

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE SUPERLIGAS DE COBALTO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA RETILÍNEA

Antônio César Bozzi¹, Luiz Carlos Bragatto Junior², Cherlio Scandian³

1-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
acessarbozzi@yahoo.com.br

2-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
luizbragatto@gmail.com

3-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
cherlio@hotmail.com

Palavras-chave: Superligas de cobalto, esclerometria retilínea, dureza ao risco, resistência ao desgaste, mecanismos de desgaste.

Resumo

Superligas de cobalto são utilizadas em muitas aplicações industriais devido à característica de manter suas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas. Três diferentes superligas de cobalto foram produzidas através do processo de fundição com composições químicas próximas às das ligas comerciais Stellite 6, Triballoy T-400, além de uma liga de Co-Cr-Fe, com composição próxima à da liga comercial Stellite 250.

A liga Co-Cr-Fe possui uma microestrutura basicamente monofásica de cobalto com cromo, molibdênio e ferro em solução sólida substitucional. A liga Stellite 6 possui uma microestrutura próxima à da eutética composta de uma solução sólida substitucional de cobalto contendo molibdênio, tungstênio e cromo além de carbonetos de cromo e tungstênio. A liga Triballoy T-400 possui uma microestrutura composta por fases Laves e solução sólida de cobalto com cromo, molibdênio, além de silício.

Para entender melhor o comportamento mecânico e tribológico dessas três superligas, foram realizados ensaios de esclerometria retilínea, a temperatura ambiente, utilizando-se um indentedor Rockwell C, com duas configurações distintas: uma de passe único, variando-se a carga normal, de 5 a 20N, e a velocidade de riscamento, de 0,01 mm/s a 1 mm/s; e outra com vários passes, de 1 a 15 passes, com a velocidade de riscamento constante de 0,1 mm/s e variando-se as cargas, de 5 a 100N. Nesses ensaios foram analisados a dureza ao risco, o fator f_{ab} , que avalia a relação entre a área do material deslocado para as bordas e a área do sulco do risco e, além disso, foram avaliadas as taxas de desgaste.

A superfície desgastada foi analisada através de perfilometria 3D e imagens de microscópio eletrônico de varredura para avaliar a taxa de desgaste e os mecanismos de desgaste predominantes em cada material. Em todas as três ligas o micromecanismo predominante foi o de microsulcamento. Na liga Co-Cr-Fe o mecanismo predominante foi dúctil em todas as configurações dos ensaios. Já nos ensaios com as ligas Stellite 6 e Triballoy T-400, as matrizes de cobalto apresentaram comportamento dúctil e as fases duras, carbonetos e fase Laves, apresentaram comportamento frágil, sendo fraturadas durante os ensaios.

Nas ligas Stellite 6 e Triballoy T-400, em ensaios com vários passes, foram observada a deformação plástica da matriz de cobalto, que desse modo, encobria os carbonetos e as fases Laves, respectivamente, e também uma mistura mecânica, devido a fratura excessiva dos carbonetos e das fases Laves que se misturaram com a matriz de solução sólida de cobalto.

A liga Co-Cr-Fe apresentou um comportamento inferior quanto à resistência ao desgaste, isto é, uma maior taxa de desgaste, e as ligas Stellite 6 e Triballoy T-400 apresentaram uma melhor resistência ao desgaste, com valores de taxa de desgaste semelhantes e menores do que a da liga Co-Cr-Fe.

1. Introdução

Componentes industriais são, geralmente, submetidos a processos severos e contínuos de desgaste. Se a perda de material não é adequadamente controlada, o componente pode falhar prematuramente, aumentando o custo do produto final [1]. Em busca de amenizar os efeitos do desgaste em materiais do setor industrial, em alguns componentes e situações específicas, são utilizadas ligas especiais como as da classe das superligas.

Superligas são ligas à base de níquel, ferro-níquel ou de cobalto geralmente utilizadas acima de 540° C [2]. Essas ligas podem ser fundidas, forjadas ou produzidas por metalurgia do pó [3]. Também podem ser depositadas por processos de soldagem (*hardfacing*) [4]. As características das superligas incluem propriedades tribológicas superiores; excelente resistência mecânica; resistência a fadiga e fluência; boa estabilidade superficial; estabilidade de fases a alta temperatura e alta resistência a oxidação e corrosão [3].

No caso das superligas de cobalto, podemos subdividi-las, em duas subclasses principais, denominadas Stellites e Triballoys. Nas Stellites, temos como principais elementos o cobalto, cromo e molibdênio e/ou tungstênio, além do carbono, que formará os carbonetos. Já, para as Triballoys, temos o cobalto, cromo, molibdênio e silício, com pouquíssima ou nenhuma presença de carbono, que assim propiciará a formação da fase Laves. Além dessas subclasses, podemos mencionar outra subclasse à parte, composta por cobalto, cromo e ferro como principais elementos.

Para que haja o entendimento de como o material se comporta quando submetido a um ambiente onde este estará sujeito ao processo de abrasão, é comum executar ensaios em laboratórios com o intuito de representar o que acontece no ambiente em que esses materiais trabalham. Um desses ensaios é o de esclerometria retilínea, que representa um evento monoabrasivo, onde um indentador de dimensões e formato conhecidos é forçado contra a superfície do material a uma determinada carga e risca essa superfície com uma determinada velocidade.

A resposta do material ao ensaio de abrasão depende, muitas vezes, de sua microestrutura. Muitos materiais que são sujeitos ao desgaste abrasivo possuem fases duras ou precipitados em uma matriz mais macia. Essas fases podem ser carbonetos ou fases intermetálicas que possuem uma dureza bastante elevada. A resposta desses materiais depende do tamanho da fase dura em relação à escala da deformação causada por cada partícula abrasiva individualmente. Essa escala de deformação pode ser descrita tanto pela largura quanto pela profundidade da indentação causada por cada partícula [5]. Isto está diretamente ligado a fração volumétrica da fase dura no material e também ao caminho

livre entre elas, podendo o material se comportar de forma homogênea ou heterogênea com o processo de desgaste.

A resposta do material ao processo abrasivo foi verificada através dos micromecanismos de desgaste e da taxa de desgaste [6,7].

Nesse trabalho foram realizados ensaios com um e vários passes no ensaio de esclerometria retilínea, já que em outros trabalhos [8,9], foi constatado que apenas um passe não representa a resposta real do material às condições de desgaste normalmente impostas em situações reais.

2. Materiais e métodos

Foram avaliadas três diferentes superligas de cobalto produzidas através do processo de fundição com composições químicas próximas às das ligas comerciais Stellite 6, Triballoy T-400, além de uma liga à base de Co-Cr-Fe com composição próxima à da liga Stellite 250. As composições das ligas encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Composição química das ligas estudadas

Liga	Porcentagem em peso de cada elemento						
	C	Co	Cr	Fe	W	Mo	Si
Co-Cr-Fe	0,22	47,7	29,8	19,1	0,18	0,33	0,96
Stellite 6	2,3	64,2	24,2	0,65	4,2	0,02	1,25
Triballoy T-400	0,17	57	8,5	0,76	0,13	29,4	3,36

A microestrutura da liga Co-Cr-Fe é composta de uma matriz de cobalto com átomos de cromo, molibdênio e ferro em solução sólida substitucional (Fig.1(a)), em dendritas de solidificação com grãos grosseiros, com algumas inclusões e precipitados. Na liga Stellite 6, podemos notar a presença da matriz de cobalto (cinza claro) e uma grande quantidade de carbonetos de cromo (cinza escuro). A fração volumétrica de carbonetos estimada na liga é de 38,7%, (Fig1(b)). Para a liga Triballoy T-400, a microestrutura mostra uma grande quantidade de fases Laves, em uma matriz dúctil de cobalto em solução sólida com a presença de alguns eutéticos lamelares formados por fase Laves alternadas com solução sólida de cobalto. A fração volumétrica de fases Laves estimada na liga é de 41,6%. (Fig.1(c)).

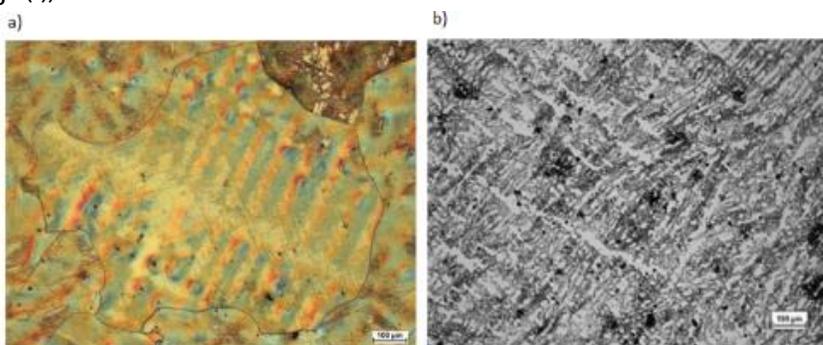


Figura 1. Microestrutura das ligas: a) Co-Cr-Fe, b) Stellite 6.



Figura 1. Microestrutura das ligas: c) Tribaloy T-400.

As durezas globais das amostras foram avaliadas com uma carga de 10 kgf. Para as ligas Stellite 6 e Tribaloy T-400, que apresentam carbonetos e fases Laves, respectivamente, foram avaliadas tanto a dureza na matriz como dos carbonetos e fases Laves. Essas durezas foram feitas utilizando cargas de 50 gramas para a matriz e os carbonetos da amostra de Stellite 6 e 100 gramas para a matriz e as fases Laves da amostra de Tribaloy T-400. As durezas estão apresentadas na Tabela 2

Tabela 2. Dureza Vickers das ligas estudadas.

Liga	Dureza Global (Hv)	Dureza da Matriz (Hv)	Dureza da Fase Dura (Hv)
Co-Cr-Fe	333 ± 5
Stellite 6	452 ± 5	340 ± 4	1220 ± 20
Tribaloy T-400	488 ± 14	341 ± 5	1056 ± 10

Os ensaios de esclerometria retilínea foram realizados no equipamento Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker, utilizando um indentedor Rockwell C com ponta de diamante de 200µm de raio de ponta e 120° de ângulo de ponta.

Com o intuito de estudar o efeito da velocidade de riscamento e da carga na resposta nas diferentes ligas, foram realizados ensaios com velocidades de riscamento de 0,01, 0,1 e 1 mm/s e cargas normais de 5, 10,5, 15 e 20 N.

Para melhor avaliar o comportamento abrasivo dessas ligas, também foram realizados ensaios com vários passes numa mesma trilha. Nesses ensaios, os riscos foram feitos sempre no mesmo sentido, ou seja, unidirecionalmente. Para isso, quando o indentedor atingia o fim do curso do primeiro risco, ele era suspenso e retornava à posição inicial para dar seguimento ao outro passe. Nesses ensaios, a velocidade utilizada foi de 0,1mm/s. A quantidade de passes foi de 1, 3, 5, 10 passes com cargas de 5, 10,5, 15, 20, 50, 100 N para as três ligas estudadas. Além disso, para a liga Stellite 6, foram realizados ensaios adicionais com 12 e 15 passes para as cargas de 50 e 100N.

Para todas as condições foram feitas três repetições, com comprimento dos riscos de 5 mm.

Após os ensaios, os riscos foram analisados no perfilômetro Talysurf CLI 1000 – 3D Surface Profiling Systems fabricado por Taylor Hobson Precision e foram feitas imagens no microscópio eletrônico de varredura EVO MA10, da Zeiss.

Nesses ensaios, foram avaliados a dureza ao risco, de acordo com a norma ASTM G171 [10], para um passe, além do fator f_{ab} [6], taxa de desgaste e mecanismos de desgaste.

3. Resultados

3.1. Ensaios com passe simples.

As figuras 2 (a), (b) e (c) apresentam a dureza ao risco [10], em função da carga aplicada e a velocidade de riscamento para as três ligas ensaiadas. Para a liga Co-Cr-Fe houve uma pequena tendência de aumento dos valores de dureza ao risco com o aumento da velocidade de riscamento, que sofreu aumentos de uma e duas ordens de grandeza. Isto também foi observado em trabalho anterior [11] em ensaios com aço carbono com diferentes velocidades de riscamento. Uma possível explicação para esse comportamento pode estar associada com a movimentação das discordâncias móveis, no qual o aumento da velocidade de riscamento não daria tempo dessas discordâncias se movimentarem, e estas atuariam como discordâncias travadas, produzindo assim certo aumento de resistência mecânica do material [12].

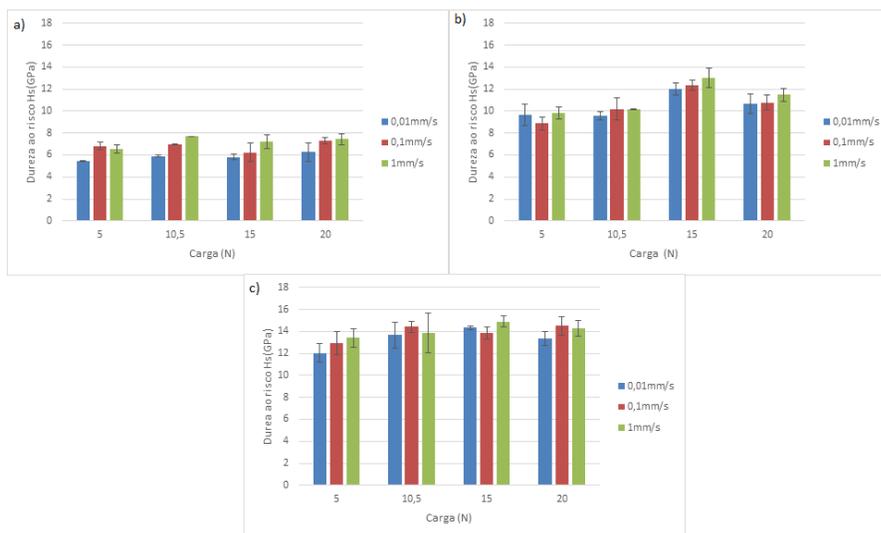


Figura 2. Dureza ao risco (Hs) em função da carga aplicada para diferentes velocidades de riscamento para: (a) Co-Cr-Fe, (b) Stellite 6 e (c) Tribaloy T-400.

Nas outras ligas, Stellite 6 e Triballoy T-400, não há uma correlação evidente do comportamento da dureza ao risco com a velocidade de riscamento. De um modo geral, a

liga Triballoy T-400 apresentou maiores valores de dureza ao risco, que está ligado com a maior dureza global desta liga, tabela 2.

Os valores de f_{ab} , figuras 3 (a), (b) e (c), para todas as três ligas não apresentaram uma correlação com a velocidade de riscamento. De um modo geral, observando-se os valores médios, todas as ligas apresentaram f_{ab} menor que 0,5, o que se traduz em um micromecanismo de desgaste predominante de microsulcamento. Os valores relativamente altos dos desvios padrões do parâmetro f_{ab} , no caso das ligas Stellite 6 e Triballoy T-400 podem ser explicados ao fato destas ligas não serem homogêneas, apresentando tanto fases duras como mais macias. Contudo, mesmo para a liga Co-Cr-Fe, que possui uma microestrutura homogênea, os valores de desvio padrão também foram altos.

Para confirmação dos micromecanismos de desgaste, foram feitas imagens de MEV, figuras 4 (a), (b), (c), (d), (e) e (f). As setas brancas indicam o sentido do riscamento. Podemos observar a formação de material deslocado para as laterais dos riscos em todas as ligas evidenciando a predominância do microsulcamento.

Nas figuras 4 ((c), (d), (e) e (f)) notamos a presença de microtrincamento nos carbonetos e nas fases Laves das ligas Stellite 6 e Triballoy T-400, respectivamente, por serem esses, bastante duros e frágeis. As setas pretas mostram regiões onde houve um estreitamento dos riscos, fato citado anteriormente, que altera o perfil médio dos riscos causando dificuldade para medição do fator f_{ab} , como consequência, aumentando o desvio padrão. Vale a pena observar que nessas regiões onde houve estreitamentos há uma diminuição do material deslocado para as laterais do risco, que resulta no aumento dos desvios padrão do fator f_{ab} .

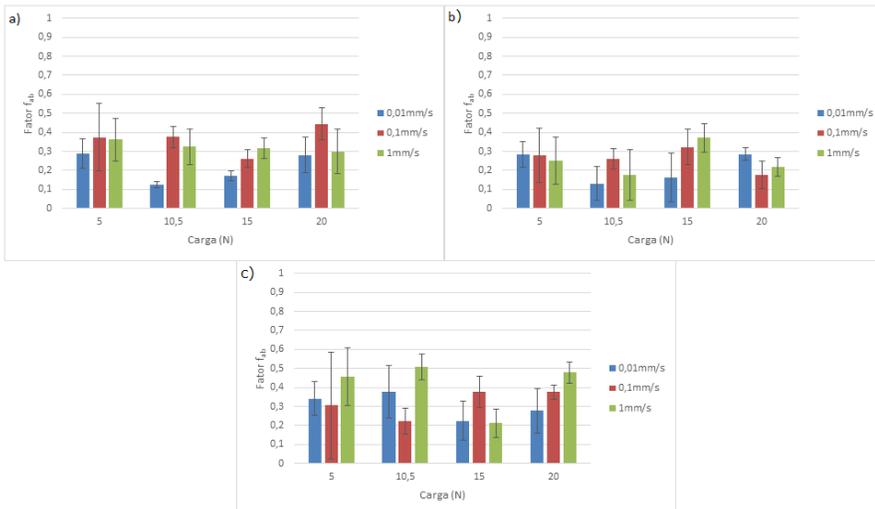


Figura 3. Fator f_{ab} em função da carga aplicada para diferentes velocidades de riscamento para as ligas: (a) Co-Cr-Fe, (b) Stellite 6 e (c) Triballoy T-400.

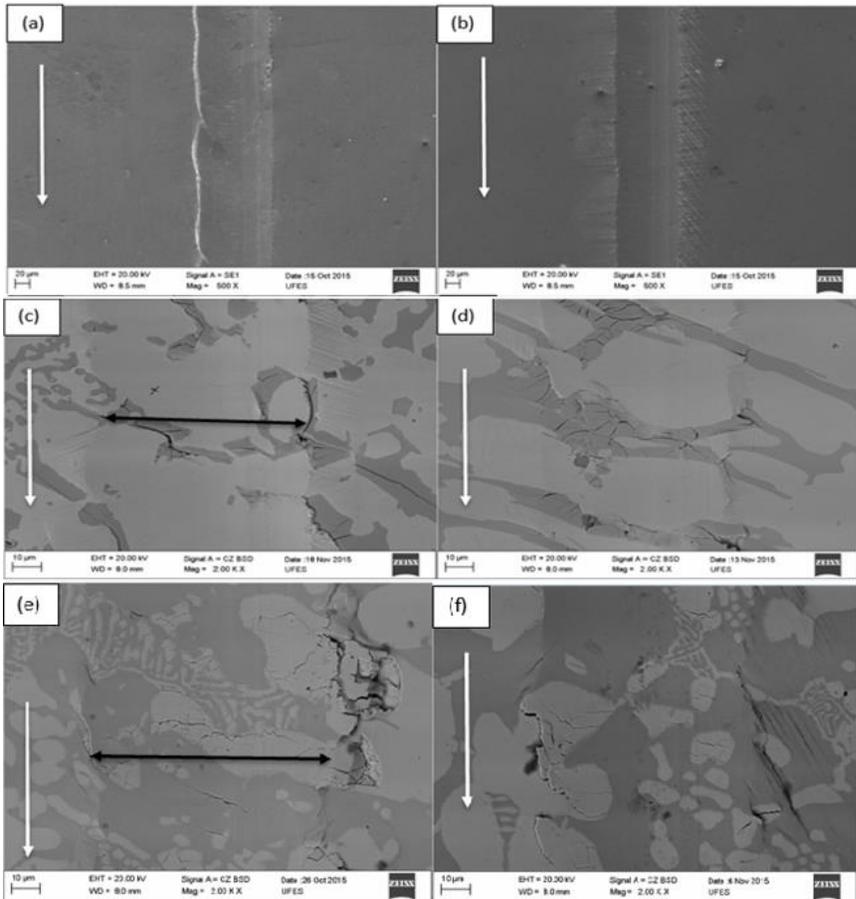


Figura 4. Imagens de MEV dos riscos (a) 20N a 0,1mm/s e (b) 10,5N a 0,01mm/s na liga Co-Cr-Fe, (c) 15N a 1mm/s e (d) 10,5N a 0,01mm/s na liga Stellite 6 e (e) 20N a 1mm/s e (f) 15N a 0,1mm/s na liga Tribaloy T-400.

3.2. Ensaio com vários passes

As Figuras 5 (a), (b) e (c) apresentam os resultados do fator f_{ab} em função da carga e do número de passes. Para todas as ligas, podemos observar que os valores de f_{ab} não apresentaram uma correlação com a carga. Seus valores, para todas as condições, estão abaixo de 0,5, o que indica a predominância do micromecanismo de microsulcamento. Há uma tendência a diminuição desses valores com o aumento do número de passes.

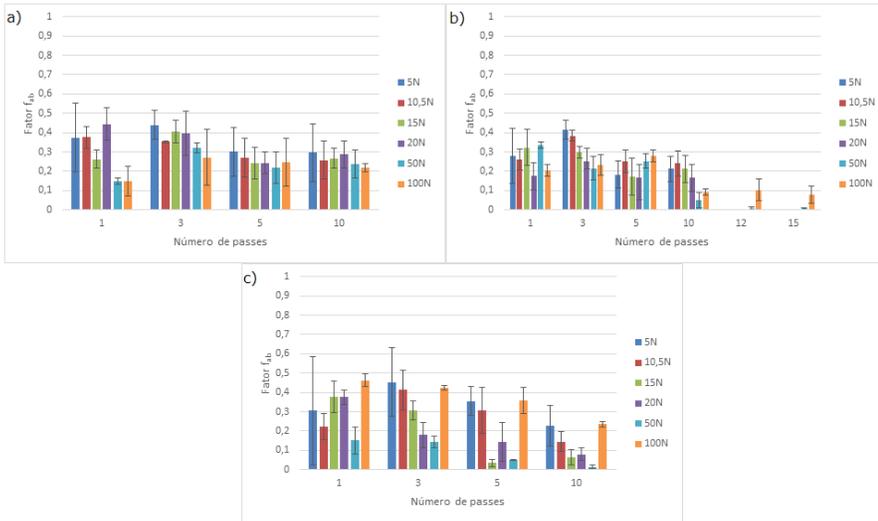


Figura 5. Fator f_{ab} em função da carga e do número de passes para as ligas: (a) Co-Cr-Fe, (b) Stellite 6 e (c) Tribaloy T-400.

Para a liga Co-Cr-Fe, as imagens de MEV, figuras 6 (a) e (b), mostram que com o aumento da carga e do número de passes, a quantidade de material deslocado para as laterais do risco aumentou, indicando maior predominância do micromecanismo de microsulcamento. Houve também um aumento na quantidade de bandas de deslizamento presente nas laterais do risco como mostrado na figura 6(a), para a carga de 10,5N com 1 passe e figura 6(b), para a carga de 20N com 10 passes. A seta branca indica o sentido de riscamento.

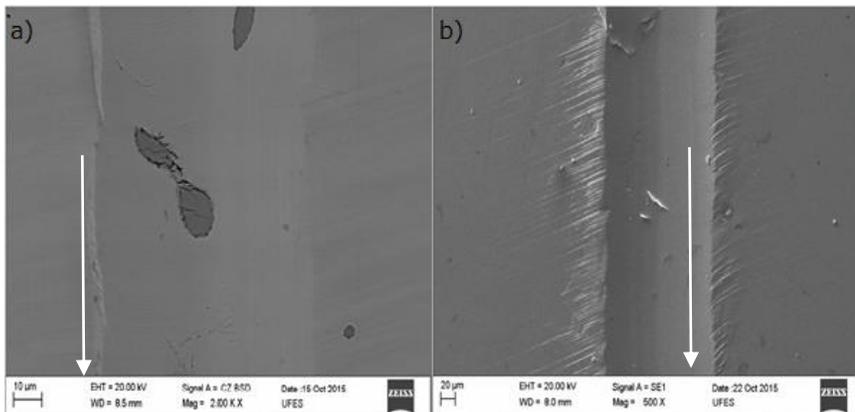


Figura 6. Imagens de MEV dos riscos: (a) 10,5N com 1 passe e (b) 20N com 10 passes, para a liga Co-Cr-Fe.

Para os ensaios com as cargas de 50 e 100N, há uma grande severidade no desgaste, como pode ser observado nas imagens de MEV, figuras 7 (a) e (b). Há um maior deslocamento de material para as laterais do risco com o aumento do número de passes e, também, uma maior formação de bandas de deslizamento nas laterais dos riscos com o aumento do número de passes, se comparado com as cargas menores. Além disso, podemos observar a formação de debris e a deformação plástica do material que é deslocado pelo riscamento encobrendo o material à frente (*smearing*).

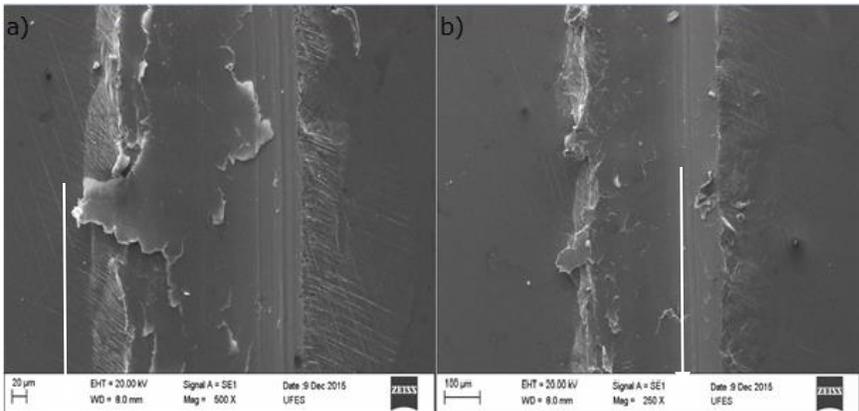


Figura 7. Imagens de MEV dos riscos: (a) 50N com 10 passes e (b) 100N com 10 passes, para a liga Co-Cr-Fe.

Para a liga Stellite 6, as imagens de MEV, figuras 8 (a) e (b), mostram o mesmo comportamento da liga anterior, ou seja, com o aumento da carga e do número de passes, há um aumento da quantidade de material deslocado para as laterais do risco, indicando maior predominância do micromecanismo de microsulcamento. Há também um aumento na quantidade de bandas de deslizamento presente nas laterais do risco, mas nesse caso, somente na matriz de cobalto (cinza claro). Já os carbonetos de cromo (cinza escuro) apresentaram trincamento, mesmo em cargas baixas, que foi ampliado com o aumento da carga e do número de passes. Essas trincas não se propagaram pela matriz ductil.

Para os ensaios com as cargas de 50 e 100N, podemos observar, figuras 9 (a) e (b), a alta severidade do desgaste com uma elevada quantidade de trincas dos carbonetos, não somente dentro do risco, mas também nas laterais desses. Com o aumento do número de passes, há um deslocamento de material devido a deformação plástica da matriz, cobrindo o material a frente. Para maiores números de passes, podemos observar um processo de mistura mecânica, onde os carbonetos estão extremamente fraturados e misturados a matriz.

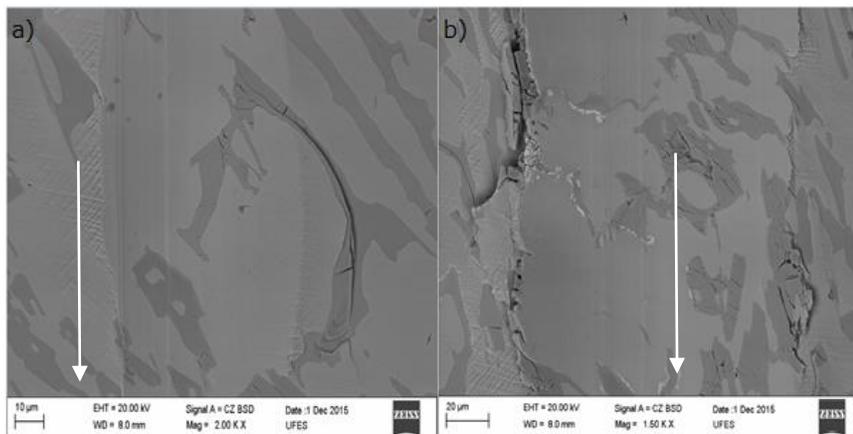


Figura 8. Imagens de MEV dos riscos: (a) 5N com 10 passes e (b) 20N com 10 passes, para a liga Stellite 6.

Para a liga Tribaloy T-400, as imagens de MEV, figuras 10 (a) e (b), mostram que, com o aumento da carga e do número de passes, houve um aumento da quantidade de material deslocado para as laterais do risco, indicando maior predominância do micromecanismo de microsculamento. A quantidade de bandas de deslizamento presente na matriz (cinza escuro) nas laterais do risco é menor devido a grande fração volumétrica de fases Laves (cinza claro) presente nessa liga. As fase Laves apresentaram trincamento, mesmo em cargas baixas, que foi aumentando com o aumento da carga e do número de passes. Pode-se observar também na figura 10 (a), que o ensaio com 10 passes e a carga de 5N foi muito suave, tornando muito difícil se identificar as dimensões do risco.

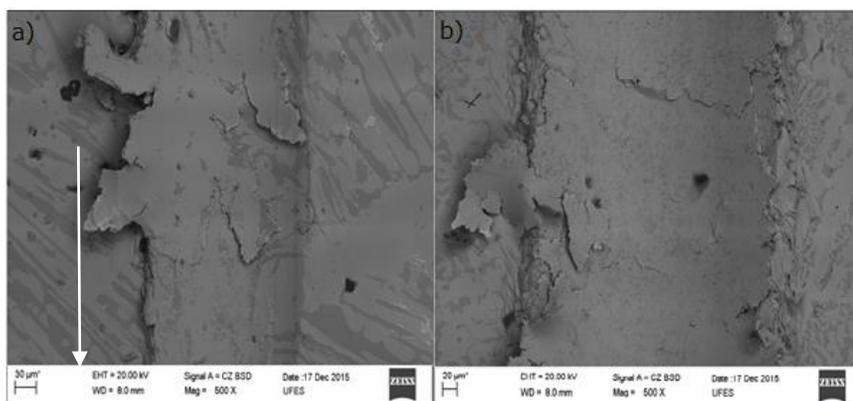


Figura 9. Imagens de MEV dos riscos: (a) 50N com 15 passes e (b) 100N com 15 passes, para a liga Stellite 6.

Para os ensaios com as cargas de 50 e 100N, figuras 11 (a) e (b), há uma grande severidade no desgaste, onde se observa que com poucos passes, já se obteve intensa formação de material deslocado para as bordas do risco, trincamento da fase Laves e formação de debris. Foi observado também, como nas ligas anteriores, a ocorrência de *smearing*, e além disso, a formação de uma mistura mecânica, como ocorrido com a liga Stellite 6.

Na figura 12 podemos observar o comportamento das ligas em termos da taxa de desgaste^[13] em função da carga e do número de passes. Não se observa uma correlação da taxa de desgaste com a carga. Contudo, podemos observar claramente a diminuição da taxa de desgaste com o aumento do número de passes. Para as ligas Stellite 6 e Tribaloy T-400, com o aumento do número de passes, essa taxa chega a ser desprezível, exceto para a carga de 100N, indicando a boa resistência ao desgaste dessas ligas. Essas ligas apresentaram os menores valores de taxa de desgaste e estes foram semelhantes, exceto para a carga de 100N onde a liga Stellite 6 obteve um comportamento muito melhor.

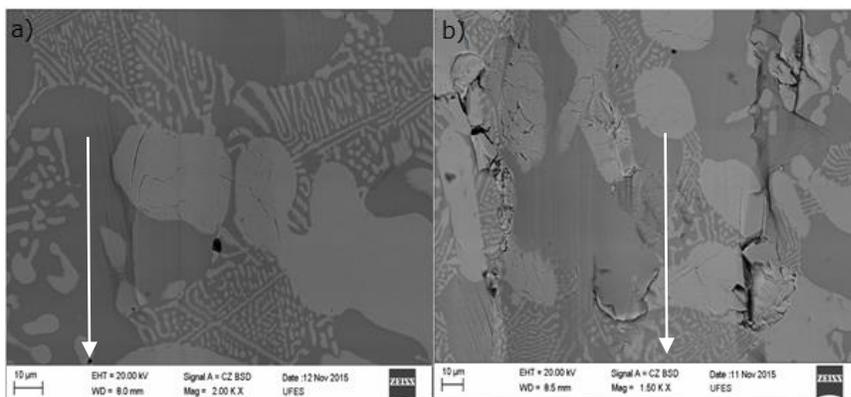


Figura 10. Imagens de MEV dos riscos: (a) 5N com 10 passes e (b) 20N com 10 passes, para a liga Tribaloy T-400.

4. Discussão

4.1. Liga Co-Cr-Fe

Mesmo com cargas elevadas e um grande número de passes, o material não perdeu sua capacidade de deformação plástica devido ao não aparecimento de trincas. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por Xu, Zwaag e Xu [14] que, em seu trabalho, estudaram ligas com durezas e capacidades de deformação diferente, entre os quais um aço TWIP, que é um aço austenítico com grande quantidade de manganês e alta capacidade de encruamento devido á formação de maclas por deformação plástica. Foram realizados ensaios de esclerometria retilínea com vários passes e várias cargas, onde um indentador de maior raio e ângulo de ponta efetuava os vários passes com as cargas determinadas, encruando o material, e outro indentador de menor ângulo e raio de ponta efetuava somente um risco, dentro desses riscos feitos com o indentador maior, com uma pequena carga. Dentre as ligas estudadas, o aço TWIP, não apresentou sinais de esgotamento plástico com o aumento da carga e da quantidade de passes. Nas outras

ligas, nos quais foi atingida a suas capacidades de deformação plástica ocorreram trincas. Isto sugere uma alta capacidade de deformação plástica de liga Co-Cr-Fe.

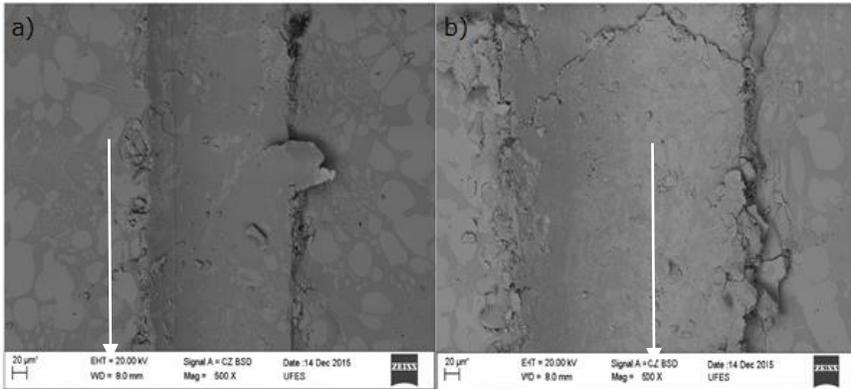


Figura 11. Imagens de MEV dos riscos: (a) 50N com 10 passes e (b) 100N com 10 passes, para a liga Tribaloy T-400.

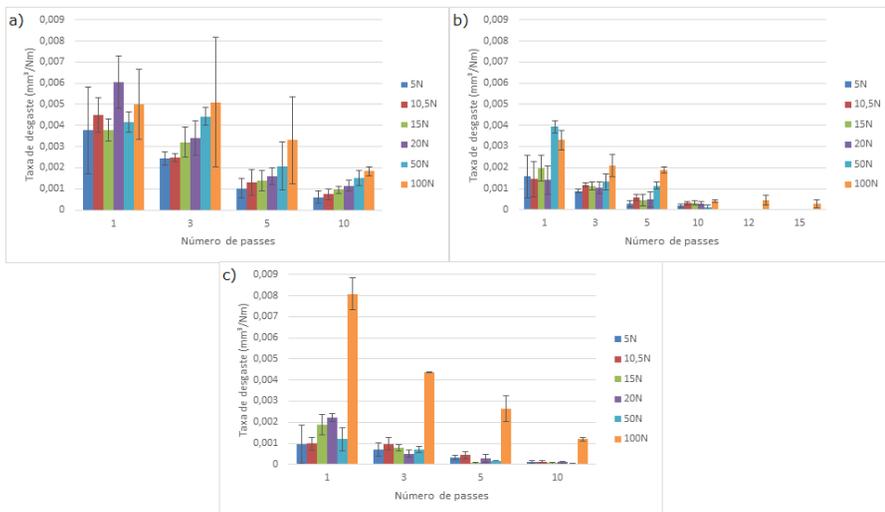


Figura 12. Taxa de desgaste em função da carga e do número de passes para as ligas: (a) Co-Cr-Fe, (b) Stellite 6 e (c) Tribaloy T-400.

4.2. Liga Stellite 6

As bandas de deslizamento na matriz do material presente em praticamente todos os ensaios também foi observada em outros trabalhos [15-17]. A presença dessas bandas de deslizamento na liga fundida indica uma alta taxa de encruamento e alta tendência a transformação de fase induzida por deformação [17].

O deslocamento de material por deformação plástica que encobria os carbonetos, *smearing*, foi observado com maior nitidez em ensaios com cargas elevadas e maior quantidade de passes. Isto também foi observado nos trabalhos de Setty, Kosel e Fiore (1982) [16] e Shetty, Kosel e Fiore (1983) [17]. Podemos notar, também, que houve destacamento de material que foi parcialmente ou totalmente retirado do risco, debrís, mais evidente em altas cargas com aumento do número de passes, também encontrado em outros trabalhos [16,17].

4.3. Liga Triballoy T-400

Nesta liga, fica bastante evidente a fragilidade do comportamento da fase Laves, que pôde ser observado em todos os ensaios, no qual ocorreu a propagação de trincas, mesmo para fora do risco. Como resultado da natureza frágil da fase Laves, as ligas Triballoy possuem uma resistência à propagação de trinca relativamente baixa.

Como sabemos, devido a grande fração volumétrica de fase Laves presente na liga Triballoy T-400, esta governa o seu comportamento quanto à resistência a abrasão. Podemos observar que para altas cargas e grande número de passes, a liga apresentou comportamento semelhante ao da liga Stellite 6, com formação de uma mistura mecânica, composta de fases Laves extremamente fraturadas e da matriz do material, que a partir daí, se comporta de maneira homogênea e dúctil, diferente do comportamento heterogêneo demonstrado pelas ligas antes da formação da mistura, como pode ser observado na figura 5, com a queda do fator f_{ab} , mostrando que a predominância do micromecanismo de microsulcamento está cada vez mais evidente, mesmo com a grande quantidade de debrís formados dentro e fora do risco para essas mesmas altas cargas e grandes quantidades de passes.

5. Conclusões

- Os ensaios com um passe variando-se a velocidade de riscamento em até duas ordens de grandeza, demonstraram que esta não foi um parâmetro que influenciou de maneira relevante as variáveis analisadas.
- Para ensaios com um passe, de um modo geral, a liga Triballoy T-400 apresentou maiores valores de dureza ao risco, que está ligado com a maior dureza global desta liga.
- Os valores de f_{ab} ficaram abaixo de 0,5 para todas as condições, indicando a predominância do micromecanismo de microsulcamento, tanto para um como para vários passes.
- Para ensaios com vários passes, a taxa de desgaste da liga Co-Cr-Fe apresentou um comportamento de desgaste inferior ao das outras ligas, com valores maiores de taxa de desgaste. As ligas Stellite 6 e Triballoy T-400 obtiveram resultados próximos, com valores de taxa de desgaste semelhantes exceto para os ensaios com a carga de 100N, onde os valores de taxa de desgaste da liga Stellite 6 foram menores do que os da liga Triballoy T-400.

6. Referências

- [1] MEZLINI, S. et al. Effect of indenter geometry and relationship between abrasive wear and hardness in early stage of repetitive sliding. *Wear*, [s.l.], v. 260, n. 4-5, p.412-421, fev. 2006. Elsevier.
- [2] ONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. *Superalloys: A Technical guide*. 2ª Edição. ed. ASM International, 2002.
- [3] ZHANG, S.; ZHAO, D. (Eds.). *Aerospace Materials Handbook*. CRC Press, 2013.
- [4] DAVIS, J. R. (Ed.). *ASM Specialty Handbook - Nickel, Cobalt, and their alloys*. ASM International, 2000.
- [5] HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [6] ZUM GAHR, K. H.. Wear by hard particles. *Wear*, Karlsruhe, v. 31, n. 10, p.587-596, 1998, Elsevier.
- [7] WOLDMAN, M. et al. The influence of abrasive body dimensions on single asperity wear. *Wear*, [s.l.], v. 301, n. 1-2, p.76-81, abr. 2013. Elsevier.
- [8] XU, Xiaojun; ZWAAG, Sybrand van Der; XU, Wei. A novel multi-pass dual-indenter scratch test to unravel abrasion damage formation in construction steels. *Wear*, [s.l.], v. 322-323, p.51-60, jan. 2015. Elsevier.
- [9] LINDROOS, Matti et al. Wear behavior and work hardening of high strength steels in high stress abrasion. *Wear*, [s.l.], v. 322-323, p.32-40, jan. 2015. Elsevier.
- [10] ASTM G 171-03 - Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. 2009.
- [11] MAAN, N. and VAN GROENOU, A. B. Low speed scratch experiments on steels. *Wear*, v.42, p. 365- 390, 1977.
- [12] FERREIRA, F. M. Avaliação tribomecânica via esclerometria retilínea e endentação instrumentada do aço ABNT 8550. 2010. 119 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [13] WOLDMAN, M. et al. The influence of abrasive body dimensions on single asperity wear. *Wear*, [s.l.], v. 301, n. 1-2, p.76-81, abr. 2013. Elsevier.
- [14] XU, Xiaojun; ZWAAG, Sybrand van Der; XU, Wei. A novel multi-pass dual-indenter scratch test to unravel abrasion damage formation in construction steels. *Wear*, [s.l.], v. 322-323, p.51-60, jan. 2015. Elsevier.
- [15] SHETTY, H.R.; KOSEL, T. H.; FIORE, N. F. A study of abrasive wear mechanisms using diamond and alumina scratch tests. *Wear*, Notre Dame, v. 80, p.347-376, January 1982, Elsevier.
- [16] SHETTY, H.R.; KOSEL, T. H.; FIORE, N. F. A study of abrasive wear mechanisms in cobalt-base alloys. *Wear*, Notre Dame, v. 84, p.327-343, July 1983, Elsevier.
- [17] AHMED, R. et al. Single asperity nanoscratch behaviour of HIPed and cast Stellite 6 alloys. *Wear*, [s.l.], v. 312, n. 1-2, p.70-82, abr. 2014. Elsevier.
- [18] ALSTEAD, Alison; RAWLINGS, Reeds D.. The effect of iron additions on the microstructure and properties of the "Tribaloy" Co-Mo-Cr-Si wear resistant alloys. *Journal Of Materials Science*, Londres, v. 20, p.1693-1704, 1985.