INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

KAIO SOUZA BORTOLINI

DIEGO FLEGLER DA SILVA

ESTUDO COMPARATIVO DO MICRODESGASTE ABRASIVO EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L E ERFV USADAS NA INJEÇÃO DE ÁGUA PARA RECUPERAÇÃO SECUNDÁRIA

SÃO MATEUS

2014

KAIO SOUZA BORTOLINI
DIEGO FLEGLER DA SILVA

ESTUDO COMPARATIVO DO MICRODESGASTE ABRASIVO EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L E ERFV USADAS NA INJEÇÃO DE ÁGUA PARA RECUPERAÇÃO SECUNDÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso Superior em Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de graduação em Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. M.sc Luiz Rafael Resende da Silva.
Coorientador: Prof. Eng. Felipe Costa Novo Malheiros
Coorientador: Prof. Eng. Marcos Barcelos

SÃO MATEUS
2014

B739e Bortolini, Kaio Souza
Estudo comparativo do microdesgaste abrasivo em tubulações de aço API 5l e ERFV usadas na injeção de água para recuperação secundária / Kaio Souza Bortolini, Diego Flegler da Silva.-- São Mateus, 2014.
52 f. : il; 30 cm.

Orientador: Prof. M.sc. Luiz Rafael Resende da Silva.
Coorientadores: Prof. Felipe Costa Novo Malheiros, Prof. Marcos Barcelos

Monografia (graduação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Curso Superior de Engenharia Mecânica, 2014.

1. Tribologia. 2. Desgaste microabrasivo – Estudo comparativo. 3. Aço - Microabrasão. 4. ERFV – Microabração. I. Silva, Luiz Rafael Resende da. II. Malheiros, Felipe Costa Novo. III. Barcelos, Marcos. IV. Instituto Federal do Espírito Santo. V. Título.

CDD – 621.89

KAIO SOUZA BORTOLINI

DIEGO FLEGLER DA SILVA

ESTUDO COMPARATIVO DO MICRODESGASTE ABRASIVO EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L E ERFV USADAS NA INJEÇÃO DE ÁGUA PARA RECUPERAÇÃO SECUNDÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de graduação em Engenheira Mecânica.

Aprovado em 31 de Julho de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. M.sc. Luiz Rafael Resende da Silva

Instituto federal do Espírito Santo

Orientador

Prof. M.sc. Davi Pereira Garcia

Instituto Federal do Espírito Santo

Avaliador

Prof. Eng. Marcos Barcelos

Instituto Federal do Espírito Santo

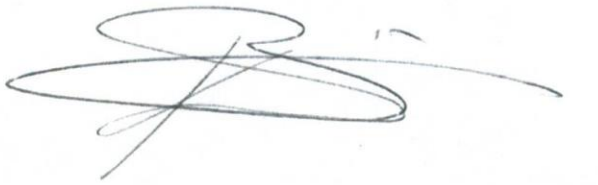
Avaliador

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e ao autor.

São Mateus, 31 de Julho de 2014.

Diego Flegler da Silva



Kaio Souza Bortolini

Para nossos pais, amigos e familiares, que sempre nos apoiaram diante as adversidades.

AGRADECIMENTO

Agradecemos primeiro a Deus, por nossas vidas e oportunidades que tem nos proporcionados.

Agradecemos o nosso orientador, Luiz Rafael Resende da Silva, que nos apoiou e deu suporte em toda a realização do presente trabalho. Agradecemos aos nossos coorientadores, Felipe Malheiros e Marcos Barcelos, que nos auxiliaram em meio as dificuldades.

Agradecemos o professor Renato Siqueira, pelo incentivo que nos foi dado durante toda a nossa graduação. Ao amigo Renato Franco, pela disposição e auxilio na aquisição do material para que o presente trabalho pudesse ser confeccionado. Agradecemos a todos os amigos que caminharam juntos nos momentos bons e ruins durante a nossa vida acadêmica.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”
Friedrich Nietzsche

RESUMO

Com a necessidade de inibir problemas causados pela acidez e corrosão nas tubulações utilizadas no escoamento de petróleo, buscam-se alternativa para tal problema, como a busca por novos materiais. Devido aos grandes prejuízos financeiros causados por essa deterioração do material, a troca das tubulações de aço API 5L por tubulações de epóxi reforçado com fibra de vidro (ERFV) vem se tornando constantes nas linhas de injeção de água para recuperação secundária dos reservatórios.

O presente trabalho faz um estudo comparativo do desgaste microabrasivo das tubulações de aço API 5L, grau B e tubulações de epóxi reforçadas com fibra de vidro (ERFV), utilizadas no sistema de injeção de água em reservatórios de petróleo para recuperação secundária. Este trabalho foi feito com o material sendo submetido a ensaios de microabrasão realizados em um tribômetro do tipo esfera livre, com variação de dois tipos de partícula abrasiva (SiO_2 e SiC) para cada teste, mantendo-se a carga normal de 0,22 N e a velocidade constante (157,4 rpm). As medidas das impressões feitas nas amostras foram realizadas com um microscópio óptico ligado a um software (Generic Video Module) em tempos diferentes no ensaio, 5, 15, 30, 45 e 60 minutos de teste. As amostras foram preparadas e dimensionadas com 30 x 10 x 3 mm. Com estes ensaios foram analisados os coeficientes de desgaste (k) e os volumes desgastados nos dois materiais, o APL 5L e o ERFV, discutidos os desgastes microabrasivos baseado nas literaturas.

Palavra-chave: Injeção secundária. Aço API 5L. ERFV. Microabrasão. Coeficiente de desgaste (k).

ABSTRACT

With the need to inhibit problems caused by acidity and corrosion in the pipes used in transporting oil, are sought alternative to such a problem, as the search for new materials. Due to huge financial losses caused by the deterioration of the material, the exchange steel pipes of API 5L for fiberglass-reinforced epoxy pipelines (FRE) has become constant lines of water injection for secondary recovery of reservoirs.

This article makes a comparative study of micro abrasive wear in steel pipes API 5L, grade B and fiberglass-reinforced epoxy pipelines (FRE), used in water injection into oil reservoirs for secondary recovery system. This study was done with the material being subjected to tests performed in a tribometer microabrasion free ball type, ranging from two types of abrasives particles (SiO_2 and SiC) for each test, maintaining a normal load of 0,22 N and constant-speed (157,4 rpm). The measurements of the prints made on the samples were performed with an optical microscope linked to a software (Generic Video Module) at different times during each test 5, 15, 30, 45 and 60 minutes of test. The samples were prepared and sized 30 x 10 x 3 mm. With these tests the wear coefficient (k) and volumes worn in both materials were analyzed, and the API 5L and FRE, discussed wear microabrasive based on the literatures.

Keyword: Injection secondary. Steel API 5L. FRE. Microabrasion. Wear coefficient (k).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma de desgaste. (Adaptado BURWELL and STRANG, 1952) ...13
Figura 2 - Ilustração das diferenças entre (a) abrasão a dois corpos e (b) abrasão a três corpos. (Adaptado de HUTCHINGS, 1992).....14
Figura 3 - Desenho esquemático do ensaio de microabrasão do tipo esfera livre (Adaptado de ARAÚJO, 2007) 15
Figura 4 – Esquemático da calota de impressão na amostra (Adaptado MARQUES, 2011). 16
Figura 5 - Micromecanismos de desgaste (Adaptado GAHR, 1987) 18
Figura 6 - Relação entre o Volume relativo da taxa de desgaste e a razão H_a / H_s. (Adaptado HUTCHINGS, 1992) 19
Figura 7 - Contato entre a partícula e a superfície, para (a) abrasão severa e (b) abrasão suave. (Adaptado HUTCHINGS, 1992) 20
Figura 8 - Gráfico da relação entre a resistência ao desgaste abrasivo de diversos materiais em um teste de abrasão à pino como uma função da dureza do material. (Adaptado GAHR, 1987) 21
Figura 9 - Fluxograma da unidade de tratamento de água.....26
Figura 10 - Processo de fabricação de tubos (Adaptado TELLES, 2001) 27
Figura 11 - Fabricação de tubos por laminação - Mannesmann. (Adaptado TELLES ,2001) 28
Figura 12 – Representação do processo de enrolamento de filamentos. (Adaptado HOA, 2009) 30
Figura 13 - Amostra de aço API 5L utilizada para o ensaio.....32
Figura 14 - Amostra de ERFV utilizada no ensaio.....33
Figura 15 - Microabrasômetro Calowear de esfera livre 34
Figura 16 - Equipamento de microabrasão 35
Figura 17 - Lupa usada para medição da calota de impressão.....35
Figura 18 - Computador ligado ao microabrasômetro. 36
Figura 19 - Amostras depois do ensaio de microabrasão. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (%) do aço API 5L, grau B utilizadas no ensaio.....31
Tabela 2 - Composição química (%) segundo a norma API do aço API 5L, grau B, PSL 1. (Adaptado MATWEB, 2014).....31
Tabela 3- Parâmetros do ensaio de microabrasão 37
Tabela 4 - Resultados para o aço API 5L, com o abrasivo a base de SiC.....38
Tabela 5 - Resultados para o aço API 5L, com o abrasivo a base de SiO_2. 38
Tabela 6 - Resultado para ERFV, com abrasivo a base de SiC 39
Tabela 7 - Resultados para ERFV, com abrasivo a base de SiO_2.....39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
API	*American Petroleum Institute*
DIN	*Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normatização)
ERFV	Epóxi Reforçado com Fibra de Vidro
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2S	Ácido Sulfídrico
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
AISI	*American Iron and Steel Institute*
S_iC	Carbeto de Silício
S_iO_2	Dióxido de Silício (Sílica)
S	Distância percorrida
N	Força normal (Newtons)
V	Volume desgastado
K	Coeficiente de desgaste
B	Diâmetro da calota de impressão
D	Diâmetro da esfera
rpm	rotações por minuto
H_a	Dureza da partícula
H_s	Dureza da superfície
Y	Limite de escoamento
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
CIM	Corrosão Influenciada por Microorganismos
SST	Sólidos Suspensos Totais
TOG	Teor de Óleos e Graxas
HV	*Hardness Vickers*
HB	*Hardness Brinell*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 REFERENCIAL TEÓRICO 13

2.1 DESGASTE DOS MATERIAIS 13

2.1.1 Desgaste por abrasão 14

2.1.1.1 Ensaio por microabrasão 15

2.1.2 Micromecanismos De Desgaste Abrasivo 17

2.1.3 Propriedades Da Partícula 18

2.1.3.1 Dureza da partícula 18

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DO PETRÓLEO 21

2.2.1 Métodos Convencionais De Recuperação Secundária 22

2.2.1.1 Projetos De Injeção 23

2.2.1.2 Fluidos Injetados 23

2.3 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA INJEÇÃO EM POÇOS 24

2.3.1 Unidade De Tratamento De Água 26

2.4 TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS 27

2.4.1 Tubos de aço carbono 28

2.4.2 Tubos de ERFV 29

3 MATERIAIS E MÉTODOS 31

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS 31

3.1.1 Preparação Das Amostras 31

3.1.1.1 Amostras De Aço 31

3.1.1.2 Amostras De ERFV 32

3.2 ENSAIO DE MICROABRASÃO 33

3.2.1 Parâmetros do ensaio de microabrasão 36

3.2.2 Caracterização Das Amostras 37

4 RESULTADO E DISCUSSÕES 38

4.1 COEFICIENTE DE DESGASTE.....38
5 CONCLUSÕES.....44
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. 45
REFERÊNCIAS.....46

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de Petróleo do mundo, e uma das principais formas de escoamento de óleos e gases são as tubulações metálicas. Entretanto, Frauches-Santos (2014) relata que na produção de petróleo a presença de gases como o ácido sulfídrico (H_2S) e o dióxido carbono (CO_2) causam como consequências aumento da acidez e corrosão. Levando em consideração a corrosão de tubulações metálicas em ambiente petroquímico, buscam-se alternativa para inibir esse problema.

Atualmente como forma de diminuir ou impedir o processo corrosivo as empresas de petróleo apostam na troca das atuais tubulações para tubulações de aços inoxidáveis, tubulações com revestimentos interno ou até mesmo o uso de compósitos como o epóxi reforçado com fibra de vidro (ERFV).

Com uma redução dos problemas ocasionados pela corrosão, o presente trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente a resistência ao desgaste abrasivo em tubulações de aço carbono API 5L (atual tubulação utilizada) e tubulações epóxi reforçada com fibra de vidro (tubulação que está sendo implantada na injeção de água) para melhorar a produção de petróleo no Norte do Espirito Santo.

O desgaste abrasivo é um dos principais tipos de desgastes que se destaca pela sua ampla ocorrência e seus grandes prejuízos financeiros. De acordo com a ASTM G40-01 (2001), define o desgaste abrasivo como sendo “a perda de massa resultante da iteração entre partículas ou asperezas que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem”.

Visando a compreensão do desgaste abrasivo pelo qual as tubulações são submetidas, neste trabalho foram realizados testes de microabrasão a fim de comparar qualitativamente as amostras de aço API 5L e ERFV para aplicação em tubulações com uso de dois diferentes abrasivos, o carbeto de silício (SiC) e a sílica (SiO_2). Também foram comparados os valores de coeficiente de desgaste obtidos nos testes de microabrasão.

Para obtenção dos resultados do teste de microabrasão foi utilizado uma metodologia que englobou desde a preparação das amostras até a avaliação da calota de impressão, que obteve características esféricas. Além da metodologia, o trabalho se baseou em revisão bibliográfica onde foram abordados os principais conceitos relacionados à tribologia, desgastes abrasivos, micromecanismos de desgaste por abrasão, propriedades da partícula, métodos convencionais de recuperação no processo de injeção de água, projetos de recuperação e unidade tratamento de água e tubulações industriais com devidos processos de fabricação de tubulações de aço carbono API 5L e tubulações de ERFV.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, será feita uma revisão bibliográfica para o entendimento de conceitos relacionados à tribologia e suas aplicações em tubulações utilizadas nos métodos de recuperação de poços.

2.1 DESGASTE DOS MATERIAIS

De acordo com Hutchings (1992), o desgaste ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra. Definido ainda por Ludema (1981), o desgaste pode acontecer como a perda de material ou dano superficial.

Segundo Jost (1990), a ciência que estuda o desgaste é a tribologia. A palavra tribologia vem da palavra grega tribos que significa “esfregar, atritar, friccionar” e logos que significa estudo, obtendo uma tradução que significa estudo do atrito ou a ciência que estuda o atrito. Tribologia abraça a investigação científica de todos os tipos de atrito, lubrificação e desgaste e também a aplicação técnica do conhecimento tribológico.

Segundo Burwell e Strang (1952), o desgaste pode ser classificado de acordo com a figura 1.

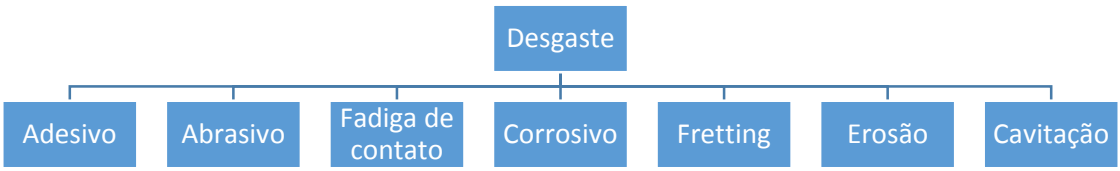


Figura 1 - Fluxograma de desgaste. (Adaptado Burwell e Strang, 1952)

De acordo com a DIN 50320 (1979), quatro mecanismos básicos de desgaste ou combinações deles estão envolvidos no processo de desgaste:

a) Adesão: Formação e quebra de ligações adesivas interfaciais.

b) Abrasão: Remoção de material devido ao riscamento.

c) Fadiga de contato: Fadiga e formação de fissuras em regiões superficiais, devido a ciclos de tensão tribológicas, que resultam na separação do material.

d) Reação Triboquímica: A formação de produto de reação química como um resultado das interações entre os elementos de um tribossistema iniciado por ação tribológica.

Na grande maioria, os problemas industriais de desgaste estão associados ao desgaste por abrasão. Frauches-Santos (2014) descreve o desgaste abrasivo como um fenômeno complexo, que gera perda de matéria e resulta em gastos expressivos na indústria.

2.1.1 Desgaste por abrasão

No desgaste abrasivo definido por Hutchings (1992), o material é removido ou deslocado de uma superfície por partículas duras, ou algumas vezes por protuberâncias duras em um contra corpo, forçado contra e deslizando junto a superfície.

A abrasão pode ser classificada levando em consideração o número de corpos envolvidos; abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (figura 2). Também citado por Hutchings (1992), o desgaste a dois corpos é causado pela ação de saliências duras em uma contra face, enquanto no desgaste a três corpos as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as superfícies em deslizamento.

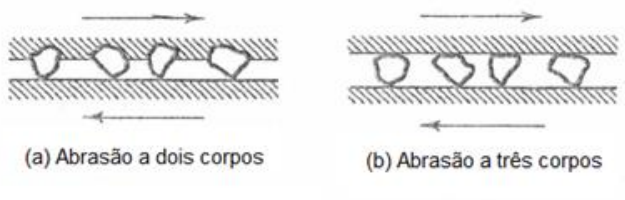


Figura 2 - Ilustração das diferenças entre (a) abrasão a dois corpos e (b) abrasão a três corpos. (Adaptado de Hutchings, 1992)

2.1.1.1 Ensaio por microabrasão

A microabrasão definido por Rutherford e Hutchings (1997) é um ensaio de desgaste em escala micrométrica, onde o princípio de funcionamento do mesmo consiste em utilizar uma máquina de teste do tipo esfera livre, empregando uma esfera de aço duro posicionada sobre a amostra de teste na presença de uma lama abrasiva, que é gotejada na região de contato, é mostrado na figura 3.

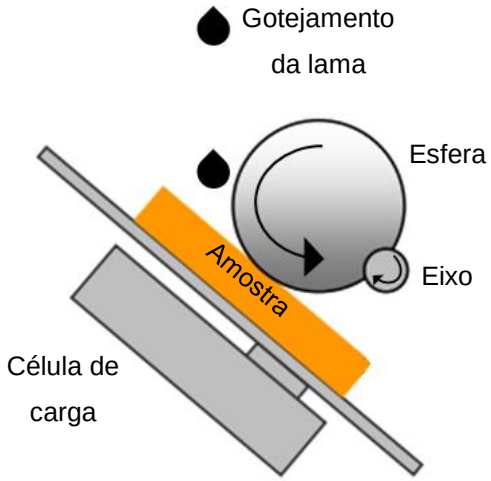


Figura 3 - Desenho esquemático do ensaio de microabrasão do tipo esfera livre (Adaptado de Araújo, 2007)

Segundo Araújo (2007) a esfera é movimentada pela rotação do eixo guia, a 150 rpm, sobre o qual a esfera é posicionada, ou seja, a velocidade de deslizamento da esfera sobre a amostra é determinada pela velocidade de rotação do eixo que suporta a esfera

A rotação da esfera de encontro amostra na presença do fluido abrasivo produz uma cratera (desgaste) com uma geometria esférica na superfície do material. Para Rutherford e Hutchings (1997), para materiais homogêneos o desgaste abrasivo equivale à equação de Archard de desgaste por deslizamento, segundo a equação 1 e 2 representada a seguir:

$$SN = \frac{V}{k} \approx \frac{1}{k}\left(\frac{\pi b^4}{32D}\right) \quad (1)$$

Onde:

$$V = \frac{\pi b^4}{32D} \quad (2)$$

S – Distância percorrida
N – Força normal
V – Volume desgastado
k – Coeficiente de desgaste
b – Diâmetro da calota de impressão
D – Diâmetro da esfera

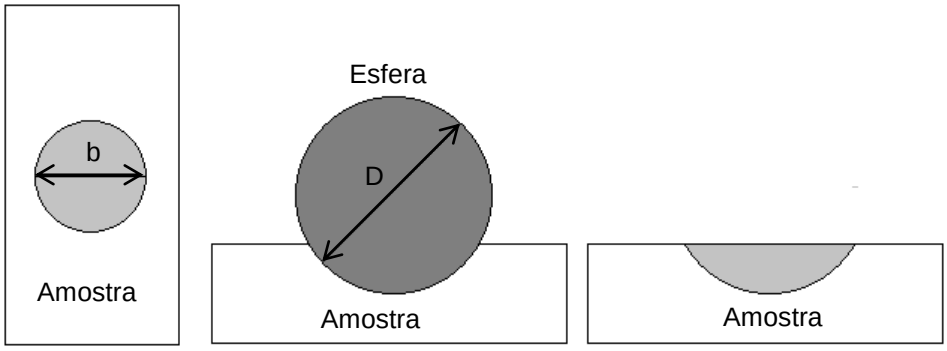


Figura 4 – Esquemático da calota de impressão na amostra (Adaptado Marques, 2011).

A figura 4 mostra o esquemático da calota de impressão ocasionada pelo desgaste no ensaio por esfera livre. Onde S é a distância total deslizada pela esfera em relação à superfície da amostra, N é a força normal entre esfera e amostra, V é o volume de desgaste, k é o coeficiente de desgaste, o símbolo D representa o diâmetro da esfera, e b é o diâmetro da calota desgastada. O k mede a severidade do desgaste, onde quanto maior for o valor de k maior será o volume desgastado, podendo-se dizer que o coeficiente de desgaste pode ser interpretado como o volume de material desgastado por unidade de força e por unidade de distância percorrida.

De acordo com Cozza, Suzuki e Schön (2014) e Cozza (2006) quando a relação entre o coeficiente de desgaste e a distância de deslizamento é caracterizada por um

desgaste constante, diz-se que o processo de desgaste atingiu o regime permanente. Os pontos utilizados para o cálculo do valor de k devem pertencer à região de regime permanente.

No início do ensaio, segundo Zeferino (2007), a área da cratera é relativamente pequena, logo a pressão de contato tende a ser maior. Com o andamento do ensaio, a área aumenta e consequentemente a pressão diminui, já que a pressão normal permanece constante. Não existe uma padronização de distância de deslizamento ou tempo de ensaio para que o processo atinja o regime permanente. A obtenção do regime permanente depende principalmente do material do corpo de prova e da esfera de ensaio, além da força normal, dureza, forma e tamanho das partículas abrasivas, concentração do fluido abrasivo e sua vazão no contato do corpo de prova com a esfera.

Até que o regime permanente não tenha sido atingido, segundo Cozza (2006), a relação do coeficiente de desgaste com o tempo de ensaio apresenta um crescimento não linear. Desconhecem-se literaturas que abordam esse assunto especificamente.

2.1.2 Micromecanismos De Desgaste Abrasivo

Os mecanismos de desgaste abrasivo para os metais podem ocorrer por deformação plástica, em casos de materiais dúcteis, e por fratura frágil, em casos de materiais frágeis.

De acordo com Gahr (1987), os micromecanismos relacionados a materiais dúcteis (deformação plástica) podem ser classificados como microsulcamento, formação de proa e microcorte. Quando a caracterização do micromecanismo se dá por fratura frágil (materiais frágeis), será classificada como microtrincamento. A figura 5 ilustra esses micromecanismos.

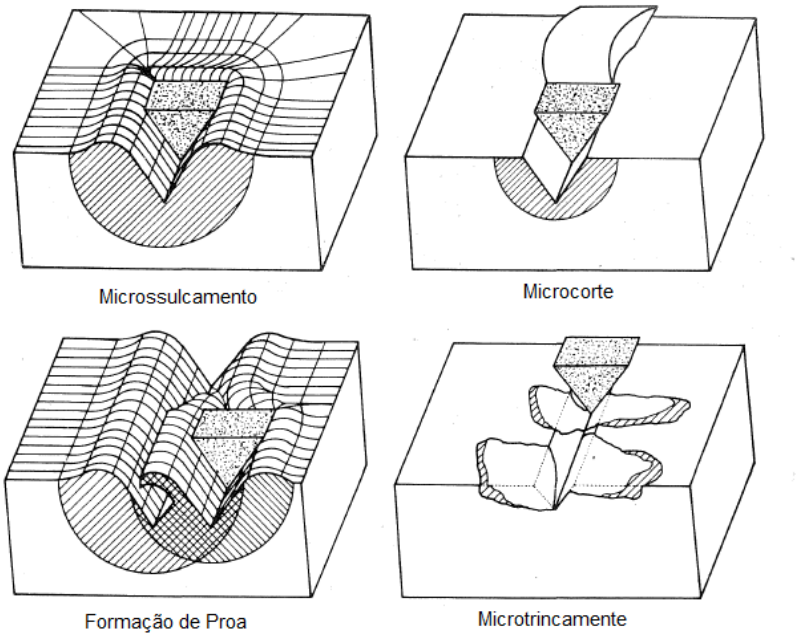


Figura 5 - Micromecanismos de desgaste (Adaptado Gahr, 1987)

No caso dos polímeros, segundo Hutchings (1992), se o contra corpo é liso o desgaste resulta da adesão entre as superfícies e envolve deformação apenas na camada superficial do polímero. Por outro lado, se o contra corpo é rugoso, então suas asperezas causarão deformação no polímero em certa profundidade e o desgaste resulta da abrasão associada com a deformação plástica do polímero ou do crescimento de trincas por fadiga na região de deformação.

2.1.3 Propriedades Da Partícula

As propriedades com maior relevância no estudo das taxas de desgaste são: a dureza da partícula, o formato e o tamanho.

2.1.3.1 Dureza da partícula

A dureza da partícula envolvida na abrasão tem influência direta nas taxas de desgaste. Para partículas significantemente duras, comparado com a superfície, o valor exato da dureza não é relevante. Hutchings (1992) cita que a taxa de desgaste torna-se muito inferior para a relação entre a dureza da partícula (H_a) e a dureza da

superfície (H_s) quando essa razão (H_a / H_s) é menor que 1, como mostrado na figura 6.

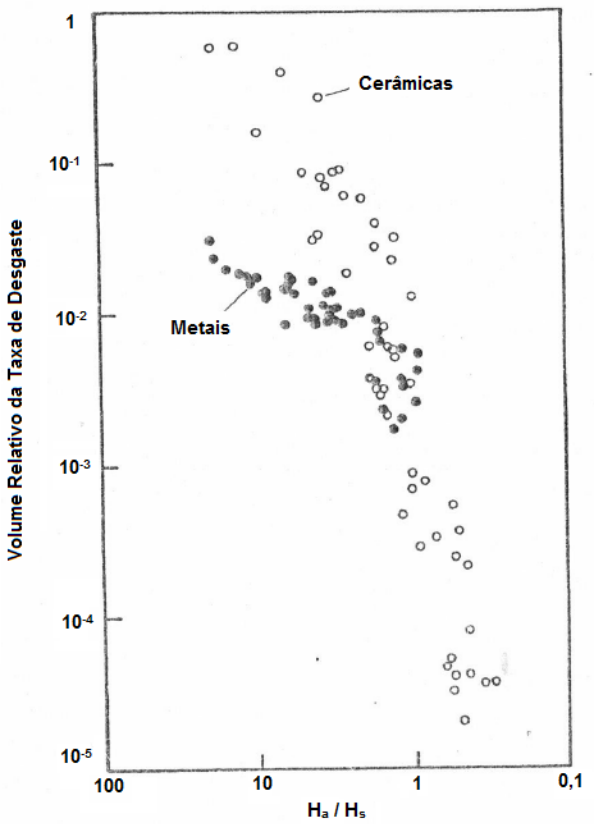


Figura 6 - Relação entre o Volume relativo da taxa de desgaste e a razão H_a / H_s. (Adaptado Hutchings, 1992)

Se a região superficial do corpo se deforma plasticamente, então seu limite de escoamento (Y) foi excedido. Segundo Hutchings (1992), a deformação plástica será considerável na superfície quando a pressão média de contato com a partícula atingir 3Y, que representa o valor da dureza do material da superfície e independerá da forma da partícula.

Em partículas esféricas pressionada contra uma superfície plana, a pressão máxima de contato é cerca de 0,8 vezes a dureza do material da partícula. Logo, espera-se que uma esfera com dureza H_a cause endentação na superfície. Um resultado análogo é obtido experimentalmente para outras geometrias, onde o grão abrasivo de qualquer geometria poderá causar riscamento somente se H_a / H_s > 1,2. Abrasão sob condições onde H_a / H_s < 1,2 é denominada como abrasão suave, em contraste com a abrasão severa (H_a / H_s > 1,2), mostrada na figura 7.

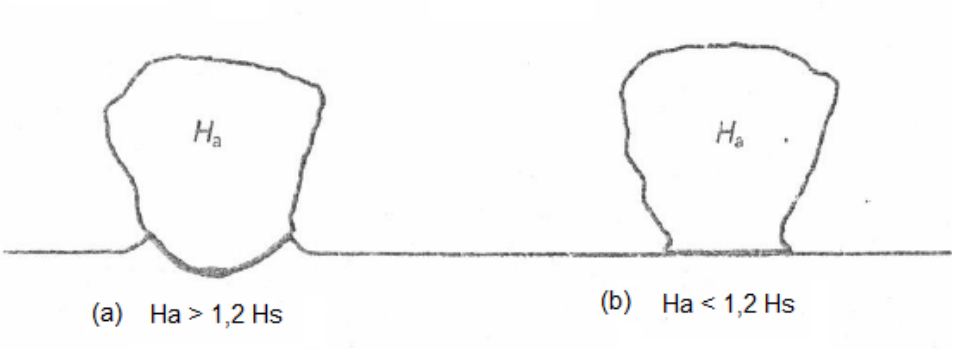


Figura 7 - Contato entre a partícula e a superfície, para (a) abrasão severa e (b) abrasão suave. (Adaptado Hutchings, 1992)

Comparados com metais e cerâmicas, os polímeros exibem menores coeficientes de atrito, com valores normalmente entre 0,1 e 0,5. Dessa forma, os polímeros são muitas vezes usados em aplicações tribológicas sem lubrificação, usualmente deslizando contra corpos mais duros. Quando se compara o desgaste entre cerâmicas e metais observam-se muitas semelhanças, entretanto quando se fala em micromecanismos de desgaste, a fratura frágil de destaca em materiais cerâmicos e se faz essencialmente ausente em metais, segundo Hutchings (1992).

A figura 8 correlaciona os diversos materiais de acordo com a sua resistência ao desgaste abrasivo em função da sua dureza. Para Gahr (1987), o teste de desgaste em uma grande variedade de materiais mostrou que a resistência ao desgaste abrasivo aumentou com o aumento da dureza dos materiais. A figura mostra que a dureza é uma propriedade muito importante para previsão do comportamento do desgaste abrasivo de diferentes metais puros, cerâmicos e polímeros.

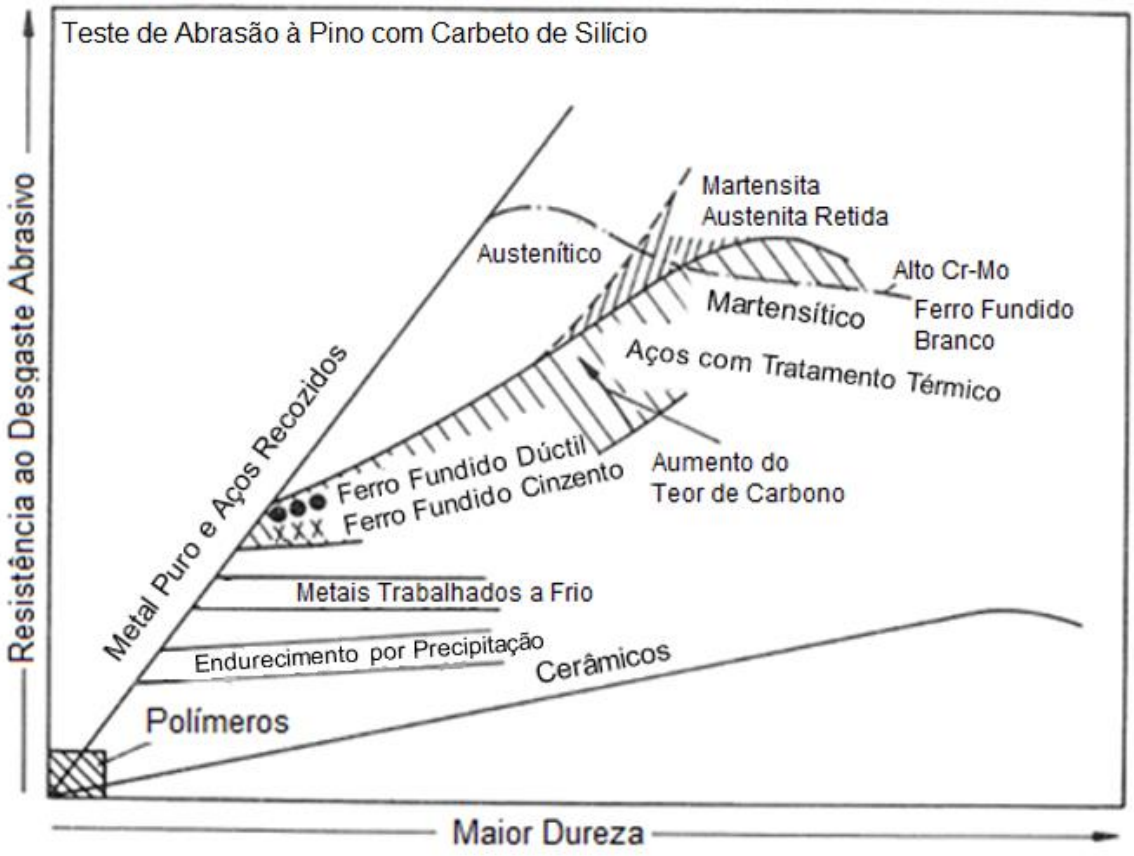


Figura 8 - Gráfico da relação entre a resistência ao desgaste abrasivo de diversos materiais em um teste de abrasão à pino como uma função da dureza do material. (Adaptado Gahr, 1987)

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DO PETRÓLEO

De acordo com Rosa (2006), os reservatórios de petróleo, em sua descoberta, possuem certa quantidade de energia, denominados energia primária. Durante o processo de produção há uma dissipação da energia primária, causada pela descompressão dos fluidos do reservatório e pelas resistências encontradas pelos mesmos ao fluírem em direção aos poços de produção. A quantidade de óleo retirada de um reservatório unicamente por meio de suas energias naturais é denominada de recuperação primária.

Também citado por Rosa (2006), após a exaustão dessa energia natural, os reservatórios retêm grandes quantidades de petróleo, sendo necessária uma suplementação da energia primária com energia secundária, artificialmente transferida para o reservatório ou por meios de tornar a energia primaria mais eficiente, com a finalidade de proporcionar a obtenção de uma quantidade adicional

de óleo, além daquela já produzida. Essa operação denomina-se recuperação secundária.

As primeiras experiências tinham como objetivo fornecer pressão ao reservatório, por meio da injeção de um fluido, com a finalidade de deslocar o fluido residente nos meios porosos e ocupar o espaço deixado por eles. Thomas (2001) cita como o aspecto mais crítico do fluxo dos fluidos nos meios porosos é a baixa pressão, a injeção de fluidos para o deslocamento de outros fluidos geralmente não apresentava sucesso. O resultado da análise do comportamento dos meios porosos sujeitos a injeção de fluidos, surgiram diversos processos conhecidos atualmente e tem como objetivo o aumento da eficiência de recuperação e aceleração da produção.

Segundo Thomas (2001), os métodos de recuperação atualmente recebem sua denominação de acordo com a natureza do processo. Assim, a recuperação primária é a produção gerada pela energia natural do reservatório. A recuperação secundária é a designação para a injeção de água ou injeção de gás. Esse processo de injeção de água ou gás é de elevada confiabilidade e recebe o nome de métodos convencionais de recuperação secundária. Para os demais processos mais complexos e com tecnologias que não estão satisfatoriamente desenvolvidas, são denominadas de métodos especiais de recuperação secundária.

2.2.1 Métodos Convencionais De Recuperação Secundária

De acordo com Thomas (2001), o método convencional de recuperação secundária é a denominação do processo de injeção de um fluido em um reservatório com a finalidade de deslocar o óleo para fora dos poros da rocha, ocupando o espaço deixado pelo fluido deslocado, buscando um comportamento puramente mecânico, sem qualquer interação química ou termodinâmica entre os fluidos ou os fluidos e a rocha. Os métodos convencionais utilizam injeção de água e processo não miscível de injeção de gás, denominados fluidos deslocante, para empurrar o óleo, fluido deslocado, para fora das rochas, sem se misturar ou interferir na rocha-reservatório.

2.2.1.1 Projetos De Injeção

Uma das etapas mais importante no projeto de injeção é a definição da maneira como os poços de petróleo serão distribuídos no campo de petróleo. O modelo escolhido deve proporcionar a maior produção possível de óleo durante um intervalo de tempo econômico e com menor volume de fluido injetado, deve obter boa produtividade resultando em vazões de produção atrativas economicamente e minimizar a quantidades de poços a serem perfurados, principalmente em um campo já desenvolvido, segundo Thomas (2001).

Os projetos devem estabelecer e especificar aspectos como quantidades e distribuição dos poços de injeção e produção, pressões e vazões de injeção, estimativa de vazões de produção e volumes de fluidos a serem injetados e produzidos.

Para Rosa (2006), os esquemas de injeção são divididos em dois grupos principais, sendo essa separação baseada na estrutura do reservatório e no modo como os poços são distribuídos.

2.2.1.2 Fluidos Injetados

Com Base em Thomas (2001), nos processos convencionais de recuperação, utiliza-se a água e o gás natural como fluidos de injeção. A água utilizada para a injeção pode ter quatro origens:

1) Água subterrânea, coletada em mananciais de subsuperfície por meio de poços perfurados para esse fim;

2) Água superficial, coletada em rios, lagos, etc.;

3) Água do mar;

4) Água produzida, que vem associada na produção do petróleo.

Geralmente, antes da injeção da água no reservatório, a mesma passa por um processo de tratamento para torna-la mais adequada.

O sistema de injeção de água começa com a captação da água, que pode ser originaria de umas das quatro fontes já citadas, por um sistema de tratamento da água para a injeção, o sistema de injeção da água composto por bombas, linhas e poços de injeção e sistema de tratamento e descarte de água produzida, como definido por Thomas (2001).

No caso da injeção de gás, são utilizados compressores para fornecimento de pressão e vazão necessária para o procedimento, diferenciando basicamente de outros sistemas e a existência de poços para injeção de gás.

2.3 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA INJEÇÃO EM POÇOS

Com base em Rosa (2006) e para que sejam respeitadas as diretrizes da política de segurança de informações da empresa, será preservado neste trabalho o nome da mesma, endereço e itens aqui analisados. Os dados e variáveis referentes ao tratamento de água para a injeção em poços analisados foram cedidos pela empresa e o seu nome será descrito como “empresa X”.

A água de injeção apresenta características de acordo com as fontes de obtenção, favorecendo sua utilização, dentre elas destacam-se:

- Sólidos em suspensão;
- Salinidade total associada à distribuição catiônica dos sais;
- Presença de microrganismo;
- Presença de ânions potencialmente geradores de incrustações;

- Corrosividade associada ao teor de CO_2.

Alguns parâmetros devem ser monitorados no sistema de injeção de água, tais como:

a) Temperatura: Com o aumento da temperatura, eleva-se também o nível de corrosão, pois todas as reações envolvidas são aceleradas.

b) Velocidade: Fluxos em condições de estagnação ou de baixas velocidades propiciam uma corrosão generalizada, favorecendo a formação de pites pela deposição de sólidos e o crescimento bacteriano. Em contrapartida a elevação das taxas de velocidade aceleram as reações controladas pela transferência de massa aumentando a taxa de corrosão. Se a velocidade for extremamente elevada os problemas serão relacionados à erosão ou corrosão-erosão.

c) Pressão: A influência da pressão se faz presente principalmente na existência de sistemas bifásicos (água - gás), onde o aumento da pressão provoca uma maior solubilidade dos gases aumentando consequentemente as taxas de corrosão.

d) Volume de Injeção: É um item que deve ser sempre controlado frequentemente para verificar se se a cota determinada pelo estudo de reservatório está sendo atendida.

e) Pressão de Injeção: Deve seguir requisitos do estudo do poço.

f) Óleos e Graxas: O óleo presente na água pode bloquear os espaços porosos nas rochas, pois essas frações de óleo formam borras ou fixam partículas inorgânicas nas paredes dos espaços porosos.

g) Bactérias: A presença de bactérias na água de injeção pode levar a diferentes problemas para a produção de petróleo como a corrosão influenciada por microrganismos (CIM), acidificação do reservatório e

plugueamento dos poços com comprometimento da qualidade do fluido ocasionado pelas altas concentrações de H_2S (Sulfeto de hidrogênio).

h) Sólidos Suspensos Totais (SST): Esse ensaio mede a quantidade de partículas inorgânicas (minerais e compostos) e orgânicos presentes na água de injeção.

Sabe-se que estas propriedades, podem também, influenciar diretamente na parte do desgaste por partículas duras. Podendo assim, acelerar o processo abrasivo de forma individualmente, ou aumentando a severidade do desgaste corrosivo combinado ao desgaste abrasivo.

2.3.1 Unidade De Tratamento De Água

Antes da injeção da água em poços injetores para ampliar a produção de óleo, a água segue uma linha de tratamento como representado na figura 9.

Figura 9 - Fluxograma da unidade de tratamento de água

Segundo Rosa (2006), a água produzida é direcionada para o tanque flotador, onde o óleo separado é descarregado na caixa *American Petroleum Institute* (API) retornando em seguida para o processo de tratamento. A água do flotador com Teor de óleo e graxas (TOG) no máximo de 20 mg/L é enviada para o tanque pulmão. Do tanque pulmão a água oleosa é bombeada para sistema de filtração para separação dos sólidos insolúveis. Após passar pelo processo de filtração a água filtrada é direcionada para o tanque pulmão de injeção. As bombas de injeção succionam a água tratada do tanque e reinjetam em poços de injeção através de linhas tronco e *manifolds* de injeção.

Além do tratamento representado no fluxograma, são adicionados produtos químicos (inibidor de corrosão, floculante, inibidor de incrustação e biocida) para auxiliar no tratamento da água.

2.4 TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Empregam-se hoje em dia uma grande variedade de materiais aplicados na fabricação de tubos. Para Telles (2001), as principais classificações de tubos são: tubos metálicos (ferrosos e não-ferrosos), tubos de aço com revestimento interno, tubos não-metálicos (Materiais plásticos, cerâmicas, elastômeros, cimento-amianto, entre outros).

Segundo Telles (2001) existem quatro processos de fabricação de tubos (figura 10). Tubos sem costuras podem ser fabricados por meio de processos de laminação, para aços-carbono, aços-liga e aços inoxidáveis, por extrusão, para tubos de aço de pequeno diâmetro (abaixo de 80 mm), alumínio, cobre, latão, chumbo e metais não-ferrosos, e por fundição, para tubos de ferro fundido, alguns aços especiais não-forjáveis e materiais não-metálicos como concreto, cimento-amianto e barro-vidrado. Os tubos com costuras são fabricados por processo de fabricação por solda para aços-carbono, aços-liga, aços inoxidáveis e ferro forjado.

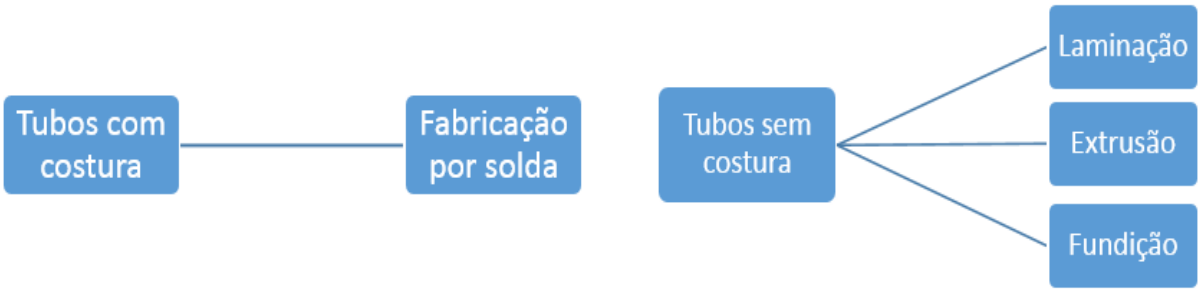


Figura 10 - Processo de fabricação de tubos (Adaptado Telles, 2001)

Atualmente, o principal material utilizado em tubulações da indústria petrolífera é o aço carbono. Em algumas aplicações específicas a utilização de tubos compósitos não-metálicos, como o polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) fabricado por processo de filamento contínuo, vem aumentando e ganhando espaço.

2.4.1 Tubos de aço carbono

Para Telles (2001), entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, facilidade na soldagem e conformação, além de ser encontrado facilmente no mercado.

Entre os processos de fabricação de tubos por laminação, o mais importante é o processo “*Mannesmann*” (Figura 11).

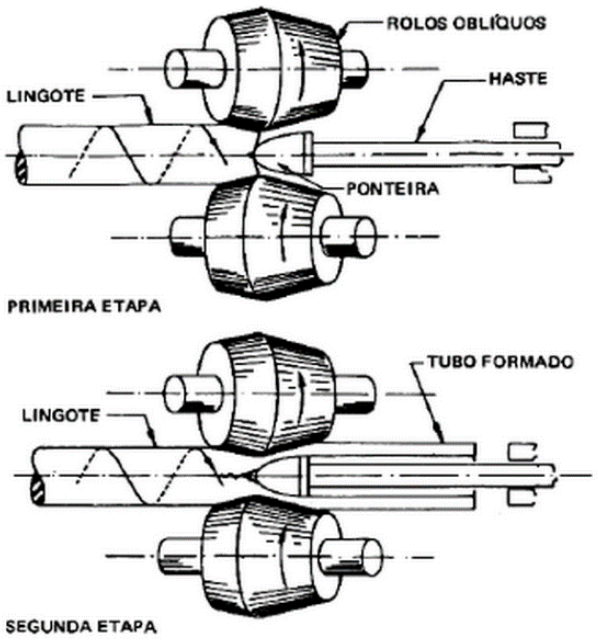


Figura 11 - Fabricação de tubos por laminação - *Mannesmann*. (Adaptado Telles ,2001)

Segundo Telles (2001), o processo se resume em:

- Aquecimento a 1200 ºC do lingote cilíndrico de diâmetro externo aproximadamente igual do tubo, e é levado aos laminadores oblíquos.

- Esse laminador oblíquo, tem dois rolos de cone duplo, cujo eixos fazem, entre si, um pequeno ângulo. O lingote é colocado entre dois rolos, que o prensam fortemente e lhe imprime, ao mesmo tempo, um movimento helicoidal de rotação e translação.

- O movimento de translação resulta em uma força que faz com que o lingote se movimente contra uma ponteira cônica, que se encontra entre os rolos. A ponteira abre um furo no centro do lingote, formando um tubo, alisando continuamente a superfície interna recém-formada.

- O tubo formado nas operações anteriores tem parede muito grossa. A ponteira é retirada e o tubo (ainda quente) é levado para um segundo laminador oblíquo, que possui uma ponteira de diâmetro maior, afinando consequentemente as paredes do tubo, aumentando o comprimento e ajustando o comprimento externo.

- Depois de duas passagens em laminadores oblíquos, o tubo está bastante empenado, passando em uma ou duas máquinas de rolos desempenadoras.

- O tubo passa por uma série de operações de calibragem dos diâmetros externo e interno, e alisamento das superfícies internas e externas. Essas operações são feitas em várias passagens em laminadores com mandris e laminadores calibradores.

2.4.2 Tubos de ERFV

Os materiais poliméricos são atualmente o grupo de mais importante dos materiais não metálicos utilizados em tubulações industriais, sendo substituto de aços inoxidáveis e metais não ferrosos. Segundo Telles (2001), de modo geral os plásticos apresentam as seguintes características: baixa densidade, alta resistência à corrosão, custo inferior comparado a outros materiais de resistência a corrosão (aços inoxidáveis, liga de níquel, titânio, etc.).

De acordo com Callister (2006), dentre as razões em que a fibra de vidro é popular como material de reforço como fibra está: é facilmente estirado na forma de fibras de alta resistência a partir do seu estado fundido, pode ser usado em técnicas de fabricação de compósitos, se dentro de uma matriz de plástico produz um compósito

de resistência especifica muito alta e em determinadas associações com plásticos forma um compósito útil em aplicações de ambientes corrosivo.

O epóxi é um material termoestável, muito usado para tubo, com extremidades lisas ou com flanges integrais, segundo Telles (2001). Essa matriz é a mais comum para compósitos avançados e para uma grande variedade de aplicações. Epóxis têm sido amplamente utilizados, devido às suas excelentes propriedades, tais como uma adesão excelente, elevada resistência, boa resistência à corrosão, baixa retração e uma versatilidade no processamento, segundo Hoa (2009). Um dos processos de fabricação de tubos compósitos de epóxi reforçado com fibra de vidro é o enrolamento de filamentos.

Callister (2006) define o enrolamento de filamentos como um processo onde as fibras de reforço (fibra de vidro) são posicionadas de uma forma precisa, de acordo com padrões pré-determinados para compor uma forma oca (geralmente cilíndrica). No processo de enrolamento de filamentos (figura 12), as fibras na forma de fios individuais ou na forma de mechas, são primeiro alimentados através de um banho de resina (epóxi) e em seguidas enroladas continuamente ao redor de um mandril, em geral, utilizando equipamentos de enrolamento automático.

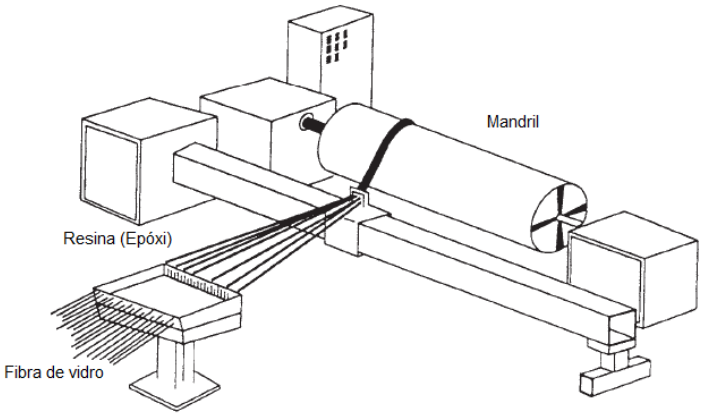


Figura 12 – Representação do processo de enrolamento de filamentos. (Adaptado Hoa, 2009)

Após o número apropriado de camadas terem sido aplicadas, a cura é realizada em um forno ou em temperatura ambiente. Posteriormente a esse procedimento, o mandril é removido e o tubo acabado é armazenado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Amostras de um tubo de aço carbono API 5L, grau B, PSL-1, sem costura e de um tubo de epóxi reforçado com fibra de vidro foram cedidas pela empresa X do ramo petroquímico. As amostras utilizadas terão dimensões de 30 x 10 X 3 mm.

A composição química das amostras metálicas foi cedida pelo fabricante, segundo especificação na tabela 1. A composição química da amostra de epóxi reforçado com fibra de vidro não foi cedida pelo fabricante.

Tabela 1 - Composição química (%) do aço API 5L, grau B utilizadas no ensaio.

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Al
0,18	1,13	0,016	0,005	0,19	0,01	0,04	0,01	0,006	0,004	0,002	0,020

A tabela 2 mostra a composição do aço segundo a norma API, para tubos de grau B.

Tabela 2 - Composição química (%) segundo a norma API do aço API 5L, grau B, PSL 1.

C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cu (máx.)	Ni (máx.)	Cr (máx.)	Mo (máx.)
0,28	1,20	0,03	0,03	0,50	0,50	0,50	0,15

Fonte: Adaptado Pipesystem, 2014.

3.1.1 Preparação Das Amostras

As amostras de aço foram preparadas manualmente no IFES, campus São Mateus, no laboratório de Fabricação Mecânica.

3.1.1.1 Amostras De Aço

Inicialmente um segmento foi retirado de uma tubulação de aço utilizando uma serra-fita, em seguida esse segmento foi novamente cortado com um arco de serra, retirando uma amostra de 30,0 x 10,0 x 7,6 mm. As amostras foram novamente serradas com o arco de serra, a fim de diminuir a sua espessura. Todo procedimento de corte foi efetuado com fluido de refrigeração alimentado manualmente.

Posteriormente ao processo de corte, as amostras foram lixadas primeiramente com lixa para metal de grana com 80 mesh, passando para lixas d'água com 220, 600, 800 e 1200 mesh. O processo de acabamento terminou com o polimento das amostras na politriz da marca Risitec com solução de alumina, com granulometria de 1 μm, atingindo as dimensões de 30 x 10 x 3 mm (Figura 13).

A superfície interna da amostra sofreu lixamento e polimento superficial, somente para planificação e retirada de óxidos.

Figura 13 - Amostra de aço API 5L utilizada para o ensaio.

3.1.1.2 Amostras De ERFV

Um segmento de tubulação de ERFV foi retirado com auxílio de um arco de serra, posteriormente sendo efetuado um novo corte, extraindo uma amostra com dimensões de 30 x 10 x 12 mm. A amostra foi seccionada e lixada em sua superfície segmentada, diminuindo a espessura, atingindo as dimensões de 30 x 10 x 3 mm (figura 14).

Figura 14 - Amostra de ERFV utilizada no ensaio.

A amostra manteve as características superficiais interna da tubulação.

3.2 ENSAIO DE MICROABRASÃO

O ensaio de microabrasão foi realizado em um tribômetro de configuração esfera livre, do tipo *Calowear* (conforme figura 15) onde uma esfera de aço cromo é posicionada sobre a amostra. A esfera é rotacionada por um eixo motor, com rotação de 150 rpm, e rola sobre a amostra, na presença de um fluido abrasivo gotejando de 1 a 3 gotas por segundo, fixada em um suporte inclinado, na qual uma célula de carga mede instantaneamente a força normal exercida sobre o contato, entre a esfera e a amostra,

durante todo o teste. A esfera possui diâmetro de 25,4 mm (1 polegada), é fabricada em aço cromo (AISI 5120), com dureza de 335 HB.

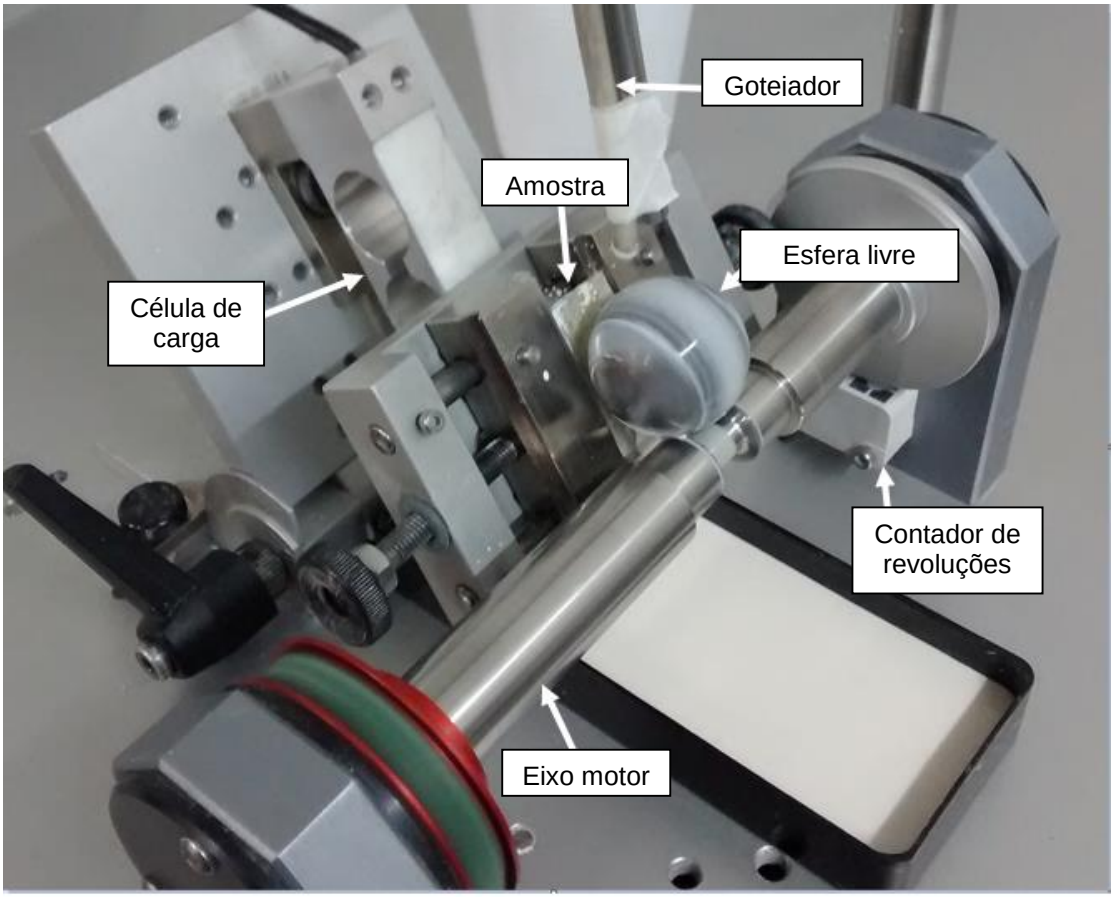


Figura 15 - Microabrasômetro Calowear de esfera livre

A carga utilizada para o ensaio foi de 0,22 N com velocidade de rotação de 157,4 rpm. Foi utilizado dois abrasivos, o carbeto de silício (SiC) e a Sílica (SiO_2), ambos na concentração de 0,75 g/ml, formando assim a lama abrasiva, gotejada na vazão de 1,4 gotas por segundo. Para manter a homogeneidade e evitar a sedimentação das partículas, o equipamento possui um agitador magnético (figura 14), para misturar continuamente a lama abrasiva, com uma velocidade de rotação de 650 rpm. Segundo HUTCHINGS, a dureza do carbeto de silício está compreendida entre 2600 a 2100 HV, enquanto a dureza da sílica tem valores entre 1200 e 750 HV.

A medição das impressões de desgaste é efetuada com o auxílio de um microscópio com fonte de iluminação, ligado diretamente a um computador, onde a imagem é transmitida e analisada em um software (figura 16 e 18). Antes de cada medição, as

amostras foram limpas em água corrente e secas com o auxílio de papel toalha, para melhor visualização das impressões.

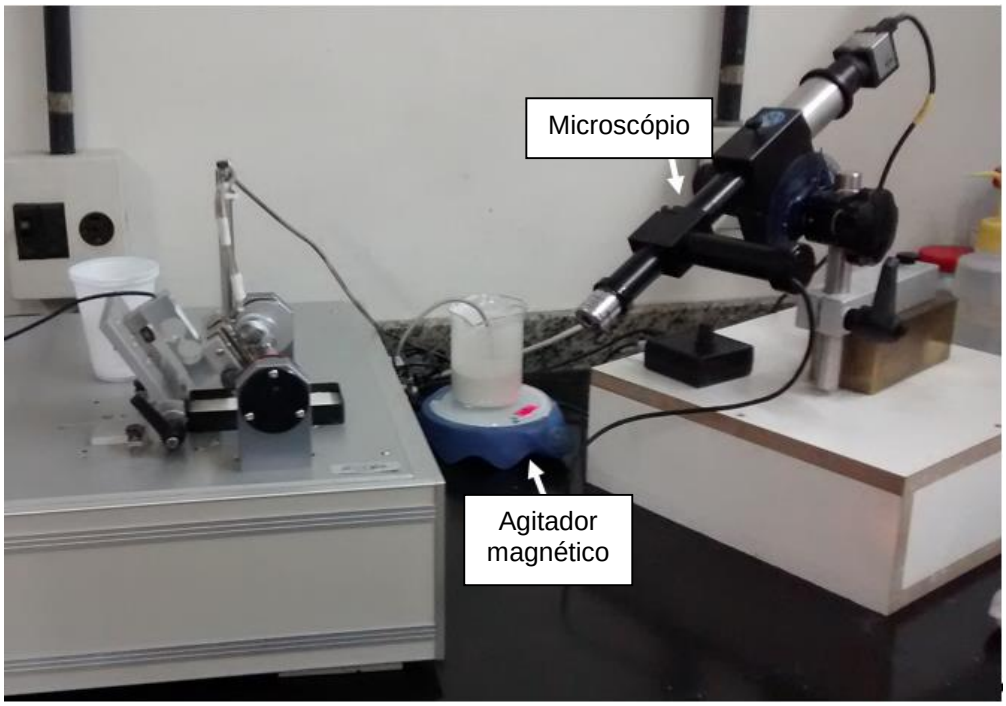


Figura 16 - Equipamento de microabrasão

Para melhor aproveitamento das amostras e agilizar os ensaios, os testes com tipos de abrasivo diferente foram efetuados na mesma amostra, respeitando uma distância mínima entre as calotas de impressão. Durante a substituição do fluido abrasivo, foi efetuada uma limpeza em todo o equipamento.

Somente a calota de impressão da amostra de ERFV com abrasivo a base de S_iC foi medido utilizando uma lupa, mostrada na figura 17.

Figura 17 - Lupa usada para medição da calota de impressão

Considerou-se que a região desgastada possui o mesmo perfil geométrico que a esfera, logo é possível determinar o volume desgastado pela equação (2). O coeficiente de desgaste (k) é calculado em função da geometria da calota desgastada, diâmetro da esfera livre, força normal (entre a esfera e a amostra) e distância percorrida, como apresentado na equação (1).

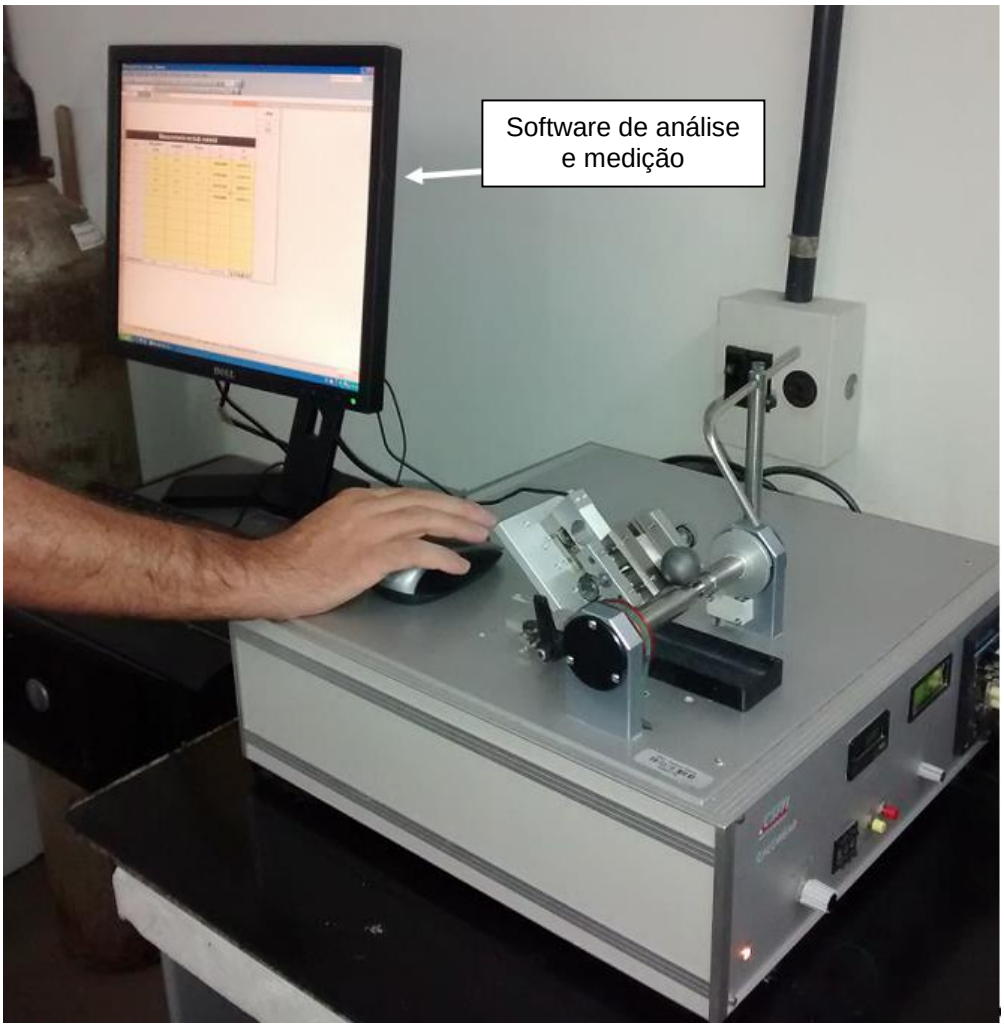


Figura 18 - Computador ligado ao microabrasômetro.

3.2.1 Parâmetros do ensaio de microabrasão

Os parâmetros utilizados no ensaio de microabrasão seguem na tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros do ensaio de microabrasão

	PARÂMETROS
Carga Normal	0,22 N
Ângulo de inclinação do suporte	60º
Velocidade de rotação do eixo	157.4 rpm
Abrasivo 1 – Carbeto de Silício (SiC)	Dureza: 2100 a 2600 HV
Abrasivo 2 – Sílica (SiO_2)	Dureza: 750 a 1200 HV
Concentração do abrasivo	0,75 g/ml
Gotejamento do Abrasivo	1,4 gotas por segundo
Quantidade de amostra	1 amostra: - Aço API 5l, grau B - ERFV

3.2.2 Caracterização Das Amostras

Não foi possível atender o planejamento como havia previsto para caracterização das amostras (microdureza, composição química e análise de micromecanimos por MEV), pois no IFES, campus de São Mateus não oferece equipamentos adequados para estes ensaios e o laboratório do campus Vitória necessitava de tempo disponível para efetuar os testes. Porém esta caracterização será realizada a *posteriore* a entrega deste trabalho.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 COEFICIENTE DE DESGASTE

A seguir constam as tabelas 4, 5, 6 e 7 com os coeficientes de desgaste para os materiais, aço API 5L e ERFV, para os diferentes abrasivos, SiO_2 e SiC.

Tabela 4 - Resultados para o aço API 5L, com o abrasivo a base de SiC.

Tempo (min)	**Nº De Voltas (eixo)**	**Ø Da Impressão *(µm)***	**Força *(N)***	**Distância Percorrida (S) *(mm)***	**Volume Desgastado *(mm³)***	**Coeficiente De Desgaste (K) *(m²/N)***
5	787	1573,68	0,22	34160,12	0,0237045	3,154E-12
15	2394	1889,52	0,22	103912,74	0,0492688	2,155E-12
30	4752	2138,87	0,22	206262,88	0,0808916	1,783E-12
45	7120	2269,09	0,22	309047,08	0,1024644	1,507E-12
60	9484	2415,96	0,22	411657,66	0,1316816	1,454E-12

Tabela 5 - Resultados para o aço API 5L, com o abrasivo a base de SiO_2.

Tempo (min)	**Nº De Voltas (eixo)**	**Ø Da Impressão *(µm)***	**Força *(N)***	**Distância Percorrida (S) *(mm)***	**Volume Desgastado *(mm³)***	**Coeficiente De Desgaste (K) *(m²/N)***
5	787	1069,44	0,22	34160,12	0,00505582	6,727E-13
15	2397	1313,25	0,22	104042,95	0,01149624	5,023E-13
30	4763	1465,63	0,22	206740,34	0,01783461	3,921E-13
45	7126	1590,30	0,22	309307,51	0,02472193	3,633E-13
60	9486	1717,75	0,22	411744,47	0,03365162	3,715E-13

A tabela 6 apresenta o resultado do ensaio para a amostra de ERFV com partículas abrasivas a base de SiC. Devido à calota de impressão possuir um diâmetro com dimensão superior ao diâmetro máximo de medição do equipamento, impossibilitou a continuação do ensaio. A medição da sua calota foi efetuada, posteriormente, com o auxílio de uma lupa graduada.

Tabela 6 - Resultado para ERFV, com abrasivo a base de SiC

Tempo (min)	Nº De Voltas (eixo)	Ø Da Impressão *(µm)*	Força *(N)*	Distância Percorrida (S) *(mm)*	Volume Desgastado *(mm³)*	Coeficiente De Desgaste (K) *(m²/N)*
5	787	3240,00	0,22	34160,12	0,42593783	5,668E-11

Tabela 7 - Resultados para ERFV, com abrasivo a base de SiO_2

Tempo (min)	Nº De Voltas (eixo)	Ø Da Impressão *(µm)*	Força *N*	Distância Percorrida (S) *(mm)*	Volume Desgastado *mm³*	Coeficiente De Desgaste (K) *m²/N*
5	787	1476,71	0,22	34160,120	0,01824254	2,427E-12
15	2360	1936,62	0,22	102393,548	0,06188568	2,747E-12
30	4717	2188,74	0,22	204656,880	0,08692135	1,931E-12
45	7075	2460,26	0,22	307007,022	0,14033759	2,078E-12
60	9431	2662,51	0,22	411744,467	0,19022651	2,100E-12

A figura 19 exibe as fotos das amostras após o ensaio. Nota-se que na amostra de ERFV não é possível a visualização da calota de impressão, devido a propriedade de reflexão do material.

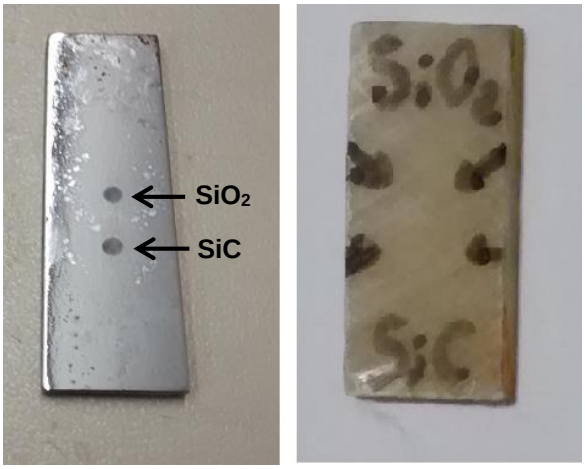


Figura 19 - Amostras depois do ensaio de microabrasão.

Assim como mostra os gráficos 1 e 2, baseado nas tabelas 4 e 5, o desgaste na amostra metálica com abrasivo a base de SiO_2 sofreu um desgaste inferior quando comparado a amostra metálica com abrasivo a base de SiC, podendo ser observado pela ordem de grandeza do coeficiente de desgaste.

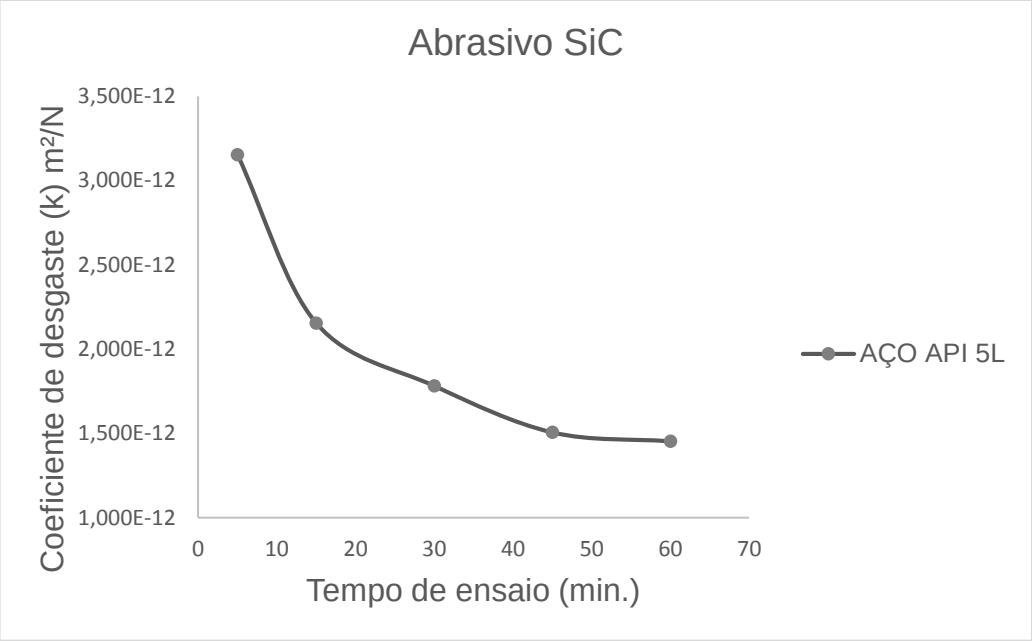


Gráfico 1 - Coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para amostra de aço API 5L com abrasivo a base de SiC

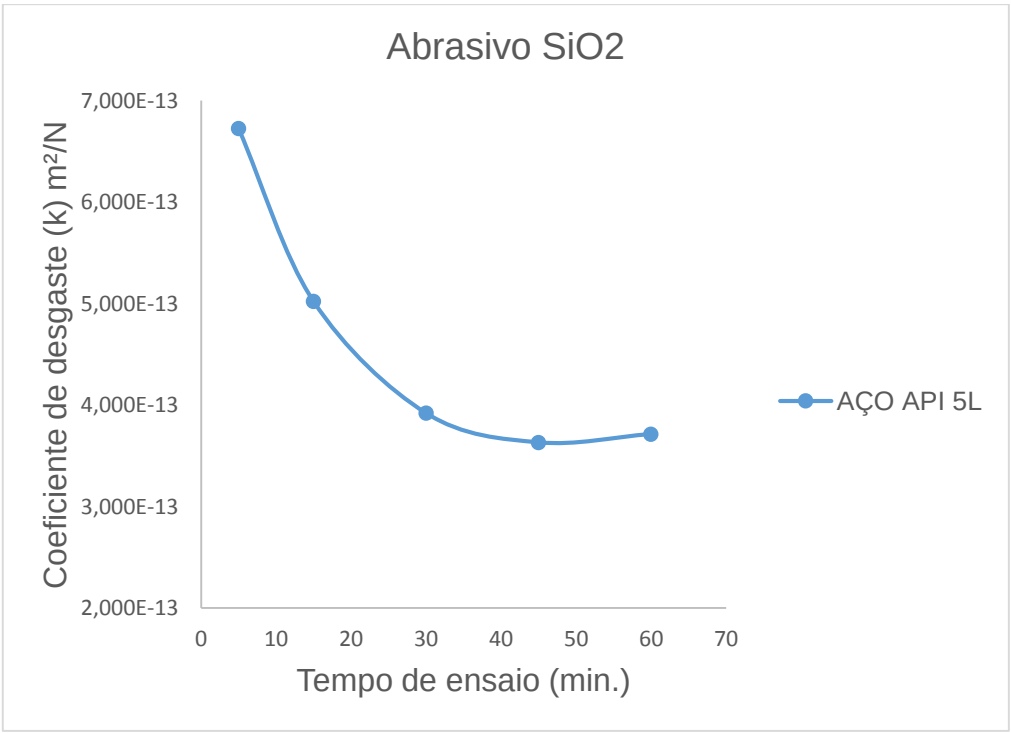


Gráfico 2 - Coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para as amostras de aço API 5L com abrasivo a base de S_iO_2

Como ilustrado no gráfico 3 e 4, com base nas tabelas 6 e 7, a amostra de ERFV com abrasivo a base de SiO_2 nos primeiros 5 minutos, o coeficiente de desgaste foi inferior

quando comparado ao coeficiente de desgaste da amostra de ERFV com abrasivo a base de SiC.

Para o gráfico 4, percebe-se que a curva que descreve o coeficiente de desgaste possui característica diferente da curva obtida para o aço API 5L, que pode ser explicado pela composição de duas fases no material, a fibra de vidro e o epóxi.

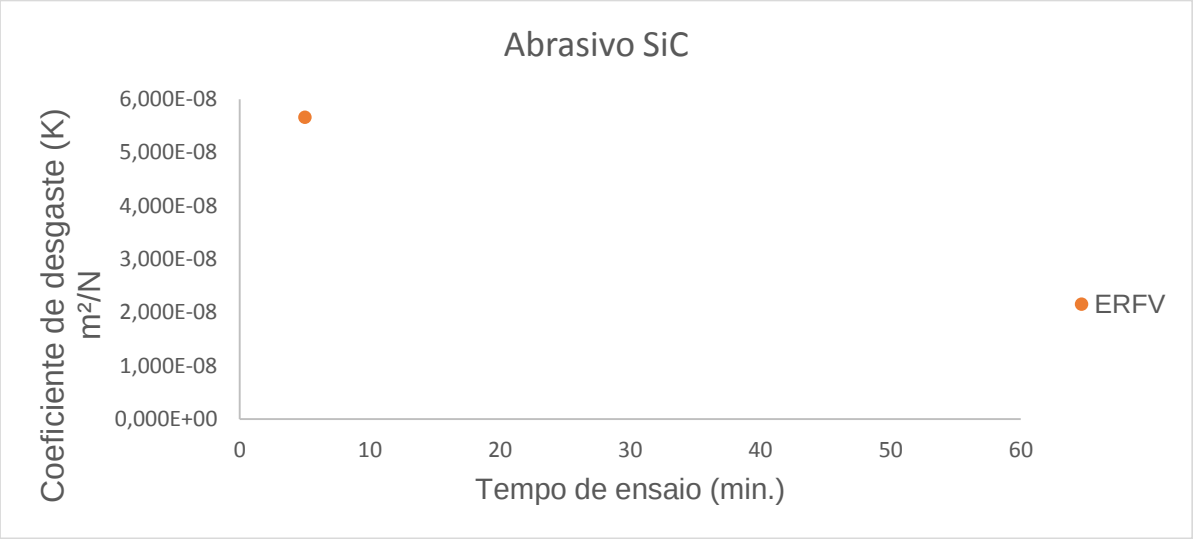


Gráfico 3 - Coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para a amostra de ERFV com abrasivo a base de SiC.

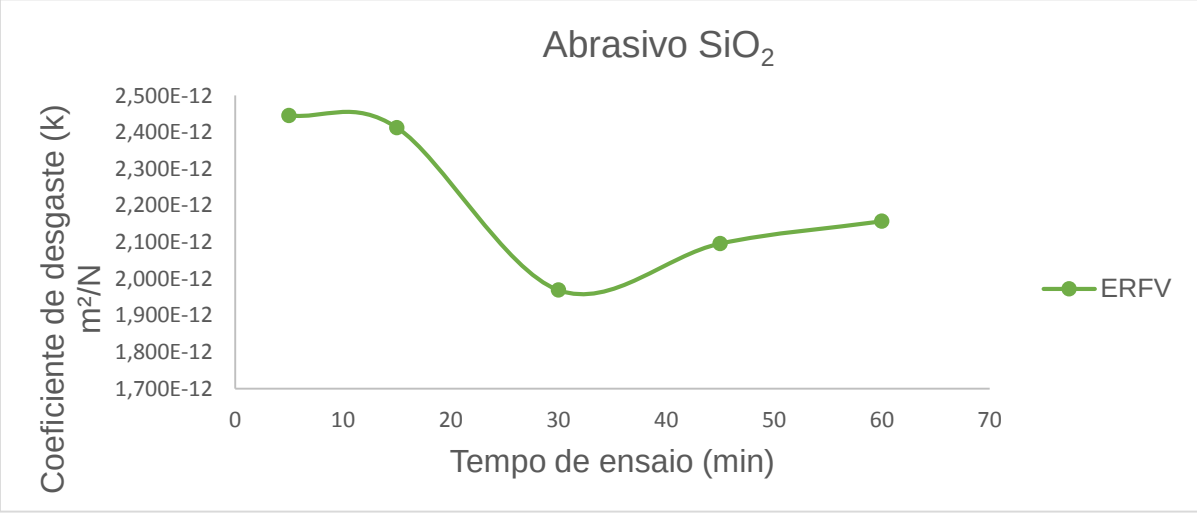


Gráfico 4 - Coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para a amostra de ERFV com abrasivo a base de SiO2.

Comparando os gráficos 1 e 3, o coeficiente de desgaste encontrado com uso de abrasivo à base de SiC, para a amostra de ERFV, foi muito superior a amostra do aço API 5L para os 5 minutos iniciais do ensaio.

Comparando os gráficos 2 e 4, observa-se um coeficiente de desgaste abrasivo maior com utilização de abrasivo a base de SiO_2 para a amostra de ERFV do que na amostra de aço API 5L.

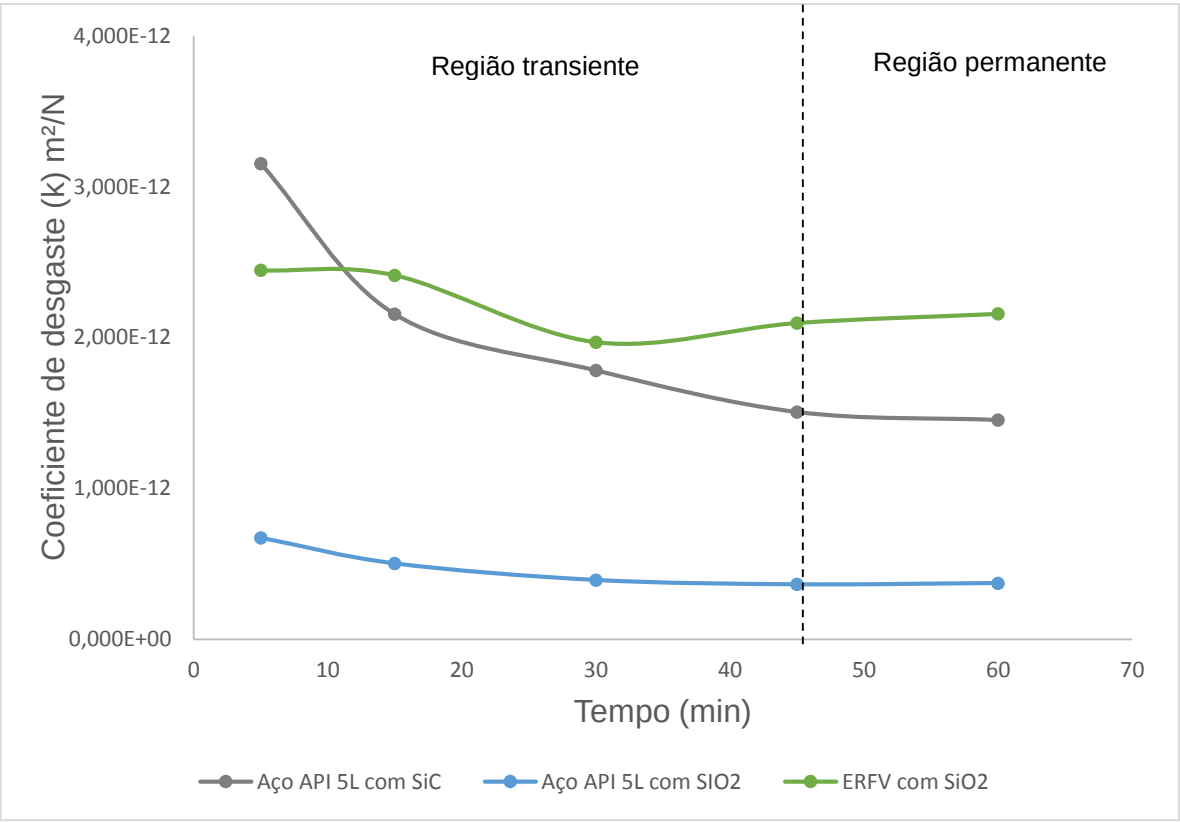


Gráfico 5 - Coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para as três amostras.

Observa-se um comportamento esperado das três curvas, conforme o gráfico 5, pois o valor de k diminui com o tempo e tende a estabilizar, encontrando um regime permanente.

Não foi possível plotar gráfico 3 junto com os gráficos 1, 2 e 4 pois o mesmo possui uma grande discrepância no coeficiente de desgaste em relação aos demais.

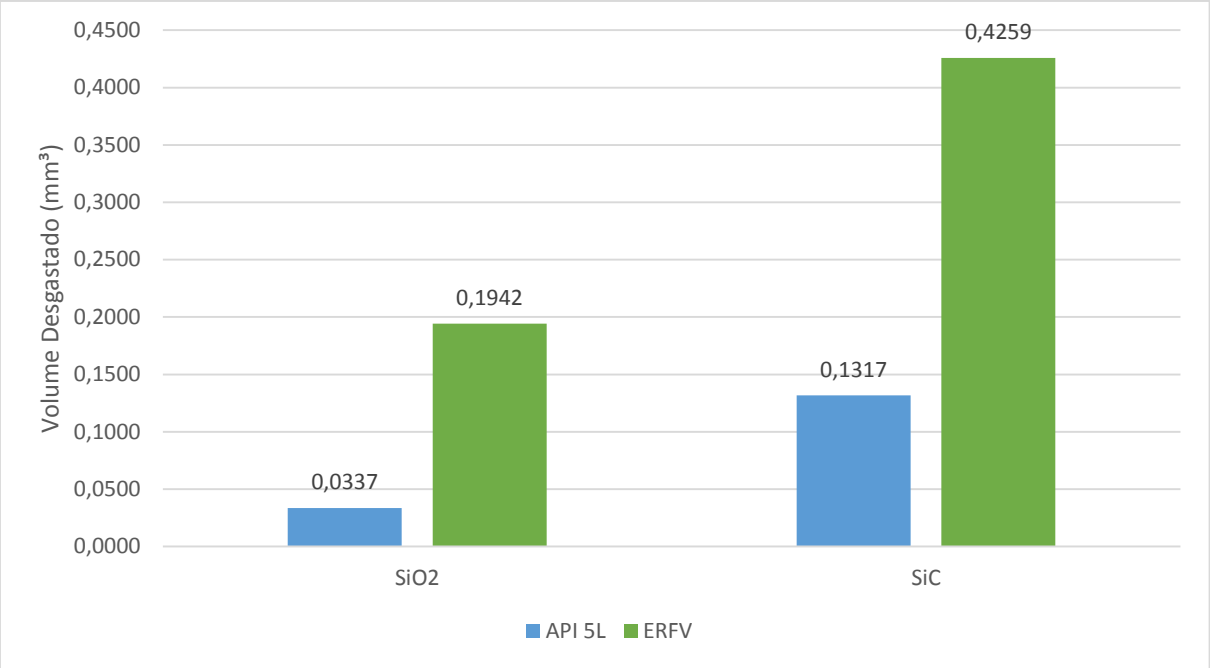


Gráfico 6 - Volume desgastado pela partícula abrasiva.

O gráfico 6 mostra o volume desgastado das amostras em relação com a dureza das partículas abrasivas utilizadas nos ensaios. Observa-se um maior volume desgastado nas amostras de ERFV do que no aço API 5L.

Ressalta-se que o volume desgastado da amostra de ERFV com lama abrasiva a base de SiC foi obtida nos 5 minutos iniciais do ensaio, não sendo possível a sua continuação devido a limitação do sistema de medição do tribômetro.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, chegamos as seguintes conclusões:

Percebemos que todos os materiais mostraram no coeficiente de desgaste duas regiões distintas, onde na primeira parte é observado que as propriedades do ensaio não estão completamente desenvolvidas (regime transiente) e a outra parte que demostra uma região de regime permanente. Esse comportamento é esperado, com base nas literaturas utilizadas.

De acordo com as literaturas e os resultados obtidos, comprova-se mais uma vez que o desgaste é proporcional à dureza da partícula.

O coeficiente de desgaste encontrado no teste de microabrasão com o uso do abrasivo a base de carbeto de silício foi maior em ambas as amostras, aço API 5L (1,454E-12 m²/N) e epóxi reforçado com fibra de vidro (5,668E-11 m²/N).

Considerando que a amostra de aço API 5L possui dureza superior a amostra de epóxi reforçado com fibra de vidro e que a amostra de aço API 5L obteve desgaste inferior a amostra de ERFV, os resultados encontrados estão em concordância com as literaturas.

O coeficiente de desgaste encontrado na amostra de ERFV com abrasivo a base de carbeto de silício (5,668E-11 m²/N) e a base de sílica (2,100E-12 m²/N) foi maior do que o encontrado na amostra de aço API 5L para os abrasivos a base de carbeto de silício (1,454E-12 m²/N) e a base de sílica (3,715E-13 m²/N).

A resistência ao desgaste abrasivo para os compósitos (baseado nas características dos polímeros) é inferior quando comparado aos materiais metálicos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Um trabalho futuro consiste em fazer análise dos micromecanismos de desgaste, levando em consideração a dureza e caracterização das amostras através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

- Análise dos mesmos materiais das tubulações associando apenas a corrosão envolvida como mecanismo de desgaste.

- Análise dos mesmos materiais das tubulações associando a corrosão e a abrasão como mecanismos de desgaste.

REFERÊNCIAS

ASTM – AMERICAN STANDART FOR TESTING MATERIALS. G40-01- Standard Terminology Relating to wear and Erosion. Annual Book of Standards Volume 03.02: Wear and Erosion. Metal Corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

BURWELL, J. T.; STRANG, C. D. On the empirical law of adhesive wear. **Journal of Applied Physics**, v. 23, n. 1, p. 18-28, jan. 1952. Disponível em: <http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/journal/jap/23/1/1.1701970.pdf?expires=1410880892&id=id&accname=2105461&checksum=EC4F4F5AB678C9424D35EF94D9F54A8B>. Acesso em: 09 de nov. de 2013

CALLISTER, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais:** uma abordagem integrada. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

COZZA, R. C.; SUZUKI, R. S.; SCHÖN, C. G. Projeto, construção e validação de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre para a medição do coeficiente de atrito. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 117-124, mar. 2014.

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo.** 2006. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DIN 50320. VerschleiB - Begriffe, Analyse von VerschleiBvorgangen, Gliederung des VerschleiBgebietes.Beuth Verlag, Berlin, 1979.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; OLIVEIRA, M. C. C. A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 293-309, 20 fev. 2013. Disponível em: < http: //www.uff.br /RVQ /index.php /rvq /article/ viewFile /490/422>. Acesso em: 13 de mar. de 2014.

GAHR, K-H. Z. **Microestruture and wear of materials**. Tribology series. v.10. Amsterdam: Elsevier, 1987.

HOA, S. V. **Principles of the Manufacturing of Composite Materials**. Pennsylvania: Destech Publications, Inc., 2009.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: friction and wear of engeneering materials. Londres: Edward Arnold, 1992.

JOST, H. P.; Tribology: origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1-17, fev. 1990.

LUDEMA, K. C. Selecting material for wear resistance. In: RHEE, S, K. et al. **Wear of materials.** Nova Iorque: ASME, 1981. p. 1-6.

MARQUES, F. et. al. Influence of heat treatments on the micro-abrasion wear resitance of a superduplex stainless steel. **Wear,** v. 271, n. 9-10, p. 1288-1294, 29 jul. 2011.

QUIMICA (%) e propriedades mecânicas: tubos mais utilizados. Ln Pipesystem o portal da hidráulica e sistemas de condução de fluidos.Disponível em: < http: // www.pipesystem.com.br / Artigos _ Tecnicos/Tubos_Aco/Quimica_Tubos/quimica_tubos.html>. Acesso em: 20 de maio de 2014.

ROSA, Adalberto José; CARVALHO, Renato de Souza; XAVIER, José Augusto Daniel. **Engenharia de reservatórios de petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS I. M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. **Jornal of Testing adn Evaluation**, *Filadélfia,* v. 25, n. 2, p. 250-260, mar. 1997.

TELLES, PEDRO C.S. **Tubulações industriais: Materiais, Projeto, Montagem.** 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

THOMAS, José Eduardo (Org.). **Fundamentos de engenharia do petróleo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

ZEFERINO, R. R. F. et al. Análise de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos sob força normal e pressão de contato constantes. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. 14. 2007, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica, 2007. p. 1-9. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/creem/2007/PDF/0218.PDF>. Acesso em: 17 de jun. de 2014.