

ANDRÉ MENDES CARNEIRO LYRIO

**ANÁLISE DE FALHA DE PALHETA DE TURBINA A VAPOR DE UMA
TERMELÉTRICA**

**SÃO PAULO
2007**

ANDRÉ MENDES CARNEIRO LYRIO

**ANÁLISE DE FALHA DE PALHETA DE TURBINA A VAPOR DE UMA
TERMELÉTRICA**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Áreas de Concentração:
ENGENHARIA METALÚRGICA
ANÁLISE DE FALHAS

Orientador: Prof. Dr. Cesar Roberto de
Farias Azevedo

SÃO PAULO
2007

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cesar R. F. Azevedo, pela orientação, constante estímulo e por proporcionar um trabalho que em sua execução me agregou muito conhecimento.

Ao meu pai Nilton Lyrio Júnior e à minha mãe Sandra Mara Mendes Carneiro Lyrio que me proporcionaram todas as condições possíveis não só para ingressar na faculdade, mas também proveram todo o suporte necessário durante o curso.

Aos amigos Gabriel "Lucas" Rubin de Lima, Pedro "Jacaré" Garcia Lins, Gerson Shimada, André "R.H." Hirano, Fausto Caires, Daniel Fridman, Marcelo "Paraíba" Arruda, Cristiane Reis Ide, Ricardo "Ferrari" Casciato Carlini, Renato Nazário Ide, Fernando Kameoka, André "Babi" Camargo, Robin Taffin, Rafaelle "Fausto" Alves, Dennis "Pimpa" Yonashiro Bocuzzi, José "Zélão" Adriano Oliveira e Mariana Perez de Oliveira que tornaram minha trajetória acadêmica uma experiência única, além de terem me dado suporte por diversas vezes em situações que me possibilitaram chegar à etapa final da graduação, a realização deste trabalho.

RESUMO

O cenário do setor energético nacional aponta para um grande crescimento da importância das termelétricas na matriz energética elétrica brasileira, sendo que hoje já representam 21% da potência instalada no país. Este trabalho trata da análise de uma falha prematura em palhetas de turbina a vapor de uma unidade geradora termelétrica, que causou um efeito “dominó” e retirou a turbina de operação. Foram analisados os resultados de: inspeção visual, ensaios não destrutivos, ensaios macro e microfractográficos, caracterização microestrutural, micro análise química EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), ensaios de microdureza, ensaios de tração e de análise química convencional. Concluiu-se que a causa principal da falha das palhetas de aço inoxidável martensítico foi erosão por particulado sólido exógeno (partículas de ferro) junto à raiz do bordo de fuga, que promoveu a nucleação de trincas por fadiga. A propagação das trincas de fadiga foi favorecida principalmente por vibração axial durante a operação da turbina em regime transitório. A origem das partículas exógenas não foi determinada.

ABSTRACT

The premature failure of steam turbine generator blades, belonging to thermoelectrical power generator unit, was investigated and the following tests were carried out: visual inspection, non destructive testings, macro and microfractography microstructural characterization, EDS microanalysis, chemical analysis, micro hardness and tensile testing. The share of the thermoelectrical energy in the Brazilian energy matrix has increased significantly over the recent 10 years, representing today more than 20% of the energy supply of the country. The results indicated that the failure was caused by foreign particle erosion, which took place preferentially at the trailing edge root. The resulting surface irregularities promoted the nucleation of fatigue cracks, whose propagation was favoured by the axial vibration, which took place during the transient operation mode.

SUMÁRIO

1. Introdução	6
1.1. Falhas em palhetas de turbinas	12
2. Procedimento experimental	21
2.1. Ensaios realizados pelo LMAF-IPT	24
2.2. Metodologia do presente trabalho	25
3. Resultados e discussão	27
3.1. Inspeção visual	27
3.2. Exame macrofractográfico	32
3.3. Exame microfractográfico	39
3.4. Metalografia	50
3.5. Discussão geral	56
4. Conclusão e sugestões	60
5. Bibliografia	61

1. Introdução

Nos dias de hoje um conceito globalmente discutido e defendido é o de sustentabilidade, que define uma atividade que permita sua própria perpetuação senão a perpetuação de outras atividades locais sem prejudicar de modo irreversível o meio ambiente. O resultado desse foco é a busca por fontes alternativas de energia, fontes limpas e/ou renováveis de energia.

Com isso a energia hidrelétrica, nuclear e da biomassa se mostram bastante interessantes. No caso da energia nuclear apesar de ser apresentada como uma alternativa limpa há o grande problema relacionado à sua segurança, pois por menor que seja a probabilidade de um evento de falha acidental, ou não, as consequências podem ser extremamente desastrosas. [1]

Nesse cenário o Brasil se encontra em uma posição confortável, com a maior reserva de recursos hídricos do mundo, 8,2 km³/ano contra 4,5 da Rússia [2] que é o segundo, apesar de não ser o maior explorador, mas sim o quarto, atrás de EUA, Canadá e China, também com o grande avanço tecnológico no uso dos biocombustíveis, assumindo papel importante no mercado de etanol e provavelmente no de biodiesel.

Apesar de tais vantagens o Brasil não segue tais rumos. Com o racionamento energético de 2001 foram implantados planos de urgência para se expandir a matriz energética elétrica, com isso criou-se o “novo modelo energético nacional” [2,3] e os “leilões de energia” [2,3]. O resultado destes leilões, dada a urgência por energia elétrica, foi o favorecimento das termelétricas pelo seu tempo reduzido de implantação e início de funcionamento e sendo assim a maioria da energia comercializada.

O uso de termelétricas está na contramão da tendência atual, pois com a sua utilização aumenta a emissão de gases estufa além de outros problemas do ponto de vista ambiental. A matriz energética elétrica brasileira atual é ilustrada na tabela 1 abaixo:

Empreendimentos em Operação							
Tipo		Capacidade Instalada		%	Total		%
		N.º de Usinas	(kW)		N.º de Usinas	(kW)	
Hidro		648	76.712.289	76,81	648	76.712.289	76,81
Gás	Natural	76	10.237.724	10,25	106	11.290.442	11,30
	Processo	30	1.052.718	1,05			
Petróleo	Óleo Diesel	563	2.894.272	2,90	584	4.336.326	4,34
	Óleo Residual	21	1.442.054	1,44			
Biomassa	Bagaço de Cana	232	2.816.701	2,82	276	3.874.675	3,88
	Licor Negro	13	794.817	0,80			
	Madeira	26	224.207	0,22			
	Biogás	2	20.030	0,02			
	Casca de Arroz	3	18.920	0,02			
Carvão Mineral	Carvão Mineral	7	1.415.000	1,42	7	1.415.000	1,42
Nuclear		2	2.007.000	2,01	2	2.007.000	2,01
Eólica		15	236.850	0,24	15	236.850	0,24
Total		1.638	99.872.582	100	1.638	99.872.582	100

Tabela 1: Matriz energética brasileira Julho/2007 – ANEEL [4]

O Brasil possui no total 1.638 empreendimentos voltados à geração de energia elétrica em operação, gerando 99.872.602 kW de potência, dos quais as usinas termelétricas correspondem a praticamente 21% de toda a potência gerada no país, revelando sua atual importância no cenário energético nacional.

Ao se diferenciar os diversos tipos de usinas termelétricas existentes, pode-se dividí-las em basicamente dois tipos: as “a gás” e as “a vapor”. A diferença primária entre elas está no fluido irá acionar a turbina. A primeira utiliza os fumos da queima do combustível para o acionamento da turbina, enquanto a segunda utiliza o a

queima combustível como fonte de calor e utiliza o calor para gerar vapor d'água e esse aciona a turbina. Podem-se observar as partes principais do funcionamento de uma usina termelétrica, de maneira extremamente simplificada, na figura 1.

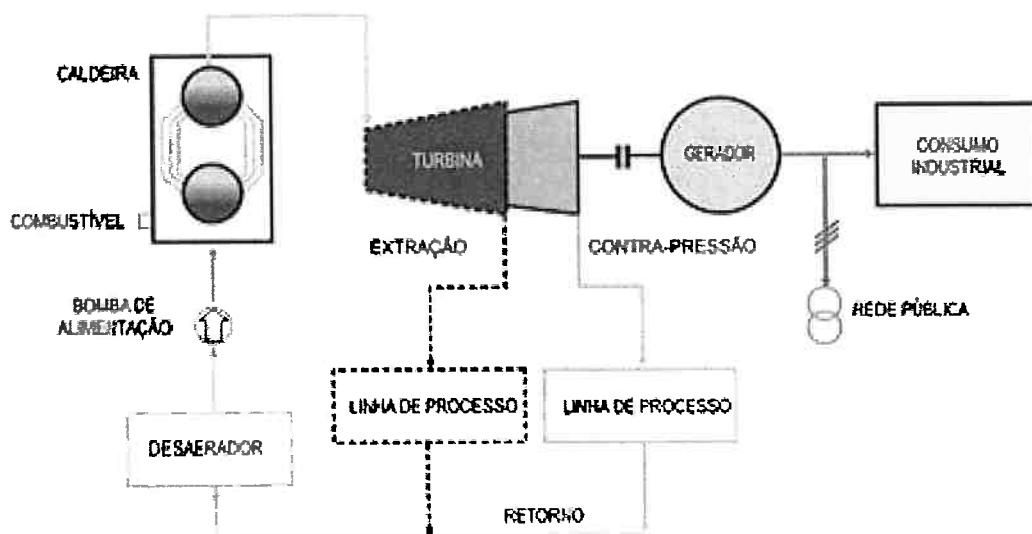


Figura 1: Esquema de usina termelétrica a vapor

O combustível é queimado, o calor liberado é utilizado para aquecer a caldeira e nela produz-se o vapor, esse é canalizado e conduzido até a turbina. Com o fluxo de vapor a turbina é acionada. A turbina pode ser definida como um motor a calor no qual se transforma a energia contida no vapor, em energia cinética [5]. O eixo da turbina é acoplado a um gerador, que converte a energia cinética em energia elétrica. Depois o vapor segue para um condensador e posterior tratamento (linha de processo).

Em geral turbinas de termelétrica operam com fluxo único de vapor, basicamente o vapor entra por um lado e sai pelo outro seguindo para o condensador (vide figura 2). Uma turbina pode possuir diversas configurações de estágios (seqüências de palhetas), sendo todos eles acoplados ao mesmo eixo. Em

turbinas de termelétrica, onde se objetiva a maior eficiência, o vapor é alimentado a alta temperatura e alta pressão e sai da turbina a baixa pressão. Devido ao aumento de volume do vapor se utilizam palhetas pequenas nos primeiros estágios e palhetas grandes nos últimos (vide figura 3) [5].

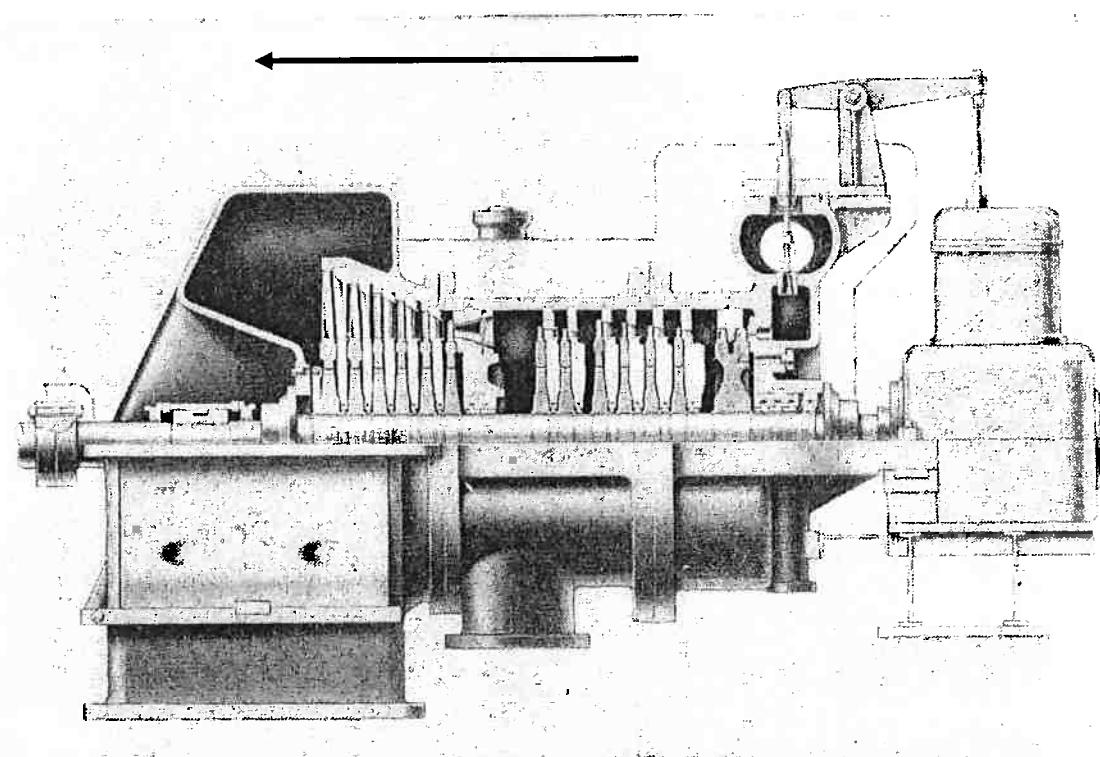


Figura 2: Diagrama de uma turbina, visão lateral. Palhetas acopladas aos rotores de um mesmo eixo. Sentido do fluxo do vapor indicado pela seta. [5]

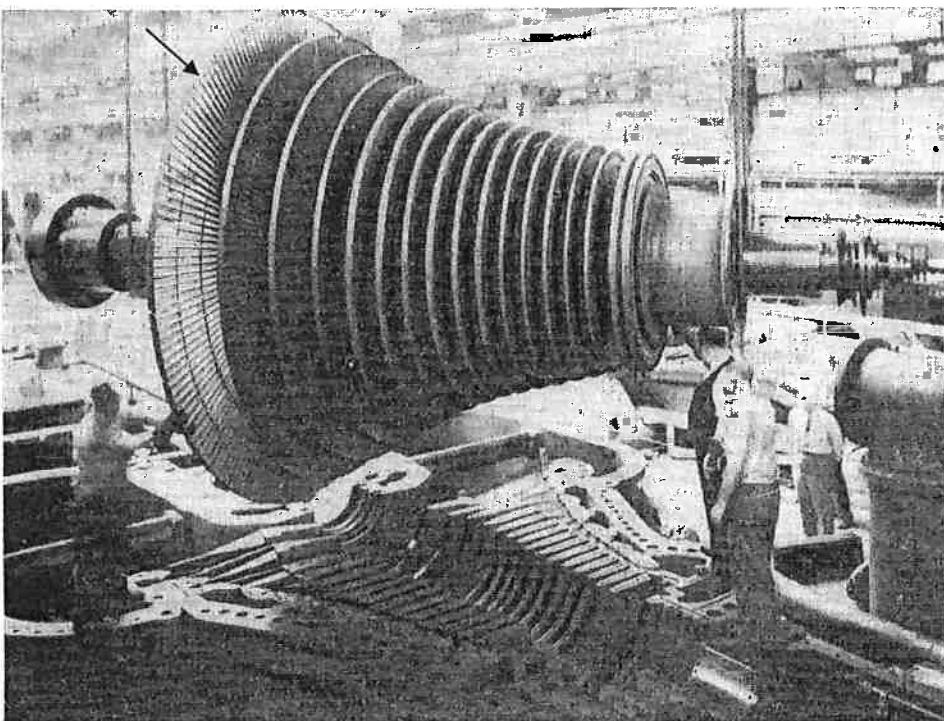


Figura 3: Estágios uma turbina desmontada, último estágio indicado pela seta [5]

Neste presente trabalho foi analisada uma falha que ocorreu em uma turbina a vapor de uma termelétrica de 140MVA. A turbina operava normalmente até a ruptura das palhetas do último estágio da turbina impedindo sua operação. Do total de 65 palhetas, 17 estavam quebradas.

Uma palheta tem partes definidas, ao observar seu perfil bordo de ataque (leading edge), que corresponde o local onde a palheta é atingida pelo fluxo, e bordo de fuga (trailing edge), local de saída do fluxo (vide figura 4). Ao longo de seu comprimento: raiz (root), meia altura (mid-height) e ponta (tip) (vide figura 5). O fluxo de vapor deve estar perfeitamente alinhado com o bordo de ataque, pois assim se reduz a perda de carga devido à variação brusca de direção [6]. Por isso se utilizam lâminas fixas entre cada estágio de palhetas da turbina (vide figura 6). Ao longo do comprimento da palheta a velocidade aumenta (uma vez que a velocidade angular é constante ao longo da palheta), sendo assim o ângulo de ataque deve aumentar ao

longo do comprimento da palheta para satisfazer tal necessidade (perfis observados na figura 5).

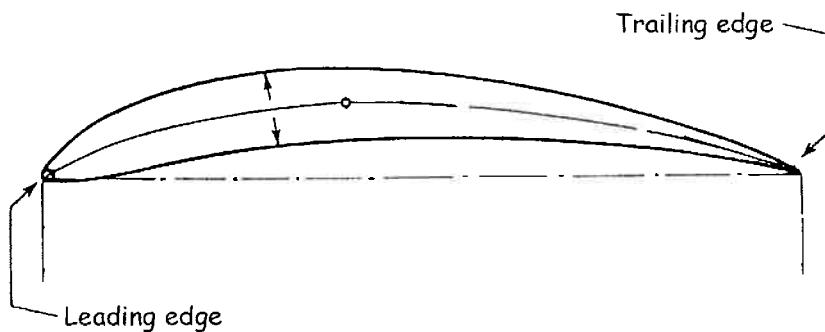


Figura 4: Perfil comum de uma palheta, indicados o bordo de ataque (leading edge) e o bordo de fuga (trailing edge) [6]

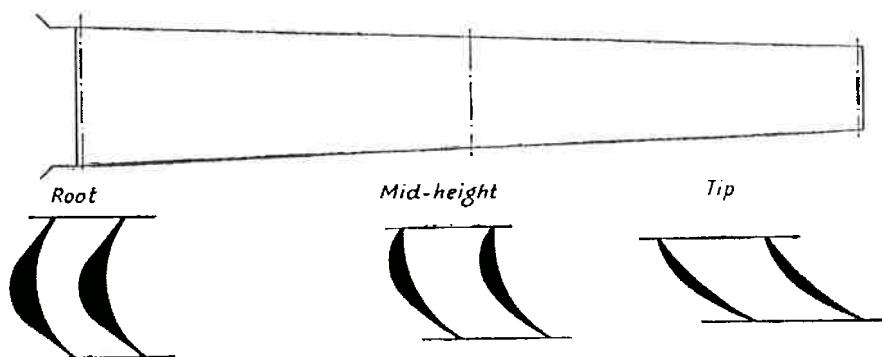


Figura 5: Perfis diferenciados ao longo do comprimento de uma palheta [6]

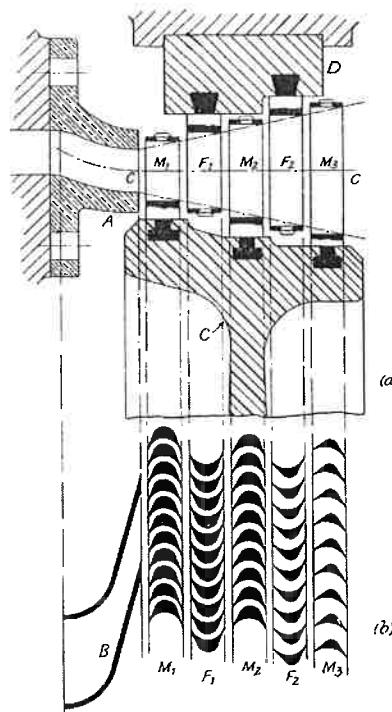


Figura 6: Exemplo do sistema de redirecionamento do fluxo de vapor - (a) visão lateral; (b) perfis das partes indicadas. A – bico alimentador, B – perfil do bico alimentador, C – rotor, D – carcaça, M_i – palhetas e F_i – lâminas fixas de mudança de direção de fluxo [6]

1.1. Falhas em palhetas de turbina

Como este trabalho trata de uma falha em serviço, torna-se interessante definir o termo “falha”. A falha de uma parte, peça, ou conjunto de peças, pode ser caracterizada quando a parte em questão atende a pelos menos uma das três características [7]:

- *Quando se torna totalmente inoperante;*
- *Quando ainda opera, mas não realiza sua função de maneira satisfatória;*

- Quando devido à deterioração seu uso se torna não confiável ou inseguro para uso continuado.

Mesmo que o componente não frature, pode ser considerado que falhou caso sofra deformação, pois acabará se enquadrando em uma das três características supracitadas, como por exemplo, uma viga de uma ponte, caso deformar tornará seu uso continuado inseguro e sendo assim pode ser considerada que falhou mesmo antes de fraturar ou causar outros tipos de falha em sua estrutura.

As causas mais comuns de falhas em engenharia são [7]:

- Desenho deficiente: quando o desenho da peça é deficiente para dada operação revelando pouco esforço de engenharia para evitar características no desenho que conduzissem à falha prematura. Às vezes mudanças no desenho sem dar a devida atenção a concentradores de tensão pode resultar em falhas também.
- Deficiência na seleção do material: a seleção do material deve levar em conta os aspectos dimensionais e geométricos do projeto, quando considerações inadequadas são realizadas o material pode ser selecionado de maneira subdimensionada e acarretar em falha.
- Imperfeições na peça: muitas falhas se originam em imperfeições, tanto internas quanto superficiais, pois podem acabar por reduzir a resistência média do material, promovendo assim caminhos preferenciais para a propagação de trincas, como entalhes (concentradores de tensão), ou sítios preferenciais de corrosão por pite, ou corrosão intergranular.
- Processamento incorreto: Às vezes a susceptibilidade à fratura está relacionada à especificação de processamento inadequada, mudanças na

especificação sem total avaliação, especificações ambíguas, não seguir às especificações, ou erro/dano accidental na peça por parte do operador no processo de manufatura da peça.

- Erro de montagem: a falha pode ser ocasionada por um erro de montagem não observado pelo fabricante, ou cliente, e sendo assim o equipamento é posto em uso. Esse tipo de equívoco causa a falha prematura principalmente de partes móveis por acarretar em esforços de vibração que não estavam previstos no projeto.
- Uso inadequado: o uso do equipamento em condições anormalmente severas de velocidade, carregamento, temperatura e meio, ou pelo menos sem freqüente manutenção preventiva, ou inspeção, é uma das causas mais freqüentes para a ocorrência de falhas em serviço.

Gallardo et alli [8] estudaram a falha de palhetas de turbina a gás após 10.500h de serviço, sendo a vida útil prevista para 40.000h. A turbina operava a gás natural e ar filtrado, as palhetas foram fabricadas utilizando-se uma superliga de níquel, CMSX-4. Ao realizarem a inspeção visual, os autores observaram grande perda de material nas pontas das palhetas, principalmente no bordo de ataque, como se pode observar na figura 7. Também foram observadas marcas de desgaste no trilho¹, indicando ocorrência de fricção entre trilho e palhetas devido a um desalinhamento entre o eixo da turbina e a carcaça. A composição química e a microestrutura das palhetas e de seu revestimento estavam dentro das especificações. O material do trilho, no entanto, estava fora das especificações (se esperava uma liga de níquel se encontrou uma liga de cobalto). Esta montagem deficiente provocou fricção pelo uso de material com coeficiente de expansão térmica maior do que o especificado. Por

¹ rail - trilho: local da carcaça da turbina que serve como guia por onde passam as pontas das palhetas [9]

fim concluiu-se que a falha das palhetas ocorreu devido inicialmente ao desgaste, que levou à remoção do material de revestimento das palhetas, que levou finalmente à perda acentuada de material por corrosão em alta temperatura.

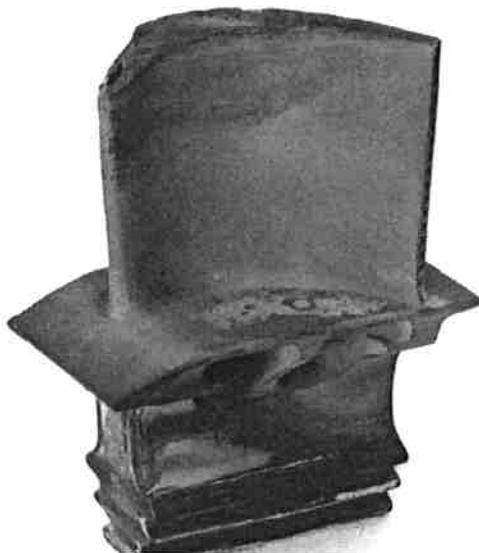


Figura 7: Palheta apresentando desgaste em sua ponta [8]

Wang et alli [10] estudaram a falha de palhetas do último estágio de uma turbina a vapor, onde em uma inspeção de rotina, após 13200h de serviço, foram identificadas trincas nas palhetas. As palhetas foram fabricadas a partir de um aço inox martensítico com 12% de cromo e tiveram tratamento modificado com o objetivo de melhorar a resistência à erosão, sendo o bordo de ataque temperado a 1020°C e revenido a 400°C (vide figura 8).

Foi realizada inspeção visual, ensaios não destrutivos (líquido penetrante), caracterização microestrutural, análise macro e microfractográfica, microanálise química (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy) e ensaios mecânicos.

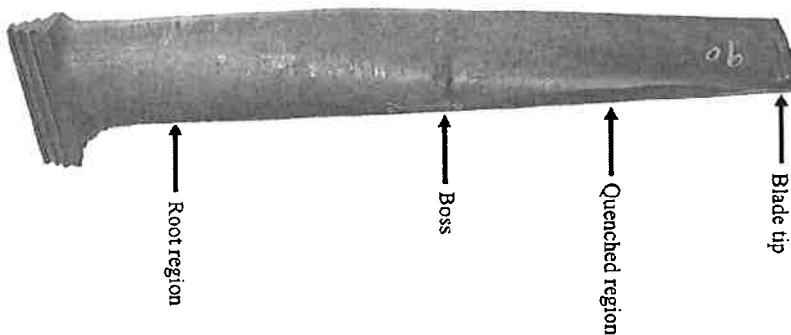


Figura 8: A palheta em detalhe [10].

Durante a inspeção visual notaram que as trincas se apresentavam justamente na região temperada, porém não se estendiam além dessa região. Observou-se também que a região havia sofrido erosão, porém as trincas encontradas não estavam relacionadas com as cavidades de erosão. Foi realizada microanálise química do material, na região da base da palheta comprovaram que sua composição estava dentro das especificações, porém na região da trinca o resultado indicou a presença de oxigênio. A análise microestrutural também comprovou que o material estava dentro das especificações, sem comprovação de mudança na microestrutura martensítica desejada, resultado esperado pelos autores devido à temperatura de trabalho de 150°C (vide figura 9). A análise macrofractográfica revelou marcas de praia e estrias radiais indicando que se tratava de uma trinca por fadiga (vide figura 10).

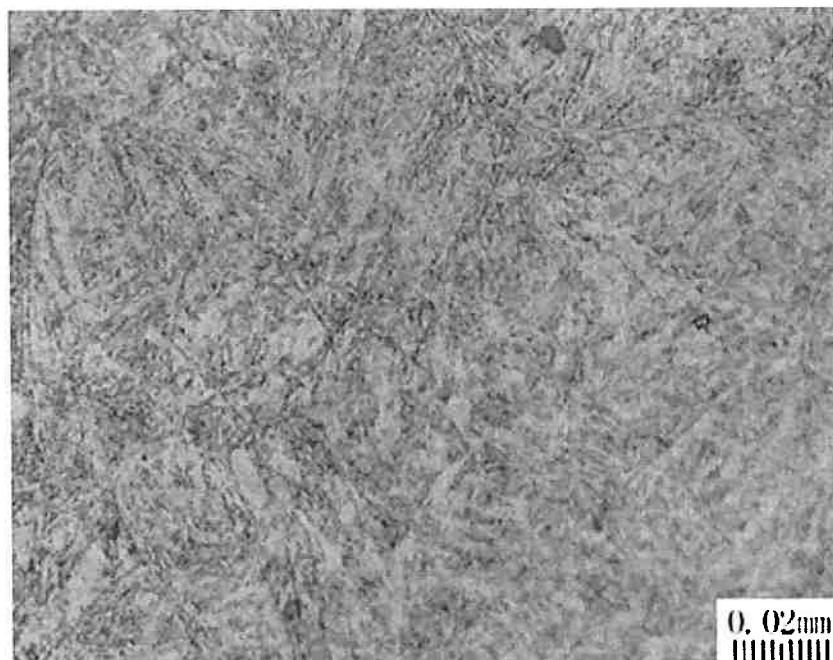


Figura 9: Microestrutura martensítica (região temperada) [10]

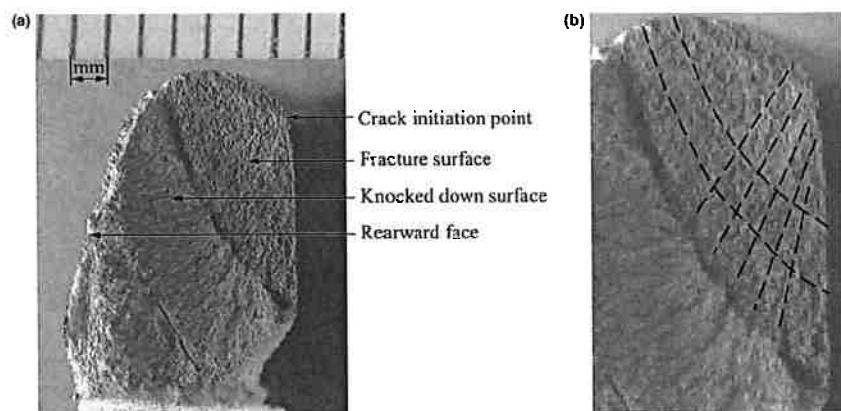


Figura 10: Local de início da fratura, marcas de praia [10]

Os ensaios mecânicos revelaram que apesar da dureza estar dentro das especificações, o alongamento, redução de área e resistência ao impacto apresentaram valores abaixo das especificações para a região que foi temperada.

Verificou-se também que a posição de origem das trincas não só coincidia com a região que sofreu o tratamento térmico, como também se trata de um local onde há uma saliência.

Por fim concluiu-se que a trinca se iniciou devido ao tratamento térmico inadequado associado a um detalhe geométrico do projeto, que agiu como concentrador de tensões, as marcas de praia indicam que a propagação da trinca se deu por fadiga possivelmente associada à corrosão devido à presença de oxigênio na região da trinca.

No caso estudado por Rossette et alli foi analisada a falha das palhetas do último estágio de uma turbina a vapor de uma instalação geotérmica de 110 MVA. As palhetas fabricadas em aço inoxidável martensítico AISI 410 falharam após um ano de operação em serviço, se encontravam torcidas (vide figura 11).

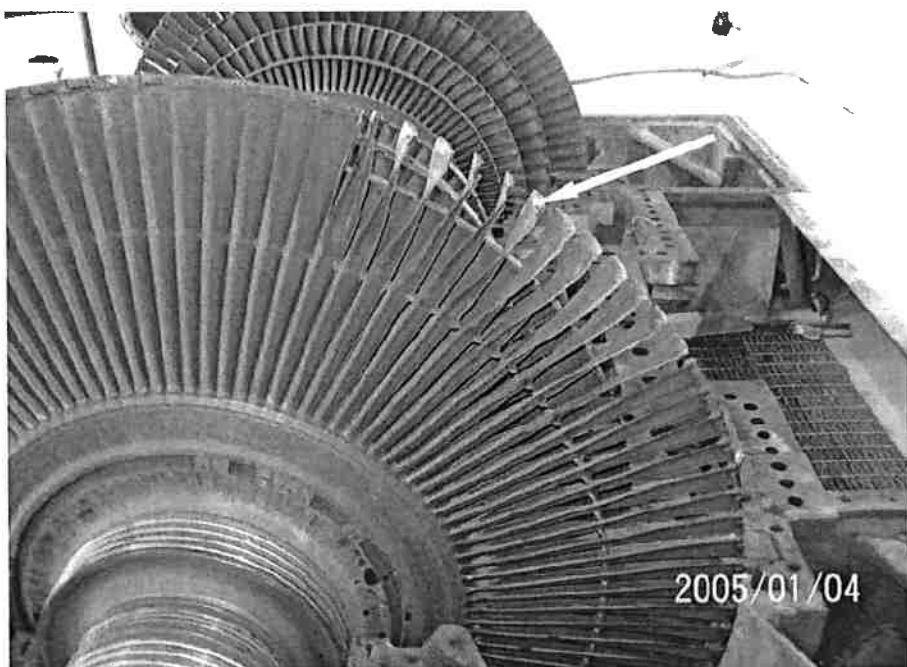


Figura 11: Último estágio da turbina, palhetas torcidas. [11]

A investigação foi realizada através de inspeção visual, microfractografia, análise química, análise de tensões e vibração através de método de elementos finitos e cálculos de propagação de trincas.

Durante a inspeção visual perceberam que os segmentos estabilizadores, fixados às pontas das palhetas, haviam se desprendido das palhetas torcidas e se encontravam fraturados. A composição química e a microestrutura tanto das palhetas quanto dos segmentos estavam dentro das especificações. Observaram que os segmentos fixados às pontas das palhetas fraturaram por fadiga e se destacaram. Através dos cálculos realizados através de método de elementos finitos perceberam que o destacamento desses segmentos causou uma mudança drástica no comportamento das palhetas quanto à vibração. Segundo o registro de operação da turbina verificaram que houve operação em condições de baixa carga/baixa pressão devido a uma parada de funcionamento da turbina. Tal tipo de operação em regime transitório resulta em vibração e consequente variação nos esforços mecânicos aos quais as palhetas são submetidas devido à instabilidade no fluxo de vapor (vide figura 12). Após a análise das características dinâmicas das palhetas concluíram que a trinca por fadiga se deu justamente durante o regime transitório.

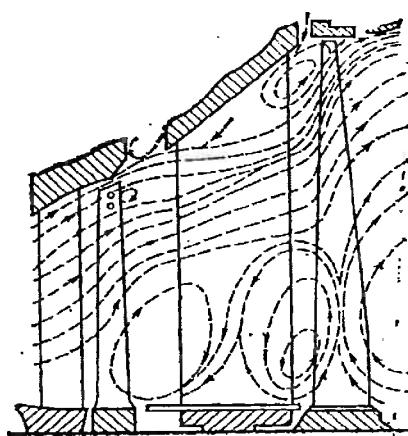


Figura 12: Fluxo de vapor em baixa carga/baixa pressão [11]

Foi estudado por Illescas et alli [12] uma falha em palhetas do último estágio de uma turbina a vapor onde foram encontradas trincas de fadiga na base do bordo de fuga das palhetas. Concluindo que a causa da nucleação das trincas estava diretamente associada à operação da turbina em regime transiente com baixa pressão. Onde foram constatadas vibrações elevadas nesses períodos de operação.

Um outro problema encontrado na operação de turbinas é o arraste de material particulado sólido. O material pode se depositar ao longo do sistema, inclusive nas palhetas, diminuindo a eficiência da turbina ou causar danos às palhetas, se depositado ao longo do trilho do estágio, causando desgaste decorrente do atrito entre as palhetas, o particulado e o trilho. Além disso, pode causar a erosão das palhetas através do choque do material particulado com as palhetas. [13]

A erosão pode ser causada não só por particulado, mas também pelo próprio vapor. No último estágio de palhetas se trabalha com baixa pressão e temperaturas da faixa de 150°C. Em certas ocasiões de operação se trabalha com o que se chama de vapor úmido, um misto de vapor com fase condensada, e o choque dessa fase condensada com as palhetas também pode causar erosão. [14]

2. Procedimento Experimental

Uma análise de falhas tem como objetivo identificar a causa principal do evento que levou à falha. Esse tipo de análise possui diversos estágios, ou etapas a serem cumpridas. Os estágios recomendados para uma investigação de uma falha de engenharia são os seguintes [15,16]:

1. Aquisição de informações e seleção de amostras: Inicialmente em uma investigação de falha é interessante reunir toda a informação disponível que seja relevante ao estudo da falha: dados sobre a fabricação do componente, informações sobre sua utilização, históricos de falha desse tipo de componente e outras informações que ajudem na reconstrução do evento que resultou na falha. É interessante que sejam selecionadas amostras que revelem informações importantes sobre a falha, portanto tal seleção deve ser realizada de modo que o máximo de informações possam ser registradas, principalmente através de registro visual, fotografias.
2. Exame preliminar da parte que falhou: Deve-se realizar uma inspeção visual, sem auxílio de equipamento, de todas as partes do componente que falhou antes mesmo de se realizar a limpeza das peças. O objetivo é identificar as partes mais importantes, que estejam diretamente relacionadas à falha, e detalhes que possam revelar alguma informação.
3. Ensaios não destrutivos: Inspeção por partícula magnética; Inspeção por líquido penetrante; Inspeção eletromagnética; Inspeção por ultra-som; Radiografia. Interessantes para localizar descontinuidades próximas à superfície da peça.

4. Ensaios mecânicos: Ensaios de dureza; ensaios de tração. Úteis para verificar se o material está de acordo com as especificações mecânicas do projeto.

5. Seleção, identificação, preservação e limpeza das amostras: Uma adequada seleção, preservação e limpeza das superfícies de fratura são importantes para se evitar que evidências importantes sejam danificadas ou destruídas.

6. Exame e análise macroscópica: Nesta etapa se examinam as amostras com pouco aumento, de 1x a 100x. A quantidade de informação que pode se obter dessa etapa é bem extensa. Ao se observar a superfície de uma fratura pode-se obter uma indicação do regime de tensões ao qual a peça foi submetida.

7. Exame e análise microscópica: É realizada com muito mais aumento que a análise macro, chegando até a 300.000x de aumento. Em geral é útil para reconhecer as seguintes características em uma trinca ou fratura:

- Fratura com alvéolos, típica de sobrecarga em materiais dúcteis;
- Facetas de clivagem, típicas de fratura frágil transgranular em materiais CCC ou HC;
- Fratura frágil intergranular, encontradas em aços fragilizados em revestimento (temper-brittle) e devido à corrosão intergranular;
- Estriações (marcas de praia), típicas de fadiga.

8. Seleção e preparação das seções para análise metalográfica

9. Exame e análise das seções metalográficas: Nesta etapa consegue-se reunir informações sobre a microestrutura do material, podem-se identificar características das condições de fabricação e operação da peça.

10. Determinação do mecanismo de falha

11. Análise química de todas as partes (secção, superfície, revestimento, produtos de corrosão, etc.): Importante para determinar se o material está dentro das especificações do projeto. Com isso pode-se avaliar também se as especificações do projeto estão dentro do recomendado para a dada aplicação.

Este trabalho foi realizado a partir de dados crus do relatório de uma falha que ocorreu em uma turbina a vapor da Termonorte em Porto Velho, durante o ano de 2004. A unidade geradora de 140MVA já havia sofrido paradas por motivos diversos até uma parada automática devido ao disparo do alarme de alta pressão do condensador, durante a parada foi indicada vibração pelos sensores. A vibração de intensificou durante a parada causando danos ao mancal que vazou óleo. Por fim ocorreu um incêndio no local da instalação da turbina. O relatório [17] foi realizado em 2005 pelo Laboratório de Metalografia e Análise de Falhas (LMAF) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT.

As palhetas foram fabricadas pela Fuji Electric por forjamento e tratamento térmico, sendo cada palheta em peça única de aço inoxidável martensítico. O estágio era composto por 65 palhetas fixadas ao rotor, das quais 17 estavam quebradas (sendo 16 palhetas adjacentes) e as demais apresentavam outros tipos de danos, como presença de trincas, deformação plástica e perda de material [18]. Na figura 13 observam-se as palhetas, após a falha, ainda montadas no rotor da turbina. Na parte esquerda da imagem uma série de palhetas fraturadas e na parte direita as palhetas que não fraturaram. Os danos presentes nas palhetas indicam que foram causados durante o evento da falha justamente pelas palhetas que romperam, devido a magnitude dos danos apresentados.

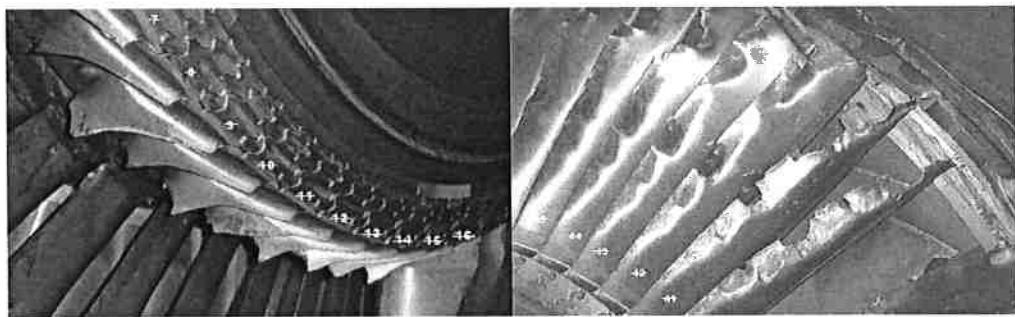


Figura 13: Palhetas montadas na turbina, danificadas e rompidas [18]

O IPT foi contratado pelo representante do IRB (Instituto de Resseguros do Brasil) para fornecer resultados de vários ensaios (sem interpretação ou emissão de relatório de análise de falhas) para todos os envolvidos (Termonorte, El Paso Merchant Energy Group, Fuji Electric, Hyundai, Camargo Correia e seus consultores: COPPE-Rio e Exponent) neste caso de falha. As equipes das empresas relacionadas discutem em juízo o caso até a presente data. O objetivo deste trabalho é apresentar um laudo de análise de falhas a partir dos resultados que foram disponibilizados que será apresentado na ICEFA 3 (Third International Conference of Engineering Failure Analysis).

2.1. Ensaios Realizados - LMAF-IPT

Seguindo a metodologia que foi concordada por todos os interessados através da assinatura de um protocolo de ensaios, foram realizados os seguintes ensaios:

- Inspeção visual (realizado no LMAF do IPT);
- Ensaio não destrutivo (realizado no LMAF do IPT – partículas magnéticas e líquido penetrante)

- Macrofractografia (realizado no LMAF do IPT – microscópio estéreo)
- Microfractografia (realizado no LMAF do IPT – equipamentos: JEOL 5200 com EDS e JEOL 6300 com EDS)
- Metalografia (realizado no LMAF do IPT – equipamento NEOPHOT 32)
- Ensaios de dureza e microdureza (realizado no LMAF do IPT)
- Análise química (realizado pela Div. Química do IPT)

Métodos e equipamentos utilizados:

- a) Combustão, analisador de carbono e enxofre - Equipamento Leco CS-444
 - b) Espectrometria de emissão óptica – Equipamento ARL 3460
 - c) Espectrometria de plasma - Equipamento Seiko SPS 1700R
 - d) Fusão sob gás inerte, detecção por condutividade térmica - Equipamento Horiba EMGA-520
- Ensaios de tração (realizado pela Div. Mecânica do IPT – Máquina de ensaio universal AMSLER)

2.2. Metodologia do presente trabalho

Em posse dos resultados, o trabalho consistiu em uma avaliação crítica dos mesmos, cruzando as informações com o objetivo de identificar o mecanismo pelo qual a falha ocorreu.

- Acesso aos documentos – Relatório do IPT [17] e Relatório da empresa Exponent [18], no qual há o registro da falha e as condições de operação da usina. Também 3 CDs contendo os resultados dos ensaios e fotografias realizados pelo IPT;

- Interpretação dos documentos – Foram analisados os resultados dos ensaios, as imagens presentes nos relatórios e os relatórios de perturbação e funcionamento da usina;
- Edição dos documentos – Foram selecionados os resultados e documentos importantes para o estudo da falha, assim como indicados os pontos importantes dentro do material selecionado (indicações em fotografias, etc.);
- Cruzamento de informações – Relacionando as imagens e resultados entre si, como macrofractografia, microfractografia e EDS, com o objetivo identificar o mecanismo da falha;
- Revisão bibliográfica – Comparaçao dos resultados presentes com o que consta em literatura;
- Proposição do mecanismo de falha.

3. Resultados e Discussão

3.1. Inspeção visual

As palhetas foram inspecionadas visualmente sem o auxílio de qualquer equipamento além da máquina fotográfica. Foram atribuídos números com o objetivo de se manter um registro preciso de cada operação que foi realizada. Das palhetas analisadas, segue como exemplo as de número 4, 33, 37 e 51 (veja figuras 14 a 17). Sendo as de número 4 e 51 exemplos de lâminas que apresentaram danos, porém não romperam (vide figuras 14 e 15) e as de número 33 e 37 (vide figuras 16 e 17) exemplos de palhetas fraturadas.

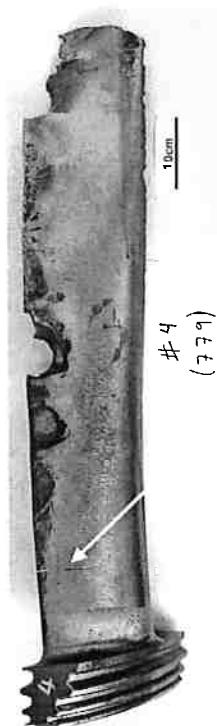


Figura 14: Palheta 4, presença de trinca a uma distância de aproximadamente 107 mm da raiz, vide seta, e de regiões com deformação plástica e perda de material [17]



Figura 15: Palheta 51, presença de trinca na raiz, vide seta, e de regiões com deformação plástica e perda de material [17]



Figura 16: Palheta 33 [17]

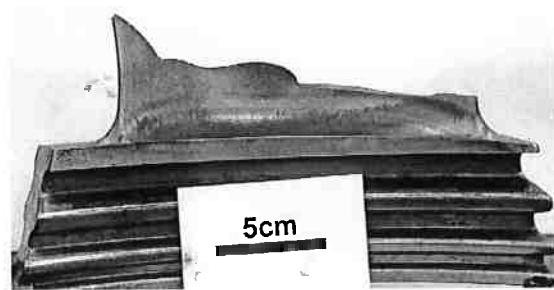


Figura 17: Palheta 37 [17]

As palhetas 4 e 51 apresentam não só deformação plástica e perda de material, como também trinca (na de número 51, bem próxima a base; na palheta 4, a 107 mm da base). Observam-se as trincas em detalhe na figura 18.

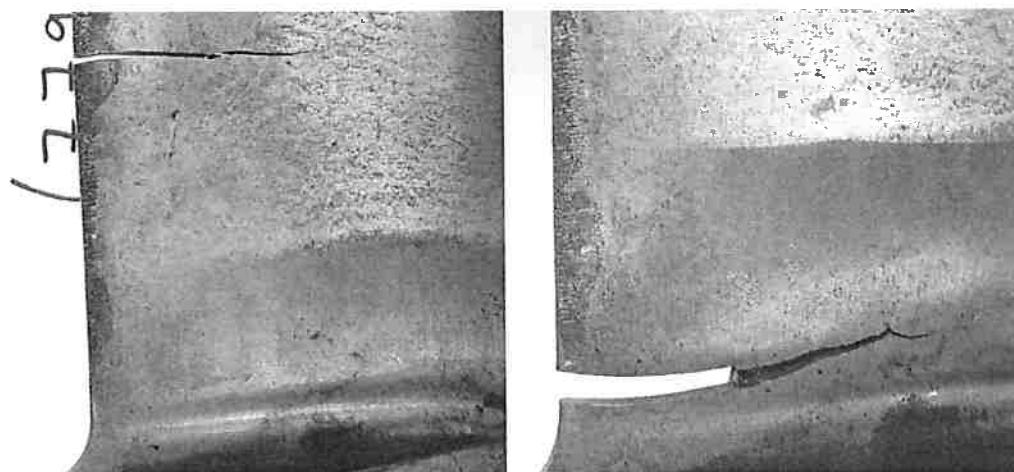


Figura 18: Respectivamente, trincas no bordo de fuga (trailing edge) das palhetas 4 e 51 [17]

Também foi notado que havia desgaste em diversas regiões das palhetas, principalmente no bordo de ataque e no bordo de fuga (vide figura 19).

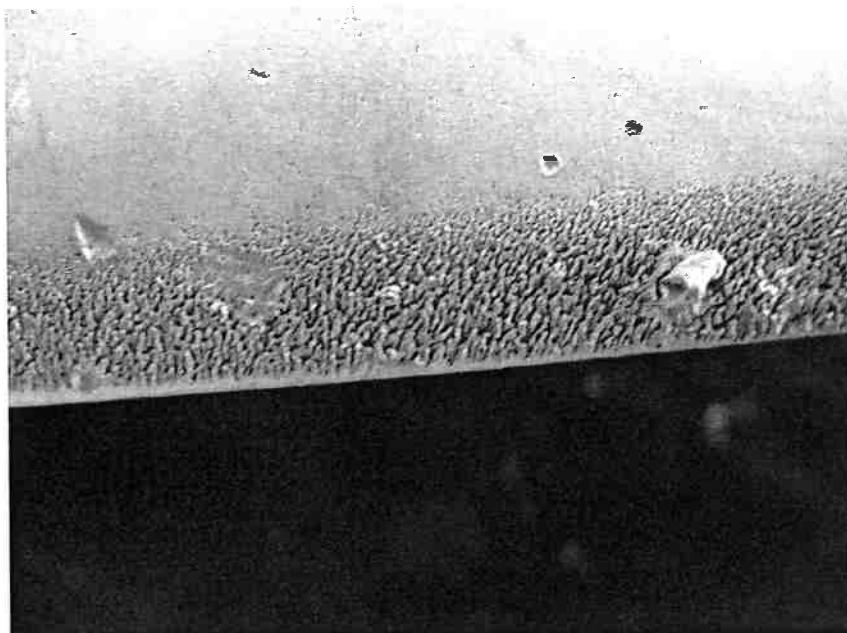


Figura 19: Desgaste no bordo de ataque da palheta 4 [17]

Analizando as palhetas fraturadas, se percebe diferenças entre as superfícies de fratura, aparentando mecanismos de fratura diferentes. Algumas apresentaram uma região plana bem definida (flat fracture), como a palheta 37 (vide figura 20), enquanto outras apresentaram somente fratura inclinada (slant fracture), no caso da lâmina 46 (vide figura 21). Na figura 20 pode-se observar a provável mudança de mecanismo (estável versus instável) pelas marcas na superfície de fratura. A fratura inclinada em geral corresponde a cisalhamento e isso, em geral, corresponde à sobrecarga. [19].

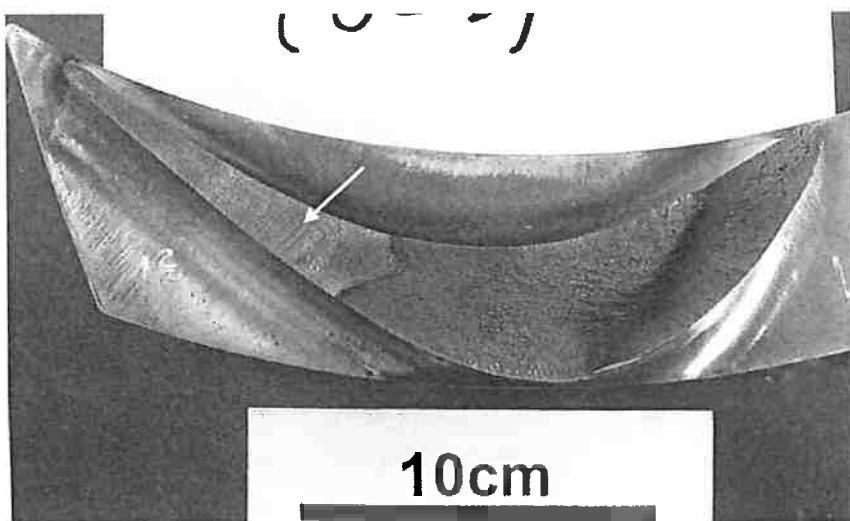


Figura 20: Visão superior da superfície de fratura, palheta 37, região plana indicada por seta [17]

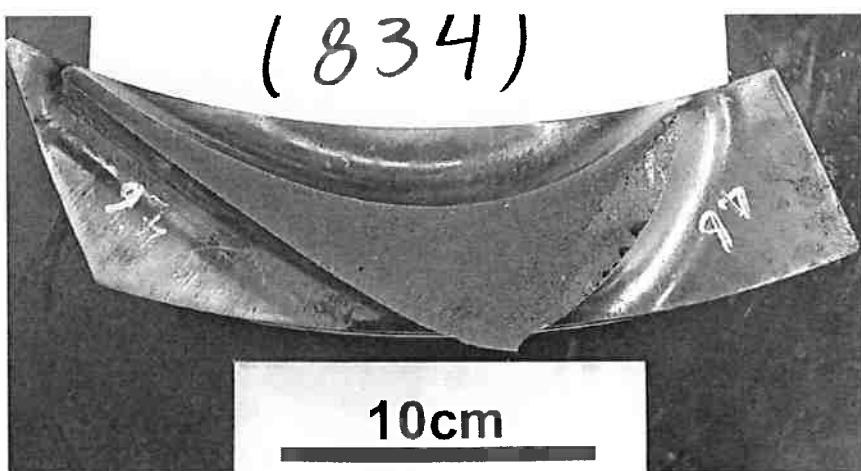


Figura 21: Visão superior da superfície de fratura, palheta 46 [17]

Durante a inspeção visual se realizaram medições, registradas na tabela 2, das fraturas planas encontradas. A região plana provavelmente corresponde a uma região de propagação estável da fratura, enquanto a região inclinada provavelmente a uma região de propagação instável (sobrecarga). A palheta 37 apresentou o maior comprimento de fratura plana dentre as palhetas rompidas, 84 mm. Como ela apresentou o maior comprimento de fratura estável, sugere-se que esta palheta foi a

primeira a romper. As demais palhetas não relacionadas na tabela 2 não apresentavam nem ruptura nem trincas planas. Todas as trincas se apresentaram no bordo de fuga.

palheta	condição	Comprimento da região plana (± 1 mm)	Altura relativa á raiz do bordo de fuga (± 1 mm)
33	Rompida	0	19
20	Trincada	1 **	120
28	Trincada	2 **	15
63	Trincada	2 ** 2 **	280 325
48	Trincada	5 ** 1 **	20 114
6	Trincada	6 **	18
7	Trincada	9 ** 5 **	15 110
57	Trincada	10 **	68
19	Trincada	18 **	24
29	Trincada	18 **	16
35	Rompida	25	121
51	Trincada	30 *	16
24	Trincada	45 **	22
30	Trincada	47 **	19
62	Trincada	50 **	23
2	Trincada	60 **	100
5	Rompida	67	16
32	Rompida	67	20
34	Rompida	68	70
36	Rompida	69	19
4	Trincada	85 **	107
37	Rompida	84	18

(*) convertida adotando o plano da base como referência

(**) medidas realizadas na superfície convexa

Tabela 2: Relação das medições de comprimento de fratura plana e respectiva altura

em relação à raiz da palheta [17]

3.2. Exame Microfractográfico

Cada palheta foi devidamente cortada, inclusive a fratura ou trinca, para ser analisada em partes [17]. Nessa etapa se objetivou identificar padrões na superfície de fratura para assim obter mais informações sobre o mecanismo pelo qual a fratura ocorreu.

Seguindo a metodologia empregada foi acompanhada primeiramente a caracterização da palheta 37. A amostragem realizada da superfície da fratura está ilustrada na figura 22. Como observado na inspeção visual, provavelmente a trinca se iniciou na região B (vide figura 23) seguindo sucessivamente pelas regiões C, D E e F (vide figuras 24 a 28). Sendo que a região F onde há mudança brusca no mecanismo pelo qual a fratura se deu. A região A corresponde a uma visão lateral, onde se observa o lado convexo da ponta do bordo de fuga.

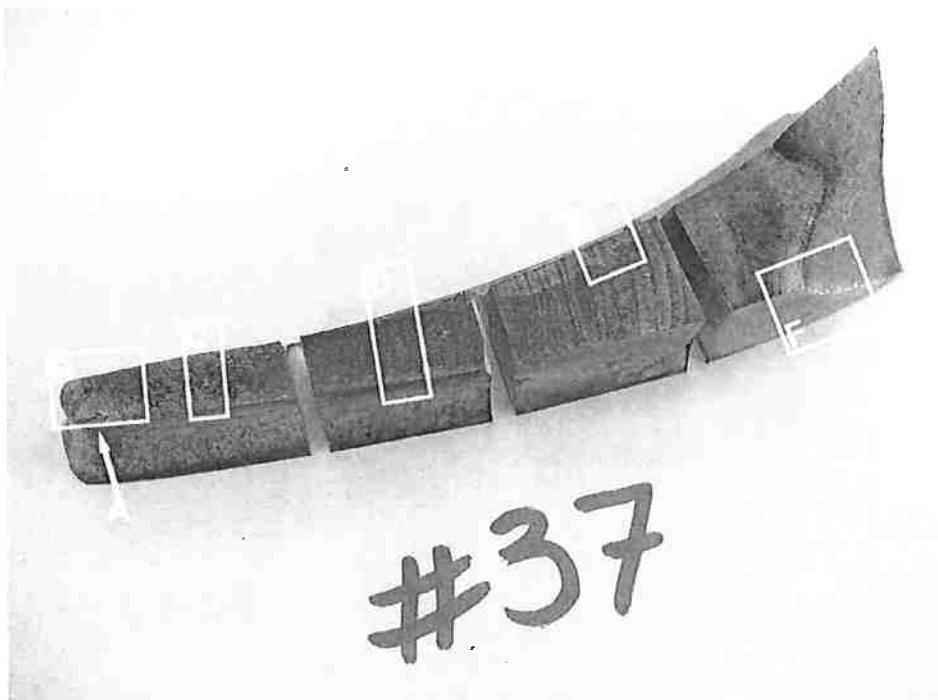


Figura 22: Amostragem da superfície da fratura da palheta 37 [17]

Podemos observar a região B da superfície de fratura na figura 23. Nota-se que se trata de uma região de morfologia semi-elíptica contendo marcas radiais, que indicam o possível local do início da fratura (indicado por seta na figura 23).

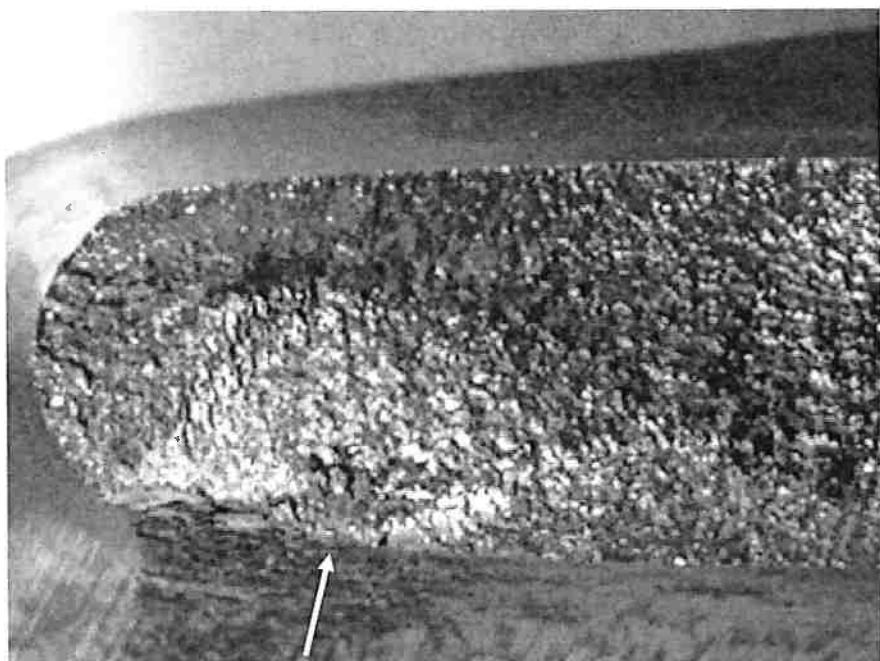


Figura 23: Região B, superfície da fratura – palheta 37. Local de início da fratura
indicado por seta [17]

Na figura 24 observamos a região C, que da esquerda para a direita da imagem, inicialmente apresenta as mesmas características encontradas em B e depois aparenta características diferentes. No canto direito da região C observamos uma região sem características topográficas definidas. As regiões D e E (vide figuras 25 a 27) apresentam curvas paralelas muito bem definidas, com espaçamento aparentemente crescente e mais definidas da região D para a região E. Essas marcas se assemelham muito às marcas de praia, típicas de fadiga. Tais marcas são causadas pela variação do ciclo de carregamento (solicitação mecânica) ao qual a peça é submetida, principalmente variação de tensão alternada. [19]

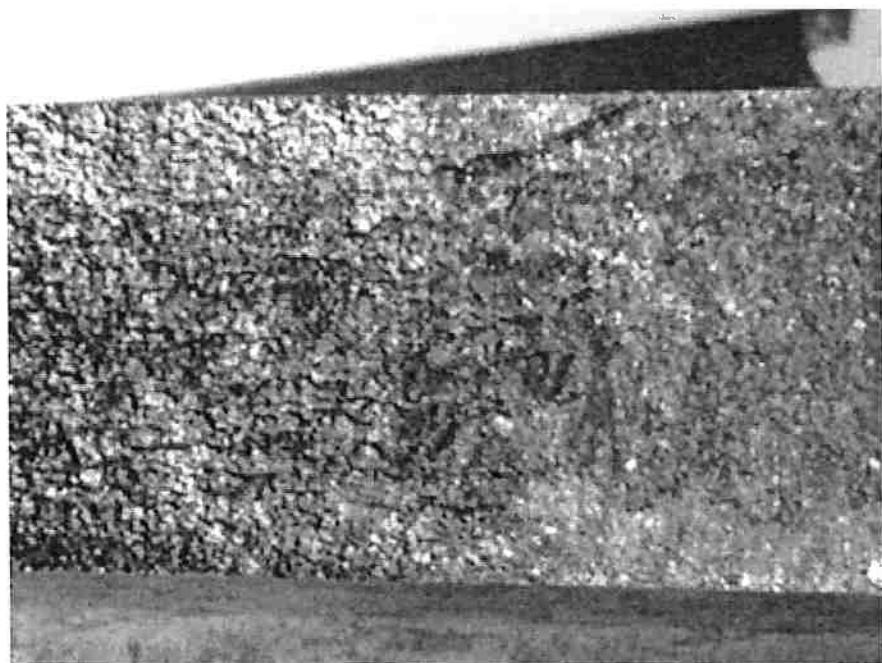


Figura 24: Região C, superfície da fratura – palheta 37 [17]

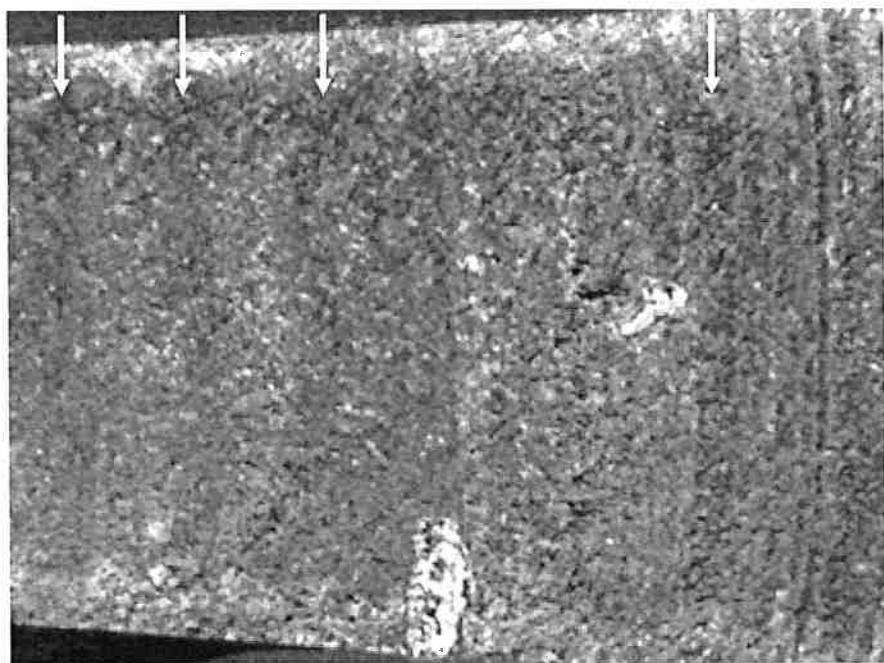


Figura 25: Região D, superfície da fratura – palheta 37 [17]



Figura 26: Região E, superfície da fratura – palheta 37 [17]

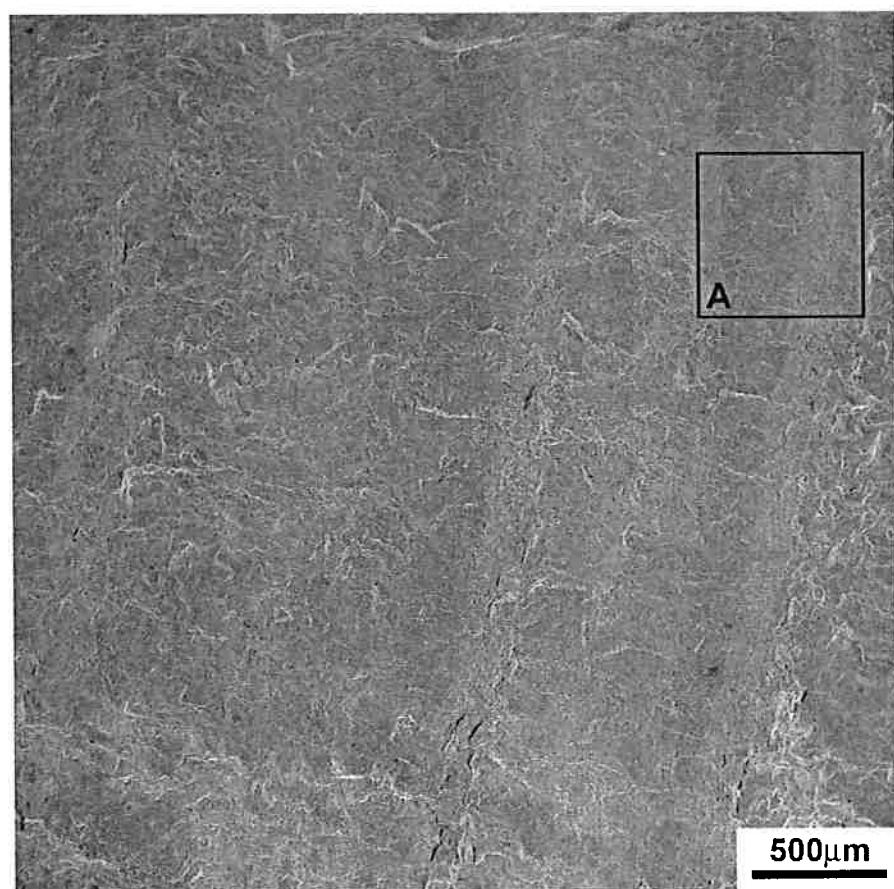


Figura 27: Região E – 35x -- palheta 37 [17]

Na figura 28, região F, há uma brusca mudança na topografia de fratura, que será detalhada durante o exame microfractográfico.



Figura 28: Região F, superfície da fratura – palheta 37 [17]

Adicionalmente, a região de início da trinca, que deu origem à fratura se situa na região da aresta formada pela região da superfície da fratura e a lateral convexa da palheta, onde se pode notar um aparente desgaste (vide figura 29). Desgaste semelhante foi encontrado em outras palhetas também (vide figuras 30 e 31).

É interessante notar que este aspecto morfológico de desgaste na parte inferior do bordo de fuga é bastante diferente do mostrado anteriormente na parte superior do bordo de ataque (vide figura 24), e tal diferenciação deve estar relacionada com fluxo do vapor na palheta da turbina.

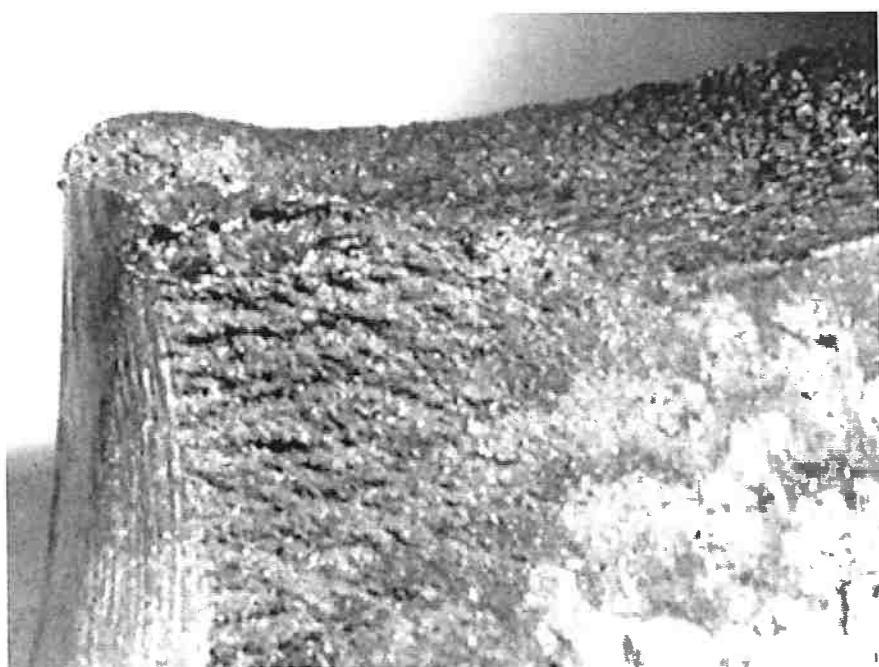


Figura 29: Região A, rugosidade da lateral convexa – palheta 37 [17]

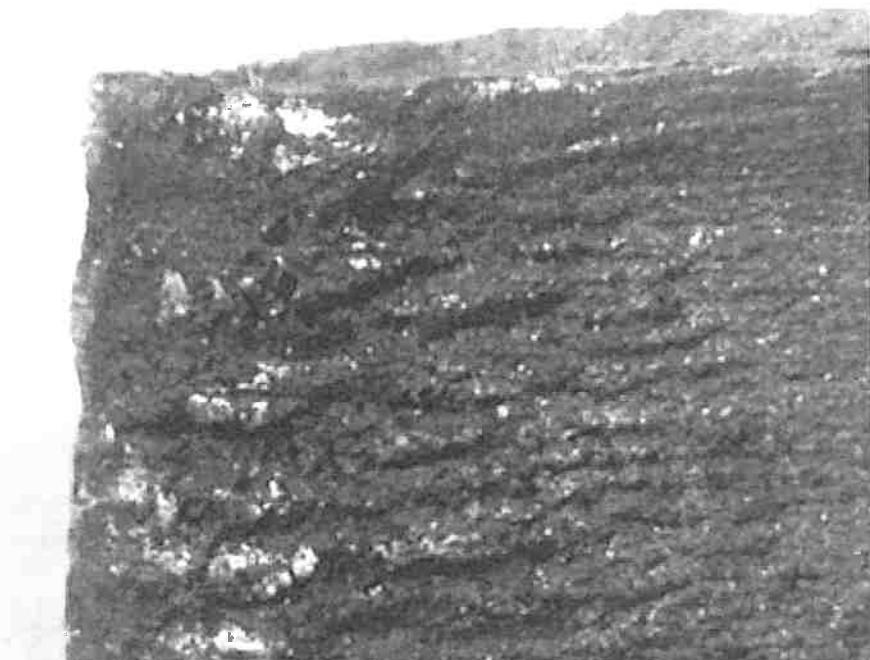


Figura 30: Superfície do lado convexo no início do bordo de fuga da palheta 4 [17]

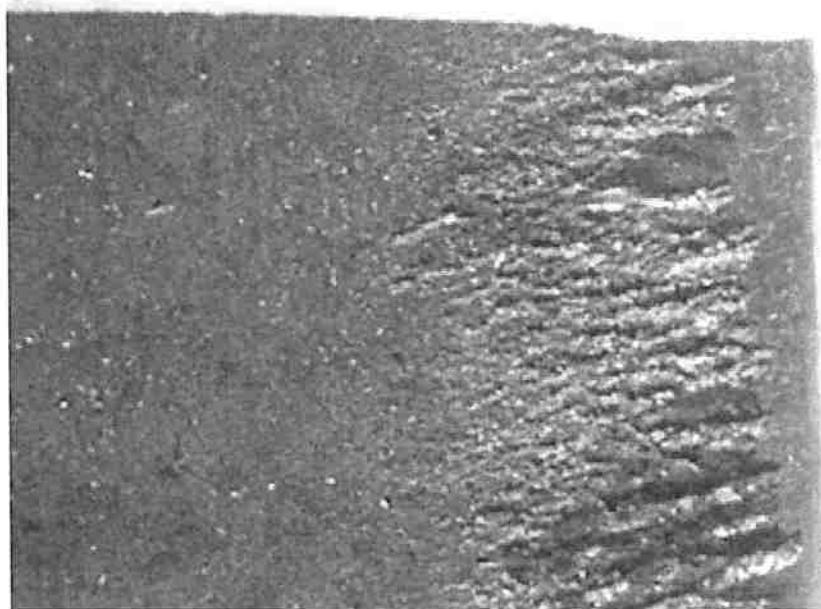


Figura 31: Superfície do lado convexo no início do bordo de fuga da palheta 51 [17]

Analizando-se as evidências mostradas das figuras 23 a 31, há um forte indício de que a trinca realmente se iniciou na região B seguindo pelas regiões C, D, E e F. As características da superfície de fratura apontam para uma possível trinca por fadiga, onde na região B se observa a região de início de fratura (ponto de nucleação da trinca, mostrado pela seta da figura 23). Todas as suposições deverão ser confirmadas através de microfractografia, deste modo a nucleação e propagação das trincas serão investigadas em mais detalhe durante exames microfractográficos (palheta 37) e de caracterização microestrutural (palhetas 4 e 51), de modo a identificar os mecanismos atuantes tanto na nucleação quanto na propagação da trinca.

3.3. Exame microfractografico

Seguindo a análise da palheta 37, temos na figura 32 sua amostragem de microfractografia. A análise se iniciou pela região 1.

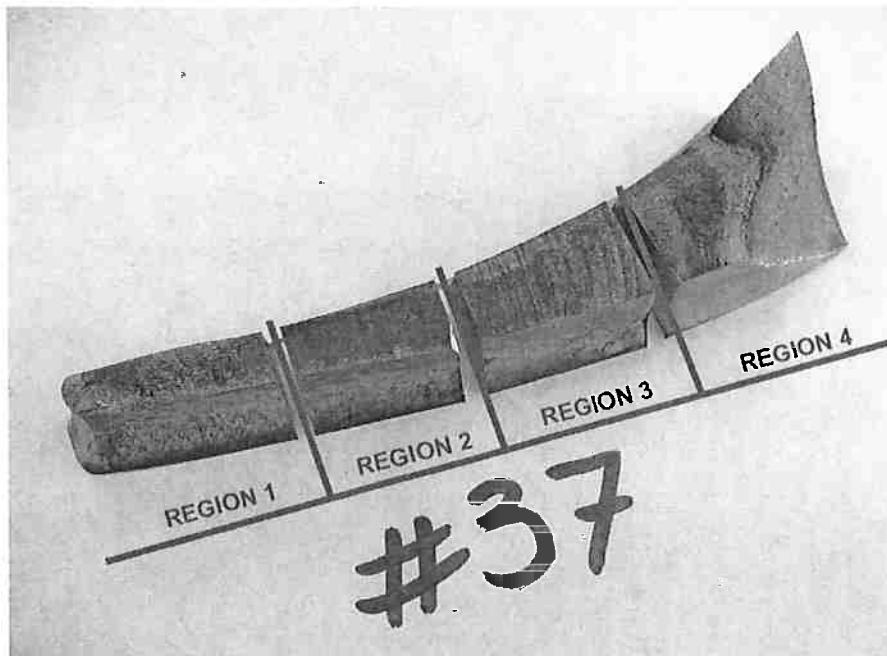


Figura 32: Amostragem da superfície de fratura, palheta 37 [17]

Pode-se observar com clareza as marcas radiais convergindo para as áreas A e B da região 1 (vide figura 33). Analisando as figuras 34 (área D da região 1) e 35 (área E detalhe da área D da região 1) pode-se observar com clareza o padrão característico das estrias de fadiga. De acordo com mecanismo proposto de propagação de trincas de fadiga as estrias são observadas devido a oxidação instantânea da frente de propagação da trinca que impede a união do material durante a fase de compressão da frente da trinca, que ocorre devido ao relaxamento das tensões elásticas presentes na região não trincada durante o ciclo de elevação

da tensão aplicada. Em ensaios de fadiga realizados no vácuo, a superfície de fratura não apresenta nenhuma estria de fadiga.[19]

O que não foi confirmado em outras regiões de fratura estável (vide regiões 2 e 3 nas figuras 36 e 37). De acordo com Das [20] e Brooks [21] a presença das estrias de fadiga não só dependem da interação com o meio, mas também da microestrutura e do ciclo de tensões ao qual o material é submetido. Em materiais de microestrutura complexa como aços de alta resistência com dispersão de carbonetos ou temperados torna-se difícil a detecção das estrias e ainda estas podem vir a desaparecer devido à deformação da superfície de fratura em ciclos de tensão compressão-tração com etapa de compressão intensa. Nesses tipos de materiais, muito duros, é comum se observar trincas secundárias originadas durante a propagação da trinca.

Wulpi [16] também aborda a ausência das estrias de fadiga em materiais extremamente resistentes e duros. Que ocorre por não serem dúcteis o suficiente para formar estrias de fadiga e sendo assim, principalmente em regiões de maior tensão, se observa uma superfície de fratura sem características topográficas definidas muito similar à clivagem. Os resultados são desse modo bastante coerentes.

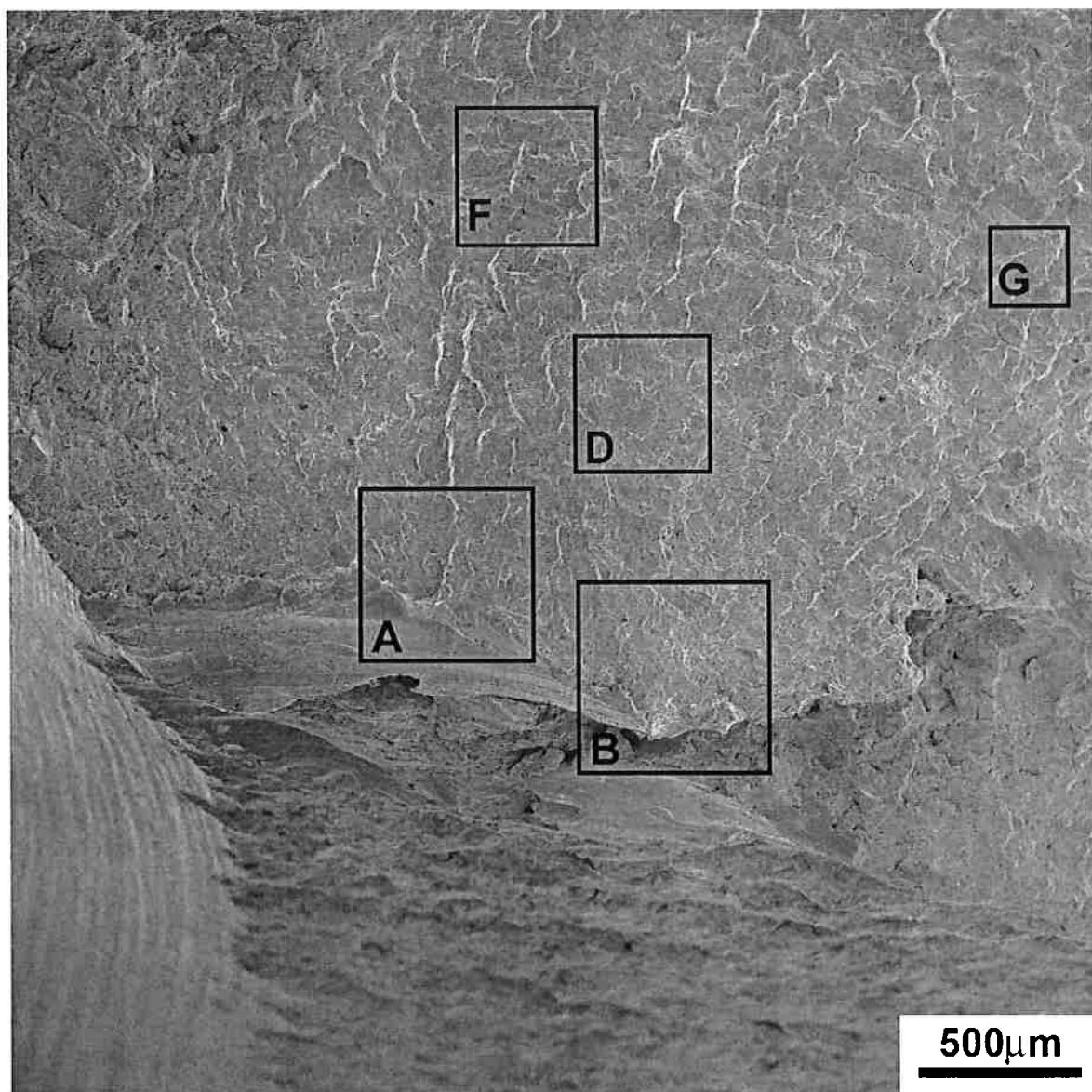


Figura 33: Região 1 – 35x – palheta 37 [17]

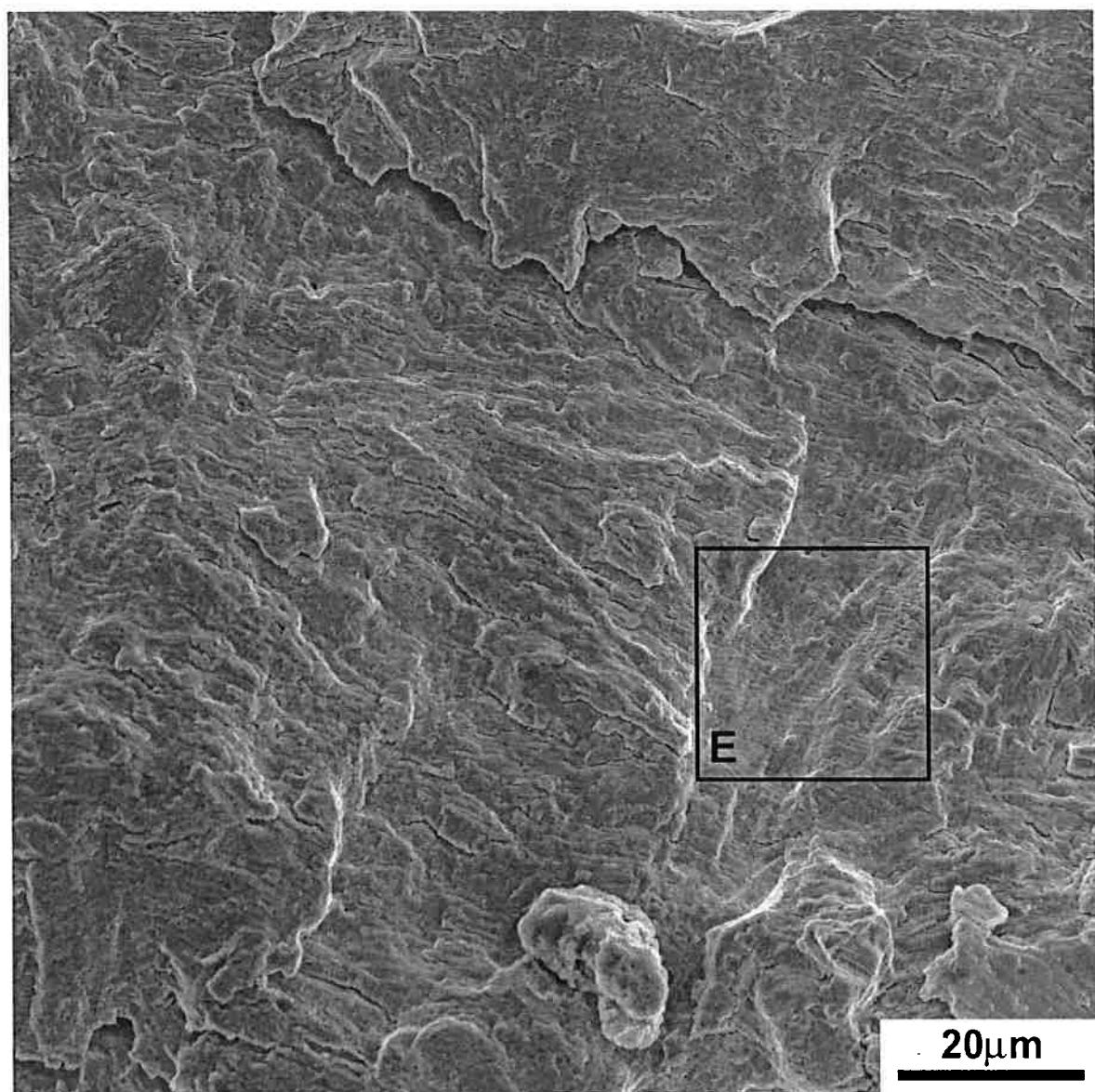


Figura 34: Região 1 – área D – 1000x – palheta 37 [17]

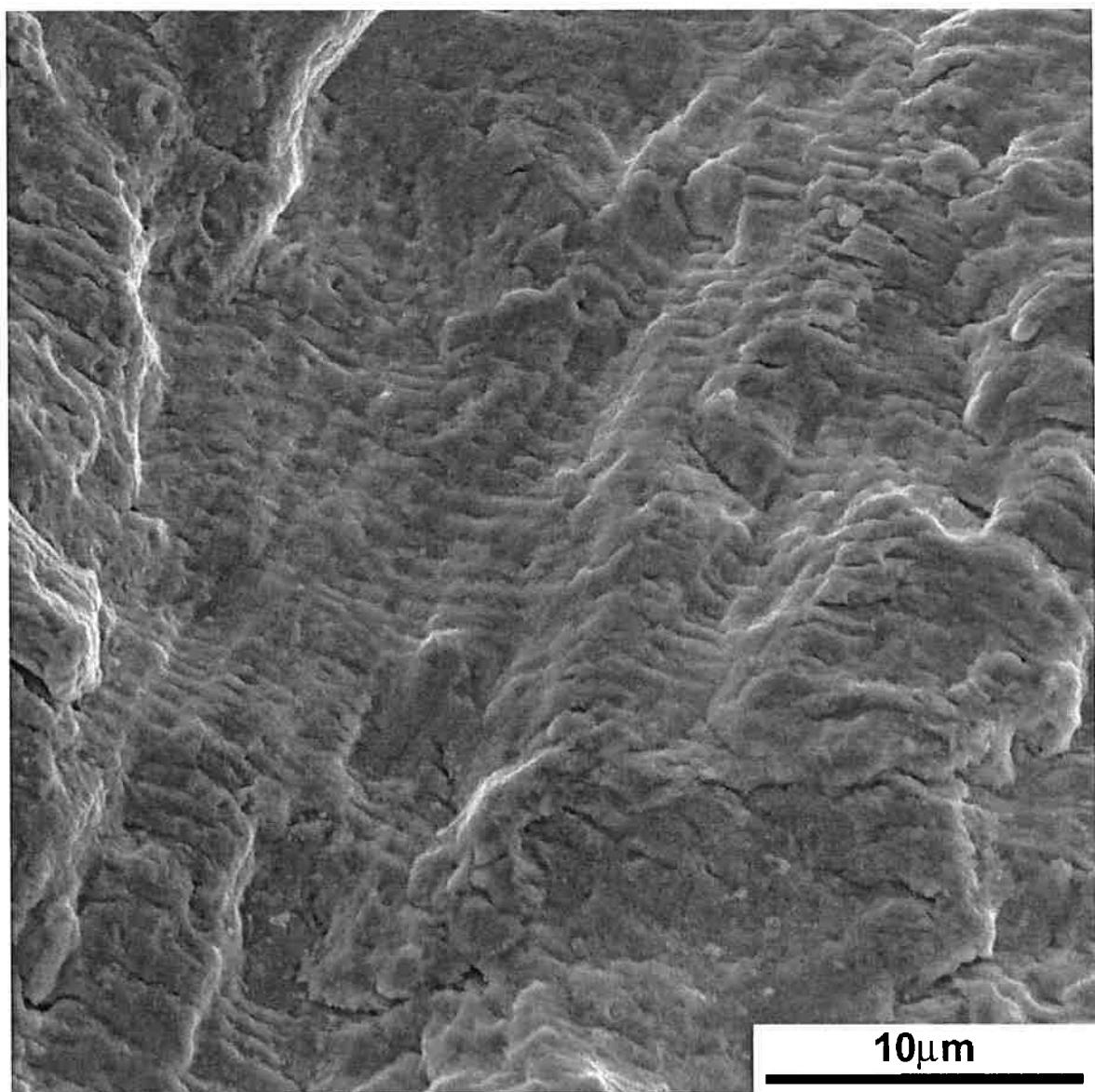


Figura 35: Região 1 – área E – 3500x – palheta 37 [17]

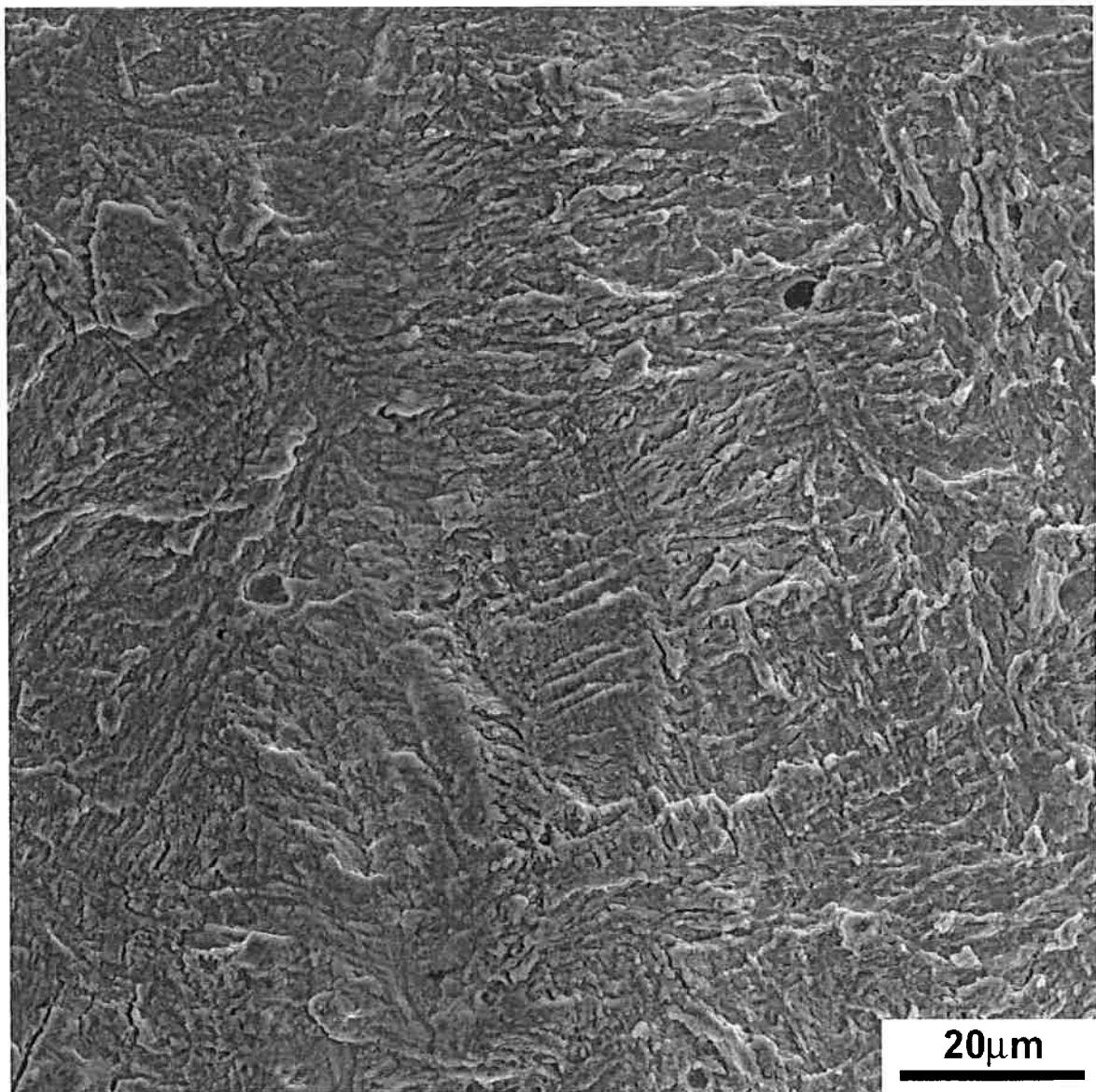


Figura 36: Região 2 - 1000x - palheta 37 [17]

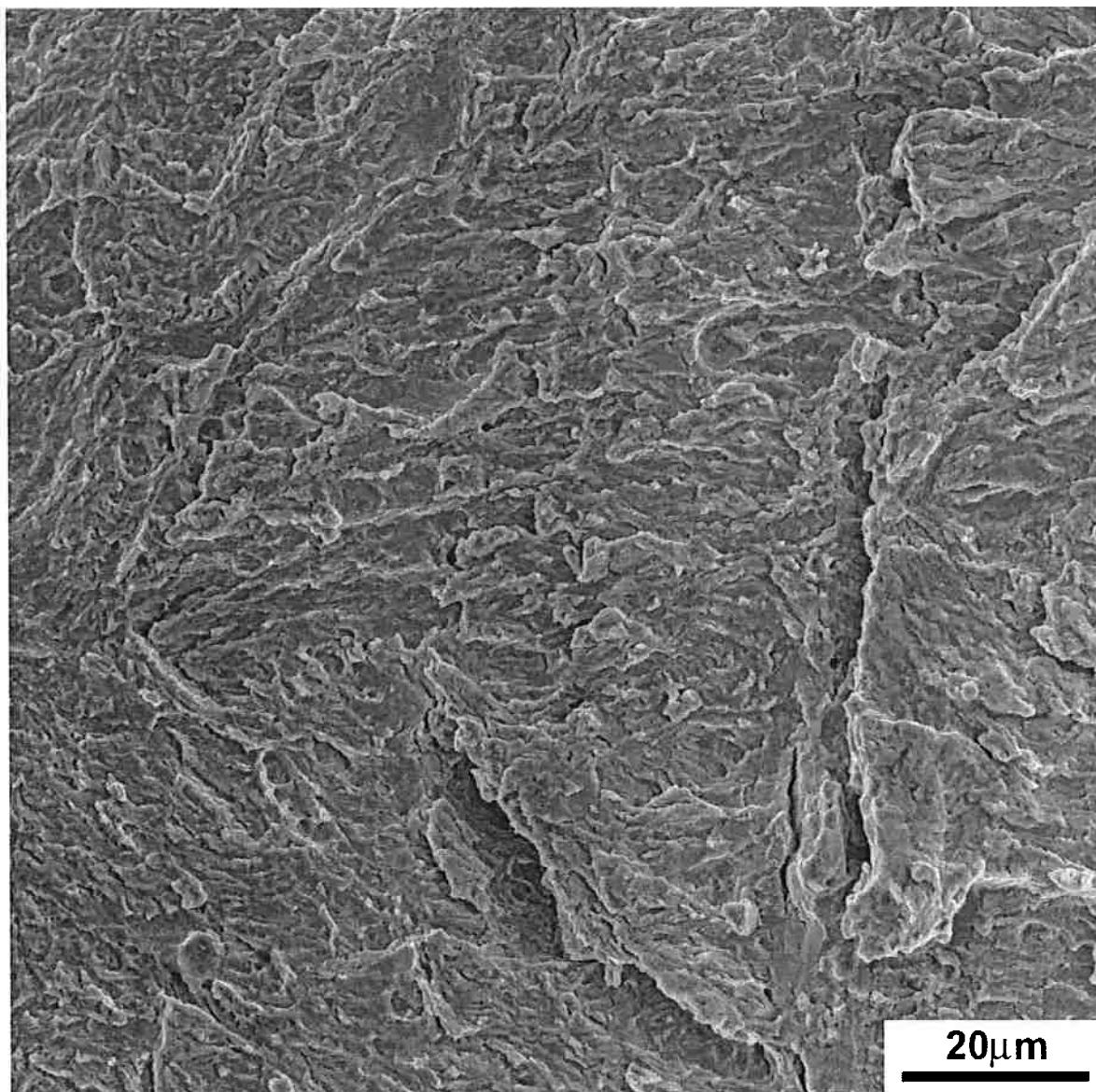


Figura 37: Região 3 - 1000x - palheta 37 [17]

Ao observar-se a região 4 da palheta 37 com 35x de aumento pode-se notar a mudança de mecanismo sendo as áreas A e B indicadas em regiões de mecanismo de fratura diferentes (vide figura 38). Na figura 39 está ilustrada a área A da região 4, onde pode-se observar superfície plana, seguindo o padrão de propagação de trinca por fadiga já encontrado, entretanto na área B da região 4 pode-se observar uma topografia bem rugosa, típica de fratura dúctil. Observa-se a presença de

coalescência de microcavidades (ou alvéolos), porém também se pode observar os degraus clássicos de clivagem [19]. Trata-se de uma fratura por sobrecarga denominada quasi-clivagem (vide figura 40). [9, 15, 16, 19]

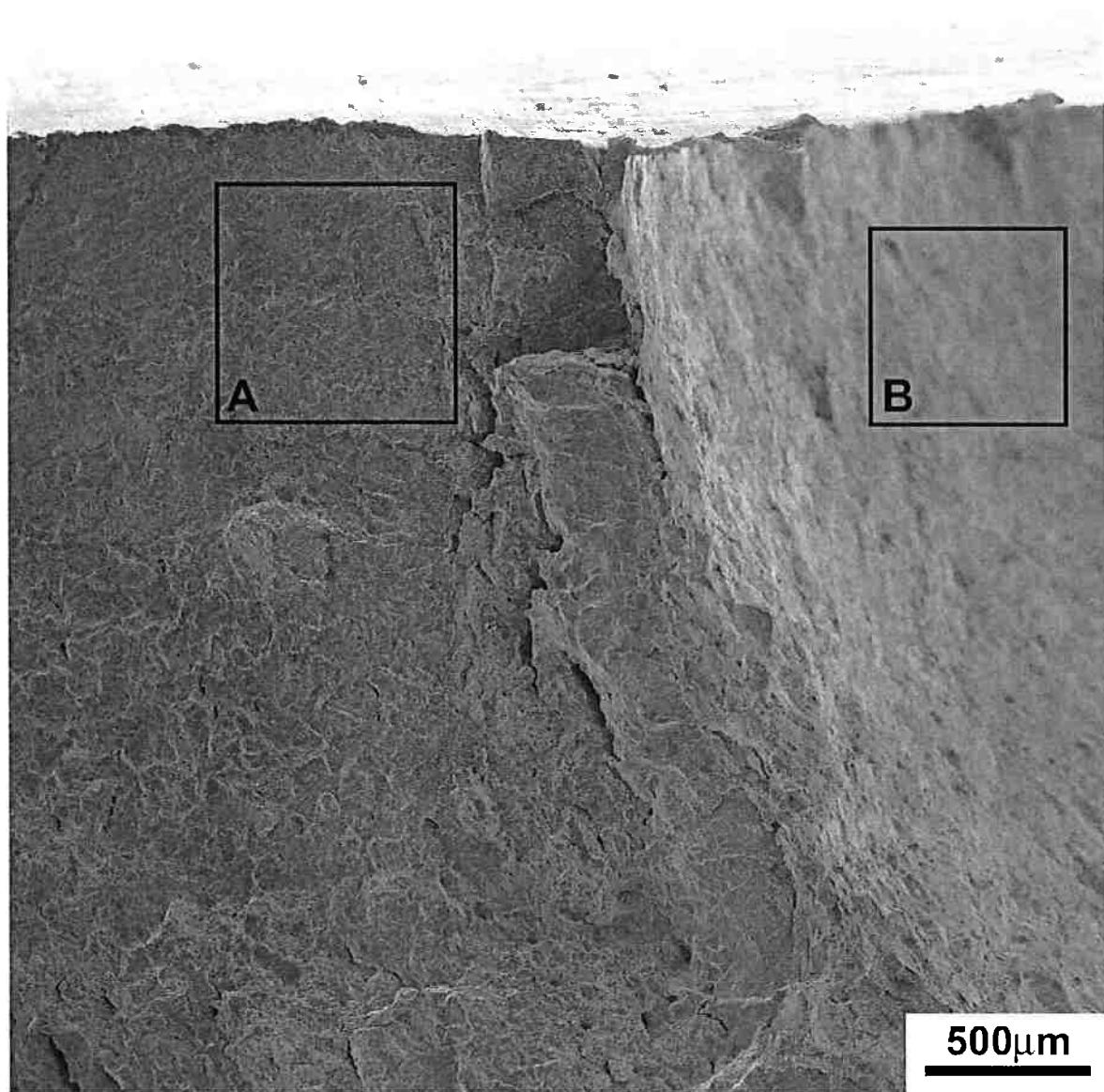


Figura 38: Região 4 – 35x – palheta 37 [17]

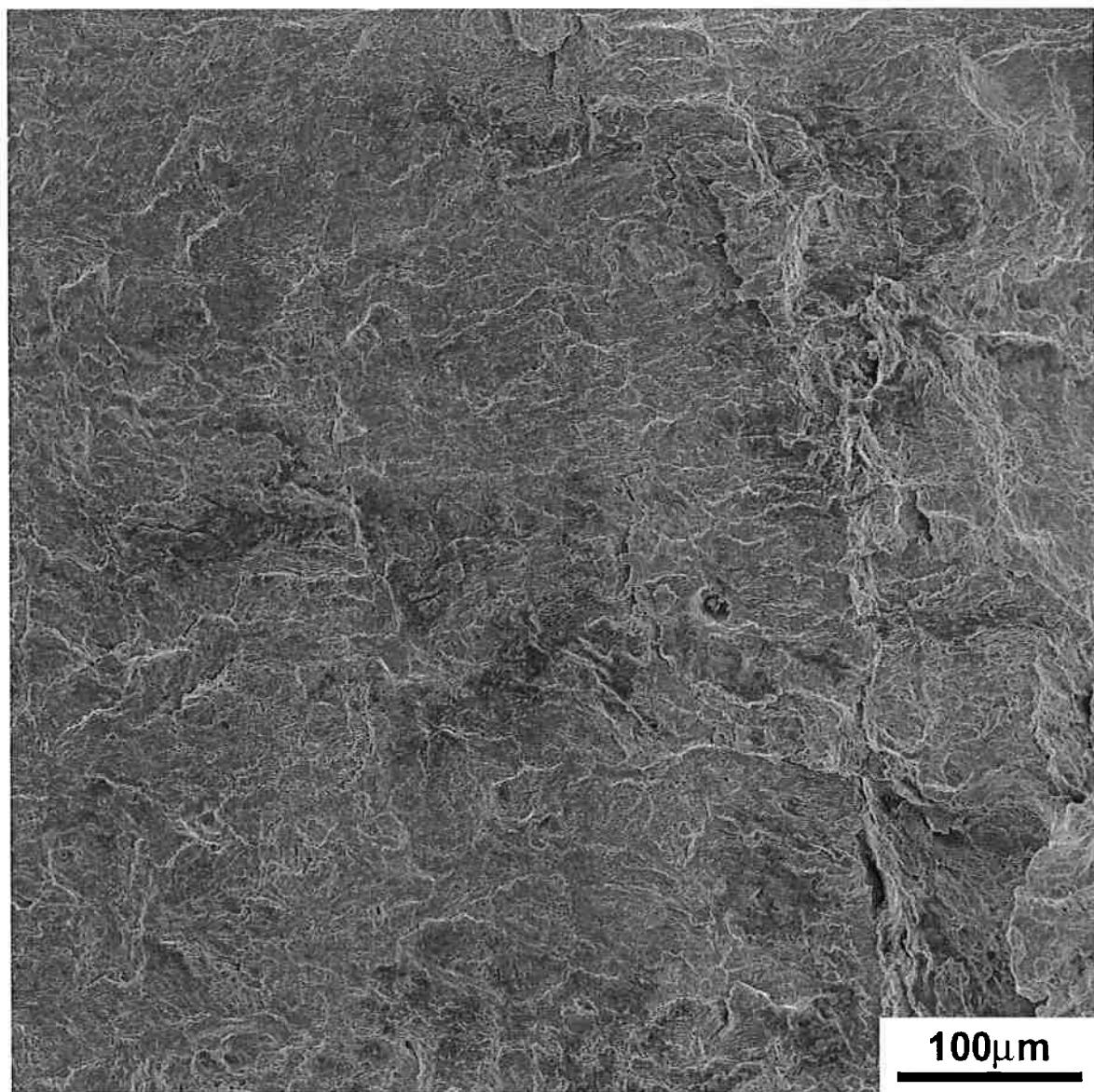


Figura 39: Região 4 – área A – 200x – palheta 37 [17]

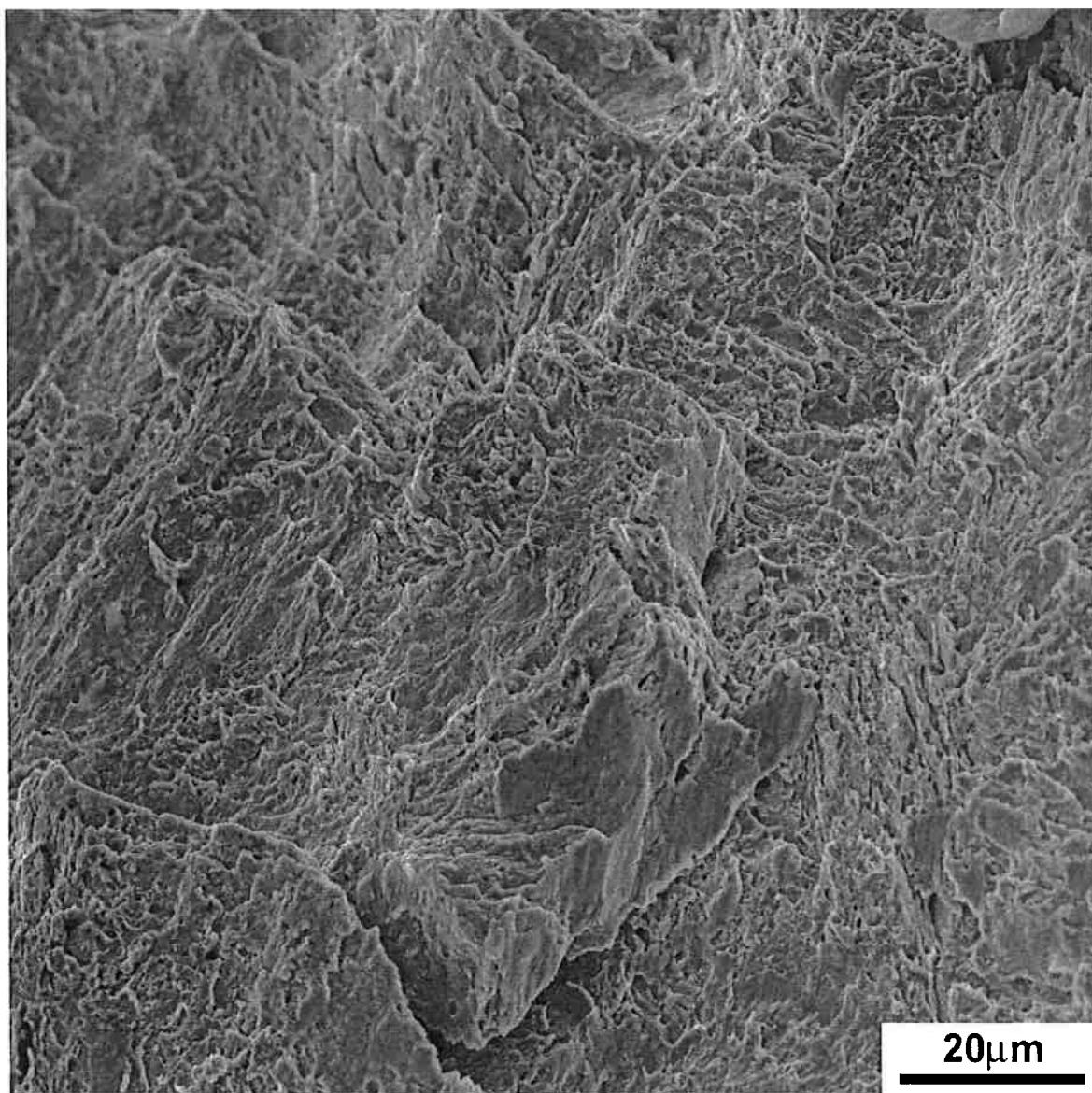


Figura 40: Região 4 – área B – 1000x – palheta 37 [17]

A causa da fratura, ou fator responsável pela nucleação da trinca, pode estar relacionada desde o próprio regime de tensões até diversos fatores, como entalhe, dano superficial, rugosidade elevada, porosidade, ou algum tipo de concentrador de tensões. [19]

Pode-se observar na superfície convexa do bordo de fuga algumas cavidades abertas devido ao desgaste, a posição dessas cavidades coincide com o local de

início da trinca (vide figuras 41 e 42). O desgaste verificado na superfície lateral é provavelmente o responsável pela nucleação da trinca agindo como concentrador de tensões.

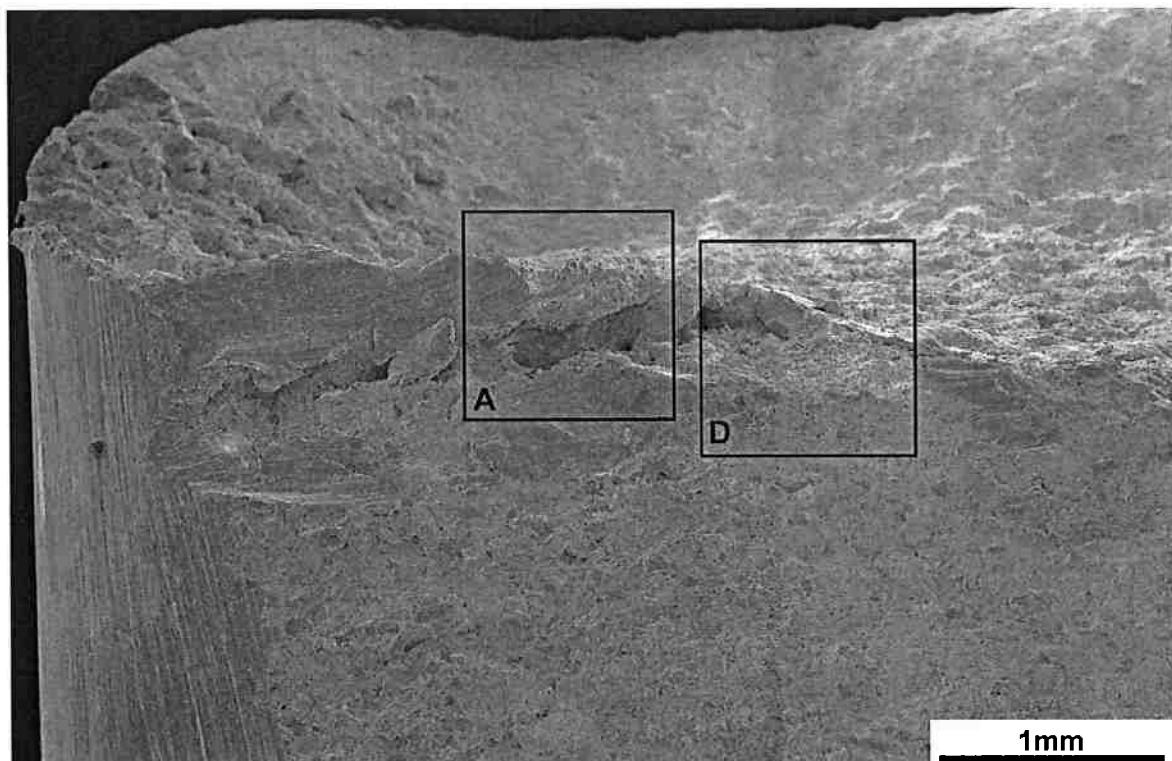


Figura 41: Superfície convexa do bordo de fuga, observado com 35x de aumento – palheta 37. Notam-se cavidades no local de início da fratura [17]

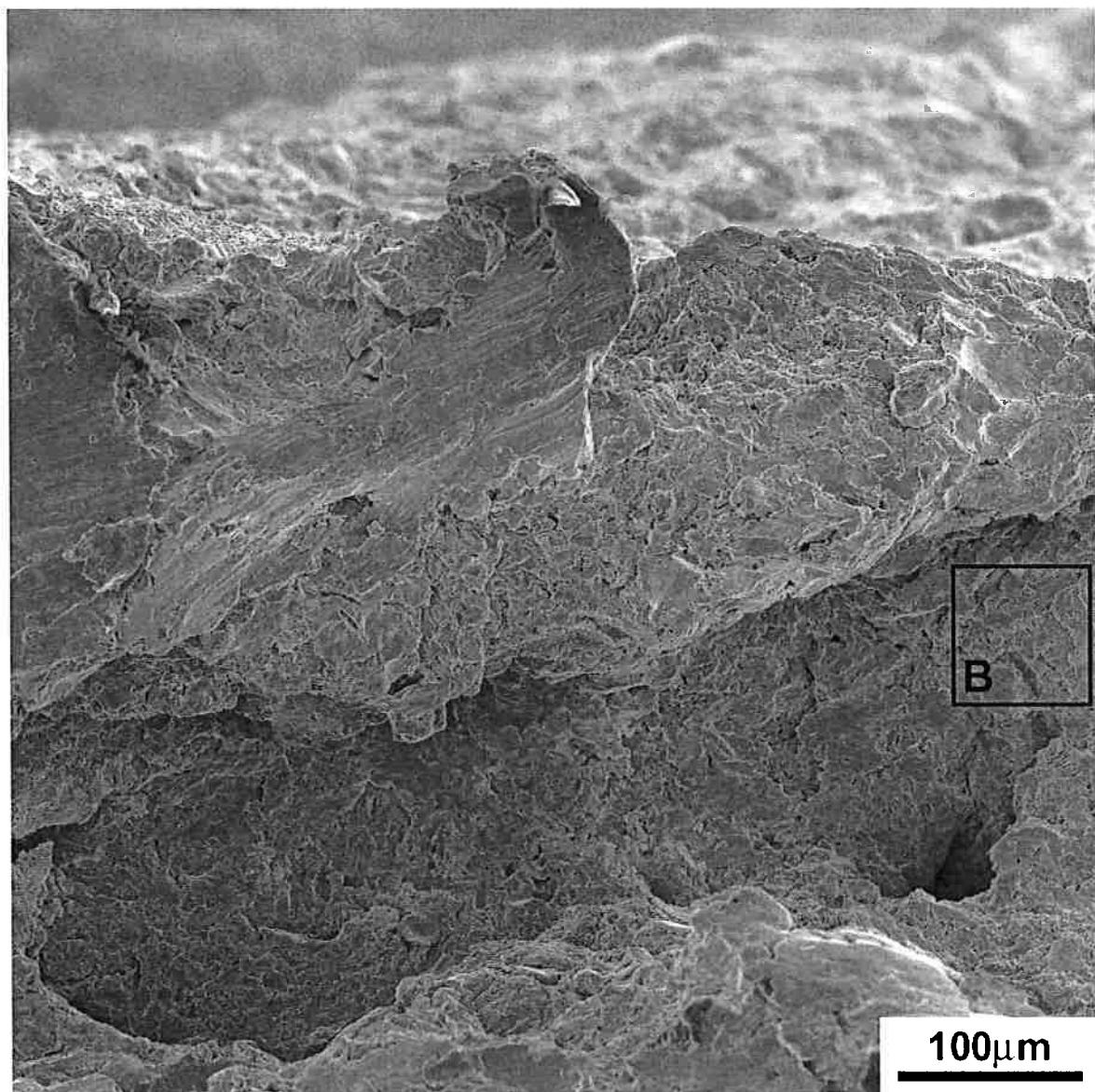


Figura 42: Superfície convexa do bordo de fuga - área A – 200x – palheta 37.

Cavidade abertas, alto fato de concentração de tensões [17]

3.4. Metalografia

Foi utilizada a palheta 4 para análise microestrutural do material. A palheta 4 apresentou um comprimento de fratura estável muito próximo ao da palheta 37. O exame microestrutural foi realizado em corte transversal e longitudinal em diversas profundidades do bordo de fuga (profundidade coincidente com o ponto de início de fratura ocorre a 0,98 mm), de modo a analisar a rugosidade superficial causada pelo mecanismo de desgaste (vide figuras 43 e 44).

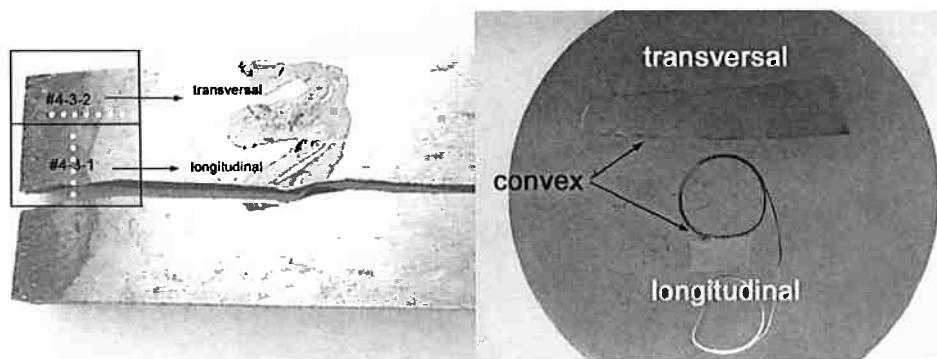


Figura 43: Amostragem do exame microestrutural da palheta 4 [17]

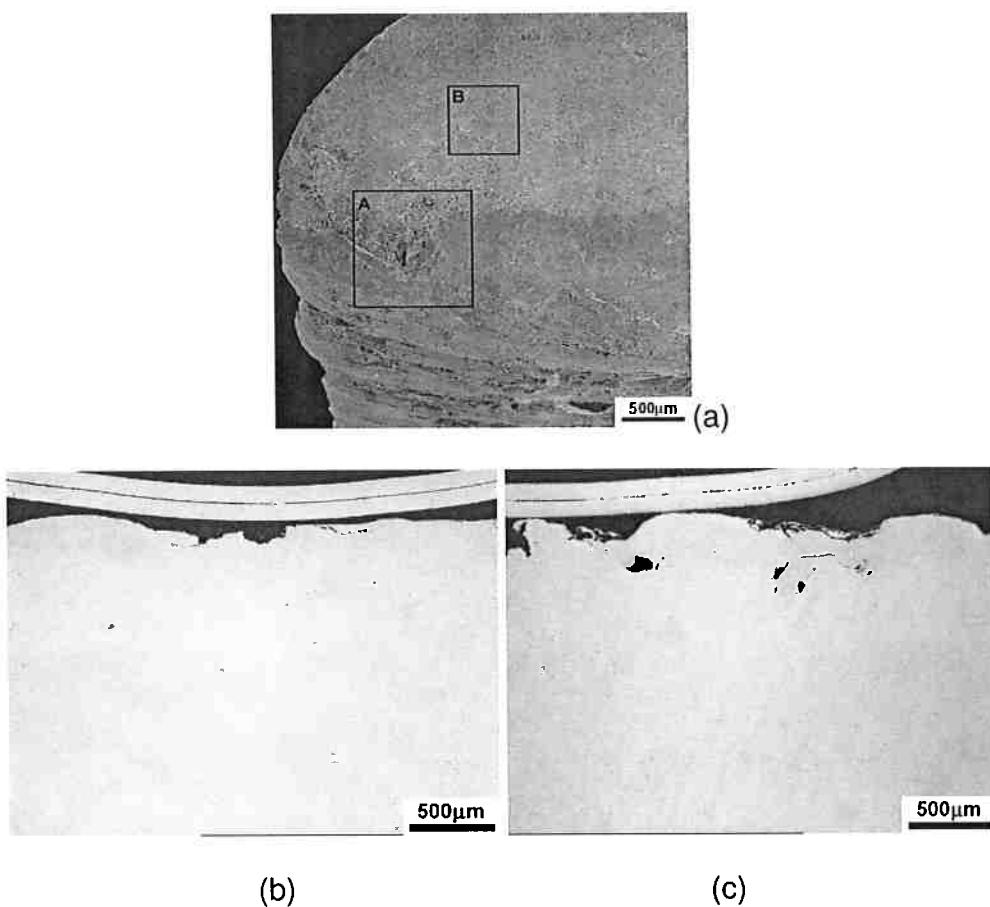


Figura 44: a) vista geral mostrando ponto de início de fratura a aproximadamente 1 mm de profundidade; b) Corte longitudinal, detalhe da rugosidade superficial causado pelo desgaste, que promoveu a nucleação da trinca de fadiga 0,98 mm de profundidade; c) Idem (b), a 1,92 mm de profundidade.

Analizando a palheta 4 (corte longitudinal) em MEV, verificou-se que a sua microestrutura é martensita revenida (vide figura 45). Ela apresenta junto à superfície convexa do bordo de fuga (local de presença de marcas de desgaste) intensa deformação plástica, seguida de trincamento e lascamento de material, este último leva à formação das irregularidades superficiais, responsáveis pela formação de concentradores de tensão. A figura 46 mostra adicionalmente a presença de partícula incrustada, sugerindo a ação de mecanismo de erosão.

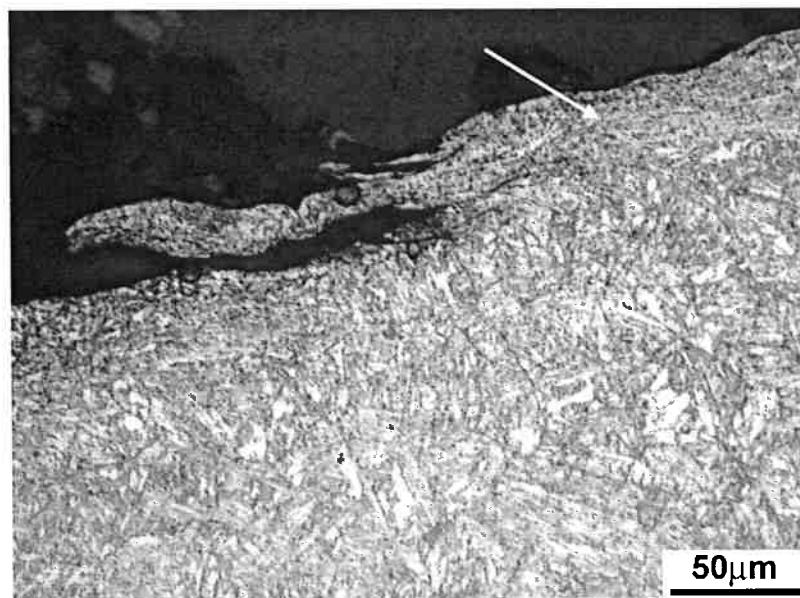


Figura 45: Corte longitudinal da superfície de fratura (local de início da trinca). Apresenta intensa deformação plástica superficial, seguida de trincamento e lascamento de material. – 500x – Palheta 4 [17]

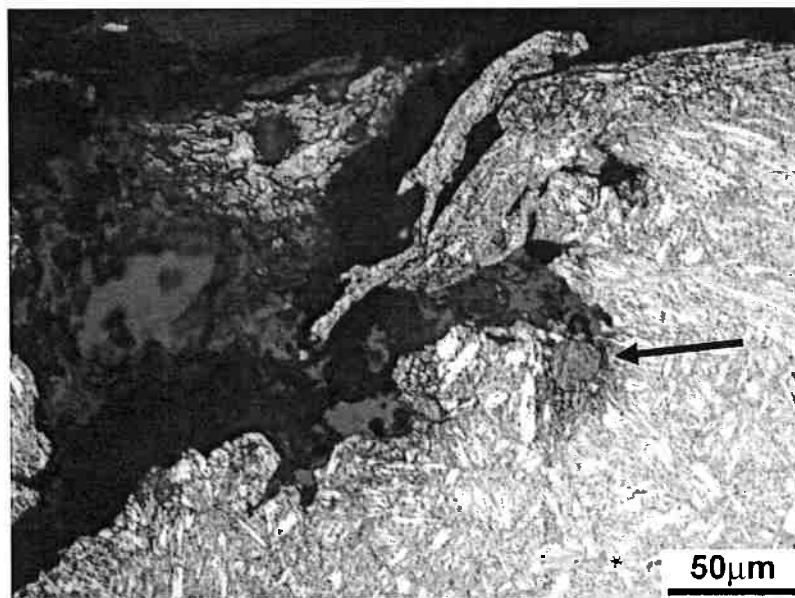


Figura 46: Corte longitudinal da superfície de fratura (local de início da trinca). Apresenta intensa deformação plástica superficial, seguida de trincamento e lascamento de material, adicionalmente, a presença de partícula incrustada (vide seta) – 500x – Palheta 4 [17]

A aparência das partículas encontradas e os locais onde se encontravam (sempre associadas a regiões com destacamento de material e intensa deformação plástica) deram fortes indícios de as partículas serem exógenas e não inclusões. Tal hipótese foi confirmada após microanálise EDS, onde foi possível comparar a composição da partícula com a da matriz (vide figuras 47 e 48).

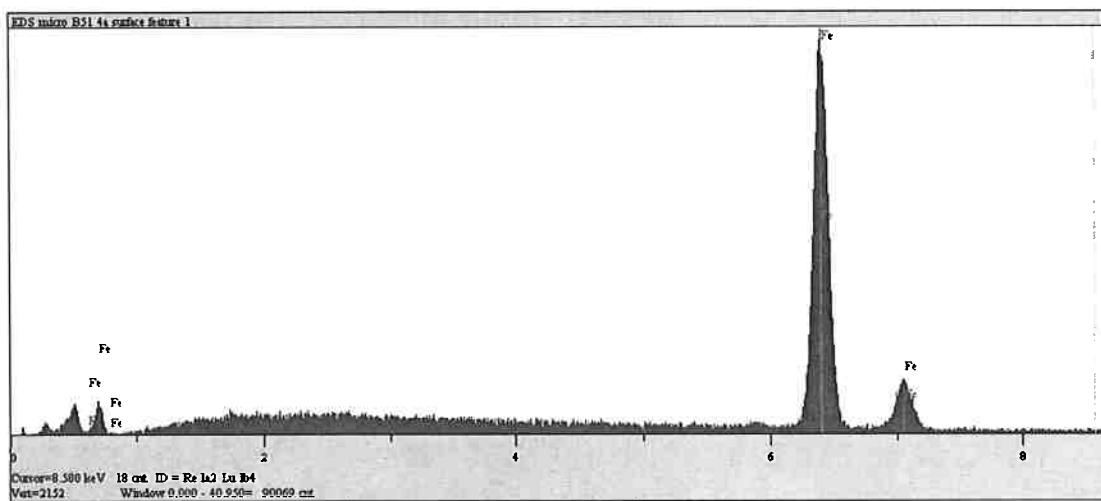


Figura 47: Microanálise EDS de uma partícula exógena [17]

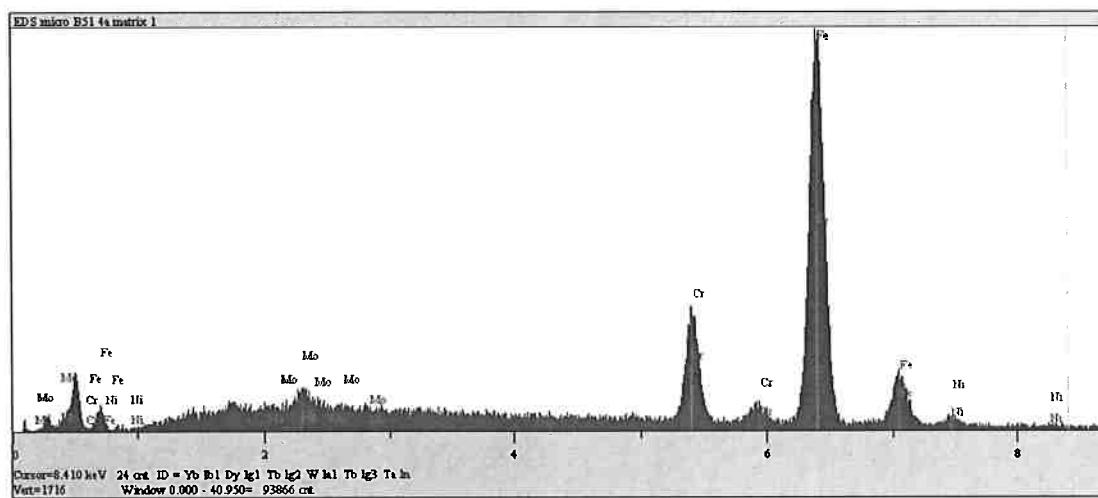


Figura 48: Microanálise EDS da matriz [17]

A composição química das partículas revela se tratar de partículas compostas basicamente por ferro, sem pico de oxigênio, podendo ser de aço-carbono, ou aço baixa liga, que se diferencia do resultado encontrado no material de base, típico de aço inoxidável. Nas palhetas foram encontradas diversas destas partículas exógenas (no total, 35 foram analisadas), todas com a mesma composição (presença somente de picos de Fe). Também não foram encontradas cavidades na superfície sem a presença de deformação, o que descartou a hipótese de corrosão.

A colisão destas partículas com a palheta deu origem à elevada rugosidade presente junto à região de início de fratura por fadiga (deformação, trincamento, lascamento). Podem ser observadas quatro partículas que causaram deformação plástica e destacamento de material da palheta 51 na figura 49.

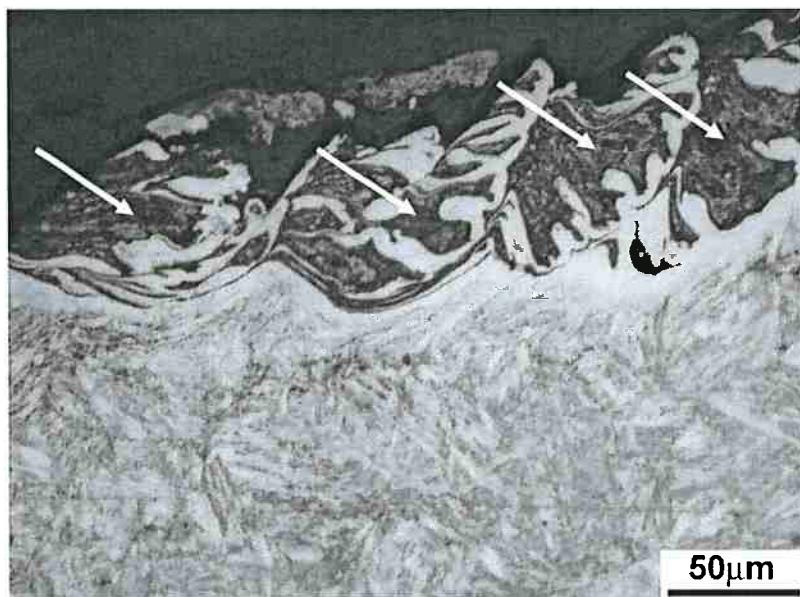


Figura 49: Corte transversal da palheta 51, danos superficiais causados por impacto de partículas exógenas, partículas indicadas por setas [17]

3.5. Discussão geral

Tanto a composição quanto as propriedades mecânicas das palhetas estão dentro dos valores esperados. Trata-se de um aço com composição semelhante ao AISI 410 (vide tabela 3) e suas propriedades mecânicas também encontram-se muito próximas (vide tabela 4), comprovando o esperado, que de fato as palhetas não foram afetadas por efeito de alta temperatura (mudança de microestrutura / fragilização), justamente por se tratar do último estágio da turbina, onde a temperatura é em torno de 150°C. Os resultados de dureza foram em torno de 300 HB.

Elementos / Amostras	M4282#4-2	M4282#28-9	M4282#31-6	M4282#51-5	M4282#62-2
Carbon (C) - %	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01
Silicon (Si) - %	0.21 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.21 ± 0.01
Manganese (Mn) - %	0.84 ± 0.01	0.80 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.85 ± 0.01
Phosphor (P) - %	0.020 ± 0.002	0.020 ± 0.001	0.020 ± 0.001	0.020 ± 0.002	0.020 ± 0.001
Sulfur (S) - %	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Chromium (Cr) - %	11.6 ± 0.1	11.5 ± 0.1	11.5 ± 0.1	11.5 ± 0.1	11.5 ± 0.1
Nickel (Ni) - %	2.8 ± 0.1	2.8 ± 0.1	2.8 ± 0.1	2.8 ± 0.1	2.8 ± 0.1
Molybdenum (Mo) - %	1.72 ± 0.05	1.70 ± 0.04	1.71 ± 0.02	1.70 ± 0.03	1.72 ± 0.08
Copper (Cu) - %	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Vanadium (V) - %	0.26 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.26 ± 0.01
Tin (Sn) - % - (2)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Nitrogen (N) - ppm	321 / 326 / 330	331 / 324 / 329	318 / 322 / 331	322 / 322 / 316	315 / 325 / 324
Aluminum (Al) - %	0.0047 ± 0.0007	0.0078 ± 0.0004	0.0034 ± 0.0004	0.0031 ± 0.0005	0.0031 ± 0.0007

Tabela 3: Resultados de análise química [17]

SAMPLE	PARAMETER	RESULTS
#4-7	<i>yield strength (MPa)</i>	870 ± 4
	<i>rupture strength (MPa)</i>	1002 ± 4
	<i>elongation (%)</i>	18.4 ± 0.5
	<i>reduction in area (%)</i>	58 ± 1
#31-3	<i>yield strength (MPa)</i>	866 ± 5
	<i>rupture strength (MPa)</i>	990 ± 6
	<i>elongation (%)</i>	19.6 ± 0.5
	<i>reduction in area (%)</i>	61 ± 1
#51-6	<i>yield strength (MPa)</i>	863 ± 3
	<i>rupture strength (MPa)</i>	996 ± 4
	<i>elongation (%)</i>	20.8 ± 0.5
	<i>reduction in area (%)</i>	62 ± 1

Tabela 4: Resultados dos ensaios mecânicos (palhetas 4, 31 e 51)

A fratura se propagou por fadiga demonstrando não só o mecanismo pelo qual a frente da trinca se propagou, como também o tipo de esforço ao qual a palheta estava submetida.

De acordo com Mann [22] um fluxo normal de operação em uma turbina a vapor palheta não arrasta partículas para a área da região afetada, superfície convexa próxima à ponta do bordo de fuga (vide figura 50). Sendo assim o arraste das partículas por fluxo de vapor irregular, torna-se bastante plausível. Possivelmente em regimes transitórios de operação, quando se está acionando ou quando se está desligando a turbina. O fluxo de vapor em regimes transitórios de

baixa pressão gera um contra-fluxo que atinge a base o bordo de fuga do último estágio (vide figura 13).

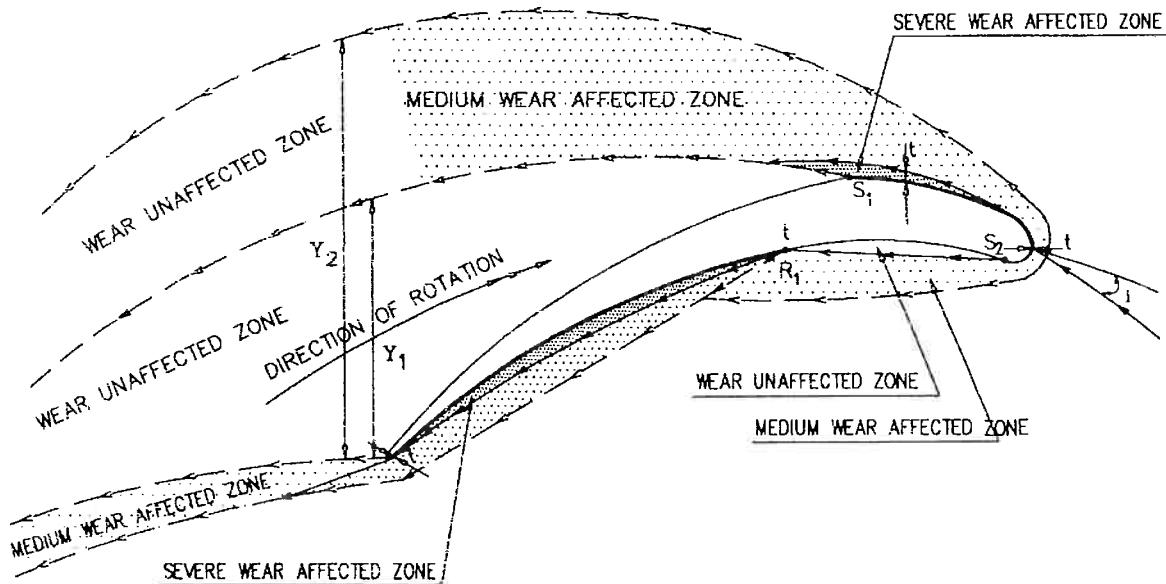


Figura 50: Locais de abrasão por particulado de uma palheta em fluxo constante de vapor [22]

Associado ao dano causado pelas partículas também está a mudança nas solicitações às quais as palhetas são submetidas durante um regime transiente de operação. A velocidade de rotação padrão de operação da turbina em questão era de 3600 rpm [18]. Na figura 51 observa-se a vibração à qual a turbina era submetida desde 0 rpm até os 3600 rpm de operação, medidas realizadas pelo fabricante durante o “speed up” da turbina (início de operação) [18]. Os picos de vibração em algumas freqüências comprovam que as palhetas foram submetidas a esforços maiores a cada interrupção na operação.

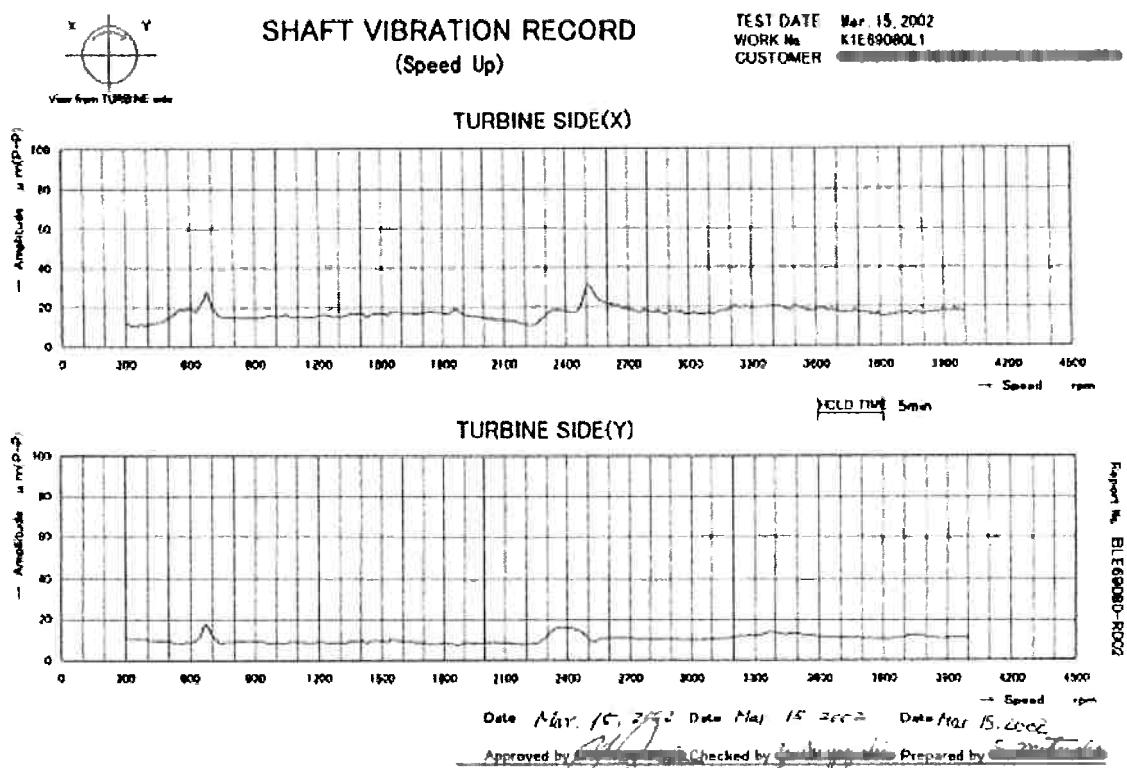


Figura 51: Registro de vibração da parte final do rotor da turbina durante início de operação [18]

4. Conclusões e Sugestões

- O despalhetamento do último estágio da turbina a vapor ocorreu por mecanismo de fadiga, que foi promovido pela erosão no bordo de fuga causado pelo impacto de partículas exógenas de ferro, cuja origem não pode ser determinada.
- A palheta 37 foi a primeira a fraturar devido ao maior comprimento de fratura por fadiga.
- A presença de partículas sólidas no fluxo de vapor é a causa principal da falha, causando erosão, criando regiões concentradoras de tensões que nuclearam as trincas presentes, que foram propagadas principalmente a cada parada e reativação da turbina.
- Com o objetivo de prevenir tal tipo de falha seria interessante investigar o comportamento de particulado sólido em fluxos de vapor de baixa pressão para se compreender melhor o comportamento das partículas e também a realização de um trabalho analisando todo o processo de uma usina termelétrica com o objetivo de se identificar a origem precisa dessas partículas.

5. Bibliografia

1. Sachs, I. A revolução energética do século XXI - Estudos Avançados. vol.21 no.59. pg. 21. São Paulo Jan./Abr. 2007.
2. Rosa, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear - Estudos Avançados. vol.21 no.59. pg. 39. São Paulo Jan./Abr. 2007.
3. Goldemberg, J; Lucon, O. Energia e meio ambiente no Brasil - Estudos Avançados. vol.21 no.59. pg. 7. São Paulo Jan./Abr. 2007.
4. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco de Informações de Geração: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>
5. Church, E. F. Steam Turbines. McGraw-Hill Book Company. 1950.
6. Kearton, W. J.. Steam Turbine Theory and Practice. 7^a Edição. Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. Londres. 1961.
7. Boyer, H. (editor). Metals Handbook. Volume 9. 8^a edição. ASM. Metals Park. 1975.
8. Gallardo, J. M.; Rodríguez, J. A. Failure of Gas Turbine Blades. Wear 252, pg. 264-268. 2002.
9. Taylor, J. L. Dicionário Metalúrgico. ABM. 1979.
10. Tu, S.T; Wang, W.Z; Zhu, K.L; Xuan, F, Z. Failure Analysis of the Final Stage Blade in Steam Turbine. Engineering Failure Analysis 14, pg. 632-641. 2007.
11. Hernández-Rossette, A. Marzur, Z. Investigation of the Failure of the L-0 Blades. Engineering Failure Analysis 13, pg. 1338-1350. 2006.
12. Perez-Rodriguez, N; Garcia-Illescas, R. Steam Turbine Blade Failure Analysis. Engineering Failure Analysis. 2007.

13. Romero, C. A; Campos-Amezcua, A. Numerical Investigation of the Solid Particle Erosion Rate in a Steam Turbin Nozzle. *Applied Thermal Engineering* 27, pg. 2394-2403. 2007.
14. Schegliaiev, A. V. *Turbinas de Vapor*. Editorial de Moscou. URSS. 1985.
15. Boyer, H. (editor). *Metals Handbook*. Volume 10. 8^a edição. ASM. Metals Park. 1975.
16. Wulpi, D. J. *Understanding How Components Fail*. ASM. 1985.
17. Azevedo, C. R. F. Caracterização fractográfica e microestrutural do material de palhetas de turbina a vapor. Relatório 74581-205. IPT. São Paulo. 2005.
18. Murray, S. J. Relatório MD10021.000 A0T0 1104. Exponent Failure Analysis Associates. 2004.
19. Stedfeld, R. L. *ASM Handbook Volume 12 "Fractography"*. 9^a edição. ASM. Metals Park. 1987.
20. Brooks, C. R. Choudhury, A. *Metallurgical Failure Analysis*. McGraw-Hill. New York. 1993.
21. Das, A. K. *Metallurgy of Failure Analysis*. McGraw-Hill. New York. 1997.
22. Mann, B. S. Particle erosion — a new concept of flow visualization and boundary layer investigations of rotating machines at high Reynolds numbers. *Wear* 223. Pg. 110-118. 1998.