

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**“RECUPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS  
DANIFICADAS POR EROSÃO CAVITACIONAL POR  
SOLDAGEM COM AÇO INOXIDÁVEL /COBALTO.”**

**Ricardo Vechin de Macedo**

**Orientador: Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu**

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia - UNESP  
– Campus de Ilha Solteira, para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.  
Área de Conhecimento: Materiais e  
Processos de Fabricação

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M141r Macedo, Ricardo Vechin de .  
Recuperação de turbinas hidráulicas danificadas por erosão cavitacional por soldagem com aço inoxidável /cobalto. / Ricardo Vechin de Macedo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2014

Orientador: Ruis Camargo Tokimatsu  
Inclui bibliografia

1. Cavitação. 2. Turbinas hidráulicas. 3. Erosão cavitacional. 4. Soldagem . 5. Recuperação. 6. Aço inoxidável com cobalto.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Recuperação de turbinas hidráulicas danificadas por erosão cavitacional por soldagem com aço inoxidável/cobalto

**AUTOR:** RICARDO VECHIN DE MACÊDO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,  
Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CASSIUS OLIVIO FIGUEIREDO TERRA RUCHERT

Departamento de Engenharia de Materiais / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 22 de novembro de 2014.

## *Dedicatória*

*A minha esposa Kelly,  
Aos meus pais Manoel e Cleusa,  
Aos meus irmãos Romeu e Rodolfo,  
Pela educação, apoio e lição de vida transmitida.*

*“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”*  
*Albert Einstein*

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência.”*  
*Henry Ford*

## *Agradecimentos*

Aos meus queridos pais Manoel Paciência de Macedo e Cleusa Marlene Vechin de Macedo, responsáveis diretos por abrir o caminho que me levou a essa conquista, sempre me apoiando em todas as etapas de minha vida, nunca medindo esforços para que tudo isso se realizasse.

Aos meus irmãos Romeu Vechin de Macedo, *in memoriam*, e Rodolfo Vechin de Macedo, que compreenderam minhas escolhas dando apoio incondicional a elas.

À minha esposa, companheira e amiga Kelly V. da Silva Campos de Macêdo, pelo apoio, paciência e palavras de incentivo e conforto nos momentos difíceis.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu pelo apoio e encorajamento na retomada dos meus estudos no PPGEM para obtenção desse título, também pela orientação, paciência e tempo despendido durante todo o tempo de estudo. Sempre com demonstrando dedicação e confiança em mim.

Aos Profs. Dr. Vicente Afonso Ventrella, Dr. Juno Gallego e Dr. Celso RiyotsiSokei por todos os esclarecimentos e ensinamentos de ordem técnica, pela amizade e co-orientação recebida durante a realização deste trabalho.

Aos Técnicos da Área de Processos de Fabricação pelo apoio necessário com o aporte de equipamentos e no preparo dos corpos de prova.

A todos os docentes do curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unesp de Ilha Solteira, pelos conhecimentos transmitidos. A equipe da Secretaria da Pós-Graduação da FEIS, pelo apoio durante esse período, que foi fundamental devido a distância.

Aos meus amigos do Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais (GC3M) e do MaProTec - Grupo de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos pelo auxílio e companheirismo. Em especial ao amigo Luís Augusto Bussaglia Sossai que fiz durante esse período.

A todos os colaboradores e demais professores da Unesp de Ilha Solteira, que de forma ou de outra, colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp por todo o auxílio na análise e solução de problemas.

Aos colaboradores da Servtec Serviços Técnicos na pessoa do Eng. Roberto de Carvalho, que não mediu esforços na realização da soldagem das amostras e em ceder os materiais. A Sra. Roselaine Ferrari por disponibilizar a estrutura do CEFER para usinagem das amostras e a todos os colaboradores que de alguma forma ajudaram.

A Engenheira Cleide Marquese e ao Professor Augusto da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio na realização dos ensaios de cavitação acelerada e pela paciência e transmissão de conhecimentos sobre esse assunto.

À Centrais Elétricas Cachoeira Dourada S/A. pelo apoio dado durante esse período e aos Engenheiros Aparício Cesar Camargo e Stanley Siqueira Pratti pelo apoio e confiança depositada na realização desse sonho.

Aos amigos da UHE Cachoeira Dourada que sempre apoiaram e torceram pelo sucesso desse projeto.

Ao SENAI de Itumbiara, na pessoa do seu diretor Claiton Candido Vieira por ceder suas instalações para preparo das amostras

A todos os meus amigos que sempre torceram por mim e pelas minhas vitórias.

E, jamais se esquecendo de agradecer a Deus, seu filho Jesus e nossa mãe Maria por tudo de bom que tem acontecido em minha vida. Rogo a eles: força, saúde e fé para todos!

## *Resumo*

### **RECUPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS DANIFICADAS POR EROSÃO CAVITACIONAL POR SOLDAGEM COM AÇO INOXIDÁVEL /COBALTO.**

No atual cenário energético, torna-se cada vez mais imperiosa a necessidade de produzir energia com maior eficiência. Dessa forma, o ganho de eficiência através de processos que permitam um maior tempo entre as manutenções, gera também uma redução nos custos destinados à produção de energia. Entretanto, 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. Os estudos indicam como forma de minimizar essa situação, um melhor projeto hidrodinâmico das turbinas e a utilização de materiais mais nobres e resistentes a erosão cavitacional. Em turbinas novas, a melhoria do projeto e a utilização de materiais mais nobres, como o ASTM A743 Gr CA6- MN, reduzem os efeitos da cavitação e prolongam a necessidade de recuperação das máquinas. 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 permitam a atenuação desse fenômeno. Nesse sentido, ocorreu o desenvolvimento das ligas austeníticas com cobalto, que em função das dificuldades operacionais existentes na época, inicialmente se mostraram ineficientes para o aumento da resistência a cavitação e dos intervalos entre as recuperações. Visando garantir a operacionalidade dessas ligas foi desenvolvido em 2000, pelo LABSOLDA, o processo MIG/MAG com pulsação térmica, ou bi-pulsado, que proporcionou, junto às usinas hidrelétricas, uma popularização dessa liga na recuperação de erosão cavitacional e uma efetiva melhoria da resistência a cavitação das áreas revestidas das turbinas hidráulicas, como consequência a redução no período de parada e de deposição de material. Entretanto, nos últimos 10 anos, houve uma significativa evolução nas máquinas de solda convencionais, entre elas, a incorporação de controles eletrônicos de soldagem, que também reduz a interferência do soldador durante a soldagem. Nesse estudo, foi realizada a comparação entre o aço inoxidável E309L-T1 e o aço

inoxidável com cobalto (Cavitalloy), soldados na posição plana e com os procedimentos adotados usualmente na recuperação de erosão cavitacional, através do processo MIG/MAG com pulsação térmica e o processo MIG/MAG convencional. A comparação foi feita mediante os ensaios de microdureza, cavitação acelerada por ultrassom, e observação das superfícies utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados mostraram maior um tempo de incubação para alguns dos corpos de prova soldados pelo processo MIG/MAG com pulsação térmica, entretanto, o desempenho final dos corpos de prova soldados pelos processos bi-pulsado e convencional foram muito próximos. O perfil de dureza superficial permitiu verificar a ocorrência do aumento da dureza na região próximo a área cavitada e também permite a determinação das camadas de solda com razoável clareza.

**Palavras Chave:** Turbinas hidráulicas. Cavitação. Erosão. Aço inoxidável com cobalto. Soldagem. Recuperação.

## *Abstract*

### **RECOVERY OF HYDRAULIC TURBINES DAMAGED BY CAVITATIONAL EROSION BY WELDING WITH STAINLESS STEEL / COBALT**

In the current energy scenario, it becomes increasingly imperative to produce energy more efficiently. Thus, the gain in efficiency through processes that allow a greater time between maintenance, also generates a reduction in costs for the production of energy. However, a major problem faced by hydropower plants, is the phenomenon of cavitation, which generates as a result of erosion turbine parts, with loss of material and performance. Studies indicate as to minimize this situation, a better hydrodynamic design of the turbines and the use of materials noblest and resistant to cavitation erosion. In the new turbines, design improvement and the use of noble materials such as ASTM A743 Gr CA6-MN, reduce the effects of cavitation and prolong the need for recovery of machinery. However, to mitigate these effects in turbines that are already in operation, especially with more than 30 years, is necessary the application of coatings with features that enable mitigation of this phenomenon. In that sense, occurred the development of austenitic alloys with cobalt, which due to operational difficulties that existing at the time, initially proved ineffective for increasing the resistance against cavitation and the intervals between recoveries. To ensure the operability of these alloys was developed in 2000 by LABSOLDA, MIG / MAG welding with thermal pulse, or bi-pulsed, which provided, along with hydroelectric plants, one popularization of this alloy in the recovery of cavitation erosion and an effective improvement cavitation resistance of coated areas of hydraulic turbines, the effect of reducing the period of arrest and deposition of material. However, in the last 10 years, significant developments in conventional soldering machines, including the incorporation of electronic controls welding, which also reduces interference welder during welding. In this study, a comparison was made of an stainless steel E309L-T1 and stainless steel with cobalt (Cavitalloy), welded in the flat position and the procedure usually adopted in the recovery of cavitation erosion through the MIG / MAG process with thermal pulse and MIG / MAG conventional. The comparison was made using the microhardness tests, accelerated cavitation ultrasound and observation of surfaces

using scanning electron microscope (SEM).The results showed longer incubation time for some of the body of proof welded by MIG / MAG with thermal pulse, however, the final performance of the body of proof welded by bi-pulsed and conventional processes were very close. The profile of hardness possible to observe the increase in hardness in the region close to the cavitated zone and also allows the determination of the welding layers with reasonable clarity.

**Keywords:** Hydraulic turbines. Cavitation. Erosion. Stainless steel with cobalt. Welding. Recovery.

## *Lista de Figuras*

<i>Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no ano de 2013.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2- Desempenho de diversos materiais empregados na construção de turbinas hidráulicas com relação ao dano cavitacional. Perda de massa ao longo do tempo provocada por um equipamento de geração de ondas ultrassônicas .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3- Curva característica da evolução da taxa erosiva instantânea, em materiais sujeitos à cavitação .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4 - Sub-divisões do conceito de soldabilidade .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5- Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6 - (a) Diagrama de Schaeffler modificado e (b) Diagrama de Schneider .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7 - Esquema do Processo de Goivagem.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 8 - Esquema Soldagem do Aço Carbono.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 9- Esquema de soldagem por partes para controle da temperatura de inter-passe.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10 - Esquema de soldagem do Aço Inoxidável E309L-T1.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11 - Esquema de soldagem do Aço Inoxidável E309L-T1 e Aço Inoxidável com Cobalto .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12 - Oscilograma idealizado do processo de soldagem MIG/MAG com pulsação térmicas .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13 - Diagrama de Schaeffler modificado indicando a microestrutura formada do Cavitalloy.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14 - Diagrama Schneider indicando a microestrutura formada do Cavitalloy.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 15 - Arranjo esquemático do equipamento utilizado para ensaio vibratório acelerado de cavitação pelo método direto (a) e pelo método indireto (b).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16 - Relação das Amostras Soldadas, Procedimento e Máquina de Solda ...</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17 - Representação esquemática das sequencias de deposição das amostras soldadas e da solda de topo.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18 - (a) Máquina Convencional IDEALARC CV400 da Lincoln (b) MTE DIGITEC 450 da IMC. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19 - Esquema de retirada dos corpos de prova da amostra para Ensaios de Cavitação Acelerada, MicrodurezaVickers e Análise Metalográfica.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20- Bancada de ensaios de cavitação.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 21- Esquema do Ensaio de Cavitação Acelerada.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 22 - Fixação da amostra para o Ensaio pelo Método Indireto.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 23-Curva característica da evolução da perda de massa e parâmetros para representação do período de incubação e taxa erosiva em materiais sujeitos à cavitação .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 24- Esquema retirada Corpo de Prova para Metalografia e Microdureza .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 25 - Microscópio Neophot 21 com o acessório para medição de microdureza instalado.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 26 - Esquema da medição da microdureza da face longitudinal nos corpos de prova. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 27 - Esquema da medição da microdureza da superfície nos corpos de prova. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 28 - Amostras durante o processo de soldagem (a) somente lixadas antes da solda, (b) Com a soldagem do arame tubular AWS E309-LT1, (c) durante a soldagem do Cavitalloy e (d) após a conclusão da soldagem com Cavitalloy. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 29 - MBI-3CO (a) na condição Esmerilhada, (b) e (c) durante o Ensaio com Líquido Penetrante (LP). ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30 - Aspecto visual dos corpos de prova para Ensaio de Cavitação Acelerada (a) antes do ensaio e (b) a realização do ensaio.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 31 - Gráfico de Perda de Massa Acumulada nos Ensaios de cavitação acelerada.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 32 - Gráfico da Taxa de Erosão por CP nos Ensaios de cavitação acelerada .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33 - Gráfico do Tempo de Incubação por CP nos Ensaios de cavitação acelerada.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 34 - Microdureza da Superfície dos Corpos de Prova após o ensaio de cavitação acelerada .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 35 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-3AI, soldado somente com Aço Inoxidável E309L-T1.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 36 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal do MBI-2AI1CO, soldado com uma camada de Cavitalloy sobre “almofada” de E309L-T1. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 37 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal do MBI-2CO, soldado com duas camadas de Cavitalloy diretamente sobre o Aço Carbono.....</i>	<i>70</i>

<i>Figura 38 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-2Al2CO e MCO-2Al2CO, soldado com duas camadas de Cavitalloy sobre “almofada” de E309L-T1.</i>	71
<i>Figura 39 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-3CO e MCO-3CO, soldado com três camadas de Cavitalloy diretamente sobre o Aço Carbono</i>	71
<i>Figura 40 - Imagem obtida por MEV da região da interface da área cavitada após 40 horas de ensaio dos corpos de prova: (a) MBI-3Al, (b) MBI-2Al1CO, (c) MBI-2Al2CO, (d) MCO-2Al2CO, (e) MBI-2CO, (f) MBI-3CO, (g) MCO-3CO . Ampliação Original: 300 X.</i>	73
<i>Figura 41 - Imagem obtida por MEV da região erodida por cavitação após 40 horas de ensaio dos corpos de prova: (a) MBI-2Al2CO, (b) MCO-2Al2CO, (c) MBI-3CO e (d) MCO-3CO. Ampliação original: 1.500 X.</i>	74
<i>Figura 42 - Região do Metal Base em Aço Carbono incluindo Linha de Fusão e ZTA. Ataque com Reagente Nital 2% - MBI-3CO - Aumento original: 100X.</i>	75
<i>Figura 43 - Região do Revestimento Soldado com o E309L-T1, Ataque com Reagente Villela (a) MBI-3Al – Aumento original: 100X; (b) MBI-2Al1CO – Aumento original: 250X; (c) MBI-2Al2CO – Aumento original: 250X; (d) MCO-2Al2CO – Aumento original: 100X</i>	76
<i>Figura 44 - Interface na Região Soldada do AWS E309L-T1 com o Cavitalloy. Ataque com Reagente Villela (a) MBI-2Al1CO– Aumento original: 100X; (b) MBI-2Al2CO – Aumento original: 100X; (c) MCO-2Al2CO –Aumento original: 100X.</i>	77
<i>Figura 45 - Interface na Região Soldada do Aço Carbono com Cavitalloy. Ataque com reagente Vilela (a) MBI-2CO – Aumento original: 100X; (b) MBI-3CO – Aumento original: 100X; (c) MCO-3CO – Aumento original: 100X.</i>	78
<i>Figura 46 - Imagem obtida por MEV da região da trinca de solidificação do MBI-2Al2CO</i>	79
<i>Figura 47 - Diagrama de Schaeffler Modificado <sup>(1)</sup>, onde mostra o resultado da primeira camada de Cavitalloy depositada sobre o AWS E309L-T1<sup>(2)</sup></i>	80

## *Lista de Tabelas*

<i>Tabela 1 - Composição Química dos Aços Inoxidáveis com Cobalto mais conhecidos comercialmente. ....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 2 - Composição Química dos Materiais Depositados. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 3 - Parâmetros utilizados na soldagem .....</i>	<i>51</i>

## *Lista de Símbolos*

AF	Ferrita Acicular
Ar	Argônio
ASTM	American Standard Testing Mechanical
AWS	American Welding Society
A	Ampère
C	Carbono
CFC	Cúbica de Face Centrada
Cr	Cromo
Cr <sub>eq</sub>	Cromo Equivalente
Co	Cobalto
Cu	Cobre
E	Energia de Soldagem
EFE	Energia de Falha de Empilhamento
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HC	Hexagonal Compacta
HV	Hardness Vickers
I	Corrente Elétrica
kgf	quilograma-força
kV	quilovolt
LP	Liquido Penetrante
MAG	Metal Active Gas
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MIG	Metal Inert Gas
µm	Micrometro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Megapascal
Ms	Martensita start
MW	Megawatts
Ni	Níquel

Nieq	Níquel equivalente
P	Fósforo
PF	Ferrita Primária
PTA	Plasma Transferred Arc
RPM	Rotações Por Minuto
Si	Silício
SFE	Stacking Faults Energy
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
ZF	Zona Fundida
ZL	Zona de Ligação
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## *Sumário*

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivo	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	23
2.1	Turbinas Hidráulicas	23
2.1.1	<i>Construção de Rotores e Seus Componentes</i>	23
2.2	Cavitação Em Turbinas Hidráulicas	25
2.2.1	<i>Processo Erosivo</i>	26
2.3	Soldabilidade	27
2.4	Processos de Recuperação das Pás	33
2.4.1	<i>Ensaio Inicial de Líquido Penetrante</i>	33
2.4.2	<i>Mapeamento das Erosões Cavitacionais</i>	33
2.4.3	<i>Remoção do Material Danificado (Goivagem)</i>	33
2.4.4	<i>Esmerilhagem e regularização da superfície</i>	34
2.4.5	<i>Ensaio intermediário de Líquido Penetrante</i>	34
2.4.6	<i>Soldagem das áreas</i>	34
2.5	Processo MIG/MAG com Pulsação Térmica	37
2.6	Relação entre a Resistência do Material a Erosão Cavitacional e suas Propriedades	38
2.7	Resistência a Erosão Cavitacional do Aço Inoxidável com Cobalto	39
2.8	Relação entre a Microestrutura e a Resistência a Erosão Cavitacional	42
2.9	Efeito do Tamanho de Grão na Resistência à Cavitação	43
2.10	Efeito do Acabamento Superficial e da Porosidade na Resistência à Cavitação	44
2.11	Efeitos da Diluição na Resistência à Cavitação	45
2.12	Ensaio de Erosão por Cavitação	46
2.12.1	<i>Cavitação por vibração</i>	47
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	49
3.1	Materiais	49
3.1.1	<i>Metal de Base</i>	49
3.1.2	<i>Arames para Soldagem</i>	49
3.1.3	<i>Mistura de Gases para Soldagem</i>	50
3.2	Soldagem das Amostras	50

<b>3.3</b>	<b>Ensaio</b>	<b>52</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio de Cavitação Acelerada</b>	<b>53</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Preparação dos Corpos de Prova para Análise Metalográfica e Dureza Vickers</b>	<b>57</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Análise Metalográfica</b>	<b>58</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Medidas de Dureza Vickers</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Soldagem</b>	<b>62</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de Erosão Cavitacional</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de Microdureza</b>	<b>68</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise Metalográfica</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>81</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO I – Procedimentos de Soldagem</b>	<b>89</b>

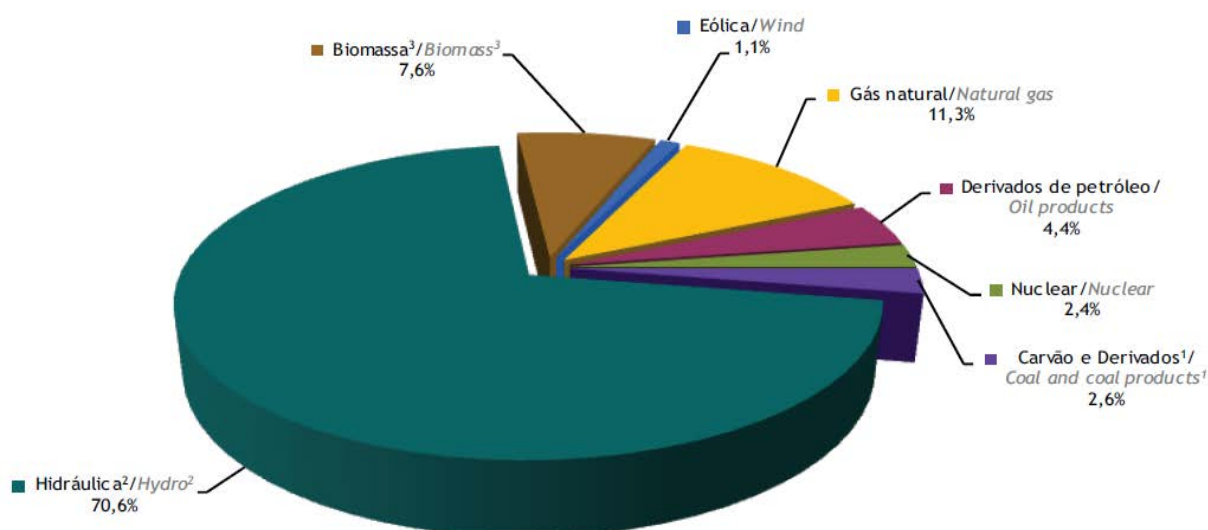
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A hidroeletricidade é considerada uma fonte de energia renovável, limpa e permanente, de baixo custo, que não gera gás do efeito estufa.

Sendo o Brasil, um país de dimensões continentais que possui uma grande quantidade de recursos energéticos, com a possibilidade de ter uma matriz energética diversificada, porém, os recursos hídricos que podem ser aplicados a essa produção são os mais abundantes, e as usinas hidrelétricas são responsáveis por 64,90% de nossa matriz energética (ANGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2014), o que faz com que no ano de 2013 ela tenha correspondido a 70,60 % da oferta de energia elétrica. É importante ressaltar que o consumo de eletricidade em 2013 teve um crescimento relativo maior que o crescimento da oferta, 3,6% e 2,9% respectivamente. (BRASIL, 2013)

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no ano de 2013



Notas/ Notes:

<sup>1</sup> Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas

<sup>2</sup> Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

<sup>3</sup> Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: BRASIL (2014)

A estiagem ocorrida nos anos de 2012 e 2013, que resultou em níveis e reservatórios abaixo do nível normal de operação, obrigou as usinas hidrelétricas a operarem com níveis de reservatório, tanto montante quanto jusante, abaixo do mínimo de projeto, situação essa que causa dentre outras coisas, problemas acentuados como: o aumento da cavitação, oscilação excessiva do eixo, o aumento dos esforços nos componentes das turbinas, principalmente nas pás levando ao surgimento de trincas, frente a um aumento na demanda de consumo. A demanda projetada para os próximos anos prevê um aumento médio no consumo de total até 2020 de 4,6%.

O resultado desse descompasso entre o aumento da demanda e das usinas hidrelétricas trabalhando de forma a forçar as turbinas tem como consequência alguns efeitos indesejáveis, como:

- erosão das pás motrizes;
- vibrações;
- ruídos excessivos;
- diminuição da eficiência das turbinas hidráulicas;
- aumento dos custos de reparo;
- perda de energia gerada por indisponibilidade das máquinas;
- limitação da flexibilidade operacional do sistema;
- redução da vida útil dos equipamentos afetados.

Com esse aumento da demanda, que vem ocorrendo ao longo dos anos, três estratégias podem ser adotadas para que a relação demanda/oferta seja mantida em níveis aceitáveis:

- A construção de novas usinas hidrelétricas, já que o potencial hidráulico a ser explorado até 2030 é de aproximadamente de 126.000 MW (BRASIL, 2007), entretanto, apenas 14.400 MW encontram-se em construção e mais 5350 MW outorgados, mas não iniciaram a construção (ANEEL, 2013). E, para garantir a expansão elétrica de forma a atender a demanda, vários desafios devem ser superados, especialmente no que se refere às questões ambientais, visto que, a construção de hidrelétricas com grandes reservatórios não está sendo mais aceita e 70% desse potencial hidrelétrico a ser explorado, concentra-se na Amazônia e no Cerrado.

- A diversificação da matriz energética passa por fontes eólicas e solares que são intermitentes para o sistema integrado e pelas termelétricas a gás natural e carvão, que são menos eficientes e poluentes (SANTOS, 2013);
- O aumento da eficiência do processo de geração de energia no parque gerador hidráulico, que no Brasil, grande parte possui mais de 30 anos (BRASIL, 2007), através da recapitação ou modernização das unidades geradoras e da redução dos tempos de parada gastos nas manutenções com as turbinas erodidas por cavitação.

Seguindo a estratégia do aumento de eficiência, um dos grandes problemas que causa prejuízos significativos as turbinas hidráulicas e como consequência as empresas geradoras, é a erosão cavitacional, visto que, exige a necessidade de paradas periódicas para a recomposição dos perfis hidráulicos das pás, das envolventes e muitas vezes das palhetas diretrizes.

Diversos pesquisadores como: Ribeiro (2008), Mesa (2010), Muthukannan (2006), tem realizado estudos para desenvolver e aperfeiçoar os materiais utilizados para recuperação de erosão cavitacional de forma a garantir uma maior resistência a cavitação, outros pesquisadores como Kruppa (2011), Moreira (2008), Ribeiro (2010), Will (2008), Bonacorso (2004) tem atuado de forma a otimizar os processos e procedimentos para garantir a qualidade do material depositado com o melhor rendimento.

Entretanto, no atual estado da arte, as ligas austeníticas ligadas ao cobalto, dentre elas o aço inoxidável com cobalto, são as que tem apresentado um bom desempenho na resistência a cavitação, sendo esse baseado no endurecimento superficial associado a transformação de fase que ocorre durante a ocorrência das ondas de choque geradas pela cavitação. Para a aplicação do material, o equipamento atualmente utilizado nas grandes empresas geradoras é a Máquina de Solda bi-pulsada ou com pulsação térmica, desenvolvida pelo LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

## **1.2 Objetivo**

Estudar e otimizar o procedimento de recuperação cavitacional considerando os aspectos do processo como comparar o uso de máquina de soldagem convencional e MIG/MAG com pulsação térmica, os materiais de deposição utilizados: arame tubular E309L-T1 e o Cavitalloy e o procedimento de deposição através da variação das camadas depositadas de revestimento.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Turbinas Hidráulicas**

Máquinas hidráulicas são equipamentos destinados a transformar a energia hidráulica em trabalho mecânico. Quando a água conserva seu movimento relativo entrando por uma região e saindo por outra, essas máquinas hidráulicas podem ser chamadas de turbinas hidráulicas. (COSTA, 2001)

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas em turbinas de ação ou impulsão e turbinas de reação.

Nas turbinas de ação ou impulsão a água flui com velocidade sensivelmente constante, apoiando-se sobre as paredes das conchas, estando submetida a pressão atmosférica. Como exemplo, temos as turbinas tipo Pelton. Esse tipo de turbina é utilizado para altas quedas e baixo volume de água. (COSTA, 2001; CERPCH, 2012).

Nas turbinas de reação, o rotor fica completamente submerso, caracterizando-se pelo movimento da água entre as pás, variando a velocidade e a pressão. (COSTA, 2001; CERPCH, 2012). Como exemplo, temos as turbinas tipo Francis, onde suas pás são fixas e as Kaplan, cujas pás são móveis, variando sua inclinação em relação ao eixo.

As turbinas Francis e Kaplan de alta velocidade específica, são mais sujeitas a incidência de cavitação em virtude de depressões ocorridas com maior frequência nas regiões convexas próximas a saída das pás rotoras.

Para geração de energia elétrica, essas turbinas são acopladas a um gerador elétrico, mantendo sua rotação em valor constante, para garantir a frequência da rede, no Brasil essa frequência é de 60 Hz.

#### **2.1.1 Construção de Rotores e Seus Componentes**

O projeto e a fabricação de turbinas hidráulicas vêm evoluindo ao longo do tempo, estando a indústria brasileira apta a fabricá-los dentro dos melhores padrões mundiais de qualidade.

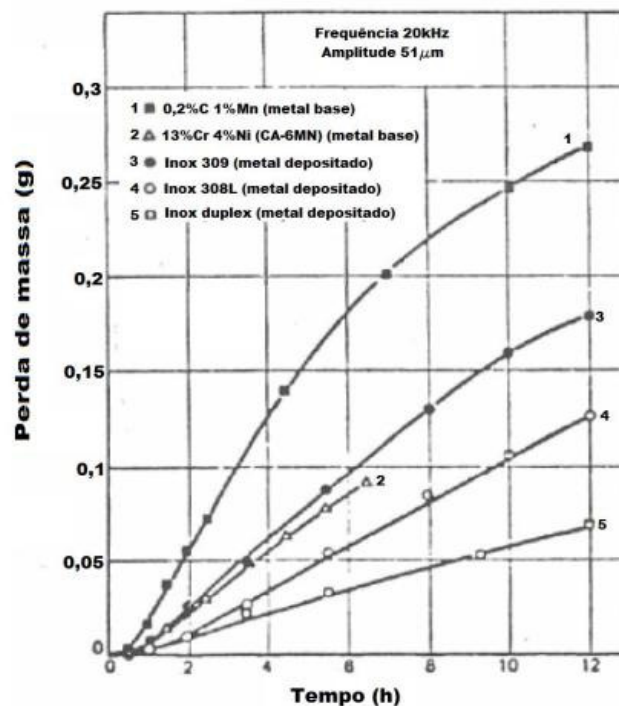
A eficiência das turbinas passa de 90%, e diversos fatores devem ser levados em consideração na fase de projeto, dentre eles: altura (H) e vazão (Q) disponíveis no local, se a máquina irá trabalhar afogada, a qualidade da água, etc.

Segundo Akthar (1986), citado por Gonçalves (2007), para a escolha do material a ser empregado, deve-se levar em consideração principalmente: custo, integridade estrutural, resistência a corrosão, resistência a erosão por cavitação e facilidade de manutenção.

Como pode-se observar nas turbinas de usinas como a de Ilha Solteira, Cachoeira Dourada, Xavantes, Paulo Afonso, até o final da década de 70, a maioria dos rotores era fabricada em aço carbono, geralmente aço carbono-manganês (C-Mn) com teor de carbono de 0,2%, como o ASTM A27. As áreas consideradas críticas para erosão por cavitação poderiam ser revestidas com aço inoxidável austenítico.

Vaz (2004) cita que na década de 80 no Brasil, foi quando iniciou-se a fabricação de rotores em aço inoxidável martensítico contendo cerca de 11 a 13% de Cromo e 1 a 6% de Níquel. Essa substituição do material de fabricação dos componentes das turbinas pode ser associada, entre outros fatores, a melhor resistência à corrosão e aos danos da cavitação, como se pode observar na figura 2 com o comportamento de alguns materiais empregados na construção de turbinas hidráulicas.

Figura 2- Desempenho de diversos materiais empregados na construção de turbinas hidráulicas com relação ao dano cavitacional. Perda de massa ao longo do tempo provocada por um equipamento de geração de ondas ultrassônicas



Fonte: Aktar (1986) citado por Vaz (2004)

Outro aspecto importante é o maior limite de escoamento que esses aços apresentam em detrimento ao aço carbono, em torno de 500 MPa para o CA-6Mn (ASTM A743) contra 250 MPa do ASTM A27, o que possibilita uma redução na espessura das partes da turbina para as mesmas condições de operação.

## 2.2 Cavitação Em Turbinas Hidráulicas

Um dos grandes problemas que atingem as Usinas Hidrelétricas é o fenômeno da cavitação. Euler (1754), citado por Allenstein (2007), 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 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 (2003), 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 Marques (2003), a cavitação possui uma aparência de “nuvem de espuma” quando observada a olho nu ou através de câmeras comuns.

Ela pode ser encontrada em todo dispositivo sujeito a um gradiente positivo de pressão, como por exemplo: turbinas hidráulicas, bombas, propulsores e lemes de navios ou componentes de equipamentos que trabalham sob severas condições em contato com fluidos. (MOREIRA, 2008; OKADA, 1990).

Tal fenômeno produz como consequência a erosão por cavitação, que é definido na ASTM G40-95 como “perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido a exposição contínua a cavitação”

A origem do termo “*erosão por cavitação*” está associada a junção de dois fenômenos físicos, o de cavitação (do latim: *cavus*= cavidade) e o do desgaste erosivo.

O principal interesse na atual fase de estudo do processo de erosão por cavitação tem sido o desenvolvimento de métodos que possam prever o

comportamento erosivo do material frente à cavitação, ou tornar mais claro o comportamento do material durante o período de incubação.

### **2.2.1 Processo Erosivo**

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 (OKADA, 1990). O material da superfície das zonas de cavitação trabalha de forma cíclica, que com o tempo acaba gerando fadiga superficial. Com o mesmo fadigado, tensões menores que a tensão de ruptura fazem com que ocorra a retirada desse material por “trincamento”, provocando a erosão cavitacional. (ASTM G32, 2006; RICHMAN, 1990; WANTANG, 2001)

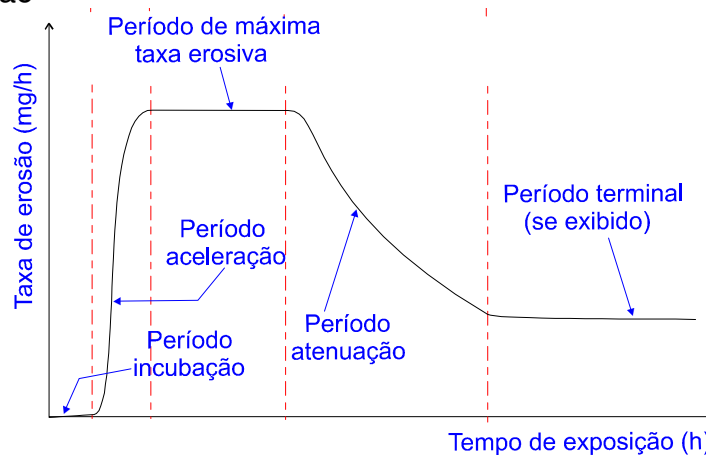
Segundo a norma ASTM G32 (2006), independente do material suscetível à erosão cavitacional, o desenvolvimento do processo erosivo em função do tempo de exposição, poderá apresentar cinco períodos ou estágios distintos, os mesmos estão indicados na figura 3 e relacionados a seguir:

- **Incubação:** período inicial onde não ocorre uma perda significativa de massa, com taxa erosiva nula ou desprezível, com poucas modificações no aspecto superficial (microdeformações).
- **Aceleração:** ao continuar absorvendo energia de impacto dos colapsos, irá ocorrer o surgimento de microtrincas no material previamente deformado, começando a apresentar um processo gradual de perda de massa em função do tempo;
- **Máxima taxa erosiva:** nesse estágio a perda de massa atinge o máximo em função do tempo e permanece constante;
- **Atenuação:** estágio posterior a máxima taxa erosiva, onde a rugosidade formada com a perda de massa absorve parte da energia de impacto, reduzindo a taxa de erosão.
- **Estabilidade:** neste estágio a taxa de erosão torna-se quase constante.

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

superfície. Em seguida, 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), na superfície, e desprendimento de partículas de desgaste (MUTHUKANNAN, 2006).

Figura 3- Curva característica da evolução da taxa erosiva instantânea, em materiais sujeitos à cavitação



Fonte: ASTM G32 (1995) adaptado por Barra (1998).

## 2.3 Soldabilidade

A definição do termo de Soldabilidade, pode ser encontrada no portal do Centro de Informação Metal Mecânica como :

*“A soldabilidade pode referir-se à facilidade de realizar a operação de soldagem utilizando-se parâmetros normais de regulação da máquina, de material de adição e de rendimento, ou à capacidade de o material ser soldado sem que haja a formação de microestruturas prejudiciais às suas características e propriedades mecânicas. Um material com boa soldabilidade deve se apresentar, após a soldagem, sem concentração excessiva de tensões internas e com boas propriedades mecânicas de tenacidade e ductilidade.” (CIMM,2012)*

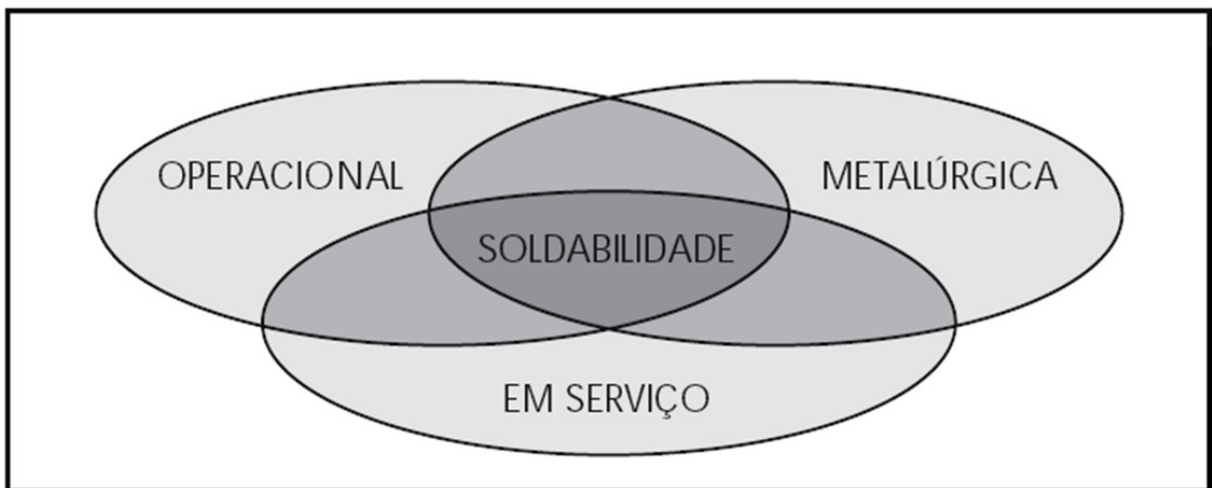
Dessa forma, para determinarmos a soldabilidade de um material, é importante conhecer o material que será soldado, considerar o processo, o procedimento de soldagem e a sua aplicação.

Brand (1997) divide o conceito de soldabilidade em 03 partes:

- soldabilidade operacional: associada diretamente a fabricação, envolvendo as particularidades de um processo de soldagem, a habilidade do soldador, as características do material a ser soldado e a versatilidade do processo de soldagem;
- soldabilidade metalúrgica: envolve as transformações de fase que ocorrem no material durante o aquecimento, a fusão, a solidificação e o seu resfriamento, estando diretamente relacionada a metalurgia da soldagem, sendo diretamente relacionado com a determinação da durabilidade e o desempenho da solda;
- soldabilidade em serviço: é o objetivo final da escolha dos materiais e procedimentos corretos, caso haja algum erro na especificação ou no procedimento de soldagem dos materiais poderá vir a ocorrer uma falha prematuramente. Esta sub-divisão passa a não ter sentido quando os demais são conhecidas e devidamente controladas.

Porém, é preciso ter em mente que os três conceitos são parte de uma propriedade única, e estão todos inter-relacionados (figura 4).

Figura 4 - Sub-divisões do conceito de soldabilidade



Fonte: Brandi (1997).

Na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente da do metal base. Soldas podem também apresentar descontinuidades como vazios, trincas, material incluso. etc. Em soldas de revestimento dois tipos de problemas inter-relacionados devem ser considerados:

1. Problemas na zona fundida ou na zona termicamente afetada que ocorrem durante ou imediatamente após a operação de soldagem, como poros, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio, perda de resistência mecânica, etc.

2. Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem em um certo momento durante o serviço da estrutura revestida. Estes podem reduzir a eficiência do revestimento nas condições de serviço e incluem, por exemplo, o aparecimento e a propagação de trincas por diversos fatores, problemas de corrosão, fluência, etc.

Para se evitar estes problemas, é importante conhecer as possíveis complicações que os materiais podem apresentar ao serem soldados, fatores do material, do projeto e do procedimento de soldagem que as afetam e a sua influência no comportamento em serviço da estrutura resvestida.

A família dos aços inoxidáveis austeníticos é maior classe em termos de número de ligas e de utilização, representam cerca de 65 a 70% do total produzido (WILL, 2008), nele estão incluídos principalmente as ligas Fe-Cr-Ni, embora existam ligas em que parte ou todo o Ni foi substituído por Mn e N.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam algumas características como (WILL, 2008; ASME, 1995):

- Tenacidade e ductilidade superiores que a apresentada pela maioria materiais, sendo mantidas até a temperaturas muito baixas, não apresentando transição dúctil/frágil;
- Boa resistência mecânica e a corrosão, mesmo a elevadas temperaturas;
- Em geral, elevada capacidade de endurecimento por deformação plástica sem o acompanhamento de uma elevada perda de ductilidade;
- Soldabilidade relativamente boa.

Como os ferríticos, os austeníticos não são endurecíveis por tratamento térmico, contendo entre 6 e 26% de Níquel, 16 e 30% de Cromo e menos que 0,3% de Carbono, o que altera sua estrutura para “Cúbica de Face Centrada” que é também não magnética.

Além do Cromo, Níquel e Carbono, os aço inoxidáveis austeníticos podem ter adições de outros elementos para obtenção de propriedades especiais, na Figura 5, Telles (2002) citado por Will(2008), relata o efeito desses elementos.

A ausência de transformação martensítica e sua boa tenacidade fazem

com que esse tipo de aço não seja suscetível a fissuração pelo hidrogênio. Sendo a sensibilização devido a formação de porosidade baixa. Dessa forma, em geral é fácil de se obter soldas adequadas sem pré-aquecimento e que não necessitam de tratamentos térmicos pós-soldagem.

Figura 5- Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos

Elemento	Efeitos
C	Provoca fortemente a formação de austenita. Pode formar carbonetos com o cromo e resultar em corrosão intergranular.
Cr	Provoca a formação de ferrita. Aumenta a resistência à oxidação e à corrosão
Ni	Provoca a formação da austenita. Aumenta a resistência à alta temperatura, resistência à corrosão e ductilidade.
N	Promove fortemente a formação da austenita (semelhante ao C). Aumenta a resistência mecânica
Nb	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular, combinado com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita, aumenta a resistência à fluência.
Mn	Estabiliza a austenita a temperaturas próximas da ambiente, mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente ( <i>hot shortness</i> ) pela formação de MnS.
Mo	Aumenta a resistência a alta temperatura. Aumenta a resistência à corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
P, Se, S	Aumentam a usinabilidade, mas promovem fissuração de solidificação durante soldagem. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão
Si	Aumenta a resistência à formação de carepa e promove a formação de ferrita. Em todos os tipos, pequenas quantidades são adicionadas para desoxidação.
Ti	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular, combinado com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cu	Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à fissuração por corrosão sob tensão e causa efeitos endurecedores por envelhecimento.
Co	Diminui a energia de falha de empilhamento. Facilita a transformação de fase induzida por deformação e aumenta o coeficiente de endurecimento por deformação.

Fonte: Telles (2002), citado por Will (2008)

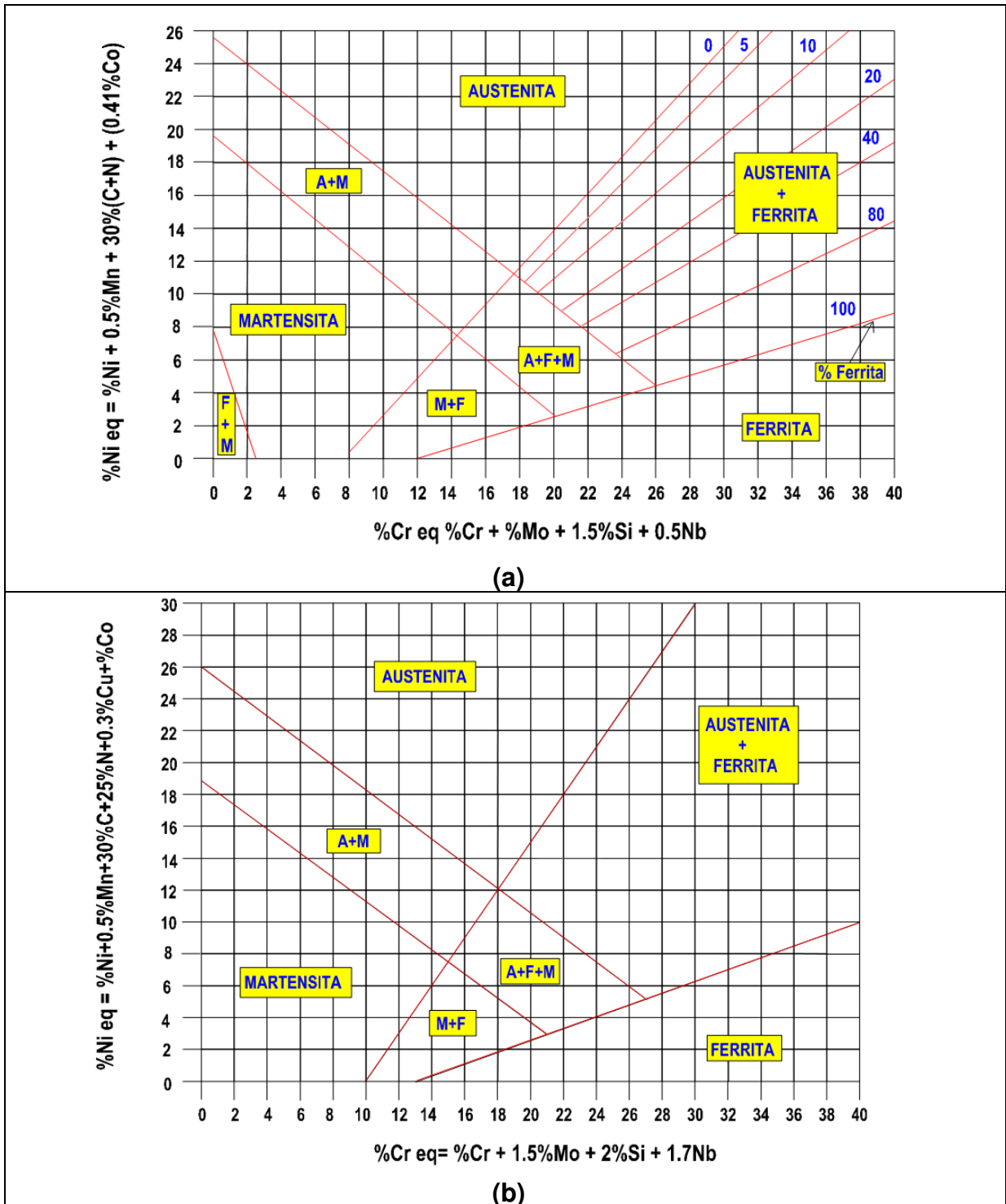
Entretanto deve-se atentar para alguns efeitos indesejáveis que podem ocorrer na soldagem, como a precipitação de carbonetos intergranulares de cromo e microfissuras na junta soldada. Esses efeitos podem ser eliminados adotando condições de soldagem compatíveis com as características dos materiais soldados.

A microestrutura da zona fundida difere em alguma extensão da microestrutura do material base. Essa microestrutura que será formada, pode ser normalmente estimada através dos diagramas constitucionais que estabelecem uma relação entre a quantidade de elementos denominados alfa-gênicos, que estabilizam a ferrita, presentes na equação do Cr equivalente ( $\%Cr_{eq}$ ) e os elementos denominados gama-gênicos, que estabilizam a austenita, presentes na equação do Ni equivalente ( $\%Ni_{eq}$ ). Dois exemplos de diagramas utilizados na definição das fases são os de Schaeffler (1949) e o de Schineider (1960), quando da presença do Cobalto, apresentados na figura 6.

Torres (1995), citado por Barra (1998), relata que a formação da fase “ $\delta$ ” pode sofrer influência e como consequência alterações em relação aos diagramas em decorrência da técnica de deposição, taxa de resfriamento, comprimento do arco, contaminação atmosférica e diluição.

Segundo Rao e Kung (1987), citado por Will (2008), que além do conhecimento da microestrutura formada, o conhecimento da relação entre  $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$  pode ser utilizado como critério de avaliação da resistência a erosão cavitacional em Aços Inoxidáveis. Em relação ao comportamento dos Aços Inoxidáveis e Ligas Ni/Co, eles observaram que as ligas que apresentavam melhor resistência possuíam uma estrutura monofásica austenítica e valores de 0,4 a 0,7 na relação  $Cr_{eq} / (Cr_{eq} + Ni_{eq})$ .

Figura 6 - (a) Diagrama de Schaeffler modificado e (b) Diagrama de Schneider



Fonte: Barra (1998).

## 2.4 Processos de Recuperação das Pás

### 2.4.1 Ensaio Inicial de Líquido Penetrante

O ensaio de líquido penetrante (LP) é realizado para identificação de defeitos em superfícies de materiais isentos de porosidade como os metálicos, cerâmicos e vidros. Este método está baseado no fenômeno da capilaridade que é o poder de penetração de um líquido em locais extremamente pequenos devido a suas características físico-químicas como a tensão superficial.

Apesar da zona com erosão cavitacional ser bem aparente, podem existir regiões adjacentes a ela que já sofreram com os efeitos da cavitação, dessa forma, a realização deste ensaio visa delimitar a área em que será necessária a recuperação.

A execução do ensaio consiste na limpeza da área a ser ensaiada, para retirada de resíduos de óleo, graxa ou outras sujidades que possam obstruir as aberturas de defeitos existentes. Após a limpeza é aplicado o líquido penetrante, devendo ficar aplicado na superfície por no mínimo 5 minutos.

Posterior ao tempo de exposição do líquido penetrante, é feita a limpeza e a aplicação de um revelador (pó branco), que irá mostrar a localização das discontinuidades superficiais com precisão e grande simplicidade, embora suas dimensões sejam ligeiramente ampliadas.

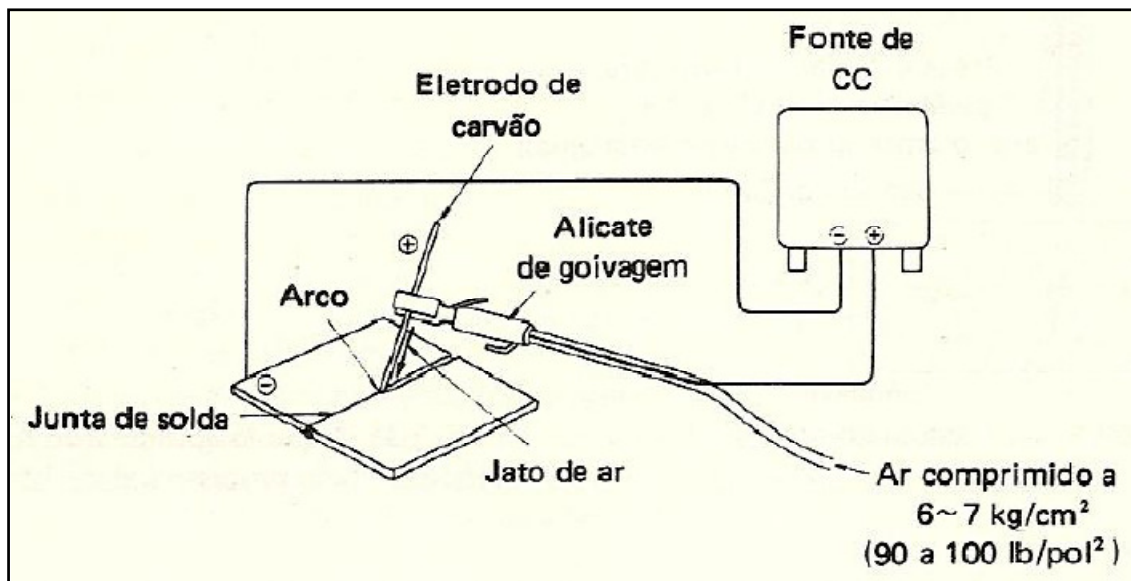
### 2.4.2 Mapeamento das Erosões Cavitacionais

Nessa etapa, as regiões visualmente atingidas pela erosão por cavitação e as áreas próximas detectadas através do LP, são devidamente identificadas e registradas quanto a sua localização e dimensões.

### 2.4.3 Remoção do Material Danificado (Goivagem)

Nesse processo o arco elétrico é gerado entre um eletrodo de carvão e o metal-base. O eletrodo de carvão tem um canal interno, através do qual flui um jato de ar comprimido, que expulsa o metal líquido proveniente da poça de fusão resultado do arco elétrico. O esquema do processo pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema do Processo de Goivagem



Fonte: Gomes (2012)

O processo é utilizado na remoção do material danificado pela erosão cavitacional, as faixas de tensão empregadas variam de 35 a 56 V. e a faixa de corrente de 150 a 500 A. São comumente utilizados eletrodos revestidos de cobre com o núcleo de grafite nos diâmetros de 1/4", 1/2" ou 3/4".

#### **2.4.4 Esmerilhagem e regularização da superfície**

Após a goivagem é feita a esmerilhagem da área a ser recuperada para regularização da superfície, evitando o aparecimento de vazios na solda em função das irregularidades e cantos vivos provenientes do processo de goivagem.

#### **2.4.5 Ensaio intermediário de Líquido Penetrante**

Concluída a preparação da superfície que será revestida, é necessário realizar um segundo ensaio de líquido penetrante, a fim de verificar que não existem defeitos ou irregularidades nessas regiões.

#### **2.4.6 Soldagem das áreas**

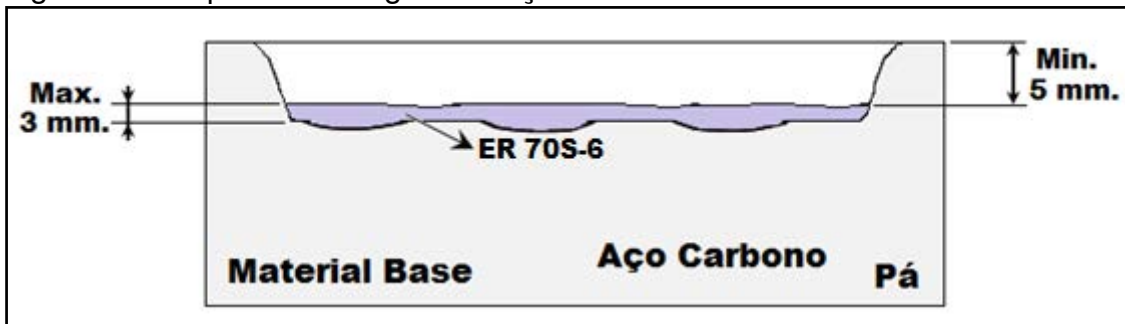
A aplicação do revestimento pode ser realizada de duas formas, para regiões onde os danos provocados pela cavitação não são intensos, com profundidades de até 8 mm, é feito o revestimento com o arame tubular AWS E309L-T1 de aço

inoxidável austenítico, seguindo conforme descrito no item 2.4.6.1. Já em regiões com profundidades maiores, tem-se optado pela aplicação na superfície das pás do aço inoxidável com cobalto, nesses casos a deposição é realizada conforme o item 2.4.6.2.

#### 2.4.6.1 Recuperação com Aço Inoxidável E309-LT1

Em função do custo dos materiais de deposição, para profundidades maiores que 6,0 mm tem-se optado por iniciar a deposição do arame sólido de aço carbono (ER 70S-6), efetuando o preenchimento até que a profundidade fique no mínimo com 5 mm. É necessário a esmerilhagem para a regularização dessa superfície e a realização de novo ensaio de líquido penetrante.

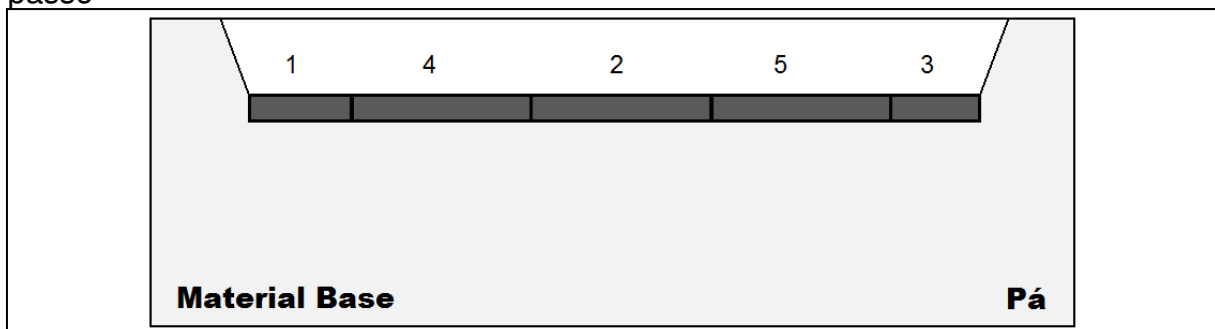
Figura 8 - Esquema Soldagem do Aço Carbono



Fonte: Do próprio autor

A temperatura da pá deve ser controlada para que não ocorra um aquecimento excessivo na região da soldagem, utilizando lápis térmico, termômetro de contato ou sem contato. Uma forma de evitar é efetuar o enchimento da superfície preparada por partes, conforme figura 9 abaixo:

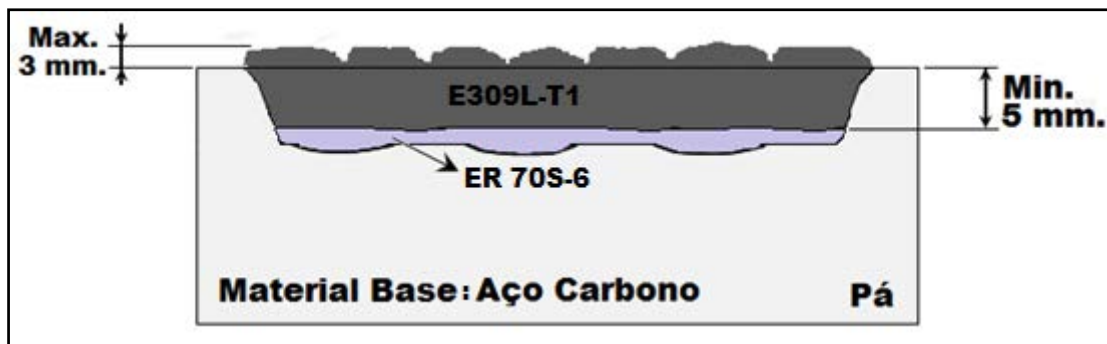
Figura 9- Esquema de soldagem por partes para controle da temperatura de inter-passe



Fonte: Do próprio autor

Completar o enchimento com o Aço Inoxidável, deixando uma sobre camada de, no máximo, 3,0 mm para acabamento.

Figura 10 - Esquema de soldagem do Aço Inoxidável E309L-T1.



Fonte: Do próprio autor

#### 2.4.6.2 Revestimento com Aço Inoxidável com Cobalto

O procedimento abaixo é o recomendado pela Welding Alloys, fabricante do arame Cavitalloy, e atualmente utilizado pela empresa Servtec.

Para espessuras maiores, efetuar o enchimento de aço carbono até atingir 10 mm de profundidade.

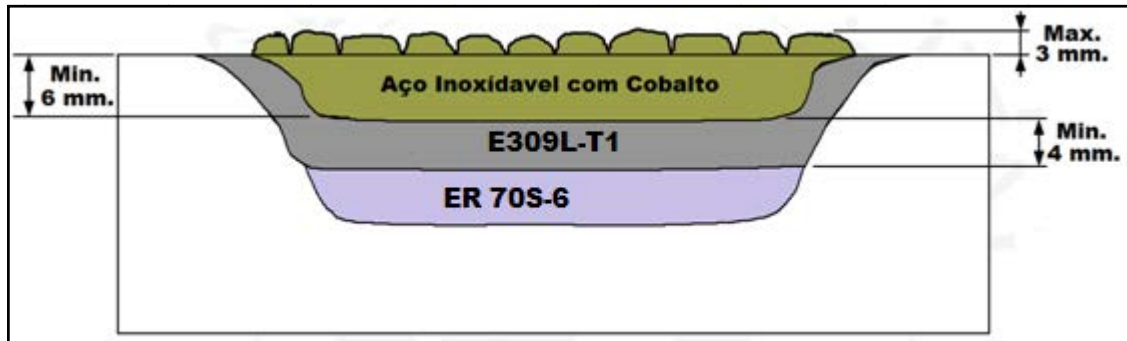
Em todo o processo de soldagem a temperatura da pá deve ser controlada para que não ocorra um aquecimento excessivo na região da soldagem, utilizando lápis térmico, termômetro de contato ou sem contato. O croqui apresentado na figura 9, pode ser utilizado como forma de efetuar o enchimento da superfície.

Regularizar a superfície e executar ensaio de líquido penetrante para garantir que não existam poros, vazios ou trincas. Prosseguir com a deposição do arame tubular AWS E309L-T1, com o qual deverão ser efetuados pelo menos dois passes de solda.

Uma nova regularização da superfície deve ser feita através do esmerilhamento, mantendo uma espessura mínima de 6 mm. Efetuar ensaio de líquido penetrante para avaliar o resultado da soldagem quanto à presença de poros, trincas, etc.

Completar o enchimento com arame tubular de aço inoxidável com cobalto até obter sobre camada para acabamento máximo de 3 mm.

Figura 11 - Esquema de soldagem do Aço Inoxidável E309L-T1 e Aço Inoxidável com Cobalto



Fonte: Do próprio autor

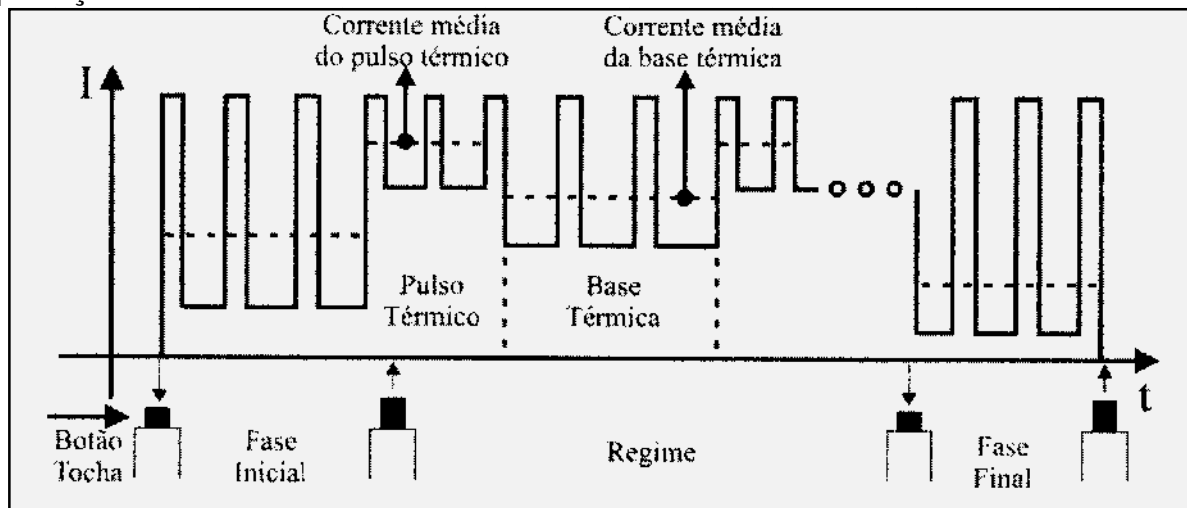
## 2.5 Processo MIG/MAG com Pulsação Térmica

O desenvolvimento do processo surgiu da dificuldade operacional na utilização dos arames tubulares a base de cobalto, em uma parceria entre a UFSC e uma empresa parceira, do ramo de geração de hidroeletricidade. (SILVA, 2009).

Dutra *et al* (1995), citado por Barra (1998), propôs a aplicação da pulsação térmica no processo MIG, através do emprego de fontes de soldagem de última geração, de forma a obter um processo que incorporasse as vantagens da pulsação térmica do processo TIG, que garantiria um nível de frequência adequado para ter efeito sobre a poça metálica, e características da corrente pulsada, permitindo controlar melhor a transferência metálica.

A Figura 12 mostra o oscilograma idealizado do processo MIG/MAG com pulsação térmica.

Figura 12 - Oscilograma idealizado do processo de soldagem MIG/MAG com pulsação térmicas



Fonte: Silva (2009)

Para Barra (1998), os seguintes benefícios também podem ser esperados da pulsação térmica:

- Zona termicamente afetada mais estreita;
- Controle da zona fundida;
- Curto espaço de tempo em temperaturas elevadas, na sucessão de pulso.

Segundo Silva (2009), o processo de MIG com pulsação térmica foi desenvolvido pelo LABSOLDA para suprir as dificuldades operacionais na aplicação dos revestimentos a base de cobalto através do processo convencional de MIG/MAG para recuperação de turbinas hidráulicas.

## **2.6 Relação entre a Resistência do Material a Erosão Cavitação e suas Propriedades**

Segundo Ribeiro (2007), citando Karimi (1989), a erosão por cavitação pode ser considerada um tipo de dano com características próprias e que devido ao caráter pulsatório do fenômeno, não pode ser correlacionada com propriedades mecânicas estáticas. Entretanto, inúmeros pesquisadores tentaram estabelecer uma relação entre a resistência à erosão cavitação e as propriedades dos materiais. Porém, nenhuma das propriedades monotonias dos materiais, como: dureza, limite de escoamento, limite de resistência, ductilidade ou resiliência, apresentaram bons resultados quanto a correlação entre essas propriedades e sua resistência a erosão cavitação quando comparados diversos tipos de materiais. Essas propriedades apresentam uma relação com a resistência a erosão cavitação quando comparadas com materiais de mesma classe e tipo. (VAZ, 2004; YOSHIHISA, 1989; HEATHCOCK, 1982).

Pode-se indicar algumas características para que um aço apresente boa resistência a erosão cavitação, essas características são: alta resistência ao ancoramento de discordâncias, baixa energia de falha de empilhamento, distribuição homogênea de pontos de ancoramento, transformação de fase induzida por deformação, tamanho de grão pequeno e alta plasticidade. Dessa forma, diversos materiais que possuem, uma ou de preferência mais dessas características tem sido desenvolvido pela indústria (ESPITIA, 2010, citando HAMMITT, 1980).

Diversos pesquisadores, dentre eles Richman (1990), Barra (1998), Vaz (2004), Rao (1997), indicam como mecanismo principal da erosão cavitacional a fratura por fadiga, e que a boa resistência à fadiga de um material esteja relacionada ao mecanismo que permite uma baixa remoção de partículas durante a cavitação nas ligas dúcteis. A resistência ao dano cavitacional medida tanto por um tempo de incubação como por uma taxa de perda de massa apresenta segundo os autores, uma boa correlação com a tenacidade e o coeficiente de resistência a fadiga ( $\sigma'f$ ).

Richman (1990) cita a existência da relação de propriedades microscópicas, como a energia de falha de empilhamento, com a resistência a erosão cavitacional e a uma correlação com  $\sigma'f$  e com o produto de  $\sigma'f.n$ , sendo “n” o expoente de endurecimento por deformação cíclica.

Ribeiro (2007), citando Rao (1997), e Filippin-Lira (2001) usam como exemplo um rotor de turbina hidráulica que quando projetado é para vida infinita à fadiga. Entretanto, a necessidade de manutenção e de reparo, em sua grande maioria realizada por processos de soldagem por arco elétrico, acaba por inserir danos a esses componentes, reduzindo a vida à fadiga. O processo de soldagem pode deixar tensões residuais na região recuperada que se somam às tensões de trabalho, fato esse que pode levar essa região da estrutura à falha, mesmo quando com as cargas operacionais dentro do limite de projeto. A tensão residual presente no componente recuperado é função do tipo de material de base, do processo de soldagem empregado, da velocidade de resfriamento e da geometria e condições de apoio da estrutura. Com a existência de alguns defeitos superficiais e/ou internos (poros) ocorre a intensificação da concentração das tensões por se tratarem, também, de variações de geometria.

## **2.7 Resistência a Erosão Cavitacional do Aço Inoxidável com Cobalto**

As ligas para revestimentos mais resistentes à erosão por cavitação permitem que se diminua a frequência e o tempo de paradas para reparos, gerando assim menores gastos com mão-de-obra e materiais, além de maior disponibilidade da turbina hidráulica para a geração de energia. Dentre os materiais atualmente utilizados na recuperação de erosão cavitacional, encontra-se o aço inoxidável com cobalto, comercialmente atende pelos nomes de Cavitalloy, Cavitec, Durcavit,

diferentemente das Ligas de Cobalto conhecidas comercialmente como Stellite, elas possuem uma quantidade menor de Cobalto além de outros elementos como Manganês e Nitrogênio (WELDING ALLOYS, s.d.; HART, s.d.; SIMONEAU, 1986).

Na Tabela 1, pode-se observar a composição química dessas ligas.

Tabela 1 - Composição Química dos Aços Inoxidáveis com Cobalto mais conhecidos comercialmente.

Liga	Elementos de Liga (%)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	V	P	N	Cu
<b>Cavitalloy</b> <sup>(a)</sup>	0,19	1,9	9,8	19,5	-	10,8	0,28	-	-	0,3	-
<b>Cavitec</b> <sup>(b)</sup>	0,21	2,4	10	13,6	0,12	11,3	-	0,06	0,03	0,2	0,1
<b>Durcavit</b> <sup>(b)</sup>	0,2	1,2	7,0	15,8	0,66	9,0	-	0,07	0,01	0,12	0,03

Fonte: <sup>(a)</sup> Dados do Fabricante, <sup>(b)</sup> WILL (2008).

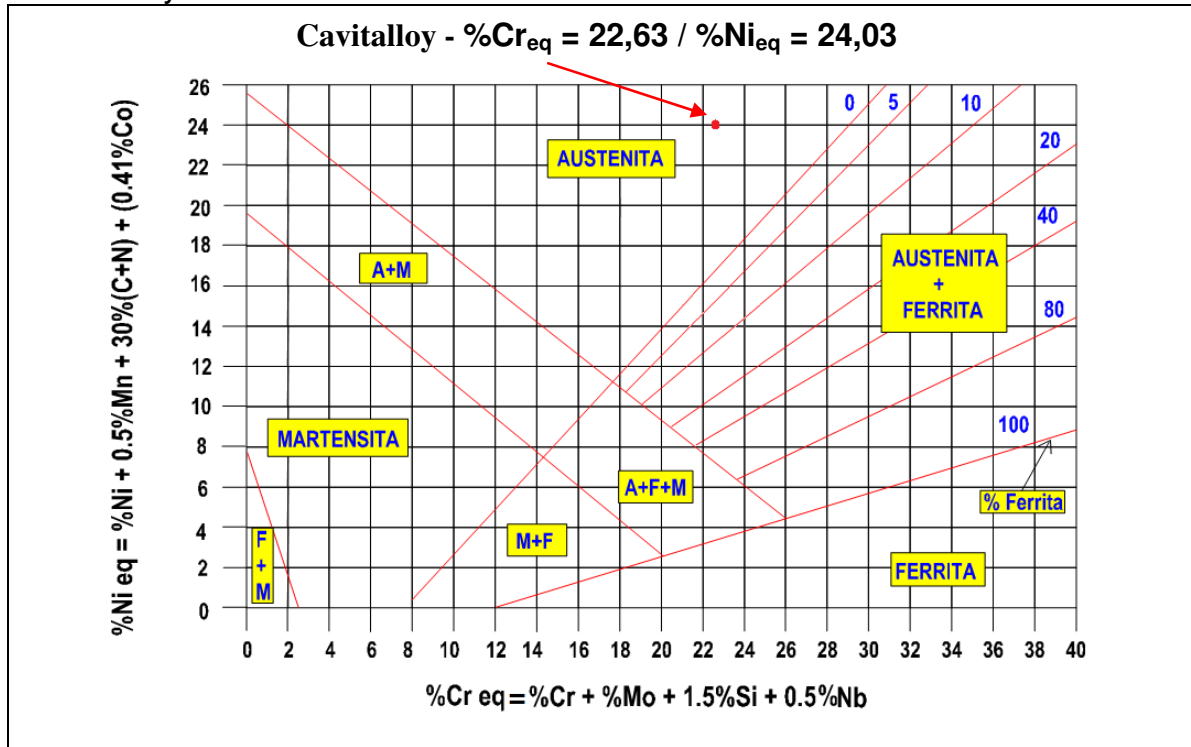
Segundo Simoneau (1984), citado por Will (2008), o início do desenvolvimento dos aços inoxidáveis ligados ao cobalto se deu em função dos estudos que constataram a resistência superior, chegando a 50 vezes, das ligas de cobalto com baixo teor de carbono (Stellite 21) em relação ao aço inoxidável AISI 308. Simoneau (1986), realizando experimentos para o desenvolvimento de novas ligas, chegou 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, visando conseguir uma estrutura austenítica, com baixa falha de empilhamento e com características de deformação planar, maclação fina e elevado endurecimento por deformação.

Hart (s.d.) realizou testes em campo para seu estudo sobre a resistência a Erosão Cavitacional de três revestimentos utilizados em turbinas hidráulicas, que indicaram uma resistência do Aço Inoxidável com Cobalto até 10 vezes superior a um Aço Inoxidável Austenítico (AISI 308). Em estudos realizados em laboratório por Hart (s.d.) e Simoneau (1986) utilizando métodos de cavitação acelerada por vibração, essa resistência chega a ser 20 vezes superior.

Pode-se observar através do Diagrama de Schaeffler modificado, Figura 13, e de Schneider, Figura 14, tendo como referência a composição química do Cavitalloy, informada pelo fabricante, que a estrutura formada é austenita. A formação dessa estrutura nesse material é em função do mesmo possuir em sua composição

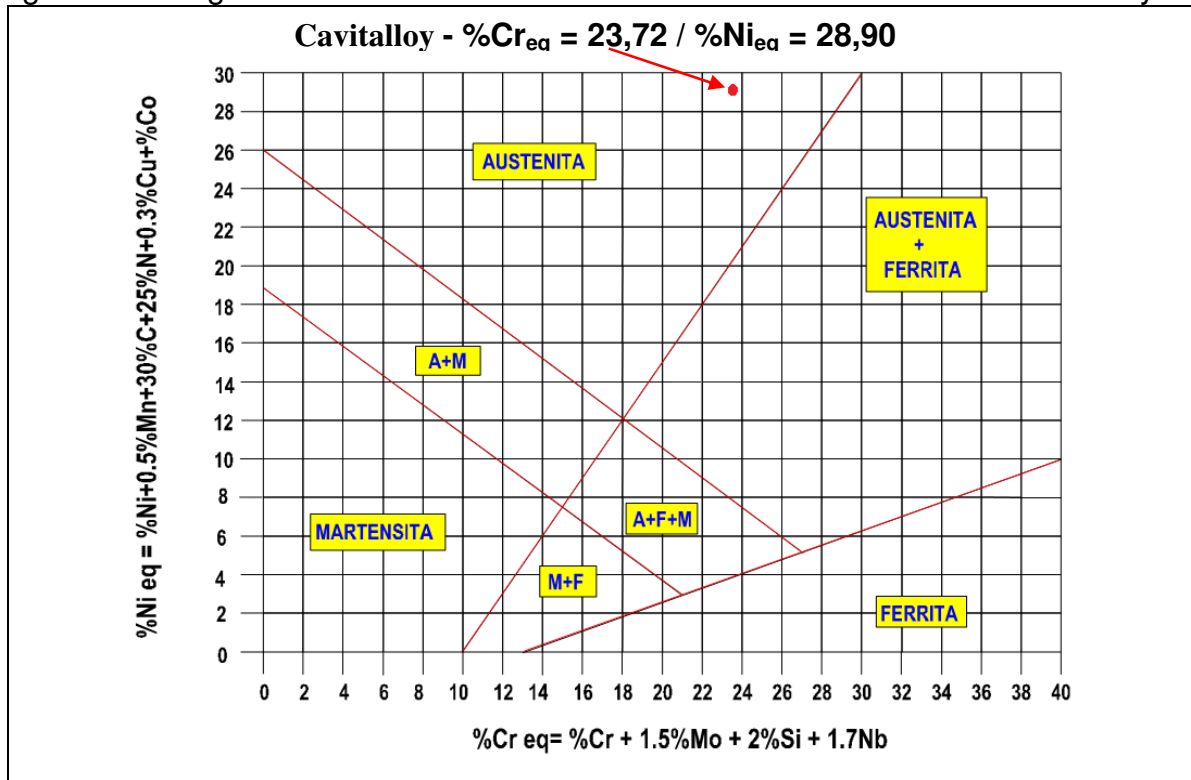
química, elementos alfacenos, que facilitam a formação de estruturas dessa forma.

Figura 13 - Diagrama de Schaeffer modificado indicando a microestrutura formada do Cavitalloy



Fonte: Barra (1998).

Figura 14 - Diagrama Schneider indicando a microestrutura formada do Cavitalloy



Fonte: Barra (1998).

Para Otterloo (1996), citado por Mussardo (2008), 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.

## 2.8 Relação entre a Microestrutura e a Resistência a Erosão Cavitacional

Diversos pesquisadores, dentre eles Ribeiro (2008), Xiaojun *et al.* (2003), Procopiak (2000), Lambert *et al.* (1987), atribuem o bom desempenho em relação a cavitação do Aço inoxidável ao cobalto, a sua microestrutura que possui como características: a baixa energia de falhas de empilhamento, estrutura monofásica austenítica “ $\gamma$ ” e transformação de fase induzida por deformação ou por combinações destas.

Segundo Ribeiro (2008), a energia necessária para que ocorra a transformação de fase é oriunda dos impactos da implosão dos microjatos sobre a superfície, que provocam as deformações cíclicas. Estando o período de incubação do material, diretamente relacionado ao tempo necessário a essa transformação. Sendo que, apenas após a transformação de fase que esses impactos provocarão o desenvolvimento de tensões localizadas necessárias ao início da fratura.

A baixa energia de falha de empilhamento, em conjunção com o encruamento que é causado pela cavitação, promove o deslizamento planar maclas de deformação e as transformações martensíticas. (HART *et al.*, 2005; KARIMI, 1989).

As falhas na sequência de empilhamento de planos atômicos de alguns materiais cristalinos, essas falhas acabam resultando em estruturas diferentes em pontos localizados dos cristais formados. Estando esse defeito associado a um determinado nível de energia que depende da composição química do material. Materiais que possuem baixa energia de falha de empilhamentos (EFE), geralmente apresentam discordâncias parciais bem separadas com maior área de falha de empilhamento. (PROCOPIAK, 1995, citado por RIBEIRO, 2008)

Para os aços inoxidáveis ao cobalto existe uma falha na sequência de empilhamento que resulta em estruturas  $\gamma$  (matriz) e  $\varepsilon$ , sendo que nesse caso a

energia de falha de empilhamento é a diferença de energia livre entre essas estruturas. Sendo assim, pode-se dizer que existe uma relação entre a EFE e a fase  $\varepsilon$ , servindo as falhas como embriões para essa fase. (BARRA, 1998, citado por PROCOPIAK, 2000; LAMBERT *et al*, 1987)

Heathcook(1982) e Barra (1998), indicam que um ponto importante que deve ser considerado na resistência a erosão por cavitação dos aço inoxidáveis austeníticos, é a metaestabilidade estrutural da austenita. Sendo que essa característica permite, devido as tensões geradas pela cavitação, uma transformação da estrutura inicialmente austenítica, para uma estrutura combinada de austenita  $\gamma$  (CFC), mais martensita  $\varepsilon$  (HC) e martensita  $\alpha'$  (CCC). Essa formação de martensita acima da temperatura de transformação no resfriamento ( $M_s$ ) depende principalmente dos elementos de liga presentes e da tensão aplicada.

Pode-se dizer que as características de estrutura monofásica, baixa energia de falhas de empilhamento e transformação martensítica, induzida por deformação, estão inter-relacionadas e constituem um papel importante na boa resistência à cavitação de depósitos soldados. (ZYLA *et al*, 1994, citado por BARRA, 1998)

## 2.9 Efeito do Tamanho de Grão na Resistência à Cavitação

Bregliozzi *et al* (2005) e Barra (1998), indicam um aumento da resistência à cavitação quando do refinamento dos grãos, devido ao fato dos contornos de grãos apresentarem um nível de deformação mais elevado que a superfície exposta do grão, isto é, os contornos servindo de barreira ao movimento estrutural.

Segundo Procopiak *et al* (2000), em seu estudo realizado sobre os efeitos da modificação da superfície na resistência a cavitação, o refinamento da microestrutura esconde a extensão da falha de empilhamento, reduz a quantidade de transformação de fase, e prolonga o período de incubação.

O refinamento dos grãos da fase inicial  $\gamma$ , também proporciona o abaixamento de  $M_s$ , aumentando o tempo de incubação antes do início da transformação  $\gamma \rightarrow$  martensita (NISHIYAMA, 1978, citado por BARRA, 1998) e provoca um aumento da força necessária ao arrancamento das partículas superficiais. (BARRA, 1998)

## 2.10 Efeito do Acabamento Superficial e da Porosidade na Resistência à Cavitação

Pesquisadores como Procopiak (2000), Boccanera (1998) e Barra (1998) consideram o acabamento superficial e defeitos superficiais, como poros e inclusões, aspecto que possui uma grande importância na resistência à cavitação. Comparando revestimentos de mesmos materiais, quanto melhor for este acabamento, melhores serão os resultados no que diz respeito à cavitação. Acabamentos com muitos riscos de lixa, porosidades e à presença de inclusões provocam a perda de desempenho, devido a geração de pontos microscópicos, mas que são suficientes para que o processo de erosão seja iniciado.

Com relação a influência do acabamento superficial, Boccanera (1998) desenvolveu um trabalho a fim de estabelecer comparações para as resistências baseadas no acabamento superficial, utilizando teste acelerado de cavitação por método ultrassônico, seguindo os padrões da norma ASTM G32. Após os testes de cavitação, as amostras polidas mostraram que a erosão se iniciava nas maclas geradas pelas deformações dentro de cada grão e linhas deixadas pelo polimento que são zonas de maior encruamento. Nas amostras lixadas, os riscos deixados por lixas apresentaram um efeito concentrador de tensões equivalente a um entalhe, sendo regiões sítios preferenciais para a proliferação do processo de erosão.

Segundo Ribeiro (2007), citando Ahmed *et al* (1990), a influência do acabamento superficial, é de tal ordem, que existe a possibilidade de rastream-se os diferentes períodos que compõem o processo erosivo por meio da rugosidade ( $R_a$  e  $R_y$ ) apresentada em diferentes tempos de ensaio e, desta forma, definir cada período pela mudança abrupta no aspecto da superfície exposta à cavitação.

Em seu estudo, Procopiak *et al* (2000), verificou que defeitos superficiais, porosidades e inclusões, geravam uma perda de desempenho das ligas soldadas frente a resistência a cavitação. Esses defeitos são pontos para iniciação da erosão, diminuindo o desempenho e a resistência. Como forma de melhorar a superfície, reduzindo a quantidade e distribuição desses defeitos, os autores realizaram experiências utilizando o processo a arco elétrico TIG (GTAW), obtendo para os mesmos materiais, um melhor desempenho.

Boccanera (1998) também estudou, em consumíveis AWS E309L-16 e outro aço inoxidável austenítico ligado ao cobalto, utilizando os testes de cavitação

acelerada baseado na ASTM G32, os efeitos da porosidade na taxa de erosão. Sendo que esta se inicia com valores elevados nos primeiros ciclos e tende a estabilizar nesse patamar, dessa forma, pode-se inferir que devido a uma alta taxa erosiva inicial, o regime permanente é atingido nessas regiões mais rapidamente.

## 2.11 Efeitos da Diluição na Resistência à Cavitação

Segundo Barra (1998), os revestimentos soldados podem apresentar níveis distintos de diluição em função do tipo de processo, do grau de automação e das técnicas de deposição empregadas.

Observa-se quanto da diluição, que esta apresenta um efeito importante quando do uso de processos de fusão de materiais, substrato-revestimento ou revestimento-revestimento, pois, poderá ocorrer uma alteração da microestrutura e da composição da camada superficial. Dependendo do par específico utilizado no processo de fusão, poderá ocorrer, por exemplo, em se tratando de revestimentos endurecidos por solução sólida a diminuição da dureza com o aumento da diluição (LIMA *et al*, 1998).

Para Ribeiro (2007), quanto ao material do substrato, o mesmo apresenta uma forte influência na diluição, materiais que possuem um maior coeficiente de transferência de calor e o bom coeficiente de condutividade térmica apresentam uma diluição menor. Como por exemplo, Aço Carbono AISI 1020 que apresenta menor diluição que o aço inoxidável austenítico AISI 304, e aço inoxidável martensítico AISI 410.

Tanto Barra (1998) quanto Boccanera (1998) estudaram o efeito da diluição, e encontraram que a diluição média para o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW) é da ordem de 15 a 20%, contra até 27% para o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW).

A influência da diluição no cordão de solda se manifesta por um comportamento diferente entre as camadas do depósito, inclusive com a diminuição de sua resistência ao impacto da água, caso esse seja constituído de material menos resistente. (BARRA, 1998; REBELLO e HUHNE, 1987, citado por RIBEIRO, 2007).

Mussardo (2006) alerta para a importância da diluição, no que diz respeito à resistência a erosão cavitacional, pois, como, geralmente, no processo de recuperação é empregado uma camada de amanteigamento, onde o material aplicado não necessariamente possui as propriedades requeridas para uma boa resistência a cavitação, um alto grau de diluição aumentaria a probabilidade do reparo não obter as características desejadas, reduzindo a durabilidade do reparo e aumentando seus custos.

## 2.12 Ensaio de Erosão por Cavitação

Com o intuito de possibilitar em escala laboratorial, a compreensão e a simulação do processo erosivo provocado pelo fenômeno de cavitação, inúmeros métodos e tipos de equipamentos foram desenvolvidos para a avaliação da resistência de materiais empregados na construção e recuperação de componentes sujeitos a este fenômeno, todos voltados para uma representação o mais próxima possível da situação real encontrada em campo, porém, sob acelerada condição, utilizando parâmetros constantes e eliminando-se possíveis interferências. (BARRA, 1998; VAZ, 2004)

Os diferentes métodos podem ser classificados em função da forma pela qual o fenômeno da cavitação é induzido. Existem, basicamente, dois tipos diferentes de métodos: os que utilizam fluxo de líquido e aqueles onde o fenômeno da cavitação é induzido por vibração (geralmente ultrassônica) (MARQUES, 2003). Como exemplo tem-se:

- Para fluxo de líquido: Jato de água ou “droplet impact”, empregados para obtenção do processo erosivo em sistemas “líquido - corpo sólido” e cavitação de túnel, onde a cavitação é produzida pela passagem do fluido por um Venturi ou por uma obstrução em um circuito hidráulico. Este teste possui aplicação na simulação acelerada do processo erosivo envolvendo cavitação por fluxo. (BARRA, 1998);
- Para induzido por vibração: Cavitação por vibração, este teste possui uma maior aplicação em função de seu baixo custo e pela facilidade do controle de importantes parâmetros envolvidos no processo de simulação da cavitação a partir da aplicação de sonotrodos ultrassônicos, Figura 15 (BARRA, 1998). Sendo este método o utilizado nessa dissertação.

Os diferentes métodos de ensaios geram também diferenças nos resultados finais apresentados. O ensaio de Cavitação de túnel, que utiliza o tubo de Venturi, possui uma taxa de erosão mais lenta que a do ensaio de cavitação induzida por vibração ultrassônica, que por sua vez, apresenta, geralmente, uma taxa mais lenta de erosão do que o ensaio por jato de água. Assim como ocorre no ensaio com o tubo de Venturi, o ensaio de cavitação induzida por vibração ultrassônica produz alta densidade e frequência de impactos, porém com uma intensidade relativamente baixa, gerando principalmente deformação elástica por fadiga. Já o ensaio de jato de água produz um número menor de impactos, mas com maior intensidade, gerando mais deformação plástica e endurecimento superficial.

Dessa forma, como os mecanismos e condições experimentais são diferentes, não se pode comparar os resultados dos diversos tipos de ensaios para avaliação da resistência de um material ao dano cavitacional. Sendo assim, não se pode transferir diretamente para os componentes de uma turbina hidráulica os resultados obtidos nos ensaios, devendo, a previsão dos danos nestes equipamentos serem levantadas através de um histórico de longo prazo dos dados de operação da usina. (GONÇALVES, 2007, citando IWAI *et al*, 1997; HART, s.d; SOARES *et al*, 1994; MARQUES, 2003)

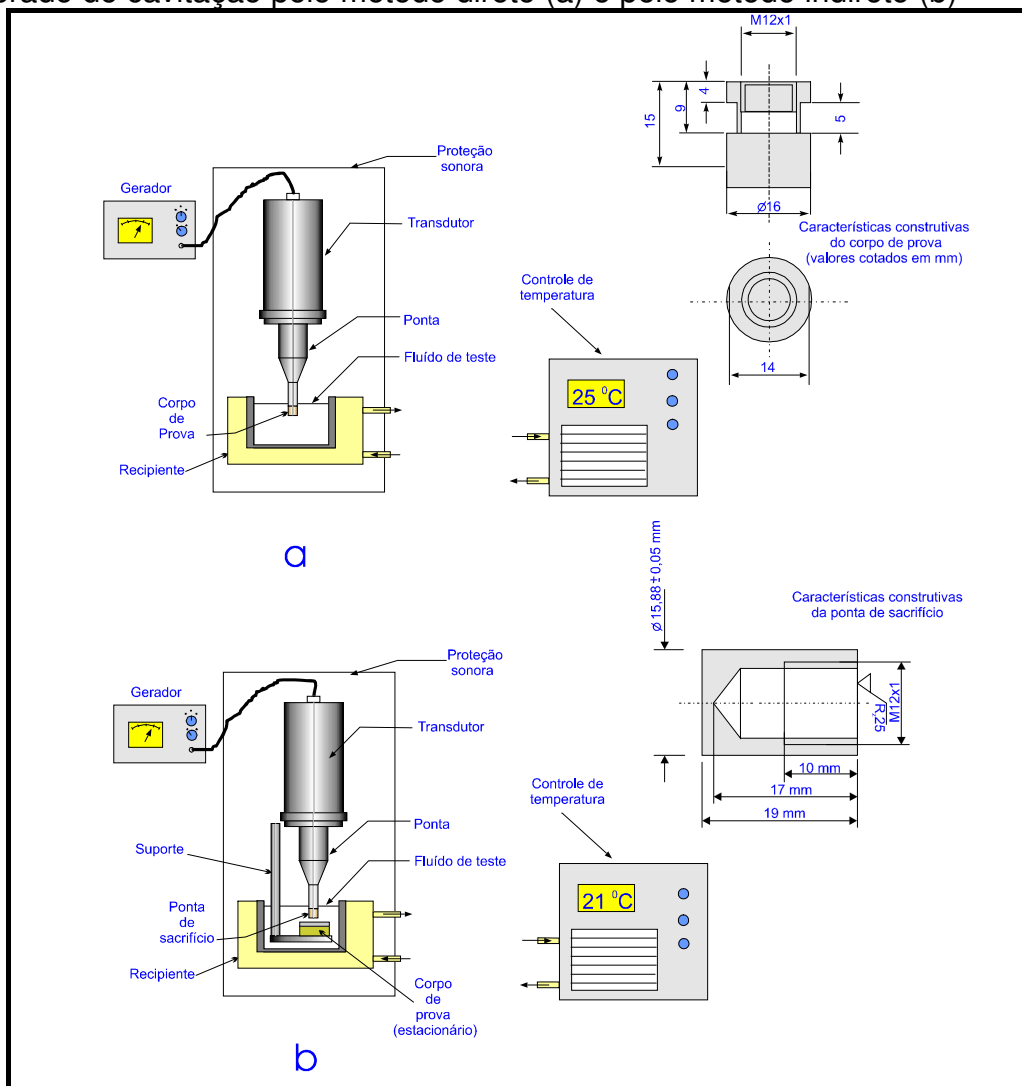
### **2.12.1 Cavitação por vibração**

Os danos provocados na superfície do material no Método Direto (Figura 15a), é devido a flutuação de pressão no fluido gerada pela vibração em alta frequência e no Método Indireto (Figura 15b) provocado pela vibração de um corpo de sacrifício sobre a amostra a ser testada, posicionada de forma estacionária a uma distância pré-estabelecida. (BARRA, 1998).

Os testes acelerados de cavitação por vibração são padronizados pela a norma ASTM G32, de forma geral, a execução do ensaio, é realizado utilizando um dispositivo constituído por gerador ultrassônico e conversor piezoelétrico – acústico. O corpo de prova, tanto para o *método direto*, quanto para o *indireto*, do material a ser ensaiado, deve ser colocado concentricamente ao recipiente e imerso em água destilada à temperatura controlada, sendo submetido a vibração ultrassônica em intervalos de tempo. Este intervalo de tempo varia em função da resistência à cavitação do material, e deve ser estabelecido de tal maneira a se obter uma curva

de perda de massa acumulada por tempo de ensaio com razoável precisão. Ao final de cada intervalo, o corpo de prova é pesado em uma balança com precisão de 0,1 mg com o objetivo de determinar a perda de massa. O ensaio é finalizado, conforme recomendado pela norma, após a taxa de perda de massa atingir seu máximo e começar a diminuir.

Figura 15 - Arranjo esquemático do equipamento utilizado para ensaio vibratório acelerado de cavitação pelo método direto (a) e pelo método indireto (b)



Fonte: Barra (1998).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Metal de Base

Para representar o rotor de turbinas, o material selecionado como metal de base para esse estudo foi o Aço Carbono, ABNT 1020, tendo como dimensão nominal 130 x 90 x 12,7 mm de espessura. Sendo esse material um aço carbono dúctil, o mesmo é similar aos aços carbono comumente utilizados na fabricação de turbinas Francis de grande porte entre as décadas de 60 e 70, não apresentando boa resistência ao fenômeno de cavitação. Todavia, atualmente estes rotores têm sido revitalizados e sua utilização tem sido significativamente ampliada com a recuperação das áreas cavitadas utilizando procedimentos e materiais com maior resistência ao fenômeno.

#### 3.1.2 Arames para Soldagem

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

Tabela 2 - Composição Química dos Materiais Depositados.

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

Fonte: (a) Welding Alloys Brasil Ltda. / (b) AWS A5.22

A utilização desses arames se justifica pelos procedimentos atualmente empregados em grandes empresas de geração de energia no processo de recuperação de turbinas hidráulicas, pois possuem alta taxa de deposição, permitindo a soldagem em diversas posições, com pequeno índice de respingos, fácil remoção de escórias e ótimo acabamento.

### **3.1.3 Mistura de Gases para Soldagem**

Como gases de proteção foram utilizados a mistura com 25% dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 75% Argônio (AR) para a soldagem do arame tubular AWS E309L-T1 e a mistura com 2% Oxigênio (O<sub>2</sub>) e 98% Argônio (AR) para a soldagem do Cavitalloy.

## **3.2 Soldagem das Amostras**

Atualmente a recuperação das turbinas de aço carbono é realizada aplicando somente o arame tubular AWS E309L-T1, ou utilizando o AWS E309L-T1 como uma camada intermediária entre o metal base e o Cavitalloy, também chamada de “almofada”. 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 os parâmetros de soldagem conforme os consumíveis e gases utilizados.

A soldagem das amostras foi realizada manualmente, através de um soldador habilitado e experiente, cedido pela empresa SERVTEC em seu laboratório de manutenção de máquinas de solda, sendo que os procedimentos utilizados estão descritos no Anexo I e os parâmetros apresentados na tabela 3. O intuito da escolha dessa forma de trabalho foi a de assemelhá-la ao máximo com a condição real. A soldagem foi realizada utilizando uma Máquina Bi-pulsada (MBI) Digitec 450, e uma Máquina Convencional (MCO) Lincoln IDEALARC CV400. Na figura 18 observa-se, uma imagem das máquinas utilizadas.

Na Figura 16, pode-se visualizar as relação das amostras soldadas com seus códigos relacionados as respectivas máquinas e procedimentos adotados. Os códigos dos corpos de prova foram divididos em duas partes, a primeira refere-se ao tipo de máquina de solda utilizada e a segunda parte ao material depositado e a quantidade de camadas. Como por exemplo: MBI-2AI1CO, corpo de prova soldado com a máquina de solda bi-pulsada, com duas camadas de revestimento de E309L-T1 e uma Camada de Cavitalloy.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na soldagem

Equipamento: MTE DIGITEC 450 – Fabricante: IMC								
Arame de Soldagem	Gás	Entrepasses (°C)	Tensão (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						
Arame de Soldagem	Gás	Entrepasses (°C)	Tensão (V)	I (A)	Veloc. Arame (m/min)	Vazão do Gás (l/min)
CAVITALLOY	I98	180/240	20	130	7,2	16

Fonte: Dados do próprio autor

Figura 16 - Relação das Amostras Soldadas, Procedimento e Máquina de Solda

CP	Proc. Nº	Código	Material Depositado	Máquina
1	01	MBI-3AI	3 Camadas de E309L-T1	MTE DIGITEC 450
2	02	MBI-2AI1CO	2 camadas de E309L-T1 + 1 camada de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
3	03	MBI-2AI2CO	2 camadas de E309L-T1 + 2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
4	03	MCO-2AI2CO	2 camadas de E309L-T1 + 2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	IDEALARC CV400
6	04	MBI-2CO	2 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
7	04	MBI-3CO	3 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	MTE DIGITEC 450
9	04	MCO-3CO	3 camadas de Aço Inoxidável ao Cobalto	IDEALARC CV400

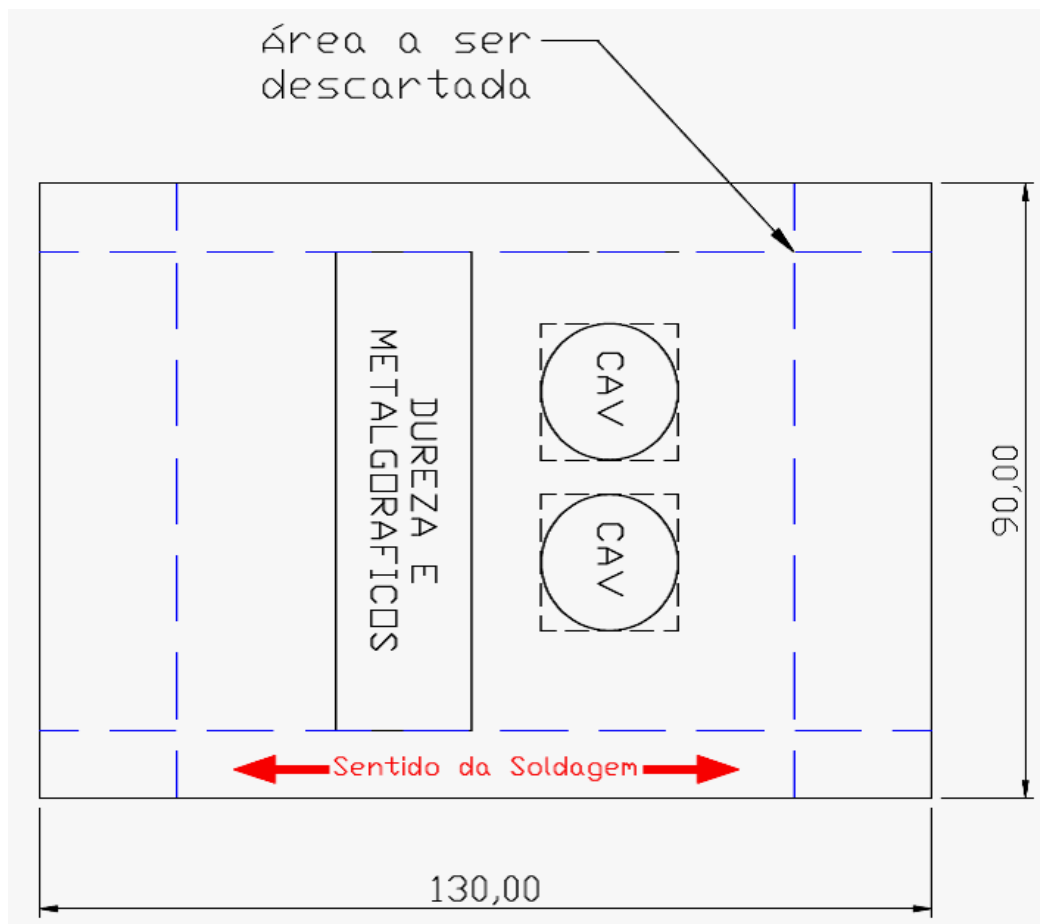
Fonte: Dados do próprio autor

Na figura 17, pode-se observar de forma esquemática a sequência de camadas do revestimento.

O acompanhamento dos parâmetros utilizados na soldagem foi feito utilizando o painel das máquinas e temperatura entre passes foi medida utilizando um termômetro a laser marca Tecpel modelo DIT-513.



Figura 19 - Esquema de retirada dos corpos de prova da amostra para Ensaios de Cavitação Acelerada, Microdureza Vickers e Análise Metalográfica.



Fonte: Elaboração do próprio autor

### 3.3.1 Ensaio de Cavitação Acelerada

O Ensaio de Cavitação Acelerada realizado seguiu a norma ASTM G32/09 modificado para o método indireto, conforme item 2.12.1.

As dimensões dos corpos de prova para realização do ensaio foram de 30 x 25 x 8 mm, com um peso máximo de 60 gramas, sendo este limite de massa determinado pela capacidade da balança de precisão. Dessa forma, inicialmente foi feito o corte da amostra, com uma esmerilhadeira convencional da marca Bosch modelo GWS 8-115, separando-a em duas partes, após a separação, a amostra foi novamente cortada em dois corpos de prova com sobremetal de 5 mm para cada lado, de forma a concluir o corte em um *cut-off* adequado, com disco abrasivo de 250 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura, dotado de um sistema de refrigeração com bombeamento de fluido de corte.

De forma a garantir o paralelismo das faces e a espessura de 8 mm, os corpos de prova passaram por um processo de usinagem de acabamento, utilizando uma retifica plana.

Concluído o corte, tendo sempre cuidado com identificação das amostras, iniciou-se o desbaste da superfície a ser ensaiada, por meio do lixamento em máquina rotativa com fluxo de água corrente, com uma lixa mais grosseira, grana 120. O aspecto da superfície era constantemente monitorado, de forma que, ao conseguir um acabamento uniforme, era realizada a troca da lixa com um abrasivo mais fino. A cada troca, era rotacionado em 90° o corpo de prova na direção do lixamento, técnica que facilita a observação da superfície sob preparação. Na máquina rotativa foi realizado o lixamento com as lixas grana 120, 220, 320 e 400.

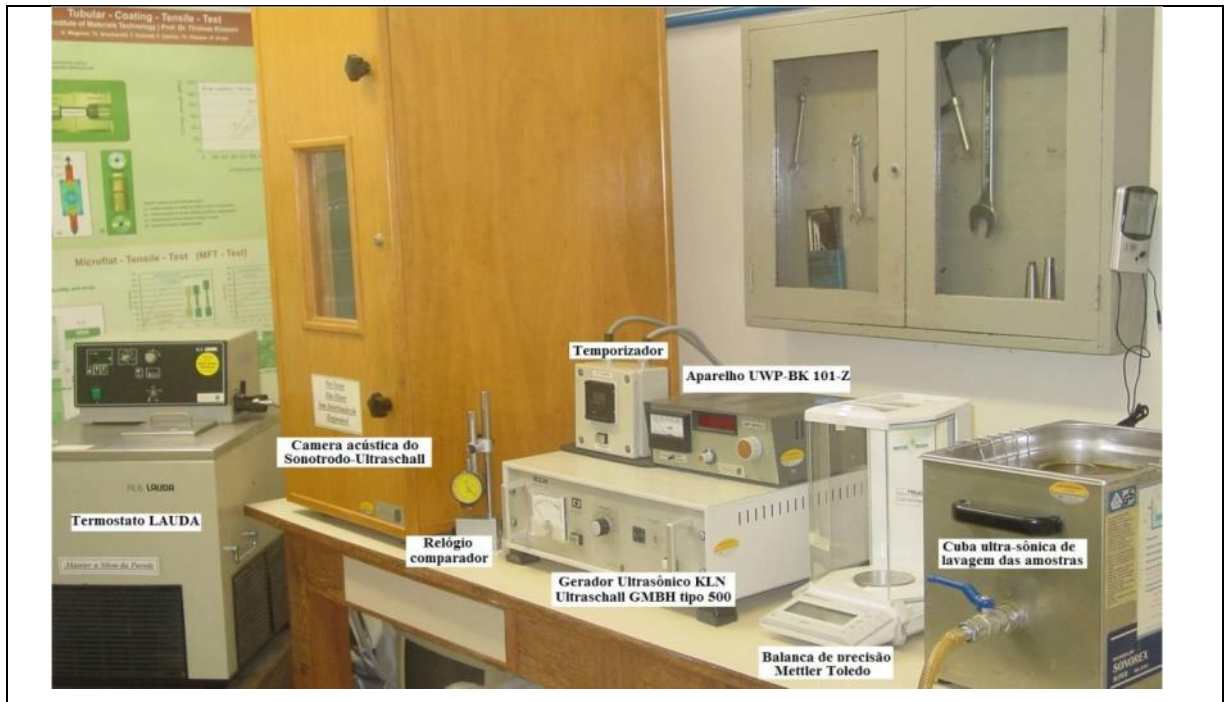
Para as lixas grana 600 e 1200, foi realizado o lixamento manual, onde as lixas foram fixadas em uma mesa sob água corrente.

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. Quando o aspecto visual da superfície não apresentou mais riscos, fez-se novamente a limpeza do corpo de prova em água corrente, álcool 96% e o secamento em fluxo de ar aquecido.

No ensaio, os corpos de prova ficaram posicionados a 0,5 mm de distância da ponta de sacrifício. Segundo Barra (1998) citando Pohl *et al* (1995), essa modificação provoca uma perda de severidade em torno 40 a 60% em relação ao método direto.

O ensaio foi realizado com 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 piezelétrico, a uma frequência de  $20 \pm 0,2$  kHz. A amplitude de oscilação aplicada foi de  $0,05 \pm 0,0025$  mm, mantendo a temperatura controlada através de termostato em  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ . Na figura 20, é possível observar uma imagem da bancada utilizada no ensaio de cavitação acelerada.

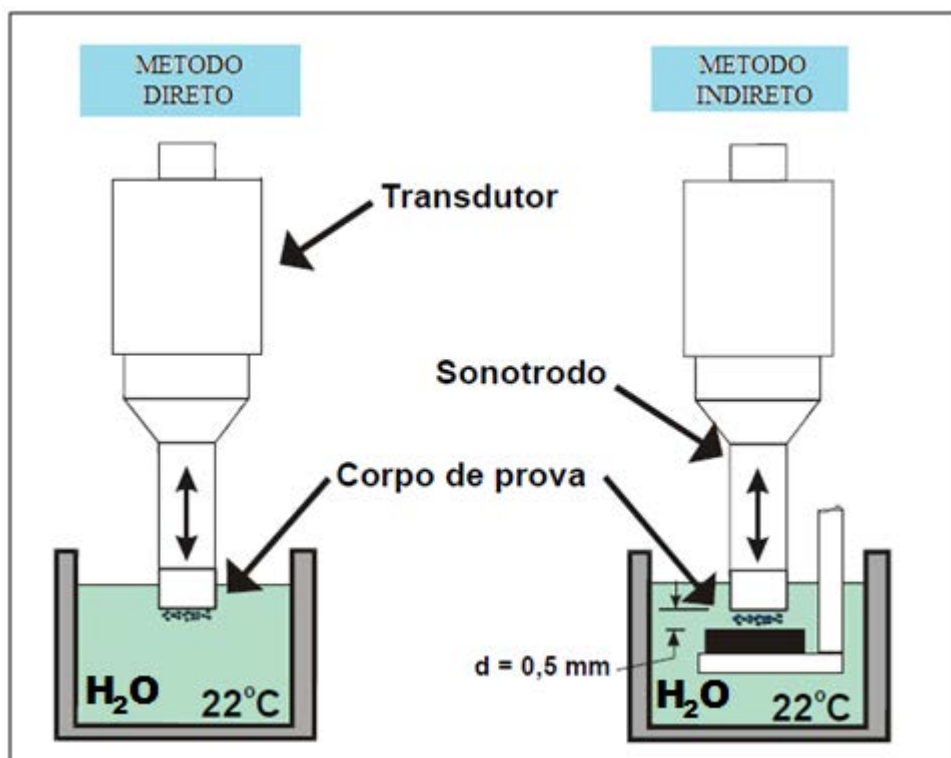
Figura 20 - Bancada de ensaios de cavitação



Fonte: Marqueze (2012)

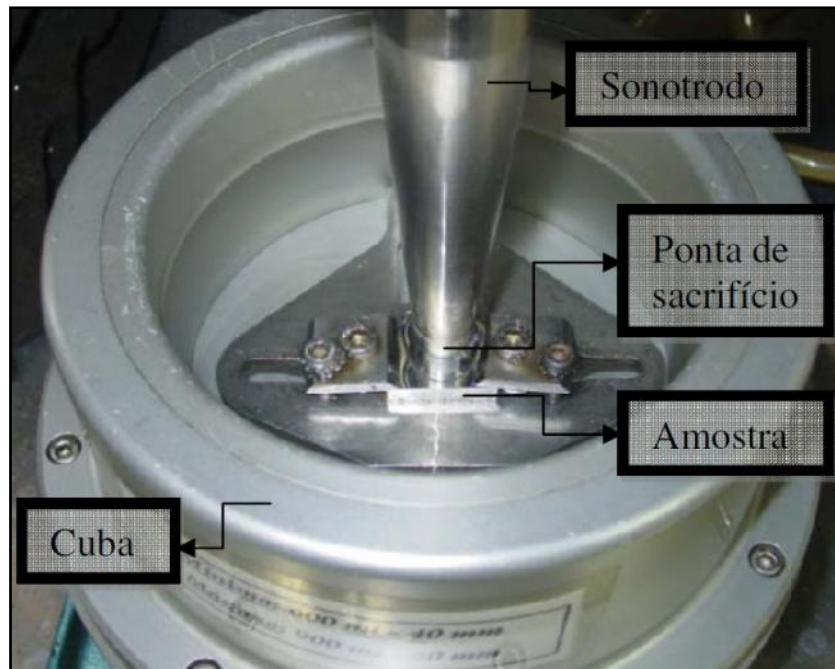
A figura 21 mostra o esquema do ensaio de Cavitação Acelerada, e na figura 22, um exemplo da fixação da amostra na cuba de ensaio.

Figura 21- Esquema do Ensaio de Cavitação Acelerada



Fonte: Boccanera (1999)

Figura 22 - Fixação da amostra para o Ensaio pelo Método Indireto



Fonte: Marqueze (2012)

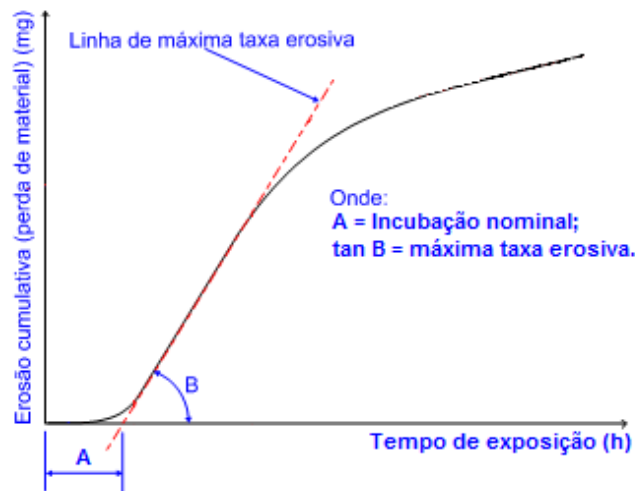
Para a medição da perda de massa da amostra utilizou-se uma balança com precisão de 0,1 g. em tempos predeterminados.

Por meio dos dados obtidos no ensaio determinou-se a curva de perda acumulada de massa, a taxa de erosão e o período de incubação, o que permitiu realizar o estudo comparativo dos Materiais, Processos e Procedimentos aplicados.

Na figura 23, é possível observar de forma esquemática a forma de determinação da máxima taxa erosiva e do período de incubação. De forma prática, para a obtenção desses valores, faz-se a plotagem dos dados obtidos em um gráfico gerando uma curva “Perda de massa x Tempo”. A tangente à região dessa curva, que representa a erosão em regime permanente, fornece a máxima taxa de erosão, já a sua interseção com o eixo “x” determina o período de incubação. Desse modo o ensaio permite determinar o período de incubação e taxa de erosão que caracteriza o revestimento quanto à resistência a erosão por cavitação.

O período de incubação apresenta uma relação direta com as propriedades relacionadas à absorção de energia e resistência do material, isto é, resiliência, razão de compressão ao choque, dureza e tensão de resistência (WILL, 2008).

Figura 23-Curva característica da evolução da perda de massa e parâmetros para representação do período de incubação e taxa erosiva em materiais sujeitos à cavitação



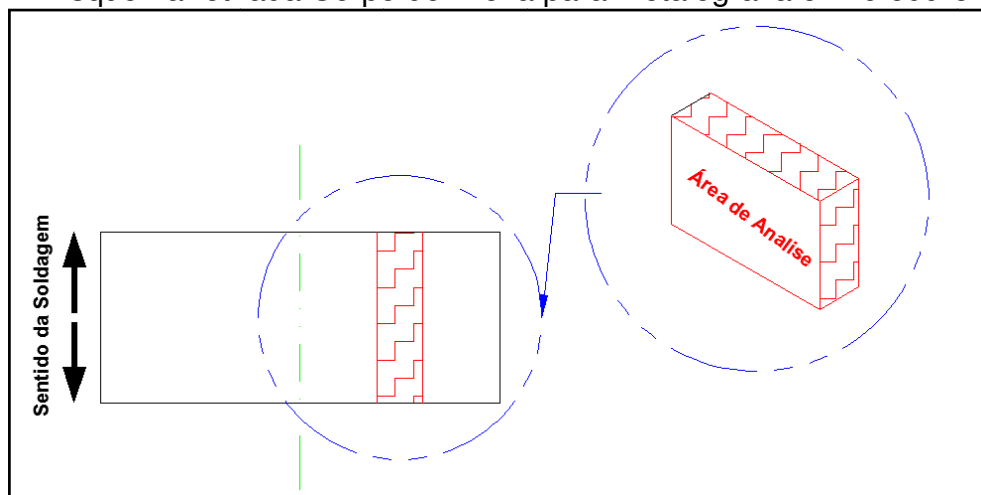
Fonte: Adaptado de ASTM G 32 (1992)

Os ensaios de cavitação acelerada foram realizados no laboratório do LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### 3.3.2 Preparação dos Corpos de Prova para Análise Metalográfica e Dureza Vickers

A parte da amostra destinada as análises metalográficas e microdureza Vickers foi seccionada em 2 partes, utilizando uma lixadeira e disco de corte para aço inox, o corpo de prova foi retirado da mesma parte para todas as amostras, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24- Esquema retirada Corpo de Prova para Metalografia e Microdureza



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os corpos de prova foram cortados utilizando uma *cut-off*, com disco abrasivo de 250 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura, dotado de um sistema de refrigeração com bombeamento de fluido de corte.

O desbaste e polimento foram realizados utilizando o mesmo processo da preparação das amostras para o ensaio de cavitação acelerada, entretanto, utilizando apenas o lixamento manual, na mesa sob água corrente.

### **3.3.3 Análise Metalográfica**

Os corpos de prova na condição polida foram atacados em duas etapas. Os corpos de prova preparados para análise longitudinal inicialmente atacados com Nital 2% (98 ml de álcool etílico, 2 ml de ácido nítrico), para a análise do metal base, com a finalidade de visualizarmos a microestrutura da região soldada, inclusões e a Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Em uma segunda etapa para a visualização da microestrutura formada na região do material depositado por solda e a ZTA, foi realizado o ataque dos corpos de prova polidos com reativo Vilella (0,5 ml ácido pícrico, 2,5 ml de ácido clorídrico, 50 ml álcool etílico), utilizado por Gonçalves (2005) e Mussardo (2008) para revelar as estruturas dos aços inoxidáveis.

Conforme citado por Mussardo (2008), a realização do ensaio em duas etapas se faz necessário, pois, com a aplicação direta do Vilella, as estruturas do aço carbono serão degradadas, impedindo sua visualização dos contornos de grãos, bem como a definição dos tamanhos.

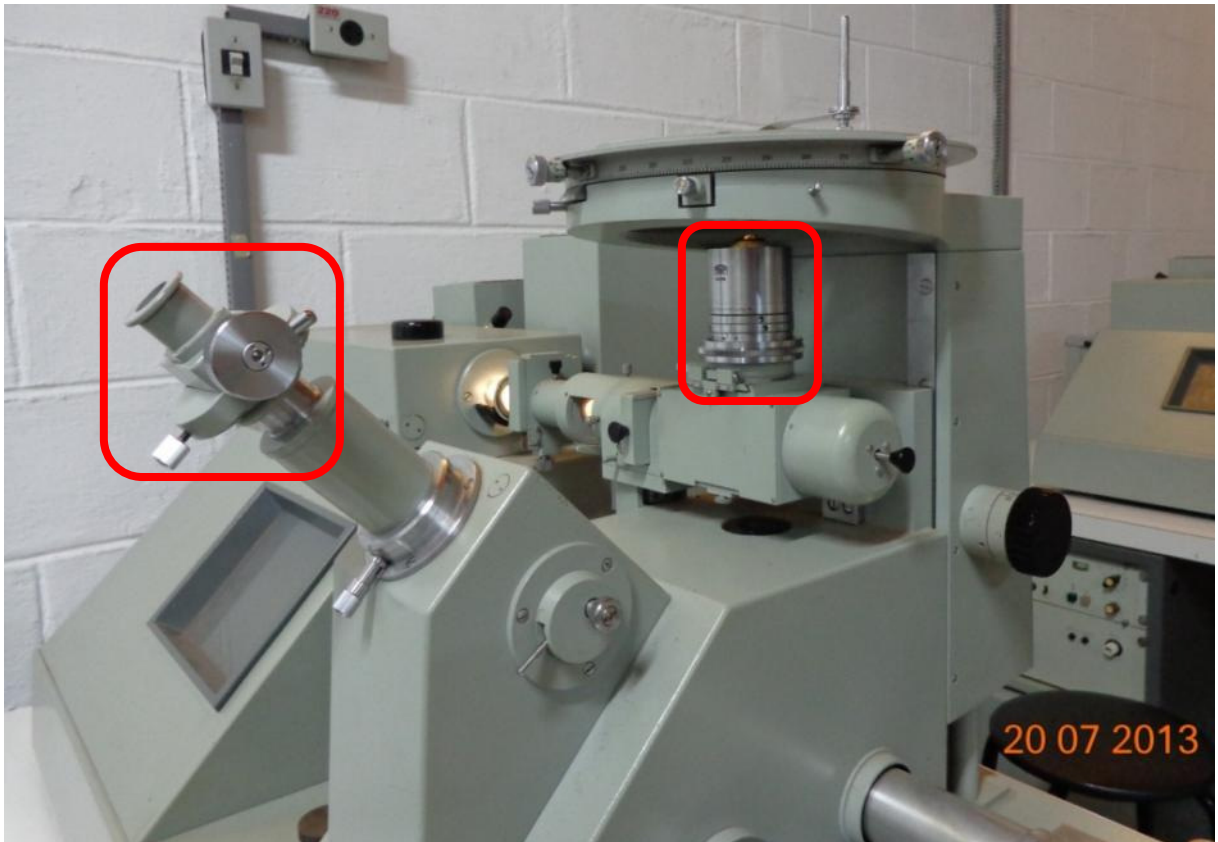
Para a observação das amostras, foi utilizado o microscópio metalográfico Neophot 21, acoplado a uma câmera fotográfica de 3,2 *megapixels*.

### **3.3.4 Medidas de Dureza Vickers**

A medição da microdureza Vickers foi realizada na superfície dos corpos de prova após o ensaio de cavitação acelerada e na face longitudinal dos corpos de prova preparados para essa finalidade, a fim de levantar o perfil de microdureza das camadas soldadas

Para as medições utilizou-se um acessório do microscópio metalográfico Neophot21, Figura 25, com a montagem de um acessório específico para a obtenção de microdureza.

Figura 25 - Microscópio Neophot 21 com o acessório para medição de microdureza instalado.

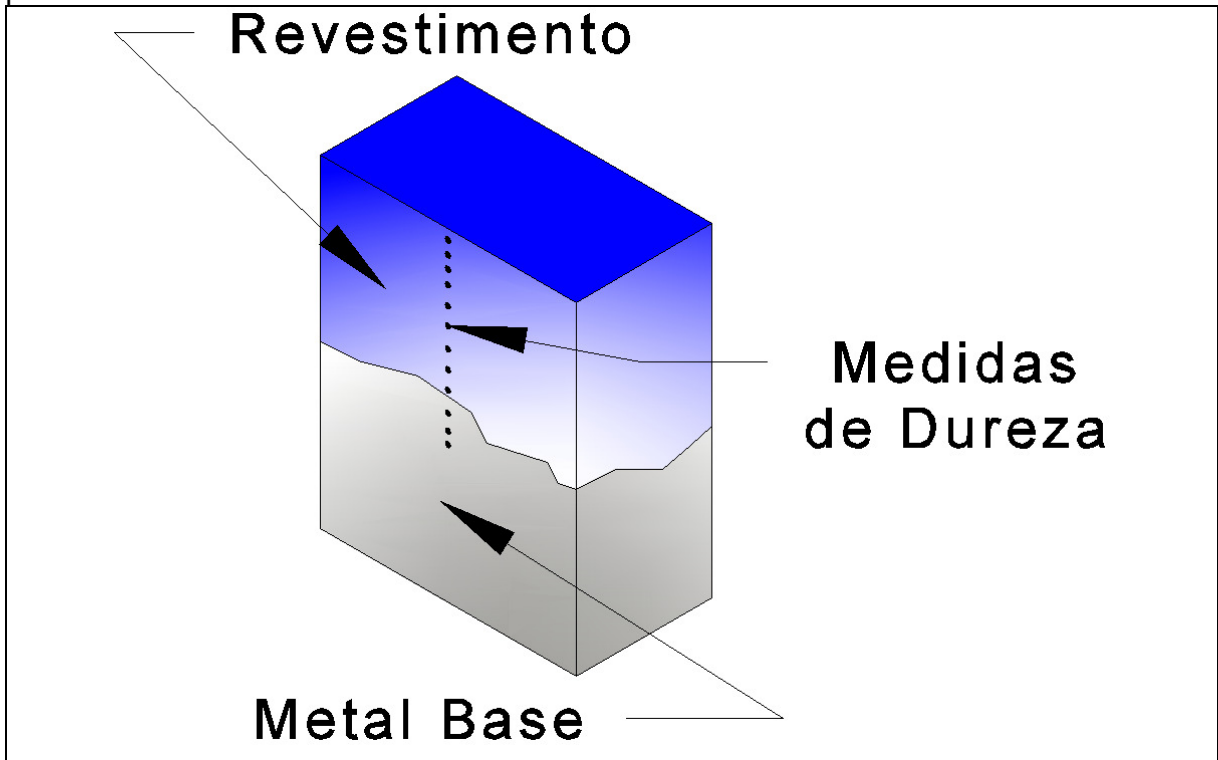


Fonte: Elaboração do próprio autor

A carga aplicada nesta etapa, com o uso de um indentador de diamante com formato piramidal de base quadrada, foi constante de 100 gf por 15s. Na realização das medidas das diagonais foi utilizada uma ampliação de 8x, sendo verificada a calibração no microscópio para esta carga com a conclusão da medida em 2 corpos de prova, a fim de garantir a repetibilidade das medidas.

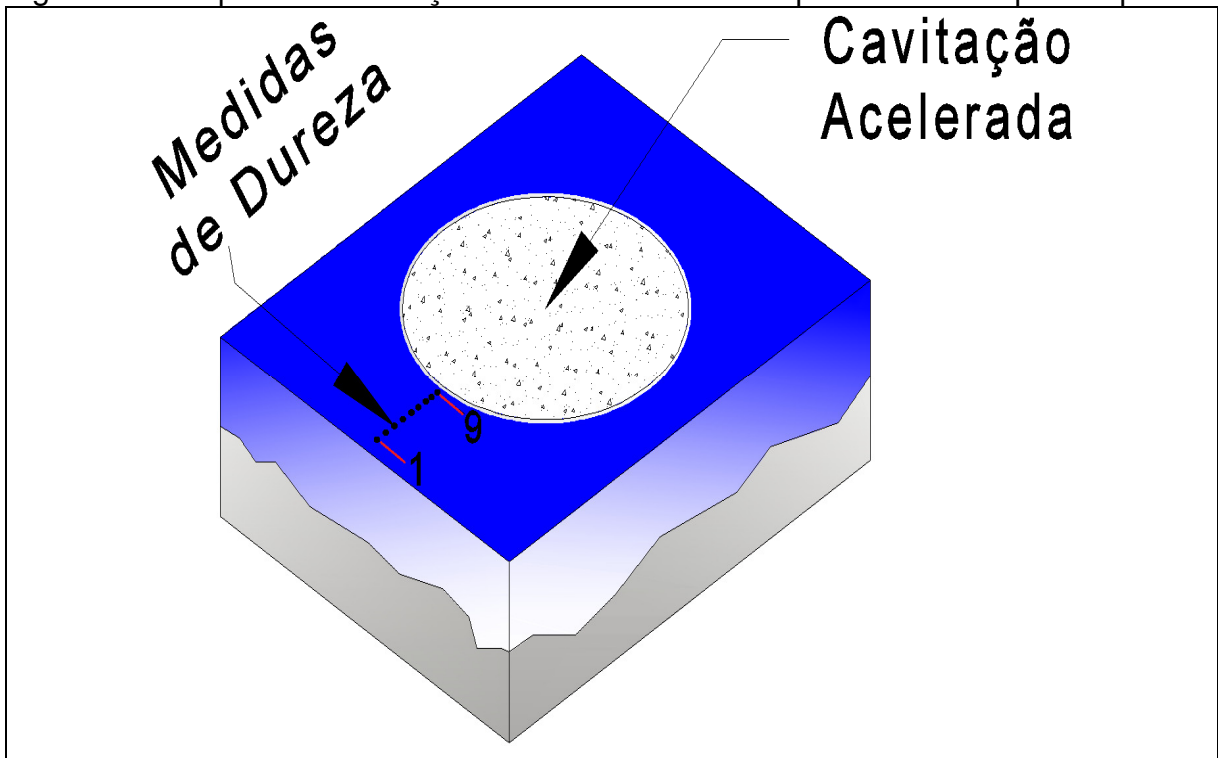
As medidas de microdureza foram obtidas por meio de uma “varredura” na face longitudinal do corpo de prova no sentido da superfície até o metal base, conforme Figura 26. Na Figura 27, o esquema de medida para os corpos de prova do ensaio de cavitação acelerada, onde foi feita a varredura no sentido da borda até próximo a região cavitada, de forma a levantar um perfil de dureza.

Figura 26 - Esquema da medição da microdureza da face longitudinal nos corpos de prova.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 27 - Esquema da medição da microdureza da superfície nos corpos de prova.



Fonte: Elaboração do próprio autor

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

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

Na Equação 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.

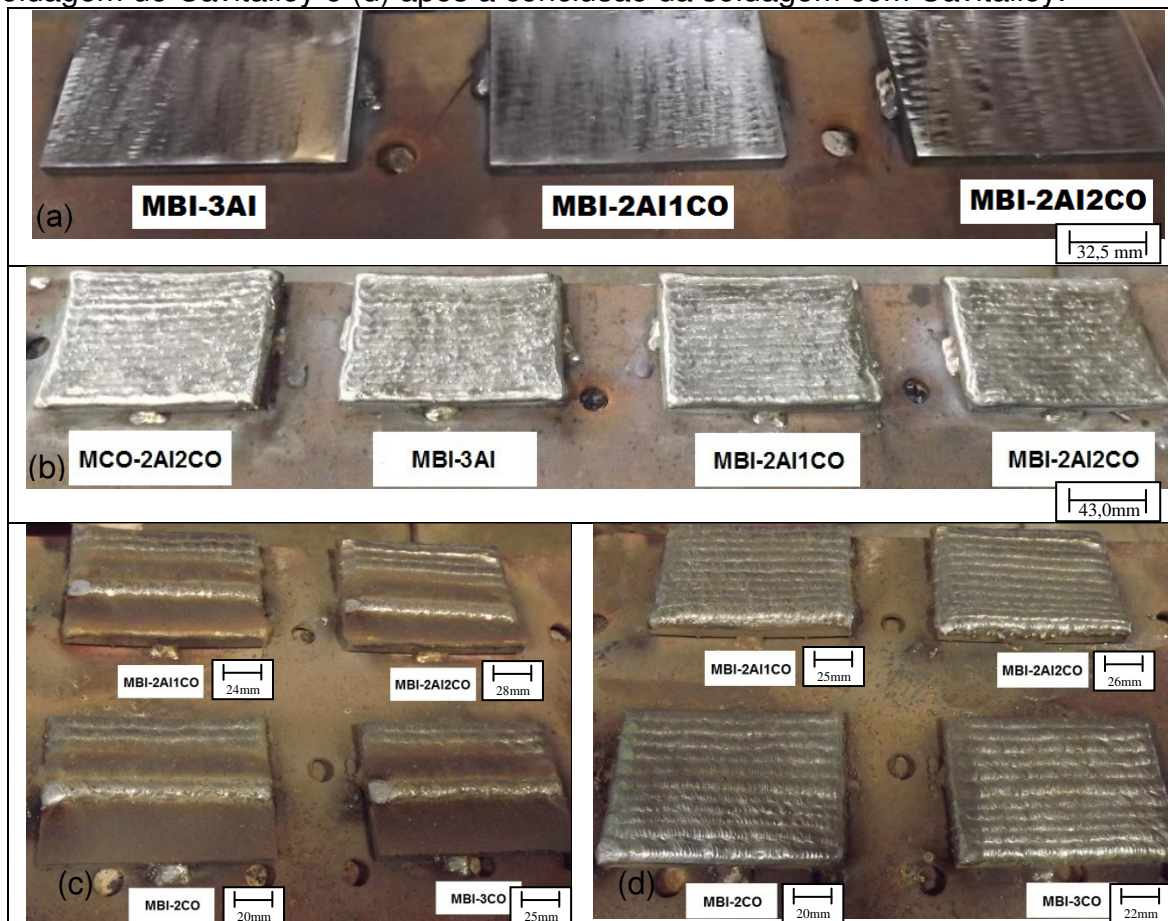
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Soldagem

A soldagem foi realizada conforme os parâmetros apresentados na Tabela 3, e utilizando as máquinas e processos da figura 16.

Pode-se observar, na Figura 28, 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.

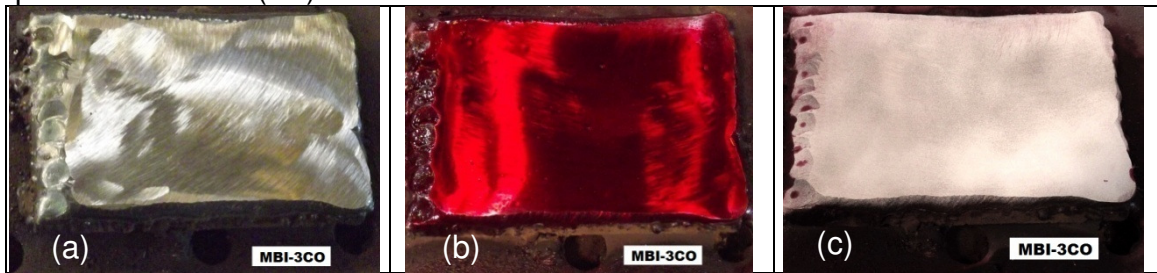
Figura 28 - Amostras durante o processo de soldagem (a) somente lixadas antes da solda, (b) Com a soldagem do arame tubular AWS E309-LT1, (c) durante a soldagem do Cavitalloy e (d) após a conclusão da soldagem com Cavitalloy.



Fonte: Elaboração do próprio autor

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, na Figura 29 um exemplo do ensaio realizado.

Figura 29 - MBI-3CO (a) na condição Esmerilhada, (b) e (c) durante o Ensaio com Líquido Penetrante (LP).

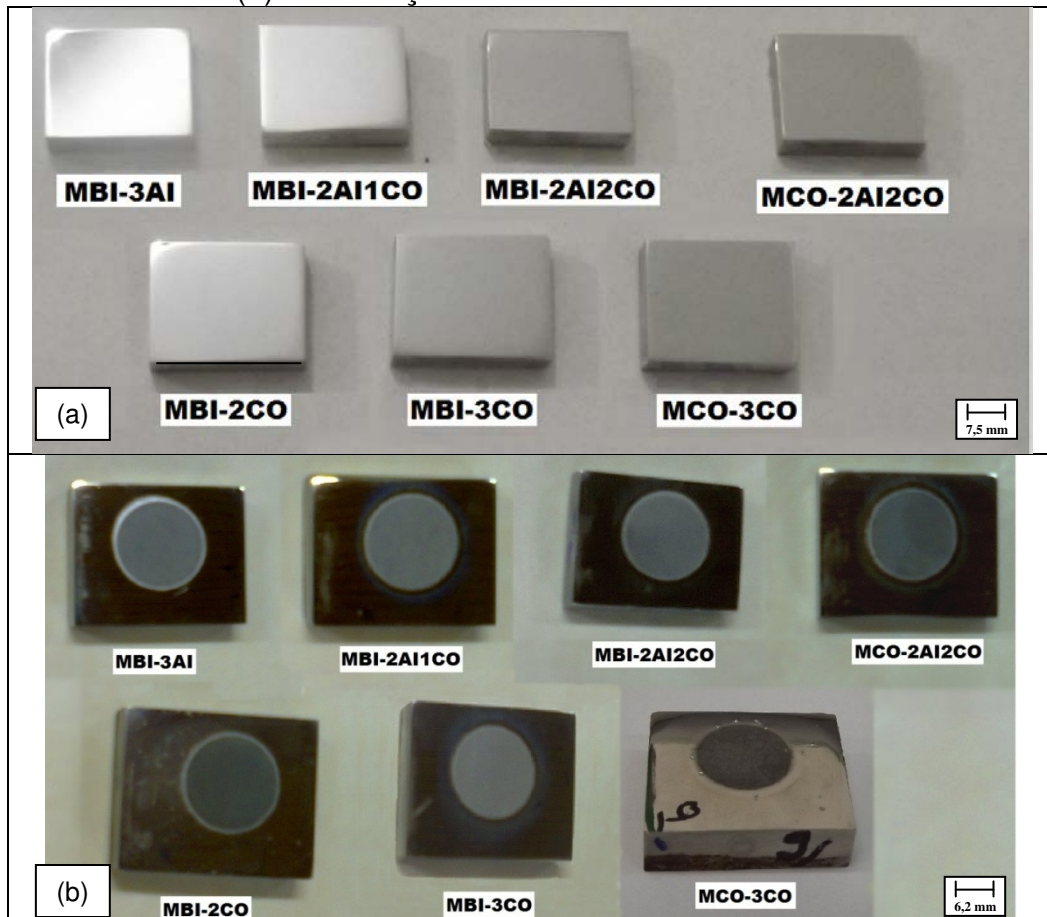


Fonte: Elaboração do próprio autor

## 4.2 Ensaios de Erosão Cavitação

A Figura 30(a) apresenta os corpos de prova preparados para realização do ensaio de cavitação acelerada. Os corpos de prova foram preparados conforme orientação disposta por Marqueze (2012). Na Figura 30(b), pode-se visualizar os 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 30 - Aspecto visual dos corpos de prova para Ensaio de Cavitação Acelerada (a) antes do ensaio e (b) a realização do ensaio.

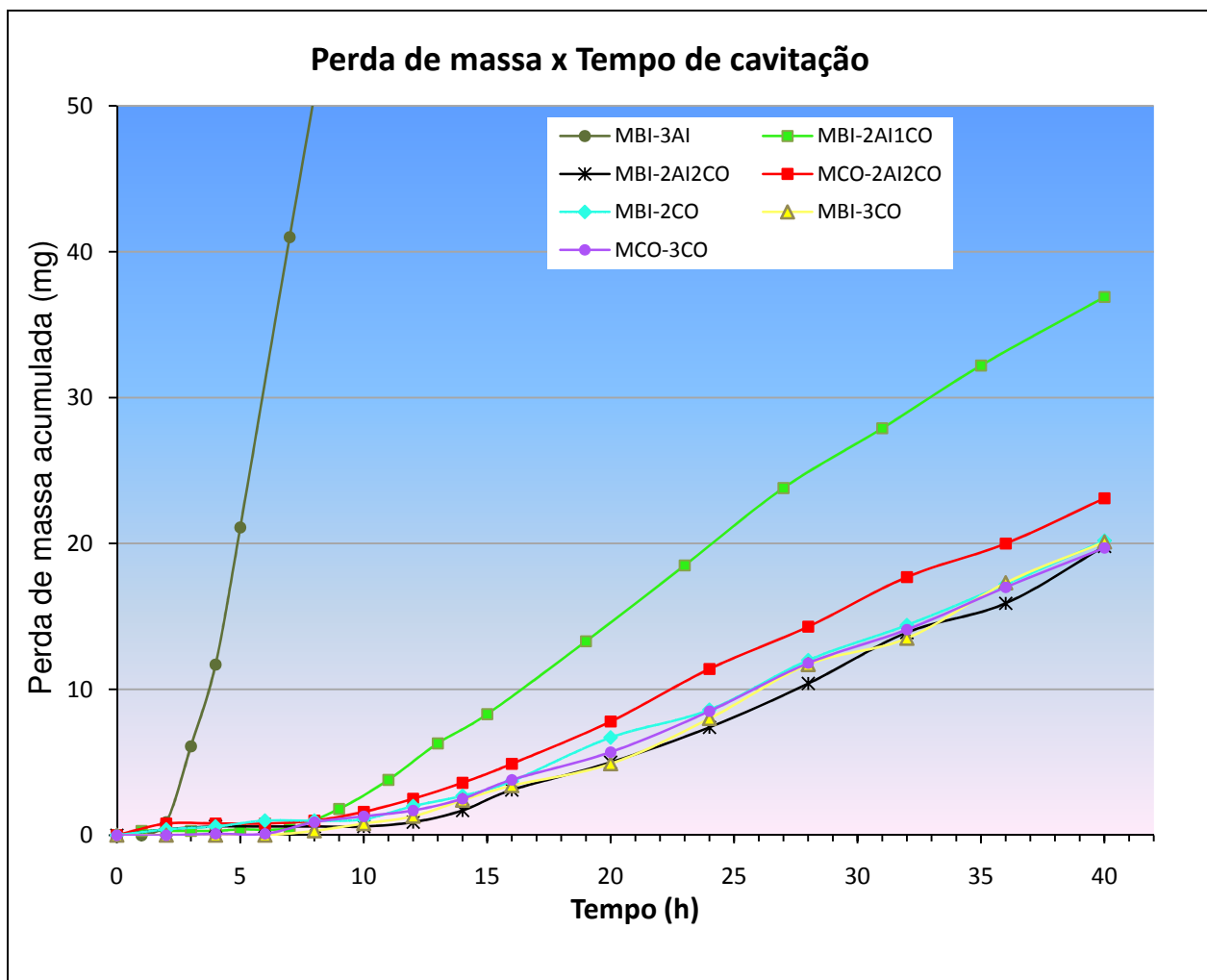


Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados do ensaio de cavitação acelerada são apresentados na Figura 31, 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, semelhante ao encontrado por Will *et al* (2010).

Os corpos de prova MBI-2AI2CO, MBI-2CO, MBI-3CO e MCO-3CO tiveram um desempenho similar no ensaio de cavitação acelerada, entretanto, o MCO-2AI2CO que possuía características similares apresentou um desempenho inferior. O CP MBI-2AI1CO apresentou o pior desempenho entre os corpos de prova revestidos com aço inoxidável com cobalto.

Figura 31 - Gráfico de Perda de Massa Acumulada nos Ensaio de cavitação acelerada



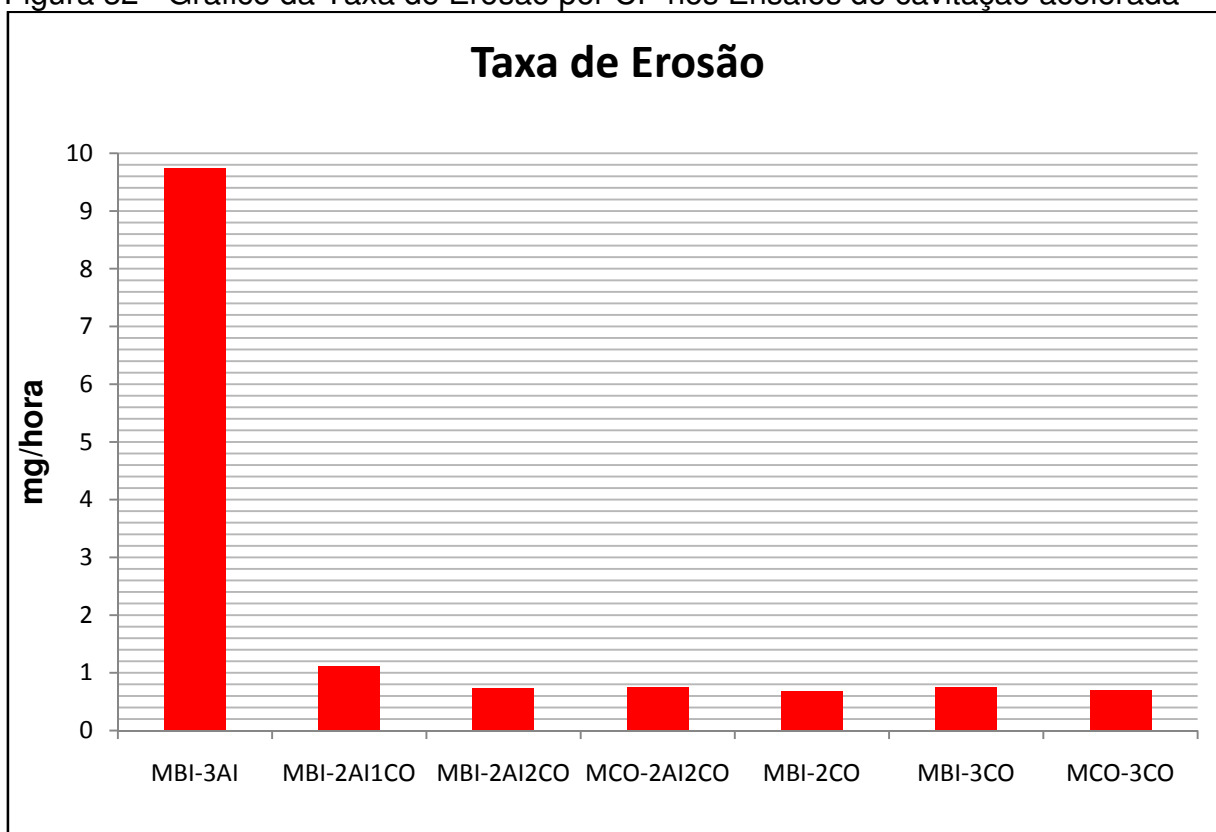
Fonte: Dados do próprio autor

Como observado por Boccanera *et al* (1999), Martinez (2009) e Ribeiro (2010), 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 distintos processos e procedimentos adotados de soldagem do arame tubular de aço inoxidável com cobalto, pode-se observar na figura 31 que os perfis de perda de massa acumulada são similares.

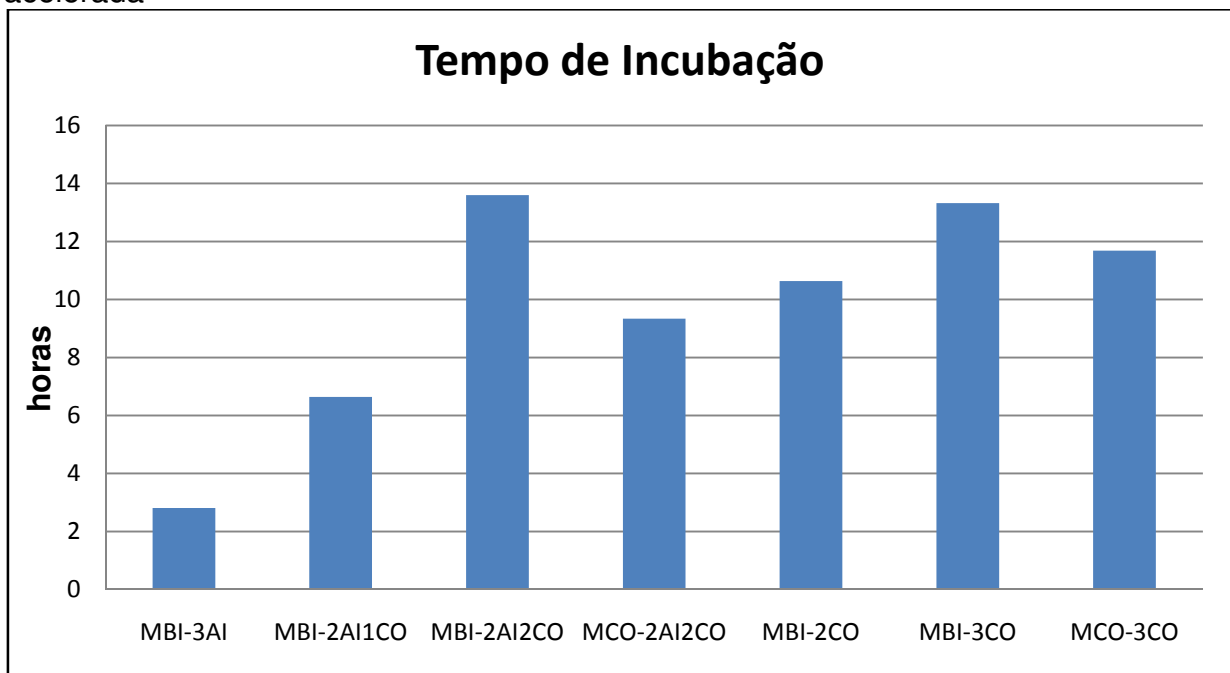
No gráfico da Figura 32, é possível visualizar a taxa de erosão, onde se observa um melhor desempenho do MBI-2CO e do MCO-3CO, sendo o MBI-2CO (com duas camadas de aço inoxidável com cobalto) soldado com a máquina de processo bi-pulsado e o MCO-3CO (com três camadas de aço inoxidável com cobalto) soldado com a máquina convencional. Entretanto, quando se observa o gráfico da Figura 33, relativo ao tempo de incubação, o melhor desempenho foi do MBI-2AI2CO, seguido pelo MBI-3CO.

Figura 32 - Gráfico da Taxa de Erosão por CP nos Ensaios de cavitação acelerada



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 33 - Gráfico do Tempo de Incubação por CP nos Ensaio de cavitação acelerada



Fonte: Dados do próprio autor

O tempo de incubação dos corpos de prova avaliados tiveram uma sensível variação entre eles, segundo alguns pesquisadores como Allenstein (2007) e Barra (1998), essa diferença no tempo de incubação estaria relacionada a presença de poros, riscos, micro-trincas ou impurezas na superfície, pois, sendo a cavitação um fenômeno localizado, qualquer descontinuidade pode afetar a resistência.

Após o período de incubação, onde se inicia o processo efetivo de retirada de material, essa remoção é causada pela propagação de trincas nos contornos de grãos. Essa energia absorvida necessária para remover um dado volume de material por trincamento é menor que para remover o mesmo volume de material por deformação plástica. O que provocaria o aumento da taxa erosiva, sendo o material depositado de mesma composição, fazendo com que ao final elas fiquem próximas.

Os resultados dos ensaios de cavitação acelerada, não podem ser diretamente transpostos para os modelos reais de turbina, onde outras variáveis não controláveis estão associadas a formação da cavitação como: operação com quedas variáveis, variação da pressão de sucção em função da alteração do nível de jusante, qualidade da água, dentre outras, entretanto, observando o gráfico do tempo de incubação e extrapolando, poder-se-ia dizer que um maior tempo de incubação,

favorece um aumento entre o tempo necessário de manutenção. Nesse ponto, os corpos de prova soldados pelo processo bi-pulsado tiveram um melhor desempenho.

Dos corpos de prova revestidos com mais de uma camada de aço inoxidável com cobalto, o MCO-2Al2CO soldado com a máquina pelo processo convencional, teve um desempenho inferior aos demais corpos de prova, porém, se comparado ao aço inoxidável E309L-T1, seu desempenho continuou sendo bem superior. Quando se observa os resultados do MCO-3CO, também, soldado pelo processo convencional, porém, com a aplicação de 3 camadas de aço inoxidável com cobalto, o resultado fica próximo ao dos corpos de prova soldados pelo processo bi-pulsado, MBI-2CO e MBI-3CO. Pode-se notar no perfil de dureza longitudinal (figura 39) que o acréscimo dessa terceira camada reduziu a dureza, provavelmente devido ao aporte térmico.

Na posição plana utilizada nesse estudo, apesar dos corpos de prova soldados pelo processo convencional apresentarem um desempenho inferior aos corpos de prova soldados pelo processo bi-pulsado, a diferença no desempenho não chega a ser tão significativa, como se pode observar na Figura 32, onde as taxas de erosão são próximas. Entretanto, segundo Oliveira<sup>1</sup>, na prática, devido à posição de soldagem sobre-cabeça necessária a recuperação das turbinas, a soldabilidade apresentada pelo processo GMAW bi-pulsado é superior ao processo GMAW convencional.

O desempenho inferior do MBI-2Al1CO, revestido com apenas uma camada de aço inoxidável com cobalto, corrobora com os resultados encontrados por Barra (1998), demonstrando que na aplicação de apenas uma camada de revestimento, a diluição do aço inoxidável com cobalto na camada de revestimento de aço inoxidável E309L-T1 tem forte influência na resistência a cavitação. Mesmo assim, apresentando um desempenho superior ao aço inoxidável E309L-T1.

O incremento de camadas depositadas de aço inoxidável com cobalto não demonstrou ganhos significativos de resistência à cavitação, podendo-se notar pela Figura 31, que os corpos de prova com duas camadas de depósito apresentaram uma boa resistência.

---

<sup>1</sup>OLIVEIRA, R. C. Engenheiro Mecânico Responsável Técnico da empresa SERVTEC Serviços Técnicos Terceirizados Ltda. Notas particulares. Dezembro, 2012.

### 4.3 Ensaio de Microdureza

Na Figura 34, pode-se observar os resultados das medições realizadas para levantamento de um perfil superficial de dureza, da região próxima a borda até a região próxima a área cavitada, conforme Figura 27.

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

Nos resultados obtidos, é possível notar que ocorre um aumento da dureza quando da aproximação da área cavitada, fato esse observado também por Boccanera (1999), Martinez (2010) e Hart (s.d.)

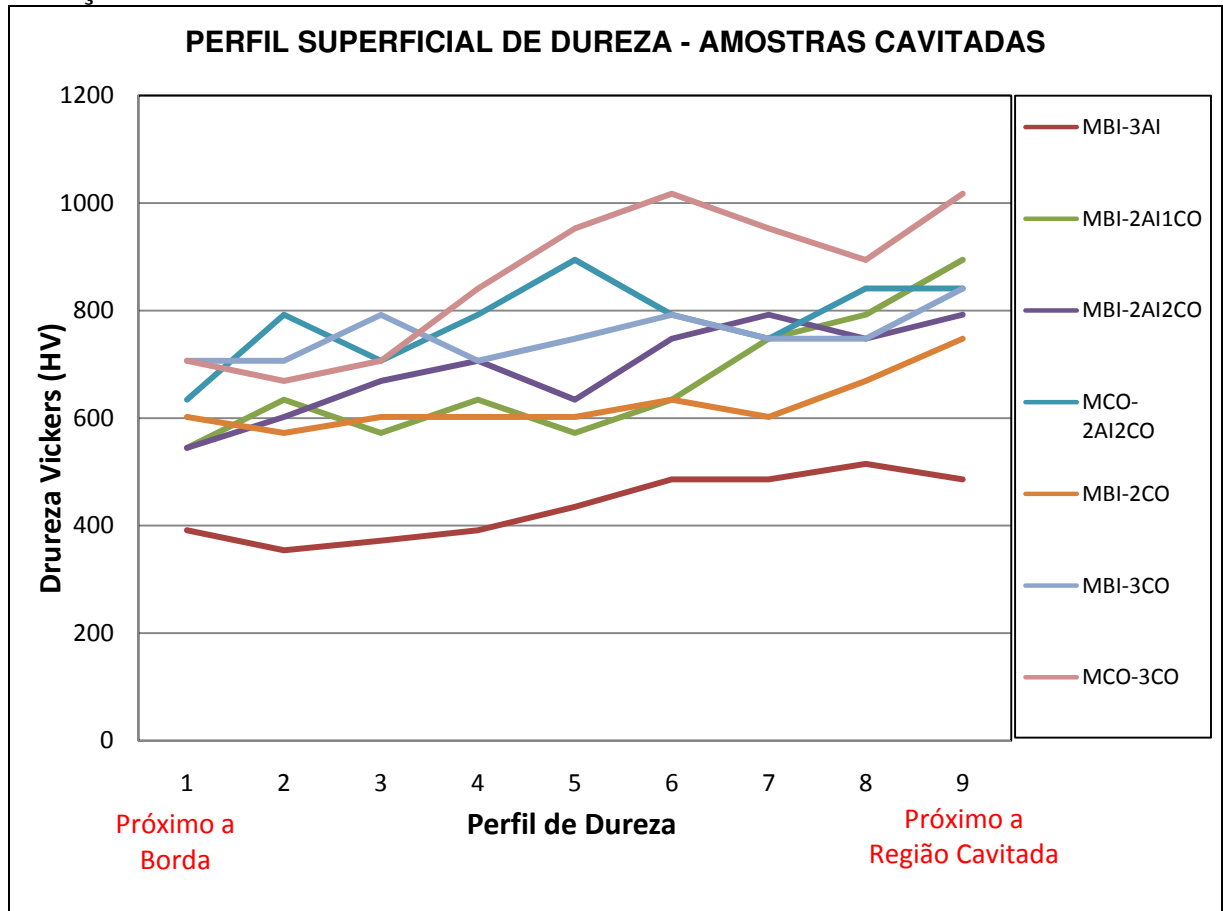
Pesquisadores como Hart (s.d.), Xiaojun (2003) e Bordeasu (2012) atribuem esse endurecimento ocorrido em função da cavitação, a transformação induzida por deformação de austenita em martensita ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ), que juntamente com a baixa energia de falha de empilhamento, promovem também um aumento da resistência a cavitação.

Nas figuras 35 à 39 são apresentados os resultados das medições realizadas para o levantamento de um perfil longitudinal de dureza dos corpos de prova soldados, conforme Figura 26. As medições foram realizadas com aplicação de uma carga de 100 gf por um tempo de 15s.

O primeiro ponto de medição foi realizado a uma distância que variou de 0,5 a 2,0 mm da superfície, devido ao formato dos corpos de prova e limitações do microscópio quanto ao apoio dos mesmos, as demais medidas foram feitas a uma distância que variaram de 0,5 a 1,0 mm, em função dos valores encontrados percorrendo da superfície até o metal base.

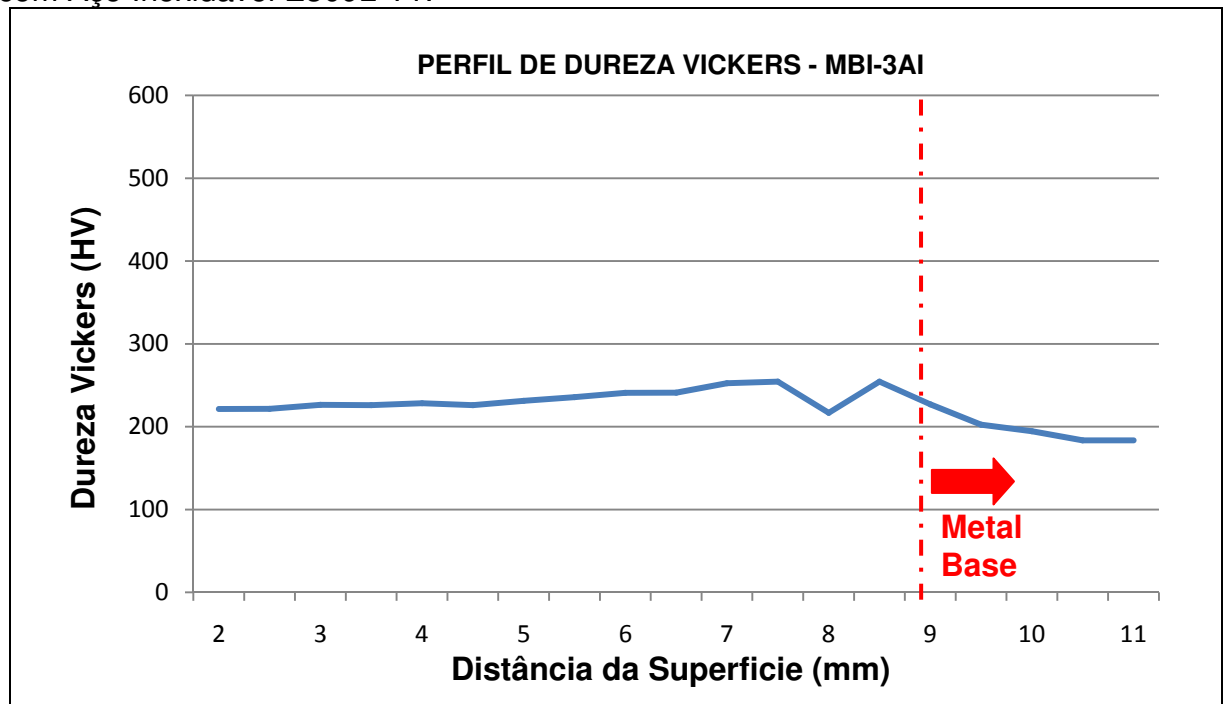
Pode-se observar na região (1) próxima as linhas tracejadas das figuras 36 e 38, que ocorre uma variação de dureza que pode ser explicada pela diluição entre o aço inoxidável com cobalto e o aço inoxidável E309L-T1, observando uma transição mais suave do valor de dureza, bem como na região (2) do metal base (aço carbono) com o aço inoxidável E309L-T1. Essa redução gradual da dureza no sentido da superfície para o metal base demonstra que o aço inoxidável E309L-T1 faz um bom papel de “almofada”, corroborando com Mussardo (2006) e Barra (1998).

Figura 34 - Microdureza da Superfície dos Corpos de Prova após o ensaio de cavitação acelerada



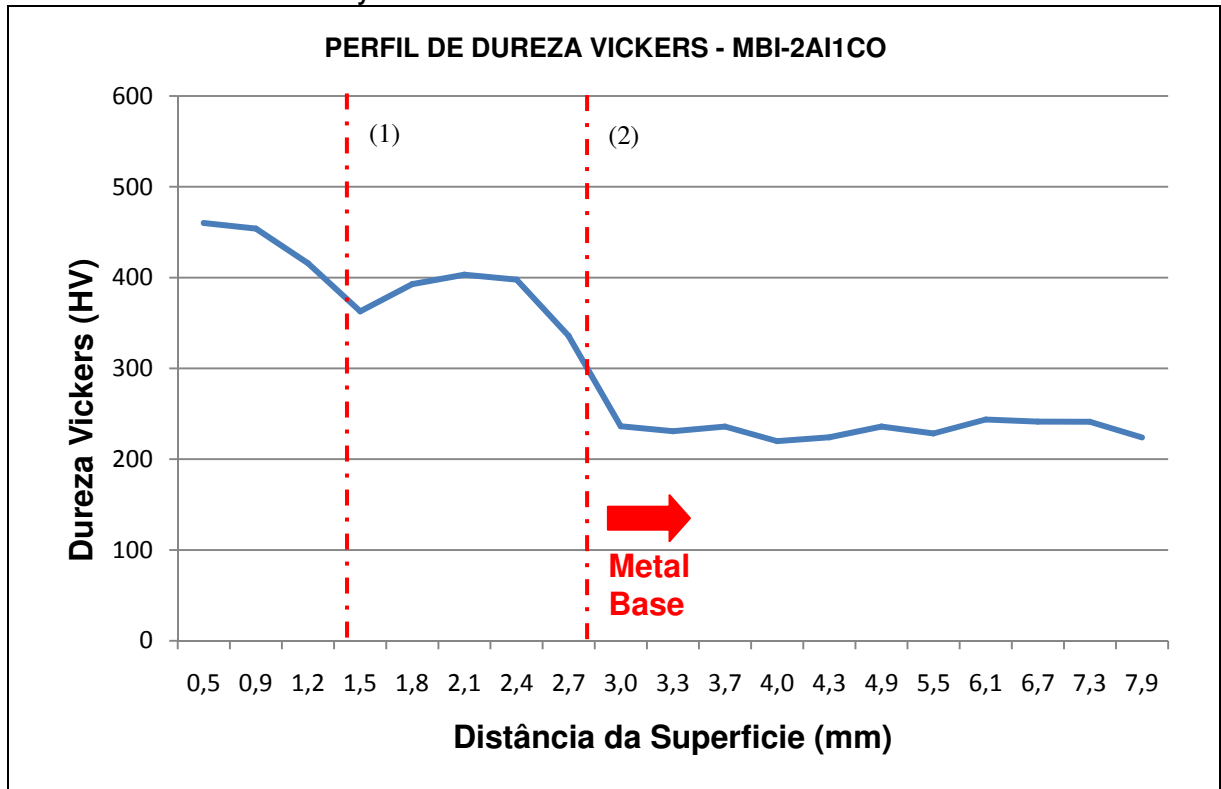
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 35 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-3AI, soldado somente com Aço Inoxidável E309L-T1.



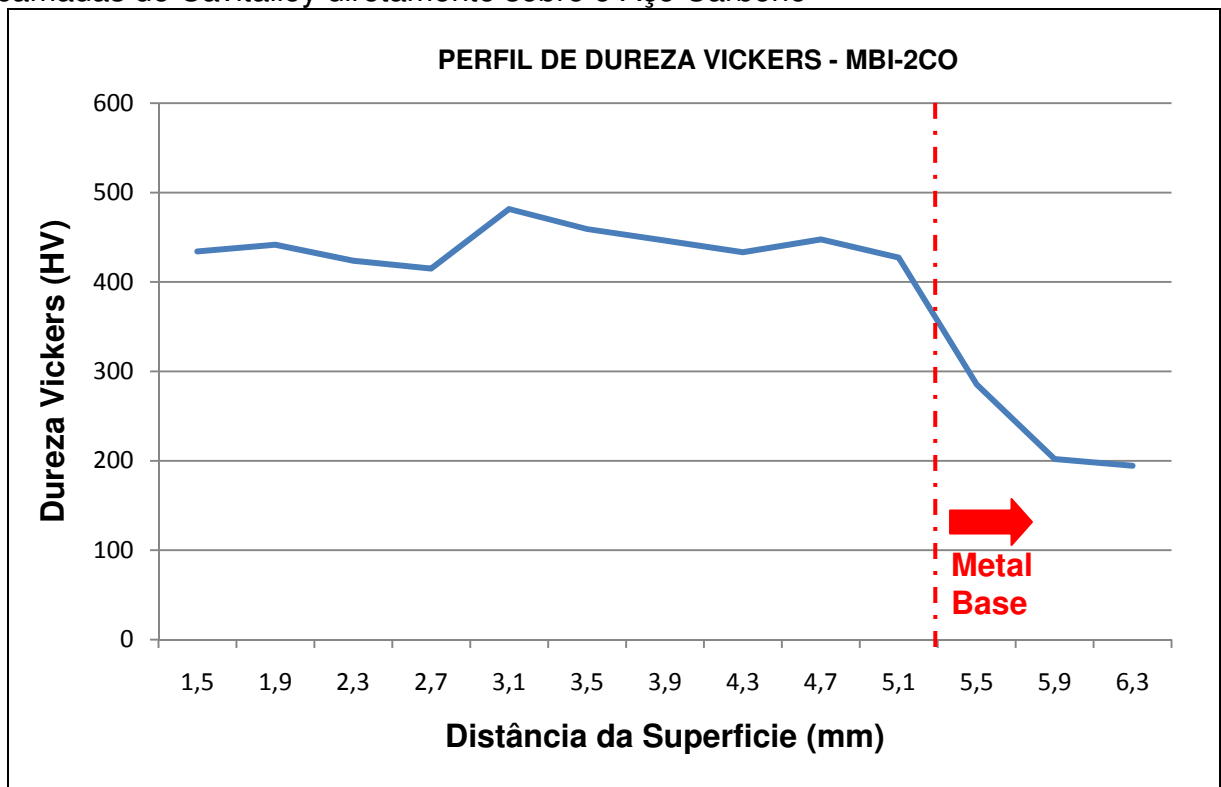
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 36 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal do MBI-2Al1CO, soldado com uma camada de Cavitalloy sobre “almofada” de E309L-T1.



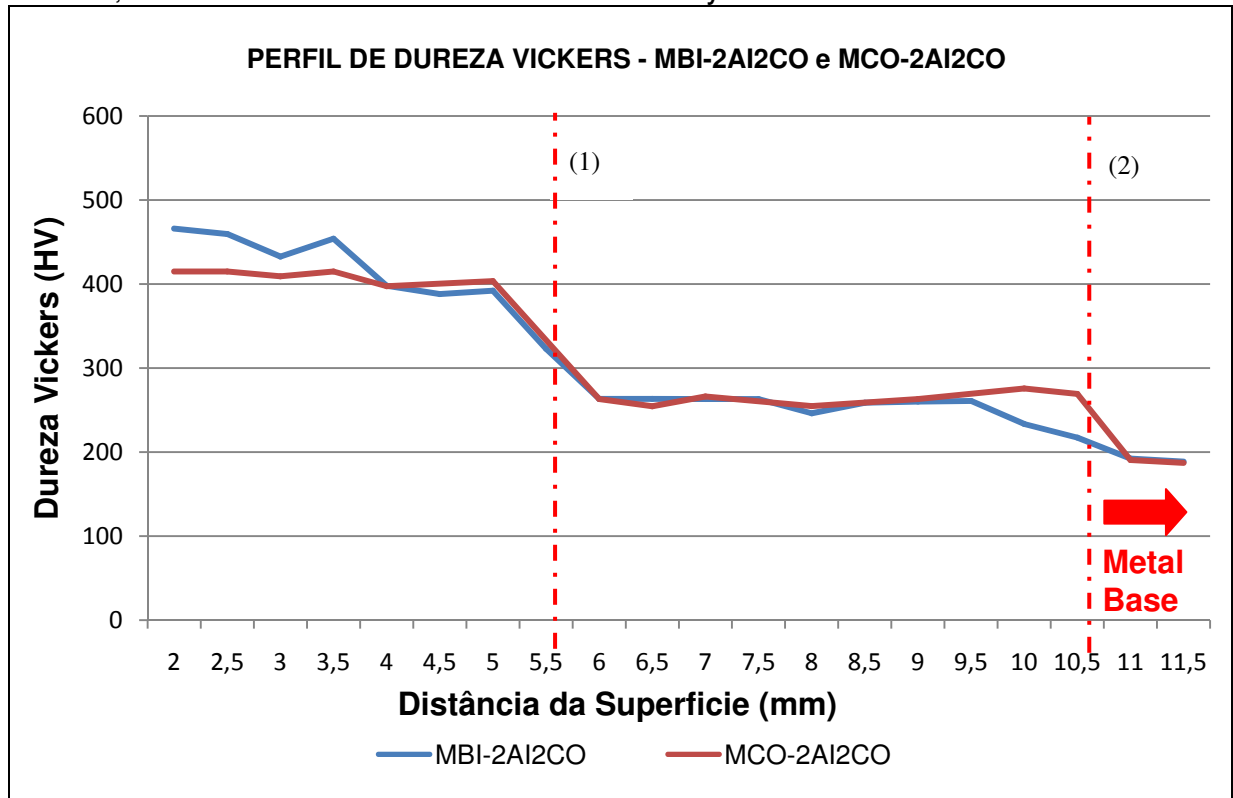
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 37 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal do MBI-2CO, soldado com duas camadas de Cavitalloy diretamente sobre o Aço Carbono



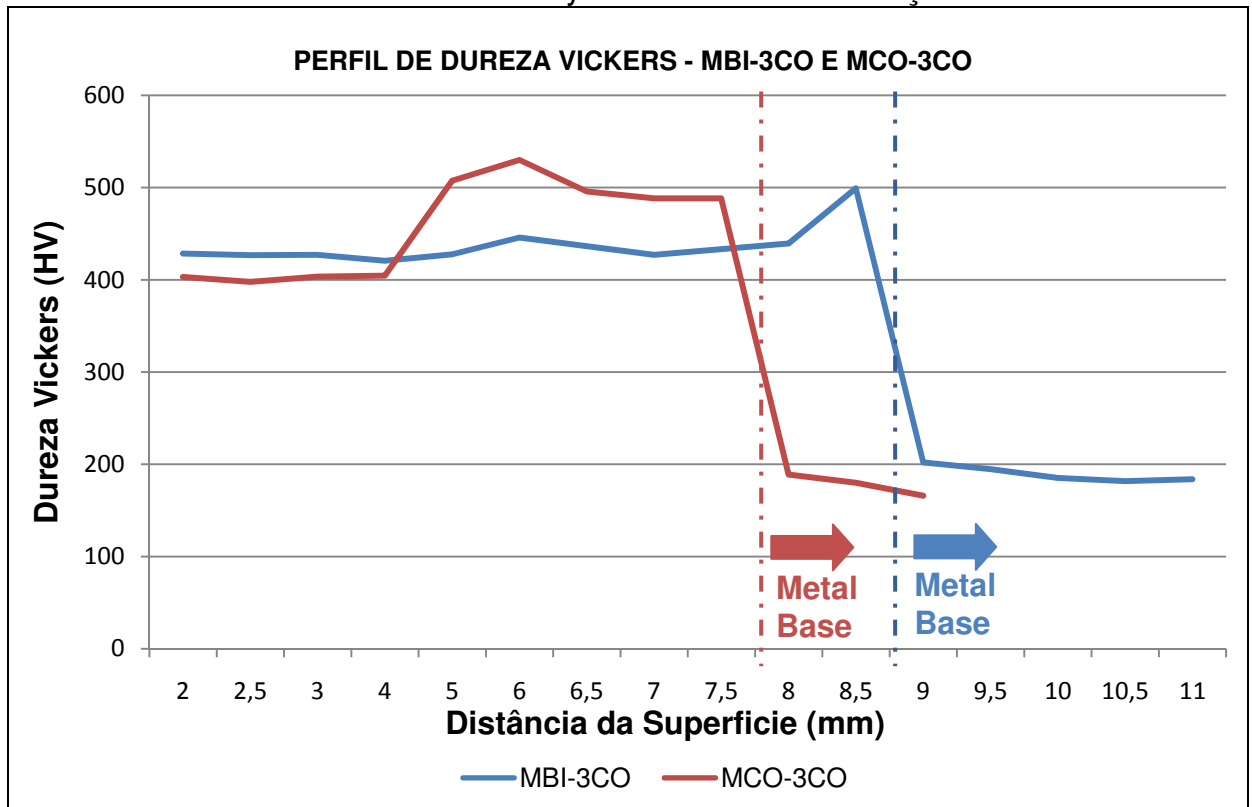
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 38 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-2Al2CO e MCO-2Al2CO, soldado com duas camadas de Cavitalloy sobre “almofada” de E309L-T1.



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 39 - Perfil da Microdureza Face Longitudinal dos MBI-3CO e MCO-3CO, soldado com três camadas de Cavitalloy diretamente sobre o Aço Carbono



Fonte: Dados do próprio autor

Para materiais de características semelhantes, a dureza pode ser um indicador para a resistência a cavitação (HART, s.d.), entretanto, outros aspectos podem influenciar na resistência a cavitação, como o processo, a habilidade do soldador ou o procedimento, fato que pode ser observado na figura 38 e 39, onde os corpos de prova com durezas similares, MCO-2Al2CO e MCO-3CO, soldados por meio do processo convencional, obtiveram resultados diferentes durante os ensaios de cavitação acelerada (figura 31,32 e 33).

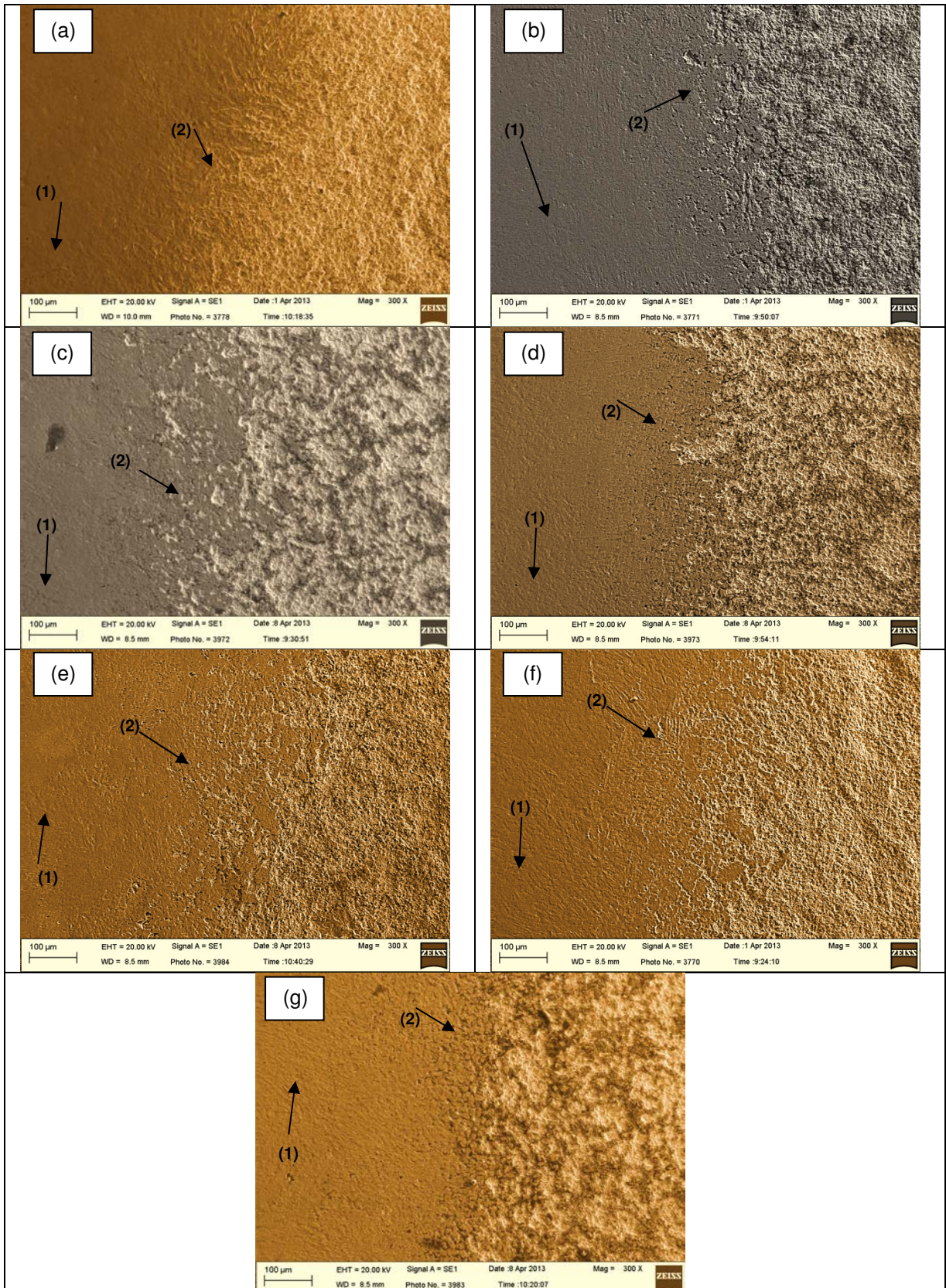
Corroborando com o encontrado por Barra (1998), nas figuras 37 e 39, a região da interface entre o aço inoxidável com cobalto e o aço carbono apresenta um aumento da dureza, como foram depositados 2 e 3 camadas de revestimento, respectivamente, esse aumento de dureza na região pode estar associada ao reaquecimento, com refinamento da microestrutura e o aumento de carbono. Entretanto, para os CPs MBI-2CO e MBI-3CO, figura 37 e 39 respectivamente, soldados por meio do processo bi-pulsado, esse aumento do perfil de dureza, foi mais homogêneo, provavelmente devido aos dois níveis de “heat input”, característicos desse tipo de processo, que promove um aporte de temperatura mais controlado ao revestimento soldado.

#### 4.4 Análise Metalográfica

Na análise por meio da técnica de MEV da superfície dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cavitação acelerada, é possível notar após análise das imagens da figura 40, observando a região ainda não erodida, linhas de deformação (1) semelhantes às encontradas por Will (2008) e Hattori (2009), que seriam relacionadas com o mecanismo de absorção de energia por transformação de fase. Na região próxima a área mais erodida, contornos de grão (2) corroídos pelo processo de cavitação, como observado por Bregliozzi *et al* (2005) e Hattori (2009).

Na figura 40, também é possível observar na interface entre uma zona que sofreu erosão e a que sofreu influência da cavitação, sinais de encruamento, o que explicaria o aumento de dureza que ocorre nessa região (COJOCARU, 2010).

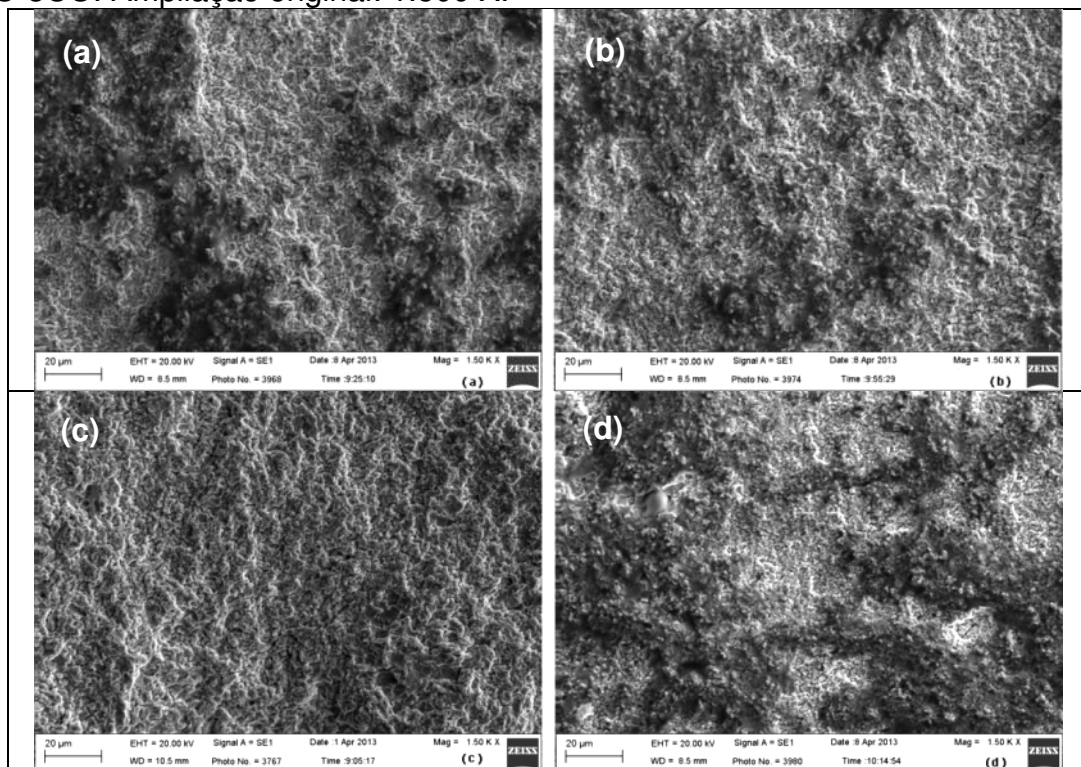
Figura 40 - Imagem obtida por MEV da região da interface da área cavitada após 40 horas de ensaio dos corpos de prova: (a) MBI-3AI, (b) MBI-2AI1CO, (c) MBI-2AI2CO, (d) MCO-2AI2CO, (e) MBI-2CO, (f) MBI-3CO, (g) MCO-3CO. Ampliação Original: 300 X.



Fonte: Dados do próprio autor

Na figura 41, é possível evidenciar a formação de crateras, ondulações e degraus com saliências na superfície de todos os corpos de prova, formação similar ao encontrado nas turbinas hidráulicas que sofreram cavitação. O que corrobora com pesquisadores como: Hattori (2009), Hart (s.d), Okada (1990), quanto a natureza da perda de material na cavitação estar relacionada à fadiga superficial do material.

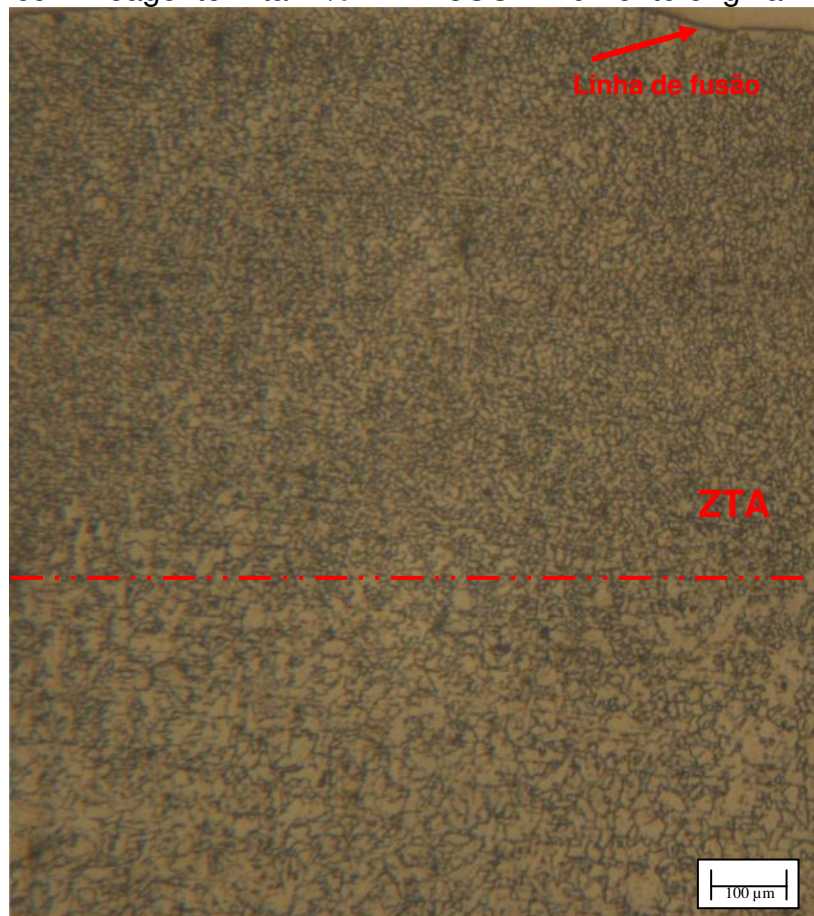
Figura 41 - Imagem obtida por MEV da região erodida por cavitação após 40 horas de ensaio dos corpos de prova: (a) MBI-2Al2CO, (b) MCO-2Al2CO, (c) MBI-3CO e (d) MCO-3CO. Ampliação original: 1.500 X.



Fonte: Dados do próprio autor

A partir da análise longitudinal dos corpos prova após o ataque da superfície polida com o reativo de Nital 2% revelou-se a microestrutura do metal de Base em aço carbono, onde é possível notar, Figura 42, um refinamento dos grãos na região da Zona Fundida (ZF) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA), entretanto, os grãos da linha de fusão apresentam visualmente um tamanho maior que o da ZTA, possivelmente em função do resfriamento mais lento, em comparação a mesma. A microestrutura formada no metal base com tamanhos de grãos diferentes em regiões diferentes do metal base, é semelhante a citada por Marques (2005).

Figura 42 - Região do Metal Base em Aço Carbono incluindo Linha de Fusão e ZTA. Ataque com Reagente Nital 2% - MBI-3CO - Aumento original: 100X.



Fonte: Dados do próprio autor

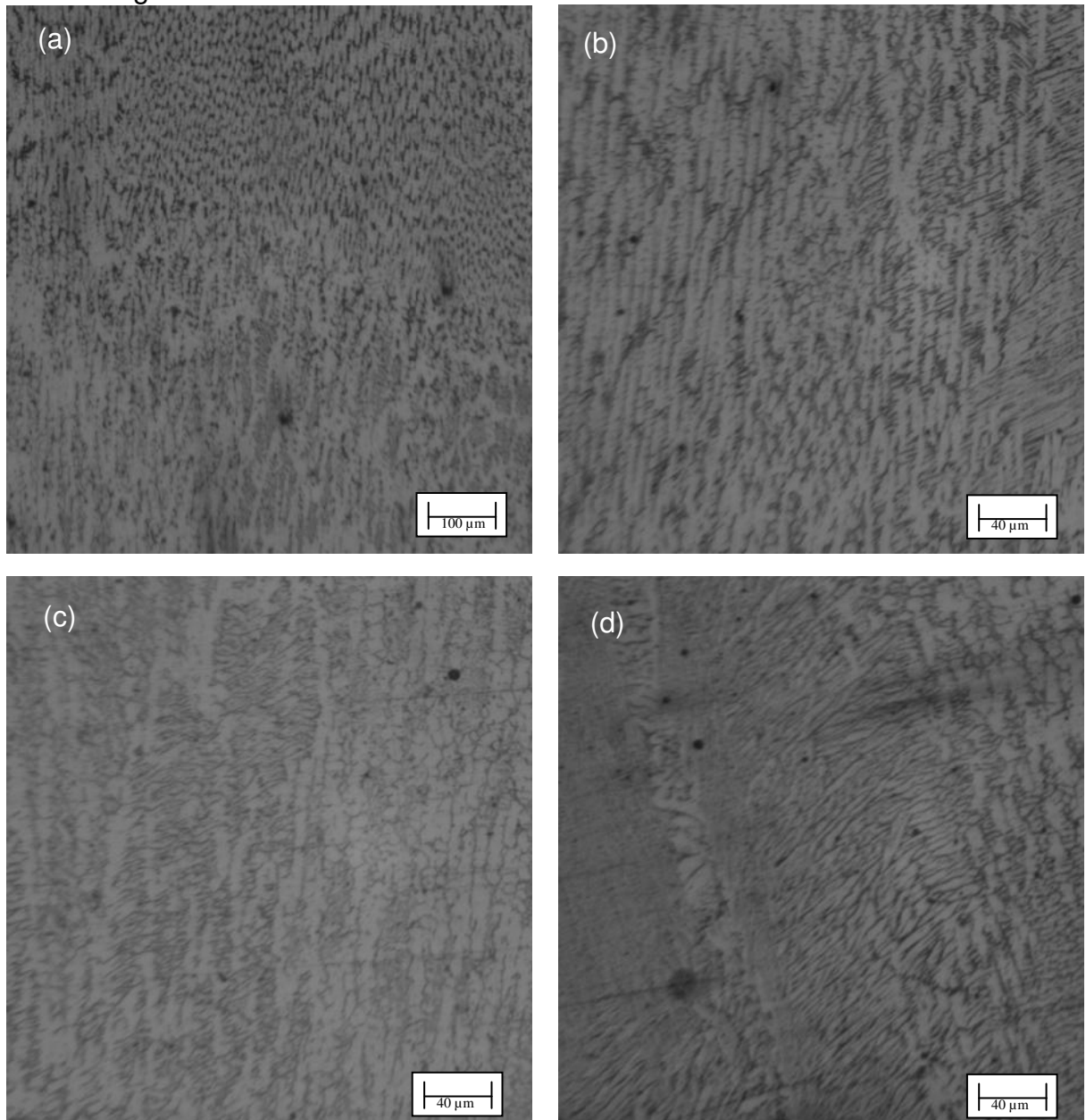
O ataque com o reagente Villela revelou a microestrutura das diferentes camadas de material da zona soldada. A Figura 43 mostra o aspecto típico da zona soldada com o aço inoxidável E309L-T1 que revelou uma microestrutura dendrítica bruta de fusão, contendo inclusões globulares, com composição química não identificada que presumidamente podem ser óxidos.

A interface entre as camadas de aço inoxidável E309L-T1 e o aço inoxidável com cobalto é mostrada na Figura 44, com uma estrutura dendrítica da camada resistente a cavitação, onde é possível notar a existência de uma descontinuidade no MBI-2Al<sub>2</sub>CO, Figura 44b.

O ataque químico realizado revelou a microestrutura das camadas de revestimento resistente à cavitação. As micrografias apresentadas nas Figura 44 e 45 mostram a região da interface ZF/ZTA, também conhecida como Zona de Ligação (ZL), entre a primeira camada do aço inoxidável com cobalto e o aço inoxidável E309L-T1 e entre o aço inoxidável com cobalto e o aço carbono respectivamente,

onde é possível observar, similar ao encontrado por Mussardo (2005), a solidificação da poça começando com o crescimento epitaxial dos grãos da zona parcialmente fundida, ao longo da interface sólido-líquido.

Figura 43 - Região do Revestimento Soldado com o E309L-T1, Ataque com Reagente Vilela (a) MBI-3Al – Aumento original: 100X; (b) MBI-2Al1CO – Aumento original: 250X; (c) MBI-2Al2CO – Aumento original: 250X; (d) MCO-2Al2CO – Aumento original: 100X .

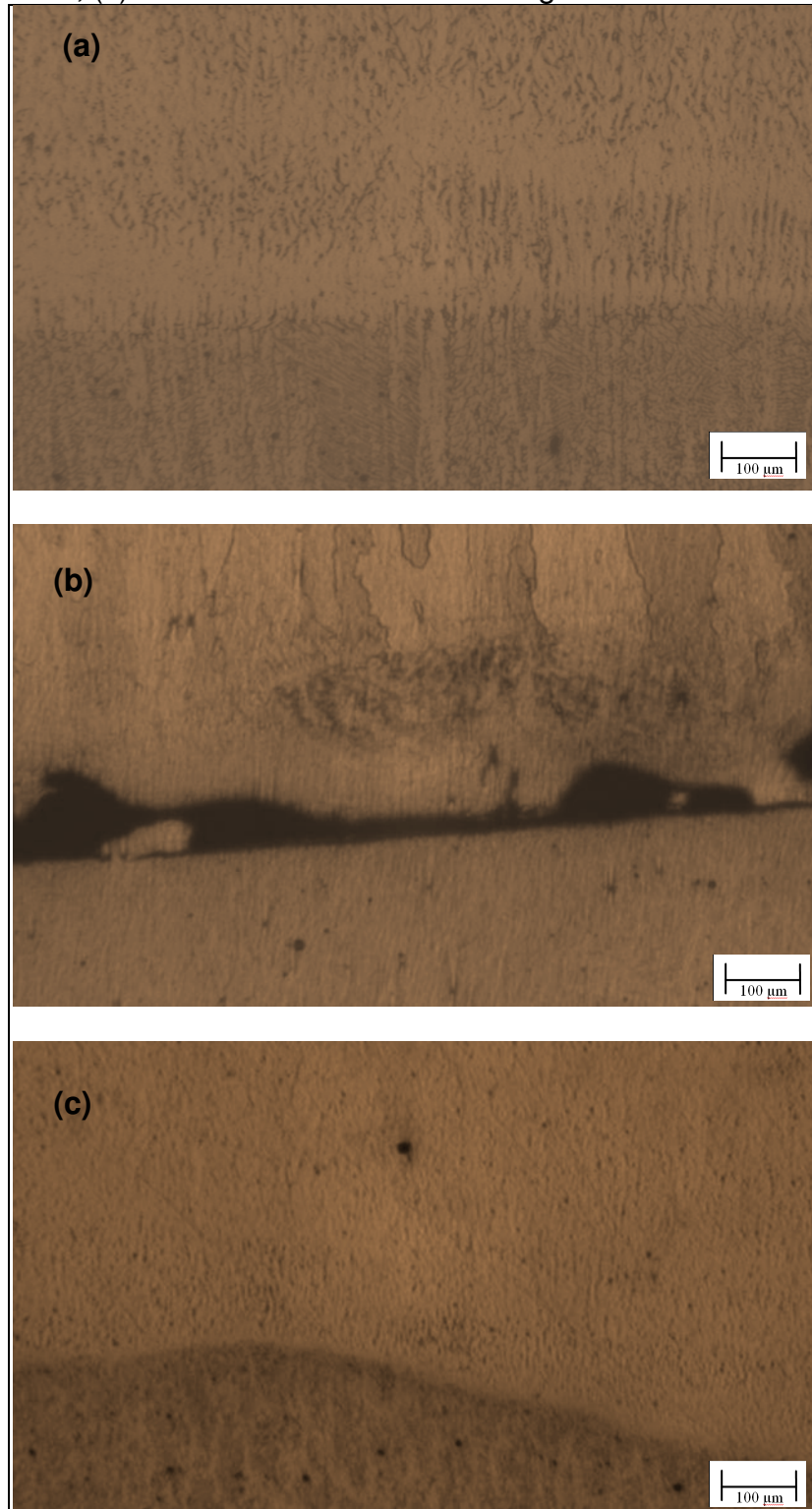


Fonte: Dados do próprio autor

Apesar dos parâmetros utilizados na soldagem do aço inoxidável com cobalto serem semelhantes, pode-se notar nos corpos de prova analisados a ocorrência tanto do crescimento dendrítico do tipo celular quanto do tipo colunar. Segundo Modenesi (2001), tal comportamento pode ser atribuído a gradientes de

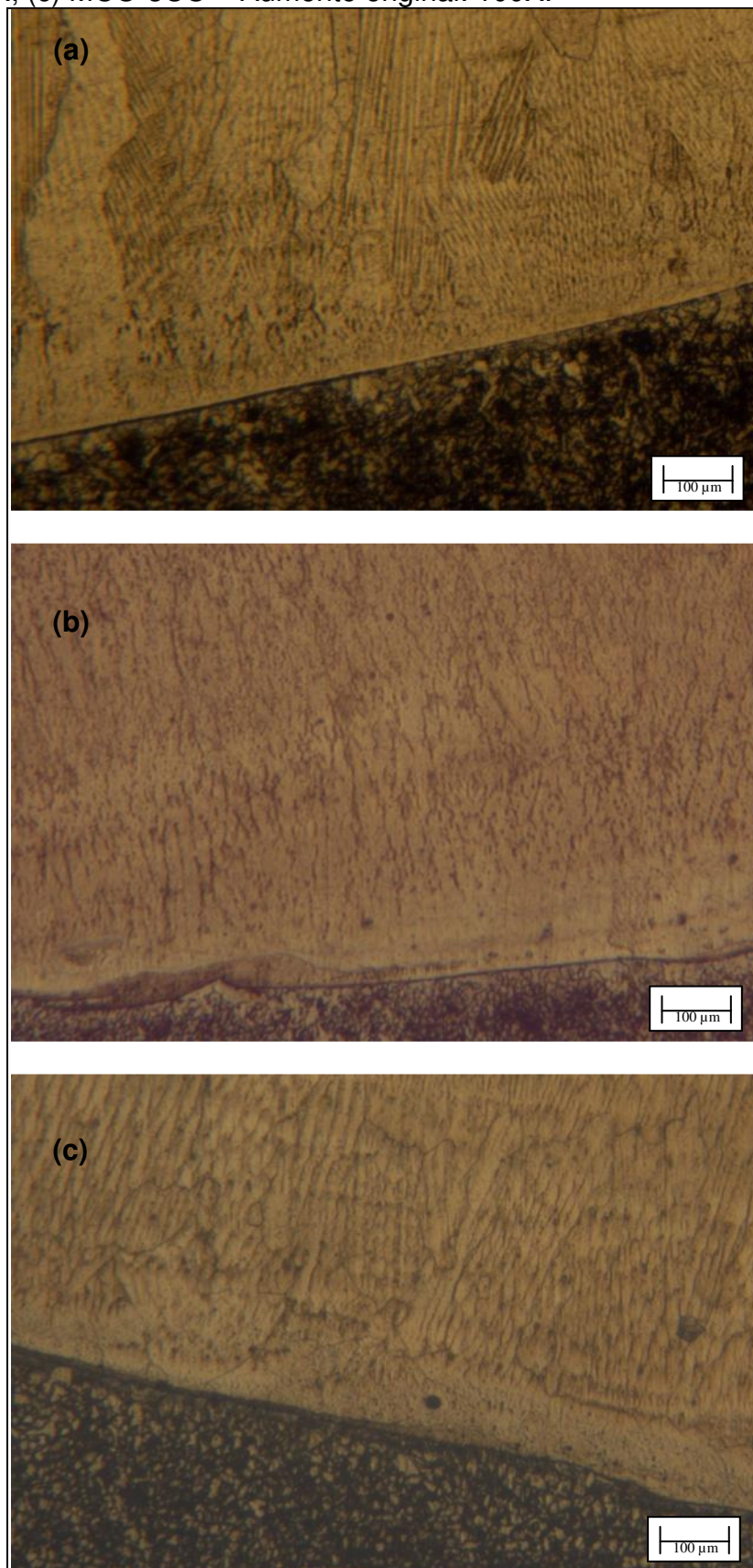
concentração existentes na poça de fusão, de forma a se resultar na solidificação com austenita primária.

Figura 44 - Interface na Região Soldada do AWS E309L-T1 com o Cavitalloy. Ataque com Reagente Vilela (a) MBI-2Al1CO – Aumento original: 100X; (b) MBI-2Al2CO – Aumento original: 100X; (c) MCO-2Al2CO – Aumento original: 100X



Fonte: Dados do próprio autor

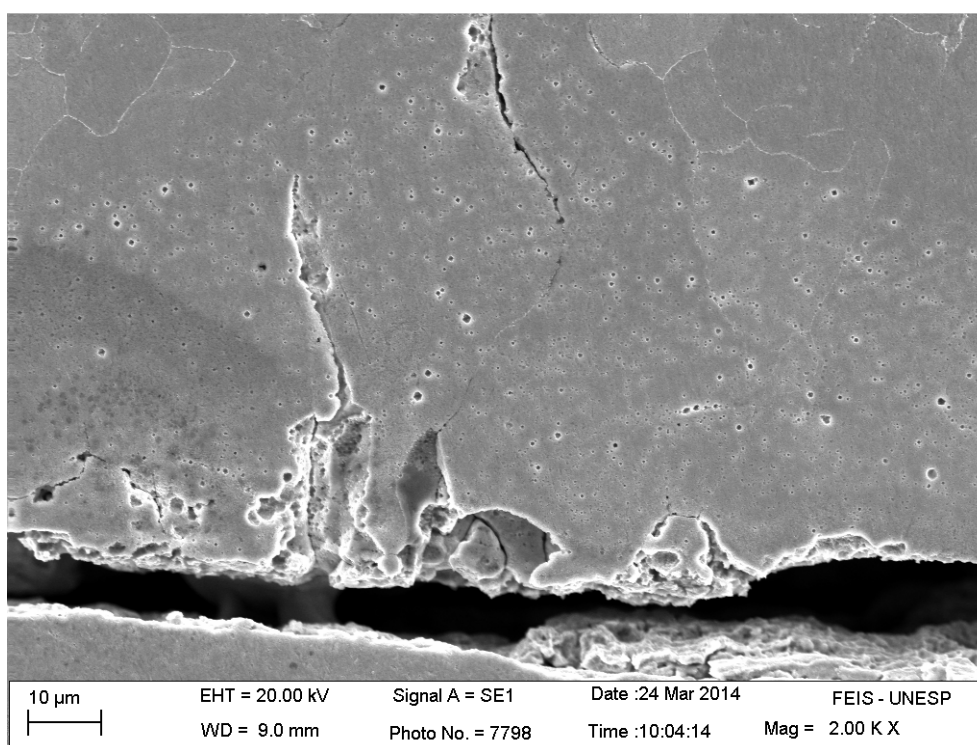
Figura 45 - Interface na Região Soldada do Aço Carbono com Cavitalloy. Ataque com reagente Vilela (a) MBI-2CO – Aumento original: 100X; (b) MBI-3CO – Aumento original: 100X; (c) MCO-3CO – Aumento original: 100X.



Fonte: Dados do próprio autor

Na imagem feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do MBI-2Al2CO na região da descontinuidade, Figura 46, é possível observar que a mesma possui uma descontinuidade com característica de trinca, também é possível se observar que a partir dela estão se originando trincas secundárias. Esse tipo de trinca é preocupante, pois como as mesmas são pontos concentradores de tensão podendo favorecer o início de uma fratura frágil ou por fadiga, com a possibilidade de deslocamento do revestimento durante o período de serviço.

Figura 46 - Imagem obtida por MEV da região da trinca de solidificação do MBI-2Al2CO

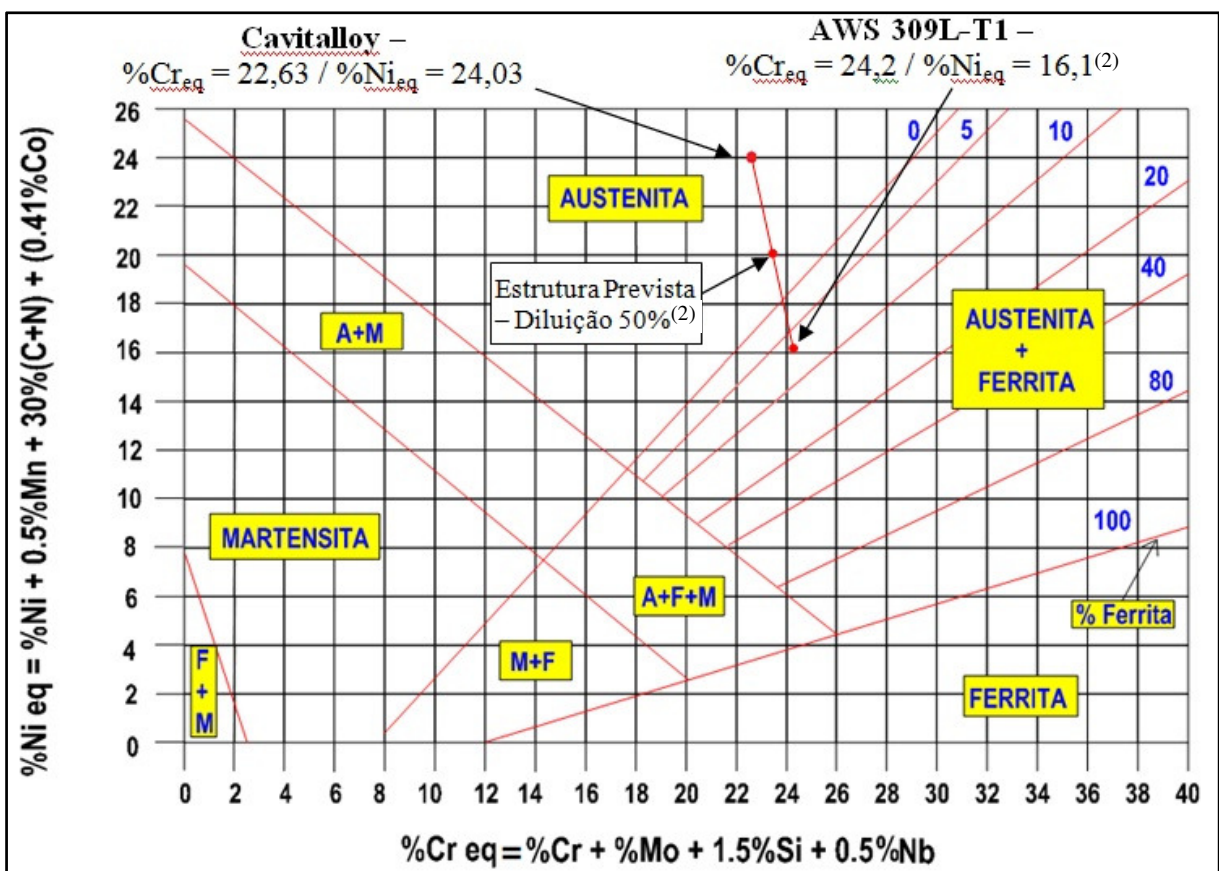


Fonte: Dados do próprio autor

Para o corpo de prova MBI-2Al2CO, quando se observa na Figura 47, o Diagrama de Schaeffler, onde foram colocados no gráfico os dados do AWS E309L-T1, da camada de “almofada”, e do aço inoxidável com cobalto (Cavitalloy), e estando a diluição diretamente ligada à energia de soldagem, uma velocidade mais baixa, poderia produzir uma maior diluição. Utilizando como referencia uma diluição na ZF próxima a 50%, como indicada por Modenesi (2001), a estrutura formada seria monofásica austenítica, diferente de uma microestrutura austenítica e ferrítica produzida com uma diluição entre 10 e 27%, indicada por Barra (1998) e Boccanera (1998). Dessa forma, em função da localização da trinca, na ZL, a mesma pode ser

originária do processo de solidificação, visto que, uma estrutura austenítica apresenta uma baixa resistência a formação das trincas no processo de solidificação, que ocorre devido a formação de filmes de material líquido segregado entre os contornos de grãos do material nos estágios finais de sua solidificação e com a incapacidade dessa estrutura suportar aos esforços decorrentes da contração do material. (MARQUES,2005).

Figura 47 - Diagrama de Schaeffler Modificado <sup>(1)</sup>, onde mostra o resultado da primeira camada de Cavitalloy depositada sobre o AWS E309L-T1 <sup>(2)</sup>



Fonte: <sup>(1)</sup>Barra (1998) / <sup>(2)</sup>Modenesi (2001)

## 5 CONCLUSÕES

As medidas de dureza permitem identificar com razoável clareza a profundidade e a faixa de transição das camadas de revestimento soldado. Para o mesmo material, depositado com procedimentos distintos, uma maior dureza superficial não representou uma melhor resistência a cavitação durante os ensaios de cavitação acelerada.

Na posição de soldagem plana, utilizada para esse estudo, não se observou um ganho significativo na resistência à cavitação do aço inoxidável com cobalto depositado por meio do processo bi-pulsado em comparação ao convencional. Entretanto, na posição de sobre-cabeça, onde a energia de soldagem necessária para deposição do aço inoxidável com cobalto é maior no processo convencional, faz com que o processo bi-pulsado apresente melhor desempenho operacional.

O incremento de camadas não demonstrou ganhos significativos na resistência a cavitação pelas técnicas laboratoriais utilizadas, e nem um aumento significativo do valor de dureza sobre a última camada, demonstrando que o procedimento adotado de deposição de duas (2) camadas de Aço Inoxidável com Cobalto é suficiente para garantir a resistência à erosão cavitacional.

A deposição do Aço Inoxidável com Cobalto diretamente sobre o Aço Carbono apresentou boa resistência a cavitação, sem apresentar trincas ou outros defeitos visuais na região soldada, demonstrando que pode ser uma boa solução quando da utilização em pás de turbinas com espessuras pequenas, onde não é possível a utilização do procedimento com aplicação de camada do aço inoxidável E309L-T1.

Mesmo apresentando descontinuidade na região da ZL, o MBI-2Al2CO soldado com o processo bi-pulsado, apresentou um bom desempenho à resistência a cavitação, o que demonstra que o processo de pulsação permite uma homogeneidade para o revestimento, garantindo essa característica do Aço Inoxidável com Cobalto.

Para reduzir a probabilidade de ocorrência de defeitos oriundos da solidificação durante o processo de soldagem, é recomendado que se controle os parâmetros de soldagem para que a diluição fique abaixo dos 30%, produzindo uma estrutura austenítica e ferrítica.

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 E309L-T1, a sua resistência é em média 12 a 15 vezes superior. O que justifica o investimento quando da aplicação realizada de forma correta.

## REFERENCIAS

ALLENSTEIN, A. N. **Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável martensítico ca6-nm nitretado por plasma**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ALLENSTEIN, A.N. **Modificação da superfície pela introdução de nitrogênio no aço inoxidável martensítico utilizado em componentes hidráulicos**. 2011. 211 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus**. Washington: ASTM, 1992. p. 97-110. (Norma G 32-92).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **Standard terminology relating to wear and erosion**. Washington: ATM, 1995.p. 145-151. (Norma G 40-95).

ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes**. 72 p. Abendi. Fev/2014. Disponível em:<[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/LP\\_2014\\_atual.pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/LP_2014_atual.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2014.

BAPTISTA, M. B.; COELHO. M. M. L. P. Cavitação. In \_\_\_\_\_. **Fundamentos da engenharia hidráulica**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2003. p.171-186.

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**. 1998. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

BOCCANERA, L. ;BARRA, S.R.; BUSCHINELLI, A.J.A. Resistência à erosão por cavitação de revestimentos soldados. In:CONGRESO ARGENTINO DE SOLDADURA, 10, CONGRESO IBEROAMERICANO DE SOLDADURA, 6, Buenos Aires. **Anais...** Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/8477380/Resistencia-a-erosao-por-cavitacao-de-revestimentos-soldados#scribd>>. Acesso em: 18 jan. 2012.

BOCCANERA, L. et al. Cavitation erosion resistance of co-alloyed stainless steel weld claddings as compared to thermal sprayed coatings. In:ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 25, 1999, Belo Horizonte. **Encontro...** Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 1999. Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/8269766/CAVITATION-EROSION-RESISTANCE-OF-Co-ALLOYED-STAINLESS-STEEL-WELD-CLADDINGS-AS-COMPARED-TO-THERMAL-SPRAYED-COATINGS#scribd>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

BOCCANERRA, L.F.; BUSCHINELLI, A.J.A.; BARRA, S.R.; FREITAS, C.R.R. SANTOS, J.V. Influência do acabamento superficial, porosidade e diluição sobre a

resistência à cavitação de revestimentos soldados. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 24, CONGRESSO LATINO-AMERICANO, 11, IBERO-AMERICANO DE SOLDAGEM FORTALEZA, 5, 1998, Fortaleza. **Anais...** Disponível

em: <[http://www.academia.edu/1431419/Influ%C3%Aancia\\_do\\_Acabamento\\_Superficial\\_Porosidade\\_e\\_Dilui%C3%A7%C3%A3o\\_Sobre\\_a\\_Resist%C3%Aancia\\_%C3%A0\\_Cavita%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_Revestimentos\\_Soldados](http://www.academia.edu/1431419/Influ%C3%Aancia_do_Acabamento_Superficial_Porosidade_e_Dilui%C3%A7%C3%A3o_Sobre_a_Resist%C3%Aancia_%C3%A0_Cavita%C3%A7%C3%A3o_de_Revestimentos_Soldados)> . Acesso em: 25 abr. 2014.

BRANDI, S. D. **Soldagem dos aços inoxidáveis**. São Paulo: Acesita, 1997.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2014. 288 p. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia 2020**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2011. V. 3. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano nacional de energia 2030**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2007. V. 3. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pne/forms/empreendimento.aspx>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

BREGLIOZZI, G.; SCHINO, A.D.; AHMED, S.I.; KENNY, J.M.; HAEFKE, H.; Cavitation wear behavior of austenitic stainless steels with different grain sizes. **Wear**, Amsterdam, v. 258, p. 503-510, 2005. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0043164804002327/1-s2.0-S0043164804002327-main.pdf?\\_tid=b1e3e3e6-b112-11e4-ac79-00000aab0f6b&acdnat=1423565638\\_8974d4c3fa4fd353df6e9860083dfd01](http://ac.els-cdn.com/S0043164804002327/1-s2.0-S0043164804002327-main.pdf?_tid=b1e3e3e6-b112-11e4-ac79-00000aab0f6b&acdnat=1423565638_8974d4c3fa4fd353df6e9860083dfd01)>. Acesso em: 03 ago. 2008.

BONACORSO, N. G. **Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte**. 2004. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) –Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BORDEASU, I. ;BADARAU, R. ;JURCHELA, A. **The deformations and Microstructural transformations analyses produced by cavitation to the austenitic stainless steel**. 2008. Disponível em: <[http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2008/411-414\\_for\\_web.pdf](http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2008/411-414_for_web.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2012.

CALAINHO, J.A. L. et al. Cavitação em turbinas hidráulicas do tipo Francis e Kaplan no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 15, 1999, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [S.n.] Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/conem/2000/OC8712.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

COJOCARU, V.; CAMPIAN, V.; FRUNZEVERDE, D.; ION, I.; CUZMOS, A.; DUMBRAVA, C. Laboratory tests concerning the influence of surface hardening on the cavitation erosion resistance. In: PROCEEDINGS OF THE WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING MECHANICS, STRUCTURES, ENGINEERING GEOLOGY (EMESEG '10), 3, 2010, Corfu Island. **Proceedings of the...** Corfulsland: WSEAS Press, 2010. p. 210-213. Disponível em: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Corfu/EMEGEO/EMEGEO-35.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

COSTA, T.; SANTOS, D.; LANÇA, R. **Turbo máquinas hidráulicas**. Faro: Escola Superior de Tecnologia Universidade do Algarve. Faro, Portugal, 2001. 14 p. (Notas de Aula)

GOMES, M. **Processos de fabricação**. 55 p. (Notas de aula). Disponível em: <[http://professormarciogomes.files.wordpress.com/2008/09/aulas-10-e-11-soldagem\\_12.pdf](http://professormarciogomes.files.wordpress.com/2008/09/aulas-10-e-11-soldagem_12.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2012.

GONÇALVES, B.H.B. **Estudo comparativo da resistência a erosão por cavitação do metal de solda depositado por um arame tubular tipo 13%Cr - 4%Ni - 0,4%Mo e do aço fundido ASTM A743 CA-6NM**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

HART, D.; WHALE, D. **A review of cavitation-erosion resistance weld surfacing alloys for hydro turbines**. Disponível em: <<http://www.castolin.com/publication/review-cavitation-erosion-resistant-weld-surfacing-alloys-hydoturbines>>. Acesso em: 20 dez. 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>>. Acesso em: 04 nov. 2014.

CIMM. **Dicionário metal mecânico – Definição**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/444-soldabilidade>>. Acesso em: 02 mar. 2013.

Metal –Check. **Líquido penetrantes**. Disponível em: <<http://www.metalchek.com.br/ensaios-nao-destrutivos/líquidos-penetrantes>>. Acesso em: 25 ago. 2012

CERPCH. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. **Turbinas**. <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/turbinas.html>>. Acesso em: 15 jul. 2012.

KRUPPA, R.G. et al. A influência do aporte térmico na metalurgia de soldagem de revestimento de aço inoxidável com cobalto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v.3, n.2, p. 1-9, 2011. Disponível em: <<http://www.revistaret.com.br/ojs-2.2.3/index.php/ret/article/viewFile/82/11>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

LAMBERT, P.; SIMONEAU, M.; DICKSOM, J. I. **Cavitation erosion and deformation mechanism of Ni and Co austenitic stainless steels**. Québec: Institute of Research of Hydro-Québec, 1987.

LIMA, C.R.C.; CAMARGO, F.; MARQUES, P.V. Estudo comparativo das propriedades de revestimentos a base de cobalto (Stellite) aplicados por soldagem e por aspersão térmica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 24, 1998, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: FAPESP, 1998.

MARQUES, P. V. Proteção de turbinas hidráulicas contra o desgaste cavitacional. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v.8, n.2, p. 47-59, 2003.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005. 362 p.

MARQUEZE, C. M. **Manual para a realização de ensaios de cavitação acelerada conforme norma ASTM G 32- 09**. Florianópolis: Laboratório de Cavitação/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

MARTINEZ, J.A.B. et al. Resistência à erosão por cavitação de ligas martensítica e austenítica aplicadas por soldagem sobre aço inoxidável. In: SEMINÁRIO ANUAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE MATERIAIS, 2, 2009, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFP, 2009. Disponível em: <[http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/documentos/IISA\\_PPGEM.pdf](http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/documentos/IISA_PPGEM.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2012.

MESA, D. H.; GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Avaliação da resistência ao desgaste erosivo gerado por cavitação em aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de nitrogênio: estudo dos mecanismos de desgaste. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 1, p. 147 – 152, 2010. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416597025>>. Acesso em: 20 set. 2009.

MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: SENAI-SP, 2004.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. Ilha Solteira, 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

MUSSARDO, G.B. **Análise microestrutural de revestimentos usados no reparo de turbinas hidráulicas danificadas pela cavitação**. Ilha Solteira, 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

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**, Lausanne, v. 201, n. 3/4, p. 1289-1295, 2006. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0257897206001071/1-s2.0-S0257897206001071-main.pdf?\\_tid=57a90118-b126-11e4-a660-00000aacb361&acdnat=1423574076\\_02f5243d762202aea7ff0d869c463b4b](http://ac.els-cdn.com/S0257897206001071/1-s2.0-S0257897206001071-main.pdf?_tid=57a90118-b126-11e4-a660-00000aacb361&acdnat=1423574076_02f5243d762202aea7ff0d869c463b4b)>. Acesso em: 10 fev. 2015.

OKADA, T.; IWAI, Y. Cavitation erosion. **JSME International Journal**, Fairfield, v.33, n.2, p.128-135, 1990.

PROCOPIAK, L. A. J.; SOUZA, N.C.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; XIAOJUN, Z. **Efeito dos processos de modificação superficial na resistência a erosão por cavitação**. Brasília, DF: Programa P & D COPEL / ANEEL 1999/2000.

RAO, A. S.; KUNG, D. **Metallic overlay materials for the optimum cavitation performance of hydraulic turbines**. New York: Canadian Electrical Association. 1987.127 p.

RIBEIRO, H.O. **Desenvolvimento de ligas para revestimentos por pta resistentes à cavitação**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RIBEIRO, H. O. et al. Resistência à erosão por cavitação de aços inoxidáveis austeníticos CrMnSiN depositados por PTA. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 121-129, 2010.

RICHMAN, R. H.; McNAUGHTON, P. **Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals**. *Wear*, Amsterdam, v. 140, p. 63-83, 1990.

SANTOS, J. O preço da segurança. **Brasil Energia**, Rio de Janeiro, n. 395, p. 18-22, 2013.

SILVA, F.M.P.; SILVA, E.F. **Processo de corte a grafite**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/7683023/Processos-de-Corte-a-Grafite>>. Acesso em: 25 ago. 2013.

SILVA, R.H.G.; DUTRA, J.C. Thermal-pulsed MIG/MAG welding applied to the repair of cavitation erosion on large-scale hydraulic turbines. **Welding and Cutting**, Duesseldorf, v. 8, n. 1, p. 27-30, 2009.

SIMONEAU, R. **Co containing austenitic stainless steel with high cavitation resistance**. United States Patent. Patent Number 4.588.440, 1986. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/4588440.html>>. Acesso em: 06 jul. 2013.

VAZ, C. T. **Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13%Cr - 4%Ni - 0,4%Mo**. 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

WANTANG, F. Resistance of high nitrogen austenitic steel to cavitation erosion. **Wear**, Amsterdam, v. 249, n. 9, p. 788-791, 2001.

WILL, C. R. **Ligas inoxidáveis resistentes à cavitação depositadas por plasma – PTA:arame**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

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, 2010.

XIAOJUN, Z. et al. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel. **Materials Science & Engineering**, Amsterdam, v. A358, p. 199-204,

2003.Elsevier. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0921509303002971/1-s2.0-S0921509303002971-main.pdf?\\_tid=0896c93a-b152-11e4-aa38-00000aacb361&acdnat=1423592841\\_187388dcee5b419da053f2a3350783ff](http://ac.els-cdn.com/S0921509303002971/1-s2.0-S0921509303002971-main.pdf?_tid=0896c93a-b152-11e4-aa38-00000aacb361&acdnat=1423592841_187388dcee5b419da053f2a3350783ff)>. Acesso em: 20 ago. 2013.

YAEDU, A.E. **Influência do substrato na deposição de stellite1 com plasma de arco transferido**. 2004. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Materiais e Metalúrgica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

YOSHIHISA, A. Correlation between mechanical properties of material and damage by the vibratory cavitation test. **JSME International Journal**,Fairfield,v.32, n.4, p.558-566, 1989.

## **ANEXO I – PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM**

### **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM N° 01**

#### **DEPOSIÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL AWS E309L-T1 EM CHAPA PLANA**

1. Esmerilhar a superfície do corpo de prova de aço carbono, a fim de retirar as carepas provenientes do processo de fabricação e a camada de oxidação;
2. Realizar a limpeza com acetona da superfície para eliminar os resíduos da esmerilhagem;
3. Realizar a medição da altura inicial do corpo de prova;
4. Iniciar a deposição do arame tubular de aço inoxidável AWS E309L-T1, depositando de 2 a 3 camadas, devendo se garantir após a camada final uma espessura de 8 a 10 mm.
  - a) Após a aplicação de cada camada deve-se esmerilhar a mesma e realizar ensaio de líquido penetrante, a fim de verificar a existência de trincas ou quantidade excessiva de poros.
  - b) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases°C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

5. Esmerilhar, após a soldagem da última camada, realizando o acabamento da superfície com a utilização de, no mínimo, até lixa grana 80;
6. Realizar ensaio de líquido penetrante na superfície acabada, registrando com fotos o resultado do ensaio;
7. Conferir se a altura do corpo de prova está com a camada desejada, caso contrário, repetir os passos 4, 5 e 6;
8. Realizar a marcação do corpo de prova através da utilização de “Tipo” ou Marcador Industrial.

## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM N° 02**

### **DEPOSIÇÃO DE UMA CAMADA DE AÇO INOXIDÁVEL COM COBALTO E “ALMOFADA” DE AWS E309L-T1 EM CHAPA PLANA**

1. Esmerilhar a superfície do corpo de prova de aço carbono, a fim de retirar as carepas provenientes do processo de fabricação e a camada de oxidação;
2. Realizar a limpeza com acetona da superfície para eliminar os resíduos da esmerilhagem;
3. Realizar a medição da altura inicial do corpo de prova;
4. Iniciar a deposição do arame tubular de aço inoxidável E309L-T1 da camada de “almofada”, devendo garantir uma camada final com espessura de 3 à 4 mm.

a) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases <sup>o</sup> C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

5. Realizar, após a aplicação da camada de aço inoxidável E309L-T1, a esmerilhagem para regularização da superfície e um ensaio de líquido penetrante, verificando a existência de trincas ou quantidade excessiva de poros.

a) Conferir se a altura do corpo de prova esta com a camada desejada casocontrário, repetir os passos 4 e 5;

6. Iniciar a deposição da camada do arame tubular de aço inox com cobalto;

a) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases <sup>o</sup> C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

7. Após a soldagem da última camada, esmerilhar realizando o acabamento da superfície com a utilização de no mínimo até lixa grana 80;
8. Realizar ensaio de líquido penetrante na superfície acabada;
9. Realizar a marcação do corpo de prova através da utilização de “Tipo” ou Marcador Industrial.

## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM N° 03**

### **DEPOSIÇÃO DE DUAS CAMADAS DE AÇO INOXIDÁVEL COM COBALTO E “ALMOFADA” DE AWS E309L-T1 EM CHAPA PLANA**

1. Esmerilhar a superfície do corpo de prova de aço carbono, a fim de retirar as carepas provenientes do processo de fabricação e a camada de oxidação;
2. Realizar a limpeza com acetona da superfície para eliminar os resíduos da esmerilhagem;
3. Realizar a medição da altura inicial do corpo de prova;
4. Iniciar a deposição do aço inoxidável E309L-T1 da camada de “almofada”, devendo garantir uma camada final com espessura de 3 à 4 mm.

a) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases°C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

5. Realizar, após a aplicação da camada de Aço Inoxidável E309L-T1, a esmerilhagem para regularização da superfície e um ensaio de líquido penetrante, verificando a existência de trincas ou quantidade excessiva de poros.

a) Conferir se a altura do corpo de prova está com a camada desejada, repetir os passos 4 e 5;

6. Iniciar a deposição das 02 camadas do arame tubular de aço inox com cobalto;

a) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases°C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

b) Esmerilhar, após a aplicação de cada camada e realizar ensaio de líquido penetrante, a fim de verificar a existência de trincas ou quantidade excessiva de poros.

7. Após a soldagem da última camada, esmerilhar realizando o acabamento da superfície com a utilização de, no mínimo, até lixa grana 80;
8. Realizar ensaio de líquido penetrante na superfície acabada;
9. Realizar a marcação do corpo de prova através da utilização de “Tipo” ou Marcador Industrial.

## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM N° 04**

### DEPOSIÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL COM COBALTO SEM “ALMOFADA”

1. Esmerilhar a superfície do corpo de prova de aço carbono, a fim de retirar as carepas provenientes do processo de fabricação e a camada de oxidação;
2. Realizar a limpeza com acetona da superfície para eliminar os resíduos da esmerilhagem;
3. Iniciar a deposição do aço inoxidável com cobalto, depositando de 2 ou 3 camadas.
  - b) Após a aplicação de cada camada deve-se esmerilhar a mesma e realizar ensaio de líquido penetrante, a fim de verificar a existência de trincas ou quantidade excessiva de poros.
  - c) Anotar os valores dos dados e parâmetros abaixo utilizados na soldagem:

Máquina/ Modelo	Material	Nº Passes	Temp. Entrepases <sup>o</sup> C
Voltagem (V)	Tipo do Gás	Vazão do Gás (l/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Corrente Inicial (Im)	Corrente Final (Im)	Corrente Base (Im B)	Corrente Pulso (Im P)

4. Esmerilhar, após a soldagem da última camada, realizando o acabamento da superfície com a utilização de no mínimo até lixa grana 80;
5. Realizar ensaio de líquido penetrante na superfície acabada, registrando com fotos o resultado do ensaio;
6. Realizar a marcação do corpo de prova através da utilização de “Tipo” ou Marcador Industrial.