

INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO NA MORFOLOGIA E DIMENSIONAMENTO DE REVESTIMENTOS REALIZADOS POR “FRICTION STIR SURFACING”

Silva K.H.S, klaushigor@gmail.com^{1,2}
Santos, I.B, italobsantos@gmail.com^{1,2}
Paula R.G, raphaelmecanica@gmail.com²
Câmara M. A, marcelocamara@demec.ufmg.br²
Abrão A.M, abrao@demec.ufmg.br²

¹ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

² Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo: O processo de revestimento por atrito ocorre a partir da deformação plástica dos materiais envolvidos onde inicialmente uma haste consumível, material de deposição, é colocada em rotação e pressionada contra o substrato a um determinado valor de carga axial. Esta carga associada ao movimento de giro da haste gera um aumento da temperatura na interface devido ao atrito entre os materiais. A combinação entre pressão e temperatura gera uma camada viscoplástica na interface do conjugado, e dessa forma, ao deslocar a haste consumível no sentido longitudinal do substrato ocorre o recobrimento.

O presente trabalho pretende avaliar o efeito da alteração da rugosidade do substrato sobre o comportamento do conjugado no que diz respeito à morfologia e controle dimensional do revestimento por meio de análise visual e medições em máquina de medição por coordenadas. Adicionalmente foram avaliados os efeitos de alterações de parâmetros de entrada tais como rotação da haste consumível e velocidade de deposição do revestimento.

As deposições por meio do processo de revestimento por atrito são realizadas frequentemente com o auxílio de máquina dedicada ao processo, entretanto, neste trabalho utilizou-se um centro de usinagem com comando numérico para tal processo com êxito.

Palavras-chave: revestimento por atrito, rugosidade e morfologia

1. INTRODUÇÃO

Engenharia de superfície é uma subárea da engenharia mecânica que estuda os eventos que possam ocorrer nos níveis de superfícies dos materiais, tais como desgaste, fadiga, corrosão. Esses eventos podem acarretar falhas prematuras em componentes e sistemas de engenharia. Para se conseguir melhores respostas e até mesmo aumentar a vida útil desses componentes, alguns procedimentos podem ser adotados. Dentre esses procedimentos, o processo de revestimento é utilizado para suprir as necessidades de projeto. Revestir consiste em depositar uma camada superficial de um material com propriedades mais adequadas para aplicações específicas.

Em sua maioria os processos de revestimento ocorrem a partir da fusão do material base (substrato) e/ou do material que será revestido, o que pode alterar as propriedades mecânicas do composto. Dentre as técnicas de revestimento, a tecnologia de revestimento por atrito e

mistura mecânica, por ser realizado no estado sólido, apresenta um ganho no que se refere a aplicações em revestimento.

Vários autores, (Vitanov e outros, 2010, Gandra, Miranda e Vilaça, 2012, Gandra e outros, 2014, Pereira e outros, 2012, Rao e outros, 2012) demonstram que o processo de revestimento por atrito e mistura mecânica pode ocorrer tanto em materiais similares quanto em materiais dissimilares, que apresentam pontos de fusão distintos, que seria difícil ou praticamente impossível de revestir por outras técnicas que envolvem fusão.

Segundo Gandra, 2012, o processo de revestimento por atrito e mistura mecânica é um processo que ocorre no estado sólido, com base na deformação de uma haste consumível rotativa. Essa haste é pressionada contra o material base a ser revestido a uma determinada carga axial. Esse contato entre o consumível e o substrato gera uma camada limite viscoplástica na interface e devido à combinação de pressão e temperatura, ocorre um processo de interdifusão entre os materiais, o que configura o revestimento. Simultaneamente ocorre um avanço na direção z (vertical para

baixo) e direção x (horizontal) com velocidade e pressão constante para deposição da haste consumível no material base. O esquema do processo pode ser verificado na figura 1.

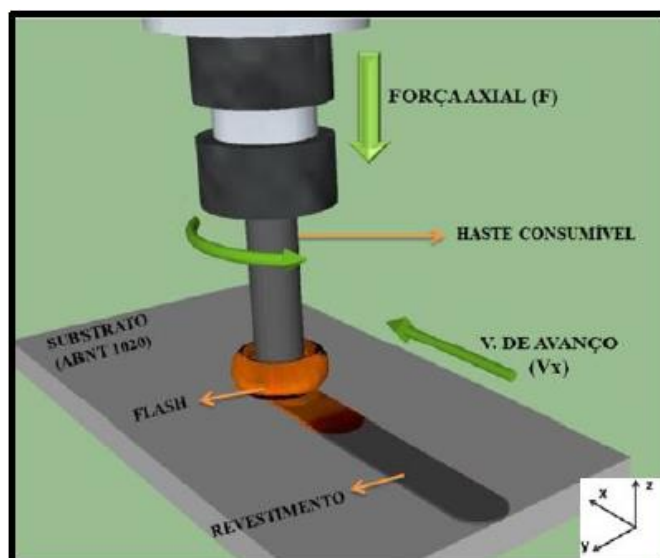


Figura1 – Esquema do processo de revestimento por atrito.

Fonte: Adaptado de Troysi (2016, p. 42).

Segundo Rafi e outros, 2011, em função do atrito o calor produzido durante o processo é conduzido ao longo do eixo consumível, estabelecendo um gradiente de temperatura, o qual determina o nível de deformação. O material fica mais dúctil seguindo tal gradiente e dessa forma ocorre a deformação plástica de maneira gradual conforme são exercidas as cargas de compressão e torção durante o processo.

Não existe um padrão pré-determinado sobre a influência dos parâmetros no processo, sobretudo porque os resultados são fortemente dependentes das características dos materiais e equipamento utilizado. Assim, a principal medida a ser tomada para que se realize um revestimento com sucesso é o ajuste dos parâmetros para cada par de materiais específico.

Os principais parâmetros de influência no processo de deposição superficial por atrito são: força axial aplicada, rotação, diâmetro e velocidade de avanço relativo da haste consumível.

Entretanto sugere-se verificar a influência da rugosidade do substrato quanto à morfologia e controle dimensional dos revestimentos utilizando para isso uma máquina de medição por coordenadas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Os materiais selecionados para o presente estudo foram os aços ABNT 1020 e ABNT 4340 para substrato e haste consumível, respectivamente. A seleção dos referidos materiais se deu em função de suas propriedades mecânicas e diversas aplicações industriais.

Realizou-se análise química em amostras dos materiais por meio da técnica de fluorescência de raios x.

2.2. Seleção dos parâmetros de revestimento

A seleção dos parâmetros de revestimento foi realizada a partir de referências como Vitanov et al. (2010) e Troysi, et al. (2016) que realizaram testes utilizando como máquina ferramenta um centro de usinagem para realização dos revestimentos, tal como o presente trabalho.

Os parâmetros de influência no processo que foram levados em consideração são: rugosidade média quadrática do substrato (R_q), velocidade de rotação da haste consumível (n) e velocidade de deposição (V_d), calculada a partir da soma vetorial da velocidade de avanço do substrato (eixo x) e velocidade de avanço da haste consumível (eixo z).

2.3. Planejamento fatorial completo

Realizou-se o planejamento fatorial completo utilizando a ferramenta Desing Of Experiments - DOE. Foram definidos três níveis para cada fator de relevância: rugosidade do substrato, rotação da haste consumível e velocidade de deposição. A tabela 1 indica de maneira destacada as combinações de testes que foram realizadas e analisadas para o presente trabalho.

TABELA 1 - Combinações dos parâmetros de deposição realizados por DOE

Deposição	Parâmetros de influência			Deposição	Parâmetros de influência		
	Rugosidade (μm)	Rotação (rpm)	Velocidade de deposição (mm/min)		Rugosidade (μm)	Rotação (rpm)	Velocidade de deposição (mm/min)
1	0,456	1500	190	14	1,622	2250	285
2	0,456	1500	285	15	1,622	2250	380
3	0,456	1500	380	16	1,622	3000	190
4	0,456	2250	190	17	1,622	3000	285
5	0,456	2250	285	18	1,622	3000	380
6	0,456	2250	380	19	2,791	1500	190
7	0,456	3000	190	20	2,791	1500	285
8	0,456	3000	285	21	2,791	1500	380
9	0,456	3000	380	22	2,791	2250	190
10	1,622	1500	190	23	2,791	2250	285
11	1,622	1500	285	24	2,791	2250	380
12	1,622	1500	380	25	2,791	3000	190
13	1,622	2250	190	26	2,791	3000	285
14	1,622	2250	285	27	2,791	3000	380

Fonte: dados do autor

2.4. Análise da morfologia dos revestimentos

Após a realização das deposições dos revestimentos foram feitas análises visuais quanto ao aspecto morfológico dos revestimentos, verificando se havia a presença de falhas e ou imperfeições de maneira macro.

2.5. Dimensionamento dos revestimentos

Para o dimensionamento dos revestimentos utilizou-se a máquina de medição por coordenadas marca mitutoyo, modelo BR-M443 onde foram realizadas medições de largura, espessura e comprimento conforme esquema da figura 2, onde 1, 2 e 3 referem-se a medidas de largura, 4, 5 e 6 espessura e 7, 8 e 9 comprimento.

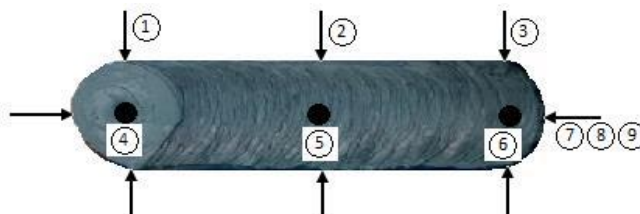


Figura 2 – Mapa para medições das dimensões do revestimento

Fonte: dados do autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho. De modo a facilitar a apresentação e discussão dos resultados foi adotada a nomenclatura conforme se verifica na tabela 2 para as combinações de parâmetros das amostras avaliadas. Levando em consideração sempre a ordem: rugosidade, rotação e velocidade de deposição.

TABELA 2 - Nomenclatura apresentada para discussão dos resultados

Rugosidade Rq (μm)	Nomenclatura	Rotação (rpm)	Nomenclatura	Velocidade de deposição (mm/min)	Nomenclatura
0,456	A	1500	A	190	A
1,622	B	2250	B	285	B
2,791	C	3000	C	380	C

Fonte: dados do autor

Como exemplo de nomenclatura a deposição realizada com os parâmetros de entrada: rugosidade de 0,456 Rq, rotação de 1500 rpm e velocidade de deposição de 190 mm/min será referenciada como AAA.

3.1. Análise química

Os resultados de análise química são apresentados na tabela 3. Nessa mesma tabela são apresentadas as composições químicas nominal do aço ABNT 1020 material utilizado com substrato e do aço ABNT 4340 utilizado como haste consumível.

TABELA 3 - Composição química dos aços ABNT 4340 e ABNT 1020

ELEMENTOS	ABNT 4340 Nominal (%)*	ABNT 4340 CP1 (%)	ABNT 4340 CP2 (%)	ABNT 1020 Nominal (%)*	ABNT 1020 CP1 (%)	ABNT 1020 CP2 (%)
Al	-	0,030	0,045	-	0,0	0,10
Si	0,15 a 0,35	0,25	0,32	-	0,18	0,23
P	Max. 0,035	0,008	0,009	Max. 0,040	0,040	0,021
S	Máx. 0,040	-----	-----	Max. 0,050	0,040	0,007
Ti	-	-----	-----	-	----	0,045
Cr	0,70 a 0,90	0,95	0,99	-	0,14	0,032
Mn	0,60 a 0,80	0,84	0,86	0,30 – 0,60	0,76	1,6
Ni	1,65 a 2,00	2,0	1,9	-	0,080	----
Cu	-	0,037	0,54	-	0,25	0,027
Mo	0,20 a 0,30	0,28	0,29	-	0,017	----
Nb	-	----	----	-	0,0	0,04
Fe	-	95,7	95,5	-	98,5	97,9
C	0,38 a 0,43			0,17 a 0,23		

Fonte: dados do autor

* Os valores nominais foram obtidos e adaptados de ASM Handbook, volume 1, properties and selection: irons, steels, and high performance alloys.

3.2. Análise visual das deposições

Após a realização dos depósitos os conjugados foram avaliados de maneira macro, por meio de fotos e análises visuais. Verificou-se que as amostras revestidas se apresentaram com um bom aspecto morfológico, uma deposição homogênea, contínua, livre de imperfeições e falhas aparentes. As deposições apresentaram uma boa repetitividade entre as amostras principais e as réplicas. Percebeu-se claramente uma variação da morfologia, tais como largura e espessura da camada revestida, quando variados os parâmetros de deposição.

Na figura 3 podem ser verificadas as amostras após o processo de deposição, indicando que todas as amostras propostas, com diferentes parâmetros, foram realizadas com sucesso. Entretanto nota-se algumas variações das morfologias, acabamento superficial dos revestimentos e influências térmicas em função das alterações dos parâmetros de deposição e das rugosidades dos substratos.

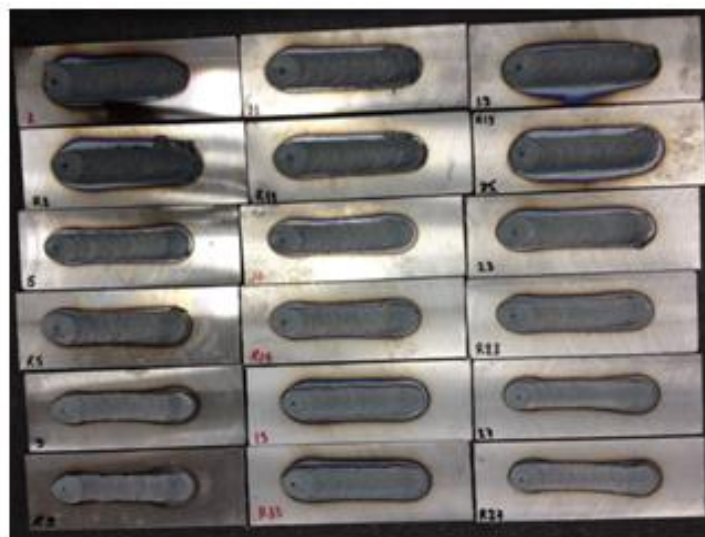


Figura 3 – Amostras antes e após a deposição dos revestimentos
Fonte: dados do autor

Na figura 4 são apresentados os aspectos das deposições das réplicas das amostras 9 e 11 que foram submetidas aos parâmetros de deposição ACC e BAB respectivamente. A influência dos parâmetros de deposição é notória. Percebe-se uma alteração não apenas na morfologia do revestimento, mas também no aspecto final da haste consumível.



Figura 4 – Amostras após a deposição dos revestimentos
Fonte: dados do autor

3.3. Avaliação dimensional dos revestimentos

As avaliações dimensionais dos revestimentos foram realizadas a partir de medições das larguras, espessuras e comprimentos dos mesmos, utilizando a máquina de medição por coordenadas. Obtidos os dados da média das larguras, espessuras e comprimentos dos revestimentos, realizou-se a compilação desses resultados nos gráficos 1, 2 e 3 conforme pode ser observado.

Nota-se, principalmente para a largura, uma boa reprodutibilidade dos resultados, seguido pela espessura e comprimento. As réplicas que apresentaram a maior distorção das amostras principais foram as referentes aos conjugados 1 e R1 e 9 e R9 quando avaliadas as espessuras dos revestimentos enquanto que para os resultados de comprimento as maiores variações ocorreram entre os pares de conjugados 1 e R1 seguidos por 19 e R19.

Sugere-se como uma possível causa das variações dos comportamentos, principalmente das espessuras dos revestimentos, a variação percentual das rugosidades entre os substratos principais e suas respectivas réplicas.

No gráfico 4 pode ser verificada a relação das variações das rugosidades das amostras principais e réplicas. Nota-se as maiores variações percentuais nas amostras 1 e 9 e suas respectivas réplicas, justamente os conjugados que apresentaram a maior distorção nas espessuras dos revestimentos, conforme verifica-se no gráfico 2.

A variação do comprimento por sua vez não demonstra uma relação direta com a rugosidade visto que as amostras 19 e R19 apresentam uma distorção relevante e suas rugosidades, entretanto foram as que mais se aproximaram, conforme pode ser visto no gráfico 4.

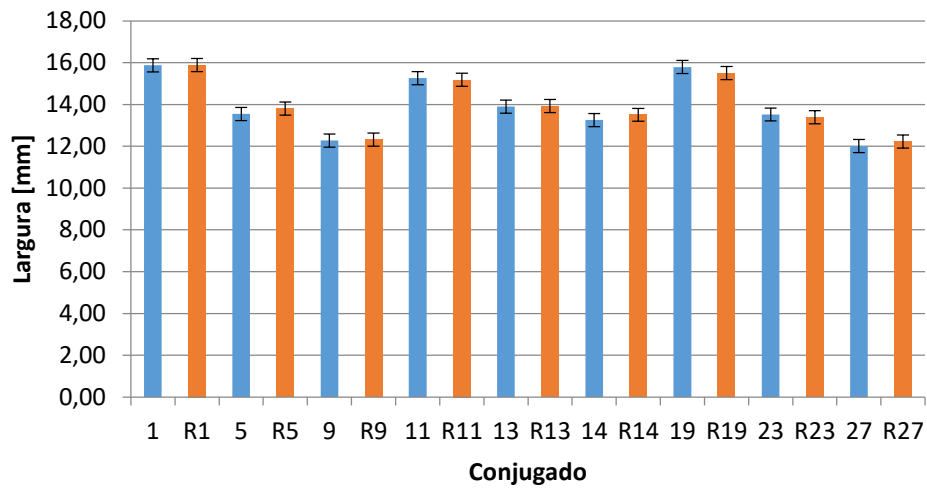


Gráfico 1 – Variação das larguras dos revestimentos
Fonte: dados do autor

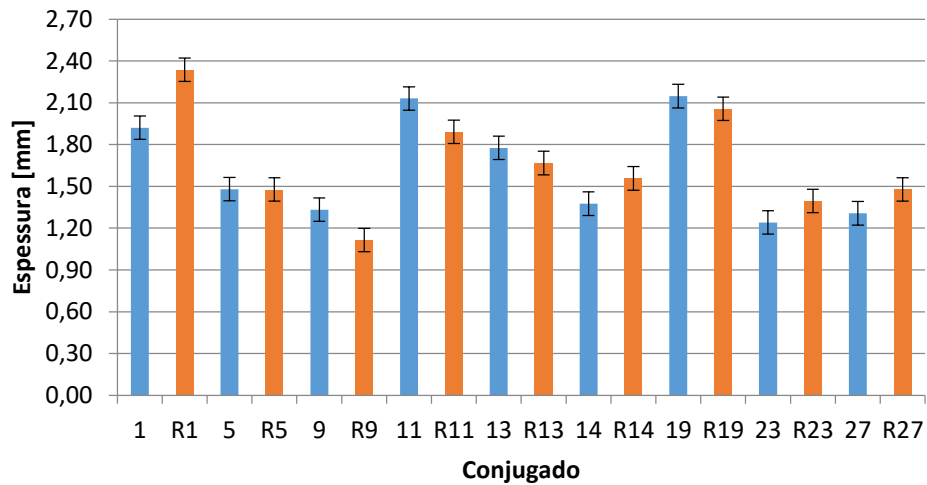


Gráfico 2 – Variação das espessuras dos revestimentos
Fonte: dados do autor

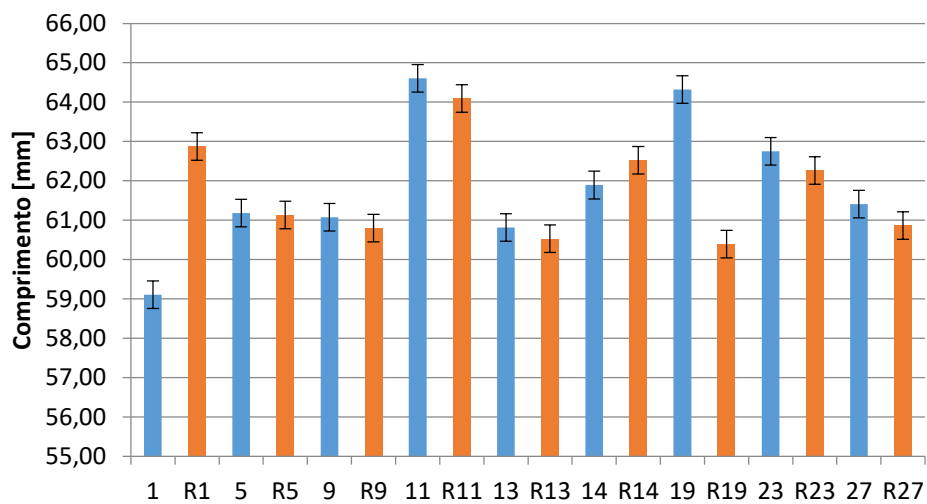


Gráfico 3 – Variação dos comprimentos dos revestimentos
Fonte: Dados da Pesquisa

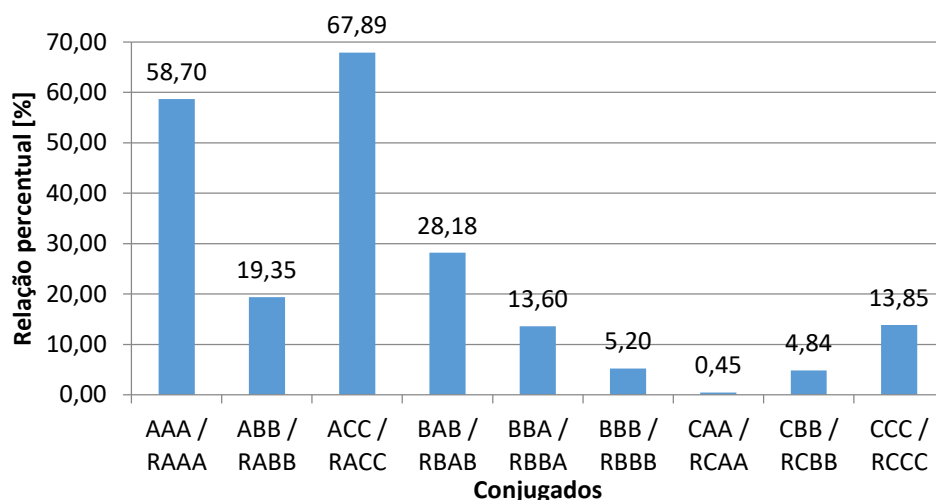


Gráfico 4.4 – Relação entre as rugosidades das amostras principais e réplicas

Fonte: dados do autor

Com o aumento da rotação nota-se uma redução da largura, o que corrobora com os resultados obtidos por outros autores, Rafi et al. (2010), Macedo (2011), Gandra et al. (2014), Perez (2016), Troysi (2016). Onde os autores relacionam esse comportamento com a presença de um plano real de contato rotacional e notou-se que a área do plano diminui com o aumento da rotação e assim diminui a transferência de material da haste consumível para o revestimento.

Como aumento da velocidade de deposição percebe-se que também há uma diminuição da largura do revestimento. Propõe-se que com o aumento da velocidade de deposição do revestimento o tempo de contato entre a haste consumível e o substrato será menor, diminuindo a energia de entrada para o processo o que condiz com a literatura nos trabalhos realizados por Gandra et al. (2012), Kumar et al. (2015), Perez (2016), Rafi et al. (2010). Percebe-se que a rugosidade, entretanto, não apresentou uma variação significativa, com um ligeiro aumento da largura nos revestimentos realizados em substratos que apresentaram $R_q = 1,622 \mu\text{m}$.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se a deposição do aço ABNT 4340 sobre o aço ABNT 1020 por meio da técnica de revestimento por atrito - FSS com o intuito de avaliar o dimensional do conjugado. Utilizou-se como parâmetros de entrada três valores diferentes para rugosidade do substrato (aço ABNT 1020), rotação da haste consumível (aço ABNT 4340) e velocidade de deposição do revestimento.

Baseado nos resultados algumas considerações podem ser realizadas:

- é possível realizar a deposição do aço ABNT 4340 em substrato ABNT 1020 com sucesso;
- os revestimentos realizados apresentaram um bom rendimento, indicando uma boa relação de conservação de massa entre as hastes consumíveis e substratos;
- os revestimentos se mostraram com bons aspectos morfológicos para todos os parâmetros de entrada, sem a aparência de falhas e deslocamentos após a deposição;
- tanto a rotação da haste consumível bem como a velocidade de deposição apresenta grande influência no aspecto da largura e espessura do revestimento;
- menores valores de rotação e velocidade de deposição formaram revestimentos mais espessos e de maiores larguras;
- Verificou-se que o parâmetro de rotação é mais influente na largura do revestimento, em função da formação de um plano rotacional de contato que reduz a transferência de material da haste consumível para o substrato quando a rotação é aumentada;
- A velocidade de deposição, por sua vez, possui maior influência na espessura do revestimento se comportando de maneira inversamente proporcional. Para menores valores de velocidade de deposição a haste consumível permanece maiores intervalos de tempo em contato com o substrato, gerando maior quantidade de energia de entrada no processo o que tenderia a aumentar o valor da espessura dos revestimentos;
- Notou-se que os valores de comprimento dos revestimentos não são influenciados pelos parâmetros de entrada do processo e sim pela programação da máquina ferramenta;
- Por fim, observou-se que a rugosidade dos substratos não se mostrou como parâmetro de influência nas variações dimensionais dos revestimentos;

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK, volume 1, properties and selection: irons, steels, and high performance alloys.

B. VIJAYA KUMAR, G. MADHUSUDHAN REDDY, T. MOHANDAS. Influence of process parameters on physical dimensions of AA6063 aluminium alloy coating on mild steel in friction surfacing. **Defence Technology** **11**, 275 -281, 2015.

BEDFORD, G. M. et al., On the Thermo-Mechanical Events During Friction Surfacing of high speed steels. **Surface and Coatings Technology** **141**, p.34-39, 2001.

D. PEREIRA, J. GANDRA, J. PAMIES-TEIXEIRA, R.M. MIRANDA, P. VILAÇA, **Wear behavior of steel coating produced by friction surfacing**. Journal of Materials Processing Technology, p.2858 – 2868, 2014.

J. GANDRA, R.M. MIRANDA, P. VILAÇA. Performance analysis of friction surfacing. **Journal of Materials Processing Technology** **212**, 1676-1686, 2012.

GALVIS, J.C., OLIVEIRA, P.H.F., HUPALO, M.F., MARTINS, J.P., CARVALHO, A.L.M. Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine. **Journal of Materials Processing Technology** **245**. 91–105. 2017.

GOVARDHAN, D. et al., Characterization of Austenitic Stainless Steel Friction Surfaced Deposit over Low Carbon Steel. **Materials and Design** **36**, p.206-214, 2012.

HANKE, S., BEYER, M., SANTOS, J.F., FISCHER, A. Friction surfacing of a cold work tool steel – Microstructure and sliding wear behavior. **Wear** **308**, p. 180 – 185. 2013.

K. PRASAD RAO, A. VEERA SREENU, H. KHALID RAFI, M.N. LIBIN, KRISHNAN BALASUBRAMANIAM. Tool steel and copper coatings by friction surfacing – A thermography study **Journal of Materials Processing Technology**, **212**, 402 – 407, 2012.

KUMAR, M. V., SATISH, S. V. Friction Stir Surfacing of Copper. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, 1414 – 1418, 2014.

PEREZ, J. C. G., Avaliação do processo de deposição superficial por atrito em liga de alumínio AA6351-T6 sobre substrato de liga de alumínio AA5052-H32. **Dissertação de Mestrado UEPG**.

RAFI, K. H., JANAKI RAM, G. D., PHANIKUMAR, G., RAO, P.K. Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity, **Surface & Coatings Technology** **205**, p. 232-242, 2010.

V. I. VITANOV, N. JAVAID, D. J. STEPHENSON, **Application of response surface methodology for the optimization of micro friction surfacing process**, Surface & Coatings Technology **204** pp. 3501-3508, 2010.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

INFLUENCE OF SUBSTRATE ROUGHNESS IN MORPHOLOGY AND DIMENSIONING OF COATINGS PERFORMED BY "FRICTION STIR SURFACING"

Silva K.H.S, klaushigor@gmail.com^{1,2}

Santos, I.B, italobsantos@gmail.com^{1,2}

Paula R.G, raphaelmecanica@gmail.com²

Câmara M. A, marcelocamara@demec.ufmg.br²

Abrão A.M, abrao@demec.ufmg.br²

¹ Pontifical Catholic University of Minas Gerais

² Federal University of Minas Gerais

Abstract: The friction stir surfacing process occurs from the plastic deformation of the materials involved where initially a consumable rod (deposition material) is rotated and pressed against the substrate at an axial load. This load associated with the rotational movement of the rod causes an increase in the temperature at the interface due to the friction between the materials. The combination of pressure and temperature generates a viscoplastic layer at the interface of the conjugate, and thus, overlapping the consumable rod in the longitudinal direction of the substrate occurs the coating.

The present work intends to evaluate the effect of the change of the roughness of the substrate on the behavior of the conjugate with respect to the morphology and dimensional control of the coating through visual analysis and measurements in coordinate measuring machine. In addition, the effects of changes in input parameters such as consumable rod rotation and coating deposition speed were evaluated.

The depositions by the friction stir surfacing process are often performed with the aid of a process machine, however, in this work a numerically controlled machining center for such a process was used successfully.

Keywords: friction stir surfacing, roughness and morphology

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.