

INSPEÇÃO NÃO-DESTRUTIVA E ANÁLISE DE FALHA DE JUNTAS FADIGADAS DE GLARE[®] 1

Henrique Nogueira Soares²
José Ricardo Tarpani³

Resumo

É realizado um estudo comparativo da capacidade de dois métodos de inspeção não-destrutiva em detectar trincas de fadiga em juntas sobrepostas rebitadas de laminado híbrido metal-fibra Glare de uso aeronáutico. Durante os ensaios mecânicos de fadiga sob amplitude constante de tensão, vários espécimes foram periodicamente inspecionados por raios-X, nas modalidades convencional e digital, além de correntes parasitas. Os resultados indicam que raios-X convencional proporcionam excelente detalhamento de trincas nas juntas mecânicas, enquanto que as imagens geradas pela modalidade digital apresentam qualidade muito inferior. Correntes parasitas se mostram uma técnica bastante interessante para a caracterização do padrão de trincamento das juntas de Glare.

Palavras-chave: Ensaio não-destrutivo; Estrutura aeronáutica; Fadiga; Junta rebitada; Laminado híbrido metal-fibra.

NONDESTRUCTIVE INSPECTION AND FAILURE ANALYSIS OF FATIGUED GLARE[®] JOINTS

Abstract

A comparison has been performed on the ability of two nondestructive methods in detecting fatigue cracks in riveted lap joints of aeronautical grade fiber-metal laminate Glare. During constant amplitude loading fatigue testing several riveted specimens were periodically inspected through X-rays radiography in both conventional and digital modalities, as well as by means of eddy current methodology. Results have shown that the conventional X-ray modality provides high quality imaging of growing cracks in the mechanical joints, whereas digital radiography displayed significantly poorer image quality. Eddy current has shown to be a very promising technique to characterize cracking patterns in mechanical Glare joints.

Key words: Airframe material; Fatigue; Fiber-metal laminate; Non-destructive inspection; Riveted lap joint.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Mestrando pelo Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil.

³ Professor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil,
*jrpan@sc.usp.br

1 OBJETIVO

Objetiva-se neste estudo avaliar a habilidade de duas técnicas de inspeção não-destrutiva, quais sejam, raios-X e correntes parasitas, na identificação de trincas de fadiga em juntas rebitadas de laminado híbrido metal-fibra (LMF) Glare®. Como consequência, o trabalho avalia também, em boa extensão, a competência nacional na importante tarefa de assegurar um padrão elevado de integridade estrutural de aeronaves civis, o que, em última instância, significa garantir um alto grau de segurança em voo.

2 INTRODUÇÃO

O setor aeronáutico se consolidou nas últimas décadas como o meio de transporte mais rápido e eficiente. Neste sentido, o desenvolvimento de novos materiais, mais leves e resistentes, em termos mecânicos e químicos (e.g. corrosão), tem contribuído significativamente para o crescimento e aperfeiçoamento desta área da mobilidade. Isto inclui o aumento da vida útil, bem como da qualidade e o melhor desempenho das estruturas e componentes aeronáuticos, o que se reflete diretamente na redução dos custos operacionais, em particular os de manutenção, mais especificamente os de inspeção periódica não-destrutiva e de análise e prevenção de falhas.

Glare é um laminado composto (híbrido) metal-fibra concebido na Universidade de Delft na Holanda, constituído por lâminas de liga alumínio de grau aeronáutico intercaladas com camadas de pré-impregnado de epóxi com fibra de vidro.^[1,2]

O material vem já, há tempos, recebendo bastante atenção da comunidade científica nacional.^[3]

Ele apresenta excepcionalmente elevada resistência à fadiga, combinada com outras propriedades atrativas à indústria aeronáutica, tais como baixa densidade, resistência ao impacto, à corrosão e à chama.^[4] A superior resistência à fadiga mecânica exibida pelo Glare é devida ao fenômeno denominado *crack bridging*, em que as fibras de vidro, mesmo que parcialmente fraturadas e destacadas da matriz epóxi, ainda sustentam considerável parcela do carregamento atuando no componente, e, portanto, reduzem a carga (ou força motriz) atuante na trinca, que se propaga preferencialmente nas camadas adjacentes de alumínio (Figura 1).

Em virtude do extraordinário potencial de aplicação do Glare na indústria aeronáutica, visto suas excepcionais propriedades específicas (propriedade/densidade), é crescente a sua utilização na confecção de fuselagens de aeronaves comerciais (e.g. Airbus A380), Figura 2, substituindo assim ligas tradicionais de alumínio de grau aeronáutico, especialmente a 2024-T3.

Resultados prévios^[5] em juntas rebitadas Glare-Glare, mostraram que o mecanismo de falha preponderante é basicamente uma função do nível de tensão aplicado, podendo variar desde a fratura por cisalhamento puro dos rebites, sob tensões relativamente altas, ao *fretting* da lâmina interna (*faying surface*) de Glare, sob reduzidas tensões aplicadas, tais como tipicamente desenvolvidas na aeronave em condições normais de serviço, passando por mecanismos mistos sob tensões cíclicas de intensidade intermediária. Uma característica fundamental dos trincamentos de juntas rebitadas de Glare sob tensões de baixas a médias, é que eles alcançam grandes extensões nas lâminas metálicas internas das chapas individuais do sanduíche Glare, unidas por rebite, sem que nucleação e crescimento ainda se manifestem nas lâminas externas, e, portanto, não são visíveis por técnicas de inspeção puramente visuais.^[5]

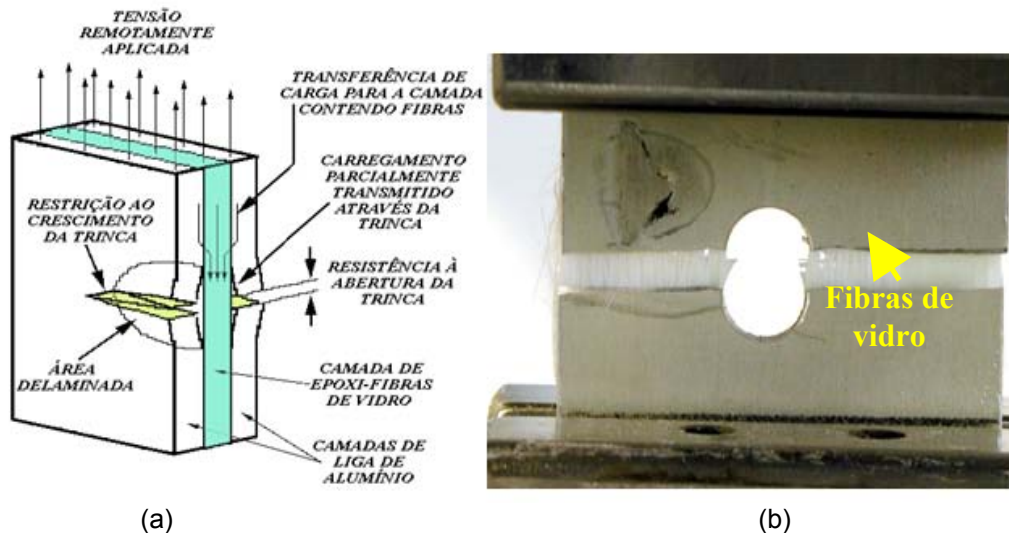


Figura 1 – (a) Conceito de *crack bridging*, extensivamente explorado nos laminados híbridos metal-fibra (b) *Crack bridging* em experimento de fadiga com Glare.



Figura 2 – Aeronave Airbus A380: em azul os painéis de Glare utilizados na confecção da fuselagem superior.

Desta forma, são imperativos o desenvolvimento, a implementação e o aprimoramento de métodos não-destrutivos mais sofisticados que o visual, de modo a se assegurar a integridade estrutural das juntas mecânicas desta nova classe de materiais de construção aeronáutica, e, por conseguinte, garantir a segurança das aeronaves em voo.

Os principais métodos rotineiramente utilizados na prática aeronáutica diária incluem o visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, raios-X, correntes parasitas e ultra-som.^[6,7] Entre estes, os mais adequados aos propósitos do presente projeto de pesquisa são raios-X e correntes parasitas, basicamente em face das especificidades e do padrão típico de trincamento destas juntas rebitadas, tal como vem sendo amplamente reportado na literatura especializada.^[8-13] Mais exatamente, as trincas de fadiga nucleiam quase que invariavelmente nas bordas da furação dos rebites, e se propagam nas laminas metálicas internas da junta sobreposta, perpendicularmente à direção de carregamento mecânico.^[5] Este processo de fratura não envolve substancial desenvolvimento de delaminações entre as diversas interfaces de Glare, justificando a limitada utilidade do método de ultrassom na caracterização quantitativa de danos nestas juntas rebitadas. Dada a camada eletricamente isolante formada pelo composto vidro-epóxi em Glare, partículas magnéticas encontram também restrita aplicação, se alguma, neste tipo de junta.

Por sua vez, líquidos penetrantes teriam utilidade única e exclusivamente no caso de trincas aflorando as superfícies externas do espécime, o que, como já referido, ocorre apenas nos estágios mais avançados de trincamento das juntas de Glare, aproximando a falha catastrófica do componente.

3 MATERIAL E CORPOS DE PROVA

Foram utilizadas chapas de Glare classificação 5, esquematizado na Figura 3, constituídas por 2 lâminas externas de liga-Al 2024-T3, com 0,5 mm de espessura cada, que ensanduíçam 4 mantas unidirecionais de uma mistura de fibras de vidro-resina epóxi justapostas alternadamente com simetria central (i.e., $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$), perfazendo assim uma espessura total do laminado metal-fibra de 1,6 mm. Dois rebites de grau aeronáutico foram utilizados na montagem em cada espécime, segundo os arranjos alinhado (vertical) e não-alinhado (horizontal) à direção de carregamento em fadiga trativa (Figura 4).

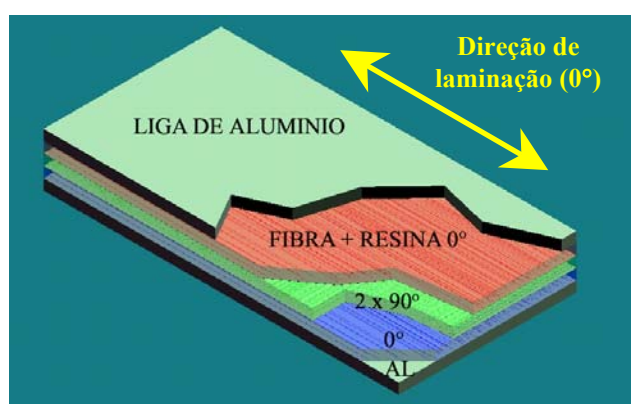


Figura 3 – Arquitetura do LMF Glare classe 5: arranjo 2/(0/90)_S.

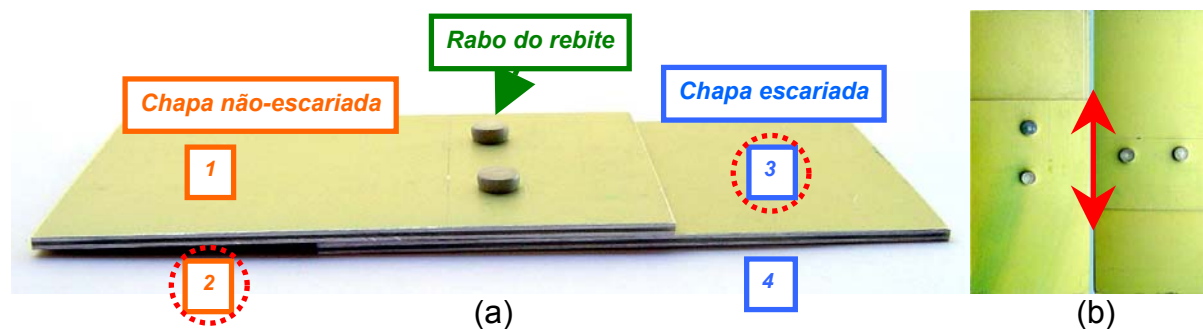


Figura 4 – (a) Corpo de prova (CDP) com rebites horizontais e nomenclatura adotada para as 4 lâminas de liga-Al que formam as 2 chapas unidas de Glare; (b) As duas geometrias de CDPs ensaiadas neste estudo, indicando-se a direção de carregamento.

4 MÉTODOS

Os corpos de prova rebitados foram submetidos a carregamento cíclico axial de amplitude constante de tensão trativa flutuante, com as tensões máximas aplicadas sendo selecionadas com base na resistência à tração das juntas de Glare. A razão R de cargas de 0,1, e a frequência de cargas senoidais de 10 Hz objetivaram evitar, respectivamente, a flambagem e o aquecimento dos corpos de prova rebitados ensaiados à temperatura ambiente.

Os critérios de falha adotados originalmente para a finalização dos ensaios de fadiga foram a ruptura completa dos espécimes, ou a aplicação de 10^6 ciclos de fadiga, qual deles primeiro ocorresse. No entanto, vários ensaios prosseguiram indefinidamente.

Empregou-se no levantamento das chamadas curvas S-N um sistema servo-hidráulico MTS[®]-810 com capacidade máxima de 250 kN.

Periodicamente, ao longo dos ensaios de fadiga, os corpos de prova foram retirados da máquina de ensaio e submetidos à caracterização não-destrutiva, utilizando-se, para isso, as técnicas de radiografia de raios-X (nas modalidades convencional, com filmes ou películas, e digital, com placas de imagem-IP) e de correntes parasitas de baixa frequência, visando-se detectar as possíveis descontinuidades tipo-trinca, geradas no carregamento mecânico cíclico previamente aplicado.

A interpretação dos resultados das inspeções não-destrutivas foi deixada integralmente a cargo dos responsáveis pela condução dos ensaios nas respectivas empresas que participaram do projeto. Além disso, o próprio processo de condução das inspeções, incluindo os equipamentos empregados, normas de procedimento aplicadas e padrões de referência utilizados, também ficou totalmente sob controle dos funcionários responsáveis pertencentes às empresas, de modo a se evitarem quebra de sigilos comerciais-industriais, bem como quaisquer influências e pressões que pudessem culminar em tendências, favorecimentos, prejuízos e pr(é)conceitos, de qualquer natureza, por parte dos diversos participantes deste programa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados de curvas S-N (tensão-vida) em fadiga obtidas para os espécimes com rebites alinhados (verticais) e não-alinhados (horizontais) à direção de carregamento, conforme padrão anteriormente ilustrados na Figura 4.

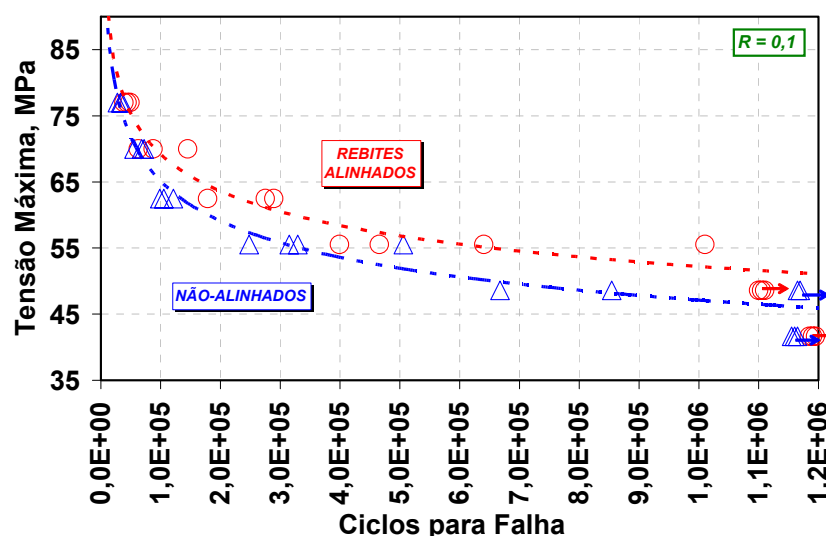


Figura 5 – Curvas S-N das juntas de Glare com rebites verticais, ou alinhadas (vermelho), e horizontais, ou não-alinhadas (azul).

Conclui-se que as juntas verticais são mais resistentes que as horizontais [5].

A Figura 6 apresenta as imagens radiográficas obtidas por raios-X na modalidade convencional (utilizando filmes fotográficos) de 4 espécimes rebitados e fadigados (2 verticais e 2 horizontais), indicando-se o número de ciclos alcançados pelos mesmos durante os ensaios de fadiga.

Observam-se claramente trincas duplas emanando de cada um dos rebites. Nota-se que a técnica não possibilita, entretanto, identificar em qual(is) das lâminas internas das chapas de Glare iniciam e evoluem os trincamentos. Provavelmente a modalidade de tomografia computadorizada de raios-X pudesse superar tal importante limitação.

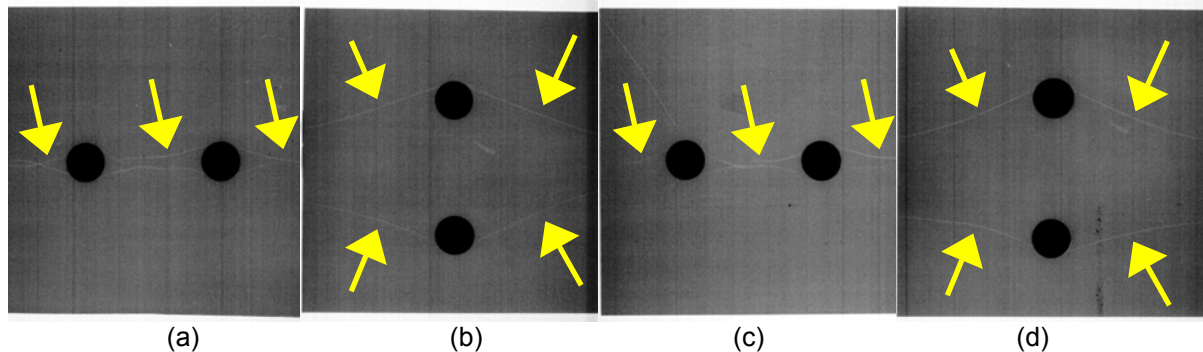


Figura 6 – Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para 4 corpos de prova (CDP) previamente fadigados até determinado número N de ciclos: (a) CDP 19, N=2.297.900; (b) CPD 29, N=7.724.352; (c) CPD 111, N=1.169.000; (d) CPD 211, N=1.929.990. As setas apontam para os trincamentos detectados pela técnica em questão. Cabe notar que as imagens correspondem ao negativo dos filmes originais, uma vez que foram obtidas por intermédio da varredura daqueles.

As Figuras 7 e 8 apresentam as radiografias digitais (placa de fósforo, método indireto) obtidas para o espécime CDP 111, de acordo com, respectivamente, dois distintos participantes do presente projeto.

Observa-se que, enquanto um deles é parcialmente bem-sucedido (equipamento industrial, Figura 8), o outro (equipamento comercial adaptado, Figura 7) falha completamente na tarefa em questão.

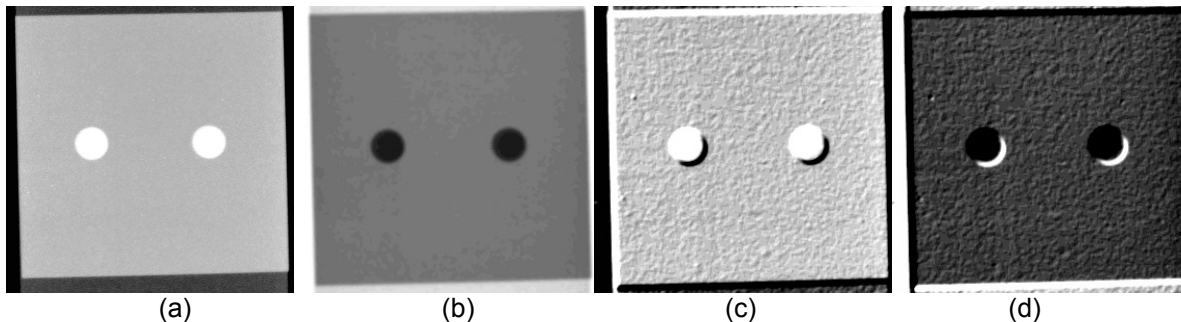


Figura 7 – Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP 111, N=1.169.000. (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo; (d) Tom invertido correspondente.

Enquanto nenhuma descontinuidade é visualizada na Figura 7, na Figura 8 algumas trincas são parcialmente identificadas, embora com certa dificuldade e estando invariavelmente deslocadas com relação aos respectivos furos de rebite, se comparadas às imagens radiográficas convencionais, assumidas como perfeitas e apresentadas na Figura 6. Cabe notar que as imagens mostradas na Figura 8 foram selecionadas com as melhores dentro de um conjunto de resultados obtidos para diversa juntas inspecionadas, que incluíram os CDPs 19, 29 e 211, o que dá uma medida da atual limitação desta modalidade quando aplicada a tarefa em questão.

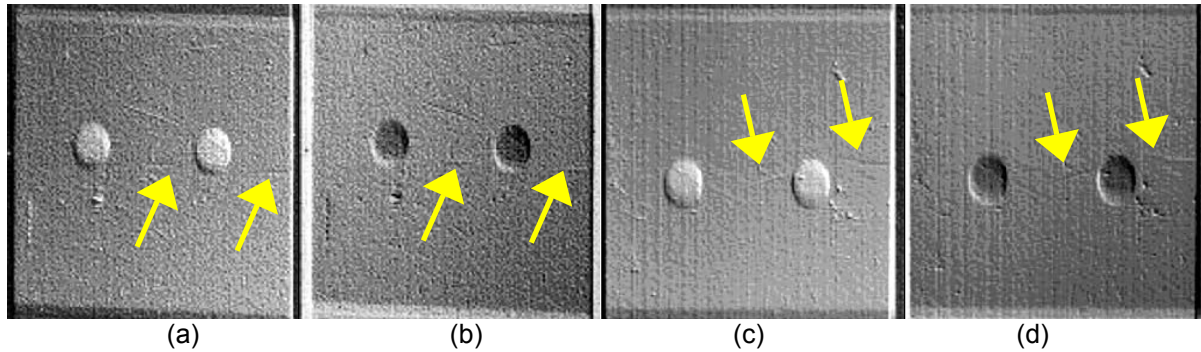


Figura 8 – Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP 111, N=1.169.000. (a) Filtro *Emboss* alto relevo; (b) Tom invertido correspondente (com a&b obtidos por incidência do feixe de raios-X a $+45^\circ$ em relação ao plano principal da junta); (c) Filtro *Emboss* alto relevo; (d) Tom invertido correspondente (com c&d obtidos por incidência do feixe de raios-X a -45° em relação ao plano principal da junta).

Passamos agora a ilustrar alguns resultados obtidos por intermédio de correntes parasitas aplicadas a alguns dos espécimes anteriormente radiografados.

Cabe mencionar que a técnica empregada, diferentemente das versões mais recentes que são inteiramente automatizadas e dispõem de processamento e edição computadorizada de imagens, além de saídas gráficas em tempo real, dependeu da precisão do equipamento utilizado na mesma proporção e medida que da perícia, sensibilidade e experiência do operador, uma vez que a varredura da amostra foi exclusivamente manual.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para os mesmo 4 espécimes anteriormente submetidos a radiografia de raios-X na modalidade convencional (Figura 6). Comparando estes esquemáticos de padrão de trincamento com aquelas radiografias nota-se, em princípio, uma compatibilidade muito boa entre os resultados obtidos pelas duas técnicas.

A técnica de correntes parasitas de baixa freqüência possibilitou em muitas ocasiões a localização exata da posição ocupada pelas trincas de fadiga internamente desenvolvidas nas juntas sobrepostas, ou seja, permitiu verificar se as trincas propagavam na lâmina metálica interna da chapa escareada e/ou não-escareada (lâminas 3 e 2, respectivamente, conforme padrão de referencia estabelecido na Figura 2), o que é virtualmente impraticável para a radiografia, a menos que esta empregue métodos tomográficos.

Tal fato constitui, indubitavelmente, uma vantagem significativa para a técnica de correntes parasitas.

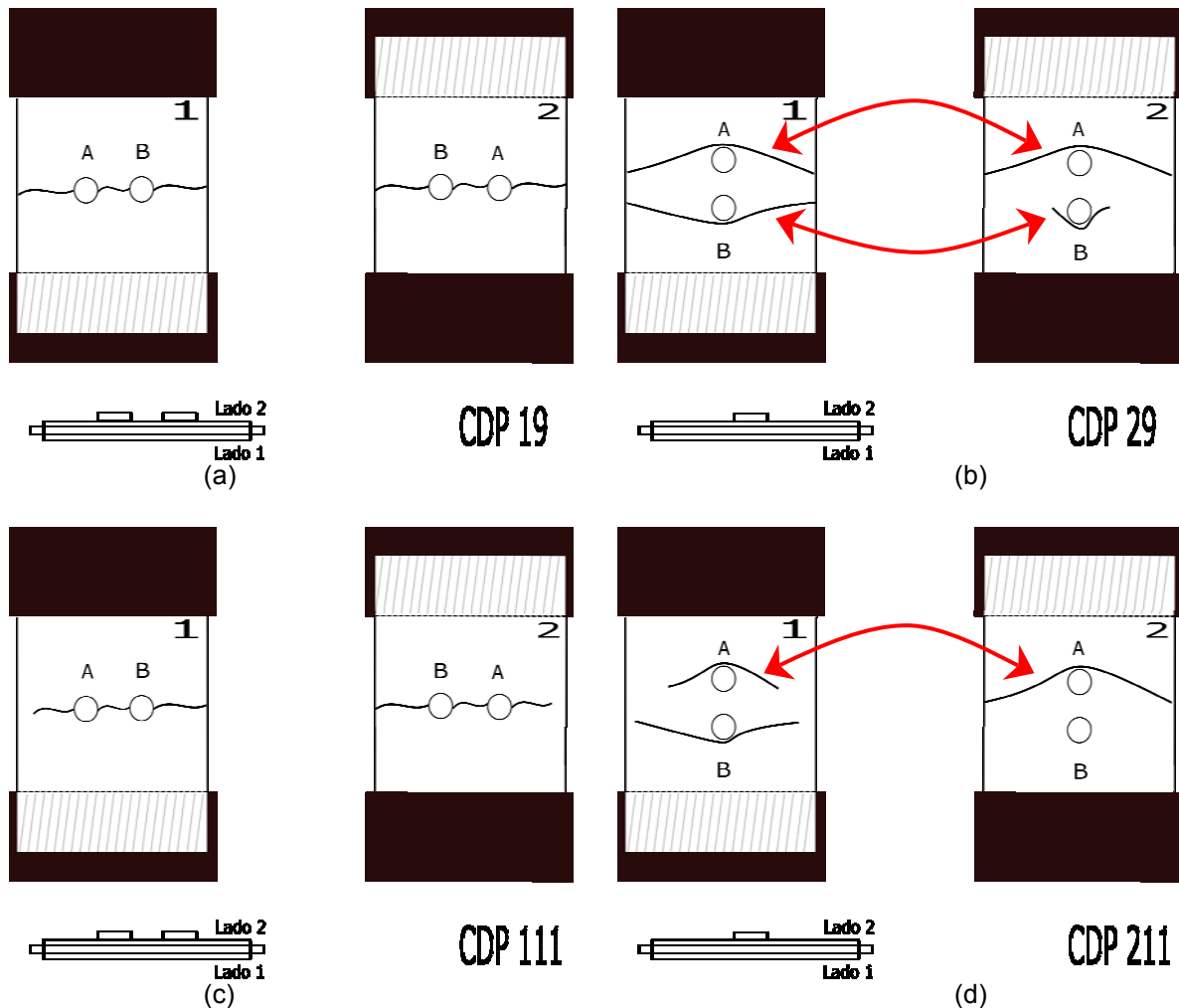


Figura 9 – Resultados de correntes parasitas por escaneamento manual, considerando-se ambos os lados de frente e verso dos espécimes: (a) CDP 19, N=2.297.900; (b) CPD 29, N=7.724.352; (c) CPD 111, N=1.169.000; (d) CPD 211, N=1.929.990.

No entanto, as correntes parasitas têm a desvantagem de, em função da própria metodologia da técnica, em que uma sonda magnética varre a superfície do espécime, não detectar com exatidão tanto a extensão da trinca quanto sua trajetória na amostra. A precisão destas medidas é basicamente proporcional ao diâmetro da sonda (6 mm no caso em questão), visto que a descontinuidade geométrica tipo-trinca é acusada pelo método uma vez que a mesma esteja no interior do perímetro definido pela sonda. Tal fato implica também em que as correntes parasitas não possam diferenciar entre duas trincas vizinhas separadas por uma distância da ordem do diâmetro da sonda. Estes parecem ser os casos (a) e (c) na Figura 9, correspondente aos trincamentos dos arranjos de rebite não-alinhados, conforme pode ser inferido através da observação das radiografias correspondentes na Figura 6.

Já nos casos das Figuras 9b e 9d, aparentemente ocorre uma perfeita compatibilidade entre os trincamentos detectados e aqueles verificados nas respectivas radiografias da Figura 6. No entanto, não é possível, neste momento, certificar-se de que ocorram (cabe dizer, improváveis) trincamentos idênticos nas duas lâminas metálicas internas das juntas verticais, conforme sugere a Figura 9 (vide trincas apontadas com setas vermelhas), o que não é desmentido pelas

correspondentes radiografias na Figura 6. A desmontagem dos espécimes para confirmação *in-loco* dos padrões reais trincamentos já esta programada.

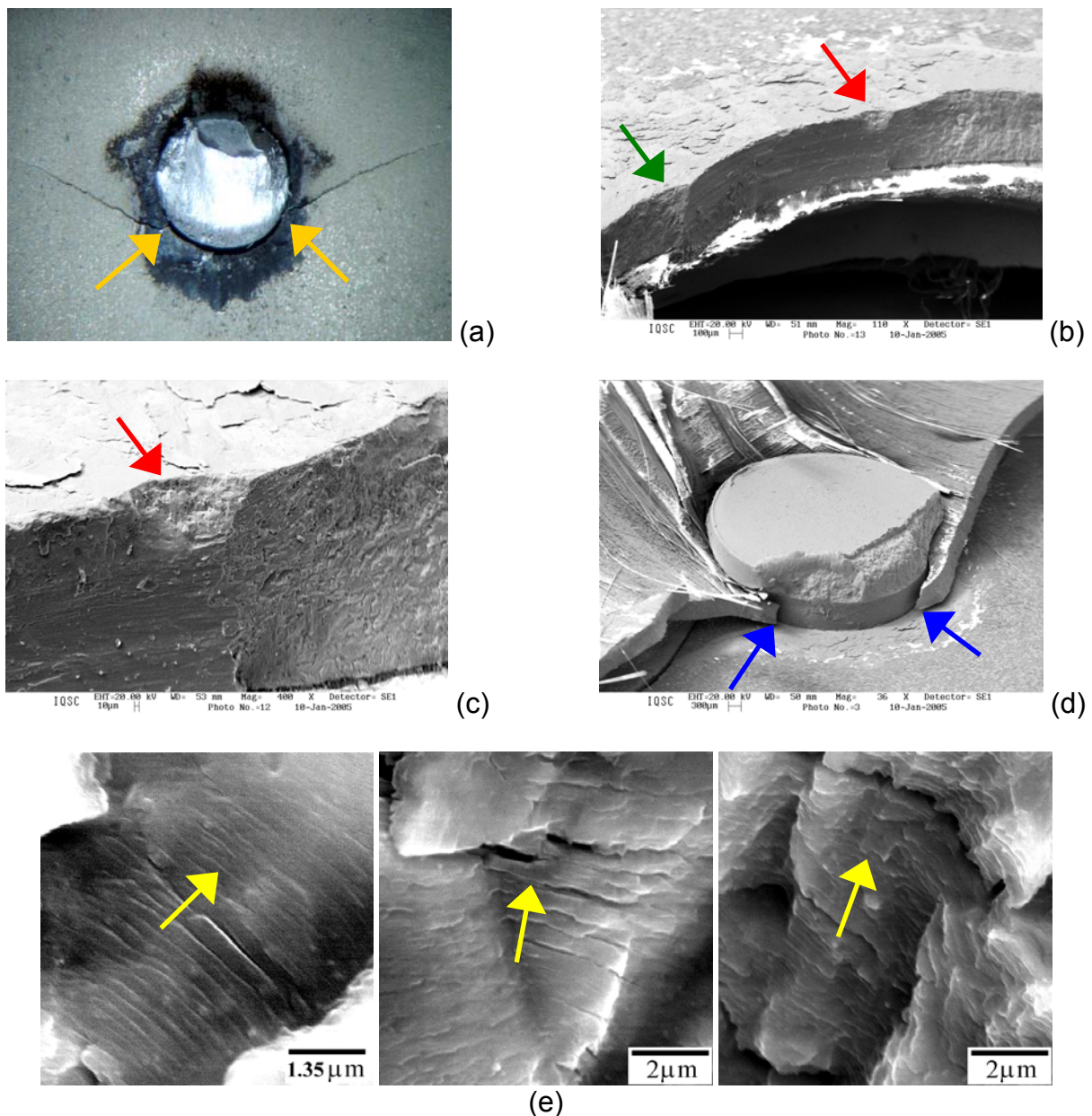


Figura 10 – (a) Trincamento duplo (setado) na borda da furação da lâmina metálica interna da chapa não-escareada de Glare, que apresenta uma superfície intensamente oxidada típica do mecanismo de *fretting*; (b) Vista interna da furação, indicando-se dois sítios de trincamento; (c) Detalhe de um dos sítios mostrados em b, onde se observa uma cratera originada pelo contato entre as duas lâminas metálicas internas das chapas de Glare; (d) Sítios de trincamento originados por *fretting* na lâmina metálica interna da chapa escareada; (e) Padrões locais de trincamento por fadiga nas lâminas metálicas internas de Glare (a direção microscopia de crescimento de trinca e indicada por setas, e a macroscópica corresponde à largura da página).

Após a falha por ruptura completa de alguns espécimes, técnicas de microscopia eletrônica de varredura foram empregadas na análise das superfícies de fratura, visando à localização dos sítios de nucleação de trincas e a caracterização dos mecanismos de iniciação e crescimento de trincas nos corpos de prova. Os resultados, Figura 10, evidenciam a nucleação de trincas segundo o mecanismo de

fretting nas proximidades dos furos de rebite, e revelam padrões de estriamento por fadiga nas lâminas metálicas internas de Glare.

Um grande desafio para os métodos presentemente avaliados de inspeção não-destrutiva seria o de identificar trincas incipientes, transitando do estágio de nucleação para o de propagação propriamente dita, estendendo-se por apenas frações de milímetros, ou seja, muito menores que aquelas mostradas na Figura 10a. Ensaio está atualmente sendo focado neste tema, seja em juntas rebitadas homogêneas Glare-Glare tais como as aqui reportadas, assim como em juntas mistas Glare-liga Al 2024-T3.

6 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos no presente estudo permitem concluir que:

1. Juntas rebitadas verticais de Glare são mais resistentes que as horizontais;
2. Mesmo produzindo imagens de alta resolução, raios-X (convencional) não possibilitam identificar em qual(is) das lâminas internas das chapas de Glare iniciam e evoluem os trincamentos;
3. Equipamentos industriais de radiografia digital são potencialmente aplicáveis à inspeção de juntas de Glare, enquanto que sistemas comerciais adaptados muito provavelmente sejam inadequados a tarefa;
4. Correntes parasitas demonstram ser adequadas para assegurar a integridade estrutural das juntas sobrepostas presentemente avaliadas, possibilitando inclusive localizar com exatidão a posição ocupada pelas trincas de fadiga internamente desenvolvidas, o que já não é possível via radiografia;
5. Correntes parasitas têm a desvantagem, relativamente à radiografia, em não mensurar precisamente a extensão de trincas e em não identificar separadamente trincas relativamente próximas entre si e situadas numa mesma lâmina metálica;
6. Análise de falhas é uma ferramenta imprescindível para caracterizar precisamente os mecanismos operantes de fratura em juntas rebitadas de Glare e auxiliar na interpretação e calibração das técnicas de inspeção não-destrutiva desta recente classe de materiais de engenharia.
7. São ainda necessários novos testes e eventuais desenvolvimentos no sentido de garantir que as técnicas avaliadas sejam capazes de detectar trincamentos incipientes, da ordem de fração de milímetros, de forma a se qualificarem como ferramentas valiosas para garantia de segurança de aeronaves em voo.

Agradecimentos

Às empresas Compoende de Tremembé-SP (radiografia convencional), TAM de São Carlos-SP (correntes parasitas), e ao Grupo de Ensaio Não-Destrutivos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (radiografia digital industrial). A empresa que supriu os resultados de radiografia digital com equipamento comercial adaptado (odontológico Gendex®) optou por não se identificar.

REFERÊNCIAS

- 1 BEUMLER T., Fiber metal laminates- a family concept. *In: 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, March 2006, Atlanta-GA, USA, Proceedings..., 2006, 1CD.
- 2 VERMEEREN C.A.R.J., BEUMLER T., DE KANTER J.L.C.G., VAN DER JAGT O.C., OUT B.C.L., Glare design aspects and philosophies. *Applied Composite Materials*, v.10, p.257-276, 2003.
- 3 BASTIAN F.L., Compósitos laminados fibra-metal: características e tenacidade à fratura. *In: 58^o Congresso Anual da ABM*, Julho 2003, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: ABM, 2003, 1CD.
- 4 VLOT A. et al, Disponível em: <<http://www.glareconference.com>>. Acesso em 23 de agosto de 2003, 2001.
- 5 TARPANI J.R., MILAN M.T., BOSE W.W., SPINELLI D., Fatigue in riveted lap joints of fiber-metal laminate Glare-5. *In: 9th International Fatigue Congress*, May 2006, Atlanta-GA, USA, Proceedings..., 2006, 1CD.
- 6 PIOTROWSKI D., BOHLER J, BODE M, MOORE D, BAKUCKAS J, GALELLA D, SWINDELL P., Assessment of capabilities and readiness of conventional and emerging NDI methods for detecting subsurface cracks in lap joint structures. *In: 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, March 2006, Atlanta-GA, USA, Proceedings..., 2006, 1CD.
- 7 SEIDL A.L., Inspection of composite structures. *SAMPE Journal*, v.30, p.38-44, 1994; *ibid*, v.31, p.42-48, 1995.
- 8 RANS C., STRAZNICKY V., Avoiding knife-edge countersinks in Glare through dimpling. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v.28, p.633-640, 2005.
- 9 DE RIJCK J.J.M., Stress analysis of fatigue cracks in mechanically fastened joints. *PhD Thesis*, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University, The Netherlands, 316 pg, 2005.
- 10 WOERDEN H. J. M., SINKE J., HOOIJMEIJER P. A., Maintenance of Glare structures and Glare as riveted and bonded repair material. *Applied Composite Materials*, v.10, p.307-329, 2003.
- 11 HEIDA J.H., PLATENKAMP D.J., In-service inspection of Glare fuselage structures. *National Aerospace Laboratory NLR-TP-2001-608 Report*, The Netherlands, 2001.
- 12 FAHR A., CHAPMAN C.E., LALIBERTÉ J.F., FORSYTH D.S., POON C., Nondestructive evaluation methods for damage assessment in fiber-metal laminates. *Polymer Composites*, v.21, p.568-574, 2000.
- 13 RYAN L., MONAGHAN J., Failure mechanism of riveted joint in fibre metal laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, v.103, p.36-43, 2000.