

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE REVESTIMENTOS DE NI-CR-B-SI DEPOSITADOS VIA LASER CLADDING

Jurandir Marcos Sá de Sousa¹

João Victor El-Hage Meyer Osório¹

Francisco Ratusznei¹

Rafael Gomes Nunes Silva¹

Milton Pereira¹

Richard de Medeiros Castro²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/nº, Trindade-CEP 88040-900 Florianópolis-SC.

²Faculdade SATC, Campus Pascoal Meller, 73, Universitário - CEP 88805-380 Criciúma - SC.

marcos.jurandir@yahoo.com.br

joaoosorio1@hotmail.com

franciscoratusznei@gmail.com

rafaelnunes.mat@hotmail.com

eng.milton@gmail.com

richard.castro@satc.edu.br

Resumo. O desenvolvimento de materiais resistentes ao desgaste abrasivo, mecanismo responsável por perdas econômicas em escala mundial em aplicações industriais é uma busca constante de centros de pesquisas tribológicas. Neste sentido, o presente artigo realiza uma investigação baseada em trabalhos onde diferentes ligas resistentes ao desgaste abrasivo tenham sido depositadas via LASER cladding, visando a preparação de superfícies de componentes para suportarem condições severas de desgaste. Deu-se enfoque as ligas do sistema Ni-Cr-B-Si, que possuem elevada resistência a abrasão e corrosão. A partir dos resultados da pesquisa, é possível inferir que a ação do desgaste abrasivo é mais intensa em revestimentos com maior diluição, menor microdureza, microestrutura menos densa e maior quantitativo de micromecanismos de desgaste atuantes. Parâmetros variados do processo LASER cladding, como: potência do feixe LASER, velocidade de varredura e taxa mássica de alimentação de pó, devem ser ajustados para a aplicação específica, permitindo a precipitação de carbonetos duros na matriz, que impedem o avanço das partículas abrasivas por sobre esta, aumentando a resistência ao desgaste abrasivo e o tempo de vida dos componentes.

Palavras chave: Desgaste abrasivo. Micromecanismos de desgaste. Carbonetos duros. Tempo de vida.

1. INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo é considerado um dos mecanismos mais comuns e intensos de desgaste encontrados na prática, sendo responsável por cerca de 50% das falhas de máquinas, componentes e equipamentos industriais (Franco e Sinatora, 2017). Este mecanismo provoca forte impacto negativo em diversos setores de expressiva relevância econômica, como agricultura, mineração e transporte. Holmberg e Erdemir (2015) descrevem que em vários países industrializados, cerca de 1,0% de seu produto interno bruto (PIB) é despendido para a manutenção e / ou reposição de componentes desgastados.

A possibilidade de preparar componentes que suportem melhor estas condições são constantemente estudadas, e novas técnicas são propostas no intuito de amenizá-las. Um procedimento bastante difundido é a aplicação de revestimentos resistentes ao desgaste por processos de deposição, como as técnicas de soldagem a arco. Há também outras rotas de processamento, como os processos de aspersão térmica e o LASER cladding (técnica em foco neste trabalho).

Neste contexto, o referido artigo apresenta uma revisão do comportamento de revestimentos resistentes ao desgaste abrasivo depositados pelo processo LASER cladding, buscando compreender o atual cenário de sua aplicabilidade a este campo do conhecimento tribológico, que possui excelente perspectiva de crescimento, tanto em virtude da demanda por componentes resistentes ao desgaste, quanto pelas características intrínsecas do processamento por LASER. Além disso, será relatado de forma mais aprofundada a avaliação de resistência a abrasão de uma liga de Ni-Cr-B-Si depositada via LASER cladding pelo Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-LASER) da Universidade Federal de Santa Catarina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Desgaste abrasivo

De acordo com Zum Gahr (1987), o desgaste abrasivo é definido como a perda de massa e os respectivos efeitos resultantes da interação entre partículas ou asperezas duras, que são forçadas contra uma superfície em movimento.

Segundo Hutchings e Shipway (2017), esta é a forma de desgaste resultante do contato entre uma superfície rugosa ou com partículas abrasivas fixas a seu corpo e uma outra superfície menos resistente, gerando sulcos, caracterizando abrasão a dois corpos. O material removido destes sulcos é deslocado na forma de *debris*, que são pressionados sobre as superfícies em contato, atuando como novas partículas abrasivas, acelerando ainda mais o processo de desgaste abrasivo. Além disto, pode-se ter abrasivos livres entre duas superfícies em movimento relativo, caracterizando abrasão a três corpos.

Stachowiak e Batchelor (2001) destacam que o desgaste abrasivo é função de vários fatores: carga aplicada sobre a superfície dos componentes e características dos materiais abrasivos (causas externas); composição da liga, dureza, ductilidade, tenacidade a fratura e características microestruturais (fatores internos); área de contato, aspectos das superfícies dos componentes e regime de lubrificação (condições de operação).

2.2. Revestimentos resistentes ao desgaste e LASER *cladding*

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), entende-se por revestimento duro uma liga homogeneamente depositada por processos de fabricação sobre a superfície de um material de menor resistência mecânica, com o propósito de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste sem prejudicar as propriedades intrínsecas do substrato. Dependendo das características que se deseja conferir ao componente revestido: resistência a abrasão, adesão, corrosão, erosão, impacto, dentre outras, utilizam-se diferentes elementos de liga e parâmetros de processamento.

Dentre os processos de deposição disponíveis, este trabalho chama a atenção para a técnica LASER *cladding*. A radiação LASER possui particularidades em relação as fontes de luz tradicionais. Hitz *et al.* (2012) destacam a sua alta intensidade e geração de feixes monocromáticos, coerentes e colimados. Além destas, a sua capacidade de gerar feixes extremamente concentrados possibilita a execução de várias operações: ablação, corte, *cladding*, marcação, polimento, refusão, soldagem, tratamentos térmicos dentre outras.

Segundo Toyserkani *et al.* (2005), a técnica LASER *cladding* é utilizada para depositar uma camada de material (na forma de arame ou pó) com características específicas sobre a superfície de substratos de menor resistência mecânica. A mesma proporciona a geração de revestimentos com: mínima inserção de distorções, baixa diluição e pequena zona afetada pelo calor (ZAC). Porém, existem alguns pontos negativos, como a exigência de elevado investimento financeiro inicial, grande rigor na parametrização do processo, além da necessidade de uma infraestrutura adequada e de pessoal técnico-científico especializado.

2.3. Revestimentos de ligas do sistema Ni-Cr-B-Si

Hemmati *et al.* (2011) depositaram revestimentos de Ni-Cr-B-Si sobre aço S355. Observaram a formação de fases eutéticas, que aumentaram a dureza, alcançando a casa de 1000 HV_{0,5}. Os autores destacam que estas ligas são comumente depositadas por aspersão térmica, porém, há uma grande dificuldade em gerar camadas densas de revestimento com resistente adesão metalúrgica com o substrato. O LASER *cladding* vêm encontrando espaço nestas aplicações, pois além de suprir estas necessidades, a técnica reduz a diluição e aumenta a dureza, contribuindo na redução do desgaste abrasivo.

Natarajan *et al.* (2016) avaliaram revestimentos de Ni-Cr-B-Si com adição de diferentes porcentagens de grafite via ensaio roda de borracha empregando sílica (60 µm) como abrasivo, velocidade de 200 rpm e cargas de 55,0 e 79,0 N durante 5,0 min. Avaliando os resultados dos ensaios roda de borracha, os autores observaram que a formação de carbonetos duros, aliado a adição do grafite reduziu drasticamente a perda volumétrica, inclusive na maior carga de ensaio. Em relação aos mecanismos de desgaste, notou-se uma transição gradativa de abrasão para adesão, com microcortes e microsulcos, cujo prosseguimento foi comprometido através do efeito de barreira imposto por estas fases de reforço.

Makarov *et al.* (2017) estudaram os efeitos das fases de reforço na resistência ao desgaste abrasivo a dois corpos de revestimentos de Ni-Cr-B-Si depositados por LASER *cladding* através do ensaio bloco sobre feltro abrasivo com carga de 49,0 N por 18,0 m. Notou-se que o aumento da resistência a abrasão deve-se principalmente à elevada dureza das fases de reforço formadas (boretos e carbonetos). O grau de severidade da ação dos micromecanismos de desgaste atuantes (microsulcos e microcortes) reduziu drasticamente após a deposição dos revestimentos.

Deschuyteneer *et al.* (2017) avaliaram a resistência à abrasão de uma liga de Ni-Cr-B-Si com e sem adição de WC pelo ensaio roda de borracha empregando uma carga de 130,0 N durante 16,0 min sob um fluxo de 80,0 g/min de coríndon. A resistência ao desgaste foi mais acentuada nos revestimentos com maior concentração e tamanho de fases de reforço, onde as maiores taxas de desgaste encontradas foram conferidas a presença de algumas fases fraturadas, que atuaram como partículas abrasivas.

3. METODOLOGIA

Aço AISI 1020 foi empregado como material de substrato, enquanto a liga Ni-Cr-B-Si 1545-00 (tamanho de partícula de pó: -106+53 µm), composição química (% peso) 0,3-0,4 (C); 2,0-3,4 (Fe); 7,5-10,0 (Cr); 1,7-2,0 (B); 3,3-3,9 (Si) e Ni (balanço) e faixa de dureza (446 a 484 HV) da fabricante Höganäs foi utilizada como material de revestimento. Conforme indica a norma ASTM G65 (2016), as amostras foram usinadas em formato retangular (76,0 mm x 25,0 mm x 10,0 mm).

Na deposição dos revestimentos, utilizou-se uma fonte LASER de fibra (Yt-Itérbio) do fabricante IPG PHOTONICS®, com potência máxima de 10,0 kW. Empregou-se parâmetros fixos de: taxa mássica de alimentação de pó de 11,2 g/min; diâmetro de feixe de 0,8 mm; overlap de 30,0%; vazão de gás argônio (proteção e arraste) de 15 l/min. A potência do feixe LASER (P_{FL}) e velocidade de varredura (V_{VAR}) foram variados em três níveis diferentes, formando os revestimentos (R_x): R_1 (1,05 kW e 5,00 mm/s); R_2 (1,40 kW e 21,70 mm/s) e R_3 (1,75 kW e 30,00 mm/s).

Empregou-se o ensaio roda de borracha em meio seco, normatizado pela ASTM G65 (2016). Foram depositadas duas amostras para cada condição, as quais foram posteriormente submetidas ao processo de retificação para tornar as superfícies planas e com rugosidade dentro da especificação exigida pela norma ($R_a = 0,8 \mu\text{m}$). O ensaio seguiu o procedimento A da norma. Empregou-se uma velocidade de 200 rpm e vazão mássica de areia abrasiva de 390,0 g/min. O ensaio foi realizado ao longo de 30,0 min, com pausas a cada 5,0 min para limpeza e pesagem das amostras. O intuito destas paradas é plotar um perfil de desgaste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme descrito no item 3.2, Sousa (2018) realizaram um conjunto de análises junto ao grupo LMP-LASER, envolvendo diluição, microestrutura, microdureza e resistência à abrasão. O presente artigo, por sua vez, focará na avaliação de resistência à abrasão dos revestimentos.

- Diluição, microestrutura e microdureza

Sousa (2018), em sua dissertação de mestrado, verificou que as três parametrizações empregadas resultaram em revestimentos de boa qualidade de superfície e com resistente adesão metalúrgica entre substrato e material de revestimento. Observou-se um largo patamar de diluição de R_1 (2,6%), R_2 (4,8%) para R_3 (22,6%), resultado conferido ao fato da $\dot{m}$ ter sido mantida constante, enquanto a V_{VAR} foi incrementada, proporcionando assim menor inserção de pó por unidade de tempo. O aumento de P_{FL} impactou diretamente na diluição e, conseqüentemente, no perfil de microdureza do revestimento.

Em relação à microestrutura, Sousa (2018) detectou basicamente três regiões: faixa planar rente a linha de fusão (sem precipitados, com elevado teor de Fe), faixa hipoeutética (menor concentração de Fe) e uma outra eutética, que se estende até o topo do revestimento. O tamanho e quantidade de fases de reforço (carbonetos de Cr - CrC) presentes variaram segundo a diluição, sendo maior nos revestimentos de menor diluição.

- Análises Tribológicas

O gráfico da Fig. 1 apresenta o perfil de desgaste característico obtido ao longo dos 30,0 min de ensaio, onde nota-se um comportamento uniforme de perda volumétrica segundo o tempo, ao longo do período total de ensaio, resultado que indica boa uniformidade de distribuição das propriedades dos revestimentos e a condução eficiente dos ensaios. Analisando o gráfico, percebe-se um pico de perda nos primeiros 5,0 min, que pode ser conferido ao incremento da área entre os espécimes, as trepidações ocorridas no estabelecimento da cortina de areia e ao rompimento da camada de óxido. O gráfico da Fig. 2, por sua vez, apresenta um comparativo entre a perda volumétrica acumulada de cada revestimento resultante do período integral dos ensaios.

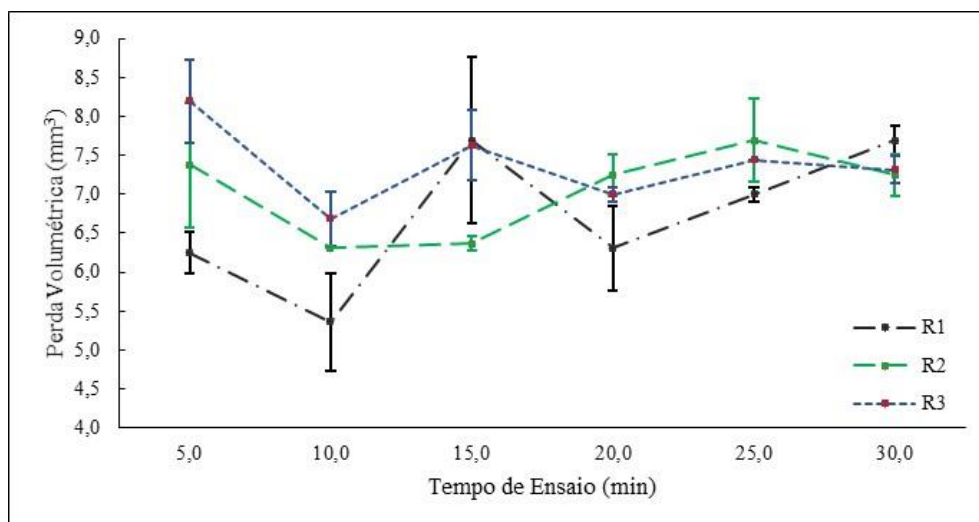


Figura 1. Perda volumétrica ao longo do tempo de ensaio.

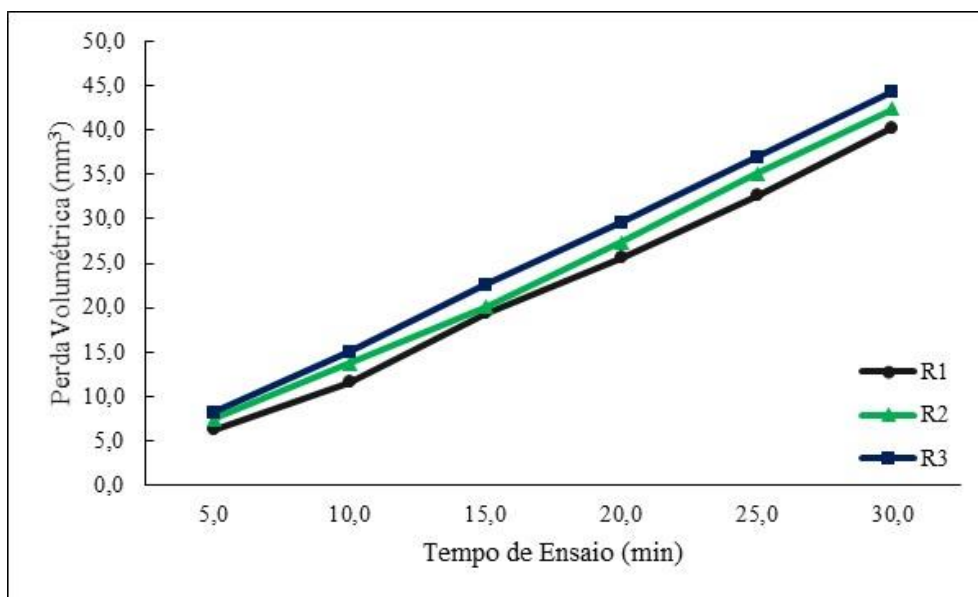


Figura 2. Perda volumétrica acumulada.

Comparando-se a perda volumétrica dos revestimentos, percebe-se uma escala crescente de R₁ para R₃. Este resultado pode ser atribuído a maior diluição, menor concentração de CrC e consequente menor microdureza destes últimos em relação ao primeiro. Pode-se dar destaque as fases de reforço (CrC), uma vez que, nos revestimentos com maior concentração e tamanho destas, a perda volumétrica foi consideravelmente inferior. Duas justificativas podem ser indicadas neste sentido: fases de reforço de grande dimensão possuem tendência de ser menos impactadas pela ação da areia abrasiva; estas fases proporcionam maior microdureza a matriz. Além disso, considerando o fato de que, após removidas, muitas destas fases passam a atuar como novas partículas abrasivas, acelerando o desgaste, maiores fases tendem a permanecer mais tempo fixas a matriz, promovendo maior tempo de proteção.

O mecanismo de desgaste abrasivo mostrou-se predominante, por meio da formação de microsulcos e microcortes, sendo a ação do primeiro mais acentuada nas regiões entre trilhas, resultado conferido a maior migração de Fe para a região superior dos revestimentos pela ação das correntes convectivas oriundas da solidificação. No decorrer do ensaio, o fluxo de areia abrasiva tende a se manter mais concentrado nestas regiões, gerando desgaste mais concentrado. A Fig. 3 ilustra as três etapas as quais os revestimentos foram submetidos: a) superfície revestida, b) superfície retificada e c) superfície ensaiada.

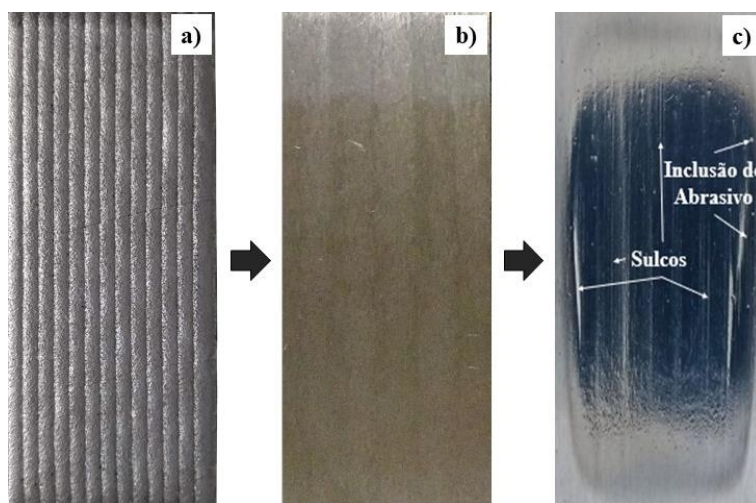


Figura 3. Etapas seguidas: a) deposição, b) revestimento e c) superfície desgastada.

A ação dos micromecanismos de desgaste mostrou-se similar em ambos os revestimentos. Porém, a menor penetração dos grãos abrasivos sobre as superfícies dos revestimentos de maior microdureza resultou em menor perda volumétrica.

Além de propiciar maior microdureza, as fases de CrC também atuaram como barreira, impedindo o avanço de micromecanismos de desgaste (microsulcos e microcortes) sobre as superfícies dos revestimentos.

Destaca-se que, na formação dos microsulcos, o material foi empurrado para as laterais pela ação das partículas abrasivas, enquanto uma outra parcela deste material permaneceu escoando ao lado e também a frente destas partículas, constituindo o efeito de cunha, onde algumas destas foram destacadas das superfícies, principalmente nas regiões rentes a algumas trincas de solidificação formadas. Como a ação dos micromecanismos de desgaste mostrou-se pouco acentuada, é possível inferir que estes destacamentos de material podem ser indicados como a principal causa dos valores de perda volumétrica observados.

Os resultados apresentados indicam influência predominante da potência de feixe LASER sobre a diluição, sendo que esta última exerceu efeito negativo sobre as características da microestrutura, microdureza e perda volumétrica. Conforme destacado previamente, os revestimentos de menor diluição demonstraram maior resistência ao desgaste e melhor uniformidade no perfil de desgaste ao longo do tempo de ensaio. A Fig. 4 ilustra a ação protetora dos CrC na interrupção de microsulcos e microcortes, principais elementos responsáveis pela redução do desgaste abrasivo.

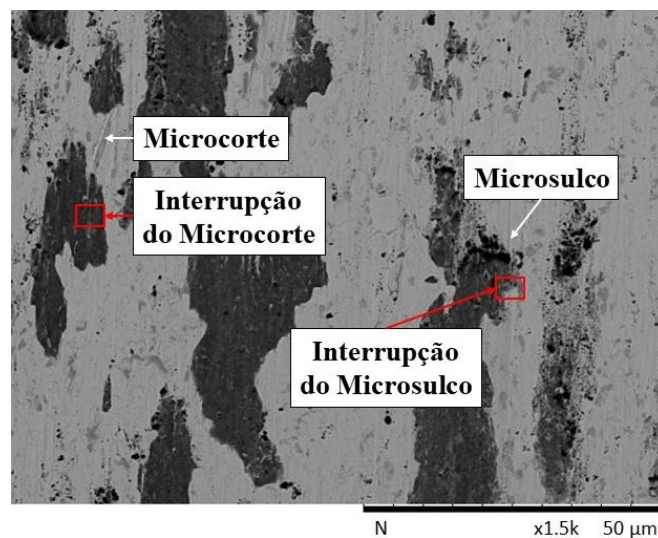


Figura 4. Interrupção de micromecanismos pelos carbonetos de Cr em uma liga de Ni-Cr-B-Si (Sousa, 2018).

5. CONCLUSÕES

A partir do cenário observado na literatura e dos resultados obtidos no LMP-LASER, algumas conclusões podem ser sem inferidas:

- É possível obter revestimentos com boas propriedades mecânicas. Porém, para isso, é preciso conhecer as características do material de adição e substrato, e otimizar os parâmetros do processo LASER *cladding*.
- Observou-se uma correlação direta dos resultados de perda volumétrica com as propriedades e características dos materiais (diluição, microestrutura e microdureza), e com os parâmetros de deposição, principalmente a potência do feixe LASER, que exerceu influência direta sobre os valores de diluição.
- A variação de diluição entre os revestimentos analisados exerceu influência direta sobre a microdureza, aspectos de microestrutura e resistência ao desgaste abrasivo.
- As fases de reforço (carbonetos duros de CrC) atuaram como uma espécie de escudo protetor, dificultando e / ou impedindo o avanço das partículas abrasivas, reduzindo a ação dos micromecanismos de desgaste abrasivo e, consequentemente, a perda volumétrica e seus efeitos colaterais. Além disso, a presença destes aumentou significativamente a microdureza, efeito mais acentuado nos revestimentos de menor diluição.
- A aplicabilidade de revestimentos do sistema Ni-Cr-B-Si no combate ao mecanismo de desgaste abrasivo vêm alcançando resultados animadores.
- A tecnologia LASER *cladding* vêm se mostrando um campo fértil, gerando revestimentos de boa qualidade de superfície e aumentando o tempo de vida de componentes sujeitos a condições severas de desgaste abrasivo.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM-G65. “American Society for Testing and Materials. ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus”: Pensilvânia, 14 p. 2016.
- Franco, L. A.; Sinatora, A., 2017, “Material Removal Factor (f_{ab}): A Critical Assessment of its Role in Theoretical and Practical Approaches to Abrasive Wear of Ductile Materials”, *Wear*, 382-383, 51-61, 11p.

- Deschuyteneer, D. et al. Influence of large particle size—up to 1.2 mm—and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC laser clad composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 311, p. 365-373. 2017.
- Hemmati, I. O.; De Hosson, T. M., 2011, “Evolution of Microstructure and Properties in Laser Cladding of a Ni-Cr-B-Si Hardfacing Alloy”, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 71, 10p.
- Hitz, C. B., Ewing, J. J., Hecht, J., 2012, “Introduction to Laser Technology”. 4. ed. *Piscataway*: Wiley-IEEE Press, 301p.
- Holmberg, K., Erdemir, A., 2015, “Global Impact of Friction on Energy Consumption, Economy and Environment”, *FME Transactions*, vol. 43, n° 3, 181-185, VTT Technical Research of Finland, 5p.
- Hutchings, I.; Shipway, P. “Tribology: friction and wear of engineering materials”. *Butterworth-Heinemann*, 2017.
- Marakov, A. V.; Soboleva, N. N. e Malygina, I. Y., 2017, “Role of the Strengthening Phases in Abrasive Wear Resistance of Laser-Clad NiCrBSi Coatings”, *Journal of Friction and Wear*, vol. 38, p. 272-278, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 7p.
- Natarajan, S. et al. “Effect of graphite addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of plasma sprayed NiCrBSi coatings”. *Materials Chemistry and Physics*, v. 175, p. 100-106, 2016.
- Sousa, J. M. S., 2018. *Análise de Revestimentos de Ni-Cr-B-Si Depositados Via LASER Cladding a Pó*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Stachowiak, G. W. e Batchelor, A. W., 2001, “Engineering Tribology”, Publishing company *Butterworth Heinemann*, 2ª edition, 744 p.
- Toyserkani, E.; Khajepour, A. e Corbin, S., 2005, “Laser Cladding”, *Boca Raton*: Crc Press, 263p.
- Zum Gahr, K. H., 1987, “Microstructure and wear of materials”. Tribology series, vol. 10. *Elsevier*, Amsterdam, 286p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

APPLICATION OF LASER CLADDING TECHNOLOGY IN COMBATING THE ABRASIVE WEAR MECHANISM

Jurandir Marcos Sá de Sousa¹

João Victor El-Hage Meyer Osório¹

Francisco Ratusznei¹

Rafael Gomes Nunes Silva¹

Milton Pereira¹

Richard de Medeiros Castro²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n°, Trindade-CEP 88040-900 Florianópolis-SC.

²Faculdade SATC, Campus Pascoal Meller, 73, Universitário - CEP 88805-380 Criciúma - SC.

marcos.jurandir@yahoo.com.br

joaoosorio1@hotmail.com

franciscoratusznei@gmail.com

rafaelnunes.mat@hotmail.com

eng.milton@gmail.com

richard.castro@satc.edu.br

Abstract. The abrasion resistant materials development, wear mechanism responsible for losses in a word scale, is a continuous aim of tribology research centers for industrial applications. In this sense, this article is dedicated to investigation based on different studies where many abrasion resistant alloys have been deposited thru a variety of techniques, specially laser cladding, aiming the surface treatment to withstand severe wear conditions. The focus seeks Ni-Cr-B-Si alloys, which present a high resistance to abrasion and corrosion wear. Based on the research results, it is possible to inquire that the wear is higher on clads whose dilution is also higher, minor hardness, less dense microstructure and higher quantity of wear micromechanisms. Several laser cladding parameters, as: laser beam power, scanning speed and powder feed rate, must be adjusted for each specific application, allowing the precipitation of hard carbides along the matrix, which avoid the abrasion particles propagation over the material surface, increasing the resistance to the abrasion wear and component life cycle.

Keywords: Abrasive wear. Wear micromechanisms. Hard carbides. Life cycle.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.