (diâmetro) - para esse hidrociclone, aumentando a pressão de alimentação, aumentarão tanto a velocidade linear como a angular. Em hidrociclone de grande diâmetro é possível obter elevadas velocidades lineares com pequenas velocidades angulares (ou pequenas pressões). Hidrociclones de pequeno diâmetro, por sua vez,

exigem pressões elevadas para que se obtenham velocidades lineares adequadas à ciclonagem;

- 3 Para uma mesma pressão, hidrociclones de diâmetros crescentes apresentarão velocidades lineares crescentes.
- 4 O movimento circular da massa fluida (movimento rotacional) acarreta o aparecimento de uma pressão negativa. Esta pressão negativa provoca sucção de ar da atmosfera para dentro do ciclone, através do apex. Esse ar mistura-se ao vórtice ascendente e sai para o overflow. Ele contribui para diminuir a densidade do líquido neste fluxo.

Vamos agora considerar a presença das partículas sólidas dentro do ciclone. O movimento circular acarreta o aparecimento de uma força centrífuga, que impele as partículas em direção às paredes do ciclone. Estas partículas ficam então sujeitas à ação de duas velocidades (além da velocidade do escoamento) - a centrífuga, que tende a arrastá-las em direção às paredes do ciclone, e a outra de direção vertical, imposta pelo movimento da água dentro do ciclone: no sentido descendente nas regiões próximas à periferia, onde a massa de polpa está sendo descarregada pelo *underflow*, e no sentido ascendente nas regiões centrais, onde a polpa está sendo descarregada pelo *overflow*.

As partículas mais grossas têm massa maior e por isto afundam mais depressa no campo centrífugo, ocupando o volume do hidrociclone próximo às paredes. As partículas finas também tendem a ser projetadas em direção às paredes, mas quando chegam lá encontram esse espaço já ocupado pelas partículas grosseiras. Em consequência, podemos dizer que as partículas maiores deslocam as partículas mais finas, no campo centrífugo, ocupando as posições mais distantes do centro do hidrociclone. Em outras palavras, as partículas mais grossas "afundam" no campo centrífugo, ocupam a sua periferia e empurram as partículas mais finas para o centro do ciclone. Ao chegar junto às paredes, as partículas maiores pela ação do atrito e perdem velocidade. São arrastadas: para baixo, pelo vórtice descendente e também pela ação da gravidade descarregam com o *underflow*. As partículas mais finas, por sua vez, são empurradas para o interior do ciclone, até encontrar o fluxo ascendente em direção ao vortex finde. Chegando aí, elas são arrastadas e descarregam com o *overflow*.

A existência de dois fluxos verticais, um descendente e outro ascendente implica em que exista um lugar geométrico onde a velocidade vertical é nula (somente a vertical - no plano horizontal continuam girando no sentido do fluxo rotacional). Este lugar geométrico é uma superfície cilíndrico-cônica e é chamada "manto". As partículas externas a este manto



descarregam via *underflow*. As partículas internas via *overflow*. As partículas que estão neste lugar geométrico são submetidas de maneira equilibrada à ação da força centrífuga e ao "empuxo" das partículas mais pesadas que as empurram na direção do vortex finder. Elas têm, portanto, chances iguais se dirigirem seja para o *underflow* ou para o *overflow*.

Isto estabelecido é fácil de entender que no hidrociclone atuam dois mecanismos diferentes sobre a separação das partículas sólidas. Um deles é o de sedimentação no campo centrífugo, através do qual as partículas mais pesadas deslocam-se em direção às paredes e depois para o apex, enquanto empurram as partículas mais leves para o fluxo ascendente que sai pelo vortex finder. Outro é o de arraste das partículas mais leves pelo fluxo ascendente. Estes dois mecanismos são afetados pela presença das partículas no manto: a existência destas partículas, nessa posição, interfere com o movimento em direção ao *overflow* ou ao *underflow*, podendo melhorar ou prejudicar a seletividade da separação, conforme o caso. A Krebs, tradicional fabricante de ciclones, recomenda o uso de porções cilíndricas longas para favorecer as separações de diâmetro de corte menor e curtas para separações mais grossas.

As partículas menores podem sair em qualquer um dos fluxos, dependendo da quantidade de outras partículas presentes, da quantidade de partículas no manto, da viscosidade da polpa etc. Já as partículas maiores são pesadas demais para serem arrastadas pelo fluxo ascendente e só podem sair pelo apex. Isto é, sua massa é de magnitude tal que, em qualquer posição em que se encontrem, serão lançadas contra a parede do hidrociclone e escorrerão em direção ao apex.

### 3 POLÍMEROS

Em virtude da crescente demanda de desenvolvimento de polímeros para as mais diversas aplicações, como em revestimento interno de equipamentos de processo, torna-se necessário o conhecimento das características e propriedades desses materiais.

#### 3.1 *Estrutura Molecular*

Polímeros são compostos orgânicos de moléculas muito grandes, quimicamente baseados em cadeias de hidrocarbonetos, aos quais são lateralmente ligados vários átomos ou radicais. Estas macromoléculas podem ser pensadas como sendo compostas de meros, menores entidades estruturais, que são repetidas ao longo da cadeia. Apresentam baixas densidades e podem ser extremamente flexíveis.

Várias características moleculares têm influência sobre as propriedades de polímeros. Emaranhamento molecular ocorre quando as cadeias assumem formas ou contornos torcidos, embobinados e retorcidos. A figura 6 representa esquematicamente uma única molécula de uma cadeia de polímero com numerosas contorções e espirais aleatórias, produzida pelas rotações das ligações dentre os átomos que compõem a cadeia.

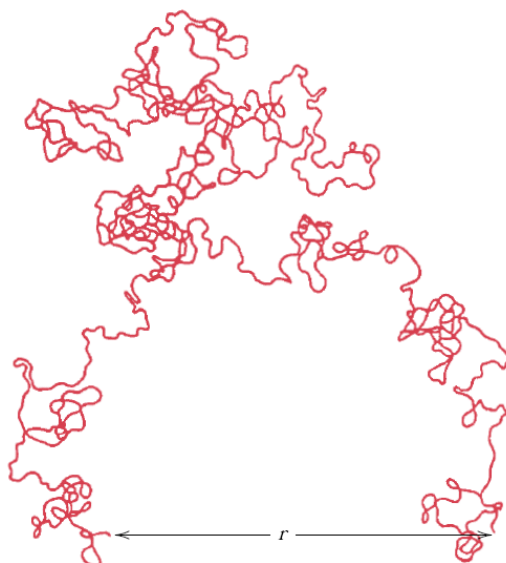


Figura 6 – Representação esquemática de uma única molécula de uma cadeia de polímero. ( De L. R. G. Treolar, The Physics of rubber elasticity, 2ns edition, Oxford University, Oxford, 1958, p. 47.)

Em relação à estrutura molecular, são possíveis estruturas lineares, ramificadas, cruzadamente ligadas e em rede, conforme figura 7. Quando o empacotamento de cadeias moleculares é tal que produza um arranjo atômico coordenado, diz-se que existe a condição de cristalinidade. Modernas técnicas de síntese de polímeros permitem considerável controle sobre várias possibilidades estruturais.

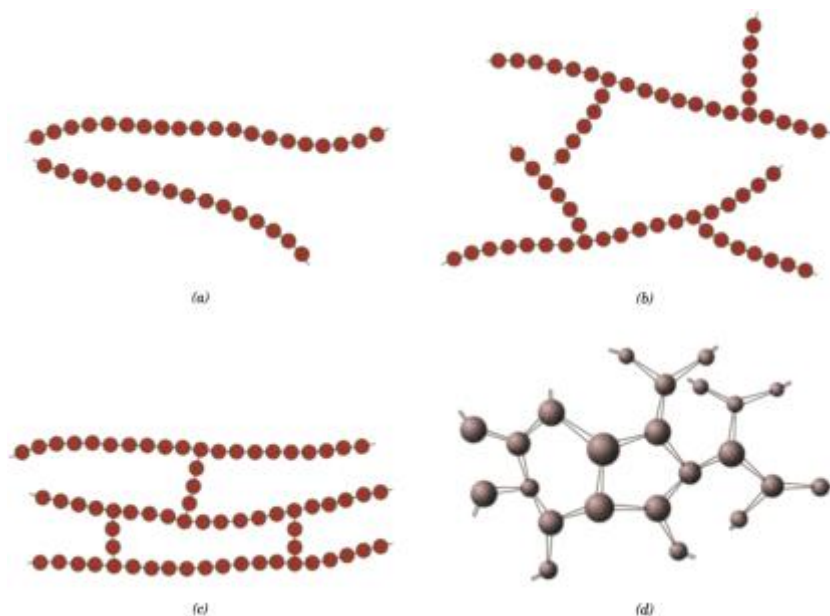


Figura 7 – Representações Esquemáticas de estruturas moleculares (a) lineares, (b) ramificadas, (c) ligadas cruzadamente, e (d) ligadas em rede (tridimensional). Círculos designam unidades de mero individuais.

Para **polímeros lineares**, podem existir extensas ligações de van der Waals entre as cadeias. Alguns dos polímeros comuns que se formam com estruturas lineares estão polietileno, cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), polimetil metacrilato, poliamidas (náilons) e fluorocarbonos. Nos **polímeros ramificados**, as ramificações são consideradas como parte da molécula da cadeia principal, resultam a partir de reações laterais que ocorrem durante a síntese do polímero. A eficiência de empacotamento da cadeia é reduzida com a formação de cadeias laterais, que resultam num abaixamento da densidade do polímero. Muitos dos materiais elásticos de borracha são **polímeros com ligações cruzadas**. Em borrachas, isto é chamado vulcanização. Polímeros compostos de unidades trifuncionais são denominados **polímeros em rede**. Um polímero que é altamente ligado cruzadamente pode ser classificado como um polímero em rede. Estes materiais têm propriedades mecânicas e térmicas distintas. Epóxis e fenolformaldeídos pertencem a este grupo.

### **3.2 Classificação**

Existem diversos materiais poliméricos popularmente conhecidos e encontram uma larga variedade de aplicações, como elastômeros (ou borrachas), fibras, revestimentos, adesivos, espumas e filmes. Dependendo de suas propriedades, um particular polímero pode ser usado em 2 ou mais destas categorias de aplicações. Por exemplo, um plástico, se cruzadamente ligado e usado acima da sua temperatura de transição vítrea, pode comportar-se como um satisfatório elastômero.

Com base no comportamento tensão-deformação, polímeros caem dentro de três classificações gerais: frágeis, plásticos e altamente elásticos. Estes materiais não são nem tão fortes nem tão rígidos quanto os metais e suas propriedades mecânicas são sensíveis a mudanças em temperatura. A resistência mecânica destes materiais pode ser melhorada por ligação cruzada induzida por radiação e por aumentos na cristalinidade e na massa molecular média. Em relação ao comportamento mecânico a elevadas temperaturas, polímeros são classificados quer como termoplásticos quer como termorrígidos. O primeiro se amolece quando aquecido e se endurece quanto resfriado; este ciclo é reversível e possível de ser repetido. Em contraste, os termorrígidos, uma vez tenham sido endurecidos, não mais se amolecerão no aquecimento.

### **3.3 Características mecânicas e termomecânicas**

Polímeros são, em muitos aspectos, mecanicamente dissimilares aos metais. Por exemplo, o módulo de elasticidade pode ser tão baixo quanto 7 MPa para elastômeros, mas pode ser tão alto quanto 4 GPa para alguns dos polímeros muito rígidos. Valores de módulo para metais são muito maiores e giram na faixa entre 48 a 410 GPa. Resistências à tração máximas para polímeros são da ordem de 100 MPa, e para algumas ligas metálicas, 4100 MPa. Enquanto metais raramente se alongam até mais do que 10%, alguns polímeros altamente elásticos podem experimentar alongamentos tão altos quanto 1000%.

Três diferentes tipos de comportamento tensão-deformação são encontrados para materiais poliméricos, como representado na Figura 8. A curva *A* ilustra o caráter tensão *versus* deformação para um polímero frágil, na medida em que fratura enquanto se deforma elasticamente. Esse comportamento é característico de fibras, como o PAD. A curva *B* indica

o comportamento para o material plástico, como o Poliuretano. A deformação inicial é elástica, a qual é seguida pelo escoamento e por uma região de deformação plástica, similar àquela encontrada em muitos materiais metálicos. Finalmente, a deformação exibida pela curva *C* é totalmente elástica, típica de borracha, com grandes deformações recuperáveis produzidas em baixas tensões. Esse comportamento é característico em uma classe de polímeros denominada elastômeros.

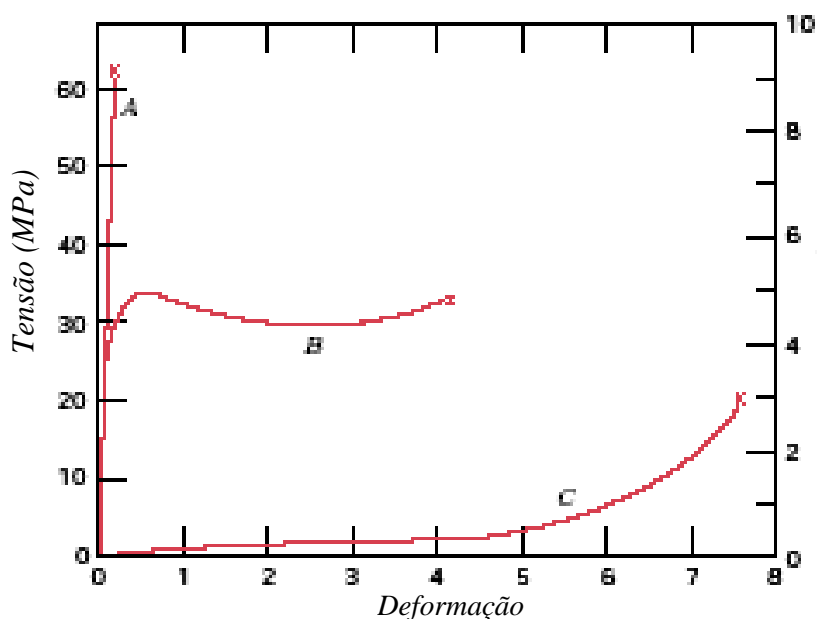


Figura 8 – Comportamento tensão-deformação para fibras (A), plásticos (B) e elastômeros (C).  
[Callister]

Grandes extensões elásticas são possíveis para materiais elastômeros que são amorfos e extensivamente ligados cruzadamente. Deformação corresponde ao distorcimento e ao desbobinamento das cadeias em resposta a uma tensão de tração aplicada. Ligação cruzada é às vezes encontrada durante o processo de vulcanização, que confere alta resiliência a esses materiais.

### 3.3.1 Viscoelasticidade

A maioria dos polímeros apresentam comportamento intermediário entre o elástico e o viscoso. A dependência das propriedades mecânicas com o tempo caracteriza sua viscoelasticidade, conforme apresentado na figura 9.

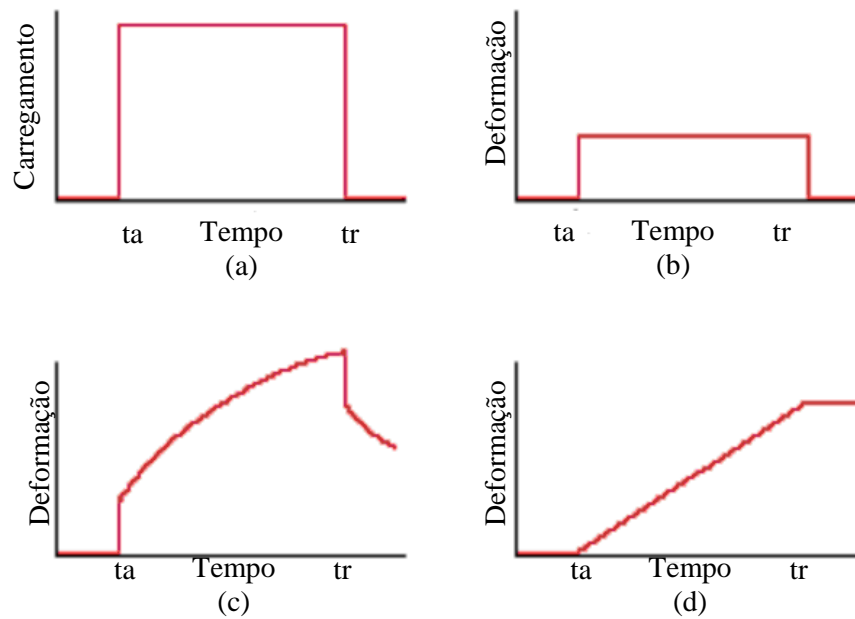


Figura 9 – Carregamento em função do tempo, onde o carregamento é aplicado no tempo  $t_a$  e aliviado no tempo  $t_r$ . [Callister]

### 3.3.2 Influência da temperatura

As características mecânicas de polímeros são muito mais sensíveis à mudanças de temperatura ao redor da temperatura ambiente. Considere-se o comportamento tensão-deformação do polimetil metacrilato ("Plexiglas") a várias temperaturas entre 4 e 60°C, Figura 10. Vale a pena notar várias características desta figura, como se segue: o aumento da temperatura produz:

- um decréscimo no módulo elástico;
- uma redução na resistência à tração;
- um aumento da ductilidade.

A 4°C o material é totalmente frágil, enquanto que considerável deformação plástica é realizada tanto a 50 quanto a 60°C.

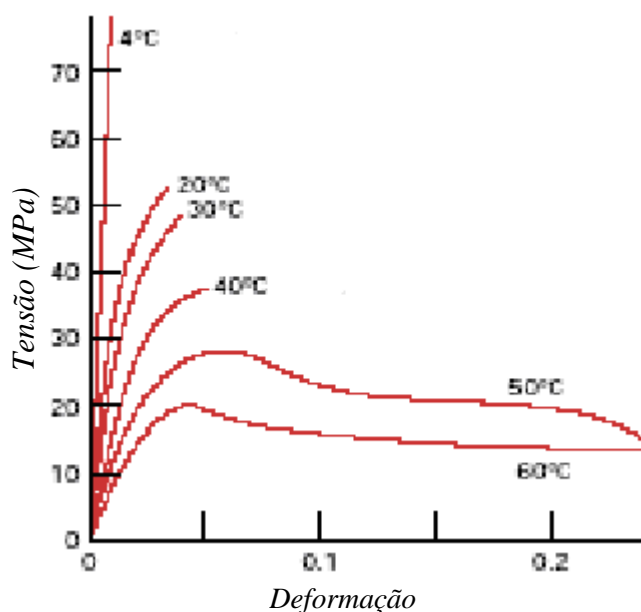


Figura 10 – Influência da temperatura sobre as características tensão-deformação de polimetil metacrilato. (de T.S. Carswell e H.K. Nason, "Effect of Environmental Conditions on the Mechanical Properties of Organic Plastics", *Symposium on Plastics*, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1944. Copyright, ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103).

### 3.4 Aplicações diversas

Em virtude da enorme variedade de polímeros com características das mais variadas, existem aplicações desses materiais em diversas áreas. A tabela 2 apresenta algumas características e aplicações típicas desses materiais.

Tabela 2 – exemplos de aplicação de alguns polímeros.

Polímero	Principais características	Aplicações típicas
Polietileno de Baixa Densidade	Resistência química, a impacto, baixa resistência mecânica usinabilidade e soldabilidade, baixo índice de absorção de água,	filmes, laminados, recipientes, embalagens.
Polietileno de Baixa Densidade Linear	Flexibilidade e resistência ao impacto	embalagens, utensílios, tubos.
Polietileno de Alta Densidade	Rigidez e resistência à erosão	bombonas, filmes, tubos de água e gás, tanques automotivos.
Polietileno de Ultra	Alta resistência ao desgaste, mesmo em	Engrenagens, componentes para

Alta Densidade	presença de água.	bombas de líquidos corrosivos, implantes de ossos artificiais.
Poli (cloreto de vinila)	Baixo custo, elevada resistência a chama, pela presença do cloro.	tubos, carcaças de utensílios domésticos.
Poliuretano	Resistência mecânica, à abrasão, e a óleos, alta resiliência. Boa resistência ao desgaste abrasivo e de rolamento. Alto coeficiente de atrito em deslizamento.	molas, tarugos, rodas, gaxetas, luvas, acoplamentos, peças para siderurgia e mineração.
Politetrafluoretileno (PTFE)	Baixo coeficiente de atrito com alta taxa de desgaste. Geralmente associado a outros polímeros e materiais. Limitado pela temperatura.	Mancais de deslizamento, vedação de conexões.
Elastômeros (borrachas)	Baixo módulo de elasticidade e alta resiliência, quando vulcanizadas.	pneus, vedações, mangueiras de borracha, correias transportadoras.

Polímeros em geral não apresentam propriedades tribológicas interessantes. Contudo, é comum a aplicação dos polímeros associados com outros materiais, além dos compósitos poliméricos, inclusive em condições severas e não lubrificadas, apresentando eficiência até superior a aços alta-liga.

### 3.4.1 Revestimentos

Revestimentos são freqüentemente aplicados às superfícies de materiais para se servir a um ou mais das seguintes funções, como proteger o item em relação ao ambiente que pode produzir reações corrosivas e deteriorativas, melhorar as aparências do item, suprir isolamento elétrico, entre outras aplicações. Muitos dos revestimentos aplicados são polímeros, a maioria dos quais são de origem orgânica. Estes revestimentos orgânicos caem em várias diferentes classificações, como tinta, verniz, esmalte, laca (verniz de resina) e goma-laca.



## 4 TRIBOLOGIA EM POLÍMEROS

Alguns polímeros adequadamente processados apresentam propriedades satisfatórias tanto em desgaste abrasivo quanto erosivo. Ambos são resultantes do contato plástico entre a superfície e um contra-corpo ou um fluido. Este contato pode ser caracterizado pelo índice de plasticidade ( $\psi$ ), que define a parcela das asperezas em contato que sofrem deformação plástica.

$$\psi = \frac{E}{H} \left( \frac{\sigma^*}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde:

E: rigidez do sistema.

H: dureza da aspereza

$\sigma^*/r$ : acabamento superficial.

Metais em geral apresentam valores de  $\psi$  entre 0,1 e 100. Polímeros em geral apresentam valores menores.

O contato entre polímeros, ou entre um polímero e um metal, é predominantemente elástico, onde a razão entre o módulo de elasticidade do material com sua dureza (E/H) determina a extensão da deformação plástica. Para os metais, este valor é próximo de 100. Para os polímeros, próximo de 10 e também apresentam menor resistência ao desgaste que metais com mesma dureza. O outro termo depende da rugosidade superficial. Para haver o contato plástico, portanto, a rugosidade deve ser elevada. Na figura 11 podemos observar ocorrência de regime elástico em superfícies finamente polidas, sob baixa carga e com baixo fator de plasticidade.

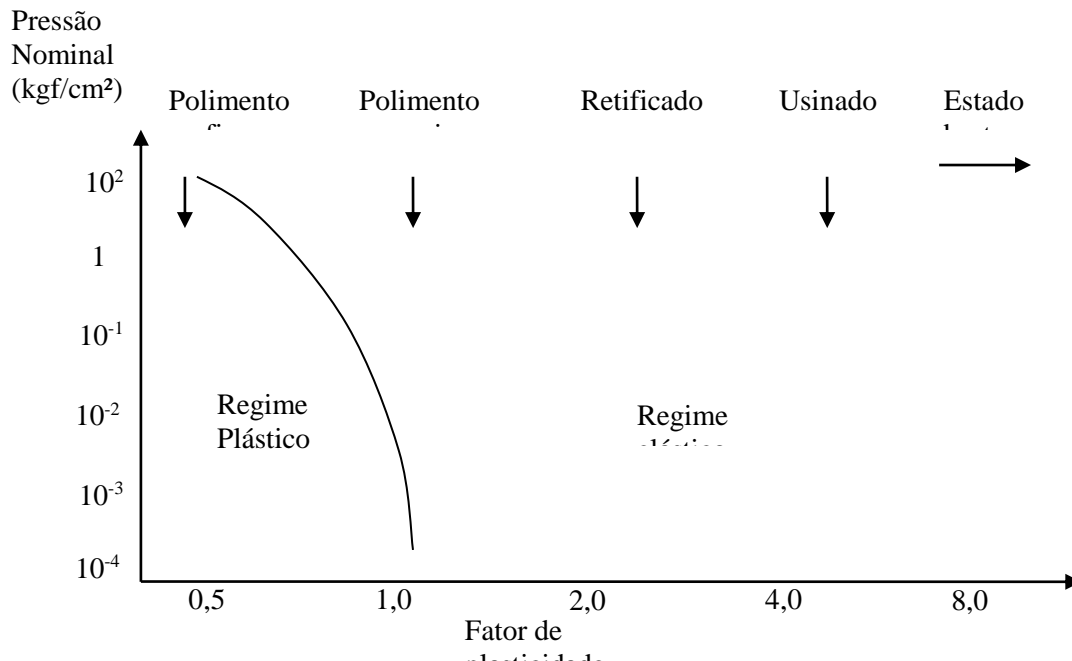


Figura 11 – Comportamento dos polímeros em função do fator de plasticidade e do contato superficial.

Polímeros em geral são cerca de dez vezes mais conformáveis e elásticos que metais e cerâmicas. Para polímeros termoplásticos, são possíveis tanto o modo dútil quanto o modo frágil e muitos desses materiais são capazes de experimentar uma transição dútil-frágil.

A teoria da abrasão também mostra que a taxa de desgaste é inversamente proporcional à dureza, mas para os polímeros esta correlação não é tão boa por dois motivos:

- Primeiramente, a dureza mede a facilidade da deformação plástica, estando relacionada com o limite de escoamento. Nos polímeros, há uma acomodação elástica próximo a indentação;
- Por fim, o contato entre os corpos gera também deformação elástica, causando dano por fadiga.

#### 4.1 Atrito em polímeros

As primeiras teorias sobre o atrito foram desenvolvidas a partir das seguintes observações, conhecidas como leis do atrito:

- A força de atrito é linearmente proporcional à força normal entre superfícies em contato. Essa razão de proporcionalidade é definida como **coeficiente de atrito** ( $\mu$ );
- O coeficiente de atrito não depende da carga normal;
- A força de atrito não depende da área aparente de contato.

As leis do atrito geralmente **não se aplicam aos polímeros**, devido a viscoelasticidade. O coeficiente de atrito varia com a carga normal, velocidade de deslizamento e temperatura. Polímeros em geral apresentam valores de  $\mu$  entre 0,1 e 0,5, menores que aqueles encontrados para os metais e cerâmicos. Em função disso, costumam ser utilizados sem lubrificação, deslizando contra superfícies duras.

O atrito pode ser atribuído a duas origens: deformação, envolvendo dissipação de energia, e adesão, originada da interface corpo/contra-corpo.

#### 4.1.1 Atrito devido à deformação

A resistência ao rolamento vem da dissipação de energia nas redondezas da área de contato, como resultado da resposta viscoelástica. Um elemento experimenta um ciclo de deformação como mostrado na figura 12.

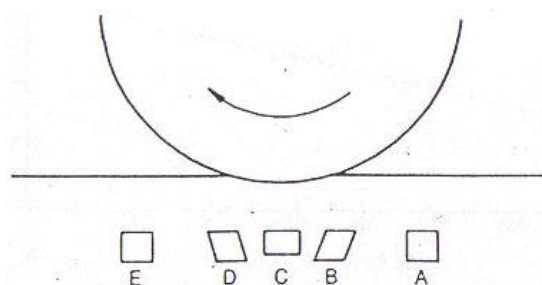


Figura 12 – Deformação de elementos de massa no polímero sob carga de rolamento (Briscoe B J, em Dowson D, Taylor C M. Godet M e Berthe D (Eds), Friction and Traction, Westbury House, 1981, pp. 81-92).

## 4.2 Fadiga

Polímeros podem experimentar falha por fadiga sob condições de carregamento cíclico. Tal como acontece com os metais, fadiga ocorre em níveis de tensão que estão abaixo do limite de escoamento. O processo de fadiga ocorre em polímeros com baixo módulo de elasticidade, ou com módulos maiores contra contra-corpos lisos. O desgaste resulta da

formação de trincas associadas à deformação elástica. O dano é cumulativo, e as partículas desprendidas são removidas após o crescimento e junção destas trincas. A taxa de desgaste por fadiga depende fortemente da rugosidade e também da carga normal. O desgaste geralmente ocorre pelo crescimento progressivo das trincas, começando na superfície. Este crescimento pode ser observado pelas marcas de abrasão na superfície. A taxa de desgaste depende muito das forças de atrito na superfície. Para  $\mu$  alto e  $E$  baixo, um ciclo de propagação pode gerar uma partícula, que pode ser deformada (alongada) rolando entre as superfícies. Os elastômeros distinguem-se por terem um baixo módulo de elasticidade e alto alongamento na ruptura em tração. A deformação pode ser elástica, quando o mecanismo está associado à fadiga, ou plástica, quando ocorre a abrasão. A figura 13 mostra as parcelas destes processos, em função do acabamento e do tipo do polímero.

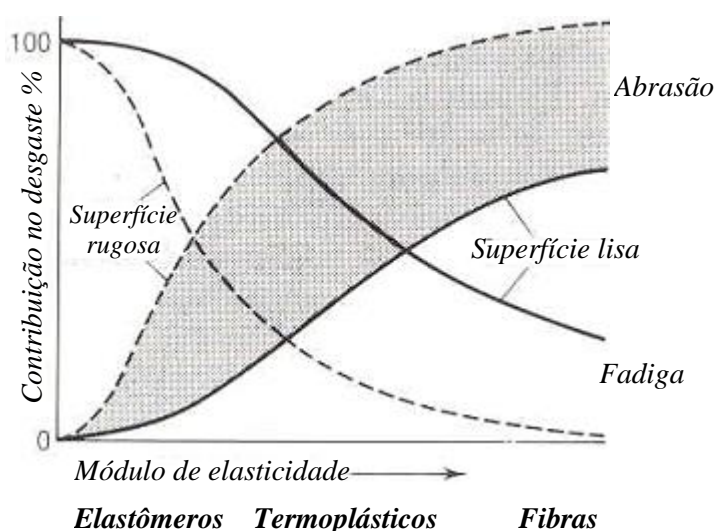


Figura 13 – Diagrama esquemático mostrando o percentual de contribuição da abrasão e da fadiga na taxa de desgaste em polímeros, bem como a influência do acabamento superficial. (Evans D C e Lancaster J K, in Scott D (Ed.) *Wear, Treatise on Materials Science and Tecnology*, Academic Press, 13, 85-139, 1979)

### 4.3 Desgaste erosivo

A erosão por partículas sólidas é um processo de desgaste, definido como sendo a remoção de material de um substrato pelo impacto repetitivo de partículas, que se movem com velocidades superiores a 1,0 m/s, constituindo-se em um importante mecanismo de desgaste, observado em uma grande variedade de condições ambientais (Shewmom, 1983). O processo de desgaste erosivo ocorre, por exemplo, quando partículas sólidas chocam-se contra uma superfície. A velocidade inicial de impacto  $U$  é o principal parâmetro responsável pela

força de contato exercida pela partícula contra uma superfície. A extensão do desgaste depende também do número de partículas, da massa de cada uma delas, e de sua velocidade de impacto. Podem ocorrer tanto mecanismos de deformação plástica quanto por fratura frágil. Estudamos os mecanismos de desgaste erosivo por deformação plástica.

### 4.3.1 Deformação plástica

A figura 14 ilustra uma partícula de massa  $m$  e velocidade  $U$  chocando-se normalmente contra uma superfície de dureza  $H$ , causando nela uma deformação plástica de área  $A$ . A partícula penetra na superfície, desacelerando até atingir o repouso a uma profundidade  $d$ .

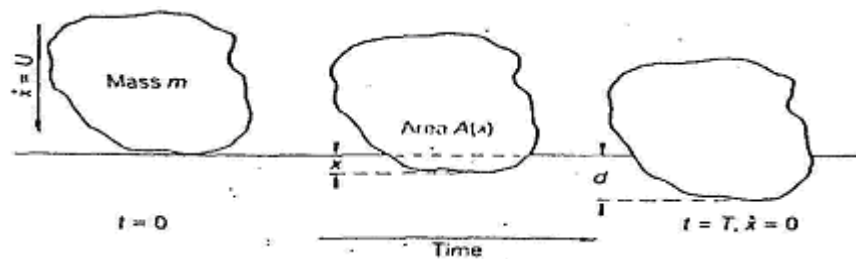


Figura 14 – Processo de penetração de uma partícula rígida em uma superfície plana, deformando plasticamente o material. O contato inicial ocorre quando  $t=0$  e a partícula assume repouso em  $t=T$

Assim, partindo da lei fundamental da dinâmica e da lei de conservação da energia, temos.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -HA(x) \quad (2)$$

$$\int_0^d HA(x) dx = \frac{1}{2} mv^2 \quad (3)$$

O volume final será dado por:

$$V = \int_0^d A(x) dx \quad (4)$$

Assumindo  $H$  constante

$$V = \frac{mU^2}{2H} \quad (5)$$

O material deslocado pode ser acomodado por deformação elástica para fora da indentação. Pode também formar rebarbas em volta da indentação ou ainda ser removido em forma de particulados. Podemos estimar a massa de material removido como  $K\rho\frac{mU^2}{2H}$ , onde  $\rho$  é a densidade de material erodido e  $K$  é um fator dimensional. Isto sugere uma relação linear entre o volume de material erodido e a massa de partículas incidentes. Contudo, observa-se experimentalmente um período de incubação, onde inicialmente ocorre um ganho de massa (figura 15). Aumentando-se a taxa de massa de abrasivo, o desgaste erosivo volta a apresentar comportamento linear conforme previsto.

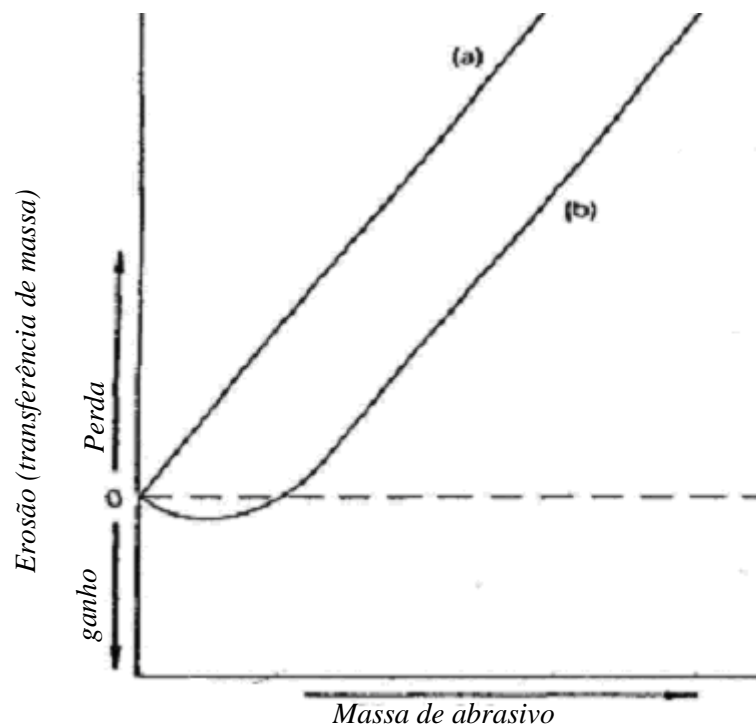


Figura 15 – Dependência da erosão com a massa de abrasivo. (a) comportamento linear. (b) para baixas taxas de massa de abrasivo, observa-se em alguns casos, aderência dessas partículas à superfície.

Em regime estacionário, a relação linear observada permite uma definição mais simples.  $E = (\text{massa de material removida}) / (\text{massa de partículas erosivas chocando-se contra a superfície})$ . Assim,

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (6)$$

Podemos observar que o desgaste erosivo também é inversamente proporcional à dureza  $H$  da superfície. A severidade do desgaste também é determinada pelo coeficiente

dimensional de desgaste  $K$ , o qual pode ser associado como medida de eficiência do processo de remoção do material.

### Influência do ângulo de impacto

A equação  $E = \frac{K\rho U^2}{2H}$  não considera a variação da taxa de erosão como o ângulo de impacto. A geometria da deformação causada pelo impacto de uma partícula dura depende tanto da velocidade da partícula quanto do ângulo de impacto, bem como da forma e orientação da partícula. Para impacto normal,  $\theta = 90^\circ$ . Erosão em materiais dúteis depende fortemente do ângulo de impacto, conforme ilustrado na figura 16. Materiais dúteis, como polímeros apresentam máximo desgaste para ângulos entre  $20^\circ$  e  $30^\circ$ .

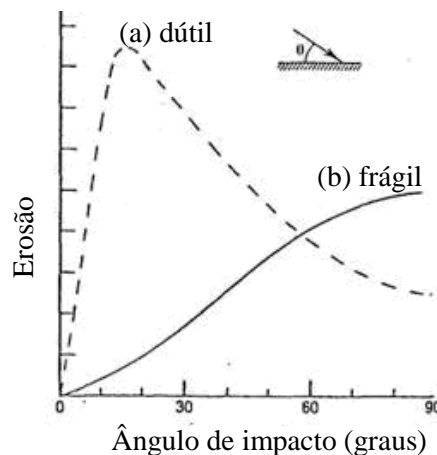


Figura 16 – Dependência da taxa de erosão  $E$  com o ângulo de impacto. [Hutchings]

Estudos sobre impacto a  $30^\circ$  de diferentes partículas sobre uma superfície apresentam três tipos básicos de danos, conforme ilustrado na figura 17. Partículas arredondadas deformam a superfície por sulcamento, deslocando material pelas laterais do sulco e pela frente da partícula (a). Impactos futuros nas áreas próximas levam a um destacamento das microrrebarbas.

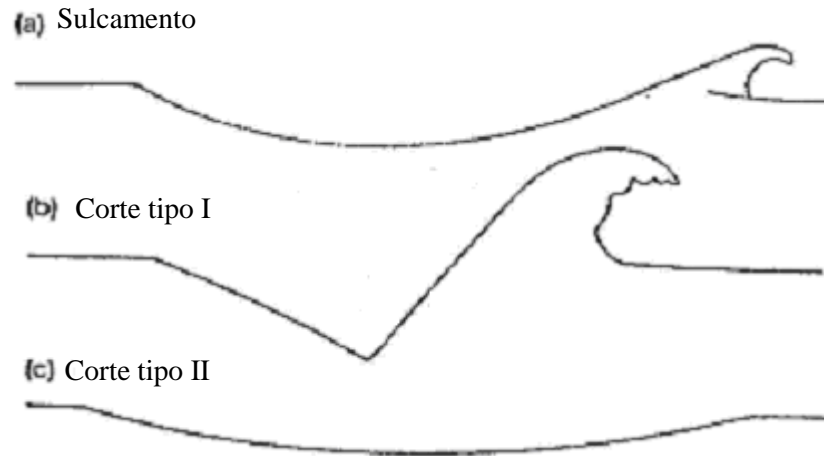


Figura 17 – Comportamentos apresentados pelo material deslocado pelo impacto da partícula.  
[Hutchings]

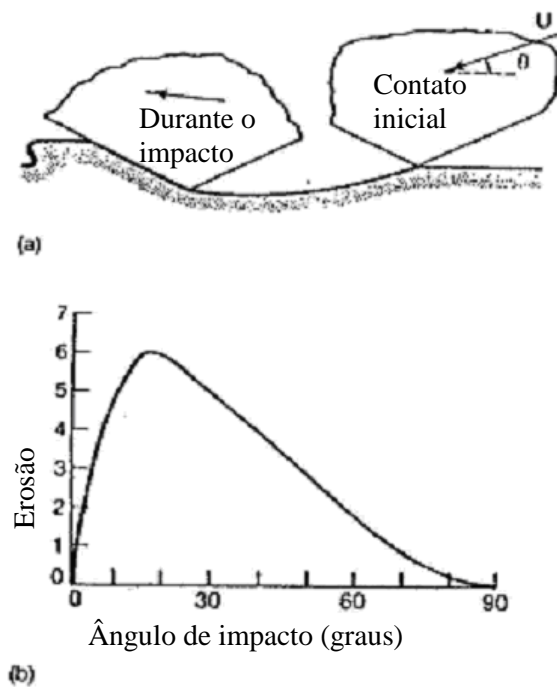


Figura 18 – modelo 2-D idealizado de uma partícula incidindo contra uma superfície dútil a um ângulo  $\theta$ . o volume de material removido é diferente do volume deslocado da indentação. Nesse modelo prediz erosão zero para incidência normal.

Várias simplificações são possíveis. Um modelo realístico será apresentado, no qual o ponto de ação das forças sobre as partículas pode mover-se durante o impacto, levando a uma formulação mais complexa para  $E$ , aproximada por:

$$E = \frac{K_1 \rho U^n}{H} f_1(\theta) \quad (7)$$

onde o expoente  $n$  da velocidade costuma situar-se entre 2,0 e 2,5 e também é função do ângulo de impacto  $\theta$ .



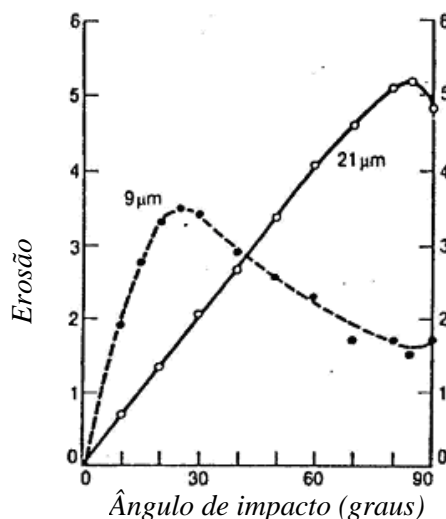


Figura 18 – Dependência da taxa de erosão com o ângulo de impacto para vidro erodido por partículas de carboneto de silício de 9 µm e 21 µm a 136 m/s (Sheldon G L, Trans. ASME B: J. Eng. For Industry 88, 387-392, 1966).

### Influência da velocidade

Alguns elastômeros apresentam excelente resistência à erosão à incidência normal e velocidades moderadas. Porém, são mais sensíveis a variações no ângulo de incidência e velocidade de impacto que materiais convencionais dúteis ou frágeis. A figura 19 ilustra a dependência da erosão com relação à velocidade de impacto em uma borracha natural. Para esse material, a taxa de erosão a 90° é cerca de 75% menor que a 30°.

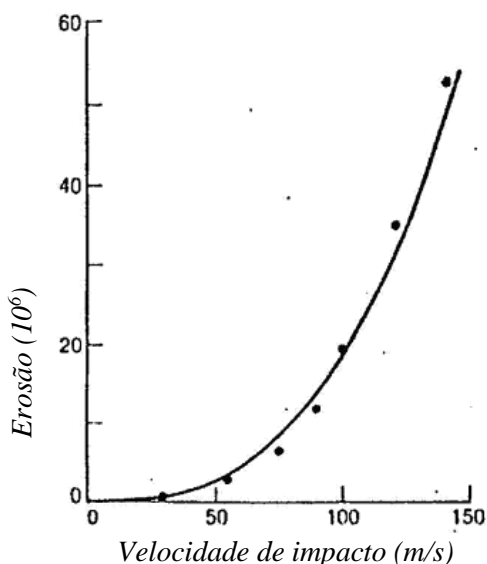


Figura 19 – Dependência da erosão E (massa removida por unidade de massa de partículas erosivas) em relação à velocidade de impacto para borracha natural, erodida por partículas de silício (areia) de 120 µm a colidindo a 30°. (Arnold J C e Hutchings I M. J. Natural Rubber Research, 1992)

Os mecanismos de desgaste em elastômeros são similares àqueles apresentados em desgaste abrasivo. Tentativas de relacionar a taxa de desgaste com a dureza do material são geralmente mal-sucedidas, devido ao comportamento diferenciado encontrado durante a medição da dureza. Outra razão deve-se ao fato que polímeros, mesmo os de maior dureza, durante o deslizamento apresentam deformações elásticas, potencializando desgaste pelo processo de fadiga, que não são controlados por propriedades plásticas. A relação de Rathner-Lancaster associa o desgaste erosivo inversamente proporcional à tensão de ruptura e ao alongamento total.

$$V \propto \frac{1}{\sigma_u \varepsilon_u} \quad (8)$$

Assim, a resistência ao desgaste erosivo apresentada pelos elastômeros é devida a sua resiliência.

#### **4.4 Desgaste por cavitação**

A partir do Teorema de Bernoulli é possível verificar que um fluido escoando, ao ser acelerado, tem uma redução da pressão, para que a sua energia mecânica se mantenha constante. Cavitação é o nome que se dá ao fenômeno de vaporização de um líquido pela redução da pressão, gerando bolhas no escoamento, que podem chegar a uma região em que a pressão cresce novamente. Então ocorrerá a "implosão" dessas bolhas. Se a região de colapso das bolhas for próxima a uma superfície sólida, as ondas de choque geradas pelas implosões sucessivas das bolhas podem alcançar até 15.000 MPa, e podem provocar trincas microscópicas no material, que com o tempo irão crescer e provocar o remoção de material da superfície por tração, originando uma cavidade de erosão localizada. A figura 20 mostra um rotor de bomba centrífuga com desgaste provocado por cavitação.

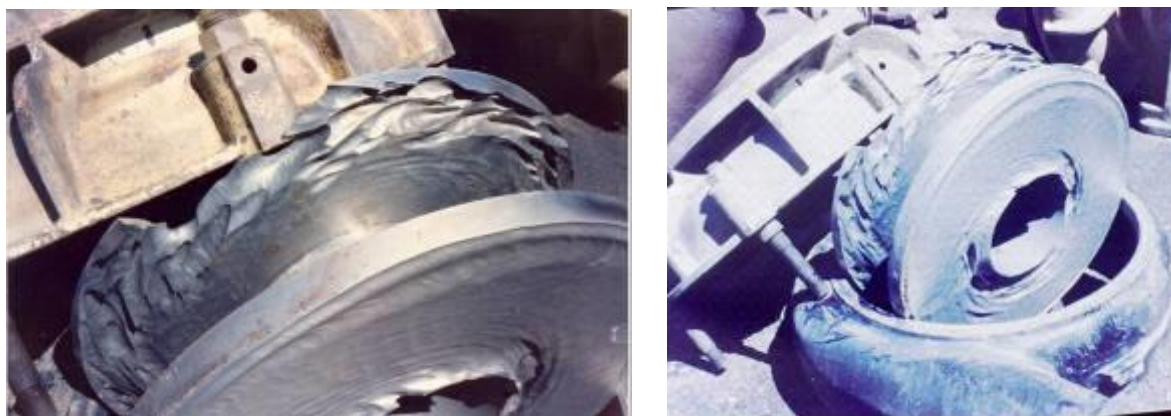


Figura 20 – Rotor de bomba centrífuga com desgaste provocado por cavitação.

## 5 ESTUDO DE CASO – MAPEAMENTO DESGASTE EM HIDROCICLONES

Esse trabalho foi iniciado a partir do interesse de um melhor entendimento e aplicação dos conhecimentos teóricos que envolvem a tribologia, para isso seria necessário o estudo de caso de algum sistema tribológico. Observando o processo de pelletização e os equipamentos que o compõe, encontramos um campo fértil para o início desse estudo, em virtude do desgaste encontrado na maioria dos equipamentos que processam o minério de ferro para a produção de pelotas. Encontramos na literatura poucas referências tratando especificamente do assunto. Entendemos que as particularidades do processo, como veremos a frente, influenciam diretamente no desgaste dos componentes e o acesso direto nas usinas, muitas vezes não fácil, portanto não é tão simples o estudo específico nesse processo.

Com a autorização da gerência de manutenção da Companhia Vale do Rio Doce, usinas complexo de Tubarão em Vitória-ES; após analisarmos vários equipamentos como bombas, tubulações, peneiras vibratórias e de rolos, moinhos e prensas, escolhemos um equipamento do processo de classificação, que são os hidrociclones.

### 5.1 Variáveis importantes do Processo de Moagem / Ciclonação

A figura 21 nos dá uma idéia simplificada do circuito moagem/ ciclonação

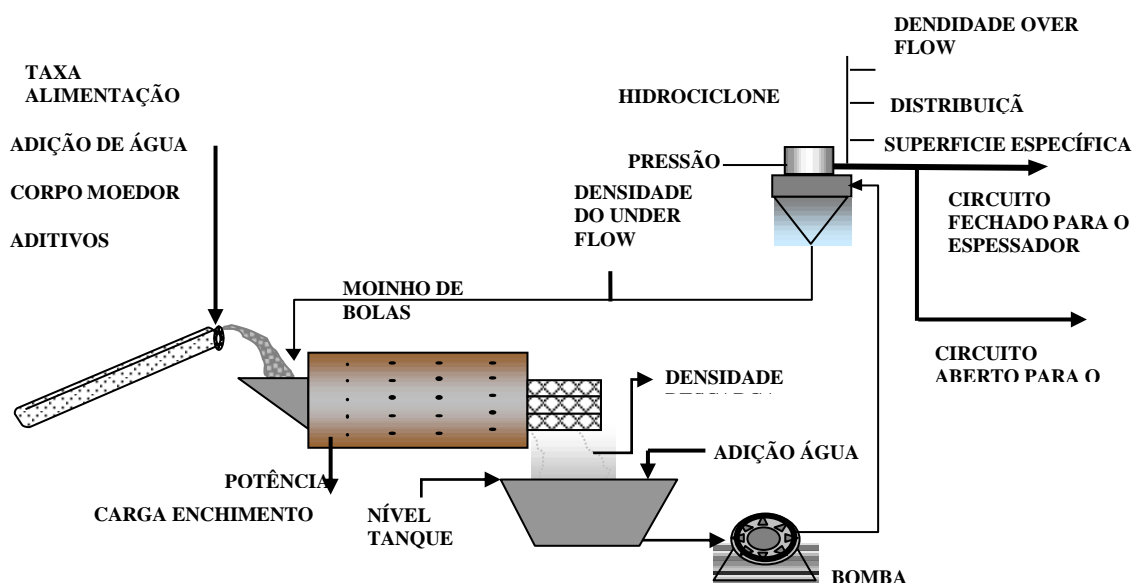


Figura 21 – Fluxograma de um circuito fechado de moagem/ciclonação

### 5.1.1 Densidade

A densidade de um determinado material ou mistura de materiais vem a ser a relação existente entre a massa e o volume ocupado pelo mesmo. É medida por densímetro, de forma automática, com emissão de sinal on line para a sala de controle, ou manualmente, pelo operador da área, com a utilização de um dinamômetro (balança de densidade com funcionamento mecânico), ou balança eletrônica estacionária. Unidade =  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/l}$ .

### 5.1.2 Granulometria

Vem a ser a medição do tamanho das partículas de um determinado material a granel. Para realização dos testes são utilizadas peneiras em laboratório.

Unidade = mesh (#) ou mm, dependendo do material a ser analisado. 325# (mesh) = 0,044 mm = 44micrômetros

### 5.1.3 Superfície específica

Define-se superfície específica de um corpo, como sendo a relação entre a somatória das áreas do corpo e sua massa. Unidade =  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

A superfície específica é medida em laboratório, com o auxílio de um permeâmetro.

Em termos práticos, pode-se afirmar que a somatória das áreas externas de um corpo aumenta, à proporção que este é fragmentado. Ou seja: quanto maior for o grau de moagem / prensagem sofrido pelo material, mais alta será a sua superfície específica.

### 5.1.4 Fator de forma F

O fator de forma é um dos parâmetros usados para quantificar a angulosidade das partículas. Uma das definições para o fator de forma é a razão entre a área de sua seção e o quadrado de seu perímetro ( $4\pi A/P^2$ ). Essas medidas podem ser estimadas através de uma imagem de MEV, por exemplo. F varia entre 0 e 1. Partículas em forma de agulhas têm F próximo de 0, enquanto partículas esféricas têm valores próximos de 1.

## 5.2 Caracterização das partículas causadoras do desgaste

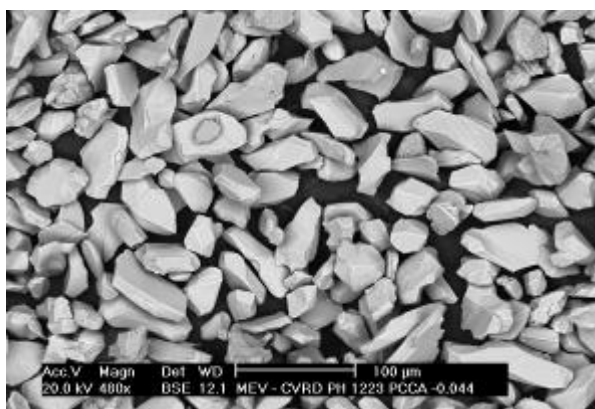
O estudo foi feito para um circuito fechado de moagem, como mostrado na figura 21, onde o moinho processa, na maioria do tempo, um minério da mina de Cauê / Conceição, que

possui as dimensões e formas como mostrado na figura 22. Essas partículas duras de minério são as causadoras do desgaste, porém com dimensões menores e diferentes formas após a moagem.

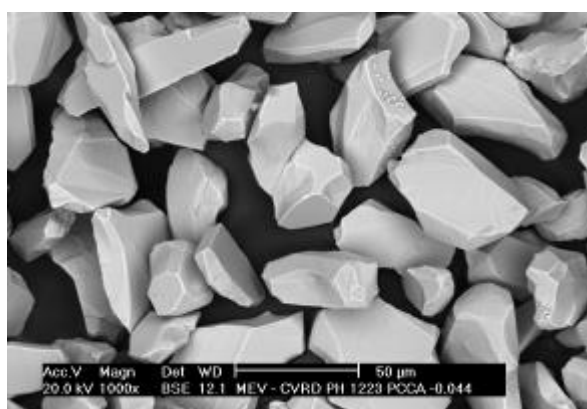
As principais características dos minérios metassomáticos são:

- Alto grau de metamorfismo;
- Crescimento e achatamento dos cristais;
- Minérios compactos;
- Tamanho dos cristais de fino (0,01 a 0,04 mm) a grosso (0,22 mm);
- Alta crepitação (granulados);
- Baixa redutibilidade;
- Baixa moabilidade (resistência apresentada ao ser moído);
- Fácil filtragem.

A figura 22 apresenta as características morfológicas do minério metassomático de cauê, recebidas na Moagem. Para diferentes tamanhos e ampliações. Observa-se visualmente que o fator de forma (razão entre área e perímetro) dessas partículas é baixo, ou seja, são partículas angulosas.



(a)



(b)

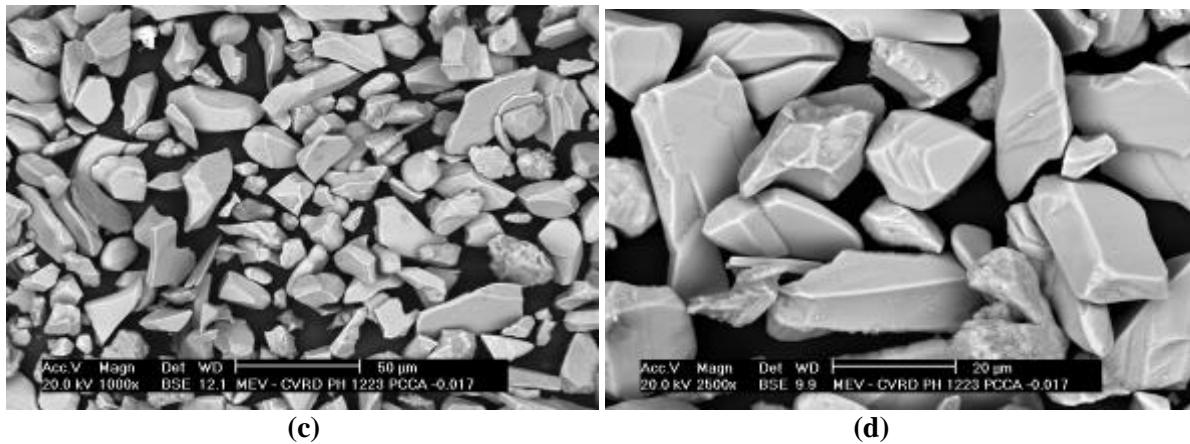


Figura 22 – MEV de partículas do minério metassomático recebida no Moinho, em frações de 0,004 a 0,017 mm (a) e (b). e frações de 0,017 mm (c) e (d)

### 5.3 Cálculo das velocidades das partículas de minério

A produção do moinho é de 300 ton/h (tonelada hora), e sua densidade de descarga varia entre 2,9 a 3,0 kg /L. A bomba de recalque trabalha com uma vazão máxima de 1280 m<sup>3</sup>/h, pressão de 2,5 kgf/cm<sup>2</sup> e sua tubulação de recalque possui um diâmetro de 12” (0,305m). A partir dessas informações, estimamos as velocidades da polpa de minério nos equipamentos.

#### Cálculo das velocidades na tubulação e nos hidrociclones:

$$Q = V \times A \quad (9)$$

onde:

$Q$  = vazão

$V$  = velocidade

$A$  = Área da seção circular

Para a bomba temos:

A vazão da bomba é conhecida, 1280 m<sup>3</sup>/h e o diâmetro da tubulação também, 0,305m, portanto temos:

$$V_b = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Onde:

$$A = \pi \times 0,1524^2 = 0,073 \text{ m}^2 \quad (11)$$

$$Vb = \frac{1280}{0,073 \times 3600} \quad (12)$$

$$Vb = 4,8 \text{ m/s} \quad (13)$$

Para o hidrociclone temos:

Secção de entrada com diâmetro 0,134 mm, a vazão total que entra na bateria de hidrociclones é 1280 m³/h, porém temos seis hidrociclones, logo a vazão será distribuída para cada hidrociclone, portanto a vazão de entrada de um hidrociclone será 1280m³ dividido por seis, nos dando um valor de 213m³/h.

$$A = \pi \times 0,067^2 = 0,0141 \text{ m}^2 \quad (14)$$

$$Vh = \frac{213}{0,0141 \times 3600} \quad (15)$$

$$Vh = 4,2 \text{ m/s} \quad (16)$$



As figuras 22 e 23 mostram equipamentos de moagem e classificação do minério.



Figura 22 – Foto Panorâmica dos moinhos de minério de ferro



Figura 23 – Hidrociclones



## 5.4 Mapeamento dos Principais Pontos de Desgaste

O mapeamento dos principais pontos desgastados foi feito após a retirada de um hidrociclone com vazamento, onde todos os revestimentos, apex e vortex foram separados para uma inspeção visual. Os pontos foram numerados como mostrado na figura 24:

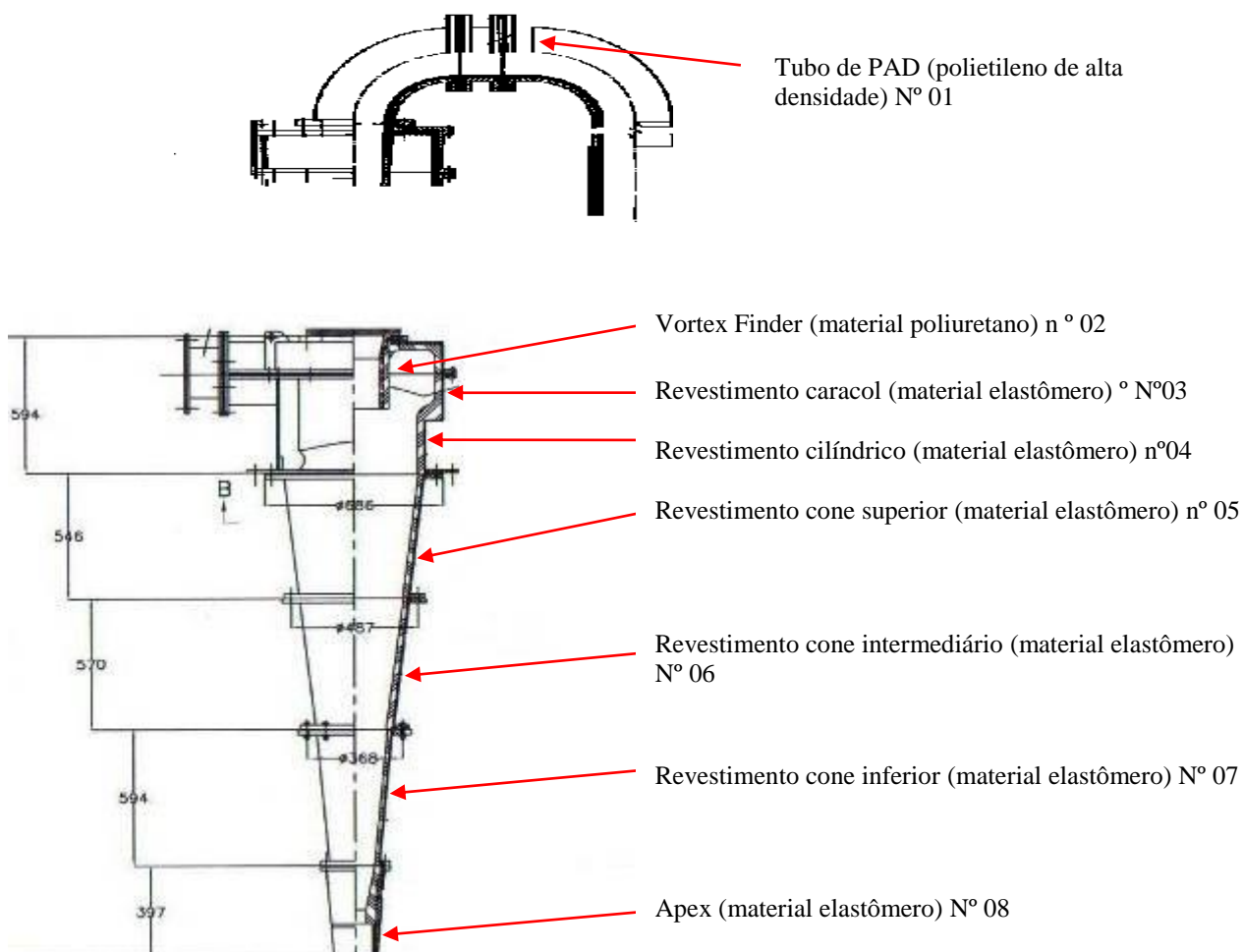


Figura 24 – Mapeamento dos pontos de desgaste.

Depois de retirados os materiais citados acima, partimos então para a fase de análise visual e críticas. Das partes que apresentaram maior desgaste, amostras menores foram cortadas para facilitar o manuseio. A figura 25 mostra uma foto das peças com as amostras já retiradas:



Figura 25 – Foto das amostras separadas para utilização

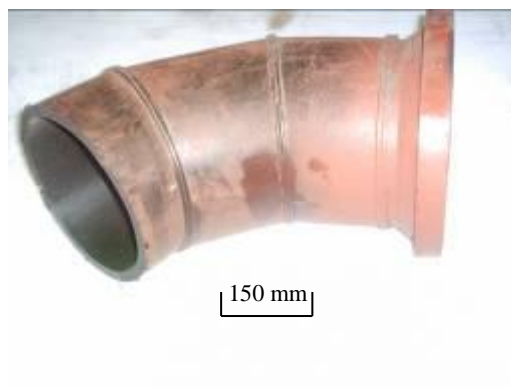
### 5.4.1 Análise visual do desgaste nas amostras

#### Amostra nº 01 tubo de PAD

Seguindo a numeração dada, serão apresentados a seguir cada amostra e pontos de maior desgaste do hidrociclone:



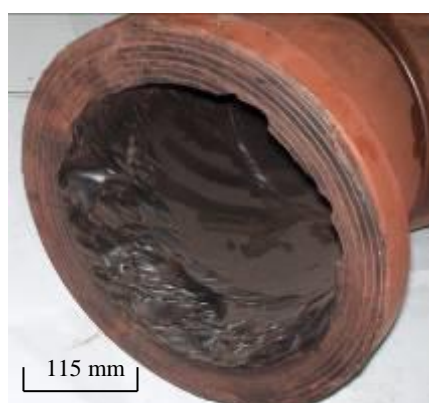
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26 – Desgaste no tubo PAD: (a); (b) Corte de uma seção do tubo; (c) Desgaste apresentado; (d) Ampliação da foto anterior.

Foi observada a ocorrência de desgaste com crateras grandes (Figura 26c), eventos bem maiores que as partículas provocadoras, com superfícies lisas e ausência de riscos visíveis. Na alimentação de cada hidrociclone partículas de minério são transportadas pela água (polpa) onde chegam com uma pressão de 1,20 kgf/cm<sup>2</sup>, o fluxo de ar ascendente transporta as menores partículas para o vortex finder. Uma queda de pressão é imposta pelo

aumento do diâmetro, saindo do vortex para o tudo de PAD gerando turbulências provocadas pelas junções dos flanges, onde há o maior desgaste. Com essas considerações sugere-se que tenha ocorrido cavitação erosiva. As bolhas geradas nas regiões de baixa pressão seriam transportadas para o interior do tubo de saída do vortex, onde existem mudanças bruscas de direção a  $30^\circ$ , responsáveis pelo aumento da turbulência, redução da velocidade e aumento da pressão. Nesses locais podem ocorrer implosão das bolhas, gerando ondas de choque. Essas perturbações podem provocar o desprendimento minúsculas partículas do tubo, quando ocorrem suficientemente próximas a este.

### Amostra nº 02, Vortex finder poliuretano

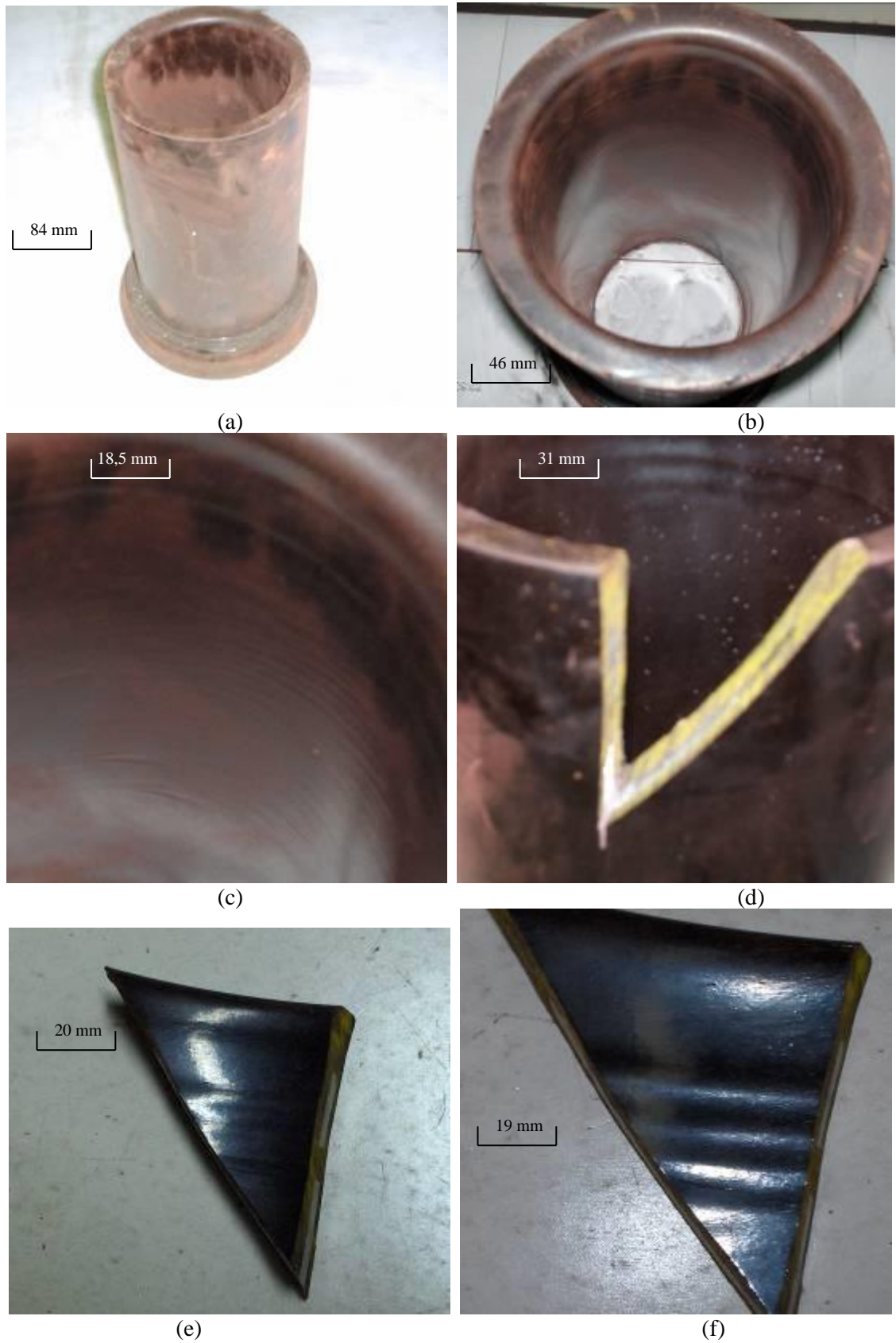


Figura 27 – Vortex finder: (a) Foto peça retirada; (b) Foto da parte interna do vortex; (c) Foto ampliada do interior do vortex; (d) Vortex com recorte da amostra; (e) Foto da superfície da amostra; (f) Ampliação da foto superfície da amostra.

Observa-se nas fotos da figura 27, principalmente na foto (c), um desgaste apresentando riscos circulares na superfície do vortex, onde a trajetória das partículas acompanham o movimento do fluxo de ar ascendente, os eventos são bem inferiores aos ocorridos no tubo de PAD. Segundo Hutchigs, o tamanho do recorte é determinado pelo tamanho da partícula e pelas condições de impacto, reduzindo o tamanho da partícula ou a velocidade é possível assegurar de que os eventos do impacto remanesçam plásticos. Sugere-se então a ocorrência de erosão a ângulos rasos (Figura 17c).

### Amostra nº03, revestimento caracol de elastômero.

Observa-se pelas fotos da figura 28 que o revestimento caracol sofre um desgaste acentuado em um ponto específico.



Figura 28 – Revestimento caracol (a); Ampliação da foto anterior (b); Corte feito para amostra (c); Foto da amostra cortada (d).



Conforme citado no capítulo 3, elastômeros possuem alta ductilidade, pelos conceitos de desgaste dúctil em mecanismo de desgaste erosivo, a maior taxa ocorre em ângulos de incidência próximos de 30° (Figura 16).

Analizando o desenho mecânico do caracol do hidrociclone e a fotografia da amostra, chegamos à conclusão de que maior taxa ocorre para o ângulo de aproximadamente 35°, conforme mostrado na figura 29.

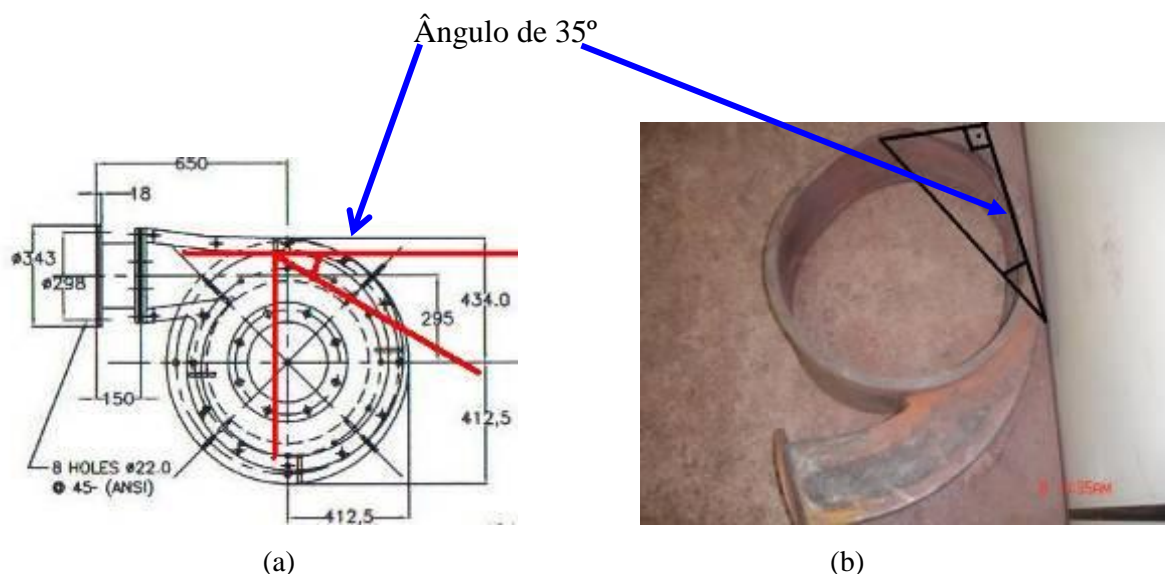


Figura 29 – (a) Desenho mecânico de um caracol de hidrociclone;  
(b) Foto da amostra do caracol retirado.

A equação  $E = \frac{K_1 \rho U^n}{H} f_1(\theta)$  estabelece a contribuição da velocidade e do

ângulo de impacto na taxa de desgaste. Valores de  $n$  entre 2 e 2,5 sugerem maior contribuição da velocidade no desgaste. Dos elementos revestidos com elastômero, como veremos mais a frente, esse é o que apresenta o maior desgaste, pois além do ângulo de incidência, o efeito da velocidade também é maior, devido ao maior diâmetro dessa secção (Cap. 2.4).

### Amostra nº 04, revestimento cilíndrico

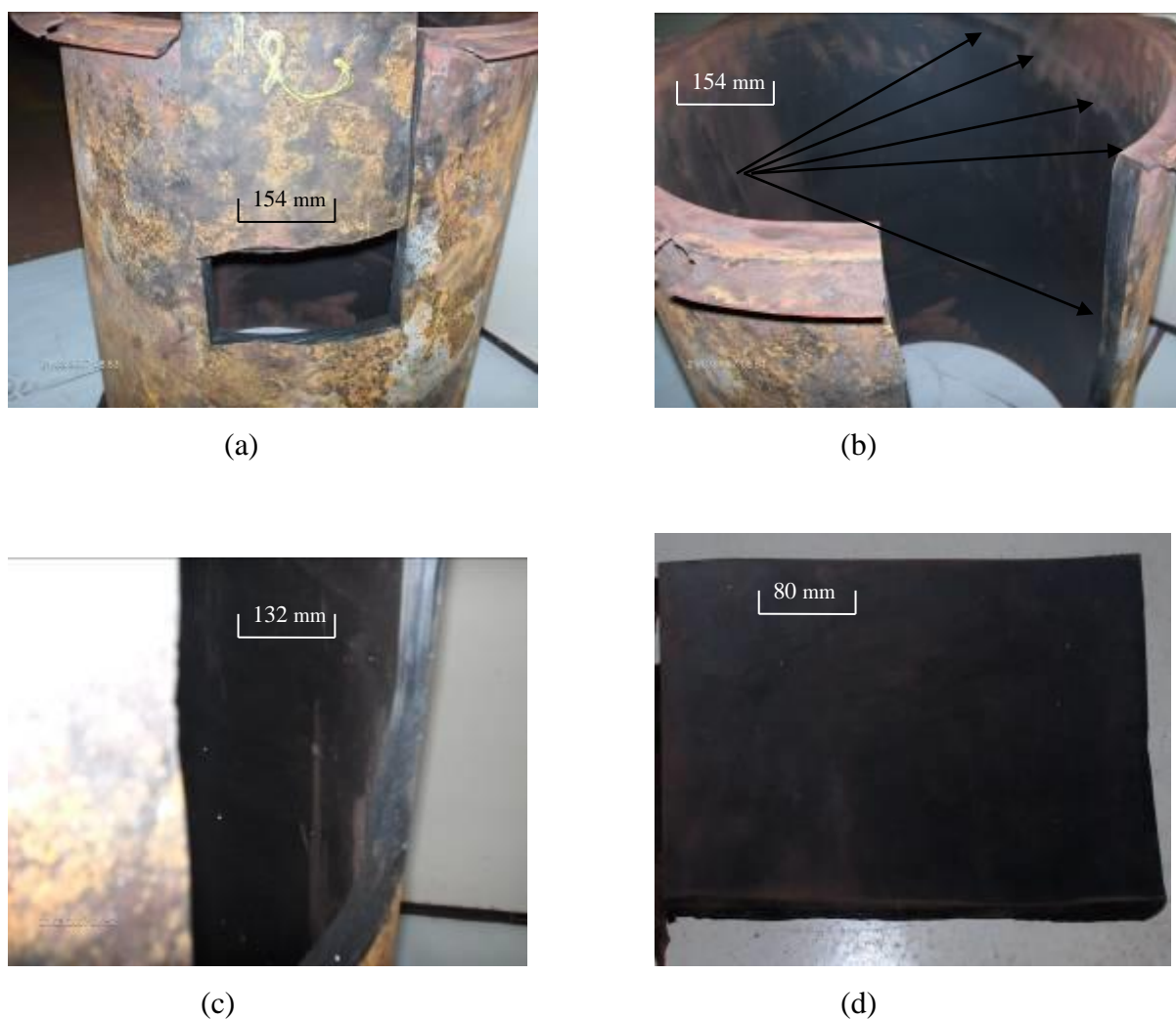


Figura 30, a) Revestimento com recorte da amostra b) Foto do revestimento, com setas indicando a trajetória do desgaste c) Foto do perfil desgastado d) Foto da amostra recortada.

Observa-se na figura 30, o desgaste provocado no revestimento cilíndrico, na foto (b), setas indicam a trajetória das partículas de desgaste, circular e decrescente. O desgaste inicia-se na junção do revestimento caracol com o cilíndrico, sendo os diâmetros iguais desses revestimentos, as velocidades são praticamente as mesmas, no entanto não há o efeito do ângulo de incidência nesse ponto como no revestimento caracol, pois ocorre a ângulo raso, por isso o desgaste causado pelas partículas é inferior ao ocorrido no revestimento caracol.



### Amostra nº 05 revestimento cone superior

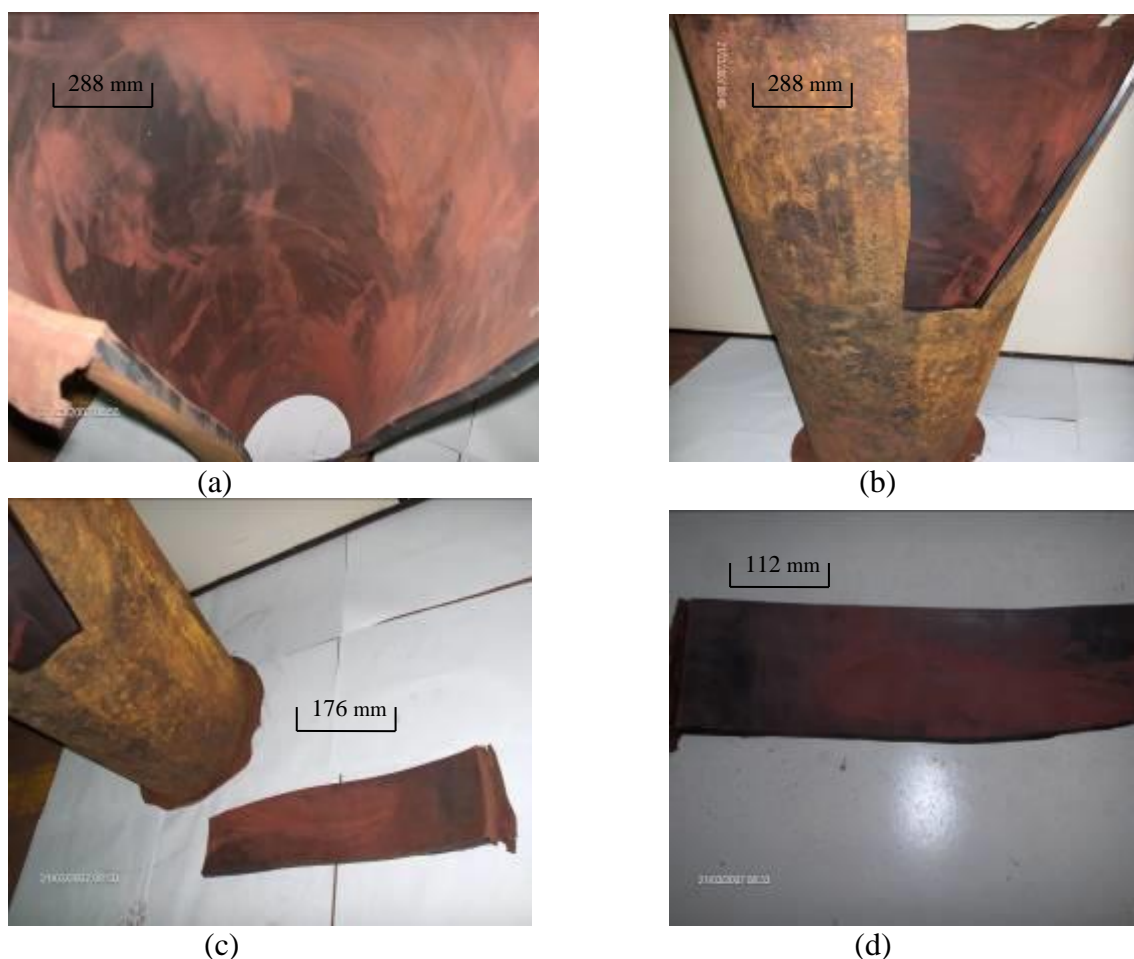


Figura 31: a) Foto interna do revestimento do cone superior b) Foto do mesmo revestimento mostrando o recorte da amostra c) Foto da amostra retirada do revestimento d) Foto da amostra

Podemos observar pelas fotos e pela inspeção feita no revestimento que nessa área do hidrociclone o desgaste foi mínimo, salvo na figura 31(d), onde aparece um risco vertical, porém não consideramos ser causado pela trajetória das partículas, mas sim um possível defeito de fabricação. Sabemos que nesse ponto da classificação há concentração das partículas maiores, no entanto a diminuição do diâmetro no sentido decrescente impõe menores velocidades. Esse pode ser o motivo do desgaste nesse local ser inferior aos das demais regiões até agora mapeadas.

### Amostra nº 06 Revestimento cone intermediário

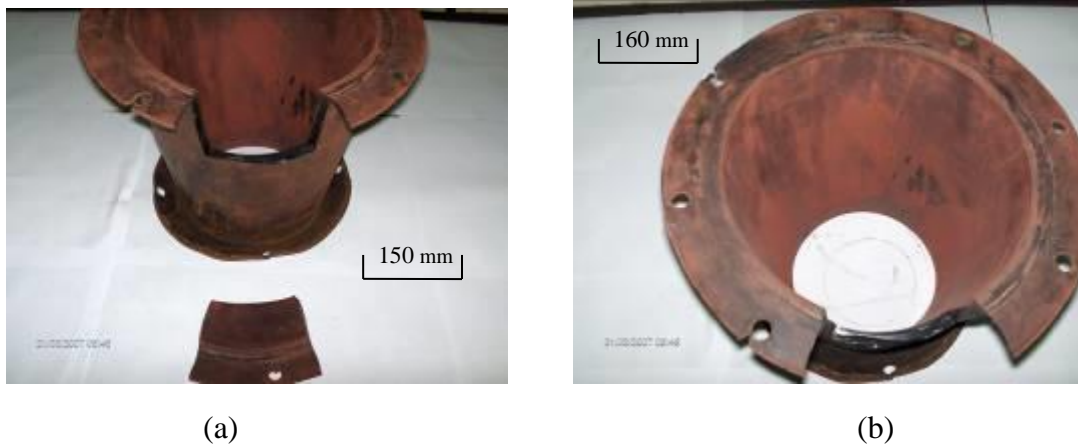


Figura 32 – (a) Fotos do cone intermediário e amostra (b) Foto interna do cone intermediário

As fotos da figura 32 mostram que não há desgaste consideráveis a olho nu nessa região. Nesse ponto as velocidades das partículas são bem inferiores, sendo os diâmetros pequenos comparados aos das áreas de maior desgaste. Sugere-se desgaste erosivo a baixo ângulo, com valores pequenos devido à baixa velocidade.

### Amostra nº 07 Revestimento cone inferior

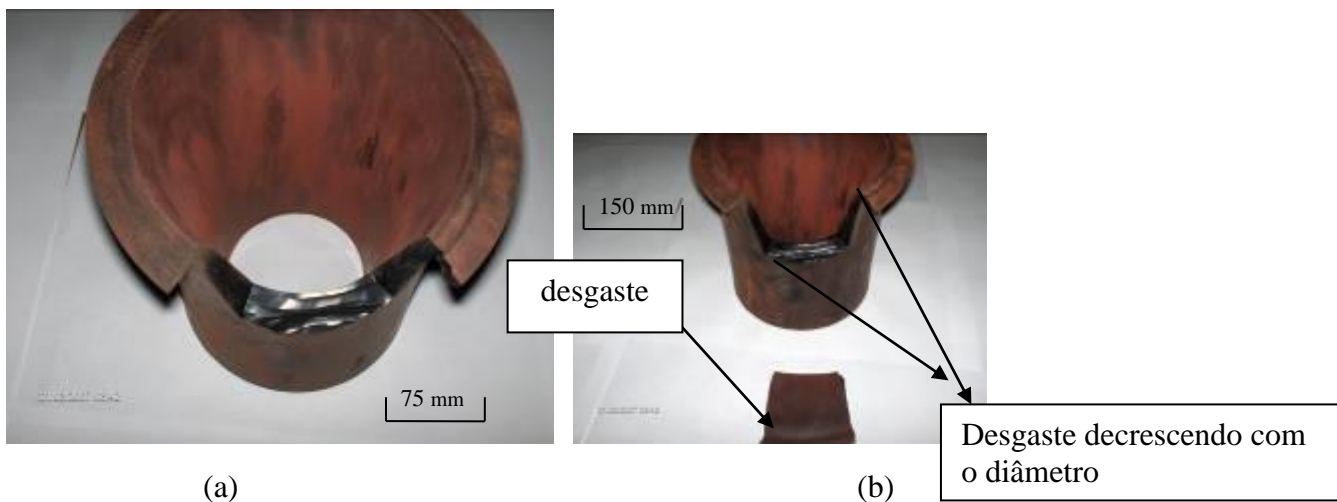


Figura 33 (a) Foto do revestimento inferior com a amostra já retirada; (b) Revestimento com amostra mostrando superfície interna, o desgaste decresce com o diâmetro.

Como nos revestimentos cônicos intermediário e inferior, podemos mais uma vez observar que o desgaste não se apresenta tão acentuado, mas há um aumento do diâmetro na parte superior do cone, ocasionado pelo desgaste de forma uniforme. Esse é um dos motivos

da troca principalmente do apex, pois como vimos no item 2.3 fig 4, o fluxo ótimo em sua saída é diretamente influenciado pelo diâmetro do mesmo.

### Amostra nº 08 Apex

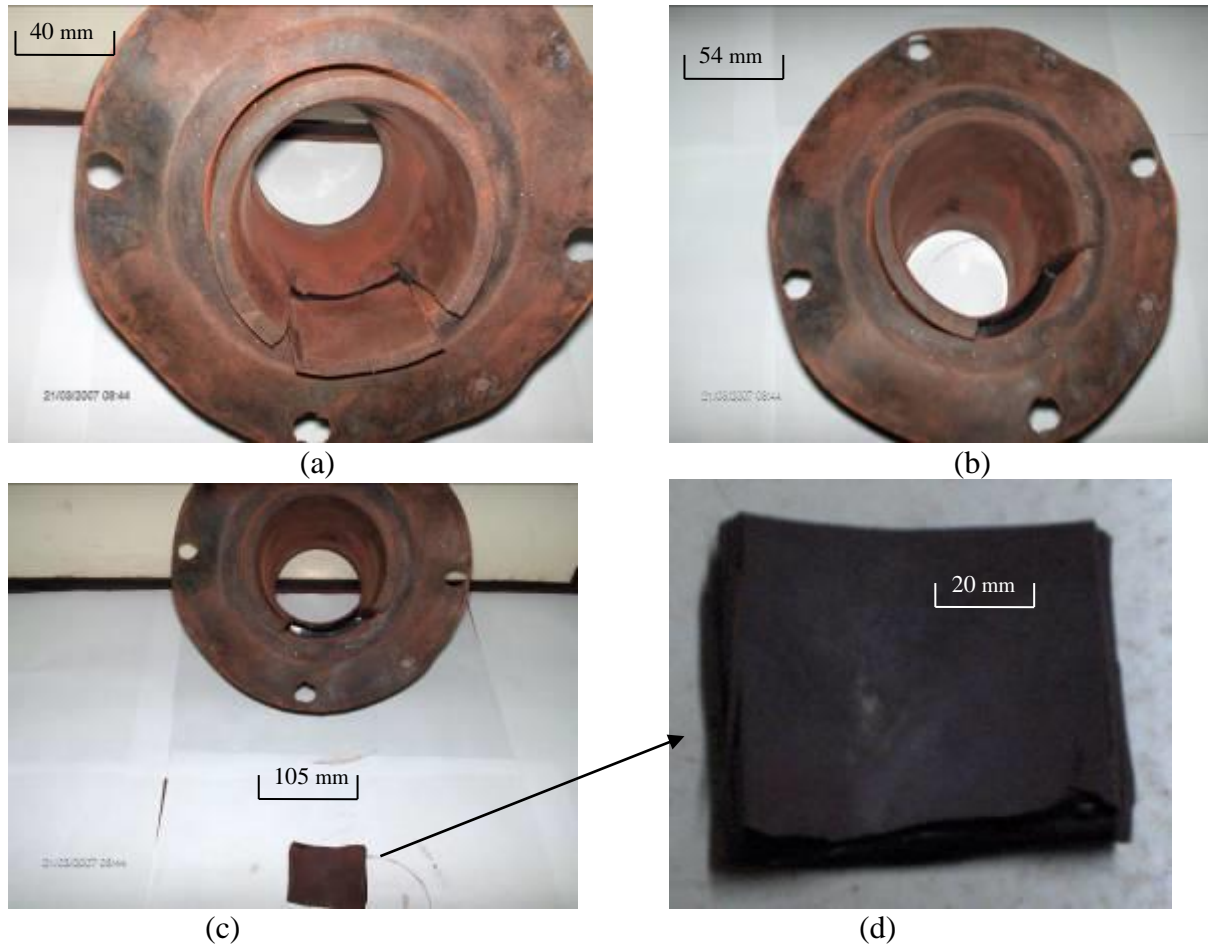


Figura 34 (a) e (b): fotos do apex com amostra recortada; (c) superfície da amostra; (d) foto ampliada da superfície da amostra.

Esse é o elemento de menor diâmetro. Visualmente não podemos tirar conclusões a não ser a ocorrência de desgaste erosivo a baixas velocidades e baixos ângulos. O desgaste ocorrido provoca redução do rendimento da classificação em virtude do aumento do diâmetro dessas peças, sendo o motivo principal das trocas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As formas das partículas provocadoras do desgaste mostradas pelas fotos no MEV (Cortesia companhia Vale do Rio Doce) são angulosas e de tamanho inferiores a  $0,044\mu\text{m}$ , porém antes do processo de moagem. O ideal seria analisarmos as partículas que saem do hidrociclone, no entanto isso não foi possível por não termos acesso ao MEV. A velocidade das partículas que entram no hidrociclone é de  $4,2\text{ m/s}$ , e diminui de forma decrescente junto ao fluxo descendente à medida que o diâmetro do hidrociclone também diminui. O mapeamento dos principais pontos nos revelou três áreas que possuem desgastes acentuados, sendo estas as maiores razões das intervenções de manutenção corretiva. A primeira foi a região do tubo de PAD, onde se sugere o desgaste por cavitação erosiva, gerando eventos imensamente superiores aos tamanhos das partículas erosivas. Na região do revestimento em forma de caracol, material elastômero, o fator preponderante para o desgaste severo ocorrido está diretamente ligado ao ângulo de incidência e diâmetro do setor, onde um valor de  $35^\circ$  foi estimado, ângulo causador de máxima taxa de desgaste para materiais dúcteis submetidos a erosão. O vortex finder, material poliuretano, mesmo próximo ao tubo de PAD, se desgastou muito menos, apresentando excelente resistência à cavitação e as deformações. Dos revestimentos de elastômeros, o elemento caracol foi o que mais se desgastou, seguindo o fluxo do material saindo da junção com o revestimento caracol, no entanto somente nessa região.

Os revestimentos cônicos apresentaram desgaste mínimo, onde ocorre de forma decrescente com fluxo de material que se direciona para o apex à medida que o diâmetro diminui. Sabemos que nessas regiões há maior concentração de partículas maiores que nas regiões com maior taxa de desgaste, portanto podemos concluir que o efeito da velocidade é muito maior que os ocasionados pelo tamanho das partículas para esse caso.

Esse trabalho de mapeamento dos principais pontos de desgaste em hidrociclones abre um campo interessante para outros estudos futuros, pois os resultados obtidos podem servir como um norte para estudos a níveis microscópicos, onde a utilização da microscopia eletrônica de varredura é indispensável, ou ainda propostas de materiais com maior resistência aos desgastes apresentados.

## 7 CONCLUSÃO

- O desgaste em hidrociclones, ocasionado por partículas de minério de ferro, ocorre predominantemente pelo mecanismo de erosão;
- Sugere-se desgaste por cavitação erosiva na região do tubo de PAD;
- No vortex finder, em poliuretano, apresentou boa resistência ao desgaste erosivo em baixos ângulos, mesmo próximo ao tubo de PAD;
- O caracol foi o revestimento em elastômero que apresentou maior desgaste, em especial onde a incidência das partículas ocorre para ângulos próximos a  $35^\circ$ , ângulos críticos para materiais dúteis;
- Os revestimentos cônicos apresentaram desgaste mínimo, com intensidade decrescente no sentido do fluxo descendente, em função da redução da velocidade, apesar da maior concentração de partículas maiores nessa região.
- Os efeitos da velocidade superaram os efeitos causados pelo tamanho da partícula.

## 8 REFERÊNCIAS

1. Hutchings, Ian M. Arnold, London **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1. ed. 5. impressão, 1999.
2. Gahr, Karl-Heinz Zum. **Microstructure and Wear of Materials**. 1. ed. Em Tribology Series, vol. 10, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987.
3. Ludema, Kenneth C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. 1. ed. CRC press, Boca Raton, 1996.
4. Callister Jr., William D. John Wiley & Sons **Materials Science and Engineering - an introduction**. 3. ed. New York, 1994.
5. Shewmom P., Sundarajan G.S. **The Erosion of Metals**. 1. ed. Ann. Rev. Master. Sci., 13,301 1983.
6. Scandian, Sherlio. “**material de aula - apresentações**”. produção independente, 2006.
7. Chaves, Arthur Pinto. “**Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**”. Volume 1 Ed. Signus, 2002.
8. CVRD, “**manual de operação**”, 2005.