

## ANÁLISE DE FRATURA EM TURBINA HIDRÁULICA: UM REESTUDO DE FALHA OCORRIDA EM UMA TURBINA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU(UHI)

**Samuel Henrique Granero Dianin**  
Acadêmico de Engenharia Mecânica  
UNIOESTE - Foz do Iguaçu  
Foz do Iguaçu - Brasil

**Nora Díaz Mora, Dra. Eng.**  
LaMat - Laboratório de Materiais  
UNIOESTE - Foz do Iguaçu  
Foz do Iguaçu - Brasil

**Aldo Manuel Ramírez González, MSc. Eng.**  
Ingeniería de Mantenimiento - SMIM.DT  
Central Hidroeléctrica de Itaipu  
Hernandarias – Paraguay

### RESUMO

Durante a inspeção quadrienal da Unidade Geradora U06, da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI), realizada em outubro de 2010, foi detectada a existência de uma trinca em toda a seção transversal do anel de desgaste rotativo inferior da roda da turbina e também uma trinca passante na pá nº 11, com aproximadamente 600 mm de comprimento. Foram contratadas duas instituições para analisar a falha: o fabricante da peça e um laboratório independente. O fabricante sugeriu que a causa provável da fratura do anel de desgaste poderia ser atribuída a um evento excepcional na condição de operação da unidade geradora, conjuntamente com a presença de defeitos no material, enquanto que o relatório da análise fractográfica emitido pelo laboratório independente, atribuiu como causa da fratura o processo de fabricação das peças, especificamente quanto ao tratamento térmico de alívio de tensões nas juntas soldadas. A realização de ensaios mecânicos e análises metalográficas são de extrema importância na análise de falhas em dispositivos mecânicos. No entanto, os tipos de análises devem ser coerentes com o meio que a peça está inserida. Podemos destacar que a importância da caracterização metalográfica reside no fato de ser possível prever ou descrever o comportamento mecânico de um determinado material relacionando a micrografia, macrografia e composição às respostas desse material a um estímulo mecânico (propriedades mecânicas). Como exemplo, este tipo de ensaio permite verificar alterações micro estruturais, encruamento e dissolução, formação de fases precipitadas, defeitos decorrentes da fusão envolvida, tais como trincas, vazios de contração e outros. Entretanto, a comprovação da qualidade das soldas é obtida através de ensaios mecânicos específicos, normatizados principalmente pela norma ASME. Estes métodos atualmente consistem nas principais ferramentas para o controle de qualidade de materiais por serem simples, eficazes e relativamente baratos. Neste trabalho, desenvolvido em conjunto com a área de Manutenção da ITAIPU, é realizada uma análise das causas da fratura com base em ensaios complementares feitos em juntas similares do anel (não fraturadas), bem como na requalificação do procedimento de soldagem, de forma a consolidar e convalidar os resultados das análises já realizadas. Os ensaios previstos incluem ensaios não destrutivos, ensaios mecânicos e ensaios fractográficos buscando assim uma caracterização do tipo de material utilizado na fabricação dos componentes da Unidade Geradora U06 e as possíveis causas da fratura. São apresentados dados de alguns ensaios realizados e confrontados com as análises anteriores. Ainda, são indicadas análises complementares para elucidação do caso.

**PALABRAS CHAVES:** Anel de desgaste, turbina hidrelétrica, fratura, ensaios mecânicos, ensaios metalográficos, ensaios não destrutivos, trinca.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante a inspeção quadrienal da Unidade Geradora U06, da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI), realizada em outubro de 2010, foi detectada a existência de uma trinca em toda a seção transversal do anel de desgaste rotativo inferior da roda da turbina e também uma trinca passante na pá n° 11, com aproximadamente 600 mm de comprimento[1]. O parecer emitido pelo fabricante[2] sobre as causas das falhas está baseado em ensaios mecânicos e o mesmo é conflitante com aquele emitido pelo laboratório de pesquisa[3] contratado, o qual esta fundamentado em ensaios metalográficos.

A determinação das propriedades metalográficas das juntas soldadas de metais ou ligas permite verificar alterações micro estruturais, encruamento e dissolução, formação de fases precipitadas, defeitos decorrentes da fusão envolvida, tais como trincas, vazios de contração e outros. Entretanto, a comprovação da qualidade das soldas é obtida através de ensaios mecânicos específicos e normatizados[4]. Sendo assim, realizar conclusões baseando-se em apenas um tipo de ensaios pode levar a resultados dispares e pouco conclusivos.

Visto que, esses pareceres não chegaram a um diagnóstico unificado, neste trabalho foi realizada uma análise comparativa entre esses resultados usando como referência a norma ASME específica para qualidade de solda[4].

### 1.1 ANÁLISE TEÓRICA DE FALHA E DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Visto que já existem dois trabalhos, produzidos por instituições respeitadas, na tentativa de elucidar o caso da falha, foi primeiramente realizada uma exaustiva revisão bibliográfica. Onde, foi buscado identificar as possíveis lacunas que deveriam ser preenchidas para ter parâmetros que balizariam os testes que seriam executados. Foram identificados esses testes de forma que com a união dos relatórios existentes e a pesquisa desenvolvida pudesse ter-se uma justificativa para a falha na peça. Considerando que, estes pareceres não chegaram a um diagnóstico unificado, neste trabalho foi realizado uma análise comparativa entre esses resultados, usando como referência a norma ASME específica para qualidade de solda[4] e posteriormente delimitados os ensaios necessários para comparação de resultados e conclusões.

Os resultados obtidos pelo laboratório[3] apontam que a origem da falha seria no procedimento de soldagem e fabricação, não sendo oriunda de processo de fadiga. No entanto as análises realizadas [3] se restringiram a ensaio de microdureza, ensaio de micrografia e ensaio microfractográfico. Portanto pode ser observada a ausência de ensaios mecânicos e dinâmicos para a caracterização do material. Foram citados os limites à fadiga e resistência a tração com base nos dados tabelados do material, portanto eventuais mudanças na composição e nas propriedades do material após solda não teriam sido considerados.

Uma alternativa para complementar essa caracterização seria a realização da análise da liga metálica (utilizando um analisador de ligas) que detectaria qualquer alteração, mesmo que em distintas regiões, na composição da peça. Ainda, ensaios de tração, charpy e dobramento dariam parâmetros para o atual estado das propriedades mecânicas da peça que podem ter sido alteradas no decorrer do tempo pelo meio em que está inserida a mesma e pelos reparos e intervenções que sofreu durante seu uso. A falta de um *Databook* da peça valida a necessidade de ensaios para definir as reais propriedades mecânicas da peça.

Por outro lado a análise do relatório do fabricante[2], sugere que o anel de desgaste na fabricação que deveria ter passado por processo de normalização após a soldagem por 10 h a 530 °C, na prática foi realizado por 6 h a 550 °C, o que poderia ter levado a uma fragilização na solda. Para validação do processo de normalização alterado, foram realizados ensaios de tração na época da elucidação das causas de falha assim como também foram realizados os ensaios de charpy, dureza, macrografia e tração, no entanto apenas na junta fraturada, sendo obtidos resultados de dureza e tração que se apresentaram dispares em relação ao local da fratura (em tração) e em relação ao valor de dureza obtido pelo laboratório[3].

Portanto os ensaios realizados pela empresa na época de confecção da peça não caracterizam o processo de soldagem segundo a norma ASME[4] mais utilizada para este tipo de peça. Após os anos de uso a peça poderia ter as propriedades alteradas devido ao tempo e as condições de uso e pelas intervenções (soldagens posteriores e revestimentos). Ainda, foi obtida apenas a caracterização da junta que sofreu ruptura, ficando, portanto uma incógnita da situação das outras juntas e até mesmo das outras peças em uso na Usina.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com base nas necessidades identificadas acima, foram avaliados os tipos e formas de corpos de prova necessários para a realização dos ensaios. Todos os ensaios foram realizados seguindo as instruções da norma ASME[4]. A norma especifica os modelos, a quantidade e as dimensões desses corpos de prova assim como a realização dos ensaios e forma de análise dos resultados.

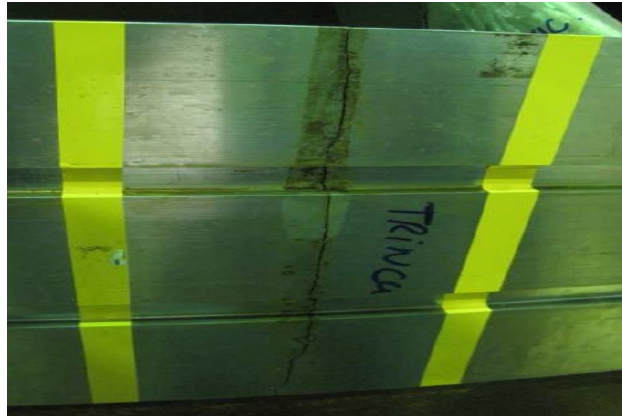
Contudo, antes de projetar e delimitar o procedimento de corte teve-se que analisar o anel por completo, para se definir o corte primário, o qual deveria incluir espaços para que se tivesse uma margem de segurança, garantindo que o corte não influiria nas propriedades dos corpos de prova, pela mudança de temperatura na superfície de corte, e que contivesse todas as regiões da peça a serem estudadas, incluindo a região de solda, a região termicamente afetada e o metal base.

O estabelecido foi que a partir da região de solda haveria 500mm para cada lado, ou seja, o comprimento do arco seria de 1000mm teoricamente (Figura 1), essa distância seria suficiente para satisfazer as necessidades exigidas e confeccionar todos os corpos de prova necessários.

Após a retirada da peça e identificação da trinca, conforme figura 2, foram realizados desenhos utilizando o software Solid Works® descrevendo detalhadamente cada uma das peças que seriam utilizadas nos ensaios (figuras 3 e 4).



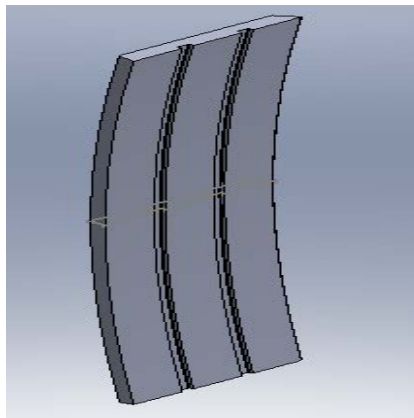
**Figura 1** – Retirada do Anel de Desgaste da maquina 06.



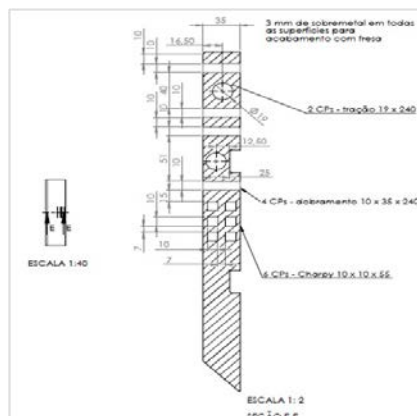
**Figura 2** – Identificação da trinca.

Estes desenhos contem todas as medidas e observações necessárias para que o corte pudesse ser feito sem a nossa supervisão, visto que o corte foi realizado na Oficina Industrial de ITAIPU por profissionais capacitados para a tarefa. Segue abaixo o detalhamento de cada corpo de prova.

Primeiramente foram retiradas 3 peças das juntas soldadas do anel, cada parte possui 1000 mm de comprimento simétricos com relação a solda. Nesta dimensão estão contidos todos os demais corpos de prova e a sobra de material devido às rebarbas do corte a laser e o acabamento em fresa posterior.



**Figura 3** – Corte do Arco Primário do Anel de Desgaste.



**Figura 4** – Corte exibindo os perfis dos corpos de prova.

É constatada a necessidade de uma continuação nas investigações sendo proposta neste trabalho a realização dos ensaios de dobramento, charpy, tração, e reproduzir o processo de soldagem para caracterização. Ainda, complementar a caracterização metalográfica via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e analisador de ligas, entre outras técnicas. Quanto à extensão das análises, pode ser inferido que existe a necessidade de que outras juntas e até mesmos outras peças (em uso) sejam analisadas, podendo-se utilizar dos ensaios não destrutivos para tais análises. Foi identificada a necessidade de aliar ensaios mecânicos e caracterização metalográfica, pois, é de extrema importância na análise de falhas em dispositivos mecânicos. No entanto, os tipos de análises devem ser coerentes com o meio que a peça está inserida.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado consiste de corpos de prova de aço Inox Martensítico retirados do metal base do anel de desgaste da unidade geradora 06. Foram retiradas ainda as juntas soldadas que não sofreram fratura do mesmo anel para as análises complementares. O corte de amostras foi realizado utilizando Cortadeira Metalográfica Pancut 40. Em segunda etapa foi realizado desbaste e Polimento mecânico das amostras – Lixadeira Manual com tampo inclinado e controle de água para resfriamento e limpeza, com granulometria de #220, #320, #400 e #600 utilizando uma Politriz Arotec Aropol 220V e pasta de diamante para desbaste. O corte foi realizado seguindo a norma para Preparação de materiais para micrografia ASTM e3-95 (1995). Análise da microestrutura das amostras após ataque químico em microscópio ótico sob luz refletida em microscópio ótico Olympus modelo CX41.

Utilizando um espectrômetro de emissão ótica (Analisador de ligas), marca ANACOM, modelo BILL-OES/B2/B2-ADVANCED, seguindo metodologia padrão de calibração do aparelho para plano analítico de aço inox, foi realizada a análise de ligas o material. A análise de durezas foi realizada em amostras retiradas do metal base, das juntas soldadas não fraturadas e das juntas ressoldadas submetidas à solda seguindo o procedimento original do projeto. Foram realizados ainda ensaios de dureza nos corpos de prova, medidos na escala Rockwell C com pré-carga de 150 kgf, utilizando penetrador de diamante em forma cônica. Foram realizadas quatro medidas em cada corpo de prova descartando a primeira.

Os ensaios de líquido penetrante (LP) foram realizados segundo o Código ASME, Seção V-Art. 6, para método e Seção VIII-div. 1-Ap 8 para critério de avaliação das descontinuidades. Para a análise pelo ensaio de ultrassom foi utilizado o equipamento Ap. Epoch III model 2300 (PANAMETRICS), bloco de referencia (40mm E FURO DE  $\varnothing 3,2\text{mm}$ ) padrão ASME, transdutores/probes SEB4H 0°(28,5+6db), WB45N2 45° (45+6db) e WB60N2 60°(46+6db). Os ensaios de ultrassom (US) foram realizados segundo

os critérios do Código ASME Seção V-Art. 5, para método e Seção VIII-div. 1-Ap 12, para critério de avaliação da solda.

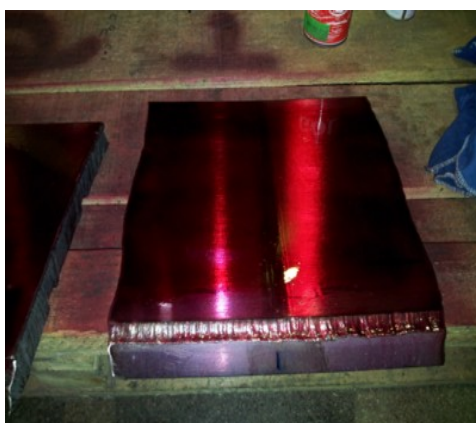
Os corpos de prova para os ensaios de tração foram usinados a partir de amostras retiradas da região do metal base isenta de solda, da região de solda e das amostras submetidas a requalificação do processo de soldagem. A confecção dos corpos de prova, a realização dos ensaios e a determinação das propriedades mecânicas serão feitas de acordo com a norma ASTM E 8M – 04[4].

As demais peças para ensaios como: dureza, micrografia, macrografia, análise de ligas foram cortadas a partir do material restante entre cada corpo de prova descrito. Visto que as dimensões dos corpos de prova utilizados nas análises metalográficas são inferiores aos demais, foram deixados entre cada peça uma quantidade de material suficiente para essas análises. O corte e preparação destas amostras foram posteriormente realizadas em bancada no laboratório de metalografia da Unioeste - Labmet.

### 3. RESULTADOS

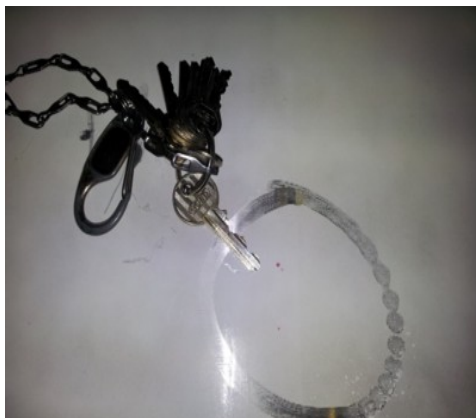
#### 3.1 Ensaio de ultrassom

Deve-se primeiramente destacar a importância da realização de ensaios de líquido penetrante: “o ensaio por líquidos penetrantes presta-se a detectar discontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc. Podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira”[5]. A realização do ensaio é dividida em 5 etapas: Limpeza Inicial da Superfície; Aplicação do Penetrante conforme figura 5; Remoção do Excesso do Penetrante; Revelação; Avaliação e Inspeção conforme figura 6, com destaque para as discontinuidades.



**Figura 5** – Aplicação do líquido penetrante.





**Figura 6** – Poros detectados por liquido penetrante.

### 3.2 Ensaio de ultrassom

Realizou-se teste por Ultrassom nas soldas dos corpos de prova com objetivo de detectar, localizar e dimensionar descontinuidade e ou falhas no metal depositado através do Ap. Epoch III model 2300 (PANAMETRICS), bloco de referencia (40mm E FURO DE  $\phi 3,2\text{mm}$ ) padrão ASME e transdutores/probes SEB4H  $0^\circ$  (28,5+6dbs), WB45N2  $45^\circ$  (45+6dbs) e WB60N2  $60^\circ$  (46+6dbs). Os ensaios de ultrassom (US), foram realizados segundo os critérios do Código ASME Seção V-Art. 5, para método e Seção VIII-div. 1-Ap 12, para critério de avaliação da solda[5].

### 3.3 Análise metalográfica

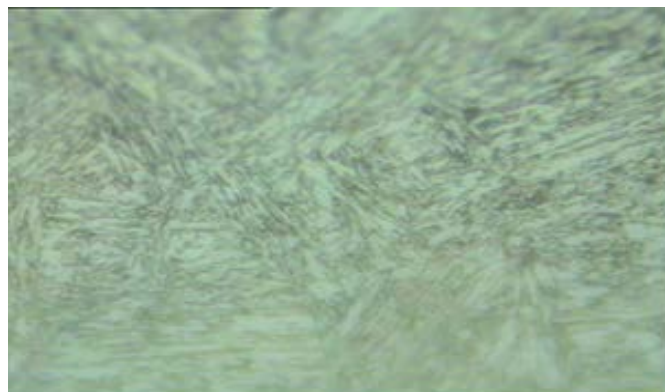
Os ensaios de macrografia não indicaram nenhuma anormalidade. Dos quais apenas pode ser percebida, na região próxima a solda, a existência da ZTA e do metal de adição com coloração distinta ao metal de base. Constatações que estão dentro da normalidade e concordam com as análises do laboratório independente[3] para a solda fraturada. Os ensaios de micrografia foram realizados para corpos de prova retirados das posições transversais e longitudinais das peças. Os corpos de prova foram devidamente preparados e posteriormente atacados com reagente apropriados para aços Inox(Reagente Villela). Foram analisadas as microestruturas com aumento de 100, 400 e 1000 vezes. Conforme pode ser isto na figura 8 e 9 a peça possui martensita, com grãos homogêneos. Na figura 7 é mostrada uma imagem na qual é possível ver o contorno de grãos da estrutura martensítica e inclusões alongadas (em branco) característico do processo de fabricação do anel. Contrastando com a bibliografia para aços inox martensíticos[6], nada pode ser encontrado de anormalidade.



**Figura 7** – Micrografia do aço Inox, ataque Villela, 100x.



**Figura 8** – Micrografia do aço Inox, ataque Villela, 400x.



**Figura 9** – Micrografia do aço Inox, ataque Villela, 1000x.

### 3.4 Análise de composição

Na tabela I são apresentados os resultados dos ensaios de composição química, dos mesmos pode verificar-se a elevada porcentagem de cromo e níquel característico dos aços inoxidáveis, ainda a quantidade de carbono presente é relativamente pequena, portanto as excelentes propriedades mecânicas da peça se devem aos elementos ligados. Destes resultados conclui-se que a composição da liga está de acordo com o material especificado para a peça (Aço Inox Martensítico), e difere apenas na quantidade de carbono dos



resultados anteriores, fato este que ainda não pode ser justificado e não foi possível encontrar qualquer relação com a fratura.

**Tabela I:** Composição do metal base.

C,%	Si,%	Mn,%	Cr,%	Ni,%	W,%	Mo,%	Ti,%
0.023	0.442	0.869	14.631	5.151	0.013	0.739	0.002
V,%	Nb,%	Co,%	P,%	S,%	Sn,%	Al,%	Cu,%
0.024	0.000	0.073	0.022	0.017	0.008	0.063	0.085
Ca,%	Zr,%						
0.000	0.001						

### 3.5 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza nos corpos de prova foram medidos na escala Rockwell C com pré carga de 150 kgf, utilizando penetrador de diamante em forma cônica. Foram realizadas quatro medidas em cada corpo de prova descartando a primeira. As durezas obtidas foram de 33 HRC e 34 HRC (equivalente a 327-336 HV), condizentes com as medidas de 378 HV (dureza vickers ou microdureza) obtido pelas análises anteriores. Podemos converter as escalas de durezas para ter uma ideia da ordem de grandeza das durezas envolvidas[6]. Portanto, destes resultados verifica-se que não há nenhuma anormalidade quanto a dureza dos corpos de prova.

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos ensaios não destrutivos e seguindo os critérios normatizados, não foram identificados defeitos para desqualificar a peça no ensaio de líquido penetrante, ou seja, que na superfície da peça não há descontinuidades capazes de interferir na fratura que ocorreu no anel de desgaste. Nos ensaios de ultrassom, por meio dos quais pode ter-se uma noção da presença de descontinuidades suficientemente grandes no total da peça, não foram encontradas anormalidades que poderiam influir na causa do começo da fratura ou mesmo a propagação da trinca.

Os ensaios de composição química, dureza, macrografia e micrografia, embora tenham permitido uma ampliação da caracterização do metal de base e das juntas não fraturadas da estrutura, não apresentaram indícios das possíveis causas da falha. Faz-se necessário contar com os resultados dos ensaios mecânicos e da caracterização de soldagem (em andamento) para poder correlacionar todos os dados e fazer uma análise que permita uma conclusão definitiva do caso em estudo.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1]MARRA, J. M.; RAMÍREZ, A. M. **Análisis de causas de las fisuras en el rodete de la turbina de la U06 de la Central Hidroeléctrica Itaipu.** In: SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO, 10., 2012, Asunción. **Anais...** Asunción - PY: CIGRÉ, set. 2012.
- [2]VOITH HYDRO. **Parecer sobre causa das trincas da UG06:** relatório técnico-científico. Doc. N°. 2TFV01-0103-01029313. 2012
- [3]BERNARDINI, P. **Análise das possíveis causas das trincas da roda da turbina da U06 da usina hidrelétrica da Itaipu.** Florianópolis: UFSC, 2011.
- [4] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME boiler and pressure vessel code:** qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. New York, 2002.
- [5] ANDREUCCI, R. **Ensaio não destrutivo por ultrassom.** Ed. Jan/2011.
- [6] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 2008.