XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

MÁQUINAS FRANCIS DE ALTA QUEDA : INOVAÇÃO EM PROJETO E FABRICAÇÃO

Hans Günther Poll(*)
VOITH HYDRO

Gert Josef Rötter
VOITH HYDRO

RESUMO

As máquinas Francis de alta queda são máquinas extremamente sofisticadas porque atingem rendimentos superiores às máquinas Pelton e por isto em muitos casos estas tem sua implantação favorecida. Entretanto este tipo de máquina possui uma série de desafios construtivos uma vez que as mesmas operam com uma pressão específica muito grande e com rendimentos altos, surgindo compromissos entre os limites físicos, necessidades de engenharia construtiva e detalhes de fabricação dos componentes.

Estas instalações tem-se popularizado na América Latina e este artigo aborda os importantes detalhes de projeto e fabricação a serem considerados na construção destas unidades.

PALAVRAS-CHAVE

Francis, Pulsação, Pressão, Turbinas, Fabricação

1.0 - INTRODUÇÃO

A aplicação de máquinas Francis em um campo tipicamente caracterizado por máquinas do tipo Pelton é uma tarefa que pode ser economicamente rentável uma vez que se pode retirar de uma máquina Francis até 2% a mais de rendimento para a mesma aplicação de uma máquina Pelton. Além disto, o custo final dos equipamentos eletro mecânicos pode ser menor no caso de uma instalação Francis o que ainda cria vantagens quando do cálculo de retorno do capital investido. Soma-se ainda o fato de que estes tipos de máquina Francis, dotada de um desenho especial, já foram ensaiados em laboratório de modelo reduzido e comprovaram as expectativas de alto rendimento.

Teoricamente este tipo de aplicação parece incontestavelmente vantajosa em relação às máquinas Pelton, mas por que simplesmente todas as máquinas Pelton existentes não foram inicialmente concebidas já como unidades Francis anteriormente? Claro, os avanços tecnológicos da fluidodinâmica computacional (CFD) aliado ao uso de novas técnicas de usinagem imprimiram velocidade ao desenvolvimento porque se pode testar mais idéias, as refinar em computador e ainda partir para testes práticos ainda que em escala de modelo reduzido para se confirmar os desenhos efetuados, pois ainda não estamos em posição de substituir o ensaio de modelo totalmente pelas análises numéricas. Com isto ganhou-se velocidade e a chance de se testar diversas alternativas o que resultou em sucesso na obtenção de geometrias que realmente permitem um rendimento bem superior à possibilidade das máquinas Pelton.

Rotores Francis de alta queda, de baixa rotação específica (Nq) tipicamente possuem uma entrada estreita e canais de passagem estreitos onde a alta pressão da água impera, num desenho que se assemelha a bombas de

(*) Rua Friedrich von Voith , n° 825 – CEP 02995-000 São Paulo, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 3944-4598 – Fax: (+55 11) 3944-4503 – Email: hans.poll@vs-hydro.com

recalque sendo que mesmo rotores de alto rendimento tipicamente eram dotados de 7 ou 9 pás. Mas para se atingir rendimentos do nível mencionado basicamente os canais de passagem de água foram ainda mais estreitados, surgindo rotores de 15 e 17 pás, ainda às vezes dotadas de pás intermediárias, chamadas de *splitter*, que dividem o estreito canal por 2, aonde finalmente chegamos a rotores com 30 até 34 pás. O escoamento bifásico de uma unidade Pelton passou a ser totalmente confinado em uma unidade Francis de alta queda e altíssimo desempenho. Os engenheiros literalmente diminuíram os espaços , inclusive entre partes móveis e estatóricas para permitir ausência de qualquer recirculação e obrigar o fluido a passar por apertados e guiados canais maximizando a transferência de energia hidráulica em mecânica. Entretanto há efeitos indesejáveis que precisam ser combatidos já em projeto para que não ocorram surpresas com a operação da máquina.

Uma pequena analogia pode ser feita: O engenheiro hidráulico se assemelha ao arquiteto em uma construção, o engenheiro de produto ao calculista-projetista e ao final são os engenheiros de fábrica e obra que devem dar vida as coisas. Todos as inovações e grandes projetos arquitetônicos muitas vezes parecem querer desafiar leis físicas e passaram por inúmeras dificuldades e desafios para se tornarem realidade e aqui a história não é diferente.

2.0 - PROJETO E INSTALAÇÃO

A figura 1 mostra um corte transversal de uma unidade de alta queda. Estas unidades de mais de 300 a 600 metros de queda caracterizam-se por serem unidades compactas com caixas espirais pequenas e rotores pequenos com ate 3 metros de diâmetro mas com rotação alta o que remete a altas forças centrífugas.

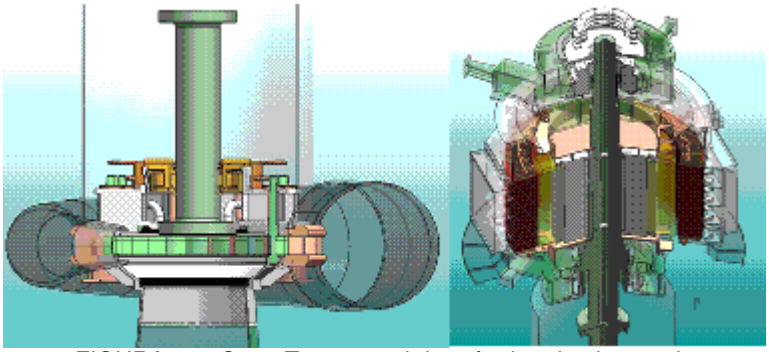

FIGURA 1 – Corte Transversal de máquina de alta queda

2.1 Unidade Geradora

O rotor do gerador pode ser construído com os pólos montados diretamente em um eixo maciço ou com uma coroa polar que esta montada sobre ripas já soldadas ao eixo. Ambas as variantes são extremamente rígidas uma vez que este rotor estará submetido a altas forças centrífugas. Especial atenção deve então ser dada aos configuração dos pólos e as cabeças dos mesmos em cujo encaixe ocorrerão as maiores tensões . A figura 2 mostra detalhes do tipo de rotor do gerador soldado.

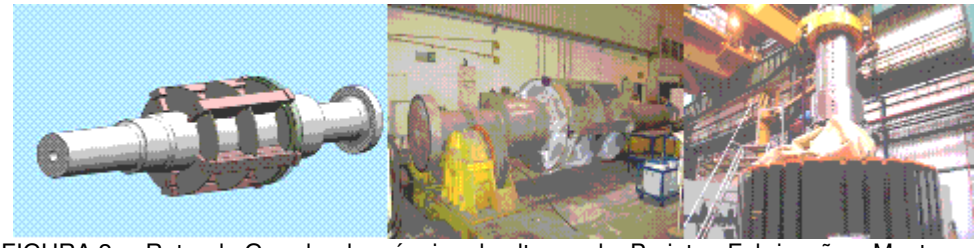

FIGURA 2 – Rotor de Gerador de máquina de alta queda: Projeto - Fabricação e Montagem

Estas unidades também são dotadas de válvulas esféricas que já são um capítulo a parte de engenharia porque são elementos dotados de vedações de serviço e manutenção acionadas por água que precisam ser cuidadosamente projetadas para evitar deformações excessivas, emperramento e ainda auto-oscilação em virtude a conexão com a coluna de água. O mancal escora merecerá atenção em virtude dos maiores valores de empuxo hidráulico, sendo impreterível o uso de tolerâncias de forma apertadas e a retífica do bloco escora para evitar qualquer imperfeição na superfície que eleve a pressão específica sobre as sapatas escora.
Também é de se notar que os elementos pressurizados como caixa espiral e tampa da turbina estarão submetidos a esforços estáticos maiores em virtude da queda da máquina e isto exigirá uma construção mais reforçada .

Em virtude de campos de pressão maiores existirá também uma sensibilidade hidráulica maior nesta unidade em que qualquer definição geométrica inconsistente pode interferir na operação da máquina seja esta provocada por

projeto errado ou desvios de fabricação não observados. Neste campo do controle dos fenômenos dinâmicos que se deve focar o projeto do rotor da turbina com especial atenção à interação do mesmo com a parte estatórica da máquina. E, na geometria de passagem de água da máquina isto se traduz no desenho das travessas do pré distribuidor e das palhetas de guia de fluxo bem como na distância entre elas e na distância desta última com a entrada do rotor. A geometria do rotor não somente é responsável pelo rendimento da máquina mas sim pelo seu dinamismo, pelos campos de pressão gerados na passagem do rotor e pelas pulsações de pressão que poderão excitar a unidade como um todo. Será na definição da geometria do rotor que o sucesso da instalação , e sua operação segura será determinada, e aqui devemos ressaltar que a definição final ocorre na escala de protótipo.

2.2 Projeto do Rotor da Turbina

Existem 3 aspectos principais a se considerar no projeto de rotores de alta queda: o projeto hidráulico, o projeto mecânico e a avaliação do comportamento dinâmico do rotor. Estes 3 aspectos precisam ser analisados simultaneamente porque os objetivos individuais podem ser inversamente proporcionais e um ponto ótimo deve ser obtido dentro dos limites aceitáveis do material, campos de pressão dinâmicos aceitáveis e ausência de ressonância. De nada nos adiantará produzir um rotor de alto rendimento que esteja submetido a tensões dinâmicas altas levando o material a fadigar em pouco tempo e produzindo trincas que obriguem a máquina a sucessivas intervenções para reparos comprometendo a disponibilidade da máquina. Da mesma forma de nada nos adiantará produzir um rotor com perfis reforçados que apresente cavitação severa e não atinja rendimentos altos pois também estaremos comprometendo a disponibilidade da unidade para reparos. Além disto, este tipo de projeto torna-se desafiador porque se a geometria de passagem de água no projeto não estiver perfeita à pressurização em quedas de 300-600 metros podem ser introduzidos distúrbios que terão consequências imprevisíveis à unidade. Estes distúrbios podem não somente ser gerados por perfis imperfeitos, mas por causas secundárias como a interação entre o comportamento dinâmico das pás do rotor, fluido e parte estatórica. Ou seja, deformações dinâmicas excessivas das pás, vibrações mecânicas, podem também colaborar para a ocorrência de distúrbios no fluxo e o aparecimento de vórtices cavitantes pois estamos tratando de escoamentos de pressão alta em canais pequenos.

2.2.1. Projeto hidráulico

Para operação em diversas condições de queda e potência a distribuição de pressão não deve mostrar indicações de cavitação . Todos os valores de pressão precisam estar acima dos valores necessários para o aparecimento de cavitação e este é o objetivo da análise do escoamento.

Nestas situações podem existir pequenos vórtices formados nas saídas das pás que por sua vez precisam se estratificados para dentro do escoamento em virtude da alta aceleração do mesmo não podendo ser observadas colisões com o lado de pressão oposto que por sua vez estará com alta pressão. As demais áreas a jusante também não podem apresentar separação ou recirculação. As figuras 3 e 4 mostram uma distribuição de pressão adequada bem como perfis de velocidade com ausência de formação de vórtices cavitantes.

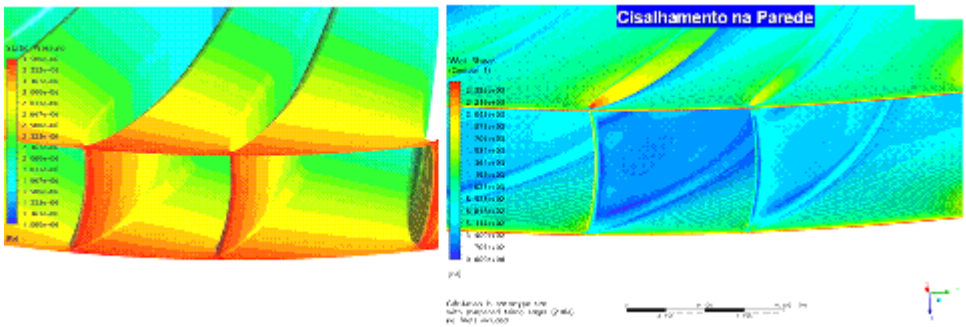

FIGURA 3 – Distribuição de pressão e cisalhamento nas paredes na entrada do rotor

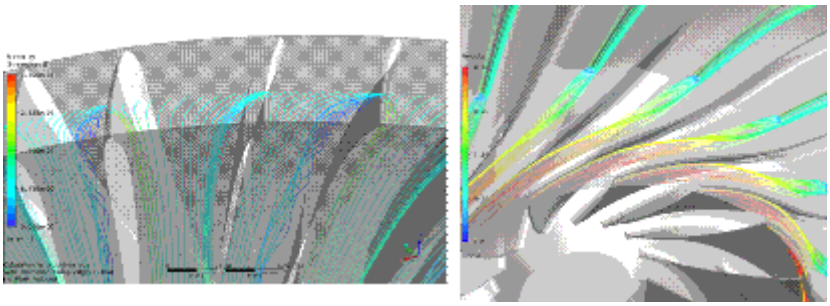

FIGURA 4 - Perfil de velocidades na entrada das pás e na saída das pás intermediárias.

2.2.2. Projeto mecânico

A avaliação mecânica passa por 3 fases de avaliação. A primeira é um cálculo estático em que o foco é a verificação de campos de tensão concentrados. Claro que os valores absolutos também fazem parte da análise, mas é a distribuição e concentração de tensões estáticas que são mais nocivas à operação segura do rotor. A distribuição de tensões estáticas para a operação nominal e para máxima potência são podem apresentar concentrações nas regiões de entroncamento de pás com cubo ou coroa e os valores absolutos devem estar sempre abaixo de 150 MPa. Para casos de operação excepcional pode ser aceitos valores até 200 MPa. A figura 5 mostra um exemplo de distribuição de tensão em uma pá principal e em uma pá intermediária mostrando ausência de severas concentrações em cantos.

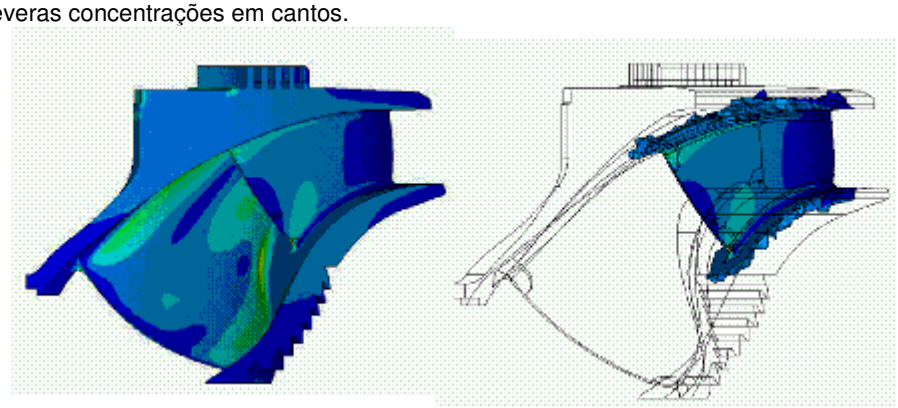

FIGURA 5 - Tensões da análise estrutural estática em pás principais e intermediária de rotor

Entretanto são as outras 2 fases de avaliação que são decisivas para a liberação de projeto mecânico e estas fases compreendem a análise modal na água e a análise da resposta harmônica da estrutura. A análise modal feita com elementos de fluido simulando a situação na água deve apresentar uma margem suficiente de 10% mínima entre os valores das frequências naturais calculadas na água e as frequências de excitação. Esta é uma margem de segurança, mas o risco ainda é definido pelo amortecimento da estrutura e pela possível amplitude da excitação. Esta margem deve ser observada considerando-se o fenômeno da iteração entre a parte estatórica e rotativa onde ser verifica se algum modo natural do rotor pode ser excitado pelos campos de pressão originados principalmente comparando-se a coincidência com um modo natural de mesmo número de diâmetros nodais. A análise estática é então somente um pré requisito para a confiabilidade do projeto porque é na avaliação dinâmica que reside a validação final do projeto.

A modelagem do escoamento é então feita com elementos fluido acústicos com imposição de um campo de pressão unitário correspondente a diversos diâmetros nodais que se pretende testar na entrada do modelo e condição de impedância na saída do modelo para as frequências determinadas. A resposta harmônica é então obtida com variação do coeficiente de amortecimento global e o resultado, deslocamentos, finalmente transformados para avaliação das tensões no modelo setorial. Esta técnica permite se obter os mais confiáveis resultados para avaliação da resposta dinâmica do sistema e validará ou condenará o projeto hidráulico ainda que eficiências superiores possam ter sido atingidas. A figura 6 mostra que as pás de dois projetos aproximadamente com o mesmo rendimento podem produzir respostas bem diferentes. O projeto 1 mostra na linha cheia em vermelho a resposta harmônica da pá principal e em linha tracejada a resposta da pá intermediária. O projeto 2 analogamente apresenta respostas com maiores amplitudes para ambas as pás e com frequências menores, mais próximas às possíveis frequências de excitação da máquina. Existe uma diferença de geometria nas pás do rotor que é responsável pela resposta mais adequada do projeto 1 em relação ao projeto 2 que se produzido provavelmente trará futuros problemas inesperados à unidade e se configurará em prejuízos à operação.

.

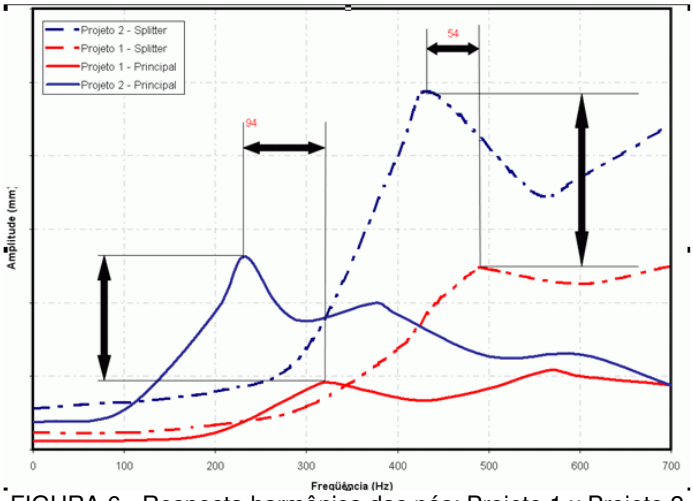

FIGURA 6 - Resposta harmônica das pás: Projeto 1 x Projeto 2

Até aqui avaliamos profundamente a questão da confiabilidade de engenharia construtiva através de uma anã lise numérica e agora precisamos avaliar as questões de fabricação e ainda as diferenças entre protótipo e modelo que são definitivas para a realização do projeto

3.0 - FABRICAÇÃO: DETALHES

A Voith Hydro desenvolveu, um processo de fabricação de rotores derivados de discos fundidos ou forjados totalmente escavados que é utilizado para rotores Francis de pequenas centrais hidrelétricas, rotores bomba e rotores Pelton. O processo se resume na fundição de peças no formato de discos ou anéis que são torneados e o perfil hidráulico fresado. As pás são divididas na parte correspondente ao cubo e na parte correspondente a coroa do rotor. Esta por sua vez também é dividida em 2: Uma parte contém aproximadamente metade das pás e a outra é um anel montado a posteriori após a soldagem das metades de cubo e coroa. Este conceito chamado do mecano soldado tem sido largamente empregado na construção de rotores bomba , rotores de pequenas centrais hidrelétricas e de rotores de alta queda somando-se mais de 40 referências sem incidência de problemas. Este processo permite velocidade de fundição e a obtenção de um material de excelente qualidade uma vez que para definição dos discos nominais somente se faz necessária a definição de contornos externos podendo-se aprofundar cálculos e definições geométricas finais enquanto o processo de fundição já esta em andamento. A figura 7 mostra as partes principais do rotor e o processo de montagem.

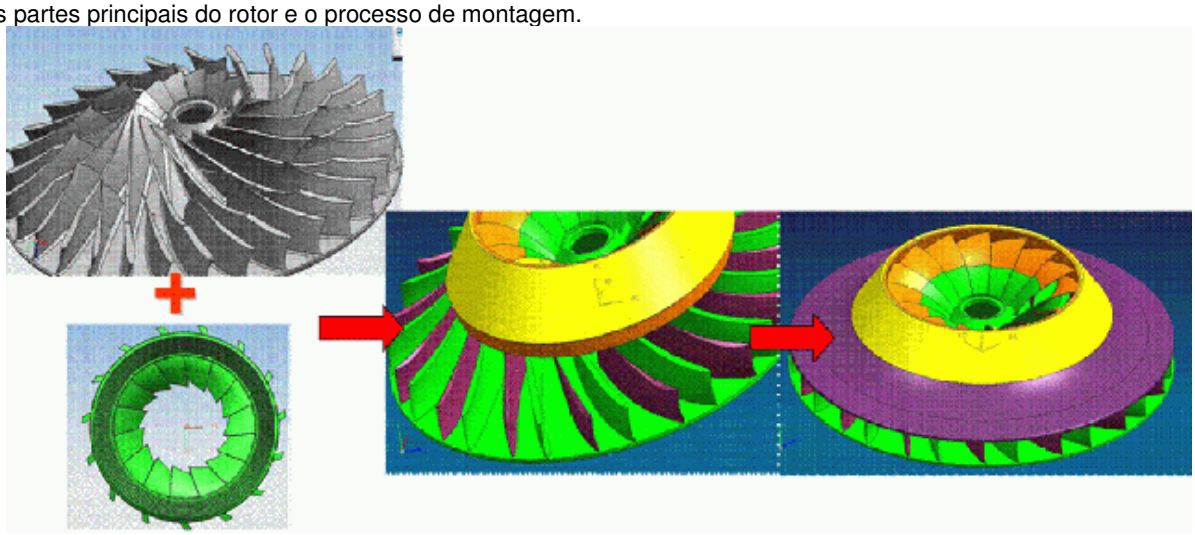

FIGURA 7 - Processo de fabricação derivados de discos para rotores de alta queda dotados de pás intermediárias

O emprego de um processo convencional de fabricação com pás separadas teria como desvantagens a própria qualidade das pás fundidas individualmente que deveriam ao final passar por um exame radiográfico individual, e as dificuldades de soldagem das mesmas em espaços reduzidos onde ondulação do perfil e ondulação dos raios de solda precisariam ser também ser checados e profilados. Este tipo de técnica convencional exigiria uma maior interação com o projeto hidráulico para permitir espaços maiores de trabalho.

A Voith possui uma fundição própria no Brasil que é dotada de um conversor AOD que trabalha em atmosfera inerte de argônio equipado com um regulador digital de última geração. Este equipamento aliado a simulações de

engenharia de fundição permitem definir a melhor posição para colocação de massalotes e executar uma distribuição de sobremetal tal que permita se produzir discos com material homogêneo com mínimo de defeitos. O material produzido da classe CA6NM constantemente atinge valores de mais de 120 J de resiliência a 0 graus após têmpera e revenimento caracterizando-se por alta tenacidade com níveis de gás residual (O,N,H) baixíssimos.

O material do interior do anel fundido é então escavado te tal modo que justamente nos entroncamentos de pá com coroa e pá com cubo se tenha material fundido uma vez que a solda é deixada para a região central do rotor. O entroncamento, região de máxima tensão dinâmica e estática , permanecerá com material fundido com alta tenacidade , homogêneo e isento de defeitos. Uma região soldada com material martensítico equivalente teria no máximo 55J de tenacidade e teria que ser minuciosamente inspecionada por UT e submetida a ciclos de reparo uma vez que a soldagem precisa passar por diversos ciclos de inspeção para finalmente ser considerada aprovada e isenta de qualquer defeito. E isto ainda dentro das limitações acústicas que existem nos cabeçotes o que suporta o fato de que o entroncamento fabricado de material fundido e homogêneo na concepção citada é muito mais seguro e confiável.

Este material também foi submetido a um programa exaustivo de investigação que incluiu testes de fadiga do material em meio aquoso através de corpos de prova simulados em bancada de alta frequência que mostrou que o material possui 20% a mais de resistência a fadiga do que as curvas de Wôhler da literatura também testadas nos mesmos laboratórios.

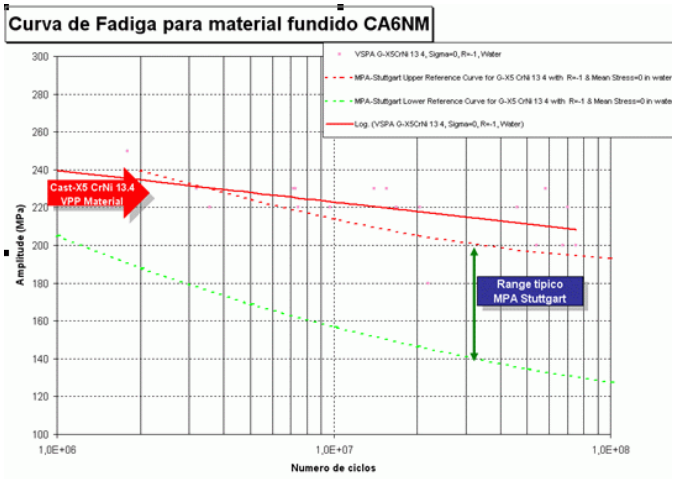

FIGURA 8 - Curva de corrosão fadiga do material fundido por VPP comparado com range típico

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 em cerca de 30%. A usinagem permite acesso da ferramenta a toda superfície hidráulica, mas para rotores de alta queda é conveniente o uso de máquinas dotadas de cabeçote fresador em 5 eixos em alta rotação com a utilização de ferramentas de usinagem com menores comprimentos, que asseguram uma grande estabilidade (rigidez) no processo de escavação e acesso melhorado. A figura 8 mostra a complexidade da usinagem, o perfeito assentamento de chapelonas na superfície final bem como a perfeição da geometria preparada para solda.

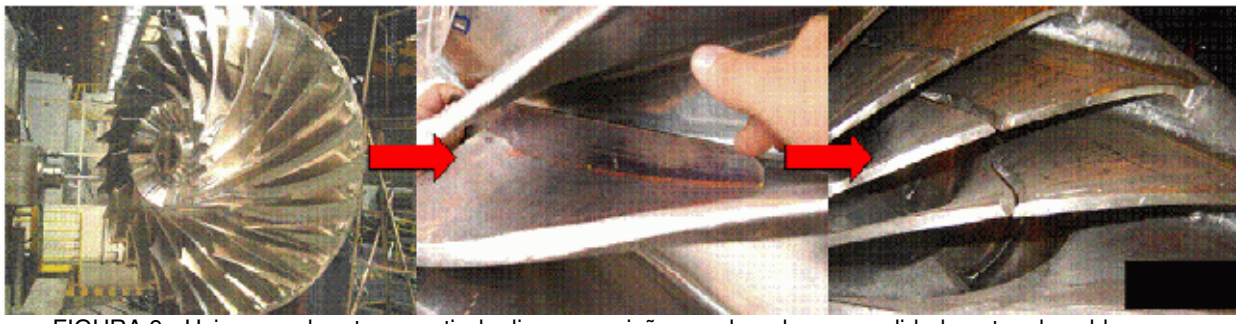

FIGURA 9 - Usinagem do rotor a partir de disco , precisão na chapelona e qualidade antes de soldagem.

Posteriormente os discos já usinados são esmerilhados, testados e soldados para formar o rotor e é a partir deste ponto que realmente se define a excelência de uma fabricação. A soldagem, nesta concepção, já se reduziu a uma única emenda entre as partes o que tem um efeito secundário de minimizar contrações e deformações. Mas, é no controle de contração de soldagem e deformações que se produzirá um rotor que atenderá absolutamente as exigências de operação. O cordão de solda já estará em uma parte plana da pá e deverá ser esmerilhado com cuidado para que as aberturas entre pás permaneçam dentro das tolerâncias de projeto que para rotores de alta

queda serão 50% do que é definido na IEC60193. Esta soldagem precisa ser balanceada para evitar a deformações das pás e principalmente a introdução de ondulação.

Os rotores de alta queda em função dos altos campos de pressão são ultra sensíveis a pequenas ondulações e devem ser encarados neste item como máquinas Pelton e não mais como máquinas Francis de alto Nq. Qualquer desvio nos canais ou ondulações da ordem de décimos será suficiente para provocar campos de cavitação e colocar em risco a operação do rotor e a disponibilidade da máquina. Para tanto os perfis deverão ser digitalizados após soldagem e esmerilhamento e comparados á risca com as tolerâncias de projeto e a manutenção da ondulação deverá ser sempre privilegiada. A figura 10 mostra o esquema de digitalização e avaliação da superfície final e um exemplo de marca de cavitação que pode ser provocada por ondulação entre canais.

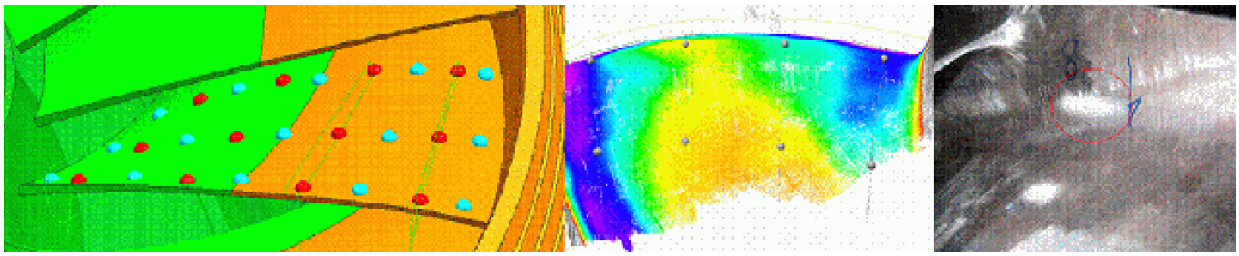

FIGURA 10 - Sistema de medição utilizado para evitar ondulações com digitalização fotográfica e efeitos provocados por ondulação inadequada.

Ao final do processo todas as pás , bem como as soldas executadas são radiografadas para passarem pelo critério classe 1 da norma ASTM. E, ainda as pás são submetidas ao um processo de *shot peening* em que a camada superficial do material é comprimida por bombardeamento de partículas o que confere extra resistência a fadiga e comprime o material no primeiro meio milímetro que ainda elimina qualquer sensibilidade a aparecimento de microporos após inicio de operação do rotor.

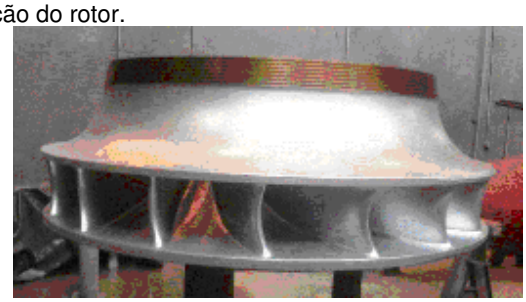

FIGURA 11 - Rotor final - Exemplo de 17 pás

4.0 - CONCLUSÃO

A correta combinação do estado da arte em projeto hidráulico , projeto mecânico e técnicas de fabricação permitem o fornecimento de máquinas Francis de alta queda em condições anteriormente somente abrangidas por máquinas Pelton e este artigo mostra detalhes a serem obedecidos nas diversas etapas do desenvolvimento do projeto e de sua construção. Estas máquinas exigem um aprofundamento das técnicas de projeto tanto hidráulico quanto mecânico para que o desenho final propicie operação segura. Da mesma forma as técnicas de fabricação empregadas exigem o emprego do estado da arte em tecnologia de fundição e materiais e a mentalidade para garantia das condições superficiais do rotor vai de encontro a rotores Pelton.

Na America Latina, principalmente na região andina e regiões montanhosas da America Central mais e mais tais projetos estão se tornando realidade e esta contribuição visa realçar detalhes que devem ser obedecidos para uma implementação segura e confiável de tais máquinas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) LACERDA, R. , KONDO, M., MELO, E, “Otimização do ciclo de fabricação de rotores hidráulicos para PCHs“, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, Brasil, 2007, GGH11.

(2) POLL, H.G., LOPES, R., “Certificação de Máquinas Hidrogeradoras para Operação“,XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, Brasil, 2007, GGH06

(3) POLL, H.G., ZANUTTO, J.C., PONGE-FERREIRA, “Diagnóstico Dinâmico de Máquinas Francis“, XVIII SNPTEE, Curitiba, Brasil, 2005.

(4) ARZOLA,F.,AZUAJE,C.,ZAMBRANO,P.,GULBRANSEN,G., “Undesired Power Oscillations at High Load in Large Francis Turbines. Experimental Study & Solution“, Proceedings of 23rd IAHR Symposium - Section of Hydraulic Machinery and Systems, Yokohama, Japan, F116, 2006.

(5) DUBAS, M. Über die Erregung infolge der Periodizität von Turbomaschinen. Ingenieur-Archiv. v.54, 1984, p.413-426.
(6) IEC 60193, edição 1999.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Hans Günther Poll
Nascido em São Paulo em 17 de setembro de 1968
Doutorado (1999): EPUSP: Mestrado (1993): EPUSP Graduação (1990) em Engenharia Mecânica: EPUSP.
Graduação em Ciências da Computação: Fatec-UNESP.
Empresa: Voith Hydro desde 1989.
Gerente Geral de Manufatura.

Gert Josef Rötter
Nascido em Schwäbisch Gmünd, Alemanha em 20 de Janeiro de 1966
Graduação: Engenharia Mecânica Geral, Fachhochschule Aalen, Alemanha (1991).
Empresa: Voith Hydro desde 1993
Gerente de Engenharia de Produção