



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH 11  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO I**

### **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA**

#### **OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE FABRICAÇÃO DE ROTORES HIDRÁULICOS PARA PCH's**

**Rafael Segantin Lacerda \***

**Marcio Kondo**

**Edilson Melo**

**Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda.**

## **RESUMO**

As necessidades do mercado de energia têm mudado rapidamente nos últimos anos e os níveis de exigência por preços baixos, alta qualidade e prazos de entrega menores têm sido cada vez maiores. Os prazos de entrega dos equipamentos eletromecânicos em usinas grandes novas geralmente são regulados pelas obras civis, porém no caso de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) muitas vezes essa verdade se inverte. Em função disso, muitos contratos podem ser decididos em função dos prazos de entrega ofertados pelas empresas.

O rotor da turbina é um dos componentes mais críticos quanto ao ciclo de fabricação, tanto em função da sua complexidade, como pelo tempo necessário de engenharia hidráulica e mecânica que não permitem que a fabricação se inicie antecipadamente. Como o prazo de fabricação é muito curto, nos últimos anos diversos processos têm sido desenvolvidos para reduzir o tempo de ciclo de fabricação do mesmo, porém atendendo às demais exigências de mercado.

Nesse cenário de busca por redução de prazos e custos de fabricação simultaneamente ao aumento da qualidade técnica do produto, a Voith Siemens Hydro Power Generation desenvolveu o conceito de fabricação de rotores Francis com concepção bi partidos para PCH's, cuja descrição é o foco desse artigo.

Portanto, o objetivo deste trabalho é o de ajudar o leitor a entender as vantagens e desvantagens desta nova concepção de fabricação em comparação com a solução tradicional do rotor fundido em monobloco. Estas alternativas foram analisadas e comparadas no sentido de suportar a escolha da melhor solução para PCH's levando em conta suas específicas condições operacionais e técnicas, que são fatores decisivos neste processo e devem estar de acordo com a opção selecionada.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

No início do ano de 2000, a Voith Siemens Hydro Power Generation desenvolveu, um processo de fabricação de rotores Pelton que utiliza um disco fundido ou forjado que integra a flange de acoplamento e parte das conchas. A outra parte das conchas é fundida próxima ao formato final ou em blocos que são então escavados. Após a usinagem do conjunto as peças são soldadas formando a geometria final do rotor.

A experiência adquirida na escavação de rotores Pelton (mais de 10 rotores já fabricados ou em fabricação) motivou a idéia da utilização de um processo similar para rotores Francis pequenos, que usualmente são fundidos em monobloco, já no formato final do rotor com sobremetal. No entanto, o rotor em monobloco exige um tempo de modelagem grande e dificulta o acesso para usinagem, esmerilhagem, polimento e reparos. Outro fator contrário à solução monobloco é a quantidade de defeitos que podem surgir na aresta de saída em função das espessuras muito pequenas e perfis hidráulicos complexos, não sendo uma geometria ótima a ser fundida. Da busca por

prazos e custos menores, melhora da qualidade técnica e com a mencionada experiência com rotores Pelton, concebeu-se o conceito de fabricação de rotores Francis denominados mecano-soldados, ou de concepção bi-partidos.

O processo se resume na fundição de peças no formato de discos ou anéis que são torneados e o perfil hidráulico fresado; posteriormente os discos já usinados são soldados para formar o rotor, o restante do processo é praticamente igual ao de um monobloco. Como as peças são feitas em partes - que depois de usinadas são soldadas - o acesso das ferramentas de corte é facilitado, possibilitando a usinagem total do rotor. O conceito mecano-soldado reduz o ciclo de produção (lead time) em cerca de 30%.



FIGURA 1 – Projeto dos discos torneados e fresados

## 2.0 - PROJETO PARA FABRICAÇÃO

Para cada projeto há a necessidade de um desenvolvimento hidráulico específico para atender às características do aproveitamento hidrelétrico em questão. Portanto cada rotor da turbina possui características (dimensões, perfis, geometrias) variáveis sendo otimizadas para o respectivo projeto.

No caso de rotor monobloco o processo de fabricação só poderá ser iniciado após a definição final do perfil hidráulico. Essa etapa da engenharia hidráulica pode levar até meses para se atingir a definição hidráulica final que assegure os níveis de eficiência contratuais requeridos. Desta forma, o ciclo total de fabricação se torna extenso não sendo possível a execução de atividades em paralelo.

Para a fabricação de rotores com a utilização da concepção mecano-soldada, a dependência com relação ao perfil hidráulico praticamente não existe, pois como o disco de fundição é maciço, qualquer alteração futura de perfil será absorvida sem impactos de retrabalho. Assim, para início do processo de fabricação são necessárias apenas as dimensões básicas do projeto do rotor (alturas e diâmetros) as quais serão utilizadas na definição dos discos de fundição.

## 3.0 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO

### 3.1 Fundição

Como mencionado anteriormente, o histórico de rotores Francis pequenos remete à concepção monobloco, porém o processo de fundição dos mesmos, por conta da complexidade do perfil, exige prazos elevados na elaboração do modelo de fundição. Também existe um comprometimento inerente a este processo nas regiões menos espessas (aresta de saída das pás) ou com geometrias muito irregulares (mudanças abruptas de espessura), exigindo certo volume de reparos.

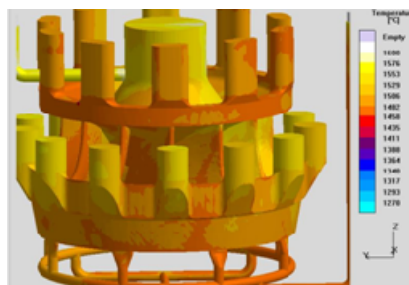


FIGURA 2 – Simulação de fundição do rotor monobloco

Em contrapartida, na concepção mecano-soldado o modelo é feito de isopor e sua execução é muito rápida, uma vez que o disco não possui reentrâncias ou perfis complexos. Em poucos dias é possível receber o modelo pronto para ser utilizado. O vazamento também é simplificado, pois a alimentação de uma peça sem complexidade na sua forma e com espessuras grandes segue um padrão melhor definido.

Um bloco maciço não produz uma quantidade de defeitos elevados, não sendo necessários muitos reparos por solda após os ensaios não destrutivos. Outra vantagem é que a usinagem atinge quase a totalidade da superfície hidráulica, minimizando a quantidade de esmerilhagem manual. O processo complicador neste método é a soldagem das duas metades no rotor.

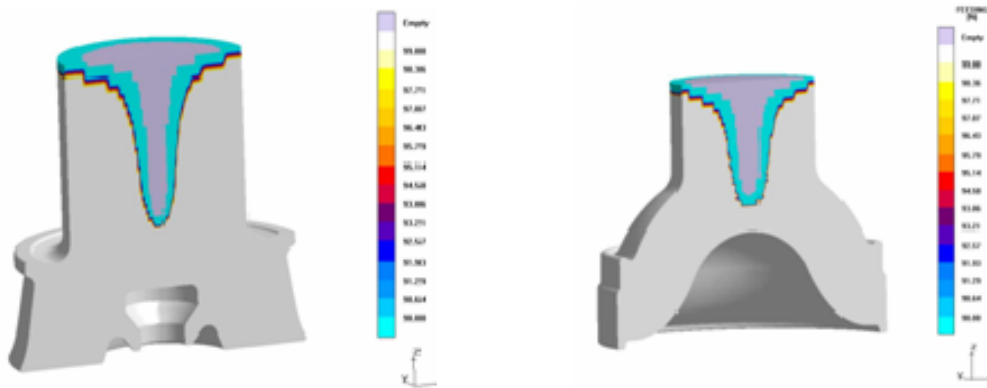


FIGURA 3 – Simulação de fundição dos discos bi partidos

Um programa exaustivo de investigação que incluiu testes de fadiga do material e simulações avançadas do processo de fundição foi executado para se determinar os pontos mais susceptíveis de forjados e de fundidos. Curvas de corrosão-fadiga para o aço inoxidável da série CA6NM (CrNi13.4) foram recentemente desenvolvidas a partir de corpos de prova e mostram que os materiais fundidos pela Voith Siemens Hydro Power Generation têm uma qualidade superior que permite completa confiabilidade de operação sobretudo nessa concepção de se fundir peças com geometrias simples.

## 3.2 Usinagem

### 3.2.1 Torneamento

Logo após a fundição, em ambos os processos de fabricação (monobloco e mecano-soldado), inicia-se o processo de usinagem tendo como operação inicial o torneamento. Na fabricação do rotor monobloco, pode ser encontrado basicamente dois tipos distintos de corte: contínuo e interrompido. O corte contínuo é benéfico para o processo de torneamento pois proporciona uma maior vida útil para a ferramenta e maior estabilidade do processo. Já no caso de corte interrompido, o mesmo oferece condições instáveis com variações de solicitações sobre a ferramenta, diminuindo assim seu desempenho e vida útil. Para o caso de rotores mecano-soldados, o processo oferece apenas o corte contínuo que como mencionado anteriormente resulta em condições melhores para o torneamento.



FIGURA 4 – Torneamento do disco da coroa

### 3.2.2 Fresamento

No processo de fabricação tradicional monobloco para rotores pequenos, uma das principais dificuldades de fabricação é o acesso da ferramenta para a usinagem, devido às dimensões reduzidas do rotor que conseqüentemente proporciona um menor espaço entre pás. Outro aspecto que limita a eficiência do processo de fabricação no caso monobloco, é o efeito de balanço da ferramenta existente no processo de fresamento com aplicação de ferramentas de grandes comprimentos (aproximadamente 500mm). Com isso apenas uma área específica da aresta de entrada e da aresta de saída podem ser usinadas e o restante necessita ser esmerilhado manualmente.

Em contrapartida, no caso da concepção mecano-soldada, cada disco é primeiramente torneado com sobremetal e logo depois fresado separadamente o que permite acesso da ferramenta a toda superfície hidráulica, diminuindo a esmerilhagem manual a ser executada posteriormente. Outro fator a ser ressaltado é a utilização de ferramentas de usinagem com menores comprimentos, que asseguram uma grande estabilidade (rigidez) no processo de escavação possibilitando a utilização de modernos conceitos de usinagem como “HSM-High Speed Machine” e “HPC-High Performance Cutter”. Tais conceitos proporcionam uma produtividade maior devido aos altos dados de corte empregados (altos avanços, rotações e alta taxa de remoção - kg/min).



FIGURAS 5 e 6 – Fresamento utilizando o conceito “HPC-High Performance Cutter”.

Como a usinagem da superfície hidráulica é controlada pelo CNC (Controle Numérico Computadorizado), pode-se assegurar altos níveis de qualidade dimensional os quais são muito mais difíceis e custosos de serem obtidos através de processos manuais.

### 3.3 Esmerilhagem

No caso de fabricação através do processo monobloco, a esmerilhagem tem como funções atingir as dimensões finais, remover escalopes resultantes do processo de fresamento, preparar a superfície para ensaios não destrutivos (END) e atingir os níveis de acabamento superficial requeridos.

Em contrapartida, na concepção de rotores mecano-soldados, as dimensões finais são atingidas no processo de fresamento e a esmerilhagem se faz necessária apenas para remoção dos pequenos escalopes resultantes do processo de fresamento, preparação da superfície para ensaios não destrutivos (END) e atingir os níveis de acabamento superficial requeridos.



FIGURA 7 – Esmerilhagem do perfil hidráulico

Essa alteração do processo de fabricação de rotores pequenos, também proporciona uma redução no ciclo de emersilhagem, pois a superfície hidráulica é completamente definida em um processo automatizado.

### 3.4 END - Ensaios Não Destrutivos

Para rotores fabricados na concepção monobloco, o índice de ensaios e reparos é relativamente alto, devido à complexidade do perfil fundido (grandes variações de espessura e geometria) e difícil acesso a toda extensão da superfície. Fato este que não ocorre na concepção de rotores bi partidos, uma vez que as geometrias fundidas são simples e existe facilidade de acesso para execução dos ensaios e reparos.

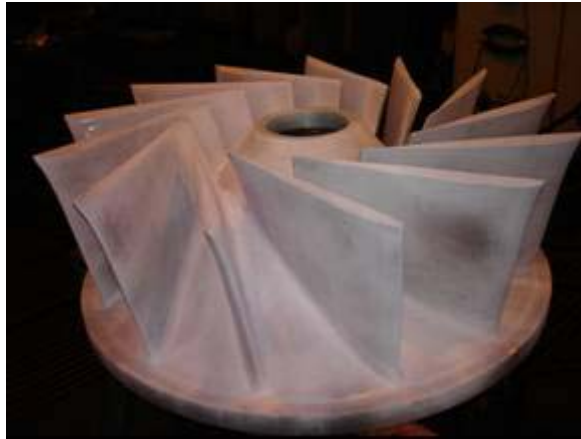


FIGURA 8 – Ensaio de líquido penetrante

### 3.5 Montagem - Soldagem

Inicialmente nessa fase é executado um controle tridimensional dos discos escavados e são determinadas as linhas de referencia para posicionamento e montagem dos discos. Após posicionamento de acordo com as referencias inicia-se o processo de soldagem. Durante a soldagem, a deformação é constantemente controlada com o objetivo de assegurar a qualidade dimensional especificada.



FIGURA 9 – Rotor completamente acabado

Essa etapa do processo de fabricação existe apenas na concepção de rotores mecano-soldados (bi partidos).

#### 4.0 - CONCLUSÃO

As exigências do mercado levaram a Voith Siemens Hydro Power Generation ao desenvolvimento e patente requerida de um novo processo de fabricação para rotores de pequeno porte para pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e rotores bomba, que tradicionalmente eram concebidos monobloco.

Como descrito nesse artigo, o processo de fabricação mecano-soldado proporciona claramente uma redução no ciclo total de fabricação, custos mais baixos e um incremento na qualidade do material base. Esses resultados levaram à Voith Siemens Hydro Power Generation a consolidar esse processo, adquirindo know-how e já tendo fabricado 8 rotores Francis e 4 rotores bomba utilizando a concepção mecano-soldado .

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Modern Metal Cutting: A Practical Handbook by Sandvik (Hardcover - 1996)
- (2) DINIZ, A. E. ; MARCONDES, F. C. ; COPPINI, N. L. . Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2003. v. 1. 248 p.
- (3) WITTE, H. Máquinas Ferramenta. 7. ed. São Paulo: Hemus, 1998.
- (4) Usinagem em altíssimas velocidades - ed. Érica (Sandvik), 2003.
- (5) The guide to Hydro Power Mechanical Design - by ASME: HCI Publications, 1996.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael Segantin Lacerda

Nascido em São Paulo, SP em 17 de outubro de 1979.

Mestrando (2004) Unicamp e Graduação (2003) em Engenharia Mecânica: UMC - Mogi das Cruzes

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda.

Engenheiro de produção.

Marcio Kondo

Nascido em São Paulo, SP em 12 de maio de 1978.

Graduação (2001) em Engenharia Naval: USP - São Paulo

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda.

Engenheiro mecânico.

Edilson Barbosa de Melo

Nascido em São Paulo, SP em 09 de agosto de 1979.

Graduação (2004) em Matemática: UNIFIEO - Osasco

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda.

Projetista mecânico.