



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/33
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

Avaliação de fadiga na fixação de polos de hidrogeradores

Thomas Hildinger(*) Daniel Ludwig Holger Henning Margit Hagmeyer

VOITH HYDRO LTDA

RESUMO

Estudos recentes e experimentos com protótipos levantaram preocupações sobre as geometrias convencionalmente utilizadas para a fixação de polos. Como líder no fornecimento de tecnologia hidrelétrica, há anos a Voith Hydro vem dedicando grande atenção a esse tema. Para isso, estabeleceu-se um procedimento para a avaliação de riscos relacionados à fadiga e seus consequentes danos. Este procedimento utiliza cálculos de FEA (Análise de Elementos Finitos) e uma avaliação de fadiga baseada em uma diretriz internacionalmente reconhecida da FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau). O procedimento pode ser utilizado antes de qualquer tipo de ensaio não destrutivo (END) para a avaliação das condições da máquina. Seguindo a experiência da Voith Hydro, este estudo ilustra o processo de avaliação e suas variações, soluções viáveis e a execução da solução escolhida no exemplo da fixação do polo do rotor, um dos componentes mais importantes do gerador.

PALAVRAS-CHAVE

Fadiga, polos, fixação dos polos, hidrogeradores.

1.0 - INTRODUÇÃO

No setor hidrelétrico, a vida útil esperada para componentes elétricos de hidrogeradores está na faixa de 30 a 40 anos como, por exemplo, até a substituição de um enrolamento. Como muitas usinas hidrelétricas operam por mais de 30 ou 40 anos, a reavaliação da vida útil de projeto está se tornando um fator cada vez mais importante para as unidades que estão em operação há muitas décadas. Além da avaliação de resistência estática, a avaliação de fadiga desempenha um papel preponderante na avaliação das condições da unidade. Por meio da avaliação de resistência estática, avaliou-se a máxima carga estática admissível atuante nos componentes. Os componentes precisam suportar a máxima carga estática. Durante a avaliação de fadiga, as cargas dinâmicas atuantes também foram avaliadas com base em seu espectro de cargas. O espectro de cargas é o resultado de diferentes condições de carga do gerador, incluindo partida/parada, rejeição de carga ou eventos de disparo. O acúmulo desse tipo de eventos leva ao consumo da vida útil da máquina.

No entanto, devido às mudanças que as operadoras fazem nas exigências dessas máquinas ao longo dos anos, a vida útil de uma máquina elétrica pode ser consumida a uma velocidade muito maior do que a sua vida útil projetada. A cada ano, com a mudança do número de ciclos de carga (como partidas/paradas), os anos de vida útil da máquina podem ser reduzidos a uma taxa maior do que a originalmente prevista. A engenharia atualmente dispõe de métodos mais sofisticados e detalhados para se determinar a vida útil de um gerador – e, consequentemente, de componentes chaves da máquina, como a fixação do polo do rotor. Se não forem detectadas a tempo, trincas podem levar à perda de integridade de uma máquina, podendo prejudicar a saúde dos colaboradores envolvidos e até mesmo causar danos às usinas.

O resultado da avaliação de fadiga é o número admissível de partidas/paradas, rejeições de carga e eventos de disparo ao qual uma máquina elétrica pode ser submetida antes de haver perda de integridade da máquina. Dessa

forma, a reavaliação da vida útil permite que operadores tenham uma melhor compreensão da vida útil remanescente de suas máquinas elétricas e planejem os intervalos de manutenção e de inspeção, além das substituições de componentes necessárias. No caso de o número efetivo de ciclos exceder o valor admissível, recomenda-se tomar outros passos e investigar diferentes soluções possíveis para se prolongar a operação da máquina.

Averiguações de resistência envolvendo avaliações de vida útil são um tema bastante complexo, e diversos métodos para a realização de tais avaliações foram propostos ao longo dos anos. No mundo inteiro, diferentes métodos de avaliação de resistência estática e à fadiga tem sido utilizados para diferentes aplicações na indústria mecânica. Metodologias bem conhecidas incluem o código ASME ou a Diretriz FKM [1].

1.0 - INTRODUÇÃO

A Voith Hydro utiliza a avaliação da resistência estática para a determinação das tensões nominais. Essas tensões são avaliadas por diretrizes internas. Para a avaliação de fadiga, realizaram-se estudos comparativos para diferentes métodos e padrões de avaliação. Avaliações analíticas de fadiga de diversas máquinas foram comparadas aos resultados de ensaios não destrutivos (END) dos componentes investigados. A maior congruência foi encontrada na avaliação realizada em conformidade com a Diretriz FKM. A Diretriz FKM foi elaborada por um grupo de especialistas alemães, e contou com o apoio financeiro da Forschungskuratorium Maschinenbau. A Diretriz FKM descreve o método de avaliação da resistência estática e à fadiga em função das tensões locais ou nominais para componentes de aço, ferro fundido e alumínio. A Diretriz FKM existe desde 1994. Essa Diretriz não apenas leva em consideração diversas normas de décadas anteriores, mas também introduz as contínuas melhorias que foram incorporadas à própria Diretriz.

Em particular, foi usado o capítulo para a avaliação da resistência à fadiga usando tensões locais, em conformidade com a Diretriz FKM. Exemplos de tensões locais incluem as tensões na área do entalhe de um componente. Para essa avaliação, emprega-se uma curva de ciclo de tensão (curva S-N) com uma probabilidade de sobrevivência de 97,5%. A curva S-N descreve o número máximo de ciclos em comparação com as tensões atuantes até ocorrer a fratura de uma amostra/componente. Ao se considerar um enorme universo de amostras, 97,5% delas não apresentarão fratura quando a curva S-N for atingida. A isso denominamos probabilidade de sobrevivência. Dito de outra forma, apenas 2,5% das amostras apresentarão defeitos quando a curva S-N for atingida. A avaliação é válida para um espectro de cargas cuja investigação supera os 10.000 ciclos. Essa área é geralmente chamada de fadiga de longo ciclo.

A Diretriz FKM se baseia em uma base de dados estatística e empírica. Esses dados são utilizados para se gerar uma curva S-N sintética. Devido à abordagem estatística, é necessário dispor do fator de segurança do material para se realizar uma avaliação adequada das resistências à fadiga. A Diretriz FKM assume que o fator de segurança do material depende da possibilidade de inspeções e das consequências da falha. Para realizar uma avaliação de resistência estática e à fadiga, é necessário calcular as tensões locais, que podem ser determinadas por uma análise de elementos finitos (FEA). Por se tratar do principal foco do presente estudo, os capítulos seguintes focam a avaliação da resistência à fadiga. Entretanto, a avaliação da resistência estática é fundamental para o projeto dos componentes individuais, e deve ser realizada antes da avaliação de fadiga.

2.0 - PRINCIPAIS PASSOS PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA

O esquema geral para a realização da avaliação está ilustrado na Fig.1. Para se realizar uma avaliação da resistência à fadiga com base na Diretriz FKM, é necessário dispor de diversos dados de entrada. A avaliação começa com a geração de um desenho assistido por computador (CAD) do projeto investigado tomando como base a sua geometria original, conforme os desenhos ou avaliações em campo. Com base nas condições de contorno do projeto, a FEA permite determinar as propriedades do material, as tensões locais e as velocidades rotacionais do gerador. As tensões calculadas podem então ser avaliadas com base na Diretriz FKM.

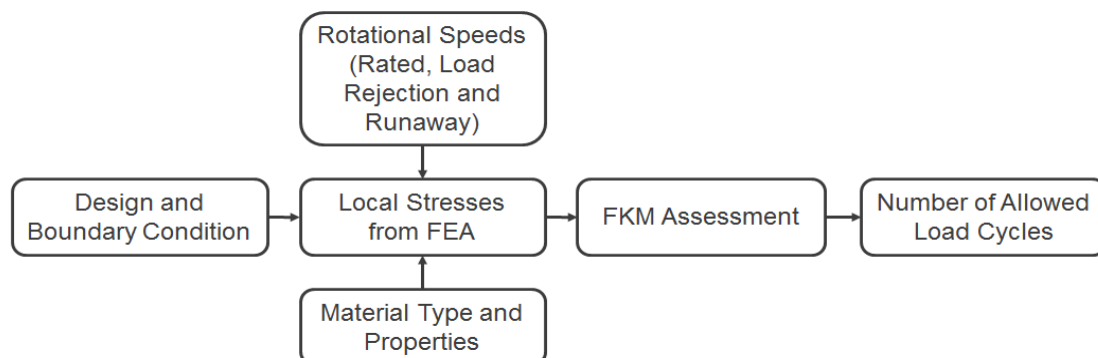


Fig. 1: Dados de entrada necessários e resultado da avaliação conforme a Diretriz FKM

O resultado da avaliação é o espectro admissível de cargas até o início de uma trinca. Deve-se notar que os resultados não podem ser transferidos de uma unidade para outras já que, para se determinar o número admissível de ciclos, é necessário levar em conta as condições de contorno de cada unidade específica.

2.1 Avaliação de tensões baseados na FEA

A avaliação começa com uma análise detalhada das tensões atuantes no componente sob diferentes condições operacionais tais como velocidade nominal, velocidade atingida após uma rejeição de carga e velocidade de disparo. Essas tensões podem ser "transpostas" de uma velocidade para outras (por exemplo, da velocidade de disparo para a velocidade nominal), já que elas são dependentes apenas da velocidade.

A avaliação de tensões atuantes na fixação do polo é realizada por uma análise FEA à luz da geometria original, das propriedades do material e das condições de contorno. A geometria é geralmente obtida a partir dos desenhos dos componentes, mas também pode ser realizada por uma avaliação de campo no caso de indisponibilidade desses desenhos. A análise FEA pode ser realizada em modelos de duas ou três dimensões (2D ou 3D).

Apenas como um passo de filtragem, a realização de uma FEA elástica linear em 2D sobre a seção axial com a maior carga proporciona resultados rápidos e com precisão suficiente. Assume-se um comportamento elástico linear do material. A Diretriz FKM recomenda que o endurecimento e a plastificação do material não devem ser levados em conta para a avaliação de tensões baseada na FEA. Após a realização de estudos de FEA em 3D em diversas geometrias representativas, a FEA em 2D foi calibrada para diferentes parametrizações, distribuições de peso e efeitos axiais – tais como corpos de polos empilhados – proporcionando resultados de validade satisfatória.

A seção com a maior carga axial é geralmente a região da placa de pressão do polo. A placa de pressão do polo está sujeita à carga mais alta devido à saliência do enrolamento do rotor (Fig. 2). A posição da área de maior carga pode mudar de acordo com o projeto do gerador como, por exemplo, devido aos canais de ventilação na coroa do rotor.

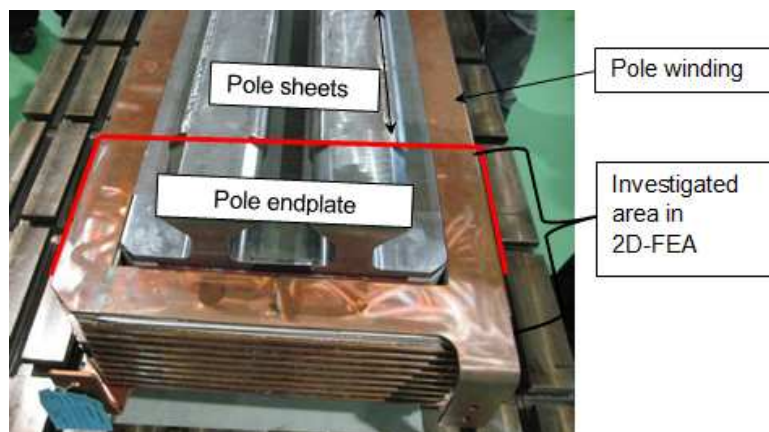


Fig. 2: Seção típica da placa de pressão dos polos do rotor

Entretanto, em algumas circunstâncias, caso os resultados da análise em 2D produzam resultados de avaliação marginais no tocante à expectativa de vida útil remanescente ou projetos especiais de polos ou da coroa, recomenda-se realizar uma análise em 3D que leve em consideração as características específicas do projeto em questão.

A lista a seguir apresenta uma série de tópicos para os quais foram realizados estudos de sensibilidade com o objetivo de melhorar a precisão da FEA:

- adaptação das condições de contorno da FEA em 2D a partir de diversos estudos detalhados de FEA;
- rigidez axial de corpos empilhados, tais como componentes de polos e da coroa do rotor;
- influência do esquema de empilhamento da coroa do rotor em tensões na ranhura de fixação do polo.

2.2 Avaliação de fadiga segundo a Diretriz FKM

Para se determinar o espectro admissível de cargas, as tensões elásticas lineares calculadas pela FEA constituirão os dados de entrada para a elaboração de uma curva S-N sintética baseada na Diretriz FKM. A curva S-N é ajustada levando-se em conta o material, o projeto e a carga de cada projeto; a utilização de propriedades de materiais realistas constitui um fator essencial para a realização de uma avaliação precisa da fadiga. Fatores importantes para essa adaptação incluem o tipo de material como, por exemplo, aço laminado, forjado ou fundido,

bem como as propriedades típicas do material, tais como ponto de escoamento, resistência à tração e alongamento até a ruptura. Se os certificados dos materiais estiverem disponíveis, as propriedades testadas do material são consideradas em uma reavaliação. Caso contrário, pode-se utilizar as mínimas propriedades especificadas. Essa informação geralmente pode ser encontrada nos desenhos. Na indisponibilidade desses dados, também existe a possibilidade de se definirem as propriedades do material por meio de testes específicos realizados em uma avaliação no campo. É possível, por exemplo, retirar amostras dos componentes para a realização de um ensaio de tração. Recomenda-se realizar um ensaio de dureza para confirmar as propriedades do material.

Características de projeto, tais como fator de gradiente de tensões e a rugosidade da superfície do componente analisado, têm influência na avaliação de fadiga e precisam ser conhecidos e devidamente considerados.

A adaptação pode ser realizada seguindo os parâmetros recomendados da Diretriz FKM. Em parcerias estreitas com universidades do mundo inteiro, foram realizados ensaios de fadiga em amostras redondas, chatas, polidas e ranhuradas, o que permitiu adaptar – ou ao menos confirmar – as premissas da Diretriz FKM com ensaios experimentais para os componentes e materiais específicos. Essas informações garantem maior precisão na adaptação das curvas S-N sintéticas às condições de contorno. Para alguns parâmetros especiais, os dados de entrada recomendados foram substituídos por resultados determinados estatisticamente a partir de ensaios. Esses parâmetros de entrada permitem adaptar a curva S-N e assim realizar a avaliação de fadiga baseada na Diretriz FKM, que determina o número admissível de ciclos até o início de uma eventual trinca.

3.0 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar os resultados da avaliação de fadiga de uma fixação de polo existente, é necessário comparar o espectro admissível ao espectro real de cargas (Fig. 3). Para o operador, isso proporcionará informações valiosas para a avaliação da situação de risco do respectivo gerador ou motor-gerador. Os eventos de partida/parada e de rejeição de carga à máxima velocidade de rotação são especialmente importantes de serem registrados ao longo da vida útil do gerador.



Fig. 3 Comparação entre o número de ciclos de carga admissível e real

Recomenda-se sempre a realização de um END assim que o espectro real de cargas exceder o máximo espectro admissível de cargas. Nos casos em que o espectro real de cargas do gerador não estiver disponível, pode-se realizar uma estimativa. Além disso, sugere-se considerar uma inspeção em alguns casos como, por exemplo, quando a unidade já estiver em operação por mais de 30 anos. Em outros casos, o resultado poderá ser utilizado para definir o próximo intervalo de inspeção para a fixação do polo do rotor.

3.1 Método de inspeção

Existem diferentes métodos de END para se inspecionar as partes mecânicas de um gerador. Em colaboração com o laboratório de ensaios alemão PWT (Prüf- und Werkstoffstechnik), desenvolveu-se um método de ensaio por partículas magnéticas (PM) específico para os componentes do rotor, já que nem todos os métodos de END podem ser utilizados para essa área da fixação do polo. Por exemplo, o ensaio por líquidos penetrantes (LP) acusará todas as folgas entre o polo e as lâminas da coroa do rotor. Este método não permite determinar uma trinca com grande segurança. A aplicação do ensaio por PM não tardou a demonstrar que mesmo esse método exige cuidados especiais. Sem o devido treinamento e as condições adequadas para o ensaio, as possíveis trincas não podem ser encontradas de forma confiável na área afetada. Dessa forma, é obrigatório contar com pessoal treinado e experiente para a realização dessas inspeções.

Caso se encontre uma indicação linear durante a inspeção, o desbaste da mesma poderá determinar se essa indicação é uma trinca, bem como sua possível profundidade. Esse é um processo iterativo: depois de um desbaste de 0,5 a 1 mm, o END é repetido. A iteração é repetida até não se encontrarem outras indicações. A profundidade final da trinca é determinada com uma borracha moldada que é pressionada contra a área desbastada e, depois da cura, é possível medir a impressão. Uma alternativa é um mapeamento dimensional por laser. Esse acompanhamento permite criar uma representação tridimensional da escavação de material e incorporá-la no modelo FEA para a realização de outros cálculos.

3.2 Possíveis soluções após a inspeção da fixação do polo

Depois do END, a condição da fixação do polo do gerador passa a ser conhecida. Isso permite definir os próximos passos para recolocar a máquina em funcionamento com intervalos de inspeção aceitáveis. Ao longo dos últimos

anos, foram desenvolvidas e executadas diferentes soluções para o prolongamento da operação das máquinas. Para um gerador com um potencial risco teórico, pode-se investigar possíveis soluções para dois principais cenários (Fig. 4):

- o gerador está em boa condição, sem indicações, ou
- o gerador apresenta indicações.

Nesse ponto, é recomendável elaborar cenários para as possíveis soluções de operação, reparo ou substituição antes de uma inspeção. Isso permite que os próximos passos sejam decididos imediatamente quando os resultados da inspeção estiverem disponíveis e o tempo de parada da unidade for reduzido a um mínimo (Fig. 4).

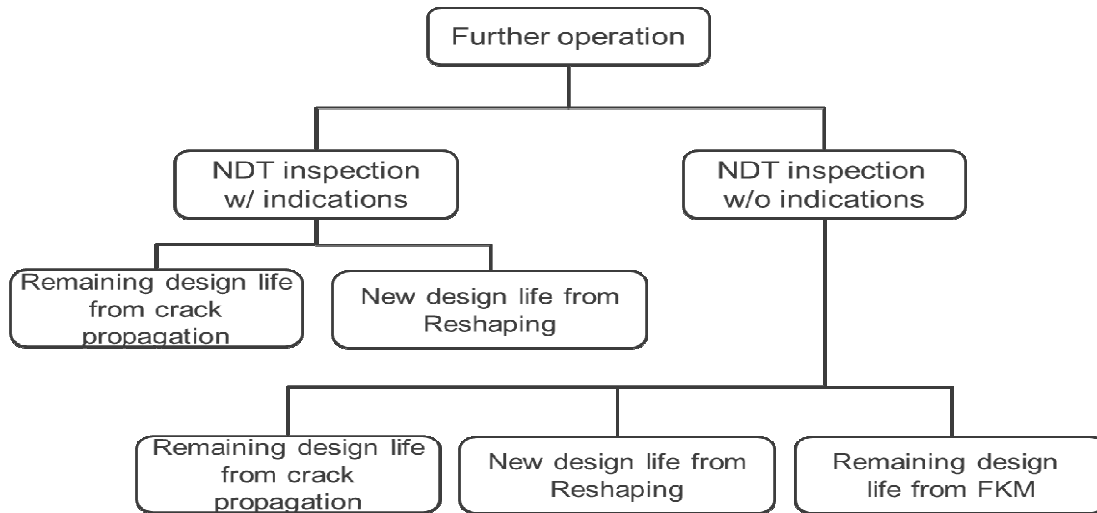


Fig. 4: Diferentes possibilidades para o prolongamento da operação de um hidrogerador

END com indicações:

Pode-se adotar duas principais soluções:

- remover o material que apresenta fadiga e trincas e gerar uma nova geometria. A isso chamamos de remodelação da área da fixação do polo. A faixa de aplicação dessa solução é limitada pelo máximo comprimento admissível da trinca, já que a seção remanescente após a remodelação deverá ser suficiente para também assegurar a integridade estática da unidade pelo período em que sua operação foi prolongada. O novo intervalo de inspeção é determinado aplicando-se a avaliação de fadiga recomendada pela Diretriz FKM para a nova geometria
- se a remodelação não puder ser realizada ou for indesejada, a análise de mecânica da fratura (propagação de trincas) poderá permitir o prolongamento da operação por um certo período. Neste caso, a máquina operará numa condição de crescimento controlado das trincas até que os componentes desgastados possam ser substituídos. A mecânica da fratura definirá o novo intervalo de inspeção.

END sem indicações:

Neste caso, o gerador poderá retomar a sua operação sem qualquer modificação contanto que o número de ciclos do gerador seja menor do que o máximo espectro admissível de cargas determinado pela avaliação de fadiga da Diretriz FKM. A próxima inspeção será necessária quando se atingir o máximo espectro admissível de cargas.

Caso o máximo espectro admissível de cargas ainda não tenha sido consumido, é possível aplicar os mesmos métodos que da situação de “END com indicações”. A vida útil projetada é alcançada e, para a análise, considera-se que uma trinca será iniciada nas próximas partidas da máquina.

3.3 Nova vida útil após a remodelação

Tanto para o caso de se encontrarem ou não indicações durante uma inspeção (Fig. 4), recomenda-se investigar a remodelação como uma solução de reparo de médio ou longo prazo para a fixação do polo do gerador. A remodelação envolve a remoção do material que apresenta fadiga e/ou trincas na fixação do polo, e especialmente na região das ranhuras com altas tensões atuantes - Fig. 5 e Fig. 6. O material removido é indicado com preenchimento preto. Até certo comprimento, pode-se remover as trincas e o material que apresenta fadiga por fressagem. A avaliação de resistência estática limita o comprimento admissível da trinca e, consequentemente, a quantidade máxima de material que pode ser removida. Além disso, o novo projeto pode ter suas tensões reduzidas e a superfície de contato da fixação do polo pode ser regularizada para uma melhor distribuição de forças, especialmente para componentes empilhados.

Em vários casos, é suficiente remover relativamente pouco material “fadigado” até se atingir o material “novo”. Dessa forma, a vida útil do componente é reiniciada após a remodelação. O processo de iniciação da trinca começa novamente, com a vantagem adicional de se ter um projeto com tensões reduzidas.

O estudo de remodelação começa com uma FEA em 2D e um processo iterativo para se descobrir a melhor solução, isto é, aquela que oferece o maior espectro de cargas possível. O trabalho prévio com a FEA em 2D reduz a duração da investigação. A solução mais adequada é então reavaliada em uma FEA em 3D.

A faixa de aplicação da remodelação é limitada pela avaliação de resistência estática. Realiza-se uma avaliação da resistência estática em conformidade com a Diretriz FKM para cada gerador. Em conformidade com a Diretriz FKM, o componente deverá resistir à carga estática máxima – e com o fator de segurança necessário – na seção transversal mais fraca (Fig. 5 e Fig. 6). Isso exige a realização de uma FEA em 3D elástica linear e elasto-plástica ideal linear. Para a FEA em 3D elasto-plástica ideal linear, utiliza-se o valor real do ponto de escoamento do material. Depois disso, realiza-se a avaliação de resistência à fadiga com base na Diretriz FKM para a nova geometria. De forma semelhante à avaliação das fixações do polo existentes, essa avaliação define o máximo espectro admissível de cargas até a realização da próxima inspeção.

O possível projeto de remodelação também deverá levar em consideração a factibilidade da fresagem. Devido ao seu formato especial, o desbaste da nova geometria poderá requerer a utilização de ferramentas especiais de fresagem. A aplicação dessas ferramentas poderá ser limitada em projetos de fixação de polos compactos, e precisará ser verificada minuciosamente. A fresagem do rotor e dos polos pode ser realizada com precisão tanto no campo como na fábrica. A posição radial dos polos será mantida por calços de ajuste do entreferro. Não se espera que isso tenha influência no sistema de corrente de excitação e na eficiência do gerador.

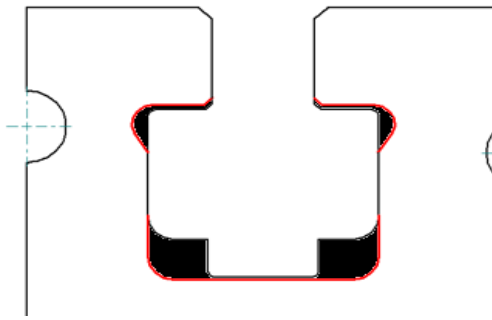


Fig. 5: Possível geometria para a remodelação do coroa do rotor

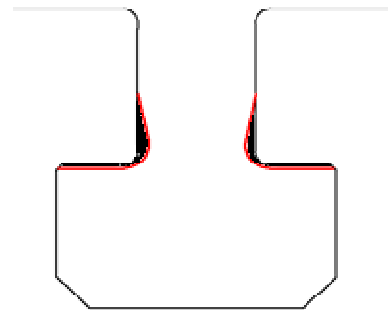


Fig. 6: Possível geometria para a remodelação do polo.

3.4 Vida útil de projeto remanescente a partir da propagação da trinca

Se forem detectadas trincas longas que não permitam a sua remoção pela remodelação durante a inspeção de uma unidade existente e com longo tempo de operação, a validação mais adequada de operação futura da unidade é obtida pelo cálculo da propagação da trinca. A fixação do polo do gerador será avaliada em conjunto com um parceiro independente, experiente e qualificado em mecânica de fraturas. O objetivo dessa avaliação é a definição do máximo comprimento crítico da trinca para os componentes da fixação do polo. Assim, será necessário realizar a FEA elástica linear e elasto-plástica ideal linear em 2D para definir a carga na ponta da trinca e a difusão da zona plástica (Fig. 7).

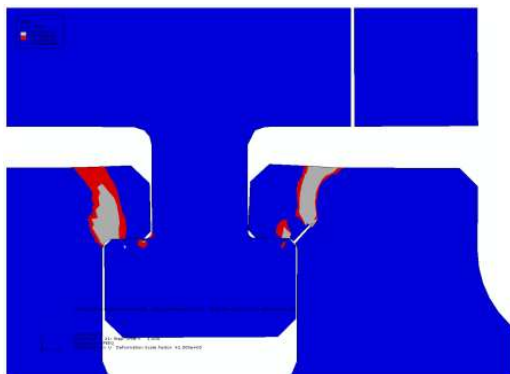


Fig. 7: FEA elasto-plástica ideal linear em 2D das fixações do polo - estudo de caso

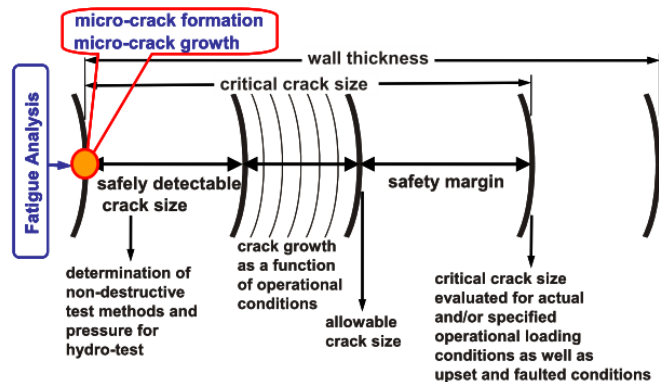


Fig. 8: Esquema do início e da propagação da trinca [2]

Por constituírem dados de entrada para o cálculo da propagação da trinca, as propriedades do material dos respectivos componentes da máquina precisam ser determinadas ou testadas. Tipicamente, aplica-se uma margem de segurança para o cálculo do tamanho admissível da trinca, conforme ilustrado na Fig. 8. Esse cálculo resulta em um número de partidas/paradas adicionais até que a inspeção precise ser repetida.

3.5 Vida útil remanescente a partir da avaliação de fadiga realizada de acordo com Diretriz FKM

No caso de a fixação do polo estar isenta de trincas após a inspeção e o fator de segurança mínimo definido pela Diretriz FKM ainda não ter sido atingido, a vida útil remanescente definida pela avaliação de fadiga estabelecerá o próximo intervalo de inspeção. A Diretriz FKM permite reduzir em ~10% o fator de segurança dos componentes inspecionados por END. Isso resulta em a um número adicional de ciclos de carga admissíveis até se atingir a vida útil. No caso de a fixação do polo estar isenta de trincas, mas o fator de segurança mínimo determinado em conformidade com a Diretriz FKM ter sido atingido, a próxima inspeção só poderá ser determinada por uma remodelação ou uma avaliação de mecânica da fratura.

4.0 - RESULTADOS TÍPICOS DA AVALIAÇÃO

Cada gerador é único. Não é possível utilizar o mesmo conceito de reparo detalhado para dois projetos diferentes. Uma avaliação individual da solução de reparo é essencial para cada projeto. Alguns resultados típicos são apresentados nos parágrafos a seguir com o objetivo de ilustrar tanto as possíveis descobertas proporcionadas pelo cálculo de tensões como as possíveis soluções após a inspeção.

4.1 Cálculo de tensões

Um projeto típico identificado para a avaliação de resistência pode ter um projeto de fixação do polo com duas pontas de fixação de 90°. O modelo CAD configurado para a FEA em 2D é ilustrado na Fig. 9. Os resultados (Fig. 10) apresentam elevadas tensões de pico nas ranhuras da fixação do polo da coroa do rotor e do polo. Além disso, o rasgo para a chave do polo também é muito tensionado.

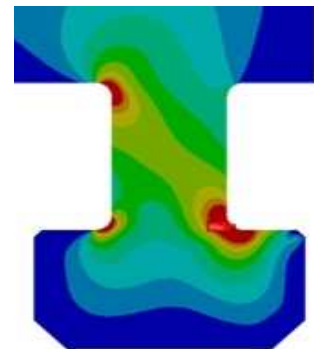
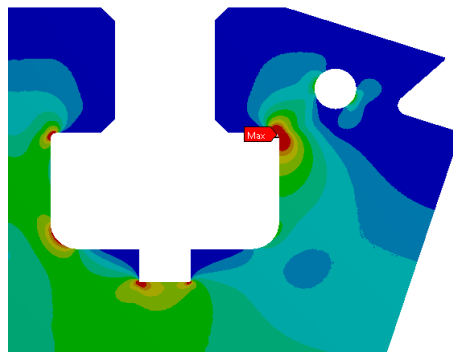
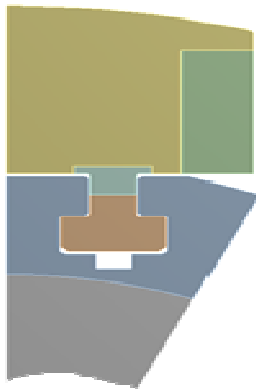


Fig. 9: Modelo FEA em 2D

Fig. 10: Equação de distribuição de tensões de v. Mises para a FEA em 2D

A Fig. 11 ilustra um modelo 3D de um projeto típico. As áreas altamente tensionadas nas ranhuras estão claramente visíveis na distribuição de tensões da FEA em 3D, conforme ilustrado na Fig. 12.

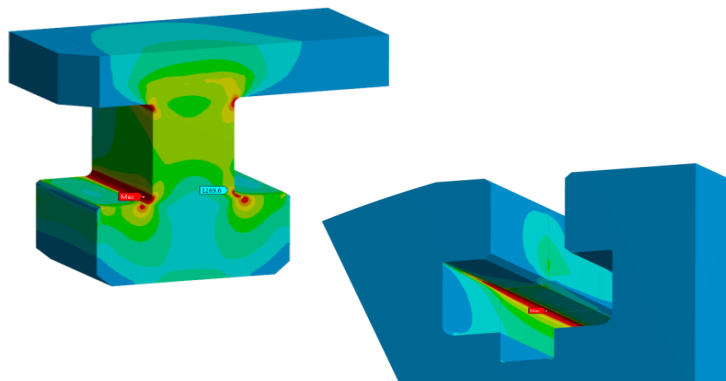
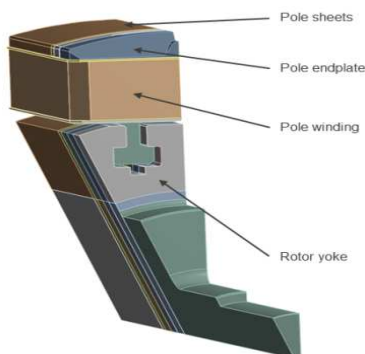


Fig. 11: Modelo AEF em 3D

Fig. 12: Distribuição de tensões de v. Mises para a FEA em 3D

A partir das tensões avaliadas, realizou-se a avaliação de fadiga da AEF em conformidade com a Diretriz FKM. O espectro de cargas do cliente excedeu o máximo espectro admissível de cargas. Nesse caso, recomenda-se a realização de um ensaio por PM na fixação do polo o quanto antes.

4.2 Resultados típicos de inspeções

Durante um ensaio por PM, é possível encontrar indicações típicas, conforme ilustrado na Fig. 13. O desbaste pode confirmar se essas indicações são trincas. A Fig. 14 ilustra uma trinca típica escavada na coroa do rotor para se definir o comprimento máximo da trinca.

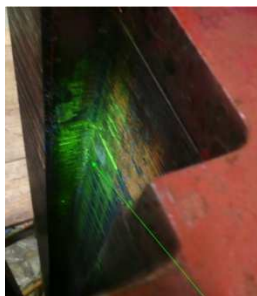


Fig. 13: Indicação típica de trinca após desbaste na área da coroa do rotor. Foto de detalhe observada por um espelho.

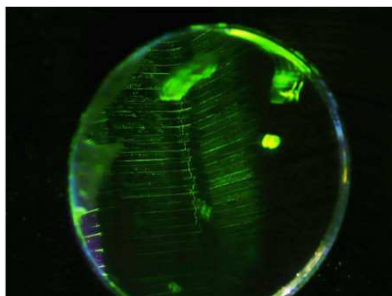


Fig. 14: Escavação típica de trinca na ranhura da coroa do rotor, ao lado da área de contato.

Um gerador com os resultados como os da Fig. 13 e da Fig. 14 não deve entrar em operação novamente.

4.3 Remodelação típica

As fotos a seguir ilustram exemplos de um trabalho típico de remodelação. A Fig. 15 ilustra a geometria original antes do desbaste do polo e da coroa do rotor. O resultado da remodelação está ilustrado na Fig. 6. As chavetas do polo foram adaptadas para não perturbar o fluxo magnético. Os calços para o posicionamento radial do polo foram colocados em frente da superfície de contato da fixação do polo com o objetivo de manter o entreferro existente do gerador.



Fig. 15: Geometria original da coroa do rotor e dos polos antes da remodelação pelo lado DE.



Fig. 16: Ranhura da coroa do rotor e ponta de fixação do polo após remodelação, com chaveta do polo ajustada e calço do entreferro.

A própria coroa do rotor foi usinada em três locais paralelamente no campo e na casa de força (Fig. 16). Isso garantiu um tempo de parada muito curto para o cliente. O peso do rotor era muito elevado para que ele fosse transportado até a fábrica. O rotor foi desbastado na superfície de contato e nas ranhuras da fixação do polo. Além disso, a ranhura da chaveta do rotor, que apresentava entalhes afiados, foi removida. O material existente da fixação do polo foi removido com ferramentas especiais de fresagem. O material foi removido e a superfície de contato na zona de transição dos raios até o pescoço na área das ranhuras das fixações do polo.

Em um projeto típico, esse tipo de projeto de remodelação pode remover trincas até a profundidade de alguns milímetros na coroa do rotor e no corpo do polo. O tamanho da trinca removida foi limitado pela seção transversal crítica do projeto original. Considerando o seu comportamento diário de operação, o projeto da remodelação garante mais de 40 anos de operação segura para o cliente.



Fig. 16: Usinagem da coroa do rotor no campo.



Fig. 17: Exemplo da usinagem de polo em fábrica da Voith Hydro para um projeto típico.

5.0 - CONCLUSÃO

Como líder no fornecimento de equipamentos hidrelétricos, a Voith Hydro vem prestando muita atenção à avaliação da fixação do polo por fadiga. Foi estabelecido um procedimento minucioso para a elaboração da avaliação de risco por computador não apenas relacionado à fadiga e à vida útil residual. Diversos geradores no mundo inteiro já foram investigados ou estão sendo atualmente investigados.

Onde a análise demonstrou uma elevada probabilidade de fadiga, recomenda-se a realização de um ensaio não destrutivo. Esse tipo de END especial precisa ser realizado por especialistas. Em um número significativo de casos em que a avaliação de resistência indicou um risco, detectaram-se trincas nos componentes da fixação do polo. Para o prolongamento da operação desses geradores, houve a necessidade de se realizarem medidas adicionais, como a remodelação. Todas as fases de avaliação e reparo exigem uma colaboração estreita com o cliente com o objetivo de se conseguir uma solução satisfatória para o prolongamento da operação das máquinas elétricas.

Os motivos do mecanismo de falha foram detalhadamente analisados após as recentes descobertas, e esse conhecimento valioso é considerado no processo do projeto de novas máquinas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FKM-Guideline, Analytical Strength Assessment of Components [Diretriz FKM, Avaliação analítica da resistência de componentes], Forschungskuratorium Maschinenbau, 6th Edition, VDMA Verlag, 2012
- [2] E. Ross et al, Design and Material Selection for Plants under Consideration of Fracture Mechanics Aspects [Projeto e seleção de materiais para instalações à luz de aspectos de mecânica da fratura], 35th MPA-Seminar, Stuttgart, 2009

DADOS BIOGRÁFICOS

(1) **Eng. Thomas HILDINGER**, graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP em 1983 e em Administração de Empresas pela Faculdade de Economia e Administração da Universidade de São Paulo – SP em 1989. Atualmente é diretor do Centro de Engenharia e Desenvolvimento da Voith Hydro.

(2) **Eng. Daniel LUDWIG**, graduou-se em engenharia mecânica pela Universidade de Ulm em 2010. No mesmo ano, juntou-se à Voith Hydro em Heidenheim como engenheiro projetista mecânico para hidrogeradores no Centro de Engenharia e Desenvolvimento da Voith Hydro.

(3) **Eng. Holger HENNING**, graduou-se em engenharia mecânica pela Beuth University of Applied Sciences [Universidade Beuth de Ciências Aplicadas] de Berlim em 1990. Trabalhou na Siemens Dynamowerk, em Berlim, como engenheiro projetista de máquinas elétricas especiais. Em 2001, juntou-se à Voith Hydro como gerente de projeto mecânico de hidrogeradores no Centro de Engenharia da Voith Hydro, em Heidenheim. Atualmente ocupa o cargo de Product Owner Generator na Voith Hydro.

(4) **Eng. Margit HAGMEYER**, graduou-se em engenharia civil em 2005 pela Universidade de Stuttgart. Em 2006, juntou-se à Voith como engenheira de aplicação hidráulica. De 2011 a 2014, esteve envolvida em diversas otimizações de pequenas e grandes unidades geradoras. Juntou-se recentemente à Voith Hydro Inc., em Montreal (Canadá), como Team Leader Engineer para Pequenas Centrais Hidrelétricas.