

**Izeds Felipe Facchini Bassetto**

# **SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO, ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

02/2012

**Izeds Felipe Facchini Bassetto**

(engenheiro mecânico, Escola Mauá de Engenharia, 2004)

# **SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO, ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:  
Engenharia da Soldagem

Orientador:  
**Professor Doutor Marcelo Massarani**

São Paulo

02/2012

"Quem passou pela vida em branca nuvem,  
E em plácido repouso adormeceu;  
Quem não sentiu o frio da desgraça,  
Quem não passou pela vida e não sofreu;  
Foi espetro de homem, não foi homem,  
Só passou pela vida, não viveu".

*Francisco Octaviano*

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais que tornaram isto possível. Ao professor Marcelo Massarani por me auxiliar com este trabalho. Ao professor Sergio Brandi pela elaboração deste curso. Aos meus colegas de curso, nossas discussões e troca de idéias. Ao engenheiro Sidney Alvares pelas informações cedidas. Aos meus colegas de trabalho que me incentivaram e ajudaram.

## **CURRICULUM VITAE**

### ***Formação Acadêmica***

a) Escola Politécnica/ USP

Pós-graduação/ Mestrado/ Engenharia Térmica – 2004/2007;

b) Escola de Engenharia Mauá/ IMT

Engenharia Mecânica – 1 999/2 003;

c) Escola Técnica Estadual Getúlio Vargas

Técnico Mecânico – 1 996/1 999.

### ***Artigos publicados***

- BASSETTO, I. F. F.; HERNANDEZ NETO, A.; SOUZA, G. F. M.; Reliability Analysis in Reciprocating Compressors for Refrigeration Systems. HVAC & R Research; v. 15, p. 137-150, 2009.
- BASSETTO, I. F. F.; HERNANDEZ NETO, A.; Estudo de Confiabilidade de Compressores Alternativos Semi-Herméticos de Sistemas de Refrigeração. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PME, v. 0719, p. 1-10, 2007.
- HERNANDEZ NETO, A.; SOUZA, G. F. M.; BASSETTO, I. F. F.; An Analysis for Failure Modes of Refrigeration Systems Reciprocating Compressors. In: 19th International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2007, 2007, Brasília.
- BASSETTO, I. F. F.; HERNANDEZ NETO, A.; Uso de Ferramentas de Confiabilidade na Manutenção de Compressores Alternativos. In: X

CONBRAVA Congresso Brasileiro de Refrigeração, Condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento do Ar, 2007, São Paulo.

- BASSETTO, I. F. F.; HERNANDEZ NETO, A.; SOUZA, G. F. M.; Estudo de manutenção preditiva para compressores de sistemas de refrigeração. In: IX Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento do Ar, 2005, São Paulo.

### ***Experiência***

Início 2007 – Andritz Hydro do Brasil, Engenharia de Serviços e Reabilitações, engenheiro mecânico.

## **RESUMO**

A soldagem é ferramenta importante na recuperação de superfícies, assim tem extrema importância como ferramenta da manutenção. O tipo mais conhecido de manutenção é a corretiva que é feita após a ocorrência da falha, ou seja, depois da quebra do equipamento. Em geral, é executada com parada total e/ou parcial do equipamento. Entende-se que a soldagem de manutenção, principalmente a de campo, se encaixa neste grupo, no qual reparos às vezes emergenciais se fazem necessários. A empresa e o profissional responsável devem estar preparados para tomarem decisões de forma segura, mas que impliquem no menor tempo possível de indisponibilidade de equipamento. No ano de 2010, foram recuperados dois grupos de pás Kaplan fundidas. O fundido era de aço inoxidável martensítico temperado e revenido do tipo ASTM A743 grau CA6NM. Turbinas Kaplan são turbinas hidráulicas do tipo axial com fluxo radial nas palhetas diretrizes, normalmente de eixo vertical; possuem pás ajustáveis de acionamento mecânico-hidráulico. Turbinas, rotores, Kaplan são os mais aplicados para baixas quedas, que variam entre 20 e 70 metros. O aço CA6NM foi desenvolvido nos anos 60, em um esforço para o desenvolvimento de novo aço para construção de rotores de turbinas hidráulicas, estes aços inoxidáveis martensíticos foram apresentados como alternativa à limitada soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos tradicionais, que possuem alta suscetibilidade de trincas a frio e que necessitam de cuidados preventivos durante a soldagem. Devido a essa dificuldade foi desenvolvido este aço com baixo teor de carbono e adição de 4 a 6% de níquel. Foram encontrados

diversos desafios na recuperação e usinagem final das pás, conforme avançaram os ensaios não destrutivos e usinagem. Neste trabalho será apresentado o caso da recuperação de uma pá Kaplan. Foram necessárias diversas intervenções para se conseguir tornar aceitável esta pá. A verificação dimensional do perfil hidráulico foi baseada na norma IEC 61364. Propriedades mecânicas e composição química, conforme normas ASTM A743 e DIN EN 10283, que são verificadas a partir de corpo de prova, conforme norma ASTM A370, apenso ao perfil hidráulico da pá. Ensaio não destrutivo segue norma CCH70-3. Ao final foi possível verificar que alguns procedimentos adotados devem ser previstos em novas recuperações.

Palavras-chave: Soldagem de manutenção. Recuperação. Aço inoxidável martensítico.

## ABSTRACT

Welding is an important tool in the surface reconstitution, so it is a very important tool for maintenance. The most known maintenance kind is the corrective, which is applied after the failure occurrence, this means, after the equipment broke down. Usually, it is run with equipment partial or complete stopped. Maintenance welding, mainly the field one is part of corrective maintenance, where sometimes emergency repair is necessary. The in charge company and professional should be prepared to take safe decisions, but that takes to the lowest time possible of equipment an unavailability. At 2010, were recuperate two sets of casted Kaplan blades. The cast was of martensitic stainless steel quenched and tempered, ASTM A743 grade CA6NM kind. Kaplan turbines are axial hydraulic turbines with radial flow in the wicket gates, usually with vertical shaft. They have mechanic- hydraulic adjustable blades. Kaplan, runners, turbines are the applied in low heads, the can be from 20 to 70 meters. The CA6NM stainless steel was developed in the 60ths, in an effort to create a new steel for hydraulic turbine runners, this martensitic stainless steel were presented as one alternative to the traditional martensitic stainless steel limited weldability, with have high susceptibility to cold cracks and need several extra care during welding. Because of this difficulty level this steel was developed with low carbon level addicted with 4 to 6% of nickel. Several challenges were found during the blades final machining, as the non destructive tests and machine were performed. This paper will present the recuperation of one of these blades. There were several interventions to allow the acceptance

of this blade. The hydraulic profile dimensional check was based on IEC 61364 standard. Mechanical properties and chemical composition as ASTM A743 and DIN EN 10283 standard, which are check from a specimen, as ASTM A370, casted in the blade profile. Non destructive test are according CCH-70 standard. At the end, it was possible to verify that some of the adopted procedures should be applied in others recuperations.

Key words: Maintenance welding. Rehabilitation. Martensitic stainless steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 Diagrama de aplicação de turbinas hidráulicas, fonte Andritz Hydro do Brasil.....	15
Figura 3. 2 – Estudo de Victor Kaplan, fonte Grafenberger, 2009.....	16
Figura 3. 3 – Protótipo da máquina de Kaplan, Grafenberger apud Storek, 2009. ....	17
Figura 3.4- Rotor Kaplan UHE Jupiá D=8,4 mm, fonte Andritz Hydro do Brasil	17
Figura 3.5 – Rotor Kaplan componentes, fonte Schneeberger, 2009.....	18
Figura 3.6-Turbina Kaplan, fonte Andritz Hydro do Brasil.....	18
Figura 3.7 – Microestrutura metal depositado, aumento 400x e ataque NITAL, fonte Pool et all, 2011.....	19
Figura 3.8 – Pás conforme se encontravam no início do projeto, destaque para pá 5.....	1
Figura 3.9 – Croqui realizado na inspeção representando a indicação encontrada no munhão da pá, fonte Andritz Hydro do Brasil.....	24
Figura 3.10 – Imagem do modelo da pá Kaplan.....	25
Figura 3.11 – Indicação linear detectada por PM.....	26
Figura 3.12 - Abertura da cavidade parcial, controle por líquido penetrante....	27
Figura 3.13 - Torneamento da pá após reparo.....	27
Figura 3.14 - Indicações encontradas após a usinagem do munhão .....	28
Figura 3.15- Pá recuperada por soldagem .....	28
Figura 3.16 – Croqui com o estudo da geometria da transição que foi posteriormente adotada.....	29
Figura 3.17 – Fator de concentração de tensão a flexão conforme Spotts et all, 1997.....	30
Figura 3.18 – Estudo de elementos finitos da transição original, fonte Andritz Hydro. ....	32
Figura 3.19 – Estudo de elementos finitos transição adotada, fonte Andritz Hydro. ....	32
Figura 3.20 - Indicação encontrada na usinagem do munhão (PM) .....	33
Figura 3.21 – Área usinada do munhão para extração do corpo de prova.....	35
Figura 3.22 – Microestrutura, corpo de prova conforme norma ASTM E03/01, método de ensaio conforme norma ASTM E7/03, aumento 400x e ataque NITAL solução 3%. ....	35
Figura 3.23 - Montagem das resistências para tratamento térmico para Lívio de tensões .....	37
Figura 3.24 - Proteção térmica com mantas.....	38
Figura 3.25 - Cavidade aberta .....	38
Figura 3.26- Solda, 1º passe .....	39
Figura 3.27 - Controle de deformação do munhão .....	39
Figura 3.28 - Ensaio de LP.....	40
Figura 3.29 - Controle de deformação com relógio comparador .....	40
Figura 3.30 - Soldagem do diâmetro do munhão, raio de alívio.....	41
Figura 3.31 - Medição do munhão.....	41
Figura 3.32- Usinagem para recuperação do munhão.....	42

Figura 3.33 - Reconstituição do diâmetro 270 mm .....	43
Figura 3.34 - Recuperação do diâmetro de 270 mm, poros e pontos com falta de fusão.....	43
Figura 3.35 - Tratamento térmico para alívio de tensões pós soldagem.....	44
Figura 3.36 - Ensaio de ultra som .....	44
Figura 3.37 - Re-usinagem do munhão .....	45
Figura 3.38 - Reparos feitos na superfície reconstituída.....	45
Figura 3.39 - Usinagem final do munhão .....	46

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Composição química .....	21
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas .....	21
Tabela 3.3 – Composição química da pá 01 – conforme ASTM E403 .....	23
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da pá 01 – conforme ASTM A370.....	23
Tabela 3.5 – Composição química da pá 01, amostra – conforme ASTM E403	35

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

CA6NM – Tipo de aço inoxidável fundido;

GX4CrNiMo 13.4 – Tipo de aço inoxidável similar ao CA6NM;

CCH70-3 – Cahier dês charges specification for inspection of steel casting for hydraulic machines;

IEC – International technical commission;

ASTM – American society for testing and materials;

DIN – Deucht institut fur nurmung;

EN – Europäische norm;

PM – Partículas magnéticas;

LP – Líquido penetrante;

UT – Ultra som;

AWS – American welding society;

GMAW – Gas metal arc welding;

TIG – Tungsten inert gas;

HB – Brinell hardness;

HV – Vickers hardness;

$\sigma_{Bmax}$  - Tensão de flexão MPa;

$M_b$  - Momento fletor Nmm;

$W_b$  - Módulo de inércia mm<sup>3</sup>;

$K_b$  - Fator de concentração de tensão;

$F$  - Força de flambagem N;

$a$  - área mm<sup>2</sup>;

$D$  - diâmetro externo mm;

$d$  - diâmetro interno mm.

## **SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA .....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
CURRICULUM VITAE .....	iv
Formação Acadêmica .....	iv
Artigos publicados .....	iv
Experiência .....	v
RESUMO .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xiii
SUMÁRIO .....	xiv
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO: RECUPERAÇÃO DE PEÇAS POR SOLDAGEM	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 MANUTENÇÃO .....	4
2.2 SOLDAGEM .....	7
2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	10
3. ESTUDO DE CASO .....	14
3.1 ROTOR KAPLAN .....	14
3.2 AÇO TIPO CA6NM .....	19
3.3 DETALHES DO ESTUDO DE CASO .....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5. COMENTÁRIOS .....	50
5.1 PONDERAÇÃO .....	50
5.2 RECOMENDAÇÕES .....	51
6. CONCLUSÃO .....	53
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: .....	55

## **1. INTRODUÇÃO**

Na indústria de hidrogeração é comum o emprego de grandes peças de aço. Os requisitos para estes aços variam conforme sua aplicação. Podendo variar de simples peças estruturais dimensionadas a flexão como suportes e tampas, revestimentos para concreto, passando por elementos submetidos à alta tensão como tirantes de alta responsabilidade. Há os grupos funcionais como mancais, pistas de vedação, labirintos, eixos, chegando aos principais elementos que são o gerador e a turbina propriamente dita.

O aço empregado em cada um destes elementos tem diferentes necessidades de propriedades, mas quando se tratam dos elementos de maior tamanho, e neste caso eles podem chegar a centenas de toneladas, todos envolvem soldagem. Desde uma simples recuperação de fundido à fabricação de elaboradas estruturas soldadas.

Dentre todos elementos da hidrogeração destaca-se, por importância e dificuldade de fabricação, o rotor da turbina hidráulica, curiosamente outro elemento importante tem a mesma denominação, o rotor do gerador.

Nas turbinas hidráulicas rotores são responsáveis pela conversão da energia potencial hidráulica do fluxo de água que passa por eles em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica no gerador.

A partir dos anos 70, praticamente todos fabricantes de componentes de turbinas hidráulicas, quando possível, passaram a adotar rotores, ou pelo menos seus componentes mais importantes expostos à água, de aço inoxidável martensítico tipo CA6NM ou seu similar GX4CrNiMo13-4, devido a sua excelente

resistência a cavitação, boas propriedades mecânicas e sua boa soldabilidade frente aos demais aços inoxidáveis martensíticos (Schneeberger, 2009).

As dimensões destes componentes, rotores, variam de menos de meio metro a mais de uma dezena de metros de diâmetro, mas em todos os casos a precisão dimensional é imprescindível, chegando a centésimos de milímetro dependendo da região.

A soldagem é uma importante ferramenta na construção e manutenção de rotores. Como ferramenta permite a recuperação, reconstrução de superfícies e, principalmente, a união de elementos rompidos; pelo aquecimento localizado para junção ou deposição de aço na forma de metal de adição que pode ser similar ou não ao metal de base.

Este trabalho aborda a soldagem como ferramenta da manutenção e recuperação de componentes novos ou não. Usando como estudo de caso a recuperação de uma pá Kaplan fundida.

Neste cenário não houve a grande dificuldade de recursos de uma recuperação local do componente, ou seja, não foi serviço de campo, mas a recuperação se deu em uma região de concentração de tensão onde as tensões internas do material devem ser minimizadas e a deformação da peça tem grande influência em seu funcionamento. O desafio encontrado foi a falta do histórico e o estado em que a peça se encontrava.

## **1.1 SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO: RECUPERAÇÃO DE PEÇAS POR SOLDAGEM**

A soldagem é uma ferramenta importante da construção mecânica. Tanto na junção de metais como na reconstrução e recuperação de superfícies. Independentemente do processo, deve-se tratar de forma diferente a soldagem de processo da soldagem de manutenção. Qualidade e segurança devem ser observadas em ambos dos casos, todavia a soldagem de processo visa produção em maior escala, com maiores recursos fabris, trabalha com processos mais específicos, mais especializados e costumeiramente tem maior tempo de preparação.

A soldagem de manutenção, por outro lado, normalmente é aplicada após a ocorrência de falha do equipamento como parte de uma manutenção corretiva. Assim, é necessária aplicação de mão de obra mais versátil, qualificada e preparada para diferentes tipos de juntas, materiais e posições de soldagem. Dada a dificuldade de acesso ou características do equipamento, o tempo de execução pode ser maior, mas o de planejamento é menor.

O processo de soldagem é de praxe manual e não há sobre material, sobre espessura, para compensar eventual deformação, ou mesmo mordedura, causada pela solda e nem sempre é viável ou possível prever tratamento térmico pós soldagem para alívio de tensões.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### ***2.1 MANUTENÇÃO***

A atividade de manutenção pode ser considerada uma função estratégica dentro de uma organização fabril, pois é responsável por manter os equipamentos operando, com a capacidade exigida ou mesmo superior à mínima requerida, para execução da atividade desejada (Cardoso, 2004).

A manutenção deve ser baseada primordialmente em plano bem elaborado, estudado com grande cuidado e objetividade, e que considere todos os elementos da instalação, até os mínimos detalhes da organização e da metodologia empregada, visando à obtenção do menor gasto de recursos financeiros e humanos possível. Para isso é importante não somente reduzir os custos, mas reduzi-los de maneira eficiente.

Por tais motivos, o estabelecimento de rotinas para organização e gerenciamento da manutenção deve ser elaborado mediante estudos cuidadosos. Como a manutenção normalmente abrange toda a instalação, seus procedimentos devem atender às necessidades de todos os departamentos, seções e divisões de toda a fábrica.

O tipo mais conhecido de manutenção é, sem dúvida, a manutenção corretiva que é feita após a ocorrência da falha, ou seja, depois da quebra do equipamento. Em geral, é executada com a parada total e/ou parcial do equipamento. Historicamente, foi o primeiro tipo de manutenção conhecido e a única realizada até Segunda Guerra Mundial (Pinto, Xavier; 2005).

Entende-se que a soldagem de manutenção, principalmente da de campo, se encaixa neste grupo, no qual reparos às vezes emergenciais se fazem necessários. A empresa e o profissional responsável devem estar preparados para tomarem decisões de forma segura, mas que impliquem no menor tempo possível de indisponibilidade de equipamento.

Já a manutenção preventiva surgiu a partir da Segunda Guerra Mundial, quando as pressões do período da guerra aumentaram a demanda por todo tipo de produto; ao mesmo tempo, o contingente de mão de obra industrial diminuiu sensivelmente. Como consequência houve um grande aumento da mecanização, bem como da complexidade das instalações industriais (Pinto, Xavier; 2005).

Começou a evidenciar-se a necessidade de maior disponibilidade, bem como de maior confiabilidade, na busca por maior produtividade, fazendo com que a indústria dependesse cada vez mais do bom funcionamento das máquinas. Isso exigiu que as falhas dos equipamentos fossem evitadas, o que resultou no conceito de manutenção preventiva, caracterizada por intervenções regulares e em períodos fixos, para executar tarefas pré-determinadas. Isto se traduz na necessidade do conhecimento dos modos de falha mais freqüentes, da taxa de falhas e, principalmente, da periodicidade com que as falhas ocorrem. Porém, esse tipo de manutenção baseia-se em análises estatísticas, de elevada incerteza, sendo comum o aparecimento de ruptura prematura no componente substituído (Nepomuceno, 1989).

Na manutenção preventiva aplicam-se reparos e recuperações que possibilitem prolongar a operação do equipamento, mas que exigem acompanhamento

periódico, como a metodologia da mecânica da fratura em trincas em grandes estruturas ou locais de difícil acesso, como base de prensas. Recobrimentos por soldagem para reconstituição de superfícies podem ser enquadrados neste grupo, como visto em moendas de cana.

A partir da década de 70, acelerou-se o processo de mudança na indústria, com a implementação de novas tecnologias, com elevado aumento da capacidade de fabricação de produtos, bem como das linhas de montagem, tornando estas mais complexas e as indústrias mais competitivas. Desta forma, a paralisação da produção indicava um aumento dos custos e reduzia a qualidade dos produtos. Na manufatura, os efeitos dos períodos de paralisação foram se agravando pela tendência mundial de utilizar sistemas “just in time”. Isto promoveu o surgimento do conceito de estoques reduzidos o qual exigiu redução de qualquer parada não programada da linha de produção ou da fábrica inteira. O crescimento da produção, com automação e mecanização, resultou em aumento no número de falhas e na capacidade de manter “padrões de qualidade” estimados. Isso pode ser aplicado tanto à qualidade de serviços quanto à de produtos, e, neste ambiente, reforça-se o conceito de manutenção preditiva (Pinto, Xavier; 2005).

A manutenção preditiva é, sem dúvida, a que menos aplica a soldagem como ferramenta. Neste caso, os métodos de fabricação e de projeto são os que necessitam de maior tecnologia de soldagem, para preparar os equipamentos para a futura manutenção.

## **2.2 SOLDAGEM**

A soldagem é uma ferramenta utilizada na fabricação e reparo de estruturas e de peças metálicas.

Nos processos usuais, uma junção soldada é aquecida no local por fonte de calor, todavia a distribuição de temperatura não é uniforme, variando à medida que o trabalho segue, conforme a poça de fusão avança sobre a junta, chapa ou peças a serem unidas.

Soldagem é definida pela Associação Americana de Soldagem como a junção localizada de metais ou não metais, como alguns polímeros, por aquecimento dos materiais até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão, ou apenas pela aplicação de pressão, e com ou sem a aplicação de metal de adição (Marckle, 1996). Existem diversos processos de soldagem aplicados na indústria atualmente. O maior fator de distinção entre os diferentes processos é a fonte de energia usada na soldagem e a forma de proteção ou limpeza do material soldado.

Soldagem é um processo de união entre metais através de uma fusão localizada. Durante a soldagem, o metal é aquecido e resfriado no local, o que causa expansões térmicas e contração do material. Como estes efeitos são restringidos pelas zonas frias adjacentes do metal base, produzem-se tensões internas a este material.

Todavia o limite de escoamento do metal baixa e as tensões de restrição sofrem um aumento relativo, a altas temperaturas.

Como resultado, o metal é deformado plasticamente na zona de soldagem. A deformação plástica permanecerá, após se completar a soldagem, e entrará em equilíbrio elástico com a zona adjacente, produzindo-se então tensões residuais. Okumura et al (1982) coloca que as deformações resultantes da soldagem são acompanhadas por plastificação localizada do material.

Com o resultado, as tensões residuais permanecem após se completar a soldagem, manifestando-se sob a forma de empenamento, deformação, e distorções na estrutura soldada.

Tensões e deformações residuais influem no comportamento em relação à fratura das juntas soldadas, de modo que o controle sobre as mesmas é de fundamental importância para segurança da estrutura, peça.

Segundo Deng et al (2007) é impossível evitar a deformação resultante da soldagem. A deformação causa problemas não somente na montagem de equipamento, mas também na dos produtos finais.

A contração da zona fundida é apenas uma das razões da deformação durante a soldagem. Outros fatores como posicionamento, fixação e seqüência de passes devem ser controlados para permitir a obtenção da precisão requerida. Como é influenciado por vários fatores, a previsão quantitativa e o controle da deformação na soldagem, especialmente para grandes estruturas soldadas, é extremamente difícil.

Tensões de tração longitudinais são normalmente geradas em torno de uma linha de solda, em uma união restrita externamente. Tensões de compressão se desenvolverão em áreas a pequena distância da linha de solda no metal base, para equilibrar as tensões de tração.

A ocorrência das tensões residuais tem como causa as deformações plásticas de compressão, que se mantêm ao longo de toda linha de solda, devido aos ciclos locais de aquecimento e resfriamento.

Existem dois métodos para minimizar ou aliviar as tensões residuais: o mecânico e o térmico. O recozimento, térmico, é, sem dúvida, o mais empregado.

A deformação em peças soldadas resulta na expansão e na contração do metal de adição depositado e do metal de base das regiões adjacentes, em razão dos ciclos de aquecimento e de resfriamento do processo de soldagem (Mahyar et al, 2011).

Durante os ciclos de aquecimento e de resfriamento, muitos fatores afetam a contração do metal e levam-no a deformar, como propriedades físicas e mecânicas que mudam conforme o calor é aplicado (Mahyar et al, 2011).

Na soldagem, o desenvolvimento da poça de fusão é determinado pela interação metal-arco elétrico, transmissão de calor, escoamento do líquido, propriedades termo físicas do metal e das condições de contorno. O entendimento do desenvolvimento da poça fundida durante a soldagem está fora da considerável significância prática. Devido à complexidade do processo e da presença do arco de plasma, investigações diretas são extremamente caras e muitas vezes impossíveis (Zacaria et al, 1995).

Dos vários fatores que afetam o tamanho e forma da poça de fusão, a distribuição de energia na poça fundida talvez seja a mais importante. Na soldagem por arco elétrico, a geometria do eletrodo, a distância da superfície fundida e a deformação da superfície da peça afetam a distribuição da energia.

Fora os parâmetros de forma e de tamanho da poça de fusão outras importantes informações, como taxa de resfriamento, gradiente de temperatura na poça de fusão, taxa de crescimento de grão, turbulência na poça, escoamento multifásico, campo eletromagnético e tensão superficial, podem ser estimadas em modelamentos detalhados da fusão e solidificação.

Uma grande dificuldade dos modelos que estudam a poça de fusão é decorrente da partição do hidrogênio, do nitrogênio e do oxigênio entre a solda e o ambiente ao seu redor.

### **2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Usualmente, pás Kaplan, máquinas hidráulicas, são inspecionadas e testadas conforme normas para fundidos deste ramo, como a "Cahier des Charges Specification for Inspection of Steel Casting for Hydraulic Machines" de 1996, CCH70-3. Esta norma estabelece os critérios de aceitação dos ensaios não destrutivos, END, que são aplicados em peças fundidas para máquinas hidráulicas de aço, que podem ser do tipo inoxidável ou não. Todavia, na indústria moderna, estas peças são costumeiramente de aço inoxidável, principalmente martensítico, mas também podem ser do tipo austenítico-ferrítico (duplex), ferríticos ou austeníticos. Essa norma visa estabelecer e padronizar regras para tornar segura a construção de máquinas hidráulicas, aplicando folhas com planos de qualidade, testes e áreas a serem testadas, nas peças em estado fundido e usinado acabado.

Neste trabalho da norma CCH70-3 foram aplicados os ensaios de líquido penetrante, partículas magnéticas e ultra som. Outros ensaios, como o de raio X, só são considerados no caso de, pedido ultra som, seu resultado não for considerado conclusivo.

Líquido penetrante: O ensaio de líquido penetrante é aplicado na detecção de defeitos abertos na superfície das peças.

Para maior efetividade, este método é limitado à inspeção de superfícies acabadas, devido ao acabamento superficial necessário, mas também é usado em diferentes estágios de manufatura, principalmente na abertura de cavidades para recuperação das peças por soldagem.

O método tradicional usa como penetrante um líquido colorido e lavável por água, visível a luz natural, com o qual a superfície a ser inspecionada é coberta, molhada.

O excesso de penetrante é removido com água e a peça secada com um pano limpo. A análise é feita após aplicação de um revelador, diluído em um líquido. O tempo de espera da revelação é normalizado.

Partículas magnéticas: O ensaio de partículas magnéticas é aplicado na detecção de descontinuidades superficiais e sub superficiais em materiais ferro magnéticos. Este ensaio não é aplicável em aços austeníticos e deve ser acordado seu uso entre as partes interessadas para utilização em aços inoxidáveis austenítico-ferrítico (Duplex).

Este ensaio é normalmente aplicado em peças brutas (rebarbadas), pré usinadas ou acabadas por ser sua efetividade limitada a pequenas distâncias da superfície.

O campo magnético utilizado deve ser intenso o suficiente para operar acima da permeabilidade magnética do material. Este requerimento é normalmente atingido em um campo tangencial de 2000 mA (25 Oe) para aços não ligados; para aços alta liga maiores campos podem ser necessários.

O valor escolhido deve ser considerado como mínimo na totalidade da área inspecionada. Um campo magnético com valores excessivos pode causar a detecção de indicações errôneas devido a saturação do metal.

O processo mais usado é o de passagem de fluxo magnético por um eletromagneto ou "Yoke". O uso deste tipo de magnetização revela descontinuidades com dimensões significativas no eixo do pólo magnético.

O eletromagneto necessita de fonte de corrente alternativa e de superfície com acabamento usinado, não bruto.

O equipamento é portátil e de fácil aplicação, todavia o uso deve ser criterioso para evitar falhas de leitura.

O agente usado como revelador consiste em finos grãos de pó eletromagnético com baixa magnetização, que podem estar contidos em meio líquido ou seco.

Deve ser observado que, independentemente do método aplicado, ele deve permitir a magnetização em 2 eixos, duas direções, para permitir a leitura cruzada.

Ultra som: O exame ultra sônico do material permite detecção de possíveis descontinuidades internas, bem como estimar, quando possível, sua natureza, dimensões e posição dentro da peça examinada.

O método tradicional é baseado na reflexão de ondas ultra sônicas produzidas por descontinuidade ou superfície oposta da peça, e é visualizada por um eco na tela do equipamento; já no método de teste de eco, por pulso ultra sônico.

O operador manualmente movimenta o cabeçote, aplicando-o sobre a superfície a ser inspecionada. A peça deve ter a superfície recoberta com uma acoplante para contato.

A escolha do cabeçote, que pode ser normal, angular ou reduzido, depende de vários parâmetros como: forma geométrica, permeabilidade acústica ao ultra som da peça, tipo de defeito esperado.

### **3. ESTUDO DE CASO**

#### ***3.1 ROTOR KAPLAN***

No início da revolução industrial, rodas d'água eram aplicadas para acionar moinhos de grãos e máquinas têxteis, como fonte de energia mecânica alimentando uma linha de eixos ou correias para mover as máquinas e dispositivos. Essas "casas de força" tinham de ser instaladas no local da queda d'água, o que limitava a aplicação do trabalho gerado a empreendimentos locais e pequenos. Conforme Fox et all (2005) a introdução da corrente alternada em 1880 tornou possível a transmissão de energia elétrica por longas distâncias, permitindo que "as casas de força" pudessem atender aos centros consumidores, possibilitando o uso de uma ampla gama de máquinas de uso doméstico e industrial.

Entre os diversos tipos de turbinas vale citar as de reação, onde parte da variação de pressão do fluido (água) ocorre externamente e outra parte dentro das pás móveis. O fluido é acelerado e direcionado para entrar no rotor na direção apropriada, à medida que passa por bocais ou pás estacionárias (pré distribuidor), seguindo para pás moveis, conhecidas como palhetas diretrizes até o rotor ou roda. No rotor há uma nova aceleração e pode haver a mudança de direção do fluido, de radial para axial, em rotores tipo Francis, ou seguir axial, em rotores tipo Kaplan.

A definição descrita na norma IEC 61364 de turbinas Kaplan é de que se trata de turbinas hidráulicas do tipo axial com fluxo radial nas palhetas diretrizes,

normalmente de eixo vertical e tubo de sucção do formato de joelho. Possui palhetas diretrizes e pás ajustáveis, também conhecidas como turbina de dupla regulação.

Turbinas, rotores, Kaplan são os mais aplicados para baixas quedas, que variam entre 20 e 70 metros. As unidades geradoras modernas atingem potências na ordem de até 200 MW. Hoje são encontradas máquinas com mais de 10 metros de diâmetro e com número de pás que variam de 3 a 8 (Grafenberger, 2009).

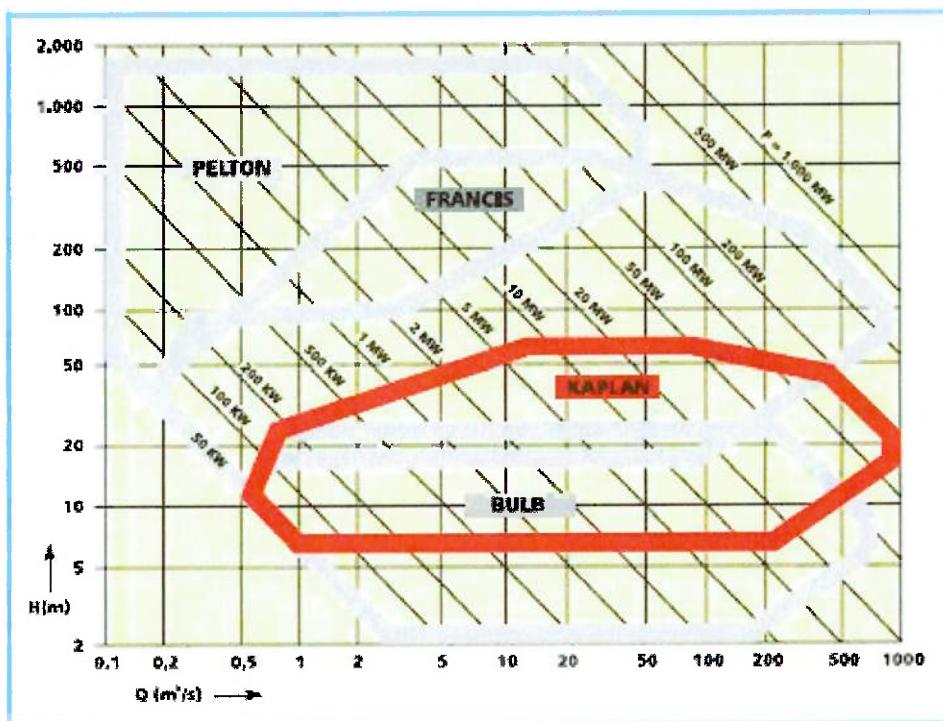


Figura 3. 1 Diagrama de aplicação de turbinas hidráulicas, fonte Andritz Hydro do Brasil

Para as baixas quedas, limite inferior da figura 3.1, os rotores Kaplan são usados em turbinas de eixo horizontal, também conhecidas como turbinas bulbo ou poço, do inglês pit, e turbinas de eixo horizontal para as maiores quedas.

Desde que, no início do século 20, o austríaco Victor Kaplan inventou este tipo de turbina, vários tipos de configuração sugeriram, variando da posição do eixo

que pode ser horizontal e vertical, número de pás, com rotor e distribuidor regulável ou apenas o distribuidor variável ou sem pás reguláveis, posição de montagem, como nas turbinas S-montante e S-jusante, caixa espirais de concreto ou caldeiradas e as várias configurações dos mecanismos de acionamento, sustentação e controle (Grafenberger, 2009).

As figuras 3.2 e 3.3 mostram parte do estudo e projeto de Victor Kaplan.

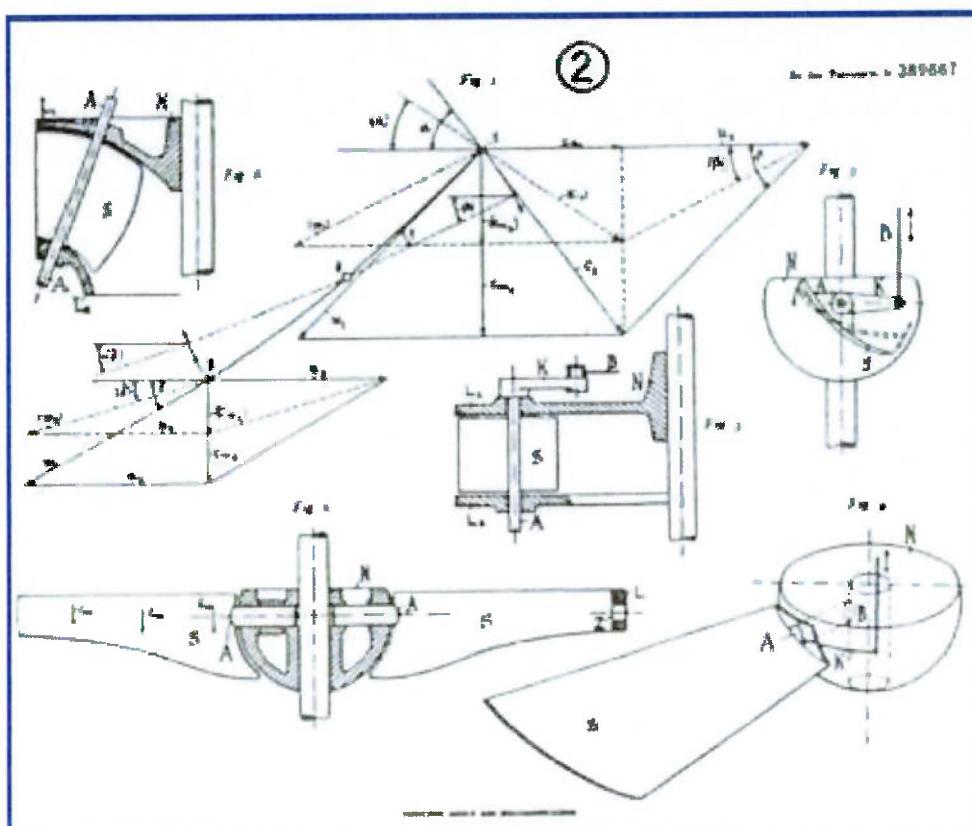


Figura 3. 2 – Estudo de Victor Kaplan, fonte Grafenberger, 2009.

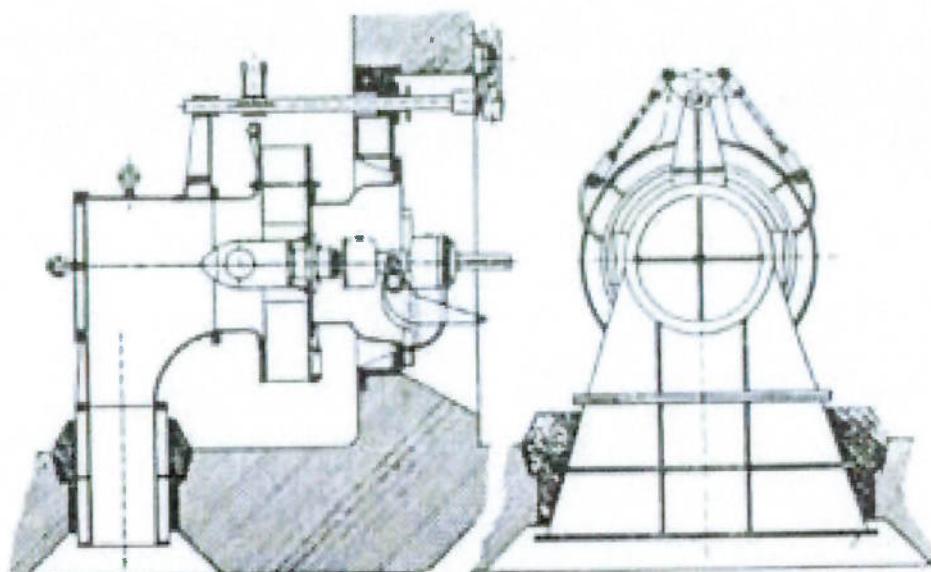


Figura 3.3 – Protótipo da máquina de Kaplan, Grafenberger apud Storek, 2009.

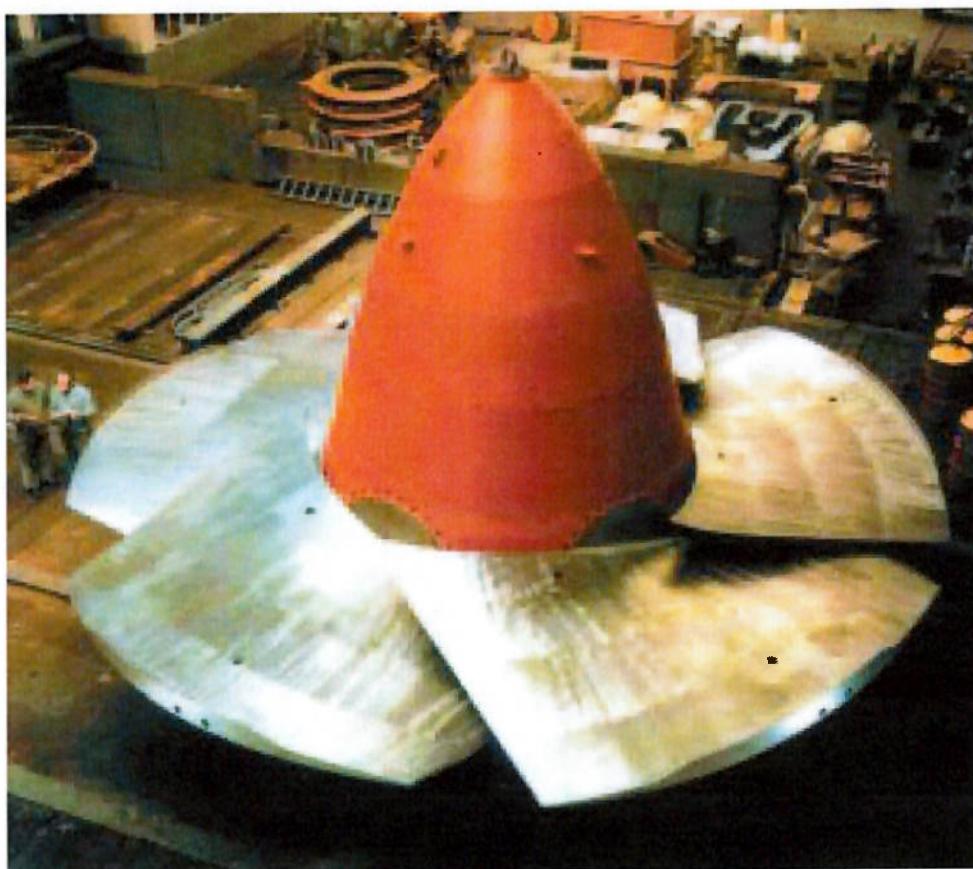


Figura 3.4- Rotor Kaplan UHE Jupiá D=8,4 mm, fonte Andritz Hydro do Brasil

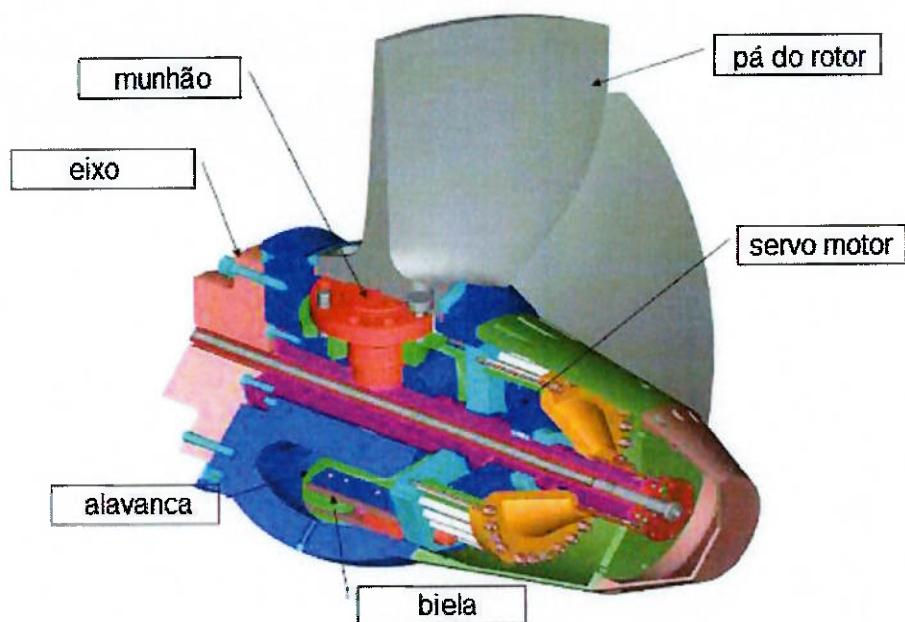


Figura 3.5 – Rotor Kaplan componentes, fonte Schneeberger, 2009.

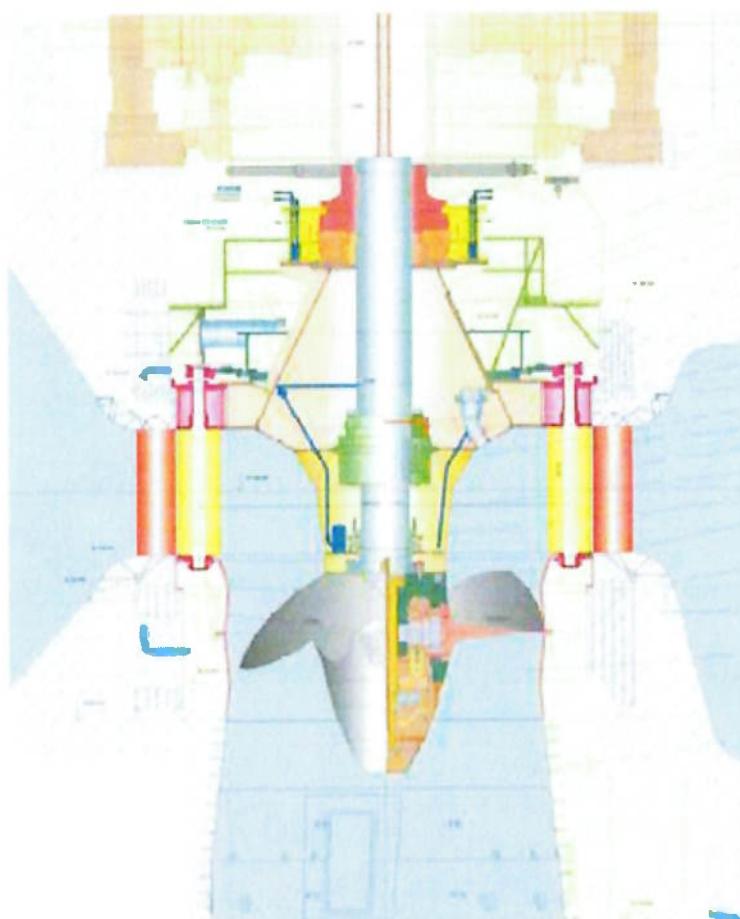


Figura 3.6-Turbina Kaplan, fonte Andritz Hydro do Brasil

As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 ilustram o que são rotores Kaplan.

### 3.2 AÇO TIPO CA6NM

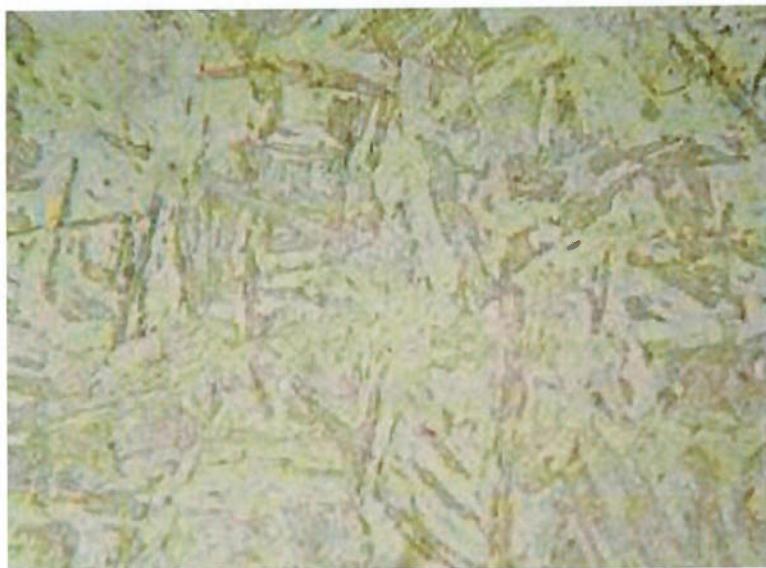


Figura 3.7 – Microestrutura metal depositado, aumento 400x e ataque NITAL, fonte Pool et all, 2011.

Desenvolvido nos anos 60, mais precisamente 1959 (Hays et all apud Gysel, 1983), em esforço para o desenvolvimento de novo aço para construção de rotores de turbinas hidráulicas, aços inoxidáveis martensíticos macios foram apresentados como alternativa à limitada soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos tradicionais, que possuem alta suscetibilidade de trincas a frio e que necessitam de cuidados preventivos durante a soldagem, um exemplo de micro estrutura soldada típica pode ser visto na figura 3.7. Devido a essa dificuldade foi desenvolvido este aço com baixo teor de carbono e adição de 4 a 6% de níquel.

A formação de trincas a frio, causadas pela presença de hidrogênio próximo a zona fundida da soldagem e na zona afetada termicamente, compromete a soldabilidade do aço inoxidável martensítico e levaram à redução dos teores de carbono, o que em aços com 13% de cromo levam à concentração do campo austenítico. Isto fez com que fosse necessário adição de níquel para gerar a

estrutura martensítica, com um pequeno nível de ferrita retida e austenita (Casas et all, 2007).

Aços inoxidáveis fundidos são especificados conforme o Instituto de Fundição de Ligas, em função de sua composição química e aplicação: a primeira letra significa o uso do material "C" para resistente a corrosão e "H" para altas temperaturas; a segunda letra indica a quantidade de cromo e níquel; o número que segue as duas letras indica o número máximo de carbono (x100) do aço; e as letras finais indicam as iniciais dos elementos de liga. O CA6NM é um aço inoxidável martensítico resistente à corrosão com 11,5 a 14% de cromo; nível máximo de carbono de 0,06%; 3,5 a 4,5% de níquel; e molibdênio como elemento de liga (Casas et all, 2007).

Para o CANM em sua condição soldada é recomendado o tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem para criar uma estrutura resistente na zona afetada termicamente. Temperado entre 950 e 1050°C, a ferrita retida e austenita impedem a homogeneização da estrutura por dissolução, pois não estão em equilíbrio depois da solidificação. O revenimento posterior, a aproximadamente 600°C, gera martensita macia e uma austenita estável, distribuída ao longo da micro estrutura, que não se transforma em martensita depois do resfriamento, contribuindo para a boa tenacidade do aço (Casas et all, 2007).

Conforme a norma ASTM A743 de 1999 temos as seguintes características para o aço CA6NM:

**Tabela 3.1 – Composição química**

Grau	Tipo	Composição em % de massa							
		Carbono máx.	Manganês máx.	Silício máx.	Fósforo máx.	Enxofre máx.	Cromo	Níquel	Molibdênio
CA-6NM	12 Cromo 4 Níquel	0,06	1	1	0,04	0,03	11,5 a 14	3,5 a 4,5	0,4 a 1

Os requisitos pedidos por esta norma para tratamento térmico pós fundição são: aquecimento mínimo de 1010°C e resfriamento ao ar a partir de 950°C, ou menos, caso haja algum revenimento intermediário antes do revenimento final. O revenimento final deve ser entre 565°C e 620°C.

**Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas**

Grau	Limite de ruptura mín. (MPa)	Limite de escoamento mín. (MPa)	Alongamento em 50 mm mín. %	Redução de área mín. %	Dureza Brinell máx.
CA-6NM	755	550	15	35	285

No caso de máquinas hidráulicas, adota-se como referência os valores de impacto ISO V adotados na DIN EN 10283 de 2010 de 50J a 20°C, todavia este valor pode ser elevado conforme necessidade: o limite do valor de impacto tem sido imposto pelo valor atingido pelo metal adição para reparo e construções soldadas. A norma ASTM não tem este valor fixado, apenas uma nota indicando que deve ser acordado entre fundidor e cliente.

A norma DIN EN 10283 também contém os valores limites indicados para o procedimento de soldagem como pré aquecimento, de 20 a 200°C, temperatura máxima de entre passes não fixada e necessidade de tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem em qualquer tipo de caso. Todavia, é usual os fabricantes adotarem limites diferentes conforme sua experiência.

### **3.3 DETALHES DO ESTUDO DE CASO**

No ano de 2010, foram recuperados dois jogos de pás Kaplan fundidas com cinco unidades em cada jogo.

As pás estavam armazenadas fazia alguns anos e se encontravam em diferentes estados de fabricação, usinagem e sem comprovação dos ensaios mecânicos e não destrutivos.

O fundido era de aço inoxidável martensítico temperado e revenido do tipo ASTM A743 grau CA6NM.

Foram encontrados diversos desafios na recuperação e usinagem final das pás conforme avançaram os ensaios não destrutivos e usinagem.

Neste trabalho será apresentado o caso da primeira pá do jogo número.

Não foram encontrados desvios não aceitáveis nos ensaios químicos e mecânicos, como pode ser verificado nas tabelas 3.3 e 3.4.

Para aceitação das pás, junto ao fornecedor, foi necessário inspeção dimensional, verificação de propriedades mecânicas e químicas, e os ensaios não destrutivos esperados para este estágio de fabricação.

A verificação dimensional do perfil hidráulico é baseada na norma IEC 61364. Propriedades mecânicas e composição química, conforme normas ASTM A743 e DIN EN 10283, que são verificadas a partir de corpo de prova, conforme norma ASTM A370, apenso ao perfil hidráulico da pá. Ensaio não destrutivos seguem norma CCH70-3.

A norma IEC 61364 contém, entre outras informações, desvios aceitáveis para máquinas hidráulicas na forma de percentual de algumas medidas de

referência, como neste caso o diâmetro externo do rotor Kaplan. Este normal é costumeiramente usada nos contratos de fornecimento, no entanto os fabricantes costumam trabalhar com valores menores do que os por ela indicado.

O controle dimensional pode ser feito por gabaritos, de dimensões padronizadas, ou por métodos de medição computacionais, como braços de medição, onde se compara a peça com o modelo teórico da pá, figura 3.10.

A norma IEC também indica um número mínimo de gabaritos e pontos de controle.

Como visto, a norma CCH70 fornece subsídios para os ensaios não destrutivos. Ela indica qual ensaio devem ser realizado em qual estado de fabricação, fundido ou acabado, o critério de aceitação para cada método de ensaio e forma de execução.

Novamente cabe ao fabricante definir critérios mais abertos ou fechados em relação a norma.

O corpo de prova é fixado em região onde possa ser facilmente subtraído, mas que seja representativa dos esforços a que a pá é submetida, neste caso no perfil hidráulico.

**Tabela 3.3 – Composição química da pá 01 – conforme ASTM E403**

Grau	Tipo	Composição em % de massa							
		Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Cromo	Níquel	Molibdênio
CA-6NM	12 Cromo 4 Níquel	0,059	0,590	0,54	0,027	0,007	12,040	3,700	0,470

**Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da pá 01 – conforme ASTM A370**

Grau	Limite de ruptura (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm %	Redução de área %	Impacto ISO KV (J)
CA-6NM	817,1	648,4	20	59,9	82,4

A dureza superficial encontrada foi de 269 HB no corpo de prova.



Figura 3.8 – Pás conforme se encontravam no início do projeto, destaque para pá 5

O primeiro desvio encontrado foi identificado no munhão, região também conhecida como eixo, na extremidade da pá no diâmetro de 385 mm, detectado por ensaio de ultra som na região central do munhão, a 243 mm da face externa, com área estimada de  $38 \text{ mm}^2$ , figuras 3.8 e 3.9.

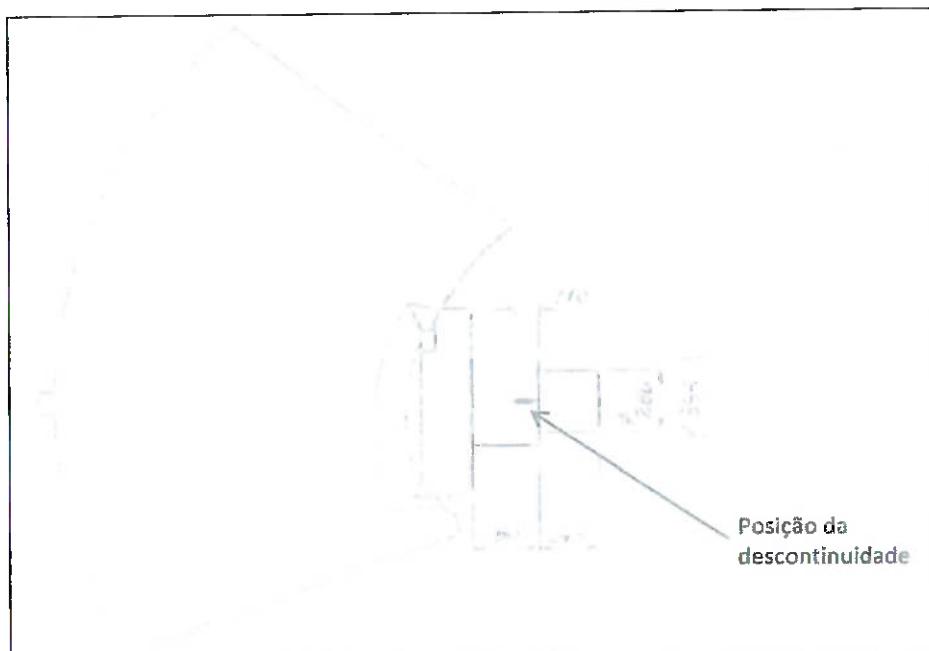


Figura 3.9 – Croqui realizado na inspeção representando a indicação encontrada no munhão da pá, fonte Andritz Hydro do Brasil.

A primeira interpretação desta indicação foi a de que se tratava de um rechuve gerado pela deficiência de alimentação do aço fundido que o massalote superior não foi capaz de suprir e solidificação antecipada na região de forma inadequada.

Optou-se pela abertura de um furo, na linha central da pá de diâmetro de 30 mm até a indicação para prospecção do fundido, para obter uma melhor resposta do ultra som.

Após a abertura do furo e nova inspeção, constatou-se que se tratava de material central de diferente densidade, poroso, sendo eliminado por usinagem com um furo de 60 mm de diâmetro até a profundidade de 345 mm. Tal furo acarretou em uma pequena perda de resistência da secção, todavia aceitável, pois não se trata de uma secção crítica com relação a esforços.

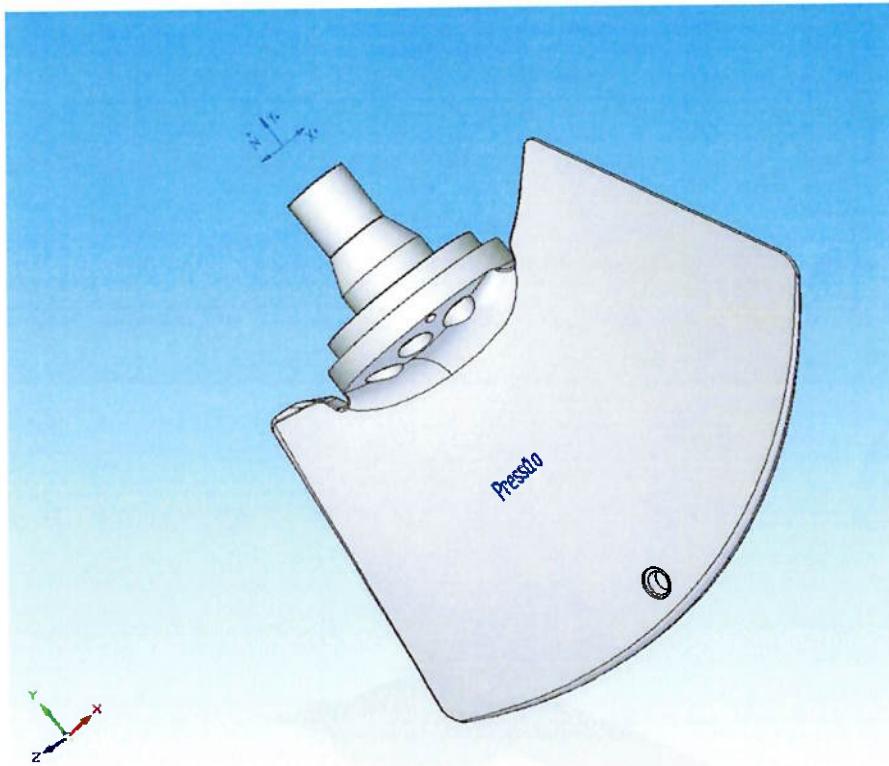


Figura 3.10 – Imagem do modelo da pá Kaplan

Após a pré usinagem do munhão foram realizados novos ensaios não destrutivos. No ensaio de partículas magnéticas detectou-se uma indicação linear na região da transição disco Ø755/munhão Ø385 mm. Região de acoplamento entre alavanca e pá, como pode ser visto na figura 3.11.



Figura 3.11 – Indicação linear detectada por PM

A cavidade foi aberta com o uso de lima rotativa e controle por líquido penetrante até sua eliminação. Apesar de lento este procedimento limita o aquecimento da peça e uma grande remoção de material e consequente deposição de metal de adição.

Após abertura, de aproximadamente 100x8 mm com 4 mm de profundidade, como a pá estava com 1 mm de sobre material, definiu-se procedimento de recuperação sem tratamento térmico posterior, conforme procedimento de soldagem qualificado, figura 3.12.

No procedimento está previsto uso de arame sólido e proteção gasosa, processo GMAW, sendo o metal de adição compatível com o metal base.

Neste caso foi empregado arame AWS ER 410 NiMo Ø1,6 mm.



Figura 3.12 - Abertura da cavidade parcial, controle por líquido penetrante

A região foi soldada, inspecionada primeiro por líquido penetrante, posteriormente, por partículas magnéticas, para torneamento para usinagem final, figura 3.13.



Figura 3.13 - Torneamento da pá após reparo

Após usinagem foi feito novo ensaio de partícula magnética, no qual foram detectadas 2 indicações a aproximadamente  $90^{\circ}$  da região reparada.



Figura 3.14 - Indicações encontradas após a usinagem do munhão

Como as indicações encontradas apresentaram dimensões reduzidas, com menos de 20 mm de comprimento, optou-se por seguir o mesmo procedimento já empregado, todavia com menor pré aquecimento para evitar deformação excessiva da peça e arame sólido de Ø1,2 mm, figura 3.14.



Figura 3.15- Pá recuperada por soldagem

Novos ensaios não destrutivos foram empregados, partículas magnéticas, e uma nova indicação foi encontrada na zona afetada termicamente do reparo feito, figura 3.15.

Dada a desconfiança das propriedades do metal base fundido e as pequenas dimensões da indicação, menor que 30 mm de comprimento, optou-se por abrir um canal de alívio e não mais soldar o munhão para eliminação da descontinuidade. Algo parecido já havia sido feito com outra pá do jogo.

Para tanto foi feito estudo inicial analítico, para estimativa da geometria necessária na transição, para evitar o efeito de concentração de tensões devido a geometria (Spotts et all, 1995) e posteriormente foi feito estudo com elementos finitos para definição final da geometria.

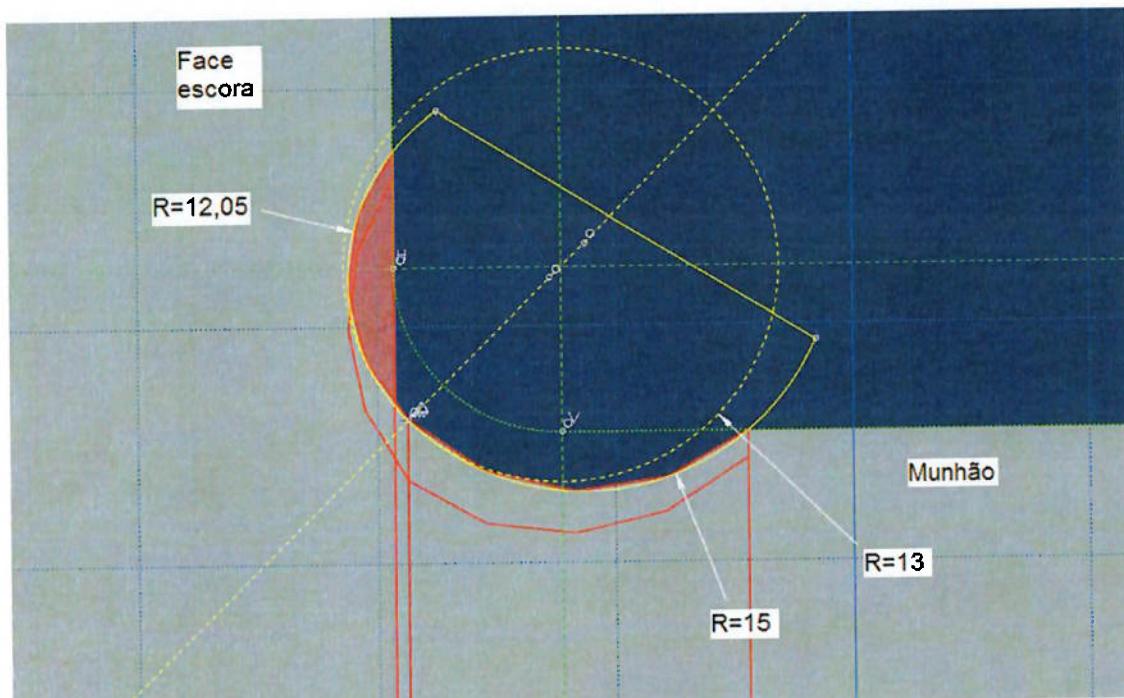


Figura 3.16 – Croqui com o estudo da geometria da transição que foi posteriormente adotada.

A linha verde da figura 3.16 representa o raio de 10 mm original, enquanto a linha amarela representa a transição que foi adotada. Esta transição é composta por três raios: sendo de 15 mm, na zona de maior criticidade, e de 13 e de 12,05 mm, nas superfícies adjacentes, composição representada em vermelho na figura.

No estudo inicial, analítico, foram desprezadas as cargas de torção e de tração na transição, pois este segmento do munhão tem função guia e graus de liberdade neste sentido, conforme a condição de carregamento da pá. As regiões do munhão anteriores à face de escora da pá estão sujeitas principalmente à tensão de flexão.

$$\sigma_{B\max} = \frac{M_b * K_b}{W_b}$$

$$M_b = F \cdot a$$

$$a = (D^2 - d^2) * \frac{\pi}{4}$$

$$W_b = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D}$$

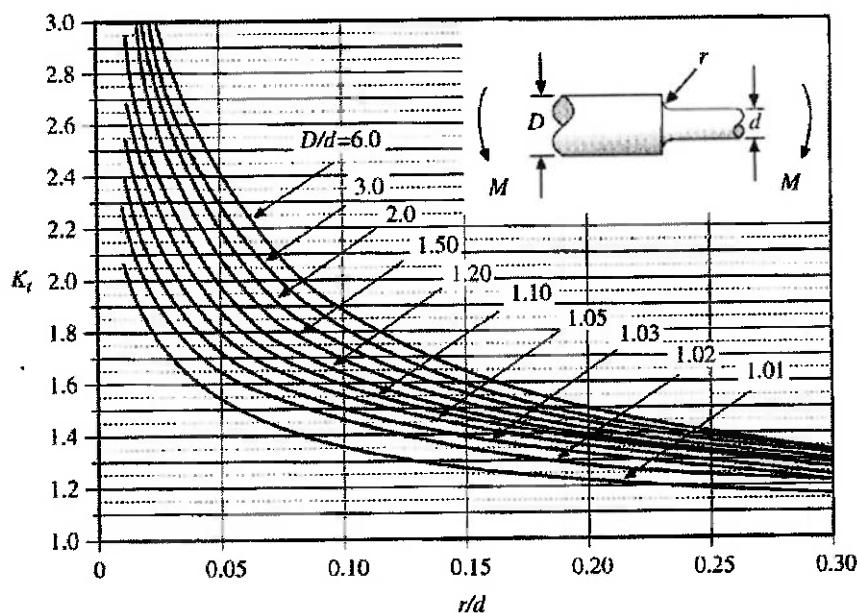


Figura 3.17 – Fator de concentração de tensão a flexão conforme Spotts et all, 1997.

No cálculo inicial considerou-se o raio de 10 mm, que era a transição originalmente prevista.

$$D_{R10}=745 \text{ mm}$$

$D_{R10}=395 \text{ mm}$

$$\frac{r}{d} = \frac{10}{395} = 0,025$$

$$\frac{D}{d} = \frac{745}{395} = 1,886$$

$K_{R10}=2,7$  (figura 3.17)

Com o novo raio de 15 mm proposto:

$D_{R10}=745 \text{ mm}$

$D_{R10}=400 \text{ mm}$

$$\frac{r}{d} = \frac{15}{400} = 0,038$$

$$\frac{D}{d} = \frac{745}{400} = 1,863$$

$K_{R10}=2,4$  (figura 3.17)

Considerando que as força atuantes são as mesmas ( $F_{R10}=F_{R15}$ ) tem-se

$\sigma_{R15}/\sigma_{R10}$ :

$$\frac{\sigma_{R15}}{\sigma_{R10}} = \frac{K_{R15} * (D^2 - d_{R15}^2) * (D^4 - d_{R10}^4)}{K_{R10} * (D^2 - d_{R10}^2) * (D^4 - d_{R15}^4)} = 0,884$$

Fator de redução  
de tensão

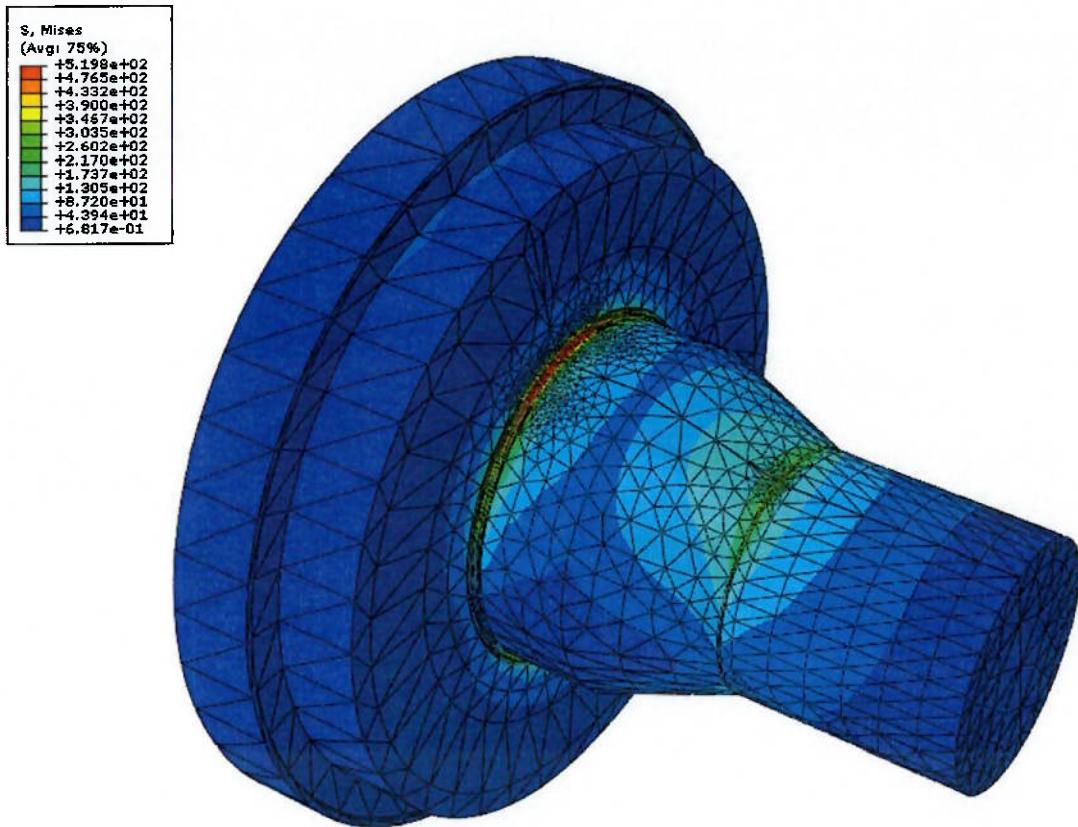


Figura 3.18 – Estudo de elementos finitos da transição original, fonte Andritz Hydro.

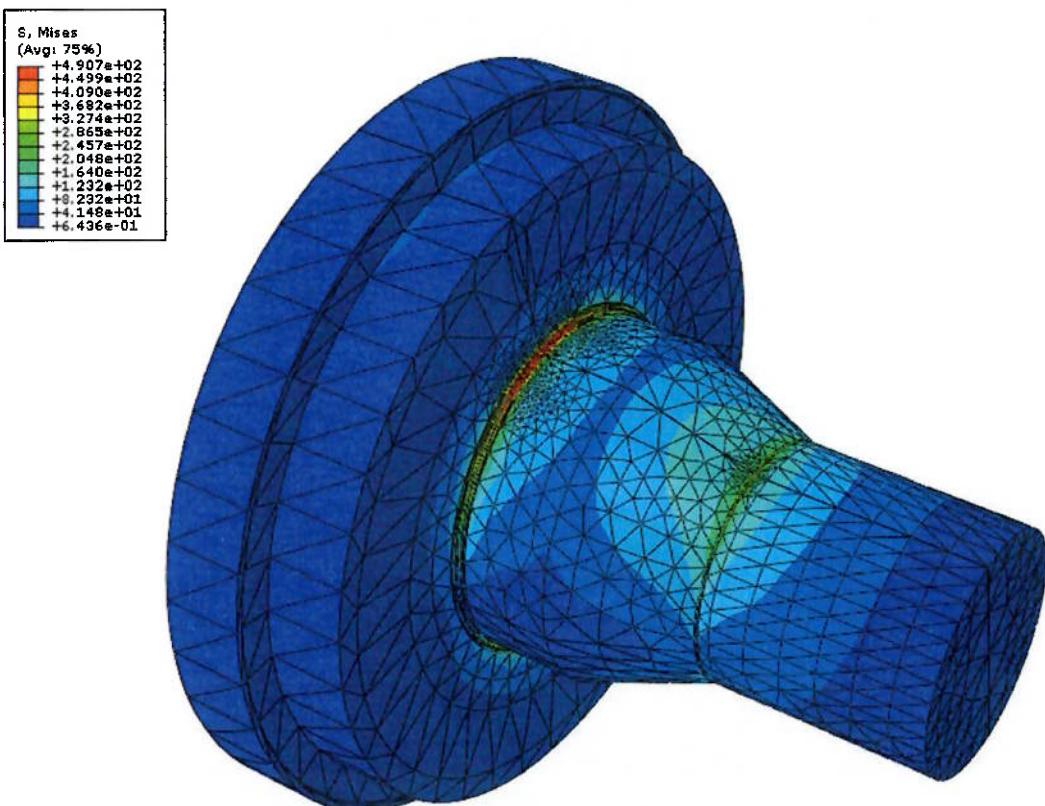


Figura 3.19 – Estudo de elementos finitos transição adotada, fonte Andritz Hydro.

Após verificação analítica, seguiu-se estudo de elementos finitos para ajuste da geometria.

Foram simulados dois casos: o primeiro, com a transição original de raio de 10 mm, e o segundo, com a nova transição proposta de raio de 15 mm.

O resultado da tensão combinada ou "Von Misses" foi para o raio de 10 mm de 520 MPa e 491 MPa, para a nova transição, figuras 3.18 e 3.19.

Assim, mesmo com redução de secção, devido a nova geometria e menor concentração de tensão, obteve-se redução maior do que 5% das tensões resultantes na transição.

Com a definição da transição, a pá foi encaminhada para novo torneamento.

Todavia durante a usinagem constatou-se (PM) que a indicação abaixo da superfície havia se propagado e que apresentava 80 mm de comprimento, figura 3.20.



Figura 3.20 - Indicação encontrada na usinagem do munhão (PM)

O próximo passo foi partir para outro tipo de análise, era necessária a verificação das condições micro-estruturais e químicas do fundido.

Peças de geometria e volumes com muita variação são desafio para os fundidores, caso o massalote, ou “reservatório” de metal líquido, não seja suficiente para alimentar a contração do aço líquido para o sólido pode haver falta de material, rechupe, ou variação da densidade do aço, como visto nesta pá. Todavia a grande variação de volume afeta também o resfriamento e o aquecimento do aço dificultando, o estabelecimento de patamares para tratamento térmico. O aço ASTM A743 CA6NM pede tratamento de tempera seguido de revenimento.

A geometria e o nível de tensão a que esta transição é submetida não permite corte de um corpo de prova da transição sem grande recuperação. O corpo de prova para obtenção da micrografia na região implicava na remoção de grande quantidade de material de pá já trabalhada, devido ao furo central, e em estado acabado, após torneamento do raio.

Optou-se pela remoção de material por amostragem no flange de acoplamento, com alavanca na face do diâmetro de 755 mm, na região que posteriormente seria usinada para abrigar pino de cisalhamento, o que deve ser feito em conjunto com a alavanca, figura 3.21.



**Figura 3.21 – Área usinada do munhão para extração do corpo de prova.**

O corpo de prova com aproximadamente 65x18x12 mm foi enviado para laboratório especializado neste tipo de análise. Micrografia sendo também pedida análise química do corpo de prova e dureza superficial.



**Figura 3.22 – Microestrutura, corpo de prova conforme norma ASTM E03/01, método de ensaio conforme norma ASTM E7/03, aumento 400x e ataque NITAL solução 3%.**

**Tabela 3.5 – Composição química da pá 01, amostra – conforme ASTM E403**

Grau	Tipo	Composição em % de massa							
		Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Cromo	Níquel	Molibdênio
CA-6NM	12 Cromo 4 Níquel	0,057	0,500	0,460	0,021	0,012	13,770	3,600	0,510

O resultado da micrografia foi que o corpo de provas tinha estrutura martensítica como esperado para esse aço, figura 3.22.

A análise química apresentou valores dentro da norma, mas diferentes dos feitos inicialmente. Isto pode ser considerado normal para peças grandes fundidas.

Foi também medido o valor de micro-dureza. Em alguns pontos chegaram a 390 HV, aproximadamente 370 HB, o que indicava um material frágil. O limite para reparos de solda do CA6NM adotado é 320 HB, enquanto a norma ASTM A743 aceita até 285 HB para a peça fundida.

Existe grande variação de volume entre a face de acoplamento da pá, de 755 mm de diâmetro, e a transição com o munhão, de 385 mm de diâmetro. As pás foram fundidas com elevado sobre material, até 100 mm, dependendo do lado. Os valores de micro-dureza encontrados eram forte indício de que a peça sofreu reparos entre o processo de fundição e pré usinagem, porém isto não foi visto na micrografia.

Sabe-se que o fundido estava com acabamento grosseiro no contorno de grão, devido ao defeito encontrado em seu centro, mas, como a micrografia não foi desta região específica, é provável que a microestrutura encontrada no flange não seja a mesma da transição.

Assim, para o novo reparo foi previsto tratamento térmico de alívio de tensões, antes da abertura da cavidade, similar ao previsto para alívio de tensões pós soldagem.

O tratamento térmico usado foi o local, onde apenas a parte a ser tratada sofre aquecimento, desta forma esperava-se menores deformações. A temperatura foi controlada com 6 termopares espalhados pelo munhão.

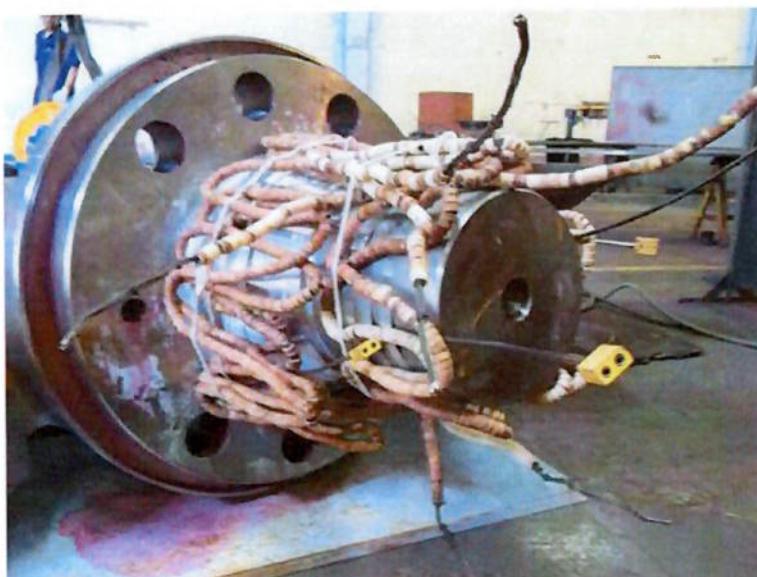


Figura 3.23 - Montagem das resistências para tratamento térmico para Lívio de tensões

A primeira instalação das resistências sobre o munhão não foi satisfatória, devido a sobreposição dos elementos que poderiam não aquecer de forma homogênea a peça, mas conforme o registrado nos termo pares o aquecimento teve gradientes de temperatura satisfatórios, figuras 3.23 e 3.24.



Figura 3.24 - Proteção térmica com mantas

A cavidade foi aberta por grafiteamento e posterior esmerilhagem até eliminação total da trinca. A abertura final ficou com dimensões de 140x25x30 mm, figura 3.25.



Figura 3.25 - Cavidade aberta



Figura 3.26- Solda, 1º passe

Dadas as maiores dimensões da cavidade aberta, necessidade de múltiplos passes para reconstrução da superfície, a soldagem foi feita com passes descontinuados e controle de deformação com relógio comparador, figura 3.26. Novamente foi aplicado baixo pré aquecimento e arame sólido de 1,2 mm de diâmetro, figuras 3.27 e 3.29.

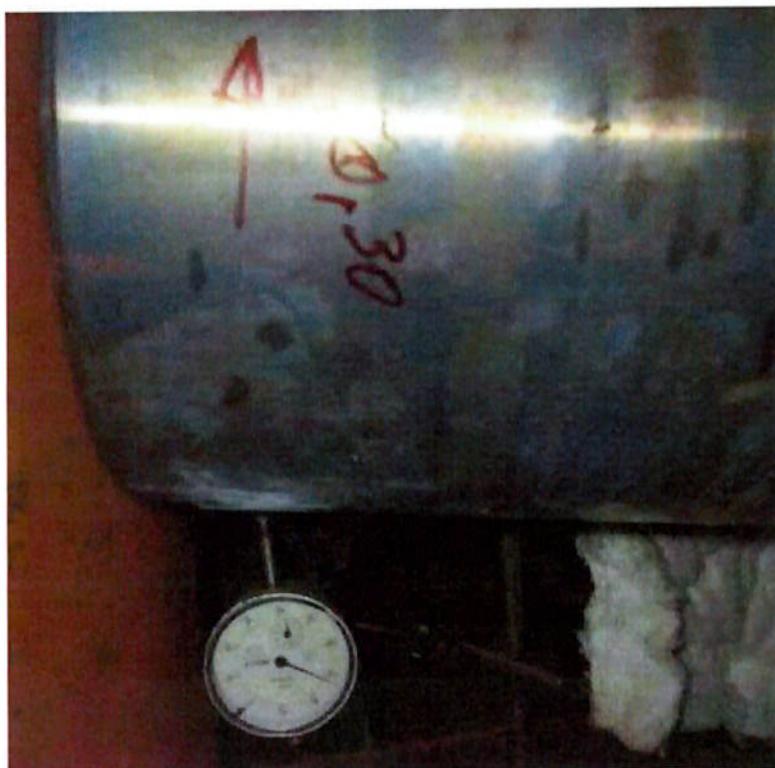


Figura 3.27 - Controle de deformação do munhão

O calor gerado na soldagem da cavidade acabou abrindo pequenos poros no fundido, figura 3.28.

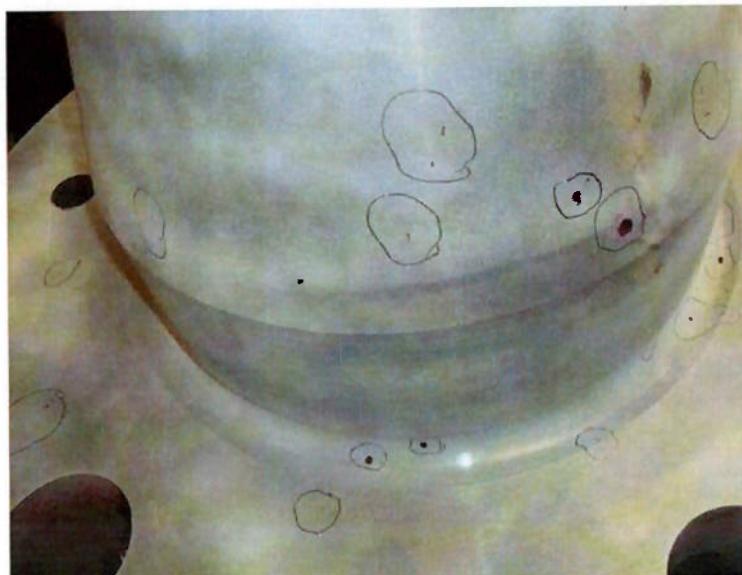


Figura 3.28 - Ensaio de LP

Para maior equilíbrio de tensões internas do material, base soldou-se todo o diâmetro do munhão, eliminando o raio de alívio que havia sido usinado e retornando ao raio original da transição disco/munhão, figura 3.30.



Figura 3.29 - Controle de deformação com relógio comparador



Figura 3.30 - Soldagem do diâmetro do munhão, raio de alívio

Após a soldagem, foi feito controle dimensional e avaliação das deformações resultantes desta recuperação e reconstrução, juntamente com a deformação resultante das tentativas anteriores de reparo.

Foi empregado braço de medição tridimensional nesta mediação, figura 3.31.



Figura 3.31 - Medição do munhão

Na medição verificou-se que a pá deformou mais de 1 mm na região do munhão, sendo necessário usinagem para re-centralização da peça, figura 3.32.

Feito controle por ultra som do reparo foram registrados pontos de falta de fusão no cordão, que tiveram de ser recuperados.

Para correta centralização do munhão, optou-se por rebaixar o diâmetro de sua extremidade guia em 0,5 mm, para equalizar as dimensões, figura 3.33.

Os poros que abriram durante o tratamento térmico foram fechados pelo processo de soldagem TIG, "Tungsten inert gas" com uso de varetas de AWS ER 410 NiMo, metal de adição que é compatível com metal base CA6NM, figura 3.34.

Após a recuperação pelo processo TIG dos poros abertos no tratamento térmico foi efetuado o tratamento térmico pós soldagem para alívio de tensões, figura 3.35.



Figura 3.32- Usinagem para recuperação do munhão

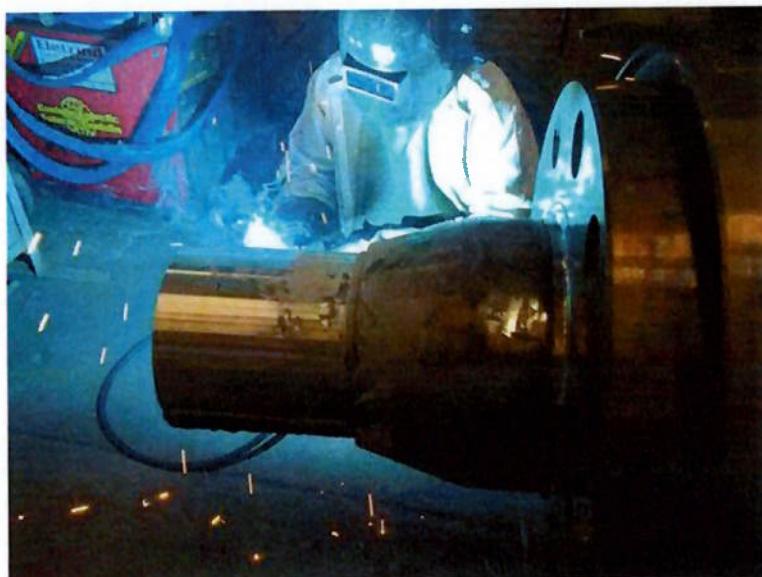


Figura 3.33 - Reconstituição do diâmetro 270 mm



Figura 3.34 - Recuperação do diâmetro de 270 mm, poros e pontos com falta de fusão



Figura 3.35 - Tratamento térmico para alívio de tensões pós soldagem

Foram feitos ensaios não destrutivos: líquido penetrante e ultra som, figura 3.36.



Figura 3.36 - Ensaio de ultra som



Figura 3.37 - Re-usinagem do munhão



Figura 3.38 - Reparos feitos na superfície reconstituída

A usinagem foi interrompida quando ainda havia 1 mm de sobre material; foi feito novo ensaio de líquido penetrante, no qual se verificou a necessidade de correções de mordeduras e falta de fusão, figura 3.37. No processo de soldagem foi aplicado novamente uso de vareta, processo TIG, todavia com procedimento sem tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem, figura 3.38.



Figura 3.39 - Usinagem final do munhão

Após a usinagem final, figura 3.39, foram repetidos todos os ensaios não destrutivos previstos no plano de qualidade da pá e esta foi considerada aceitável.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A inspeção do munhão foi realizada com cabeçote de ultra som convencional, normal, que não detectou a trinca do fundido na região da transição durante a inspeção inicial com a peça “pré usinada” ou posteriormente durante a usinagem do centro do munhão.

O cabeçote convencional de ultra som faz leituras normais a superfície e neste caso por ser uma transição pequena e de abertura insuficiente o cabeçote não foi o mais adequado.

Como o ultra som não detecta defeitos planos alinhados com o feixe, em outros ramos é normal a aplicação de diferentes cabeçotes.

Nesta pá como agravante tem-se que a microestrutura grosseira da região central do fundido também afetava a interpretação da leitura.

A norma CCH70-3 sugere diferentes tipos de ensaios não destrutivos para controle da peça em diferentes estados de manufatura para minimizar o risco de descontinuidades inaceitáveis na peça não serem detectadas. Neste caso a descontinuidade foi detectada posteriormente no ensaio de partículas magnéticas.

Todavia o uso de ultra som com cabeçote angular juntamente com o normal poderia ter ajudado na detecção precoce da trinca.

O posicionamento das resistências não estava adequado no primeiro tratamento térmico local, sobrepostas e mal distribuídas, mas não tiveram influência detectável no aquecimento, que foi acompanhado com o uso de

termopares, todavia poderiam ter comprometido o serviço com pontos locais muito quentes ou de temperatura insuficiente.

O uso de arame sólido de menor diâmetro, 1,2 mm, resulta menor deformação de que a opção de maior diâmetro, 1,6 mm, devido ao menor aporte de calor. No caso de recuperações de peças acabadas, onde a deformação pode comprometer o uso da peça, isso é relevante. Dessa forma não se recomenda o uso de processos, como com arame tubular, para recuperações mais delicadas, pois seu aporte de calor é maior que o do processo com arame sólido.

O eletrodo revestido é a primeira opção para recuperação de campo, devido a sua versatilidade ele não necessita de proteção gasosa e pode ser aplicado em várias posições, todavia o processo com proteção gasosa e arame sólido consegue melhores valores de propriedades mecânicas na junta soldada. A melhoria das propriedades mecânicas da junta também é verificada quando comparados os valores do arame sólido aos do arame tubular.

O processo TIG tem bom comportamento em reparos, sendo aplicado apenas em situações mais delicadas e trabalhos de menores dimensões, devido à menor velocidade de deposição de metal de adição e da maior dependência da habilidade do soldador. Este processo permite ao soldador qualificado maior controle da deposição de metal e consequentemente do reparo.

De forma geral, devemos ressaltar que os melhores reparos têm sido obtidos com o uso do arame sólido (GMAW), devido à melhor qualidade das propriedades mecânicas da junta soldada, boa velocidade de deposição e por ser um processo semi automático é menos suscetível a erros do soldador. Estes dois últimos itens são destacados principalmente quando o reparo envolve

grandes áreas, como reparos de áreas cavitadas de pás que estavam em operação.

A redução do pré aquecimento diminui o aporte de calor na peça, bem como sua deformação.

Todavia esse é um aço inoxidável martensítico e, como tal, sujeito a trincas por hidrogênio. O pré aquecimento está diretamente ligado ao resfriamento da junta, portanto tem influência direta na movimentação do hidrogênio pelo metal em resfriamento. Se o hidrogênio ficar retido internamente à junta podem ser geradas trincas durante o resfriamento, ou pior, quando a peça estiver sob tensão em trabalho.

A redução da temperatura de pré aquecimento deve ser avaliada com muito cuidado.

O uso de relógio comparador para controle dimensional é usual do mercado, todavia pode não ser a melhor opção em peças com pequena variação entre dimensões, ou seja, estruturas tridimensionais, sólidos de revolução, que podem deformar em mais de uma direção ao mesmo tempo. O uso de dois ou mais relógios minimiza esta deficiência. O braço de medição ou mesa tridimensional não são uma boa opção para esta medição, pois não podem ser empregados durante o reparo devido à temperatura e acesso à peça.

## **5. COMENTÁRIOS**

### ***5.1 PONDERAÇÃO***

A descontinuidade original, que posteriormente mostrou ser uma trinca, era de origem do fundido, provavelmente originada de algum reparo.

Somados a isto há indícios, como pode ser visto na figura 3.8, dada a quantidade de material no diâmetro do munhão, o tratamento térmico de revenimento pode não ter sido completamente efetivo.

Este fato aliado às características grosseiras do fundido, que, como constatadas na inspeção inicial, encontrou material poroso no centro do munhão, leva a conclusão de que a região apresentava tensões internas decorrentes do processo de fundição e têmpera ou de algum reparo.

Estas tensões foram reduzidas com os posteriores tratamentos térmicos executados.

Após a última intervenção a pá foi retirada da mandilhadora horizontal. No dia seguinte todos os ensaios previstos no plano de qualidade para este munhão foram repetidos, o resultado foi considerado satisfatório e assim a pá pôde ser liberada para montagem.

Foram feitas diversas intervenções para se conseguir tornar aceitável esta pá Kaplan.

Uma atitude mais conservadora seria ter inicialmente rebaixado a região por usinagem e recuperado a pá por soldagem, como executado no final.

Isto provocaria ganho de tempo em horas homem, tanto de engenharia quanto de usinagem e soldagem, sendo o prazo de execução reduzido. Porém não se sabia qual seria o comportamento do aço à recuperação no início, isto só pôde ser contabilizado ao final do processo e sem o tratamento térmico, pode-se concluir que este procedimento poderia não ser efetivo.

Assim sugere-se a adoção do tratamento térmico para alívio de tensões pós soldagem em pás Kaplan, ou outros fundidos de CA6NM, sempre que não se possuir histórico confiável das peças. Deve-se adotar este procedimento se possível antes do início do reparo.

Finalmente, o uso de cabeçote angular, junto com o normal, em ultra som de transições críticas foi adotado para as próximas pás.

## **5.2 RECOMENDAÇÕES**

- Prever tratamento térmico para alívio de tensões quando não se conhece o histórico da peça;
- Durante a recuperação por soldagem de peças grandes usar pelo menos dois relógios comparadores;
- Quando se conhece o funcionamento e cargas do componente é possível a recuperação sem soldagem, trabalhando-se com mudanças de raios;
- Modelos matemáticos, analíticos e FEM podem ser usados no levantamento de zonas de maior concentração de tensão na peça;
- Aplicar cabeçote de ultra som normal e angular na inspeção de zonas críticas da peça;
- Cuidado na colocação das resistências do tratamento térmico para evitar sua sobreposição;

- Escolher processos de baixo aporte de calor na soldagem de recuperação de peças acabadas;
- No caso onde o comportamento da peça na recuperação não for adequado, o rebaixamento e reconstrução da superfície por soldagem pode ser o mais indicado.

## **6. CONCLUSÃO**

Este trabalho abordou a aplicação dos conceitos de soldagem de manutenção na recuperação de uma pá Kaplan de aço inoxidável martensítico fundido.

Os procedimentos empregados levaram ao levantamento das recomendações do item 5.2 com os dados que levaram a recuperação da peça.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Estudo prático da deformação de componentes fundidos em função da energia aplicada na soldagem da junta em geometrias de sólidos de revolução, consequentemente do processo de soldagem aplicado.
- Método de controle de deformação local durante a recuperação por soldagem.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. Cardoso, I.A.P.; Desenvolvimento de método para seleção de políticas de manutenção baseado em análise de risco. Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em engenharia. Brasil 2004.
2. Pinto, A. K. e Xavier, J. N.; Manutenção: Função estratégica. 2 ed., Ed. Qualitymark, Brasil, 2005.
3. Nepomuceno, L. X.; Técnicas de manutenção preditiva. v.1, Ed. Edgard Blucher, 1989.
4. Marckle, L; Finite element analysis and simulation of weld: a bibliography (1976-1996). Ed. IOP Publishing Ltd, United Kingdom, 1996.
5. Okumura, T. ; Taniguchi, C. ; Engenharia de soldagem e aplicações, 1 ed.; Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1992.
6. Deng, D. ; Murakawa, H.; Liang, W.; Numerical simulation of welding distortion in large structures. Ed. Elsevier B.V., 2007.
7. Mahyar, A.; Godak, J. A.; Combinatorial optimization of weld sequence by using a surrogate model to mitigate a weld distortion. Ed. Springer Science + Business Media, 2011.
8. Zacaria, T. et al; Modeling of fundamental phenomena in welds. Ed. IOP Publishing Ltd., 1995.
9. Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Introdução a mecânica dos fluidos. ed. 5, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1995.

10. International standard. IEC 61364. Hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines – model test acceptance tests. ed. 2. International Technical Commission, Switzerland, 1999.
11. Grafenberger, P.; Axial turbine design. Short course in hydraulic machines and systems engineering. EPFL, Lousanne 2009.
12. Schneeberger, M.; Turbine construction design and examples. Short course in hydraulic machines and systems engineering. EPFL, Lousanne 2009.
13. American Society for Testing and Materials. ASTM A743 CA6NM. Standard specification for casting, iron chromium, iron chromium nickel, corrosion resistant, for general application. Annual book of ASTM standards, 1999.
14. Pool, H. G.; Bueno, A.; Hashizume, C.; Extra safety in stainless steel welding for Francis hydraulic turbines. Hydro Vision Congress, 2011.
15. Hays, C.; Patrick, D. H.; Hardness conversion data for CA6NM alloy. Ed. Elsevier Science Publishing Co.; New York, 1983.
16. Casas, W. J. P.; Henke, S. L.; Novicki, N.; Fracture toughness of CA6NM, quenched and tempered, and of its welded join without PWHT. Ed. Taylor and Francis, 2007.
17. Deucht Instut fur nurmung. DIN EN 10283. Corrosion resistant steel castings. Berlin, 2010.
18. Specification for inspection for steel castings for hydraulic machines. CCH70-3. ed. 3. Ed. Groupe D'Estude Cahier Des Charges Hydrauliques, 1996.

19. Spotts, M. F.; Shoup T. ; Design of machine elements. ed. 7. Ed. Prentice Hall, 1997.