

RECUPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS DANIFICADAS POR EROSÃO CAVITACIONAL POR SOLDAGEM COM AÇO INOXIDÁVEL/COBALTO¹

Ricardo Vechin de Macedo²
 Ruis Camargo Tokimatsu³

Resumo

Um dos grandes problemas enfrentados pelas Usinas Hidrelétricas é o fenômeno da cavitação, que gera como consequência a erosão de partes da turbina, com perda de material e desempenho das mesmas. Entretanto, para atenuar esses efeitos nas turbinas que já se encontram em operação, principalmente as com mais de 30 anos de vida, é necessário a aplicação de revestimentos com características que garantam uma maior resistência a esse fenômeno. Nesse sentido, esse trabalho tem o objetivo de comparar alguns procedimentos e processo utilizados na recuperação por revestimento das áreas erodidas por Cavitação em Turbinas Hidráulicas. Primeiramente foi realizada a soldagem utilizando cinco procedimentos com a Máquina Bi-pulsada desenvolvida pelo Labsolda e dois procedimentos utilizando Máquina convencional, sinérgica. Os parâmetros utilizados foram os indicados pelos fabricantes, assim como os gases de proteção. Os corpos de prova revestidos com Aço Inoxidável AISI 309 e Aço Inoxidável com Cobalto foram preparados, sendo realizados os ensaios de cavitação acelerada e microdureza vickers. Os resultados mostraram um aumento na dureza devido ao processo de cavitação e para o aço inoxidável com cobalto, apesar da variação da perda de massa, um perfil semelhante entre eles.

Palavras-chave: Cavitação; Erosão cavitacional; Soldagem; Cobalto.

REPAIR OF HYDRAULIC TURBINES DAMAGED BY CAVITATIONAL EROSION BY WELDING WITH STAINLESS STEEL / COBALT

Abstract

One of the major problems faced by hydropower plants is the phenomenon of cavitation, which creates the effect of erosion of parts of the turbine, with loss of material and performance of the same. However, to mitigate these effects on turbines that are already in operation, especially those over 30 years of life, it is necessary to apply coatings with features that ensure greater resistance to this phenomenon. Thus, this study aims to compare some procedures used in the recovery process by coating the eroded areas by Cavitation in Hydraulic Turbines. First carried out using five welding procedures with the Machine Bi-pulsed developed by Labsolda and two procedures using conventional machine, synergistic. The parameters used were those indicated by the manufacturers as well as the shielding gas. The specimens coated with Stainless Steel AISI 309L-T1 and Stainless Steel with Cobalt were prepared, being made the accelerated cavitation tests and Vickers microhardness. The results showed an increase in hardness due to cavitation process and for the stainless steel with cobalt, despite the variation of weight loss, a similar profile between them.

Key words: Cavitation; Cavitational erosion; Welding; Cobalt.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico. Mestrando, PPGEM, UNESP; Engenheiro Mecânico na Endesa Cachoeira, Cachoeira Dourada, GO, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico. Dr. Professor. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Sendo o Brasil, um país de dimensões continentais que possui uma grande quantidade de recursos energéticos, que possibilita ter uma matriz energética diversificada, porém, os recursos hídricos que podem ser aplicados a essa produção são os mais abundantes, o que faz com que no ano de 2011 ela tenha correspondido a 81,90 % de nossa matriz.⁽¹⁾

É importante ressaltar que o consumo de eletricidade em 2011 teve um crescimento relativo maior que o crescimento da oferta, 3,3% e 3,1% respectivamente.⁽¹⁾

Na geração de eletricidade em usinas hidrelétricas tudo é gigantesco, inclusive os problemas. Um dos que mais causa perda de faturamento é o desgaste das turbinas, pela chamada erosão por cavitação.

Sendo que a troca de turbinas é, na maior parte das vezes, economicamente inviável, a forma economicamente mais viável de resolver o problema, ao menos parcialmente, é manter o processo de erosão sob controle, o que é feito através da reposição do material arrancado, utilizando processos de soldagem com a aplicação de material nas pás para tentar devolver-lhes o perfil original, preenchendo as cavidades e reconstituindo os contornos.

Tal estudo se justifica em razão do parque gerador brasileiro encontrar-se hoje com uma média de 30 anos, sendo assim, necessárias manutenções e recuperações para garantir a eficiência.

1.1 Cavitação

Um dos grandes problemas que atingem as Usinas Hidrelétricas é o fenômeno da cavitação. Euler citado por Allenstein,⁽²⁾ já em 1754 indicava a possibilidade de ocorrência de zonas de pressões negativas e a formação de vazios nestas regiões presentes em turbinas de reação. A ASTM G40-95⁽³⁾ define o fenômeno da cavitação como a “formação e subsequente colapso, dentro de um líquido, de cavidades ou bolhas que contém vapor ou gás, ou ambos”.

Uma outra explicação de entendimento mais fácil é dada por Baptista e Coelho,⁽⁴⁾ em que cavitação é definida como:

“um processo semelhante ao da fervura, em que o líquido se vaporiza, diferindo, basicamente, pelo agente causador; enquanto na fervura o processo ocorre devido ao aumento da temperatura, com pressão constante, na cavitação se deve à diminuição da pressão, com temperatura constante.”

Essa redução da pressão hidrostática no líquido é produzida pela movimentação do líquido ou do contorno sólido.

Segundo Calainho,⁽⁵⁾ dentre os resultados da agressividade da cavitação, é possível citar:

- erosão de contornos sólidos em pás, palhetas diretrizes, palhetas fixas do pré-distribuidor;
- vibrações e ruídos excessivos; e
- diminuição da eficiência de turbinas hidráulicas, com queda de potência.

1.2 Erosão Cavitacional

Os ciclos da cavitação são repetidos milhares de vezes, com ondas de pressão que ficam na ordem de 10⁶ a 10⁹ MPa, para as ondas de choque e microjatos de apenas alguns microns de diâmetro.⁽⁶⁾ Esse martelamento gerado pelo impacto das

partículas liquidas sobre as pás do rotor, concentra essa energia em uma pequena área sólida próxima ou no próprio local do colapso,⁽⁵⁾ fazendo com que o material da superfície das zonas de cavitação trabalhe de forma cíclica, que com o tempo acaba gerando fadiga superficial de baixo ciclo.

Estando o material da superfície fadigado, tensões menores que a tensão de ruptura fazem com que ocorra a retirada desse material por “trincamento”, provocando a erosão cavitacional⁽⁷⁾ (Figura 1).



Figura 1. Erosão Cavitacional em Turbina Francis.

De forma resumida o processo de erosão por cavitação poder ser descrito como tendo o período de incubação, que está associado à deformação plástica do material, com formação de linhas de escorregamento e pequenas crateras na superfície.

Na sequencia, a densidade de crateras aumenta, formando ondulações e acúmulo de material ao seu redor. As trincas formadas na superfície e dentro das crateras se propagam juntando-se umas às outras, levando à formação de cavidades (pites) e desprendimento de partículas de desgaste na superfície.⁽⁸⁾

1.3 Resistência a Erosão Cavitacional do Aço Inoxidável com Cobalto

Segundo Will⁽⁹⁾ citando Simoneau, o início do desenvolvimento dos aços inoxidáveis ligados ao cobalto se deu em função dos estudos que constataram a resistência superior, chegando a 50 vezes, das ligas de cobalto com baixo teor de carbono (Stellite 21) em relação ao aço inoxidável AISI 308.

Simoneau,⁽¹⁰⁾ durante a realização de experimentos para o desenvolvimento de novas ligas, chegou-se ao desenvolvimento de aços inoxidáveis com cobalto com resistência a erosão cavitacional similar as ligas de cobalto, isso foi possível em função do balanceamento dos elementos de liga presentes, eliminando o Níquel e substituindo percentagens de Cobalto por elementos como Manganês, Nitrogênio e Carbono.

A substituição desses elementos proporciona uma estrutura austenítica, com baixa falha de empilhamento com características como: deformação planar, maclação fina e elevado endurecimento por deformação.

Para Otterloo citado por Mussardo,⁽¹¹⁾ um dos efeitos da adição de cobalto nas ligas de aço inoxidável é promover uma estrutura cristalina Cubica de Face Centrada (CFC) instável e com baixa energia de falha de empilhamento (EFE), sendo esta instabilidade devido a estrutura martensítica, também CFC, que o cobalto puro apresenta. Sendo necessária a adição de significativas quantidades de Ni para estabilizar a estrutura CFC.

As ligas a base de Co exibem uma tensão induzida na transformação de fase de austenita γ em martensita ε que tem sido associada ao aumento de resistência a erosão cavitação.⁽¹²⁾

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Metal de Base

Como material de base para esse estudo, será utilizada uma Chapa de Aço Carbono, ASTM A27 ou A36, tendo como dimensão nominal 130,0 x 90,0 x 12,7 mm (1/2") de espessura. Esse material era comumente utilizado na fabricação de turbinas francos de grande porte entre as décadas de 60 e 70, não apresentando boa resistência ao fenômeno de cavitação. Todavia, atualmente estes rotores tem sido revitalizados e sua utilização tem sido significativamente ampliada com a recuperação das áreas cavitadas com procedimentos e materiais adequados.

2.2 Arames para Soldagem

Como consumíveis de soldagem foram utilizados o arame tubular AWS E309L-T1 de 1,2 mm. diâmetro e um arame de aço inoxidável com cobalto (Cavitalloy) com 1,6 mm diâmetro. A composição química, informada pelo fabricante ou pela norma de referência, encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química dos Materiais Depositados.^(a) Dados do Fabricante, ^(b) AWS A5.22^(13,14)

Liga	Elementos de Liga (%)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	P	N	Cu
Cavitalloy ^(a)	0,19	1,9	9,8	19,5	-	10,8	0,28	-	0,3	-
AWS E309-LT1 ^(b)	0.04 max.	1.0 max.	0,5 - 2,5	22 - 25	12 -14	-	0.5 max.	0.04 max.	-	0.75 max.

2.3 Mistura de Gases para Soldagem

Como gases de proteção serão utilizados uma mistura com 25% dióxido de carbono (CO₂) e 75% Argônio (Ar) para a soldagem do arame revestido AWS E309-LT1 e uma mistura com 2% Oxigênio (O₂) e 98% Argônio (Ar) para a soldagem do Cavitalloy, todos designados sob a norma AWS A5.29.

A utilização desses arames é indicada pelo fabricante dos arames e se justifica também pelos procedimentos atualmente empregados pelas grandes empresas de geração de energia para recuperação de turbinas hidráulicas. Esses gases possuem alta taxa de deposição, permitindo a soldagem em diversas posições, com pequeno índice de respingos, fácil remoção de escórias e ótimo acabamento.

2.4 Soldagem das Amostras

Atualmente a recuperação das turbinas de aço carbono é feita aplicando somente o arame tubular AWS E309L-T1, ou utilizando o AWS E309L-T1 como "almofada" para aplicação do Cavitalloy. Nesse trabalho, além do procedimento utilizado usualmente, foi realizada a soldagem do Cavitalloy diretamente no aço carbono.

O procedimento e parâmetros de soldagem adotados foram os comumente utilizados na prática para a recuperação de erosão cavitacional pela empresa Servtec e Endesa Cachoeira, variando conforme os consumíveis e gases utilizados. Na Tabela 2 e na Figura 2, pode-se visualizar as camadas depositadas nos corpos de prova, as máquinas e procedimentos adotados.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada no laboratório de manutenção de máquinas de solda da Servtec, utilizando uma Máquina Bi-pulsada Digitec 450, e uma Lincoln Convencional Idealarc CV400. Na Figura 3, uma foto das máquinas utilizadas.

Tabela 2. Descrição das Amostras Soldadas e dos Processos Utilizados, abril/2012

CP	Material Depositado	Máquina
1	3 Camadas de AISI 309	MTE DIGITEC 450
2	2 camadas de AISI 309 + 1 camada de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
3	2 camadas de AISI 309 + 2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
4	2 camadas de AISI 309 + 2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	IDEALARC CV400
6	2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
7	3 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
9	3 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	IDEALARC CV400

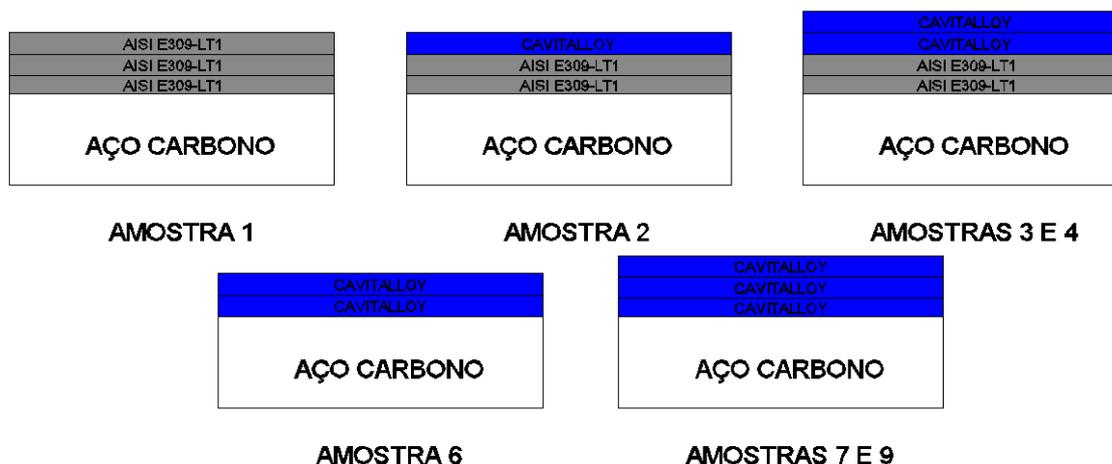


Figura 2. Representação esquemática dos revestimentos depositados nas amostras soldadas.



Figura 3. (a) Máquina IDEALARC CV400 da Lincoln (b) MTE DIGITEC 450 da IMC.

* Oliveira, R.C.; Entrevista pessoal realizada em Março/2012.

2.5 Ensaios

Para realização deste estudo, optou-se pela realização dos ensaios de Cavitação Acelerada baseado na ASTM G32-09,⁽¹⁵⁾ e de Microdureza Vickers. Nos tópicos abaixo estão descritos os procedimentos adotados para realização dos mesmos. A Figura 4 mostra esquematicamente a forma de retirada dos corpos de prova das amostras.

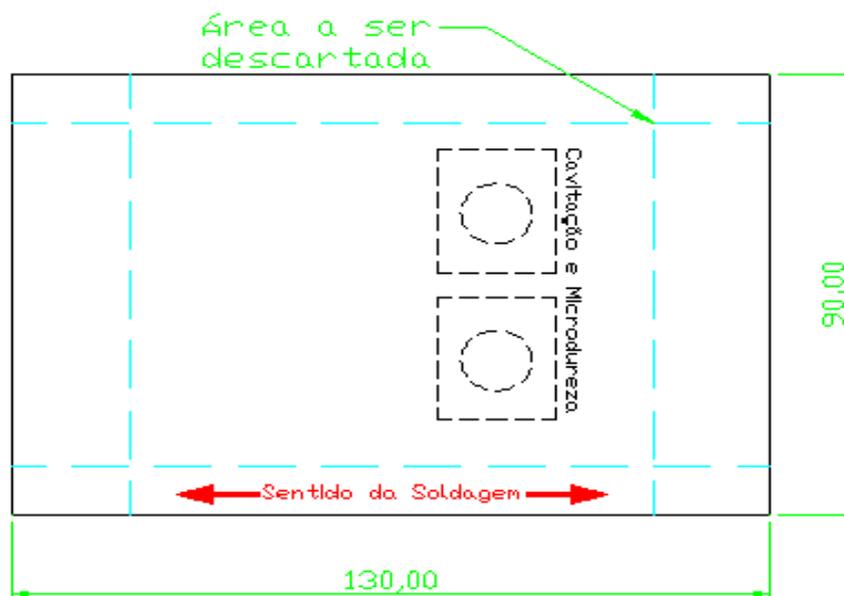


Figura 4. Esquema de retirada dos corpos de prova.

2.5.1 Ensaio de Cavitação Acelerada

O Ensaio de Cavitação Acelerada será realizado utilizando a norma ASTM G32/09,⁽¹⁵⁾ modificado para o método indireto (Figura 5).

Os corpos de prova foram cortados e usinados na dimensão de 30 x 25 x 8 mm., com um peso máximo de 60 g., devido a limitação da balança de precisão.

Concluído o corte, as superfícies dos corpos de prova foram preparadas por lixamento com lixas grana 120, 220, 320, 400, 600 e 1.200, realizando giro de 90° a cada troca de lixa. Terminado o processo de lixamento, as amostras foram limpas em água corrente, banhadas em álcool etílico 92,8% e secas sob fluxo de ar aquecido. Para o acabamento da superfície, foram utilizadas politrizes automáticas com velocidade de 600 rpm, utilizando como abrasivo Alumina com granulometria média de 3 µm e 1 µm.

O ensaio foi realizado utilizando um gerador ultrassônico KLN Ultraschall GMBH tipo 500, um Aparelho UWP-BK 101-Z para verificar a frequência do sistema (sonotrodo + ponta de sacrifício), que reproduz uma oscilação axial na ponta do sonotrodo, através de efeito piezométrico, a uma frequência de $20 \pm 0,2$ kHz. A amplitude de oscilação aplicada é de $0,05 \pm 0,0025$ mm, mantendo a temperatura controlada em $22 \pm 1^\circ\text{C}$. A perda de massa da amostra foi medida em tempos predeterminados em uma balança com precisão de 0,1 g.

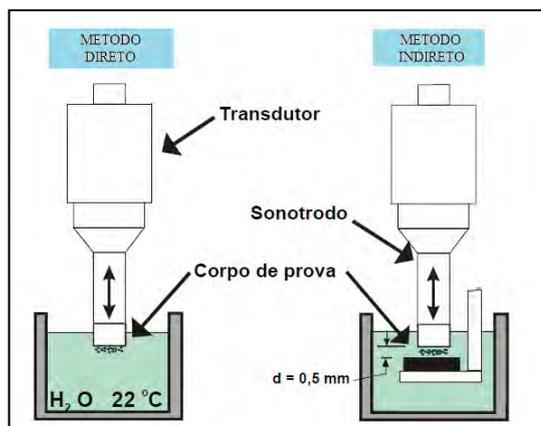


Figura 5. Esquema do Ensaio de Cavitação Acelerada. ⁽¹⁵⁾

2.5.2 Medidas de microdureza Vickers

A medição da microdureza Vickers foi feita na superfície dos corpos de prova após a realização do ensaio de cavitação acelerada, utilizando um acessório do microscópio metalográfico Neophot 21, com a colocação de um mecanismo com indentador adequado para a obtenção de microdureza.

A carga aplicada nesta etapa, através de indentador de diamante com formato piramidal de base quadrada, foi constante de 100 gf por 30 s. Na realização das medidas das diagonais foi utilizada uma ampliação de 8x. Sendo verificada a calibração no microscópio para esta carga a cada 3 amostras, a fim de garantir a repetibilidade das medidas.

As medidas de microdureza foram obtidas através de uma “varredura” na superfície do corpo de prova no sentido da superfície lateral até a região cavitada.

Foi realizada a anotação das medidas das indentações e utilizada a Fórmula 1, para conversão em dureza Vickers.

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{Q}{L^2} \quad (1)$$

Na Fórmula 1, Q é a carga (kgf) aplicada à amostra e L é o comprimento médio (mm) da diagonal referente à impressão de microdureza registrada na amostra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Soldagem

A soldagem foi realizada conforme os parâmetros apresentados na tabela 03, e utilizando as máquinas e processos da Tabela 2. Entretanto, para a máquina de soldagem do processo GMAW bi-pulsada, foi possível notar uma certa dificuldade do soldador ao operar a panela da mesma, que havia sofrido um *retrofitting*.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para a soldagem, abril/2012

Equipamento: MTE DIGITEC 450 – Fabricante: IMC								
Material	Gás	Entre-passes (°C)	T (V)	I Inicial (A)	I Final (A)	I Base (A)	I Pulso (A)	Vazão Gás (l/min)
AWS E309 LT1	C25	145/200	25,8	250	-	200	-	15
CAVITALLOY	I98	160/220	-	80	80	90	170	15
Equipamento: IDEALARC CV400 – Fabricante: LINCOLN								
Material	Gás	Temp. Entre-passes °C	T (V)	I (A)	Veloc. Arame (m/min)	Vazão do Gás (l/min)		
CAVITALLOY	I98	180/240	20	130	7,2	16		

Pode-se observar (Figura 6) os corpos de prova antes e após soldagem. Os corpos de prova apresentaram um bom aspecto visual com a soldagem em cordões em forma de tecimento com pendulamento e oscilação, variações em função da soldagem manual.

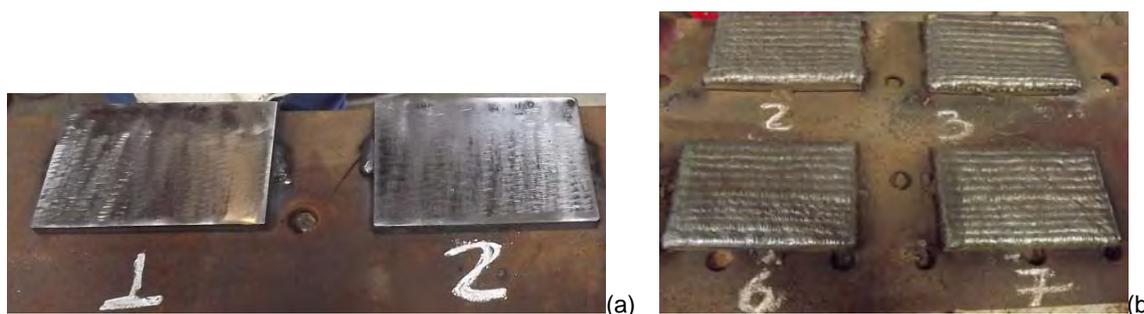


Figura 6. Corpos de Prova durante o processo de soldagem (a) somente lixadas antes da soldagem, (b) após a conclusão da soldagem com Cavitalloy.

Após a esmerilhagem de acabamento dos corpos de prova, foi realizado ensaio de líquido penetrante para garantir que a superfície estivesse isenta de poros e trincas. O acompanhamento dos parâmetros de soldagem foi acompanhado nos visores das máquinas e com termômetro a laser.

3.2 Ensaios de Erosão Cavitação

A Figura 7a apresenta os corpos de prova preparados para realização do ensaio de cavitação acelerada, os corpos de prova foram preparados conforme orientação disposta por Marqueze.⁽¹⁶⁾ Na Figura 7b, pode-se visualizar alguns corpos de prova após o período de ensaio de cavitação acelerada, onde se nota uma marca esbranquiçada nas bordas, características de áreas afetadas pela cavitação que ainda não iniciaram a perda de massa.

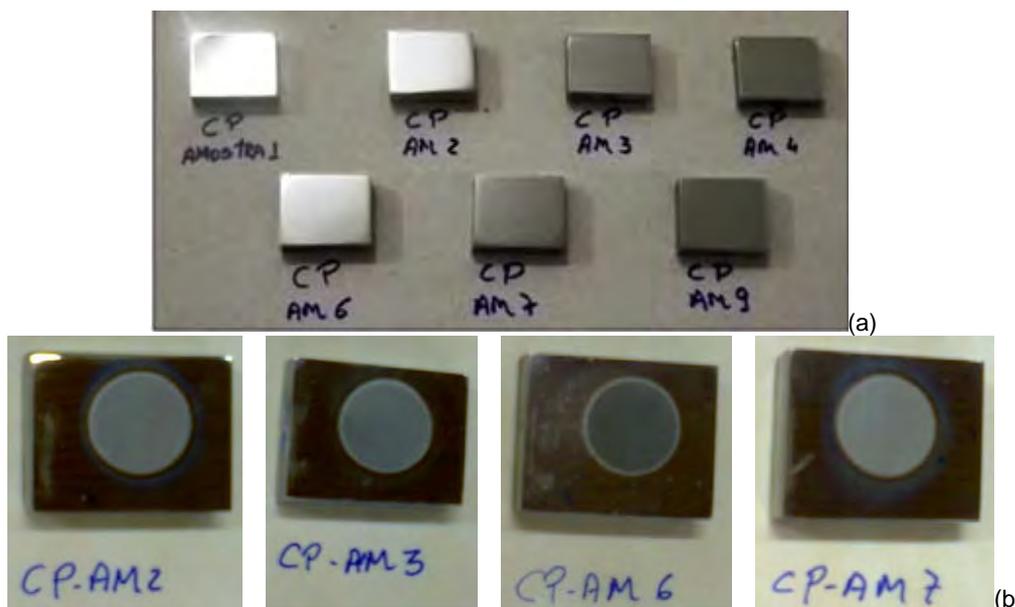


Figura 7. Aspecto visual dos corpos de prova para Ensaio de Cavitação Acelerada (a) antes do ensaio e (b) a realização do ensaio.

Os resultados do ensaio de cavitação acelerada são apresentados na Figura 8, onde é possível visualizar os perfis de perda de massa acumulada dos corpos de prova. De forma qualitativa é possível observar dois regimes de perda de material, um primeiro período de incubação sem perda de massa e um segundo com a perda de massa, similar ao encontrado por Will.⁽¹⁷⁾

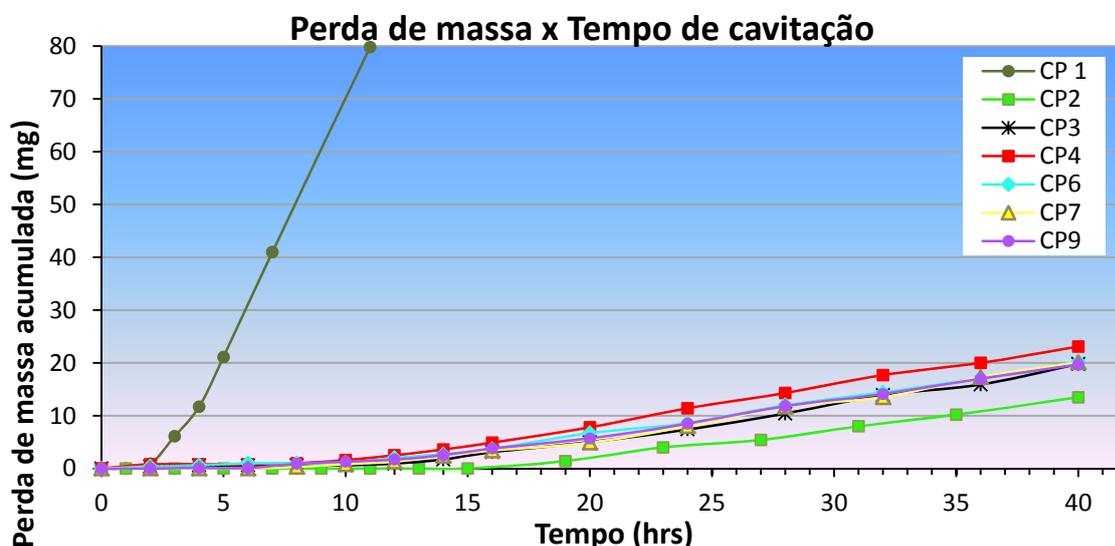


Figura 8. Perda de Massa nos Ensaio de cavitação acelerada.

Como observado por Boccanera et al.,⁽¹⁸⁾ Martinez⁽¹⁹⁾ e Ribeiro,⁽²⁰⁾ o revestimento de Aço Inoxidável AISI 309L-T1 apresenta uma resistência a cavitação inferior a do Aço Inoxidável com Cobalto na faixa de 12 a 15 vezes.

Apesar dos processos e procedimentos diferentes de soldagem do aço inoxidável com cobalto, pode-se observar na Figura 8 que os perfis de perda de massa acumulada são similares.

Na Tabela 4, é possível visualizar a taxa de erosão, onde se observa um melhor desempenho dos Corpos de Prova 2, 6 e 8, todos soldados com a máquina de

processo bi-pulsado. Entretanto os corpos de prova 2 e 3 é que apresentam um maior período de incubação.

Tabela 4. Tempo de Incubação e taxa de erosão das amostras cavitadas

CP	DESCRIÇÃO	Tempo de incubação (h)	Taxa de erosão (mg/h)
1	CP1 (3 camadas de Inox 309 (Bi-pulsada))	2,83	9,73
2	CP2 (2 camadas de Inox 309+1 camada de Inox ao Co (Bi-pulsada))	18,13	0,62
3	CP3 (2 camadas de Inox 309+2 camadas de Inox ao Co (Bi-pulsada))	14,23	0,75
4	CP4 (2 camadas de Inox 309+2 camadas de Inox ao Co (Conv.))	7,80	0,72
6	CP6 (2 camadas de Inox ao Co (Bi-pulsada))	10,80	0,68
7	CP7 (3 camadas de Inox ao Co (Bi-pulsada))	12,33	0,73
8	CP9 (3 camadas de Inox ao Co (convencional))	10,55	0,66

O desempenho dos Corpos de Prova soldados pelo processo GMAW convencional sinérgico, quanto ao período de incubação e taxa de erosão foi ligeiramente inferior ao dos corpos de prova soldados através do processo GMAW bi-pulsado. Entretanto, segundo Oliveira,[†] na prática, devido a posição de soldagem sobrecabeça necessária a recuperação das turbinas, a soldabilidade apresentada pelo processo GMAW bi-pulsado é superior ao processo GMAW convencional.

Uma correlação apontada por Will et al.,⁽¹⁷⁾ para a diferença na resistência a cavitação dos materiais esta na composição química, com materiais que possuem maior concentração de Si, Co e Mn apresentando maior resistência a cavitação.

Em função do procedimento de soldagem do revestimento, o corpo de prova CP2 foi revestido com apenas uma camada de aço inoxidável com cobalto, o que a princípio poderia ocasionar uma maior dissolução do mesmo sobre a camada de amantecimento depositada com aço inoxidável AISI 309. Na atual fase do projeto, ainda não foi feita a verificação do grau dessa dissolução, entretanto, quando feita a comparação entre os resultados apresentados por Barra⁽²¹⁾ e os resultados do ensaio de cavitação acelerada (Figura 8 e Tabela 4), é possível inferir que a camada depositada de aço inoxidável com cobalto foi espessa o suficiente para reduzir o grau, ou até eliminar, a dissolução na camada mais superficial do revestimento.

O incremento de camadas não demonstrou ganhos significativos de resistência a cavitação, outro ponto é a melhor resistência apresentada pelos revestimentos soldados diretamente sobre o aço carbono, em comparação ao soldado sobre a camada de almofada de aço inoxidável AISI 309, ambos soldados pelo processo GMAW bi-pulsado.

3.3 Ensaio de Microdureza

O resultado das medições realizadas no ensaio de microdureza dos corpos de prova para levantamento de um perfil da superfície lateral até a área cavitada, realizados com carga de 100 gf por 30s, estão apresentados na Tabela 5.

[†] Oliveira, R.C.; Entrevista pessoal realizada em Março/2012.

Tabela 5. Medidas de Microdureza Vickers após ensaio de cavitação acelerada

Medida	CP1	CP2	CP3	CP4	CP6	CP7	CP9
1	391	545	545	634	602	707	707
2	354	634	602	792	572	707	669
3	372	572	669	707	602	792	707
4	391	634	707	792	602	707	841
5	435	572	634	894	602	748	953
6	486	634	748	792	634	792	1018
7	486	748	792	748	602	748	953
8	515	792	748	841	669	748	894
9	486	894	792	841	748	841	1018

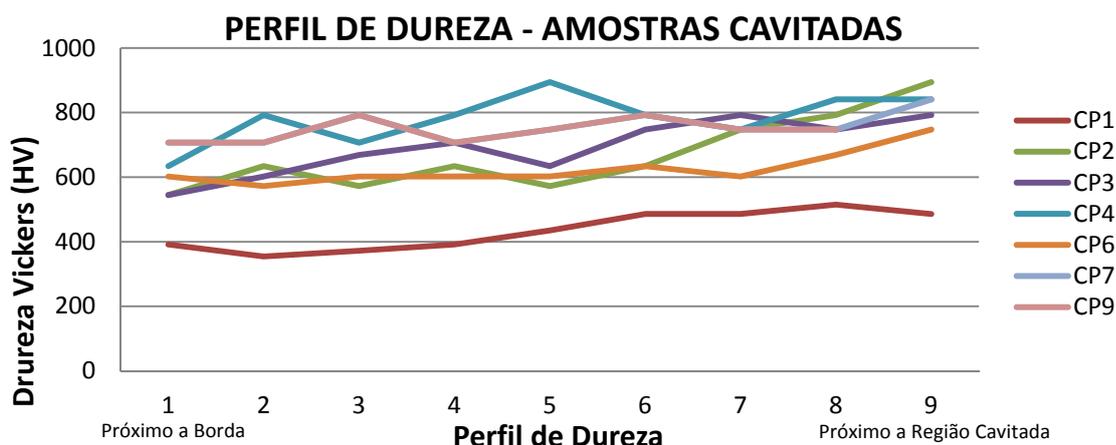


Figura 9. Microdureza da Superfície dos CP's após o ensaio de cavitação acelerada.

A primeira medida foi realizada a uma distancia de 0,5 mm da superfície lateral, de forma a evitar a interferência do corte, as demais medidas foram feitas a uma distancia que variaram de 0,7 a 1,0 mm., em função da distancia entre a superfície lateral e a área cavitada.

Na Figura 9, pode-se notar que ocorre um aumento da dureza quando da aproximação da área cavitada, fato esse observado também por Boccanera,⁽¹⁸⁾ Martinez⁽¹⁹⁾ e Hart.⁽²²⁾

Alguns pesquisadores como Hart,⁽²²⁾ Xiaojun⁽¹²⁾ e Bordeasu⁽²³⁾ atribuem esse endurecimento ocorrido em função da cavitação á transformação da martensita $\sigma \rightarrow \alpha'$, que juntamente com a baixa energia de falha de empilhamento, promovem também um aumento da resistência a cavitação.

4 CONCLUSÃO

Diferentemente do que foi apresentado por Will,⁽⁹⁾ a maior dureza superficial não representou uma melhor resistência a cavitação durante os ensaios de cavitação acelerada.

Mesmo tendo sido depositada apenas 1 camada de aço inoxidável com cobalto, o corpo de prova CP 2 apresentou boa resistência a cavitação. O que indica que é possível atingir uma camada com pouca dissolução.

Na posição de soldagem plana não se observa ganhos significativos na resistência à cavitação do Aço Inoxidável com Cobalto soldado através do processo GMAW convencional ou GMAW bi-pulsado.

Apesar do valor de aquisição do arame de aço inoxidável com cobalto ser em média, 3 a 4 vezes superior ao do arame de aço inoxidável AWS E309 LT1, a sua resistência é em média 12 a 15 vezes superior. O que justifica o investimento quando da aplicação feita de forma correta.

Agradecimentos

Os autores expressam agradecimentos pelo auxílio técnico, aos Profs. da FEIS Celso Sokei e Juno Gallego, ao aluno Luis Augusto Sossai, a Eng^a Cleide Marqueze da UFSC, a Servtec Serviços Técnicos, na pessoa do Eng^o Roberto Carvalho, por ceder seu laboratório, soldador e acervo fotográfico, a Endesa Cachoeira, aos Eng^{os}. Aparício Camargo e Stanley Pratti, e a Fundunesp pelo apoio econômico.

REFERENCIAS

- 1 BRASIL. Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2012.
- 2 ALLENSTEIN, A.N.; Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável martensítico ca6-nm nitretado por plasma. Curitiba, 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.
- 3 ASTM Standard G40, 1995, "Standard Terminology relating to Wear and Erosion.", ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995.
- 4 BAPTISTA, M.B.; COELHO. M. M. L. P.; Cavitação. In __. Fundamentos da Engenharia Hidráulica. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003. p.171-186.
- 5 CALAINHO, J.A.L.; et al. Cavitação em Turbinas Hidráulicas do tipo Francis e Kaplan no Brasil. XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, Outubro 1999. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/63950667/cavitacao-em-turbinas-kaplan-francis>. Acessado em: 01/02/2012.
- 6 OKADA, T.; IWAI, Y. Cavitation erosion. JSME International Journal, v.33, n.2, p.128-135, 1990.
- 7 WANTANG, Fu. Resistance of high nitrogen austenitic steel to cavitation erosion. Wear, v. 249, Issue 9, p. 788-791, September 2001.
- 8 MUTHUKANNAN, D. Cavitation erosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel laser-clad with nickel aluminide intermetallic composites and matrix composites with TiC reinforcement. Surface & Coatings Technology, 2006.
- 9 WILL, C.R.; Ligas Inoxidáveis Resistentes à Cavitação Depositadas por Plasma - PTA - Arame. Curitiba, 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, UFP.
- 10 SIMONEAU, R; Co Containing Austenitic Stainless Steel with high Cavitation Resistance. United States Patent. Patent Number 4.588.440, 1986. <http://www.freepatentsonline.com/4588440.html>, acessado em 06/07/2011.
- 11 MUSSARDO, G.B. Análise microestrutural de revestimentos usados no reparo de turbinas hidráulicas danificadas pela cavitação. Ilha Solteira, 2006. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista.
- 12 XIAOJUN, Z. et al. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel. Materials Science and Engineering, A358, p.199-204, 2003. Disponível em: <http://www.journals.elsevier.com/materials-science-and-engineering-a>. Acesso em 15/12/2012.
- 13 WELDING ALLOYS BRASIL LTDA. CAVITALLOY N28-G, Catalogo fabricante, 2010.

- 14 AWS 5.22/5.22M, 2010, "Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods", American Welding Society, Miami, FL, 2009. Disponível em: <http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/R10291.pdf> . Acesso em 15/12/2012.
- 15 ASTM Standard G32, 2009, "Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- 16 MARQUEZE, C.M.; Manual para a realização de Ensaios de Cavitação Acelerada conforme Norma ASTM G 32- 09; Laboratório de Cavitação/ EMC; Universidade Federal de Santa Catarina; Junho 2012.
- 17 WILL, C.R. et al. Estudo Comparativo de três ligas austeníticas com cobalto resistentes à cavitação depositadas por plasma pulsado térmico. Revista Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.15, n. 1, p. 52-60, jan./mar. 2010.
- 18 BOCCANERA, L. et al. Cavitation Erosion Resistance of Co-alloyed Stainless Steel Weld Claddings as Compared to Thermal Sprayed Coatings. XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Belo Horizonte, Setembro 1999. Acessado em 18/07/2012.
- 19 MARTINEZ, J.A.B. et al. Resistência à erosão por cavitação de ligas martensítica e austenítica aplicadas por soldagem sobre aço inoxidável. II Seminário anual de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, Dezembro 2009. Acessado em 18/07/2012.
- 20 RIBEIRO, H. O. et al. Resistência à Erosão por Cavitação de Aços Inoxidáveis Austeníticos CrMnSiN Depositados por PTA. Soldagem & Inspeção, v. 15, n. 2, p. 121-129, abr/jun 2010.
- 21 BARRA, S. R.; Influência dos Procedimentos de Soldagem Sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto. Florianópolis, 1998. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- 22 HART, D.; WHALE, D.; A review of cavitation-erosion resistant weld surfacing alloys for hydroturbines. Disponível em: http://www.castolin.dk/wCastolin_com/pdf/publications/CaviTec.pdf. Acesso em dezembro de 2012.
- 23 BORDEASU, I. BADARAU, R. JURCHELA, A. The deformations and Microstructural transformations analyses produced by cavitation to the austenitic stainless steel. Journal of Machine Design, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Servia, 2008. Disponível em: http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2008/411-414_for_web.pdf. Acesso em 20/07/2012.