

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA DEPOSIÇÃO DE LIGA INOX COM COBALTO RESISTENTE À CAVITAÇÃO VIA ASPERSÃO TÉRMICA¹

Anderson Pukaszewicz²

André Ricardo Capra³

Ramón S. Cortés Paredes⁴

Joceli da Guia Chandelier⁵

Resumo

Revestimentos resistentes à cavitação depositados por aspersão térmica vêm sendo estudados por não induzir ciclos térmicos, transformações microestruturais e ainda não introduzir tensões residuais durante a deposição. O objetivo deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros de deposição por aspersão térmica a arco elétrico na morfologia, microestrutura, microdureza e resistência à cavitação de uma liga inoxidável austenítica com cobalto. Foram alterados os seguintes parâmetros: corrente, 140A e 180A, distância de aplicação, 120 e 200mm e pressão do ar-comprimido, 40, 60 e 80psi. A morfologia e microestrutura foram avaliadas através de MO e MEV, com determinação da porosidade e teor de óxidos através de software de análises de imagens. Adicionalmente analisou-se a composição química através de EDX. A dureza do depósito foi avaliada através de ensaio de microdureza Vickers e nanodureza. A resistência à cavitação foi determinada através de ensaio por ultra-som, método indireto, com frequência de 20kHz, baseado na norma ASTM G32-96. Os depósitos apresentaram um aumento nos teores de óxidos e uma pequena redução na quantidade de poros com a elevação na pressão e aumento na distância de aplicação. A morfologia dos depósitos também sofreu alteração no tamanho e formato das lamelas. Após os ensaios de resistência à cavitação, verificou-se que não ocorreram falhas nas camadas aspergidas. As amostras mais resistentes foram as que apresentaram menor distância de aplicação e pressão de ar-comprimido intermediária, ou seja, amostras que apresentaram melhor relação entre adesão entre lamelas e menor teor de óxidos.

Palavras-chave: Cavitação; Aspersão térmica; Aço inoxidável; Cobalto.

INFLUENCE OF PARAMETERS IN THE THERMAL SPRAYING DEPOSITION OF THE COBALT STAINLESS STEEL CAVITATION RESISTANT ALLOY

Abstract

Cavitation resistance coating deposited by thermal spraying have been study because not impose residual stress, thermal cycles and transformations in mechanical properties. The aim of this work is study the changes in morphology, microstructure, micro and nanohardness and cavitation resistance of the deposition with thermal spraying parameters. The modified variables in thermal spraying deposition were arc current, (140, 180A), application distance, (120, 200mm) and pressure of the air, (40, 60, 80psi). Cobalt stainless steel was employed in this study. The morphology and microstructure was evaluated by optical and scanning electron microscopy. The chemical composition was measured by EDX. Vickers microhardness and nanohardness, with Berkovich tip, were measured. Cavitation resistance was measured by indirect ultrasound method, with frequency of 20kHz. ASTM G32-96 standard was employed. The results indicate that the increase of the pressure increased the amount oxides. The morphology of the deposit changed with the thermal spraying parameters. After the end of the cavitation tests did not happen failures in the coating. The samples with minor distance of application and middle air pressure were more cavitation resistant.

Key words: Cavitation; Thermal spraying; Stainless steel; Cobalt.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Aluno de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais da UFPR e professor do Campus Ponta Grossa da UTFPR, (41)33616128 - anderson.geraldolactec.org.br

³ Pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC – andré.capra@lactec.org.br

⁴ Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR – ramon.demec.ufpr.br

⁵ Técnico do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC – joceli@lactec.org.br

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da cavitação refere-se à formação e colapso de bolhas de vapor em um fluido, geralmente devido à redução localizada da pressão. O colapso das bolhas de vapor produz pressões elevadas que danificam a superfície e causam perda de massa. A cavitação é o maior problema encontrado em equipamentos hidráulicos como: turbinas de hidrelétricas, válvulas, bombas e propulsores de navios.⁽¹⁾ Aços inoxidáveis são os materiais mais usados para reparos em cavitação, ligas de cobalto e níquel/cobalto Stellite e aços com cobalto como Ireca[®] e Cavitec, apresentam comportamento superior em relação aos aços inoxidáveis.⁽²⁻⁵⁾

O aumento da resistência à erosão em aços tem sido associado à adição de elementos de liga, tais como cromo, níquel, manganês e cobalto, onde as ligas de cobalto e inoxidáveis com cobalto apresentam uma ótima resistência à cavitação. A elevada resistência à cavitação destas ligas pode ser decorrente da baixa energia de falha de empilhamento e transformação de fase induzida por deformação estão diretamente relacionadas com a resistência à cavitação. Em mecanismos onde a cavitação é intensa, ligas com base de cobalto e aços inoxidáveis austeníticos com cobalto têm-se mostrados resistentes à erosão, apesar de suas baixas características de dureza e resistência.⁽²⁻⁴⁾

Normalmente os processos de soldagem e recobrimento utilizados são do tipo eletrodo revestido e/ou MIG/MAG. Onde os ciclos térmicos ocasionados pelo aquecimento localizado, aliado à contração do material depositado, resultam em elevadas tensões residuais. Estas tensões favorecem mecanismos de nucleação e crescimento de trincas e com isso é acelerado o processo de cavitação.⁽⁶⁻⁸⁾

Com a finalidade de se reduzir às tensões residuais ocasionadas pela deposição por soldagem tem-se estudado o recobrimento de peças através de aspersão térmica, que é um processo que envolve a deposição de um material metálico ou não metálico finamente dividido em um estado fundido ou parcialmente fundido em uma superfície preparada para formar uma camada superficial protetora, aliado ao fato de não introduzir tensões residuais a aspersão térmica tem conseguido depositar ligas com boa resistência à erosão.^(7,9,-12)

Diversos trabalhos tem comparado a resistência à cavitação de recobrimentos aspergidos com revestimentos soldados, onde são avaliados revestimentos aspergidos com diferentes técnicas de aspersão, nestes trabalhos verifica-se a importância da preparação da superfície na resistência à cavitação, assim como a menor resistência de revestimento aspergidos em relação aos revestimentos soldados com ligas de elevada resistência à cavitação, porém nestes trabalhos não são estudados a influência dos parâmetros de processo na resistência à cavitação de revestimentos aspergidos.^(7,11,12)

Nos processos de aspersão térmica, os materiais de deposição são fundidos em uma fonte de calor gerada por meio de combustão de gases, arco elétrico ou plasma. Imediatamente após a fusão, o material é acelerado contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou plastificado. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base e as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas, com estrutura lamelar contendo óxidos e poros.⁽¹³⁾

O objetivo deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros envolvidos no processo de aspersão na morfologia, microestrutura, micro e nanodureza e resistência à cavitação de uma liga inoxidável austenítica com cobalto depositada por aspersão térmica por arco elétrico.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi avaliada uma liga inoxidável com cobalto comercial, CAV1 utilizada em processo de soldagem MIG/MAG. Na Tabela 1 é apresentada a composição química desta liga.

Tabela 1. Composição química

	C	Cr	Ni	Co	Si	Mn	Mo	S	Fe
CAV1	0,19	17,0	0,88	8,3	2,03	8,30	--	0,01	Bal.

As amostras foram depositadas utilizando processo de aspensão térmica a arco elétrico, utilizando os parâmetros descritos na Tabela 2. A redução na pressão tem o objetivo de alterar a quantidade de ar que promove a oxidação, a variação na corrente determina uma variação na quantidade de material fundido e a variação na distância de aplicação tem o objetivo de produzir depósitos com maiores velocidades de impacto das partículas. Os substratos de aço carbono foram preparados através de jateamento abrasivo utilizando óxido de alumínio branco (Alundum 38 A) como abrasivo, sendo que as rugosidades obtidas foram de no mínimo 6,0 μm e 40 μm , R_a e R_y , respectivamente, sendo imediatamente depositadas. Para a deposição utilizou-se uma pistola a arco elétrico marca Suzler-Metco modelo 300E.

Tabela 2. Parâmetros utilizados durante a aplicação

Parâmetro	Valores empregados		
Corrente (A)	140	180	
Pressão do ar-comprimido (psi)	40	60	80
Distância pistola-peça (mm)	120	200	
Tensão (V)	30		

A caracterização dos revestimentos foi realizada através de MO, com aquisição através de software de análise de imagens, o MEV foi realizado em um microscópio Philips modelo XL30 com EDX. A microdureza foi realizada através de microdurômetro Vickers com carga de 300gf e nanodurômetro MTS utilizando ponta de diamante do tipo Berkovich e carga de 10gf, a resistência a cavitação foi determinada através de um dispositivo ultrassônico de acordo com a ASTM G32/92, método indireto em um equipamento Telsonic modelo 2000, frequência de 20kHz e amplitude de 40 μm . Com a finalidade de se reduzir à influência da rugosidade e do acabamento na avaliação das propriedades mecânicas e de cavitação as amostras foram previamente lixadas e polidas com polimento final com sílica coloidal 0,05 μm .

3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são observadas as diferentes morfologias da liga testada quando depositada com diferentes níveis de pressão de ar-comprimido.

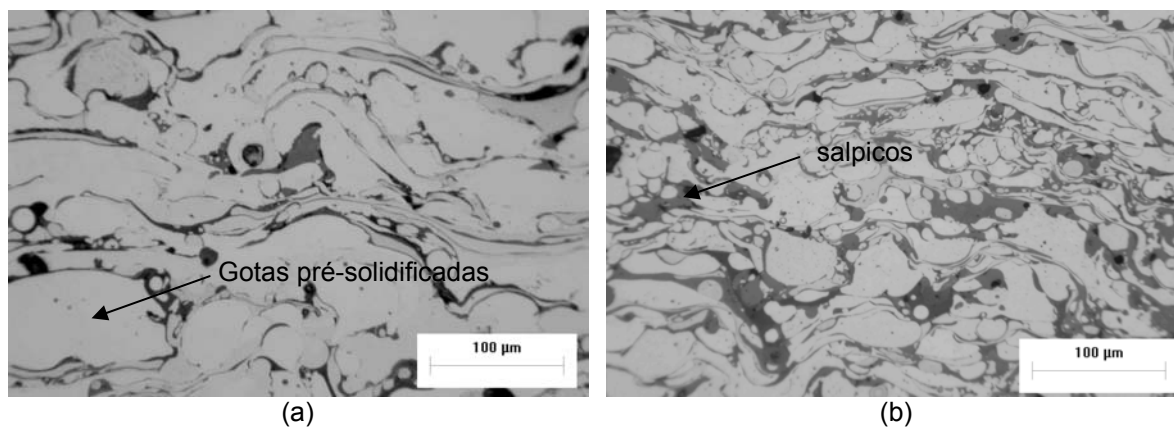


Figura 1. Morfologia dos depósitos. (a) 180A, 40psi. (b) 180A, 60psi.

Houve uma redução significativa da porcentagem em área de óxidos com a redução na pressão, porém a variação da porosidade não foi significativa. A variação da porosidade deve ser analisada com cuidado devido à quebra dos óxidos durante a preparação das amostras, o que pode dificultar uma análise mais precisa.

Pode-se observar uma redução na temperatura e força de impacto com a redução na pressão, visível pela diminuição na quantidade de gotas pré-solidificadas, deformação e diminuição na espessura das lamelas, associado com um aumento no número de salpicos.

O aumento da quantidade de óxidos, com o aumento da pressão do ar pode ser causado por dois motivos: a maior quantidade de oxigênio disponível para promover a oxidação entre as partículas, assim como a maior quantidade de salpicos, pois se observa na Figura 1(b) que os óxidos encontram-se mais concentrados nas regiões onde a presença de salpicos é maior.⁽¹⁴⁾

A redução no teor de óxidos com a diminuição na pressão e a porosidade pode ser observada na Figura 2. Para uma elevação de 60 para 80psi não houve variação significativa nos teores de óxido e porosidade.

Para a amostra com menor pressão de ar-comprimido houve a formação dois tipos de óxidos com diferentes teores de silício e manganês. Esta alteração no tipo de óxido formado pode ser decorrente da mudança na quantidade de oxigênio livre, favorecendo a formação de óxidos de silício e manganês, mais estáveis, ou devido ao aumento da temperatura durante o voo da partícula até o substrato (14). Na Figura 3 observam-se os elementos presentes nos óxidos formados com 40 psi. As amostras com maiores pressões apresentaram a formação de óxido semelhante à da Figura 3(b).

As variações na morfologia do revestimento depositado com a variação na corrente são observadas na Figura 4. Observa-se que a redução na corrente não promoveu alteração significativa nos teores de óxido e porosidade, sendo esta dentro das margens de erro presente nas análises. Na Tabela 3 são observados os valores de porosidade e teor de óxidos com a variação na corrente.

A formação dos óxidos e a porosidade estão diretamente ligadas a força de impacto e ao tempo em que a partícula percorre entre a ponta da pistola e a peça. Assim avaliou-se a formação de óxidos em duas distâncias, a 120mm, onde a velocidade das partículas é máxima e a 200mm, onde existe uma diminuição na velocidade entre a peça e o substrato.⁽¹⁴⁾

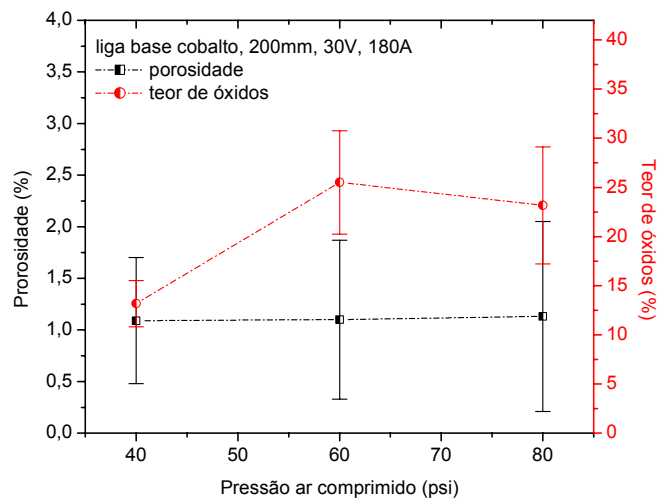


Figura 2. Variação do teor de óxidos e poros com a pressão do ar.

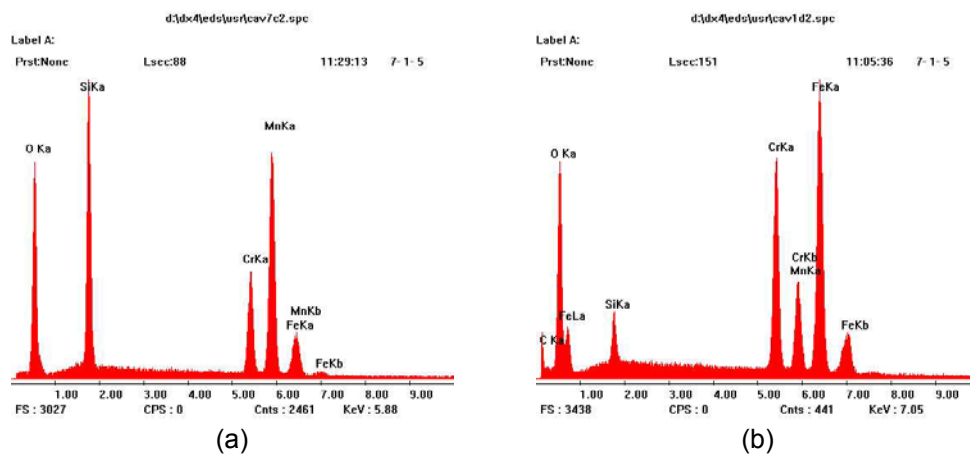


Figura 3. Composição dos óxidos (a) e (b) da amostra depositado com 40 psi.

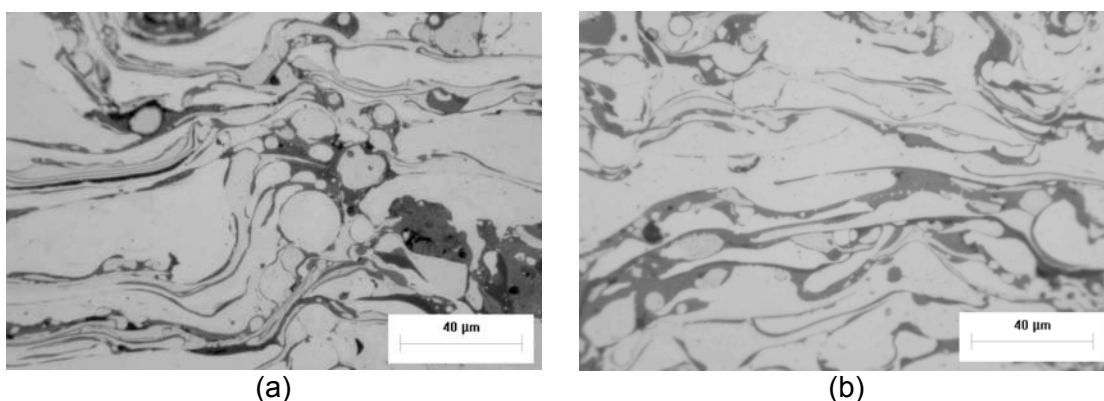


Figura 4. Depósitos com liga CAV1. (a) 140A, 60psi. (b) 180A, 60psi.

Tabela 3. Teor de óxidos e porosidade com a variação na corrente.

Corrente (A)	Teor de Óxidos (% em área)	Porosidade (% em área)
140	19,02±3,56	0,72±0,39
180	25,51±5,25	1,1±0,77

Na Figura 5 observa-se a variação da morfologia das panquecas do revestimento com a diminuição da distância de aplicação. O aspecto mais importante foi a diminuição dos teores de óxidos e porosidade com a redução da distância para pressões maiores de ar-comprimado, 60 e 80psi. A Tabela 4 indica os valores de óxidos presentes nas amostras depositadas com duas diferentes distâncias pistola-peça.

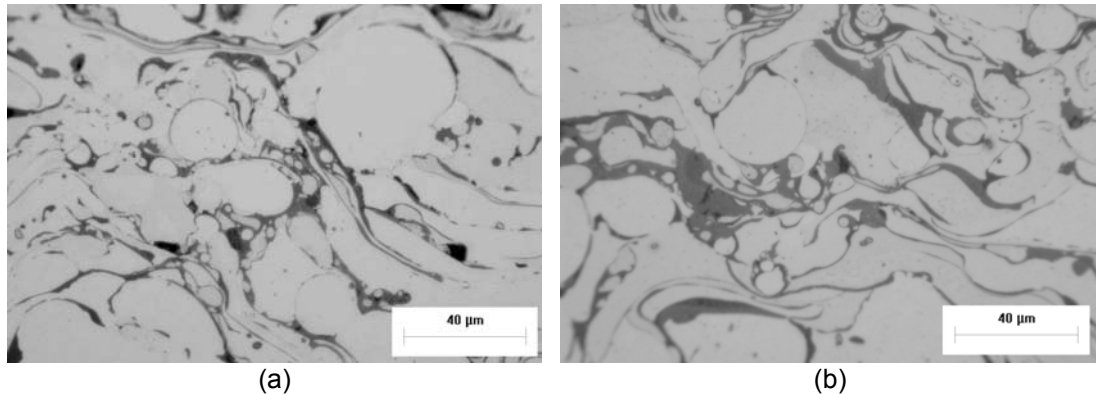


Figura 5. Morfologia dos depósitos, 180A, 60psi. (a)120mm. (b) 200mm.

Tabela 4. Teor de óxidos e poros com a variação na distância bico-peça (180A, 30V).

Pressão	Distância (mm)	Teor de Óxidos (% em área)	Porosidade (% em área)
40psi	120	10,4±1,34	0,99±0,68
	200	13,18±2,35	1,09±0,61
60psi	120	12,05±2,86	0,65±0,50
	200	25,51±5,25	1,1±0,77
80psi	120	12,3±3,00	1,11±0,62
	200	23,17±5,94	1,12±0,92

Semelhante a redução na pressão do ar a alteração na distância bico-peça promoveu uma redução na microdureza com a redução nos teores de óxidos, observa-se que a variação nos valores de microdureza é coerente com a variação na quantidade de óxidos presentes, Figura 6.

Para uma determinação mais precisa dos valores de dureza da fase metálica do revestimento realizaram-se medições de nanodureza em amostras com diferente pressão de trabalho e de distância de aplicação, ver resultados na Tabela 5. Observa-se por estes resultados que houve um aumento na dureza com a pressão de deposição e distância de aplicação, porém estes resultados podem não ser relevantes estatisticamente.

Tabela 5. Valores de nanodureza obtidos.

	40psi 200mm	40psi 120mm	60psi 120mm
Nanodureza (GPa)	4,454 ±0,406	3,565±0,397	4,662±1,151

Foi avaliada a resistência à cavitação para algumas das condições depositadas, sendo os resultados apresentados na Figura 7. Avaliaram-se principalmente os efeitos das alterações na pressão de ar comprimido e distância de aplicação na resistência à cavitação.

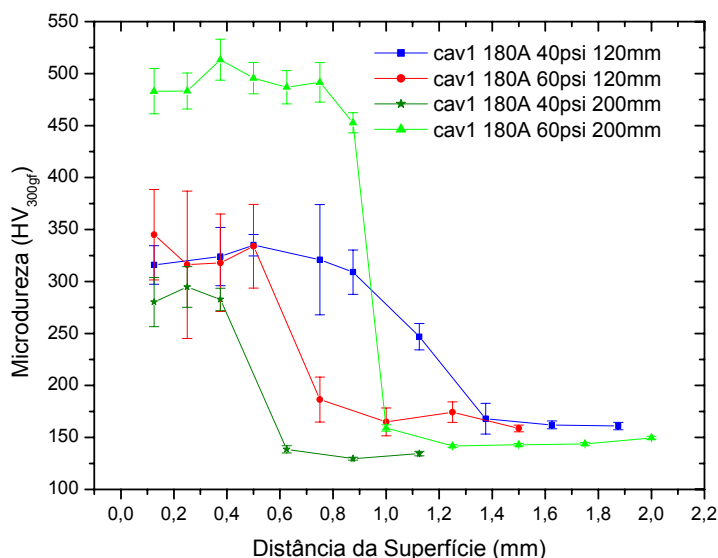


Figura 6. Variação no perfil de microdureza.

Observa-se que os depósitos aspergidos com 40psi de pressão apresentaram inicialmente uma maior perda de massa, posteriormente apresentaram valores de taxa de perda de massa foi semelhante às amostras com maior pressão de deposição.

No início do ensaio observou-se maior resistência à cavitação para as condições com maior pressão. Esta característica pode ser decorrente da melhor adesão entre as panquecas mais externas devido a maior velocidade de impacto das partículas durante a aspersão, apesar da maior quantidade de óxidos presente na amostra com pressão de 60psi.⁽¹⁴⁾

Para a camada aspergida com pressão de 60psi e distância de 200mm observa-se uma menor taxa de remoção de material no início do ensaio, quando comparado com a amostra depositada com 40psi, porém após 2 horas de ensaio a taxa de remoção aumenta a níveis superiores, determinando assim uma maior taxa de perda de massa, Tabela 6. Estes resultados são preliminares e indicam apenas tendências que serão confirmados com o decorrer da pesquisa.

Os resultados obtidos até o momento são superiores aos obtidos por Boccanera, et al, 1999.⁽¹²⁾ Boccanera em seu trabalho obteve uma perda de massa de 17mg/h para uma liga inoxidável com cobalto, porém não são fornecidos os valores dos parâmetros utilizados, inviabilizando assim uma melhor comparação entre estes parâmetros. Esta diferença pode ser decorrente também a variações no equipamento de ensaio de cavitação e metodologia empregada.

Tabela 6. Taxa de perda de massa no regime estável.

Condição de deposição	Perda de massa final em 5 horas (mg)	Taxa de perda de massa, (mg/h)
180A, 32V, 40psi, 200mm	21,30	3,16
180A, 32V, 60 psi, 200mm	21,60	6,04
180A, 32V, 40psi, 120mm	18,50	3,40
180A, 32V, 60 psi, 120mm	20,13	3,84

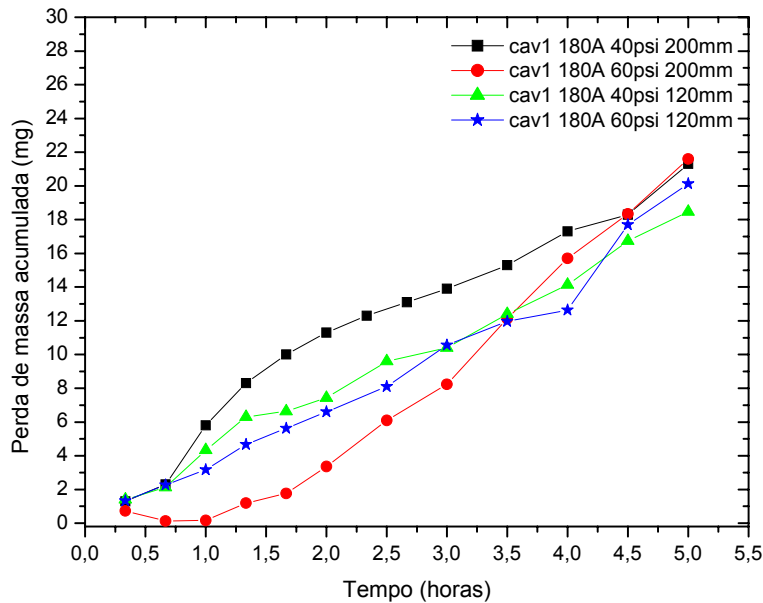


Figura 7. Resultados dos ensaios de cavitação acelerada.

4 CONCLUSÕES

Em relação à variação da morfologia e teor de óxidos com a variação da pressão de ar-comprimido, distância de aplicação e corrente observou-se que a redução da pressão e diminuição da distância há uma diminuição no teor de óxidos e um aumento na quantidade de gotas semifundidas, assim como uma diminuição na quantidade de salpicos. Para a liga inox com cobalto a redução do teor de óxidos foi de 25 para até 10,5%. O aumento da corrente de 140A para 180A não promoveu uma alteração significativa na morfologia dos revestimentos depositados.

Observou-se que os valores de microdureza variaram de acordo com os teores de óxidos presentes, onde uma maior quantidade acarretou um aumento de dureza.

Os valores de nanodureza indica um aumento da dureza com a distância de aplicação e pressão do ar porém estatisticamente esta variação pode não ser relevante.

Com relação à resistência à cavitação, a amostra que apresentou menor taxa de erosão foi aquela aplicada com a condição de menor pressão de ar comprimido. No período inicial de ensaio houve uma maior perda de massa nesta condição, comparada com a condição de maior pressão, mas houve estabilidade maior durante o ensaio, gerando assim uma menor taxa de perda de massa.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia, PIPE, pela oportunidade de realização desta pesquisa, ao Laboratório de Nanodureza da UFPR, em especial ao aluno de doutorado Alexandre e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, pela cooperação, utilização dos laboratórios e suporte financeiro dado para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 MARCH, Patrick, e HUBBLE, Jerry, Evaluation of Relative Cavitation Erosion Rates For Base Materials, Weld Overlays, and Coatings, Report No. WR28-1-900-282, Tennessee Valley Authority Engineering Laboratory, Norris, TN, September 1996.
- 2 SIMONEAU, Raynald LAMBERT, P., SIMONEAU, M., DICKSON, J.I., and L'ESPERANCE, G., Cavitation Erosion and Deformation Mechanism of Ni and Co Austenitic Stainless Steel, Proceedings of 7th Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, Inglaterra, set 1987
- 3 SIMONEAU, Raynald, Vibratory, Jet and Hydroturbine Cavitation Erosion, Cavitation and Multiphase Flow Forum, American Society of Mechanical Engineers, 1991
- 4 PROCOPIAK, L. A. J., Resistência à Cavitação de Três Revestimentos Soldados, Florianópolis, 1997. p. 74. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade de Santa Catarina
- 5 XIAOJUN, Z., Effect of Surface Modification Processes on Cavitation Erosion Resistance, Curitiba, 2002. p. 105. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná
- 6 ARAI, Y.; HIKUCHI, M.; WTANABE, T.; NAKAGAKI, M., Residual stress due to welding and its effect on the assessment of cracks near the weld interface, International Journal of Pressure Vessel and Piping, n. 63: p. 237 – 248. 1995
- 7 BOY, J. H. et al, Cavitation and Erosion Resistant Thermal Spray Coatings, Construction Productivity Advancement Research (CPAR) PROGRAM, Technical Report 97/118, Julho 1997
- 8 SHI Y.M.; CHEN B.Y.; ZHANG J.X. Effects of welding residual stresses on fatigue crack growth behavior in butt welds of a pipeline steel. Eng Fract Mech, 36, 6, 893-902, 1990
- 9 PAREDES, R.S.C., Dutra J., HENKE S., OKIMOTO P.C., PROCOPIAK LA.; RELATÓRIO: Otimização dos reparos de turbina através da pesquisa em novos processos e materiais de soldagem – Desenvolvimento de parâmetros para novos materiais – Projeto Otimização, COPEL, 2003
- 10 DUTRA J., BUSCHINELLI A., PAREDES R.S.C., HENKE S., D'OLIVEIRA A.S., PROCOPIAK LA; RELATÓRIO: Efeito dos Processos de Modificação Superficial na Resistência à Erosão de Cavitação – Projeto TrataSuper, COPEL, 2003
- 11 KREYE, H., SCHWETZKE, R., BUSCHINELLI A., BOCCANERA, L., Cavitation Erosion Resistant Coatings Produced by thermal Spraying and by Weld Cladding, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, 25-29 May 1998, Nice, France.
- 12 BOCCANERA, L., BARRA, S.R., BUSCHINELLI, A., SCHWETZKE, R., KREYE, H., Cavitation Erosion Resistance of Co-Alloyed Stainless Steel Weld Claddings as Compared to Thermal Sprayed Coatings, XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 08 a 10 de Setembro, 1999 Belo Horizonte, Brasil.
- 13 AWS. American Welding Society, Inc. Thermal Spraying. Practice, Theory, and Applications. 1985.
- 14 NEWBERY, A.,P., GRANT, P.,S., NEISER, R.A., The velocity and temperature of steel droplets during eletric arc spraying, Surface & Coating Technology, n. 195: p. 91-101. 2005