

O USO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO POR FRICÇÃO PARA RECUPERAÇÃO DE COMPONENTES EM AÇO DE ALTO CARBONO¹

Márcio Levi Kramer de Macedo²

Gustavo Alves Pinheiro³

Jorge Fernandez dos Santos⁴

Telmo Roberto Strohaecker⁵

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados de um processo alternativo de reparos em defeitos superficiais de componentes fabricados em aço de alto carbono utilizando o processo de soldagem de deposição superficial por fricção (Friction Surfacing). Foram avaliadas as influências dos parâmetros do processo de deposição como: pressão axial e velocidade de avanço do pino consumível nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos depósitos com diferentes materiais consumíveis depositados. Os depósitos foram realizados em um equipamento composto de um sistema hidráulico fixo a um pórtico rígido com uma mesa móvel. Os parâmetros de pressão axial, velocidade de rotação do pino consumível e velocidade de avanço são controlados através de softwares. Para este estudo foram utilizados como material do substrato chapa de aço carbono ABNT 1070 e como pinos consumíveis os aços ABNT 4140, ABNT 8620 e AISI 310 com 20 mm de diâmetro. Os parâmetros de deposição foram: pressão axial de 105 MPa e 150 MPa, velocidade de rotação de 3500 rpm e velocidade de avanço de deposição de 8,5 mm/s e 17 mm/s. Nos depósitos foram realizadas caracterizações mecânicas/metalúrgicas. Os resultados relatados neste trabalho são preliminares, porém muito promissores.

Palavras-chave: Deposição superficial; Fricção; Soldagem; Aços alto carbono.

USE OF FRICTION SURFACING PROCESS FOR RECOVERY OF COMPONENTS OF HIGH IN CARBON STEEL

Abstract

This work aims to present results of an alternative repair defects in the surface of components manufactured in the high-carbon steel using the friction surfacing process. Were evaluated the influences of the parameters of the process of deposition as: axial pressure and traverse speed of the rod consumables in mechanical and metallurgical properties of the deposits with different consumables deposited. The deposits were made in a device composed of a hydraulic system fixed to a rigid frame with a movable table. The parameters of axial pressure, rotational speed of the rod consumables and traverse speed are controlled through software. For this study were used as material of the substrate carbon steel plate ABNT 1070 and the rods consumables ABNT 4140, ABNT 8620 and AISI 310 with 20 mm diameter. The parameters of deposition were: axial pressure of 105 and 150 MPa, rotational speed of 3500 rpm and traverse speed of 8,5 and 17 mm/s. The deposits were made characterizations mechanical and metallurgical. The results reported in this study are preliminary, but very promising.

Key words: Deposition; Friction; Welding; Steel.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Doutorando em Eng. Metalúrgica, LAMEF – DEMET - UFRGS.*

³ *Doutorando em Engenharia, Joining Technology – GKSS (Geesthacht-Alemanha).*

⁴ *Doutor em Engenharia, Head of Joining Technology – GKSS (Geesthacht-Alemanha).*

⁵ *Doutor em Engenharia, Professor do DEMET e Coordenador do LAMEF – UFRGS.*

1 INTRODUÇÃO

A fim de melhorar as propriedades de superfície e aumentar a vida útil de componentes e estruturas e com isso diminuir os custos relativos às paradas não programadas e/ou troca por novos componentes, diversas técnicas de modificações superficiais e de revestimentos foram desenvolvidas, dentre estas podemos citar: filmes finos por PAPVD, deposição por arco elétrico, deposição a plasma, tratamentos térmicos e termoquímicos, deposição a laser e deposição por fricção, entre outras.

Em busca de novas alternativas de recuperar ou modificarem superficialmente componentes ou estruturas construídas de aço alto carbono, estudou-se a viabilidade de utilizar a técnica de deposição superficial por fricção (Friction Surfacing).

A soldagem por fricção faz parte de um dos processos de soldagem no estado sólido conforme a denominação da *American Welding Society* – AWS.⁽¹⁾ Dentro da soldagem por fricção já existem em torno de 16 variações ou formas de soldagem utilizando o princípio, conforme demonstra os estudos realizados pelo *The Welding Institute* – TWI.⁽²⁾

Dentre estes está o processo de deposição superficial por fricção (*Friction Surfacing*), tendo sido inventado e patenteado em 1941 por Klopstock e Neeleands,⁽³⁾ porém a técnica ficou em desuso até o ano de 1959. A partir de 1959, pesquisadores russos publicaram três trabalhos datados de 1959, 1970 e 1971.⁽⁴⁾ Após estes trabalhos somente em 1984 foram publicados trabalhos realizados pelo TWI e pela Portsmouth Polytechnic,⁽⁴⁾ os quais descrevem o processo e demonstram a praticidade da técnica em determinados aços. Entretanto, comercialmente, somente apareceu na última década, através do patenteamento de um processo conhecido como “FRICTEC”,⁽⁵⁾ que é um processo de deposição por fricção caracterizada por uma alta pressão de contato durante a deposição (pressão acima de 100 MPa).

Nos últimos anos tem aumentado consideravelmente a quantidade de trabalhos realizados utilizando a técnica de deposição superficial por fricção utilizando diversos tipos de materiais depositados.

Van Kalken⁽³⁾ em sua dissertação de mestrado apresentou um estudo de deposição de um aço inoxidável austenítico em substrato de aço baixo carbono utilizando um robô TRICEPT 600. A vantagem do uso do robô é que se pode realizar depósitos em três dimensões (3D) bem como automatizar o processo.

Uma das vantagens do processo de deposição por fricção é a possibilidade de deposição de materiais dissimilares. Chandrasekaran et al.⁽⁶⁾ investigaram a deposição de aço ferramenta, ligas à base de níquel (Inconel), ligas de alumínio e ligas de titânio em substrato de aço baixo carbono e aço inoxidável, aço baixo carbono e Inconel em substrato de alumínio. Eles observaram que o aço ferramenta e o Inconel depositaram muito bem em substrato de aço baixo carbono e que o alumínio depositou somente com o aumento da força aplicada. Por outro lado o titânio não depositou em nenhuma das condições testadas (talvez pela alta plasticidade as temperaturas alcançadas pelo processo). Quando utilizou o alumínio como substrato, observaram a formação de uma camada intermetálica (via análise por microsonda EDS), menos quando usado o aço inoxidável, indício que ocorre uma fusão localizada do alumínio, que indica uma relação inadequada de parâmetros. A deposição do aço baixo carbono no substrato de alumínio pode ser realizada com sucesso. Por outro lado, a deposição de aço inox requer maiores

forças aplicadas, maiores rotações e velocidades de avanço em relação ao depósito de aço baixo carbono para se alcançar um bom depósito.

Outro uso do processo de deposição por fricção é em ambientes subaquáticos, os quais foram pensados para recuperação e deposição superficial em tubulações e estruturas offshore. Em seu estudo Li e Shinoda⁽⁷⁾ depositaram um aço inoxidável martensítico AISI 440C em substrato de aço carbono estrutural em condições ao ar e embaixo da água. Eles concluíram que embaixo da água os depósitos apresentaram maior uniformidade do que em deposição ao ar e que o perfil de dureza também se apresentou mais uniforme nesta condição com uma microestrutura mais refinada do que os depósitos ao ar.

O processo de deposição superficial por fricção foi desenvolvido como uma técnica alternativa para recobrimentos superficiais resistentes ao desgaste e consiste em um processo de soldagem que ocorre no estado sólido, ou seja, não há fusão dos metais (substrato e pino consumível). Um pino consumível é utilizado para produzir o depósito no componente ou estrutura desejado (substrato). Este consumível é submetido a uma elevada carga axial e a um movimento rotacional aplicados ao substrato, dando início ao processo de fricção. O calor gerado pela fricção entre o consumível e o substrato faz com que ocorra o aquecimento, logo a plastificação do consumível. Após ocorrer a plastificação, o consumível é submetido a um movimento transversal relativo (avanço) fazendo com que ocorra o depósito de uma camada do consumível no substrato.⁽⁸⁻¹¹⁾ A Figura 1 mostra o processo de deposição por fricção. A camada depositada caracteriza-se pela microestrutura refinada devido ao processo de recristalização (semelhante ao forjamento à quente) e com excelente adesão metalúrgica devido à difusão (facilitada pela temperatura elevada) e adesão mecânica junto à interface do depósito com o substrato, e isenta de alguns defeitos como vazios, porosidades e inclusões comuns em processos de soldagem por fusão.⁽⁸⁾ Cabe salientar que a temperatura durante o processo é elevada, porém não atinge a temperatura de fusão do material (por isso o processo é conhecido como em estado sólido).

A espessura do depósito pode variar de 0,5 mm a 6 mm a qual dependerá do diâmetro do pino consumível, do material a ser depositado e da capacidade de carga do sistema.⁽⁸⁾

Em relação aos processos de soldagem por fusão e termospray, a deposição por fricção apresenta algumas vantagens, pois o processo é limpo, não libera fumos tóxicos, respingos, radiação, a diluição é considerada como desprezível (em torno de 20 μm), a zona termicamente afetada (ZTA) é estreita, o depósito é isento de porosidades, inclusões de escória e microestruturas brutas de fusão. O aproveitamento da energia é eficiente, e o calor gerado é utilizado somente aonde é necessário.⁽⁸⁾

Neste trabalho foram estudadas as influências de alguns parâmetros do processo, como: pressão axial, velocidade de deposição e material depositado, através de uma seqüência de deposição em diversas condições objetivando encontrar os melhores parâmetros de deposição. Os depósitos foram analisados e caracterizados quanto às propriedades mecânicas e metalúrgicas através dos seguintes ensaios: análise macrográfica, análise micrográfica, perfis de microdureza e ensaios de carga (*push-off test*).

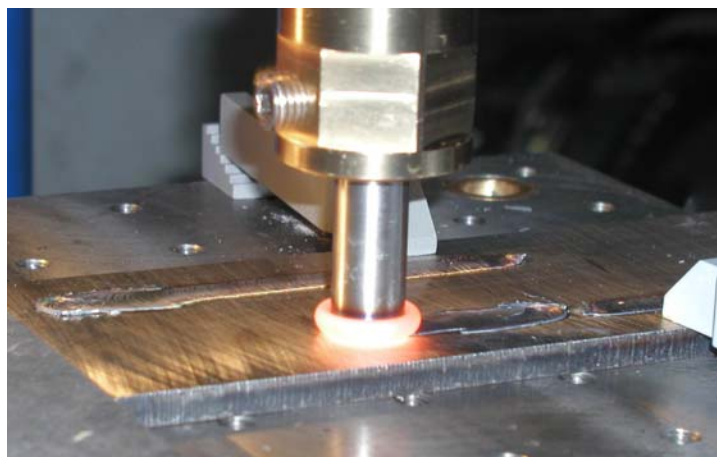


Figura 1. Macrografia mostrando o processo de deposição por fricção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado como substrato foram chapas de aço carbono ABNT 1070, conforme a composição química da Tabela 1. As dimensões das chapas foram de 50 x 150 x 9 mm (largura x comprimento x espessura).

Os pinos consumíveis foram feitos de barras redondas de aços carbono ABNT 4140, ABNT 8620 e aço inoxidável austenítico AISI 310 com diâmetro de 20 mm. As composições químicas dos pinos consumíveis estão na tabela 2. Todas as análises químicas foram realizadas em um espectrômetro de emissão óptica da marca Spectro.

Tabela 1 Composição química do substrato de aço carbono ABNT 1070.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
ABNT 1070	0,73	0,22	0,71	0,015	0,004	0,39	<0,005	0,02

Tabela 2 Composição química dos pinos consumíveis.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
ABNT 4140	0,40	0,23	0,82	0,019	0,049	0,97	0,17	0,20
ABNT 8620	0,19	0,22	0,85	0,014	0,027	0,49	0,21	0,40
AISI 310	0,07	0,37	1,18	0,036	0,013	24,91	0,19	19,69

Os depósitos foram realizados em um equipamento, pertencente ao grupo de soldagem (*Joining Technology*) do Instituto GKSS (Geesthacht-Alemanha), composto de um sistema hidráulico com potência de 50kW com capacidade de aplicar carga axial de 40kN e velocidade de rotação de até 8000 rpm. O sistema hidráulico é fixado a um pórtico rígido que tem uma mesa móvel onde é fixado o substrato, como mostra a Figura 2. O ciclo de soldagem é controlado através de um software, onde são colocados os parâmetros de soldagem de pressão axial e velocidade de rotação. A velocidade de avanço do depósito é controlada pelo sistema que move a mesa.

Os parâmetros de deposição e os materiais utilizados neste trabalho estão na Tabela 3. Para todas as séries foram realizadas três repetições.



Figura 2. Vista do equipamento de deposição por fricção.

Tabela 3 Parâmetros de deposição

Série	Substrato	Pino Consumível	Velocidade de Rotação (rpm)	Pressão Axial (MPa)	Velocidade de Avanço (mm/s)
1	ABNT 1070	ABNT 8620	3500	105	8,5
2	ABNT 1070	ABNT 8620	3500	105	17,0
3	ABNT 1070	ABNT 8620	3500	150	8,5
4	ABNT 1070	ABNT 8620	3500	150	17,0
5	ABNT 1070	ABNT 4140	3500	105	8,5
6	ABNT 1070	ABNT 4140	3500	105	17,0
7	ABNT 1070	ABNT 4140	3500	150	8,5
8	ABNT 1070	ABNT 4140	3500	150	17,0
9	ABNT 1070	AISI 310	3500	105	8,5
10	ABNT 1070	AISI 310	3500	105	17,0
11	ABNT 1070	AISI 310	3500	150	8,5
12	ABNT 1070	AISI 310	3500	150	17,0

As caracterizações mecânico-metalúrgica dos depósitos foram as seguintes: macrografia dos depósitos e em corte transversal, micrografias, perfil de microdureza e ensaios de carga (*push-off test*).

Para as macrografias dos depósitos foi utilizada uma câmera digital. Nas macrografias em corte transversal foi necessária a preparação da amostra através de corte, lixamento, polimento e posterior ataque químico com o reagente Nital 2%. Os mesmos corpos de prova utilizados para estas macrografias foram utilizados para as micrografias em microscópio óptico (MO), bem como para a realização dos perfis de microdureza. Os perfis de microdureza foram realizados utilizando um microdurômetro da marca Struers com carga de 200 gf.

Para os ensaios de carga, os substratos antes de serem realizados os depósitos foram usinados, onde ao centro do mesmo foi realizado um tampo cônico, conforme mostra o desenho esquemático da Figura 3. O ensaio de carga consiste em, após ser realizado o depósito, empurrar este tampo falso e, com isso, obter a carga a qual o depósito suportou até descolar do substrato. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos servo controlada da MTS.

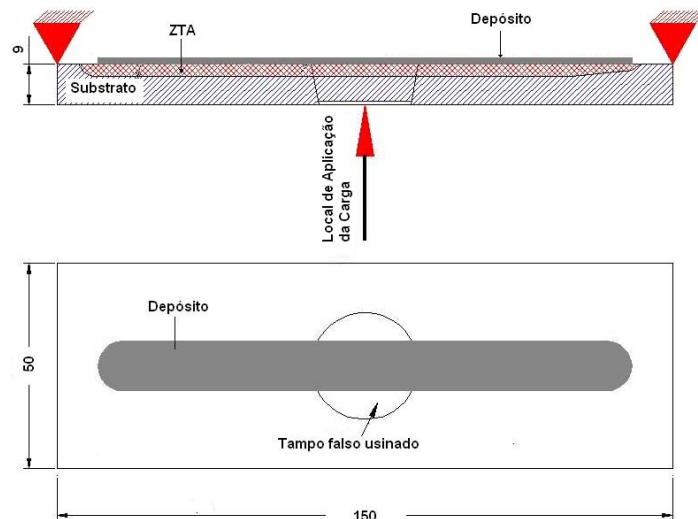


Figura 3. Desenho esquemático do ensaio de carga (push-off test).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Macrografias

As macrografias dos depósitos com os pinos consumíveis ABNT 8620, ABNT 4140 e AISI 310 encontram-se nas Tabelas 4 a 6, respectivamente.

Analisando as macrografias pode-se observar que quando foi utilizado os parâmetros de deposição com pressão axial de 150 MPa e velocidade de avanço 8,5 mm/s (séries 3 e 7) o depósito não ocorreu de forma homogênea como nas outras séries. Este fato ocorreu nas séries 3 e 7 com os pinos consumíveis de aço ABNT 8620 e 4140, porém o mesmo não ocorreu no pino de aço inoxidável AISI 310 (série 11). Este problema ainda está sendo investigado.

Nas demais séries os depósitos foram considerados bons em uma análise visual, pois os mesmos ocorreram de forma homogênea.

A influência da velocidade de avanço pode ser vista nas macrografias, podendo ser destacado que quando foram utilizados avanços menores o depósito apresentou-se com maior largura. Isto pode ser explicado pelo fato de ter mais tempo de processamento do pino plastificado. Na análise macrográfica em corte transversal pode-se constatar que quando foi utilizada a velocidade de avanço menor os depósitos apresentaram uma largura maior e em conjunto com menores forças axiais aplicadas também resultam em depósitos com espessuras maiores. Estes fatos corroboram com os estudos realizados por Van Kalken⁽³⁾ e Vitanov et al.,^(12,13) enquanto que em velocidades de avanços maiores observou-se que diminui a ZTA, pelo fato do tempo de processamento do pino ser menor e com isso menor o calor localizado.

Tabela 4. Macrografias dos depósitos com pino consumível ABNT 8620.


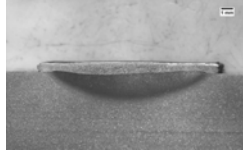

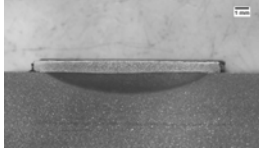


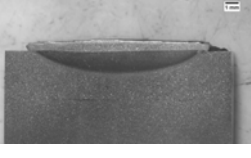
	Vista como depositado	Vista em corte transversal
Série 1		
Série 2		
Série 3		-
Série 4		

Tabela 5. Macrografias dos depósitos com pino consumível ABNT 4140.








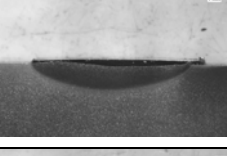

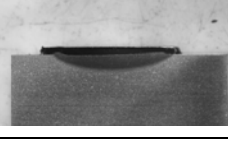
	Vista como depositado	Vista em corte transversal
Série 5		
Série 6		
Série 7	Não depositou	-
Série 8		

Tabela 6. Macrografias dos depósitos com pino consumível AISI 310.

	Vista como depositado	Vista em corte transversal
Série 9		
Série 10		
Série 11		
Série 12		

3.2 Micrografias

A Figura 4 mostra a micrografia em microscópio óptico do material do substrato original sem a interferência do processo, composta de perlita. A Figura 5(a) mostra as micrografias da interface do depósito do pino de aço ABNT 8620 e o substrato de aço ABNT 1070, onde a microestrutura no depósito apresentou-se composta de bainita e alguma perlita não transformada e no substrato (região da ZTA) composta de martensita. Estas microestruturas podem ser explicadas pelo fato da temperatura do material do depósito e da região do substrato a qual houve o contato de fricção alcançar temperaturas de austenitização dos materiais envolvidos e com subsequente resfriamento ao ar.

Na Figura 5(b) observa-se a região conhecida como solda fria (*cold lap*) a qual não adere ao substrato. Esta região que ocorre nos dois lados do depósito é inerente ao processo, porém pode ser minimizada através da escolha adequada dos parâmetros de soldagem (ex: como o aumento da pressão axial).

A Figura 6 mostra as micrografias da interface do depósito do pino de aço ABNT 4140 e o substrato. Com esse material a microestrutura do depósito apresentou microestrutura composta de martensita bem como a região da ZTA do substrato. A diferença das microestruturas martensíticas se deve ao teor de carbono do pino e do substrato.

A região de interface dos depósitos realizados com o pino de aço inoxidável AISI 310 está mostrada na Figura 7. Observa-se que a microestrutura do depósito não foi revelada, pois a amostra foi atacada com Nital 2% o qual somente revelou a microestrutura do substrato composta de martensita. Por esta figura pode observar que a diluição entre o depósito e o substrato não é visível na escala usada e que somente é observada e uma escala de poucos microns. Uma das formas de adesão do depósito é o mecanismo de ligação mecânica através das rugosidades dos materiais provocadas durante o processo de fricção e avanço do depósito, mecanismo este que pode ser visto nas Figuras 5(a) e 7.

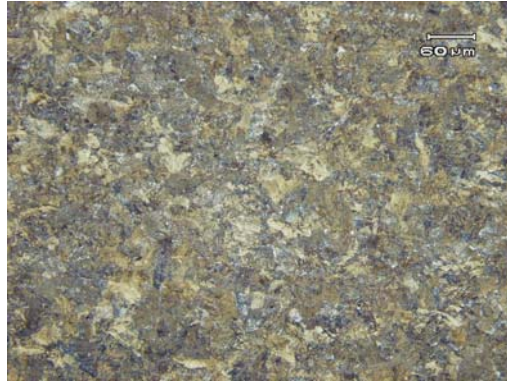


Figura 4. Micrografia mostrando a microestrutura do material do substrato original, sem a interferência do processo.

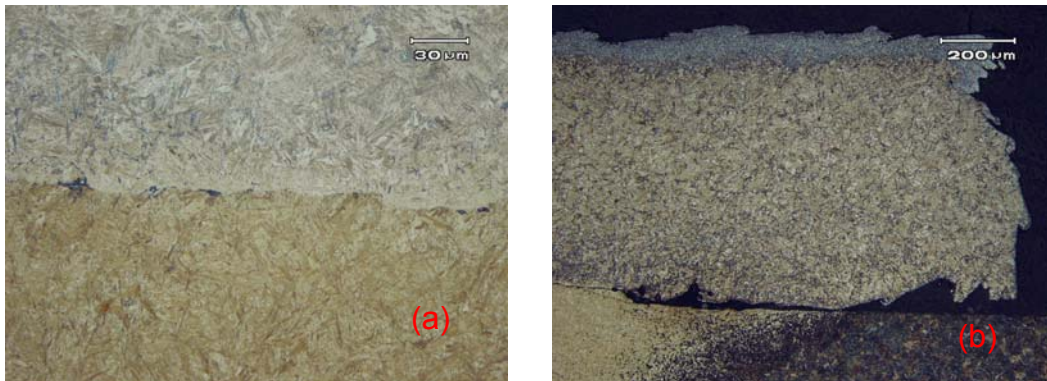


Figura 5. Micrografias mostrando em (a) a região de interface depósito/substrato e em (b) a região lateral do depósito mostrando a região de solda fria.



Figura 6. Micrografia em MO mostrando a região de interface entre o depósito do pino ABNT 4140 e o substrato.

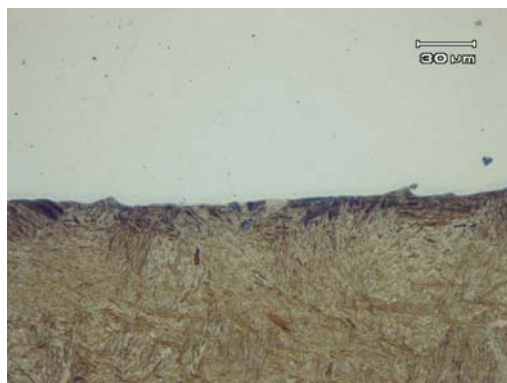


Figura 7. Micrografia em MO mostrando a região de interface entre o depósito do pino de aço inoxidável AISI 310 e o substrato. Observa-se que o depósito está sem ataque.

3.3 Perfis de Microdureza

Os resultados dos perfis de microdureza encontram-se nos gráficos da figura 8. Os gráficos são de microdureza Vickers (HV) pela distância em mm, sendo o ponto 0 com início na superfície do depósito em direção ao substrato. Observa-se em todos os gráficos que existem três regiões distintas. A primeira região que vai do ponto 0 até aproximadamente 1 mm nos gráficos (a) e (b) e até aproximadamente 0,5 mm no gráfico (c) corresponde a região do depósito (espessura do depósito), do ponto 1 a 2,5 mm corresponde a região da ZTA do substrato a qual apresentou valores de até 900 HV pelo fato de nesta região a microestrutura apresentar-se na forma de martensita. A terceira região têm início entre a distância de 2,5 mm a 3 mm até 5mm na qual a dureza se estabiliza, esta região é do substrato sem influência do processo de deposição e do calor gerado no processo.

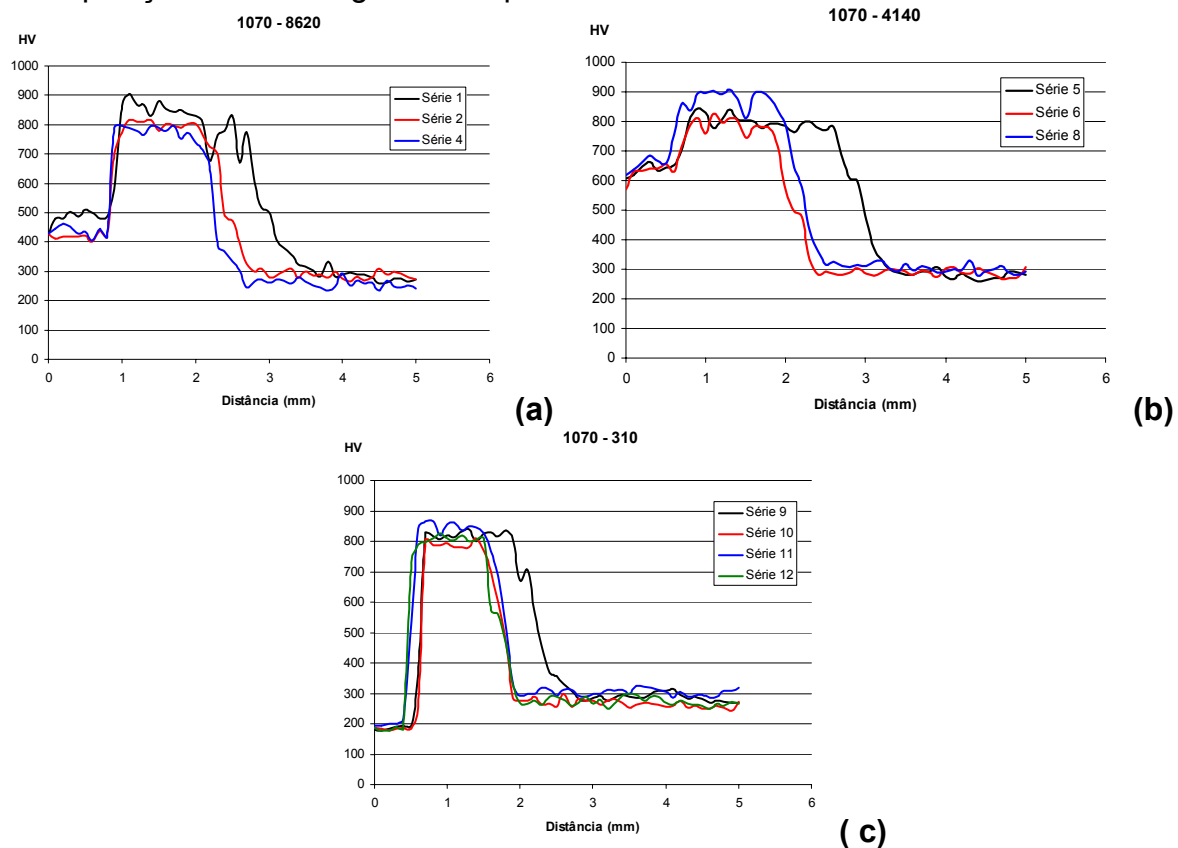


Figura 8. Gráficos com os perfis de microdureza. O início dos perfis é na superfície dos depósitos

3.4 Ensaio de Carga

Os resultados dos ensaios de carga foram plotados nos gráficos da figura 9. Os gráficos foram realizados fazendo carga aplicada em Newton (N) pelo deslocamento em mm. Pelos resultados mostrados nos gráficos pode-se observar que a velocidade de avanço de deposição teve uma influência significativa. Comparando os depósitos realizados com velocidades menores (8,5 mm/s) e os depósitos realizados com velocidades maiores (17 mm/s) e utilizando a mesma pressão axial, observou-se que foi necessária uma carga aplicada maior para destacar os depósitos que foram realizados com velocidades de avanço menores. Com a velocidade de avanço menor têm-se maior tempo de deposição facilitando os

mecanismos de adesão do depósito ao substrato. Estes resultados também foram encontrados nos trabalhos de Vitanov et al.^(12 e 13)

Quanto ao parâmetro de pressão axial aplicada, também se observou que aumentando a pressão axial foi necessária uma carga aplicada maior para destacar o depósito em relação aos depósitos realizados com pressões axiais menores, conforme mostra o gráfico da Figura 9 (c). Isto se deve ao fato que com pressões maiores têm-se um maior contato íntimo dos materiais do depósito e do substrato.^(12,13)

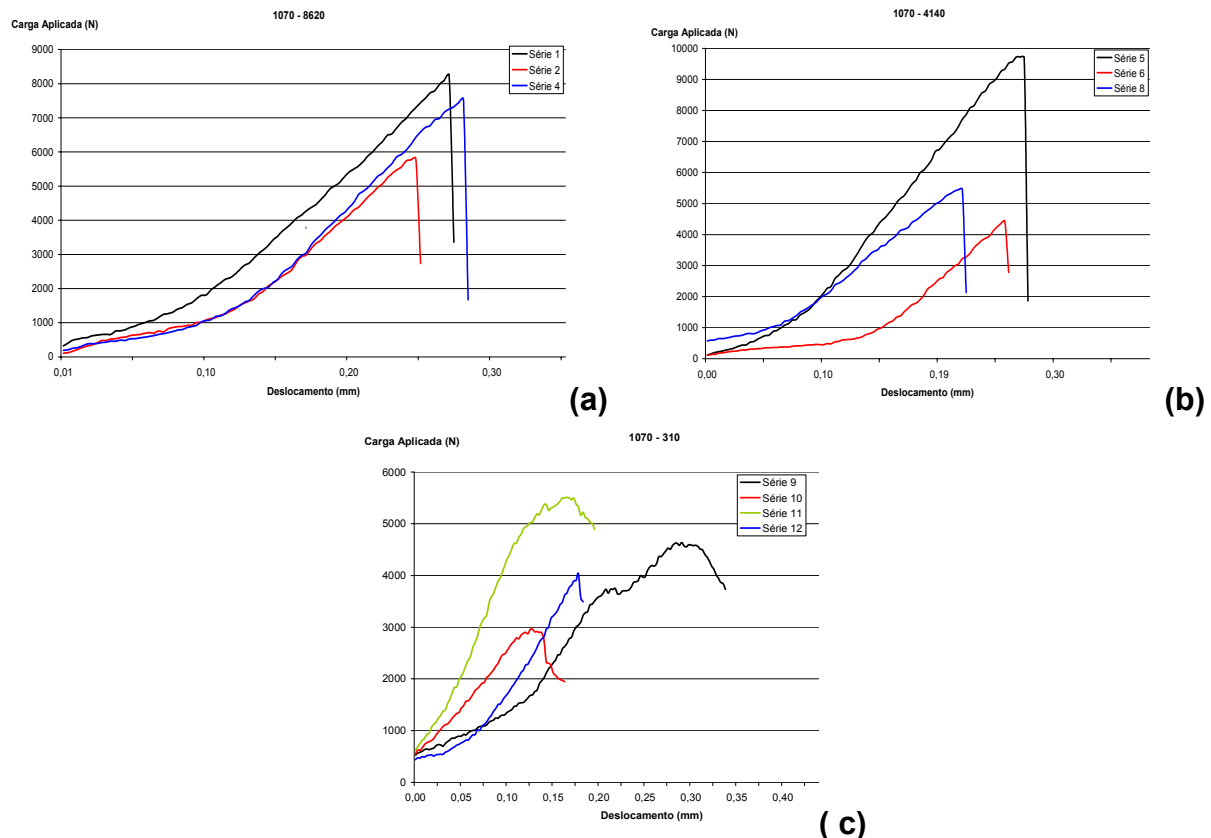


Figura 9. Gráficos com os resultados dos ensaios de carga. O gráfico (a) mostra os resultados dos depósitos em aço ABNT 8620, gráfico (b) dos depósitos em aço ABNT 4140 e o gráfico (c) dos depósitos em aço AISI 310.

5 CONCLUSÃO

Pelos estudos realizados pode-se concluir que o processo de deposição superficial por fricção pode ser utilizado como alternativa para recuperação de componentes em aços de alto carbono bem como ser utilizado como processo para deposição de materiais dissimilares tanto em recuperação como para melhorias de propriedades de desgaste e corrosão (ex: recobrimento de chapas de aço carbono com depósitos de aço inoxidável).

Os parâmetros de deposição são muito relevantes para obtenção de um depósito de qualidade, onde a priori os depósitos realizados com pressão axial maior (150 MPa) e velocidade de avanço menor (8,5 mm/s) foram o melhor conjunto de parâmetros para a deposição de pinos de aço inoxidável AISI 310. Para os depósitos com pinos de aço ABNT 8620 e 4140 está avaliação ficou prejudicada pelo fato de não termos os depósitos com os parâmetros acima, porém pelos resultados obtidos pode-se

avaliar que a velocidade de avanço menor obteve melhores resultados que os depósitos com velocidades de avanço maiores.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Eng. Mathias Beyer (GKSS) pela ajuda na execução dos depósitos, ao meu sobrinho Anderson K. Pelufa pela ajuda nas análises e ensaios. A todos os colegas que me ajudaram neste trabalho. Ao suporte dado pelo Instituto GKSS e pelo LAMEF-UFRGS. A CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook – Welding Processes – Part 2. 8th Edition.
- 2 NICHOLAS, E.D. Friction Processing Technologies. The Welding Institute, Disponível em: www.twi.org.
- 3 VAN KALKEN A ., Friction Surfacing of Stainless Steel on Mild Steel With a Robot. Dissertação de Mestrado. Delft University of Technology, 2001.
- 4 THOMAS, W.M. An Introdution to Friction Surfacing. Surface Engineering Conference, 1985, vol.3, paper 49, pp.261-277.
- 5 BATCHELOR, A . W. et all, The Effect of Metal Type and Multi-layering on Friction Surfacing. Journal of Materials Processing Technology, 57, 1996, pp.172-181.
- 6 CHANDRASEKARAN, M. et all. Friction Surfacing of Metal Coatings on Steel and Aluminum Substrate. Journal of Materials Processing Technology 72 (1997), pp.446-452.
- 7 LI, J.Q. and SHINODA, T. Underwater Friction Surfacing. Surface Engineering 2000, vol.16, N^o1, pp.31-35.
- 8 BEDFORD, G.M. Friction Surfacing for Wear Applications. Metals and Materials, November 1990, pp.702-705
- 9 NHICOLAS, E.D. and THOMAS, W.M. Metal Deposition by Friction Welding. Welding Journal, August 1986, pp.17-27.
- 10 NICHOLAS, E.D. Friction Surfacing. Metals Handbook Vol.6, pp.321-323.
- 11 BEDFORD, G.M. et all. On the Thermo-mechanical Events During Friction Surfacing of High Speed Steels. Surface and Coatings Technology 141 (2001), pp.34-39.
- 12 VITANOV, V.I. et all, Decision Support System to Optimize the FRICTEC (Friction Surfacing) Process. Journal of Materials Processing Technology, 107, 2000, pp.236-242.
- 13 VITANOV, V.I et all, Neurofuzzy Approach to Process Parameter Selection for Friction Surfacing Applications. Surface and Coatings Technology 140, 2001, pp.256-262.