

HENRIQUE DA CRUZ ARAÚJO VIEIRA
JOÃO PAULO RODRIGUES DE FARIA CAMPOS

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PARTÍCULA NA EROSÃO DO AÇO API 5CT K55 USADO EM TUBOS DE REVESTIMENTO

Projeto de Graduação apresentado
ao Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito para
obtenção de Grau em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo
Camargo Severo de Macêdo

**HENRIQUE DA CRUZ ARAÚJO VIEIRA
JOÃO PAULO RODRIGUES DE FARIA CAMPOS**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PARTÍCULA NA EROSÃO DO
AÇO API 5CT K55 USADO EM TUBOS DE REVESTIMENTO**

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo C. Severo de Macêdo
Orientador

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Co-orientador

Prof. Dr. Flávio José da Silva

Vitória, 14 de Julho de 2006.
Revisão em 13 de Agosto de 2006.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Marcelo Camargo Severo de Macêdo e Cherlio Scandian, orientador e co-orientador deste trabalho respectivamente, pela disponibilidade em nos acompanhar e orientar.

Ao técnico Valter Casteluber por se prontificar em nos auxiliar na confecção das amostras.

A HZM Industrial representada pela colega mestra Cíntia Nunes Braga Regattieri por ajudar na confecção das amostras.

Ao Engenheiro Mecânico Alexandre Pícolli que nos passou um pouco de sua experiência vivida no laboratório de materiais e em sua tese de mestrado.

A FEST (Fundação Espírito Santense de Tecnologia) pela concessão da verba para confecção das amostras.

Ao professor Fernando Lordello que concedeu a areia utilizada durante o experimento.

Ao laboratório de metrologia que realizou a análise superficial topográfica das amostras.

A CST representada pelo técnico Yukio Nishida que analisou algumas amostras com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Ao professor Temístocles Souza Luz pela concessão do multímetro para monitoração da temperatura dos ensaios.

Ao professor Flávio José da Silva e ao laboratório de materiais da Universidade de Uberlândia por analisar via Interferometria Laser e via MEV a superfície de uma amostra.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A EROSÃO	10
2.1.1	Definição	10
2.1.2	Histórico: Modelos e mecanismos de remoção de massa por erosão	12
2.1.3	Taxa de erosão	16
2.1.4	Variáveis que afetam a taxa de erosão	16
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1	OBJETIVO	35
3.2	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	35
3.2.1	Erosímetro	35
3.2.2	Amostras	37
3.2.3	Partículas abrasivas	37
3.2.4	Líquido	38
3.2.5	Velocidade de teste	38
4	RESULTADOS E DISCURSÃO	39
4.1	ENSAIO DE DUREZA	39
4.2	ANÁLISE DA RUGOSIDADE	40
4.3	ENSAIOS DE EROSÃO	45
5	CONCLUSÕES	48
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7	ANEXOS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Taxa de erosão de materiais dúcteis e frágeis em função da velocidade de impacto para ângulo de impacto de 90 graus [Zum Ghar, 1987].	18
Figura 2.2 Taxa de erosão (R_t) plotada em função da velocidade de teste para 4 aços em duas concentrações de areia distintas [Clark, 1991].	19
Figura 2.3 Variação da eficiência de colisão (η) em função do tamanho da partícula erodida e da velocidade de impacto [Clark, Wong e Lynn, 1991].	20
Figura 2.4 Variação da eficiência de colisão (η) em função da viscosidade do fluido presente no Erosímetro [Clark, Wong e Lynn, 1991].	21
Figura 2.5 Diferença entre a velocidade de impacto com a influência do filme <i>squeeze</i> na linha de estagnação (V_I) e a velocidade de escoamento potencial (V_N) para gotas de vidro de 550 μm suspensas em um líquido com $\rho = 1000\text{Kg/m}^3$ em função da viscosidade do líquido [Clark, Wong e Lynn, 1991].	22
Figura 2.6 Influência da concentração de areia na taxa de erosão R_t dos aços K55 e 1020 HR sendo erodidos à velocidade de teste de 18,7 m/s [Clark, 1991].	23
Figura 2.7 Influência do ângulo de impacto das partículas na erosão de metais dúcteis e frágeis [Hutchings, 1992].	24
Figura 2.8 Efeito do tamanho médio das partículas de carboneto de silício na taxa de erosão do aço e do bronze [Hutchings, 1992].	25
Figura 2.9 Variação da eficiência de colisão (η) em função do diâmetro das partículas erodidas para testes de erosão de curta duração [Clark, Wong e Lynn, 1991].	26
Figura 2.10 Variação da perda de massa [g/mm^2] de amostras de aço P110 em função do tempo e do tamanho das partículas de SiC. Temperatura de 40°C e velocidade de impacto de 18,7m/s [Clark, Wong e Lynn, 1991].	26
Figura 2.11 Partículas de sílica com tamanho de 50 μm vistas no MEV.(a)	27

Forma arredondada (b) Forma angular [Hutchings, 1992].

Figura 2.12 Perda de massa de um aço P110 em relação ao tempo de teste para areia e gotas de vidro com concentração igual a 1,5% em peso, diâmetro de 106 -150 μ m e velocidade de 18,7 m/s [Clark, 1991]. 28

Figura 2.13 Seis formas de partículas caracterizadas em função da angulosidade [Hamblin-Stachowiak, 1995]. 29

Figura 2.14 Efeito da dureza das partículas abrasivas na taxa de desgaste erosivo [Misra e Finnie, 1981]. 31

Figura 2.15 Ilustração do contato entre partículas de areia sob carga normal e superfície plana. (a) Quando a dureza do abrasivo (H_a) é maior que 1,2 vezes a dureza da superfície (H_s) a partícula irá indentar a superfície. (b) Se H_a é menor que 1,2 H_s , ocorrerá escoamento plástico na partícula, perdendo sua angulosidade, conseqüentemente perdendo o corte [Hutchings, 1992]. 31

Figura 2.16 (a) Variação da velocidade de impacto na linha de estagnação para diferentes densidades de partículas esféricas [Kg/m³] suspensas em água em função do tamanho da partícula. Velocidade nominal de 20 m/s e diâmetro da amostra igual a 5mm (b) Variação na eficiência de colisão para as mesmas condições [Clark, 1993]. 32

Figura 2.17 Relação entre a taxa de erosão e a dureza da superfície antes e depois do desgaste erosivo, para diversos materiais. Ângulo de impacto de 20°, velocidade de impacto de 75 m/s e partículas de carbeto de silício [Hutchings, 1992]. 34

Figura 2.18 Relação entre a dureza e a Resistência relativa à erosão em meio lamacento (água+areia), para 22 diferentes materiais [Wang-Xu, 1985]. 34

Figura 3.1 Representação esquemática dos componentes do erosímetro. 38

Figura 3.2 Erosímetro, (a) vista superior, (b) vista frontal, (c) eixo rotor, (d) vista geral, (e) fixação das amostras, (f) serpentina para resfriamento. 39

Figura 4.1 Topografia com efeito da forma cilíndrica da amostra antes do ensaio de erosão. 40

Figura 4.2 Topografia sem o efeito de forma a partir da Figura 4.1 41

- Figura 4.3** Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (150 - 300 μm). **42**
- Figura 4.4** Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (600 - 1200 μm). **42**
- Figura 4.5.** Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (300 - 600 μm). **43**
- Figura 4.6** Variação do acabamento superficial das amostras com a granulometria das partículas para os tempos de 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos. **44**
- Figura 4.7** Topografia com o efeito da forma cilíndrica da amostra erodida por 180 min em peso de areia (300-600 μm). **45**
- Figura 4.8** Topografia sem o efeito de forma a partir da **Figura 4.7** **45**
- Figura 4.9** Superfície 1.000X ampliada ao MEV da amostra erodida por 60 min. Concentração de 4 % em peso de areia (a) 150-300 μm (b) 600-1200 μm . **46**
- Figura 4.10** Superfície 2.000X ampliada ao MEV da amostra erodida por 60 min. Concentração de 4 % em peso de areia (a) 300-600 μm (b) 600-1200 μm . **47**
- Figura 4.12** Taxa de erosão em função das diferentes granulometrias para os tempos de 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos. Comparação com os resultados de **BOWEN [2004]** para as mesmas condições de ensaio. **48**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Relação do parâmetro de ponta (SP) com a forma caracterizada [Hamblin-Stachowiak, 1995].	29
Tabela 4.1 Taxa de erosão média para as três granulometrias ensaiadas.	48

RESUMO

No processo de exploração e beneficiamento do petróleo, escoam por tubulações, válvulas e conexões, fluidos contendo partículas abrasivas. Esse fluxo contendo abrasivos remove material da superfície desses componentes reduzindo sua vida útil. Conhecer o tribo-sistema a que um componente desse está submetido, e reproduzir os micromecanismos em laboratório, dará condição de avaliar as variáveis que influenciam na perda de massa do componente, permitindo assim selecionar o material mais adequado a ser empregado, além de otimizar as paradas de manutenção e minimizar os riscos de acidentes ambientais.

Este trabalho foi idealizado a partir de estudos realizados, nos quais se determinou a taxa de erosão em diversos tubos de revestimento sob condições de erosão no estado permanente. Foi estudado o efeito da granulometria da partícula abrasiva na variação dessa taxa.

Foram realizados ensaios em aços API 5CT K55 usado em tubos de revestimento nos quais variou-se a granulometria das partículas abrasivas de sílica de 150 a 1200 μm em solução aquosa.

A velocidade de rotação do eixo do misturador foi de aproximadamente 1500 rpm, o que corresponde a uma velocidade tangencial média das amostras de 7,5 m/s.

A temperatura foi monitorada e mantida em 26°C.

Foram utilizadas técnicas de medição de massa, microscopia eletrônica de varredura, interferometria laser e análise de rugosidade.

1 INTRODUÇÃO

No processo de perfuração e extração do petróleo existe a necessidade de revestir as paredes dos poços. Essa técnica de perfurar e revestir o poço simultaneamente é denominada *casing drilling*. Os tubos utilizados como revestimento, conhecidos como *casing*, eram produzidos em ferro fundido, mas com o desenvolvimento da indústria de exploração de petróleo, passou a utilizar um aço especial.

Entre as principais funções desse revestimento, destacam-se a preservação da integridade estrutural do poço, a condução do fluido de perfuração sem contaminar o solo e o alojamento dos equipamentos de elevação do processo.

A atenção dada a esse componente se justifica pela análise de seu custo em um processo de perfuração, que pode chegar a 50% do custo total.

Os processos de desgaste mais significativos atuantes no casing durante o regime de operação de um poço de petróleo são a corrosão e a erosão devido ao ambiente e ao impacto contínuo de partículas de areia.

Este trabalho avalia a resistência ao desgaste erosivo do material de fabricação de um tubo de revestimento comercial, API 5CT K55, utilizado na indústria petrolífera. Para esse estudo, foram usinadas peças cilíndricas a partir da parede desse tubo e submetidas a ensaios em um erosímetro. Avaliou-se o efeito do tamanho das partículas erosivas na taxa de erosão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A EROSÃO

2.1.1 Definição

Erosão por partículas sólidas é o desgaste causado pelo impacto de partículas duras, carregadas por um fluxo gasoso ou líquido, contra a superfície de um material. Esse fluxo imprime velocidades nas partículas que podem variar de 5 a 500 m/s, podendo em alguns casos sair desta faixa. Quando a partícula é conduzida por um líquido, o desgaste pode ser chamado erosão por meio lamacento, *slurry erosion*.

Em geral, o desgaste erosivo é causado em corpos sólidos pela ação de impacto ou deslizamento de partículas duras arrastadas nos líquidos e nos gases.

Segundo **Zum Gahr** [1987], o desgaste erosivo pode ser classificado em função dos diferentes modos de desgaste:

- Erosão por partículas sólidas em meio gasoso

Causada por partículas sólidas que são carregadas por um fluxo de gás. O ângulo de incidência das partículas exerce grande influência no desgaste, além de poder modificar o mecanismo do mesmo.

Exemplos de equipamentos sujeitos a este tipo de erosão são os transportadores pneumáticos de pó de carvão e as turbinas aero-gás.

- Erosão por partículas sólidas em meio líquido

Ocorre pela ação de escoamento de um fluxo líquido que carrega partículas sólidas.

Exemplos deste tipo de erosão são as que ocorrem em tubulações transportando meios lamacentos, *slurries*.

- Erosão devido à ação de líquido

Causada por um líquido impactando contra uma superfície sólida.

Este tipo de erosão pode ocorrer em aviões passando através de nuvens carregadas e em lâminas de uma turbina.

- Erosão por cavitação

Bolhas ou cavidades implodindo em líquidos são capazes de causar severos danos à superfície devido à erosão – cavitação.

Pode ocorrer em máquinas de fluxo como turbinas e bombas.

- Erosão por ação térmica

Inclui processos eletroquímicos que causam perda de material por fusão e/ou evaporação devido à ação de forças mecânicas, térmicas, elétricas ou magnéticas.

Um exemplo deste tipo de erosão acontece nos contatos elétricos.

- Corrosão-Erosão

É o dano causado pela ação simultânea de processos erosivos e corrosivos durante o transporte de líquidos quimicamente agressivos.

Dutos de transferência e tubos de revestimento na indústria petrolífera

são alguns dos exemplos que podem ser citados.

2.1.2 Histórico: Modelos e mecanismos de remoção de massa por erosão

O impacto das partículas em uma superfície envolve fenômenos muito complexos, tais como a interação entre as partículas e o grande número de ângulos de incidência simultaneamente. Por isso, a grande maioria dos estudos sobre o mecanismo de erosão originaram-se do impacto de uma única partícula.

Diversos mecanismos de erosão nos metais foram propostos ao longo dos anos.

Finnie [1960, 1972] apresentou um dos primeiros modelos sistemáticos de erosão, que foi desenvolvido para estudar o comportamento de materiais dúcteis e era baseado no mecanismo de corte da superfície pelo efeito de partículas duras. As principais variáveis envolvidas no modelo foram velocidade, dureza, forma, massa e resistência das partículas, assim como o limite de escoamento do material e o ângulo de impacto. Inicialmente, o modelo de *Finnie* não era aplicável para ângulos de impacto de 90° , pois previa desgaste nulo neste caso, o que não corresponde aos resultados experimentais.

Em trabalhos posteriores [**Misra - Finnie** 1980; **Finnie**, 1981] foram consideradas a influência de outras variáveis como a capacidade de deformação do material, a rugosidade superficial e a rotação das partículas ao se chocarem com a superfície, apresentando um modelo mais adequado para incidência normal. Entre as hipóteses propostas para explicar o desgaste com ângulo de impacto de 90° , encontram-se fragmentações das partículas depois do choque com posterior corte durante o movimento dos fragmentos e choques em regiões específicas onde as condições de rugosidade permitem o desprendimento do material, dentre outras.

Bitter [1963] introduziu de maneira formal um segundo mecanismo nos processos erosivos com impacto normal das partículas: a formação de trincas devido ao encruamento do material. A hipótese afirma que, mesmo que o

material tenha propriedades macroscópicas de alta ductilidade, pode ocorrer que nas regiões atingidas pelas partículas duras o encruamento seja suficiente para diminuir grandemente a capacidade de deformação e, portanto, a fratura frágil ocorra após novos impactos nos mesmos locais ou em suas proximidades.

Tilly [1973] apresentou formalmente o conceito de erosão secundária, como uma segunda etapa do fenômeno de corte na qual os fragmentos das partículas que se colidiram com a superfície a primeira vez, realizam um segundo processo de corte ao se movimentar tangencialmente sobre ela. Claramente, o modelo proposto por *Tilly* revelou a importância de se estudar as propriedades das partículas erosivas, tal como a dureza, embora alguns resultados experimentais da época mostrassem que a taxa de desgaste por erosão era bastante independente destas propriedades. Trabalhos posteriores [**Misra e Finnie**, 1981; **Palasamudram e Bahadur**, 1997] permitiram concluir que esta independência somente é válida sob condições específicas na maioria dos sistemas tribológicos.

Smeltzer e Wood [1985] apontaram a importância das propriedades termodinâmicas do material no processo de erosão, constituindo uma linha de pesquisa que até hoje é bastante polêmica. Eles mostraram que mudanças nas propriedades térmicas das superfícies permitiam obter diferenças apreciáveis nas taxas de desgaste, enquanto que mudanças em propriedades “convencionais” como dureza, limite de escoamento e/ou limite de resistência não conseguiam gerar o mesmo efeito. Um dos mecanismos incluídos no modelo foi a micro-fusão de regiões localizadas na superfície, quando a mesma é atingida pelas partículas erosivas. Segundo este mecanismo, não somente as partículas sólidas abrasivas seriam responsáveis pelo desgaste, mas, também, as partículas líquidas formadas localmente cujas velocidade e massa são função das propriedades térmicas do material e da energia cinética fornecida pelas partículas abrasivas. A hipótese da micro-fusão já tinha sido verificada experimentalmente por **Jennings et alii** [1976] usando microscopia eletrônica de varredura, mas poucos trabalhos fazem referência a este mecanismo como

um fator importante na erosão que inclui propriedades térmicas dos materiais desgastados e a energia cinética fornecida pelas partículas durante o impacto.

No final da década de 70 já apareceram na literatura citações bibliográficas relativamente completas sobre erosão, nas quais eram classificados os tipos de fenômenos erosivos e os aparelhos para sua medição. No entanto, a discussão sobre os mecanismos de remoção de material era ainda relativamente limitada, existindo campos poucos explorados como a erosão em meio lamacento, a corrosão-erosão e o entendimento da erosão sob ângulos de impacto de 90°.

No início da década de 80, **Hutchings** [1981] desenvolveu um modelo para explicar o problema da erosão com impacto de partículas em ângulos próximos a 90°, baseado no mecanismo que ele chamou de “*deformação crítica por fadiga*”. O modelo indicava que nas regiões onde o material é continuamente atingido pelas partículas abrasivas sem gerar *efeitos de corte*, o processo que acontece pode ser comparado com um fenômeno de fadiga de baixo ciclo, de modo que a lei de *Coffin-Manson*, desenvolvida para este tipo de situação, poderia ser aplicada. De acordo com o modelo, trincas são geradas quando o material alcança uma “deformação crítica” após um número determinado de ciclos (impactos) e a remoção do *debris* se dá na forma de lamelas finas com pouca deformação plástica.

Sundararajan e Shewmon [1983] também apresentaram um modelo para explicar o problema do impacto normal, baseado num mecanismo de deformação crítica diferente do apresentado por *Hutchings*. Nesta hipótese, a deformação induzida na região de choque é extremamente localizada e, portanto a situação teórica fica longe das condições ideais do modelo de fadiga que permitiriam a aplicação da lei de *Coffin-Manson*. O novo modelo considerou, então, além do efeito do encruamento a influência das propriedades térmicas do material e da morfologia da superfície. Os resultados experimentais apresentaram uma boa correlação com as hipóteses teóricas, mas a quantidade excessiva de parâmetros experimentais necessários para o

funcionamento do modelo matemático foi uma limitação importante frente aquele proposto por *Hutchings*.

Hammarsten et alii [1983] analisaram fragmentos de desgaste (*debris*) depois de ensaios de erosão de metais com partículas de carboneto de silício e desenvolveram uma complementação importante ao conhecimento dos mecanismos de desgaste por erosão em materiais dúcteis, criando uma nova classificação:

- Impacto-corte, dominante para baixos ângulos de impacto.
- Fratura frágil, em regiões muito localizadas.
- Ruptura dúctil propriamente dita.

O trabalho não apresenta um modelo matemático para prever taxas de erosão, mas oferece uma análise profunda da cinemática dos mecanismos conhecidos de interação entre as partículas erosivas e a superfície e consegue relacionar também as propriedades térmicas do material com os mecanismos de desgaste.

Clark [1991] comprovou, que para amostras cilíndricas submetidas a ensaio de erosão com partículas de areia, dois mecanismos de perda de massa do material foram observados. O tipo de mecanismo dominante variou justamente em função do ângulo do impacto da partícula contra o corpo de prova.

Já no meio da década de 90 a maior parte dos trabalhos sobre erosão teve duas orientações básicas:

- A racionalização das variáveis do material, do fluxo e das partículas com o propósito de obter uma visão geral do fenômeno, capaz de considerar inclusive a erosão de materiais frágeis e dúcteis em modelos acoplados, [**Meng e Ludema**, 1995], [**Sundararajan**, 1995] e [**Finnie**, 1995].
- O estudo de problemas específicos de difícil abordagem, que foram direta ou indiretamente ignorados em décadas anteriores. Entre estes trabalhos

podem ser citados a corrosão-erosão-cavitação e o estudo detalhado dos danos causados por impactos múltiplos [Lesser, 1995].

2.1.3 Taxa de erosão

A taxa de erosão pode ser definida pela razão entre a perda de massa do material e uma unidade de área e uma unidade de tempo [$\text{g/mm}^2\cdot\text{min}$]. Pode ser definida também como a perda de material por unidade de área e unidade de massa das partículas que estejam impactando contra a amostra [$\text{g/mm}^2\cdot\text{g}$]. Na literatura em geral, encontramos usualmente a nomenclatura R_t para a primeira definição e R_m para a segunda. R_m é mais útil quando o dano individual provocado pelo impacto das partículas é o interesse primário do estudo.

Neste estudo foi adotado o parâmetro R_t para os ensaios, já que o objetivo principal do trabalho é avaliar a perda de massa em um tubo de revestimento sob condições pré-estabelecidas.

2.1.4 Variáveis que afetam a taxa de erosão

Um estudo de Clark [2002] destacou as principais variáveis que influenciam na perda de massa R_t , em um tanque com lama abrasiva sendo agitado:

- Velocidade de impacto das partículas;
- Concentração de partículas na solução;
- Ângulo de impacto das partículas;
- Tamanho das partículas;
- Forma das partículas;
- Densidade e dureza das partículas;
- Natureza do líquido da solução;
- Natureza do escoamento do meio lamacento;

- Natureza do material da amostra.

A seguir, são apresentados diversos estudos e resultados experimentais que mostram o efeito das principais variáveis que influenciam na erosão dos materiais dúcteis.

1 – Velocidade de impacto das partículas

A velocidade de impacto influencia na energia de impacto e, conseqüentemente, na taxa de erosão. A energia de impacto mínima para iniciar o desgaste erosivo é maior em um metal duro do que em um metal dúctil. No entanto, a taxa de erosão aumenta mais rápido com a variação de velocidade para os metais frágeis. Por outro lado, o aumento na velocidade de impacto resulta no aumento da carga exercida no material alvo, que pode promover um comportamento de material frágil em diferentes materiais dúcteis.

A **Figura 2.1** mostra uma representação esquemática da taxa de erosão em função da velocidade de impacto.

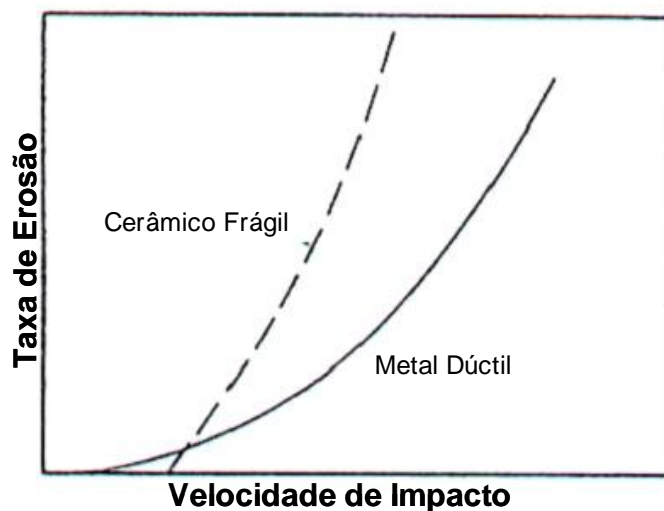


Figura 2.1 Taxa de erosão de materiais dúcteis e frágeis em função da velocidade de impacto para ângulo de impacto de 90 graus [Zum Ghar, 1987].

Em um estudo de **Clark** [1991], em que é feita uma comparação das taxas de erosão em tubos de revestimento por suspensão de óleo-areia foi verificada a

influência da velocidade de impacto nas mesmas em um tanque contendo lama abrasiva. Neste citado trabalho as taxas de erosão de três aços (P110, N80, K55), além do aço 1020 laminado a quente em suspensão de óleo + areia quartzo, GFN 140 com concentração sólida 0,5 – 4 % em peso e velocidade variando de 9,35 a 18,7 m/s, foram mensuradas em um erosímetro. O expoente de velocidade foi determinado como 2,4 e a relação da taxa de erosão com a carga sólida e com o tamanho da partícula, para partículas entre 53 e 180 μm , determinada.

A **Figura 2.2** mostra um gráfico que relaciona a taxa de erosão com a velocidade e a concentração de areia. Pela relação com a energia cinética, assume-se que a taxa de erosão é diretamente proporcional a $M.V_i^2/2$, onde M é a massa das partículas impactando contra a amostra com uma velocidade de impacto (V_i). O efeito da velocidade é muito importante já que um aumento moderado na velocidade produz um grande aumento na taxa de erosão.

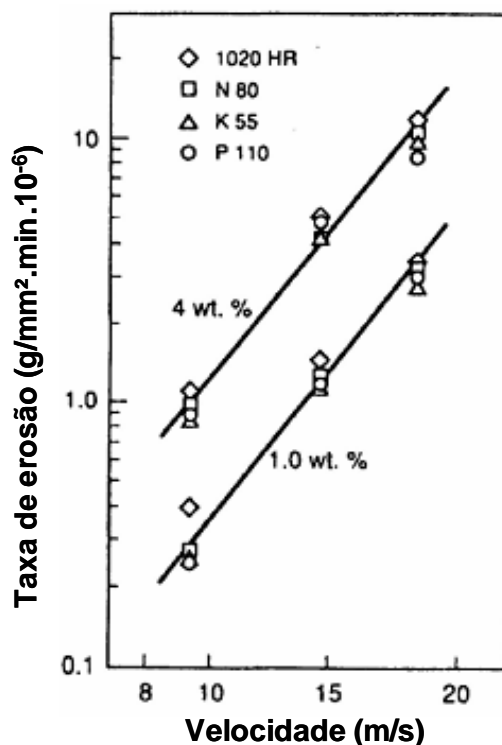


Figura 2.2 Taxa de erosão (R_t) plotada em função da velocidade de teste para 4 aços em duas concentrações de areia distintas em óleo [Clark, 1991].

Um estudo publicado por **Clark, Wong e Lynn** [1991] mostrou que nem todas as partículas presentes dentro do reservatório de teste impactam contra a amostra em um erosímetro contendo lama abrasiva. A porcentagem de partículas que colidem pode ser mensurada pela eficiência de colisão (η). Esse parâmetro representa o número de partículas impactando por unidade de área da amostra em uma unidade de tempo dividido pelo número de partículas no volume em suspensão em relação à unidade de área da amostra para a mesma unidade de tempo, sendo η sempre inferior à unidade. O efeito varia em função da capacidade do líquido carregar partículas com ele, impedindo o impacto destas partículas contra a amostra. Um decréscimo da eficiência de colisão irá causar um decréscimo na taxa de erosão.

Neste mesmo estudo, foi mostrado que a eficiência de colisão diminui com o decréscimo da velocidade em que o meio lamacento está sendo agitado, com o decréscimo do tamanho de partícula e com o aumento da viscosidade do líquido de arrasto conforme é mostrado nas **Figura 2.3 e 2.4**.

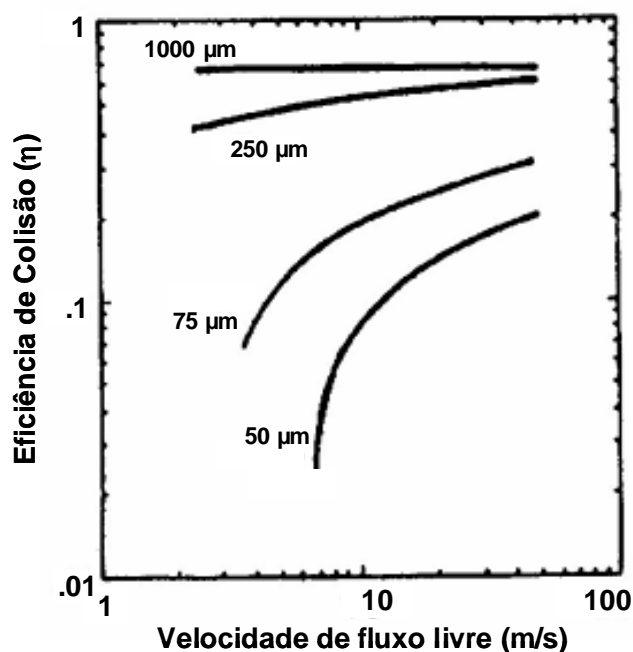


Figura 2.3 Variação da eficiência de colisão em função do tamanho da partícula e da velocidade de impacto [**Clark, Wong e Lynn**, 1991].

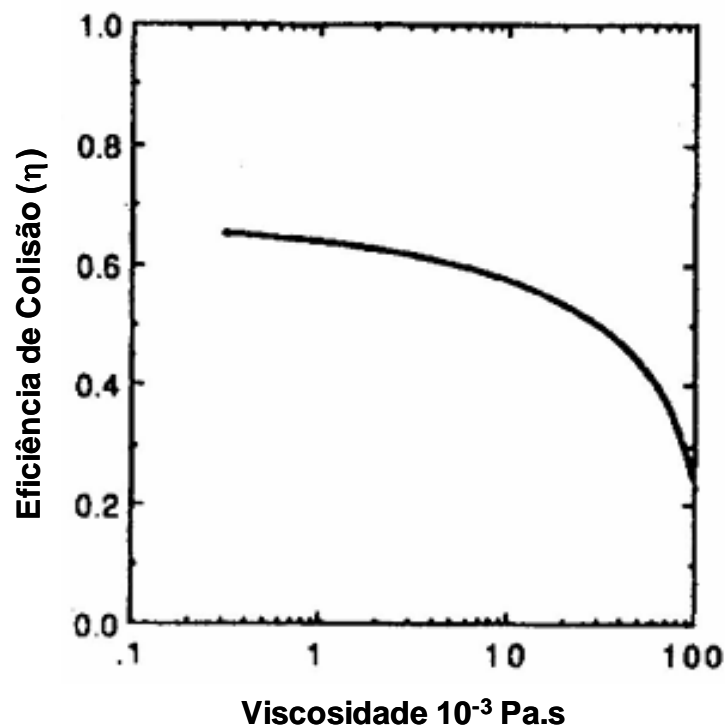


Figura 2.4 Variação da eficiência de colisão em função da viscosidade do fluido presente no erosímetro [Clark, Wong e Lynn, 1991].

Segundo **Clark, Wong e Lynn** [1991], a queda na eficiência de colisão se dá devido à presença de um filme “squeeze” que se forma sobre a superfície do material alvo. Este filme atuaria como proteção para o material retardando a velocidade de impacto das partículas erodidas e, em alguns casos, até evitando o choque. A diferença entre a velocidade de impacto previamente assumida a partir da rotação inicial do agitador (U_0) e a velocidade de impacto com a influência do filme “squeeze” (V_I), em função da viscosidade do fluido que está sendo agitado, pode ser visualizado na **Figura 2.5**. Pode-se observar que esta diferença cresce à medida que se utiliza fluidos mais viscosos, chegando até um ponto que o impacto é evitado.

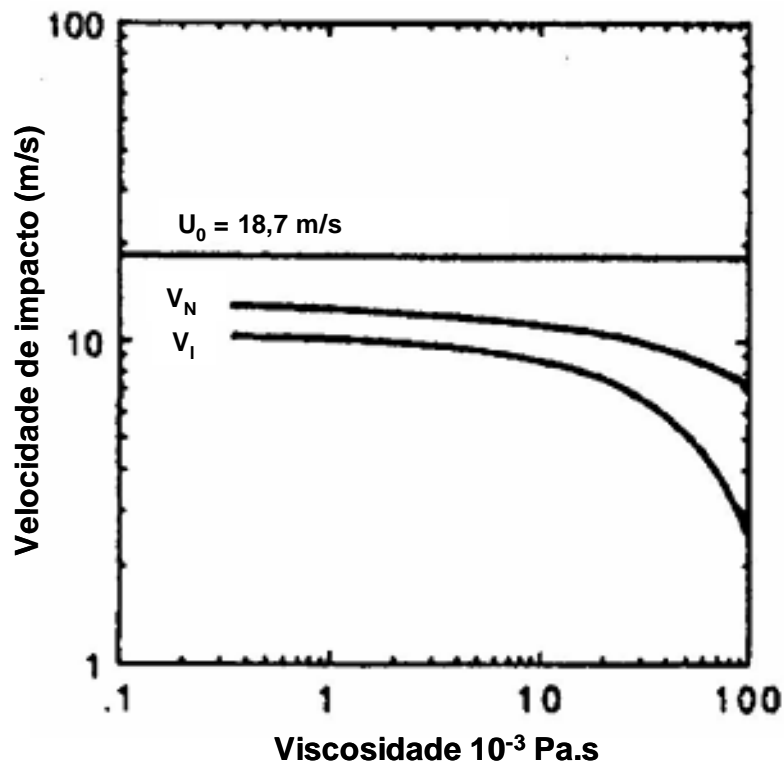


Figura 2.5 Diferença entre a velocidade de impacto com a influência do filme “squeeze” na linha de estagnação (V_I) e a velocidade de escoamento potencial (V_N) para gotas de vidro de 550 μm suspensas em um líquido com $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ em função da viscosidade do líquido [Clark, Wong e Lynn, 1991].

2 – Concentração da partícula (Carga sólida)

No estudo conduzido por Clark [1991], a taxa de erosão R_t não aumentou linearmente com a carga sólida, como mostra a **Figura 2.6**. Esta não linearidade indica que houve algum grau de interferência entre as partículas. A capacidade de todas as partículas se chocarem contra os corpos de prova (CP's) em um erosímetro carregado com lama abrasiva é reduzida com o aumento da carga sólida. Neste estudo, foi mostrado que as interferências partícula contra partícula em suspensão foram significantes para valores acima de 2 % em volume, aproximadamente 6 % em peso, mas também foram observadas reduções na taxa de erosão R_m com o acréscimo de concentração em suspensões mais diluídas que isso. O efeito, entretanto, é pequeno e é

razoável assumir que o dano aumenta linearmente com a carga sólida para suspensões diluídas.

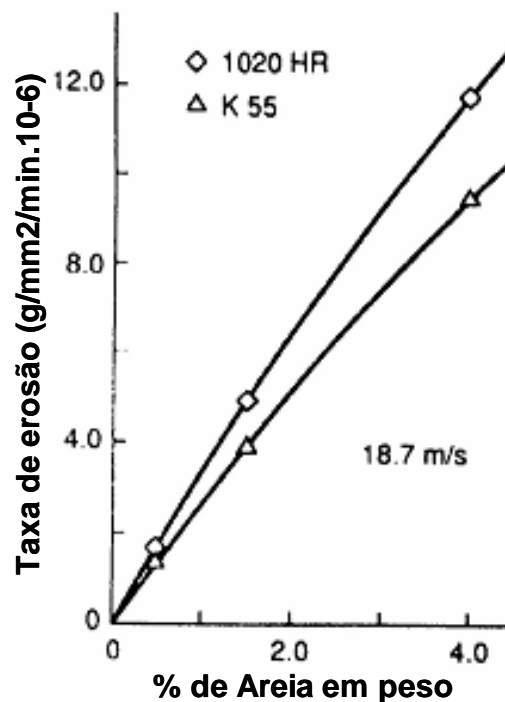


Figura 2.6 Influência da concentração de areia na taxa de erosão R_t dos aços K55 e 1020 HR sendo erodido à velocidade de teste de 18,7 m/s [Clark, 1991].

3 – Ângulo de impacto das partículas

O efeito do ângulo de impacto é uma função do mecanismo de remoção de material da superfície. Em sistemas em que prevalece a deformação plástica e o corte, as maiores taxas de desgaste são atingidas para ângulos de impacto baixos, isto é, entre 20° e 30° . Já em condições de remoção por fratura frágil as maiores perdas são obtidas para incidência normal das partículas.

O ângulo de impacto na erosão é usualmente definido com relação ao plano da superfície. Para impacto normal, $\theta = 90^\circ$, enquanto para impactos oblíquos o ângulo de incidência tende a zero. O dano provocado pela erosão de materiais dúcteis depende principalmente do ângulo de impacto, como ilustrado na **Figura 2.7** (curva a), sendo máximo em um ângulo entre 20° e 30° e caindo para a metade à $1/3$ do pico da taxa de desgaste com incidência normal.

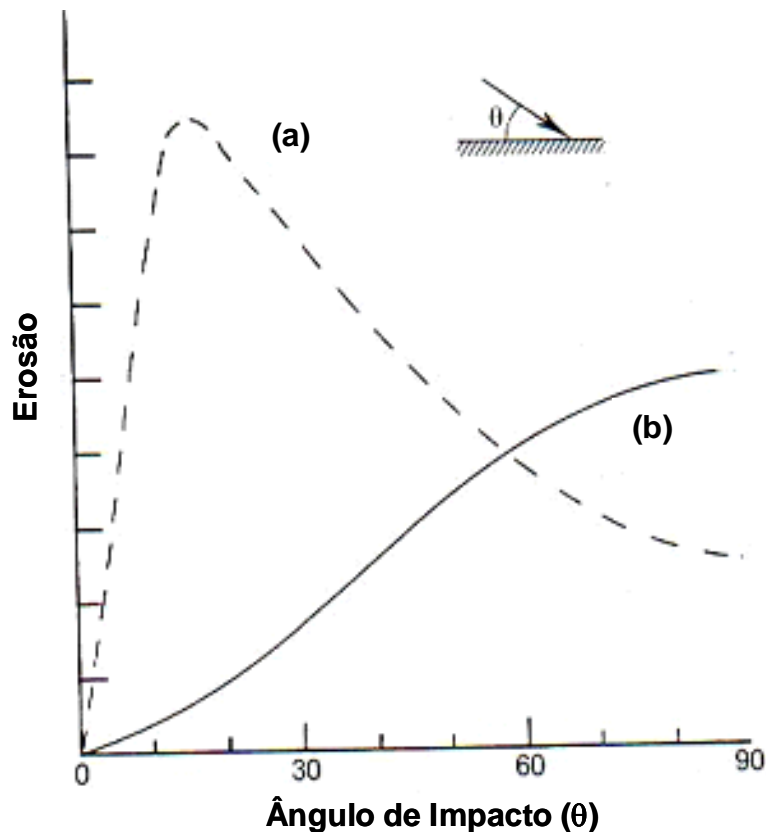


Figura 2.7 Influência do ângulo de impacto da partícula na erosão de metais dúcteis (curva a) e de materiais frágeis (curva b) [Hutchings, 1992].

A **Figura 2.7** (curva b) mostra a dependência do dano provocado pela erosão em relação ao ângulo de impacto para um caso típico onde o desgaste ocorre por fratura frágil. A erosão cai drasticamente para ângulos distantes de 90°, em contraste ao que ocorre quando o desgaste se dá por deformação plástica (curva a). Modelos para erosão por fratura frágil têm, conseqüentemente, sido desenvolvidos principalmente para impactos com incidência normal.

Em experimento realizado com amostras cilíndricas são observados ângulos de impacto variando de 0 a 90° [Clark, 1993]. Nos pontos mais próximos da *linha de estagnação*, linha longitudinal em relação ao corpo de prova que divide a área de impacto ao meio, foi observada uma maior incidência de impactos normais enquanto que em pontos mais próximos das extremidades das amostras foram observados impactos oblíquos em maior numero.

4 – Tamanho das partículas

No estudo de diversos sistemas tribológicos foi observado que tamanhos maiores de partículas ensaiadas causam um aumento na taxa de erosão, mas este efeito é menos intenso quando o tamanho supera um certo valor limite que, para o aço, encontra-se por volta de 50 μm . A **Figura 2.8** mostra o efeito do aumento do tamanho da partícula no desgaste de um aço de baixo carbono e em bronze, onde é ilustrada a mudança de comportamento quando o valor limite é ultrapassado.

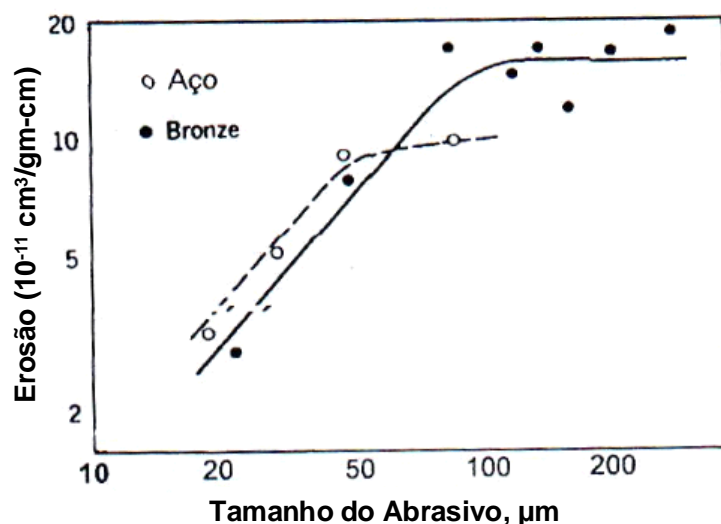


Figura 2.8 Efeito do tamanho médio das partículas de carboneto de silício na taxa de erosão de um aço e de um bronze [Hutchings, 1992].

Esse valor limite também foi verificado em experimentos realizados em um erosímetro abastecido com óleo diesel a 40°C com partículas de carboneto de silício [Clark, Wong e Lynn, 1991 e Clark e Wong 1993]. A explicação para isto seria a existência do filme “squeeze” mencionado anteriormente, que seria formado sobre a superfície da amostra de aço e evitaria a colisão para muitas das partículas menores que 50 μm que estariam dotadas de pouca energia cinética devido as suas pequenas massas. Logo, a eficiência de colisão para estas partículas seria muito baixa. Com o aumento da granulometria, a energia cinética das partículas seria maior e o filme “squeeze” já não seria capaz de

arrastá-las em outra direção, aumentando assim, a eficiência de colisão de uma maneira mais linear conforme mostra a **Figura 2.9**.

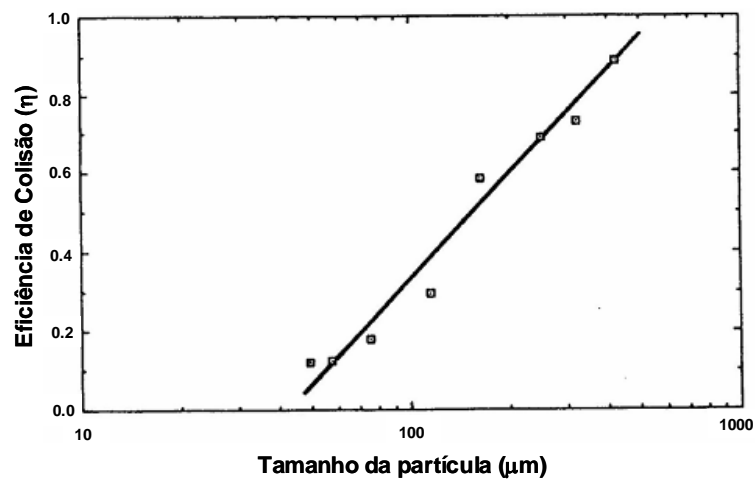


Figura 2.9 Variação da eficiência de colisão em função do diâmetro das partículas para testes de erosão de curta duração [Clark, Wong e Lynn, 1991].

Quanto maior o tamanho das partículas, maior será a perda de massa. A **Figura 2.10** ratifica essa afirmação.

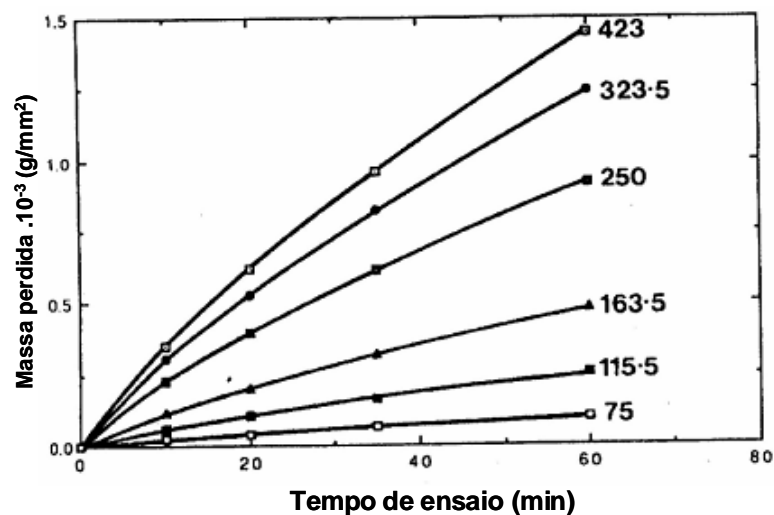


Figura 2.10 Variação da perda de massa (g/mm^2) de amostras de aço P110 em função do tempo e do tamanho das partículas de SiC. Temperatura de 40°C e velocidade de impacto de $18,7 \text{ m/s}$ [Clark, Wong e Lynn, 1991].

5 – Forma das partículas

A maioria das partículas responsáveis pelo desgaste erosivo e abrasivo é a grosso modo eqüiaxiais, mas podem ter considerável variação em sua angulosidade dependendo de sua origem. A taxa de desgaste depende fortemente do formato das partículas. As angulares, na maioria das vezes, causam maior desgaste que as mais arredondadas.

Angulosidade é de difícil definição. A **Figura 2.11** mostra duas formas de partículas de quartzo: arredondada e angular. As diferenças na magnitude do formato da partícula podem resultar em diferentes taxas de desgaste, por um fator de 10 ou mais, ainda que a angulosidade da partícula seja raramente medida quantitativamente. Isto se deve à dificuldade de identificação e quantificação do aspecto das complexas formas tridimensionais das partículas responsáveis pela erosão.

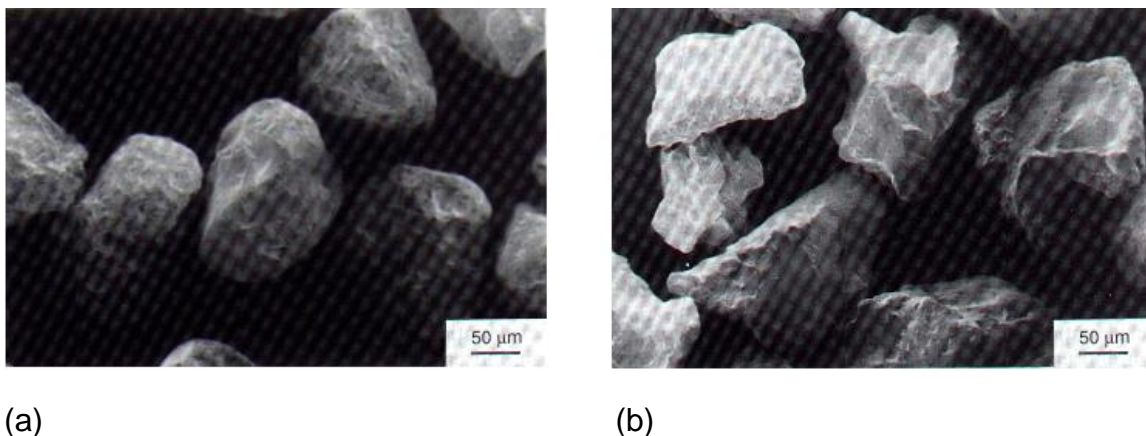


Figura 2.11 Partículas de sílica de 50 µm vistas no MEV. Forma arredondada em (a) e forma angular em (b) [Hutchings, 1992]

Hutchings [1992], **Hamblin e Stachowiak** [1995] propuseram um método para medir a angulosidade de uma partícula:

A partir do Fator de Esfericidade (F), que é a razão entre a Área da projeção da partícula pela Área de um círculo de perímetro igual ao da projeção é possível avaliar a angulosidade dessa partícula.

Se $F=1$, a projeção é um círculo, quanto maior o valor de F mais a partícula se afasta da forma circular. Pela medida de valores de F , derivada do contorno bidimensional de muitas partículas orientadas aleatoriamente, pode-se ter uma idéia de quanto à partícula tridimensional está se afastando da forma esférica.

Clark [1991] observou em ensaios no erosímetro que após um tempo de quatro horas as partículas se arredondaram por causa do impacto repetitivo e a taxa de erosão no metal começou a cair. Foi verificado também a influência da forma da partícula ensaiando-se amostras de um Aço P110, sujeito ao impacto de quartzo (forma angular) e gotas de vidro (forma arredondada) com mesmo diâmetro, concentração e durante o mesmo período de tempo. A taxa de erosão do aço P110, sujeita ao impacto de gotas de vidro, foi apenas de 2,5% da taxa quando ensaiado com partículas de quartzo, conforme mostra a **Figura 2.12**. As gotas de vidro pré-erodiram a superfície da amostra e o microcorte praticamente não foi observado.

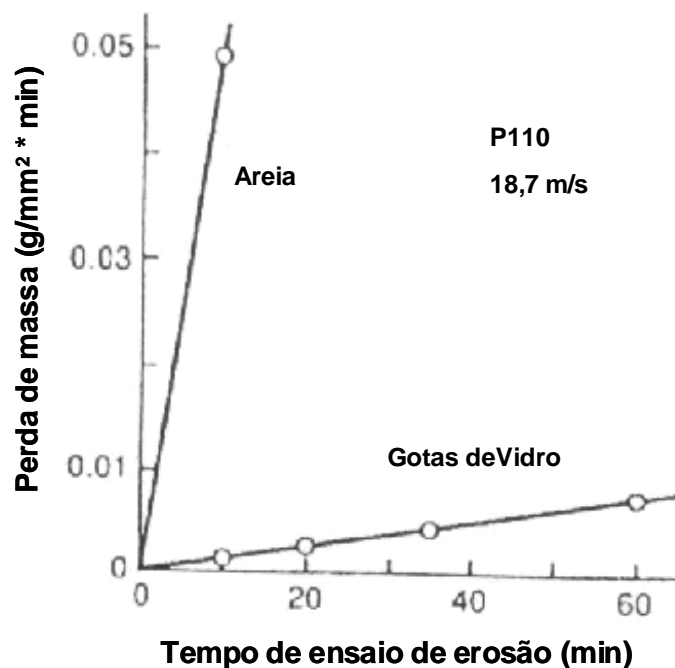


Figura 2.12 Perda de massa de um aço P110 em relação ao tempo de teste para areia e gotas de vidro com concentração igual a 1,5% em peso, diâmetro de 106–150 μm e velocidade de 18,7 m/s [Clark, 1991].

Uma segunda metodologia proposta para se avaliar a influência da forma da partícula abrasiva na perda de massa do material consiste na análise da variação do parâmetro de ponta da partícula, ou *Spike Parameter (SP)* [Hamblin e Stachowiak, 1995] conforme mostram a **Figura 2.13.** e a **Tabela 2.1.**

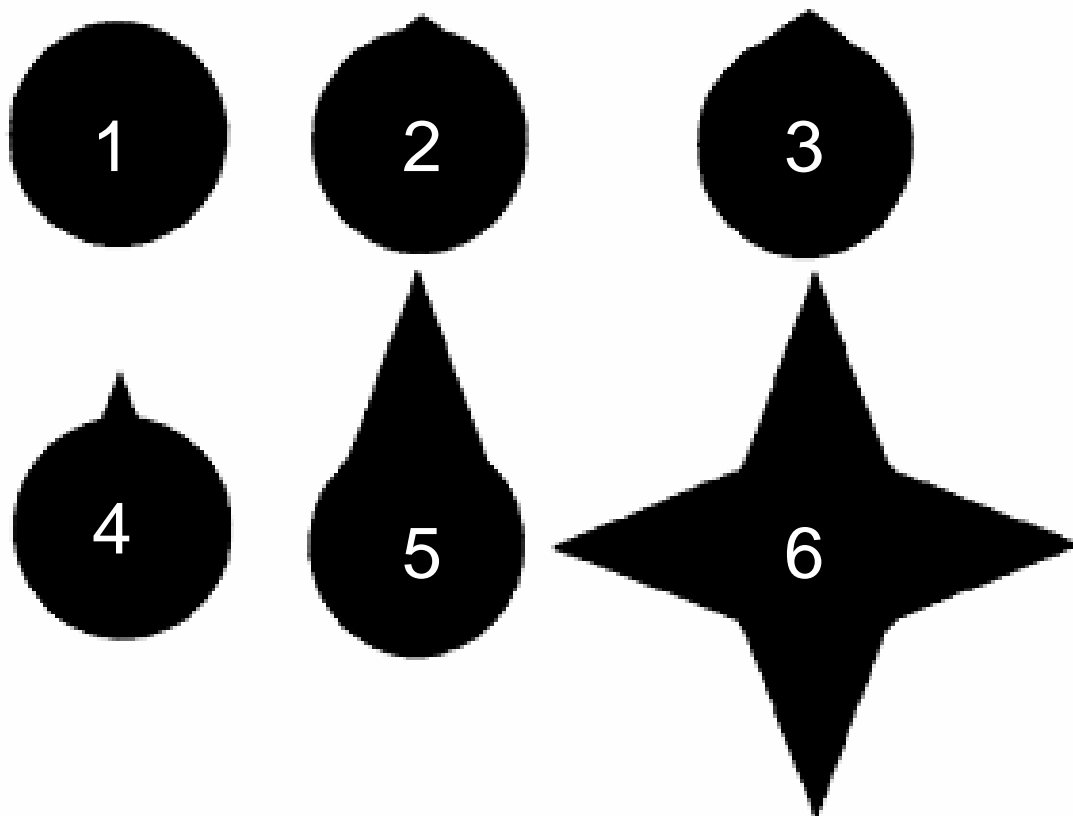








Figura 2.13 Seis formas de partículas caracterizadas em função da angulosidade [Hamblin e Stachowiak, 1995].

Mação e Scandian [ABM 2005] elaboraram um programa que utiliza as definições de **Hamblin e Stachowiak** [1995] para medir o ângulo de ponta da areia usada nos ensaios no slurry pot tester proposto por **Clark** [1991].

Tabela 2.1 Relação do parâmetro de ponta (SP) com a forma caracterizada [Hamblin e Stachowiak, 1995].

Forma	Parâmetro de Ponta (SP)
	0,1332
	0,1633
	0,1721
	0,1951
	0,2119
	0,7243

Nessa mesma pesquisa, foi verificado que quanto mais próximo de 1 o parâmetro de ponta da partícula dura maior a angulosidade e, conseqüentemente, mais severo o desgaste.

6 – Densidade e dureza das partículas

Em geral, partículas de maior dureza promovem maiores taxas de desgaste, independente da velocidade e do ângulo de impacto, conforme pode ser visualizado na **Figura 2.14**. Por outro lado, também é fato que abrasivos com durezas diferentes, mas ao mesmo tempo muito superiores à dureza da superfície, não produzem taxas de desgaste significativamente diferentes. Partículas com dureza menor que a da superfície, causam menos desgaste que partículas mais duras.

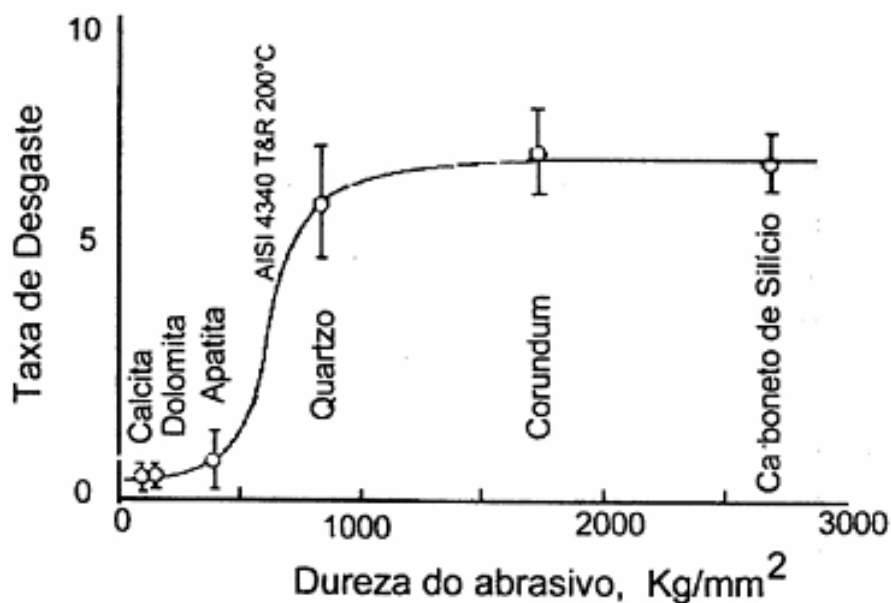


Figura 2.14 Efeito da dureza das partículas abrasivas na taxa de desgaste erosivo [Misra e Finnie, 1981].

Uma relação entre a dureza da partícula e da superfície próxima de 1,2 tem sido estabelecido tanto experimental quanto teoricamente como valor limite para considerar o efeito da dureza da partícula como fator determinante no desgaste. Esta relação pode ser observada na **Figura 2.15**.

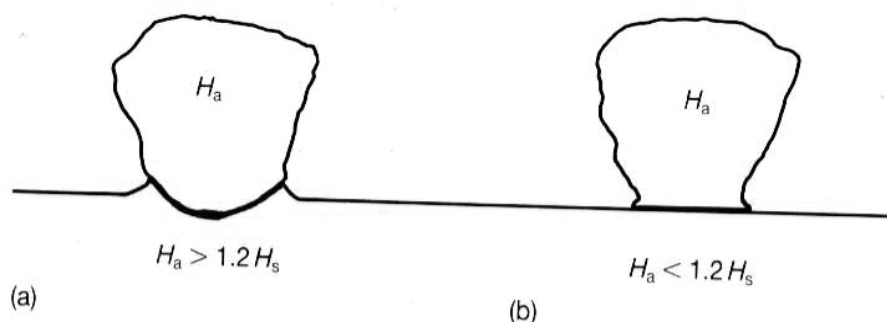


Figura 2.15 Ilustração do contato entre partículas de areia sob carga normal e superfície plana. (a) Quando a dureza do abrasivo (H_a) é maior que 1,2 vezes a dureza da superfície (H_s) a partícula irá indentar a superfície. (b) Se H_a é menor que 1,2 H_s , ocorrerá escoamento plástico na partícula, perdendo sua angulosidade, consequentemente perdendo o corte [Hutchings, 1992].

Quanto maior a densidade da partícula, maior será a velocidade de impacto contra o material alvo [Clark, 1993]. Isto resultará em aumentos de energia cinética de impacto e eficiência de colisão que, conseqüentemente, levarão a maiores taxas de erosão. A **Figura 2.16** ilustra o que foi dito.

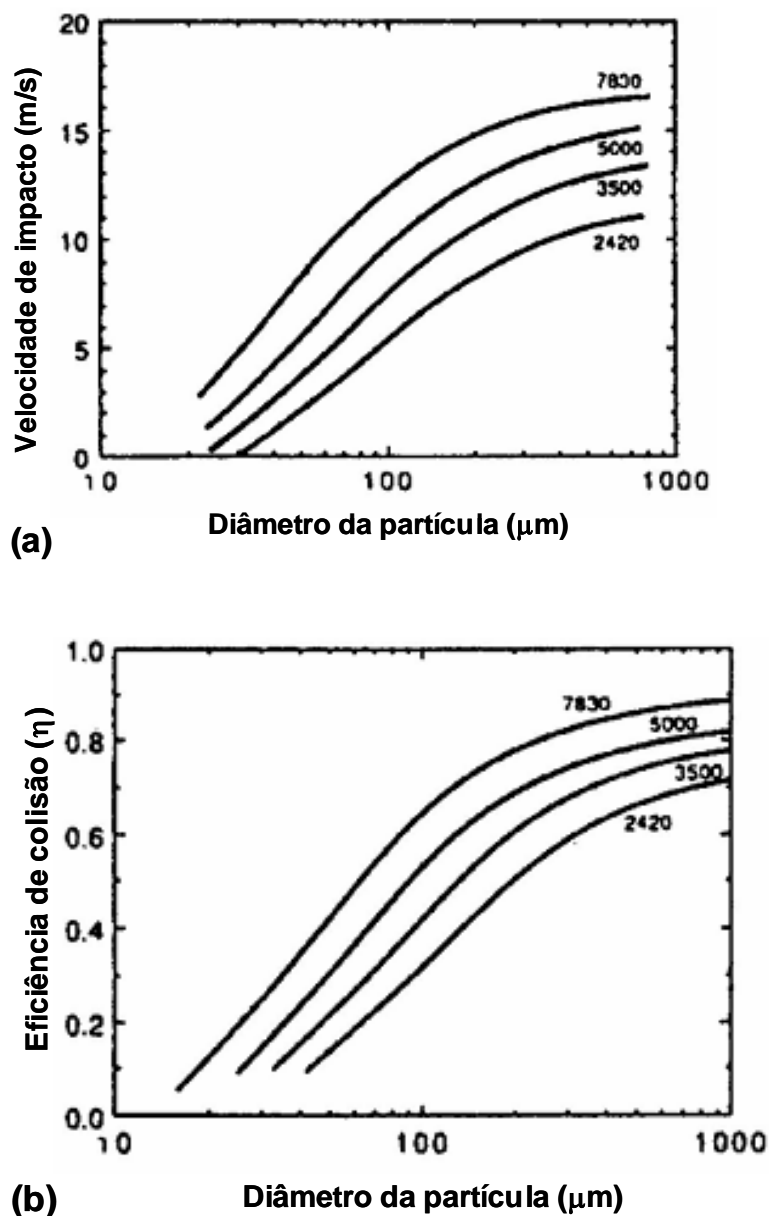


Figura 2.16 (a) Variação da velocidade de impacto na linha de estagnação para diferentes densidades de partículas esféricas (Kg/m^3) suspensas em água em função do tamanho da partícula. Velocidade nominal de 20 m/s e diâmetro da amostra igual a 5 mm (b) Variação na eficiência de colisão para as mesmas condições [Clark, 1993].

7 – Natureza do líquido em suspensão

Quanto maior for a viscosidade do líquido que estiver em suspensão em um erosímetro, menor será a eficiência de colisão (η), conforme mencionado e mostrado na **Figura 2.4** anteriormente. Conseqüentemente, a taxa de erosão também cairá, desde que sejam preservados todos os outros parâmetros do ensaio. Isto ocorre porque um líquido de maior viscosidade tem uma maior capacidade de arrastar consigo as partículas, minimizando o impacto das mesmas contra o material alvo.

8 – Natureza do escoamento em meio lamacento

O tipo de escoamento dentro do erosímetro influencia na eficiência de colisão das partículas contra as amostras e, conseqüentemente, na taxa de erosão (R_t) a ser verificada nos corpos de prova. Um escoamento turbulento faz com que o movimento das partículas seja aleatório dentro do reservatório, aumentando a eficiência de colisão, enquanto que em um escoamento laminar as partículas iriam seguir o fluxo circular do líquido fazendo com que o número de impactos contra as amostras sejam reduzidos.

9 – Efeito do material alvo

Diversos trabalhos experimentais mostraram a existência de uma região linear entre a dureza da superfície e a resistência ao desgaste erosivo para diferentes metais e ligas, como pode ser observado nas **Figuras 2.17 e 2.18**.

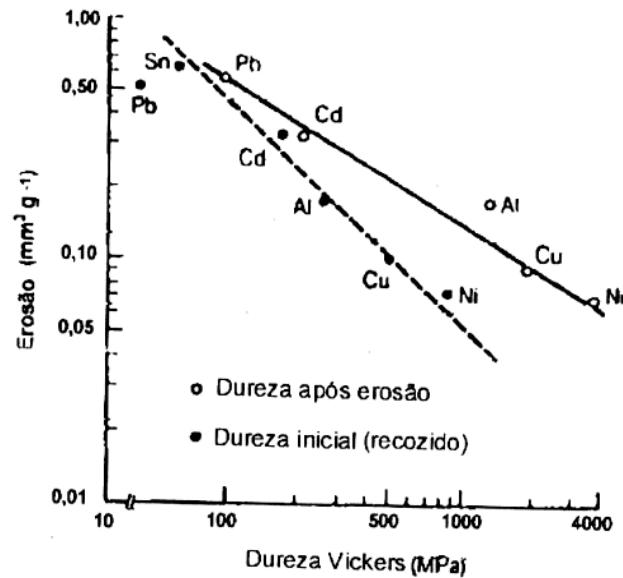


Figura 2.17 Relação entre a taxa de erosão e a dureza da superfície antes e depois do desgaste erosivo, para diversos materiais. Ângulo de impacto de 20° , velocidade de impacto de 75 m/s e partículas de carboneto de silício [Hutchings, 1992].

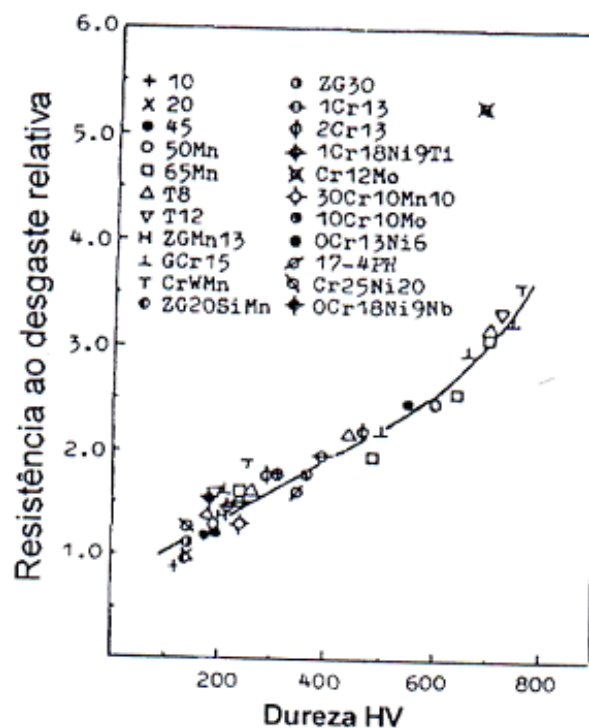


Figura 2.18 Relação entre a dureza e a Resistência relativa à erosão em meio lamacento (água + areia), para 22 diferentes materiais [Wang e Xu, 1985].

A Figura 2.18 corresponde aos resultados obtidos após impactar a superfície de metais não ferrosos com partículas de carboneto de silício em um ângulo de impacto de 20° , enquanto que a **Figura 2.18** mostra os resultados obtidos após submeter diversas ligas ferrosas a desgaste em água + areia.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Amostras

As amostras foram retiradas das paredes de um tubo de aço API 5CT K55 laminado a quente com 13 3/8" de diâmetro e 9,65 mm de espessura que é utilizado como tubo de revestimento na indústria.

Os procedimentos adotados durante a confecção das amostras foram os seguintes:

Primeiramente, as amostras foram cortadas paralelamente à linha axial do tubo para que pudessem ser minimizadas quaisquer diferenças na microestrutura decorrente do processo de fabricação. Na sequência, as mesmas foram usinadas em formato cilíndrico com diâmetro de 4,76 e comprimento de 60 mm, sendo que o comprimento que ficaria exposto à erosão seria 50 mm. Por fim, as amostras foram polidas manualmente com alumina. A área frontal sujeita ao impacto de cada amostra foi de 238 mm².

3.2 TESTE DE EROSÃO

As taxas de erosão das amostras foram determinadas por gravimetria, isto é, pela diferença de peso antes e após os testes utilizando uma balança Sartorius CP 225 D com resolução de 0,01 mg. Foram seguidos procedimentos de preparação do ensaio, limpeza e pesagem da amostra para que pudesse ser minimizado o erro decorrente da manipulação dos ensaios. Estes procedimentos estão detalhados no **Anexo B**. A topografia superficial, antes e após os ensaios, foi avaliada através de um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 3⁺.

3.2.1 Parâmetros do Teste

O abrasivo usado na realização dos experimentos foi a areia normal brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia) segundo normas **NBR 7214** e **NBR 5734**. A granulometria foi variada entre 150 μm e 1200 μm . Esta areia tem a sílica como mineral predominante. No experimento, foi adotada uma concentração de 4% em peso (184 gramas) baseado em diversos estudos realizados em poços de petróleo para que se pudesse simular uma concentração mais próxima possível da realidade e para que a interferência partícula-partícula não interferisse nos resultados [Wozniowski, 1990; Clark, 1991 e 1993]. A dureza da areia utilizada nos experimentos é de aproximadamente 800 HV [Misra e Finnie, 1981].

Foi usada água destilada para minimizar o efeito da corrosão com densidade próxima de 1000 kg/m^3 e viscosidade de 0,8927 centipoises à temperatura de 26°C. O volume de água nos ensaios foi de 4600 ml.

A velocidade adotada foi de 1500 ± 75 rpm, que corresponde a uma velocidade de impacto de aproximadamente $7,5 \pm 0,4$ m/s da areia contra a superfície da amostra. Não foi possível estabelecer uma velocidade constante durante todo o tempo de ensaio devido à turbulência gerada dentro do reservatório pelo suporte de fixação das amostras e pelas tiras verticais.

Os tempos de ensaio analisados foram de 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos.

3.2.2 Erosímetro

O erosímetro utilizado neste trabalho de aço inox 304 com 250 mm de diâmetro interno e 8 mm de espessura de parede, tendo como capacidade máxima 8 litros (**Figura 3.1**). Um eixo de aço inox vertical é montado no centro, suportando duas amostras verticais a uma distância de 48 mm além de uma hélice do tipo naval de 120 mm de diâmetro que em conjunto com os *baffles* garante a suspensão das partículas sólidas (**Figura 3.2 (a) e (c)**). Um agitador

mecânico de 255 W de potência e rotação máxima de 2000 rpm, regulável através de uma caixa de engrenagens e equipado com tacômetro digital, foi utilizado para realização dos testes. O reservatório dispõe de quatro tiras verticais, chamadas de *baffles*, dispostas 90 ° uma em relação a outra, para garantir o fluxo turbulento (**Figura 3.2 (a)**). As tiras verticais são soldadas a uma distância de 2 mm da parede do reservatório para que não fique retida nenhuma partícula sólida na interface *baffles* parede do reservatório.

O controle da temperatura durante os ensaios foi monitorado de forma *in situ* com o auxílio de um multímetro digital a partir de dados obtidos de dentro do tanque. Foi utilizada uma serpentina de aço inox com uma vazão de água variável em função da temperatura ambiente para garantir que a temperatura do ensaio ficasse em torno de 26°C **Figura 3.2 (f)**

O erosímetro dispõe também de uma junta de vedação de borracha para que não ocorra vazamento durante a realização dos experimentos e de um ponto para coleta de amostras. Há uma válvula no mesmo nível de altura das amostras durante os ensaios, para que se possa estimar a eficiência de colisão no reservatório nas condições específicas do teste, ou seja, qual a porcentagem de partículas de areia que realmente colidiu contra a superfície dos corpos de prova.

A **Figura 3.1** ilustra os principais componentes do erosímetro:

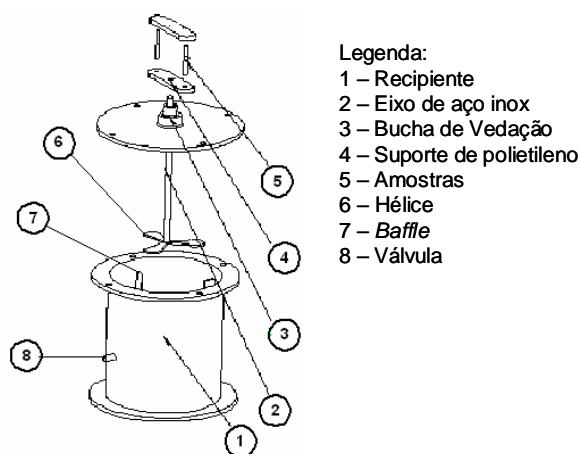


Figura 3.1 Representação esquemática dos componentes do erosímetro.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.2 Erosímetro, (a) vista superior, (b) vista frontal, (c) eixo rotor, (d) vista geral, (e) fixação das amostras, (f) serpentina para resfriamento.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – ANÁLISE DA RUGOSIDADE

Um parâmetro de acabamento comumente utilizado para caracterizar a topografia da superfície é a rugosidade média (R_a).

A **Figura 4.1** foi gerada a partir da Interferometria Laser, a fim de caracterizar a superfície da amostra antes do ensaio de erosão.

A **Figura 4.2** é a planificação da **Figura 4.1** realizada através de modelos matemáticos trabalhados em *software*.

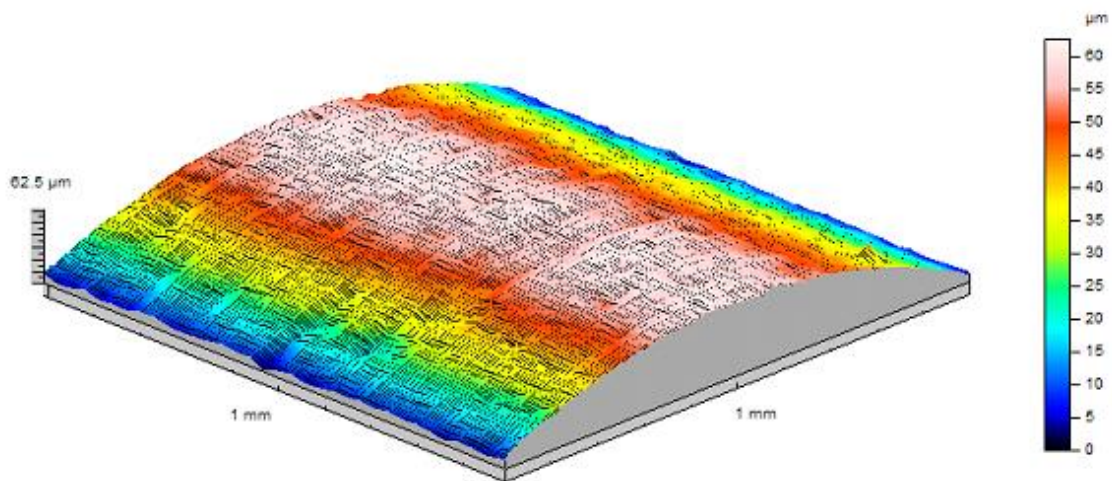


Figura 4.1 Topografia com o efeito da forma cilíndrica da amostra antes do ensaio de erosão.

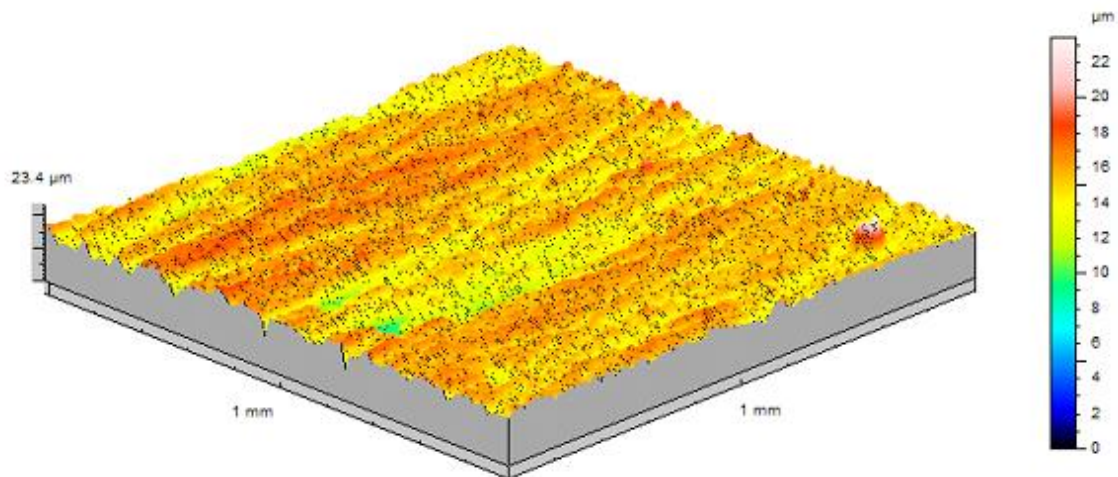


Figura 4.2 Topografia sem o efeito de forma a partir da **Figura 4.1**

Nota-se nas **Figuras 4.1 e 4.2** que o processo de usinagem empregado para a confecção das amostras, com posterior polimento, conferiu a elas um acabamento superficial com marcas de usinagem que resultam numa rugosidade com valores em torno de $1,28 \mu\text{m}$.

A distância entre as marcas de usinagem é proporcional ao avanço.

As **Figuras 4.3, 4.4 e 4.5** relacionam a rugosidade média (R_a) com o tempo de ensaio para diferentes tamanhos de partículas.

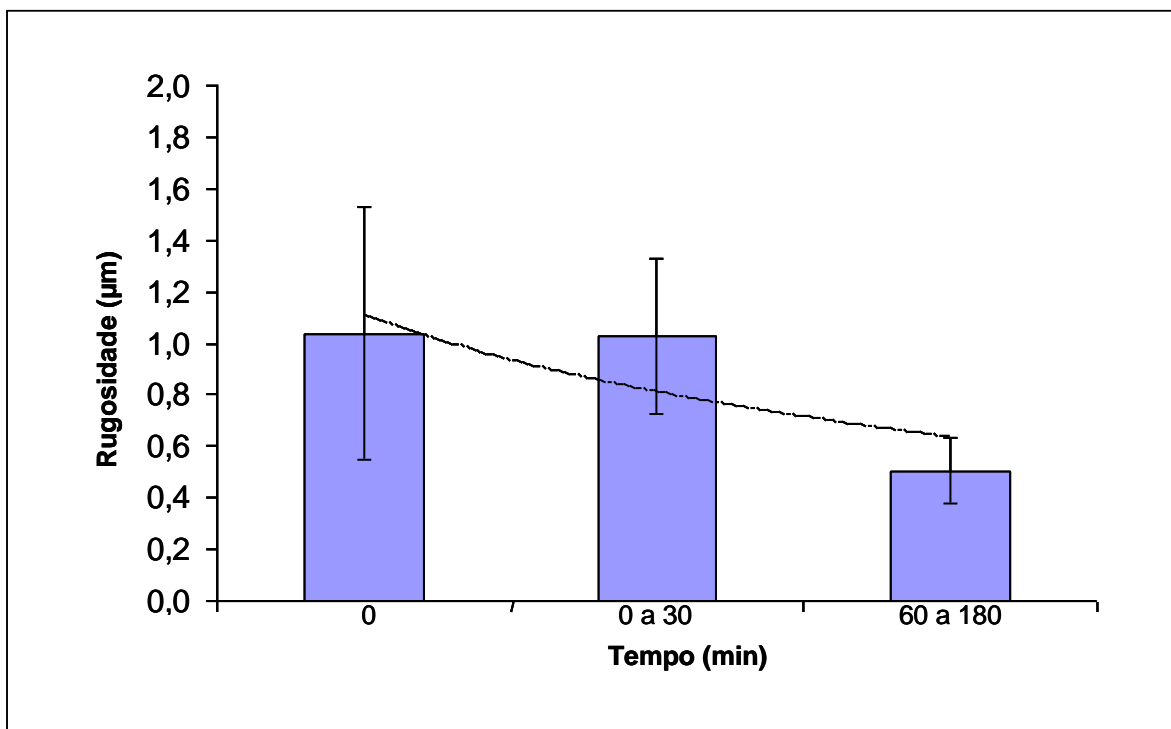


Figura 4.3 Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (150 - 300 μm).

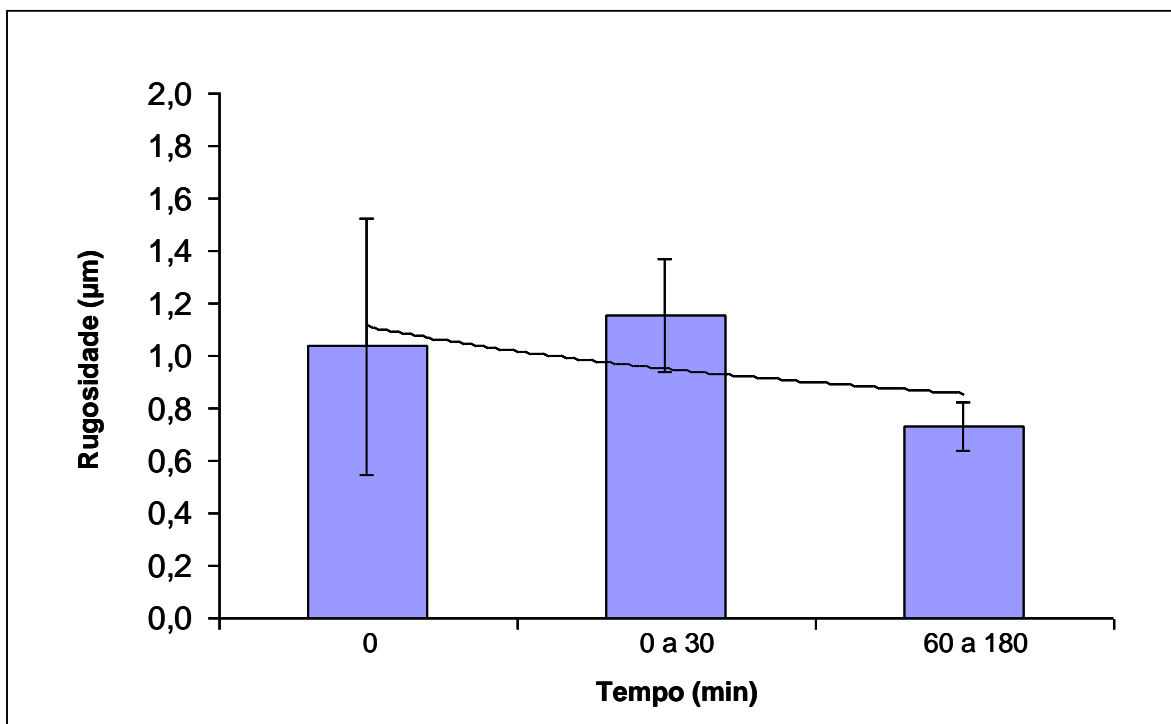


Figura 4.4 Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (600 - 1200 μm).

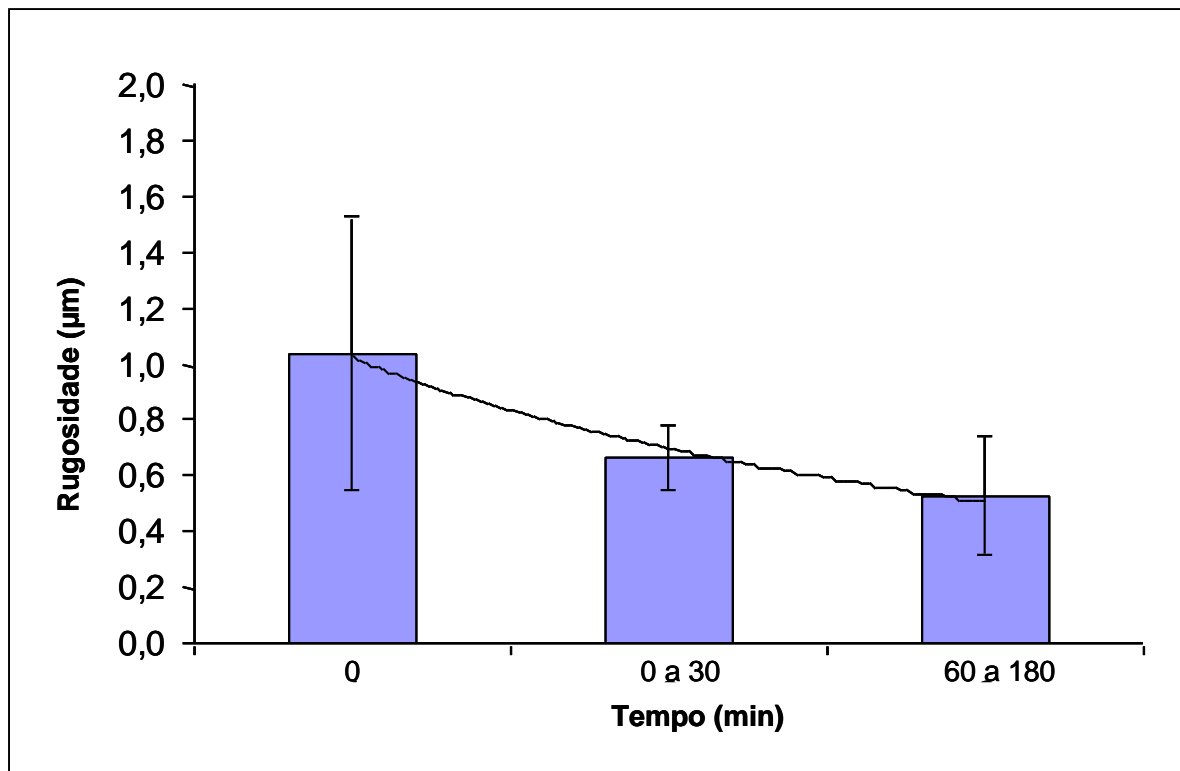


Figura 4.5. Variação da Rugosidade R_a (μm) com o tempo de erosão com areia (300 - 600 μm).

Pela análise das **Figuras 4.3, 4.4 e 4.5** pode-se concluir que com o aumento do tempo de exposição das amostras ao fluxo erosivo há uma redução significativa da rugosidade. O processo de usinagem empregada para a confecção das amostras e o posterior polimento, conferiu a elas um acabamento superficial com valores em torno de 1,04 μm . Esse acabamento, expõe vários picos na superfície do material, que o fluxo de partículas remove com o decorrer do tempo, reduzindo o valor de R_a . Para maiores tempos de ensaio esse picos já foram removidos e a rugosidade tende a estabilizar-se em um valor constante proporcional a granulometria da partícula, como pode ser visto também na **Figura 4.6**.

Outra análise interessante é a variação da rugosidade em função da granulometria das partículas para o mesmo tempo de ensaio.

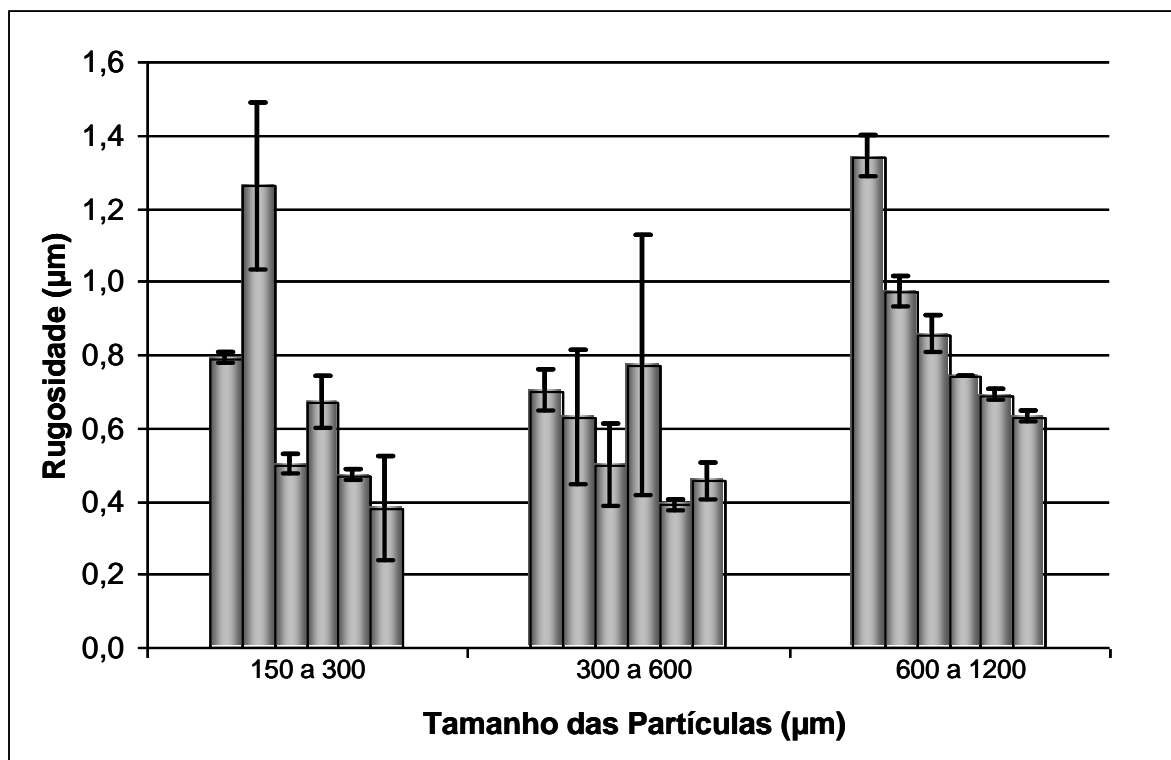


Figura 4.6 Variação do acabamento superficial das amostras com a granulometria das partículas para os tempos de 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos.

A **Figura 4.6** mostra que para valores de tempo acima de 120 minutos a rugosidade permanece constante. Essa constante é alcançada mais rapidamente para partículas com granulometrias maiores.

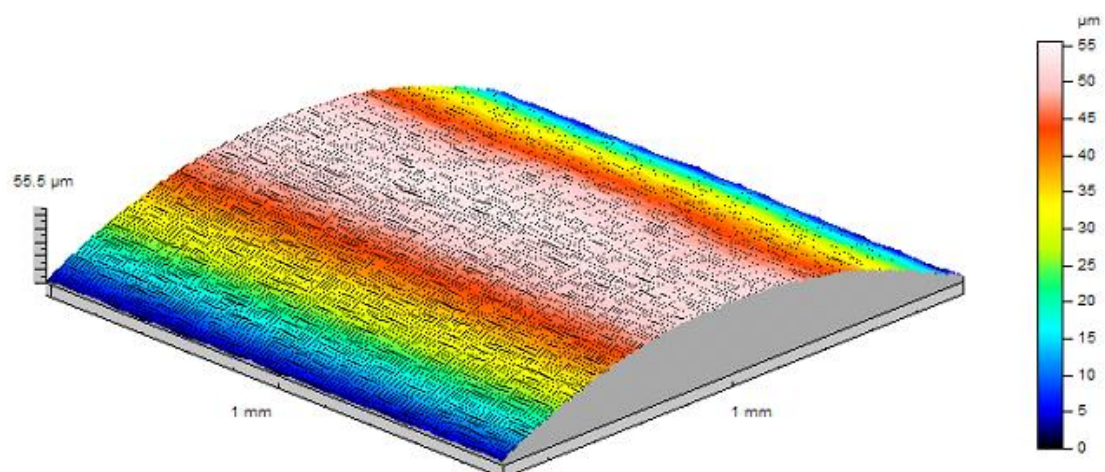


Figura 4.7 Topografia com o efeito da forma cilíndrica da amostra erodida por 180 min em peso de areia (300-600 μm).

As marcas de usinagem foram totalmente removidas.

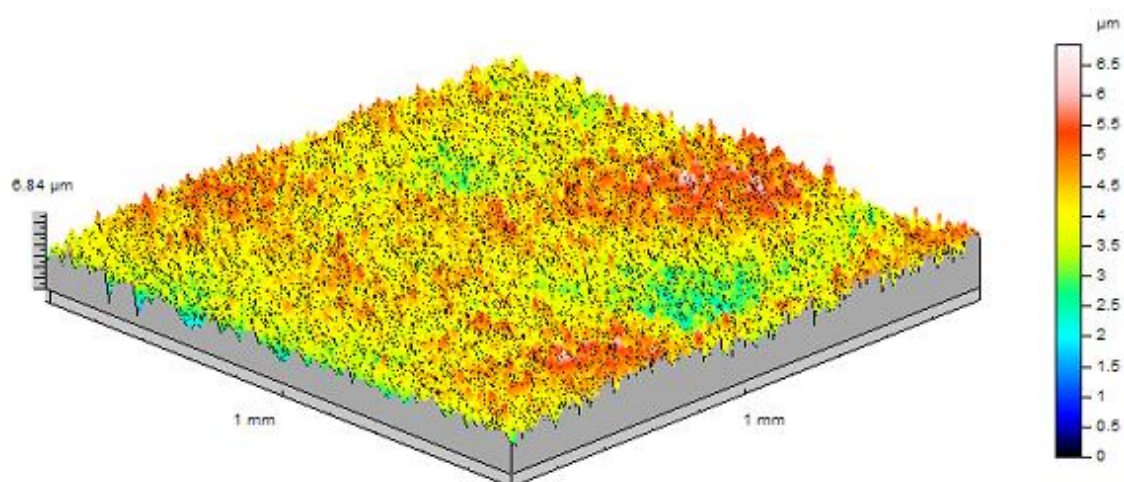


Figura 4.8 Topografia sem o efeito de forma a partir da **Figura 4.7**

O valor da rugosidade média R_a foi de $1,28 \mu\text{m}$. Nas **Figuras 4.7 e 4.8** o desgaste dos picos faz diminuir o valor de R_a como citado anteriormente e mostrado na **Figura 4.2**. Esse valor decresce para $0,57 \mu\text{m}$.

As **Figuras 4.9 e 4.10** mostram o aspecto típico de desgaste das amostras. Observa-se que o tamanho dos eventos é maior para maiores tamanhos das partículas de areia para as mesmas condições de ensaio, visto que as partículas tendem a imprimir marcas proporcionais ao seu tamanho. Além disso como a velocidade é a mesma para ambas granulometrias, quanto maior as partículas, maior a massa, e consequentemente, maior a energia de impacto.

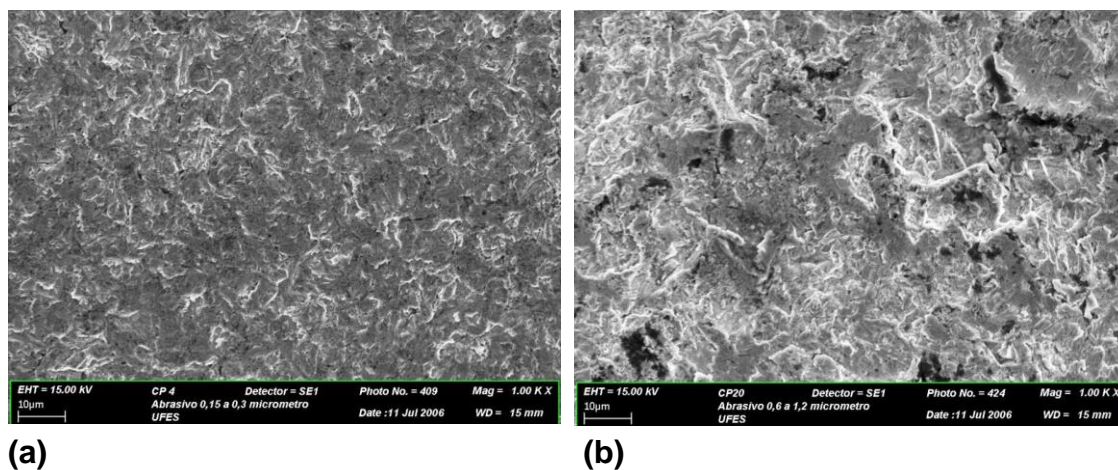


Figura 4.9 Superfície 1.000X ampliada ao MEV da amostra erodida por 60 min. Concentração de 4 % em peso de areia (a) 150-300 μm (b) 600-1200 μm .

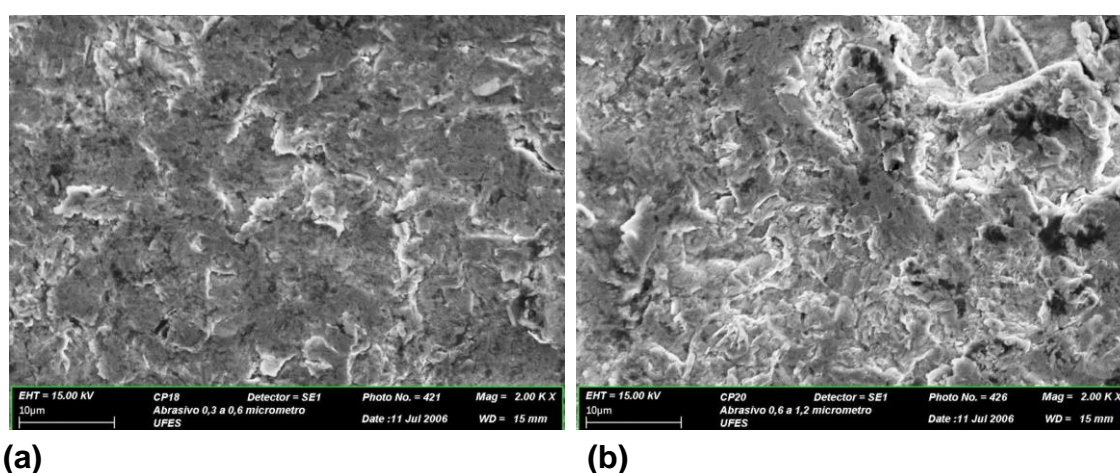


Figura 4.10 Superfície 2.000X ampliada ao MEV da amostra erodida por 60 min. Concentração de 4 % em peso de areia (a) 300-600 μm (b) 600-1200 μm .

4.3 – Ensaios de Erosão

Foram conduzidos testes de erosão (água destilada + 4% em peso de areia) para o aço API K55 5CT. Para três granulometrias de areia (150-300 μm , 300-600 μm e 600-1200 μm) para os tempos de 15, 30, 60, 90, 120, 180 min.

A **Figura 4.10** mostra a massa removida da amostra em função do tempo de ensaio para as três granulometrias.

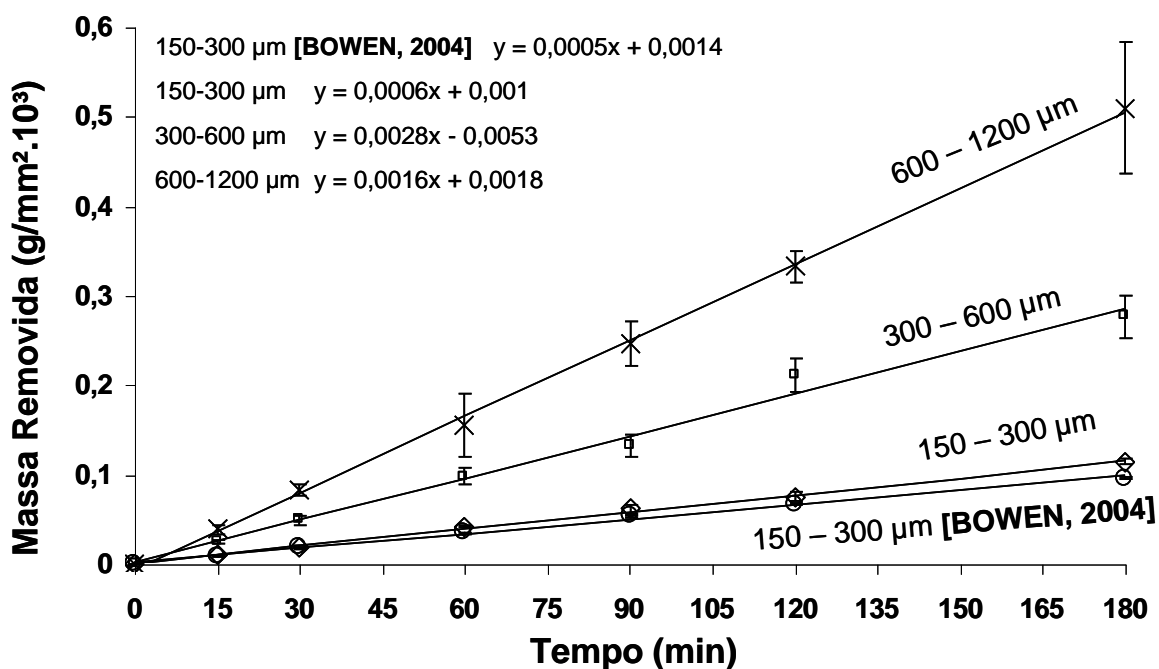


Figura 4.11 Perda de massa em função do tempo para diferentes granulometrias de areia. Comparação com os resultados de **BOWEN [2004]** para as mesmas condições de ensaio.

Pode-se observar na **Figura 4.11** que houve um aumento proporcional da perda de massa do material em relação ao tempo e todos os pontos tenderam a formar uma reta com mínima dispersão em torno da linha média. Essa figura ratifica o conceito da influência do tamanho da partícula, mostrando que com o aumento da granulometria, há o aumento da massa removida.

Para tempos maiores que 180 min não podemos considerar o aumento de perda de massa como sendo proporcional ao tempo, já que uma nova reta

média terá uma inclinação mais negativa, devido à possibilidade dos testes seguintes terem uma menor perda de massa, pelos fatores citados anteriormente, como rugosidade e angulosidade das partículas.

Os resultados obtidos de taxa de erosão em relação ao tempo são mostrados na **Figura 4.12**

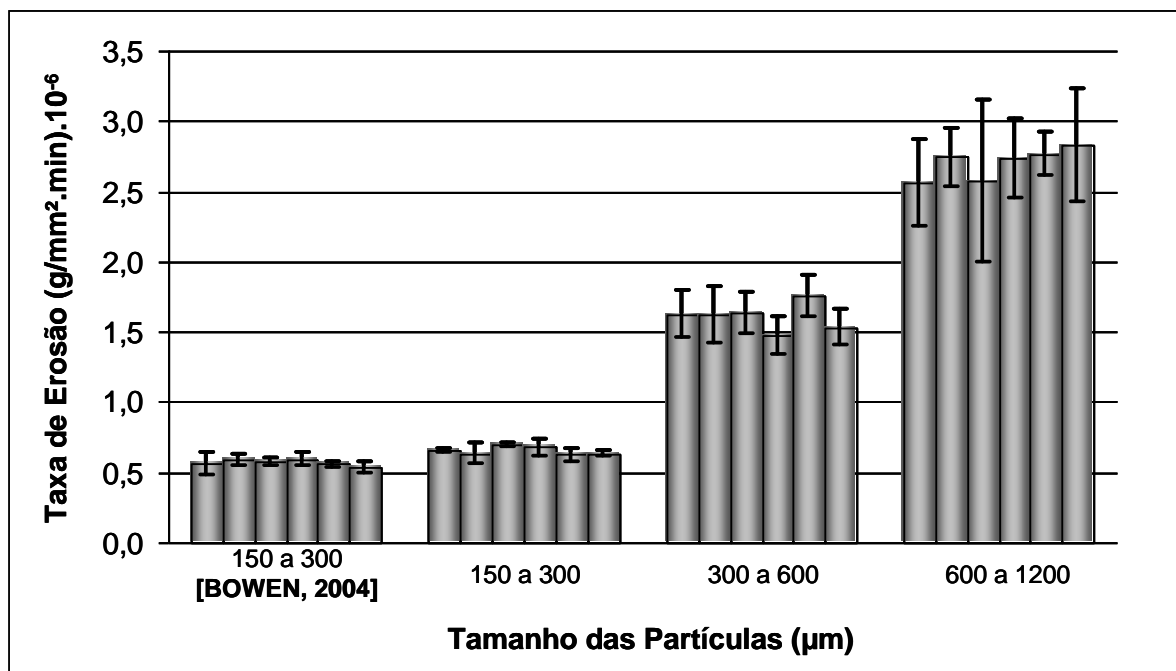


Figura 4.12 Taxa de erosão em função das diferentes granulometrias para os tempos de 15, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos. Comparação com os resultados de **BOWEN [2004]** para as mesmas condições de ensaio.

A **Figura 4.12** faz também uma comparação dos resultados obtidos para taxa de erosão nesse estudo com os resultados de **Bowen [2004]**. Essa diferença entre os valores pode ser explicada principalmente pela diferença entre o acabamento superficial inicial das amostras dos dois estudos.

Foi caracterizado o regime permanente a partir de 15 minutos, a taxa de erosão tende a ser uniforme, havendo apenas um leve aumento para o teste de 180 min para granulometria de 300-600 μm. Esta variação está dentro do limite tolerável que caracteriza o regime permanente.

Tabela 4.1 Taxa de erosão média para as três granulometrias ensaiadas.

Granulometria (μm)	150-300	300-600	600-1200
Taxa de Erosão ($\text{g}/\text{mm}^2.\text{min}$).$10^{-6}$	0,648	1,599	2,756

A **Tabela 4.1** mostra o aumento da Taxa de erosão média com o aumento da faixa de granulometria das partículas.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas referente ao trabalho foram as seguintes:

1. A taxa de erosão permaneceu constante durante todos os ensaios, de acordo com a literatura.
2. A perda de massa variou dentro do esperado pela literatura consolidada.
3. Os valores de taxa de erosão e de massa removida foram maiores do que os já publicados na literatura. O fator primordial foi o acabamento superficial inicial. A amostra apresentava valores altos de rugosidade, o que significa uma grande diferença entre picos e vales na superfície. O valor da rugosidade vai diminuindo com o tempo de ensaio devido a remoção dos picos, tornando a superfície mais regular.
4. O tamanho das partículas dita a velocidade com que o valor da rugosidade decresce.
5. A granulometria das partículas influencia também na rugosidade final para ensaios de maiores tempos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

MACAO, C. L. ; Scandian, C. . Caracterização Numérica de Partículas Abrasivas Através do Cálculo do Parâmetro de Ponta Segundo Stachowiak. In: 60 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2005, Belo Horizonte. Anais do 60 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). São Paulo : Editora da ABM, 2005. p. 3628-3636.

BITTER, J.G.A., “A study of erosion phenomena “, Parts I and II, **Wear**, vol. 6, pp.1-18, 1963.

BOWEN, E.C. “Corrosão-erosão de aço para tubo de revestimento em meio contendo H₂S”, Dissertação de Mestrado, **UFES**, 2004.

BROMBLEY, M.D. “Caracterização numérica da partícula de desgaste”, Projeto de graduação, **UFES**, 2004.

BUURMAN, C. et al, “Scaling-up rules for solids suspension in stirred vessels”, **Chemical Engineering Science**, vol. 41, No. 11, pp 2865-2871, 1986.

CLARK, H. Mcl, “A comparison of the erosion rate of casing steels by sand-oil suspensions”, **Wear**, vol. 151, pp: 217-230, 1991.

CLARK, H. Mcl, “Specimen diameter, impact velocity, erosion rate and particle density in a slurry pot erosion tester”, **Wear**, vol. 162-164, pp: 669-678, 1993.

CLARK, H. Mcl, “Particle velocity and size effects in laboratory slurry erosion measurements OR... do you know what your particles are doing?” **Tribology International**, vol. 35, pp. 617-624, 2002.

CLARK, H. Mcl; WONG, K. K.; LYNN, R.S. “On the particle size effect in slurry erosion.” **Wear**, vol. 149, pp. 55-71, 1991.

CLARK, H. Mcl; WONG, K. K. “A model of particle velocities and trajectories in a slurry pot erosion tester”. **Wear**, vol. 160, pp. 95-104, 1993

FINNIE, I., "Erosion of surface by solid particles", **Wear**, vol. 3, pp: 87-103, 1960.

FINNIE, I., " Some observations on the erosion of ductile metals". **Wear**, vol. 19, pp: 81-90, 1972.

FINNIE, I., " The mechanisms of erosive wear in ductile materials" **Corrosion-erosion behavior of materials**, K. Natesan (ed.) AIME, New York, pp 118-126, 1980.

FINNIE, I., "Some reflections on the past and the future of Erosion". **Wear**, vol. 186-187, pp 1-10, 1995.

GENTIL, V., *Corrosão*. 3 ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos e científicos, 1996.

HAMBLIN, M. G.; STACHOWIAK, G. W. "A multi-scale measure of particle abrasivity. "**Wear**, vol.185, pp. 225-233, 1995.

HAMMARSTEN, A.; SODEBERG, S.; HOGMARK, S. "Study of erosion mechanisms by recovery and analysis of wear fragments". Proceedings of **The Int. Conf. On Wear of Materials**, pp. 373-381, 1983

HUTCHINGS, I.M., "A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence." **Wear**, vol 70, pp. 269-281, 1981.

HOGMARK, S.; HAMMERSTEN, A.; SODERBERG, S. Proc **6th International conference on erosion by liquid and solid impact**, Cambridge, paper 37, pp. 1-8, 1983.

HUTCHINGS, I.M., J. Phys: D: App. Phys, vol.25, pp. A121-221, 1992.

HUTCHINGS, I.M., *Tribology*. London, British Library, 1992.

JENNINGS, W. H.; HEAD, W. J.; MANNING JR., C. R. "A mechanistic model for the prediction of ductile erosion." **Wear**, vol 40, pp. 93-112, 1976.

LESSER, M. “Thirty years of liquid impact research: a tutorial review.” **Wear**, vol 186-187, pp. 28-34, 1995.

LOWE, J.; PONCIANO, J.A. “ Avaliação da fragilização por hidrogênio utilizando uma solução de tiosulfato de sódio”, **Congresso da ABM**, 2000.

MADSEN, B.W. “A study of parameters using a new constant-wear rate slurry test.” Proceedings of **The Int. Conf. On Wear of Materials**, pp. 345-354, 1983.

MENG, H. C.; LUDEMA, K. C. “Wear models and predictive equations: their form and content.” **Wear**, vol 181-183, pp. 443-457, 1995.

MISRA, A.; FINNIE, I. “Correlations between two-body and three-body abrasion and erosion of metals”, **Wear**, vol 68, pp. 33-39, 1981.

NEVILLE, A.; HU, X. “Mechanical and electrochemical interactions during liquid-solid impingement on high-alloy stainless steels.” **Wear**, vol 251, pp. 1284-1294, 2001.

PALASAMUDRAM, S. L.; BAHADUR, S., “Particle characterization for angularity and the effects of particle size and angularity on erosion in a fluidized bed environment.” **Wear**, vol 203-204, pp. 455-463, 1997.

POURBAIX, M. Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions. Section 2 . Houston: **NACE**, 1974

STACK, M.M.; BRAY, L. **Wear**, vol. 273, pp. 186 –187, 1995.

STACK, M.M.; CORLETT, N.; ZHOU, S., **Wear**, vol.214, pp. 175, 1998.

STEPHENSON, DJ; NICHOLLS, JR. **Wear**, pp. 186-187, 1995.

SUNDARARAJAN, G. **Wear**, pp.145:251, 1991.

SUNDARARAJAN, G.; SHEWMON, P. G. “A new model for the erosion of metals at normal incidence.” **Wear**, vol. 84, pp. 237-258, 1983.

SUNDARARAJAN, G. "The solid particle erosion of metallic materials: the rationalization of the influence of materials variables." **Wear**, vol. 186-187, pp.129-144, 1995.

TILLY.G.P. "A two stage mechanism of ductile erosion." **Wear**, vol. 23, 1973.

THOMAS, J.E., *Fundamentos da engenharia de petróleo*, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2001.

WANG, Q. L.; XU, P. E. "Wear of alloy steels in silica sand slurry." Proceedings of **The Int. Conf. on Wear of Materials**, pp. 671-676, 1985

ZUM GHAR, K.H., *Microstructure and wear of materials*, 1987.

ANEXO A – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS:

1 – Colocar 4600 ml de água no tanque de aço inoxidável com o auxílio de um Becker de 1 l e outro de 600 ml.

2 – Colocar 4% em peso (184 gramas) de areia padrão 150, 300 e 600 μm dentro do tanque de aço inoxidável.

3 – Retirar 2 corpos de prova do dessumidificador e realizar o processo de limpeza dos mesmos (ver limpeza).

4 – Realizar a pesagem dos 2 corpos de prova de forma separada (ver procedimento de pesagem).

OBS: Manter a tampa da balança fechada e todos os equipamentos que gerem vibração desligados.

5 – Prender os corpos de prova no suporte com o auxílio de uma pinça tomando cuidado para que o mesmo não efetue nenhuma rotação em torno do seu eixo.

6 – Fixar o conjunto (CP's, suporte e haste) no motor já encaixado por dentro da tampa.

7 – Posicionar o motor com relação à altura no suporte tipo ferradura (ver marcação).

OBS: Foram feitas marcações para que não houvesse divergência no posicionamento dos CP's.

8 – Posicionar a haste com relação à altura do mandril (ver marcação).

9 – Ligar o equipamento e estabilizar a rotação por volta do valor desejado.

10 – Após o término do ensaio, seguir os procedimentos de limpeza e pesagem.

11 – Numerá-los e guardá-los no vasilhame de vidro.

ITEM I – LIMPEZA DOS CORPOS DE PROVA:

1 – Retirar 2 CP's do recipiente que estavam imersos em óleo para evitar a oxidação.

2 – Lavá-lo com detergente em água corrente com o auxílio de uma esponja macia, por aproximadamente 2 minutos. Essa é a única etapa que tocamos os CP's com as mãos.

3 – Fazer o polimento com Alumina (Al_2O_3) com o auxílio de uma flanela.

4 – Deixar os CP's imersos em acetona dentro de um Becker (250ml), por 8 minutos com o auxílio do ultra-som.

OBS: Retirá-los do Becker com o auxílio de uma pinça.

5 – Deixar os CP's imersos em álcool etílico dentro de um Becker por 8 minutos com o auxílio do ultra-som.

OBS: Tomar o cuidado de sempre manter a superfície de ensaio para o lado, a fim de se garantir total remoção das impurezas da superfície, além das amostras serem retidas antes de se desligar o ultra-som.

6 – Secar as amostras em ar quente (secador de cabelo) a uma distância de aproximadamente 2 cm durante 2 minutos, com o cuidado de se utilizar uma pinça para a manipulação das mesmas, a fim de se evitar ao máximo qualquer tipo de contaminação (suor, poeira, etc), que possa influenciar na medições de massa.

ITEM II – PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA:

1 – Após secagem, colocar as amostras no centro da balança e após estabilizar a medida (quando surgir o “g” (grama)), fazer a medição após 20 segundos (cronômetro).

OBS: Após o ensaio repetir o mesmo procedimento de limpeza a partir do item 4 e de pesagem descritos anteriormente.