

IMAGEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE DANOS EM NÚCLEOS DE PAINÉIS-SANDUÍCHE AERONÁUTICOS POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

¹ Alexandre M. A. Portela (*portela@sc.usp.br*)

² Edson L. G. Vidoto (*evidoto@ifsc.usp.br*)

² Mateus J. Martins (*mateus@ifsc.usp.br*)

² Alberto Tannús (*goiano@ifsc.usp.br*)

¹ José R. Tarpani (*jrpan@sc.usp.br*)

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP

² Instituto de Física de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP

Resumo: No presente trabalho, Ressonância Magnética Nuclear (RMN) foi empregada no imageamento e na caracterização de danos por amassamento do núcleo de meta-aramida (Nomex®) em painéis-sanduíche estruturais revestidos com laminados de resina epóxi fortalecida com fibras contínuas de carbono. Objetivou-se verificar a habilidade desta promissora técnica não-destrutiva para um possível emprego futuro em programas de inspeção periódica de componentes e estruturas aeronáuticas de alta responsabilidade. Os resultados foram bastante animadores, mostrando que a RMN tem, sob determinadas circunstâncias, um grande potencial para indicar, localizar e quantificar danos internos em componentes do tipo painel-sanduíche.

Palavras-Chave: Componentes aeronáuticos, Danos em painéis-sanduíche, Inspeção não-destrutiva, Ressonância Magnética Nuclear.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Painéis-Sanduíche (Honeycomb Panels) na Indústria Aeronáutica

Painéis-sanduíche estruturais são formados por um núcleo do tipo colméia (*honeycomb*) que possui uma estrutura celular e cujas unidades básicas exibem, em geral, um formato hexagonal similar à estrutura dos favos de mel. Este núcleo colméia pode ser metálico ou polimérico, sendo externamente revestido por placas laminadas sólidas, geralmente constituídas por polímeros termorrígidos reforçados com fibras contínuas de vidro, para-aramida (Kevlar®) ou carbono. A estrutura geral de um painel-sanduíche é esquematizada na Figura 1.

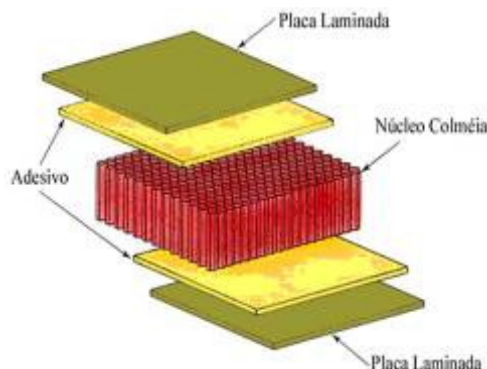


Figura 1. Estrutura básica de um painel-sanduíche - *Honeycomb* (ASKELAND, 1994).

A diversidade de aplicações de estruturas do tipo painéis-sanduíche na indústria de construção aeronáutica tem crescido rapidamente em função de suas propriedades atrativas, tais como: redução do peso das aeronaves associada a um ótimo desempenho mecânico sob fadiga, altas rigidez e resistência à flexão, ótima capacidade de isolamento térmico e acústico, alto coeficiente de amortecimento, boa resistência ao fogo, relativamente baixo custo de produção por unidade de volume, dentre outras vantagens (YEH et al, 2004; LAPLANTE et al, 2005; HEIMBS & PEIN, 2009).

Estruturas aeronáuticas tipicamente construídas com painéis-sanduíche incluem: radômes, superfícies de controle, carenagens dos motores, lâminas propulsoras de helicópteros, e, em alguns casos, até mesmo fuselagens (REZENDE & BOTELHO, 2000). A Figura 2 mostra, em termos de esforços mecânicos desenvolvidos, quais as partes mais intensamente solicitadas da estrutura de uma aeronave de grande porte durante os estágios de pouso/decolagem e em vôo, sendo que uma grande proporção destes componentes estruturais é confeccionada com painéis tipo-sanduíche.

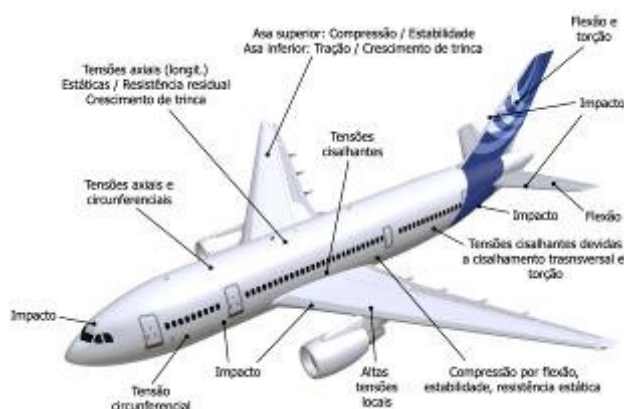


Figura 2. Tipos de esforços mecânicos aos quais são submetidos os principais elementos estruturais de uma aeronave.

Entretanto, a natureza celular do núcleo dos painéis-sanduíche os faz particularmente sujeitos ao ingresso de líquido e gases durante sua vida-útil operacional, o que leva à degradação físico-química da estrutura tipo-colméia dos núcleos, reduzindo assim as suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, incrementando o risco de falhas do veículo em serviço.

1.2 Estabelecimento do Problema

A rigor, os painéis-sanduíche aeronáuticos são projetados, fabricados e finalmente embarcados e montados no veículo aéreo de modo a que se mantenham íntegros durante toda a sua vida em serviço. Idealmente, portanto, eles deveriam se manter perfeitamente blindados contra os efeitos agressivos do ambiente de operação.

Entretanto, a existência de defeitos de fabricação, a ocorrência de danos por impacto em serviço (em especial durante os estágios de manutenção), ou mesmo a inevitável presença das furações necessárias à passagem de prendedores (fixadores), dentre outros detalhes construtivos, podem gerar uma cadeia de eventos culminando no ingresso e na percolação de gases e líquidos no núcleo-colméia dos painéis-estruturais. Tipicamente, água, fluido hidráulico, querosene, lubrificantes, degelantes e solventes são substâncias que potencialmente podem contaminar estas estruturas celulares aeronáuticas em condições normais de serviço (SHAFIZADEH et al, 1999; BALASKÓ et al, 2005).

A presença destes elementos no interior dos *honeycombs* traz sérios riscos à segurança de operação das aeronaves, donde se podem citar: (i) desbalanceamento da distribuição de peso na estrutura, com penalização adicional quanto ao consumo de combustível; (ii) corrosão de células metálicas, hidrólise de células poliméricas e degradação dos adesivos, com perda da integridade e da resistência estrutural dos elementos de construção; (iii) destruição das células do núcleo devida à expansão/contração dimensional cíclica decorrente da transformação de fases causada por variações extremas da temperatura em serviço, dentre outros tantos efeitos perniciosos. Nos veículos de asas rotativas, a presença de água ou fluido hidráulico na estrutura interna das pás rotativas degrada as suas propriedades mecânicas e causa mudanças substanciais no centro de gravidade do sistema de propulsão e sustentação. Além de todos estes efeitos nefastos, os elevados encargos incidentes nos procedimentos de reparo periódico destes componentes também não de ser considerados (LAPLANTE et al, 2005. SHAFIZADEH et al, 1999; MARBLE et al, 2009).

De fato, o ingresso destes elementos quase que invariavelmente leva a danificação da estrutura nuclear do tipo-colméia por processos químicos (ex., hidrólise) e eletroquímicos (ex. corrosão), gerando um círculo vicioso em que a entrada de gases e líquidos por posições preferenciais (em geral, a partir das furações e da estrutura de espuma localizada no bordo de ataque das hélices em helicópteros), e a sua distribuição por canais internamente criados na colméia através da degradação causada por aqueles mesmos agentes, tornam-se processos auto-acelerantes.

Não se pode também desconsiderar a possibilidade de sabotagens durante o próprio processo de manufatura dos painéis e estruturas do tipo-sanduíche. Pode-se desta forma aventar a possibilidade de o componente ser embarcado e instalado em uma aeronave numa condição já estruturalmente (mecanicamente) comprometida, de sorte que o eventual ingresso de líquidos durante a operação do veículo em serviço seria seguido, sem qualquer oposição ou restrição, pela sua ampla e rápida distribuição (migração) através da rede pré-existente de canais interconectores das células do núcleo.

Visto que as técnicas mais recentes de eliminação da umidade interna de painéis-sanduíche empregam como pontos de retirada do fluido (por exemplo, através da aplicação simultânea de calor e vácuo) os mesmos caminhos por onde se verificou sua entrada (SHAFIZADEH & SEFERIS, 2003; LI et al, 2006), ou então, mais tradicionalmente,

utilizam-se de pequenas perfurações controladamente realizadas nos laminados de revestimento do painel (UNITED TECHNOLOGIES, 1997), seria grande a possibilidade de que a estrutura interna altamente comprometida de um painel, seja pela degradação provocada pelo fluido, seja por danos previamente criados de modo intencional (sabotagem), permanecesse não-revelada durante os estágios de manutenção e reparo, implicando assim num grande risco à vida futura do componente e, por conseguinte, do veículo aéreo, de seus passageiros e tripulantes. Daí a importância do desenvolvimento de técnicas não-destrutivas que possam não somente revelar a presença de fluidos no núcleo-colméia durante a inspeção não-destrutiva rotineira, sendo a água e o óleo lubrificante aqueles mais comumente detectados, mas também, e principalmente, indicar a existência, a intensidade e a extensão dos danos estabelecidos internamente no painel, os quais podem comprometer significativamente as propriedades mecânicas de resistência e rigidez residuais da estrutura.

1.3 Inspeção por Ensaios Não-Destrutivos

A avaliação por ensaios não-destrutivos (END) das estruturas aeronáuticas se faz necessária na etapa de manufatura e durante todo o correspondente ciclo de vida-útil do veículo para a verificação de danos causados em serviço tais como: sobrecarga estática, fadiga, impactos e fatores ambientais, donde se destacam a umidade, radiação ultravioleta, temperatura e as descargas elétricas.

Devido ao enorme potencial aplicativo dos painéis-sanduíche do tipo colméia em aeronaves comerciais de grande porte, bem como em veículos de asas rotativas, estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas técnicas END para estas estruturas compósitas, sendo as principais: a termografia, sherografia, radiografia, ultrassom, e neutronografia (DOYUM & DÜRER, 2002; HSU, 2009). Mais recentemente, estudos estão avançando rapidamente na área da Ressonância Magnética Nuclear (RMN), em especial visando a detecção de água nos núcleos colméia (BALASKÓ et al, 2005, BEER et al, 2004, ABOU-KHOUSA et al, 2006). Entretanto, dados disponíveis na literatura científica aberta não permitem verificar qualquer ação por parte de pesquisadores quanto à identificação e/ou à quantificação de água e de compostos hidrocarbonetos por RMN em painéis-sanduíche estruturais.

As principais técnicas de Ressonância Magnética Nuclear incluem imageamento, espectroscopia e relaxometria.

1.4 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

A RMN é uma metodologia não-destrutiva extremamente interessante a ser investigada para a indicação, a caracterização e a mensuração de líquidos no interior dos núcleos de estruturas do tipo-sanduíche (LAPLANTE et al, 2005; MARBLE et al, 2009), em especial a RMN de alta resolução de imagens (da ordem de milímetros) a partir de dados verdadeiramente tridimensionais (SKOOG et al, 2002).

O método RMN baseia-se na excitação de um determinado núcleo que possui um número ímpar de núcleons (prótons e nêutrons). No caso da água e dos hidrocarbonetos, o núcleo de interesse é o de hidrogênio, que detém a maior relação sensibilidade/volume de amostra. Outros núcleos de interesse podem ser igualmente utilizados, com relativa facilidade de observação, particularmente se participam de moléculas que se encontram na fase líquida, ou íons de grande mobilidade em sólidos. Na técnica de relaxometria, em particular, é muito grande a possibilidade da análise das fases sólidas que contenham aqueles núcleos de interesse, enquanto que, neste mesmo caso, extrema dificuldade há de se encontrar na utilização das técnicas convencionais de imageamento.

O princípio de funcionamento de um equipamento de RMN consiste na aplicação de um campo magnético com duas componentes funcionalmente distintas. A um campo intenso e uniforme, que irá mudar a orientação natural dos spins contidos nos núcleos dos átomos, é superposto um campo magnético oscilante, pulsado, perpendicular ao primeiro e na faixa de freqüências naturais de precessão dos núcleos devido ao intenso campo estático. A condição de equilíbrio na presença apenas do campo estático é representada por uma Magnetização macroscópica, resultante de um pequeno desbalanço da quantidade de núcleos orientados paralelamente ou antiparalelamente ao campo estático. Esta situação é caracterizada por completa ausência de coerência da componente transversal da magnetização. Quando o núcleo é exposto à radiação eletromagnética de freqüência apropriada, ocorrerão transições que irão promover a criação de coerência transversal, de forma que a variação no tempo da componente transversal da magnetização é detectada com uma bobina orientada no plano transversal à direção do campo magnético principal. Esta bobina intercepta o fluxo de indução magnética daquela componente, gerando ali uma força eletromotriz que constitui o sinal de RMN, proporcional à densidade protônica do meio. A criação da imagem é feita codificando-se espacialmente as freqüências naturais de precessão do núcleo através da imposição de uma combinação temporal de gradientes do campo estático. As metodologias de imagens consistem na aquisição dos sinais de RMN que contém aquela codificação espacial, e seu posterior processamento, que fornece os resultados convertidos em imagens bi- ou tridimensionais do interior do objeto inspecionado (CALLAGHAN, 1991).

2. MATERIAL E AMOSTRAS

Painéis-sanduíches estruturais com núcleos do tipo-colméia (formato hexagonal de células), fabricados em meta-aramida (Nomex[®]) e revestidos com laminados rígidos confeccionados em resina epóxi fortalecida com fibras

contínuas de vidro, foram utilizados neste estudo. Este tipo de material é amplamente empregado em aeronaves, em partes como, por exemplo, carenagens, pisos e radôme.

Amostras com dimensões de 70 mm de comprimento, 45 mm de largura e 10 mm de altura foram empregadas neste trabalho. Elas foram extraídas dos painéis originais e íntegros por meio de corte com serra de fita. A relativamente pequena dimensão das amostras foi limitada pelo reduzido tamanho da bobina empregada para a produção do campo eletromagnético.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Amassamento do Núcleo

Para a inserção dos danos nas amostras de painel-sanduíche, se fez necessária a retirada de um dos revestimentos de face empregando-se cuidadosamente na operação um estilete de aço. Após esta extração, a amostra foi posicionada horizontalmente na base plana de um equipamento de compressão da Emic[®] modelo DL 5000/10000, utilizando-se uma célula de carga de 10 kN na qual foi acoplado um eixo de ponta cônica que foi pressionado diretamente contra o núcleo da amostra, conforme ilustrado na Figura 3. O procedimento foi repetido em seis posições diferentes, aplicando-se em cada uma delas um determinado deslocamento vertical do eixo, de modo a se produzirem danos como diferentes profundidades e, conseqüentemente, com distintos diâmetros proporcionais àquelas. Os danos causados pela endentação forçada do núcleo são claramente revelados e identificados na Figura 4, enquanto que o dimensional dos mesmos é fornecido na Tabela 1.

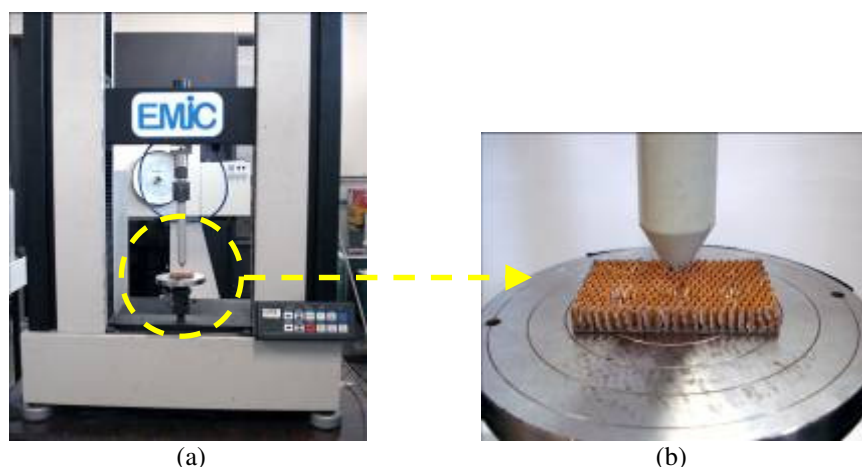


Figura 3. Sistema de ensaios de compressão adaptado para impingir danos de modo controlado no núcleo-colméia de uma amostra de painel-sanduíche: (a) Vista geral; (b) Detalhe.

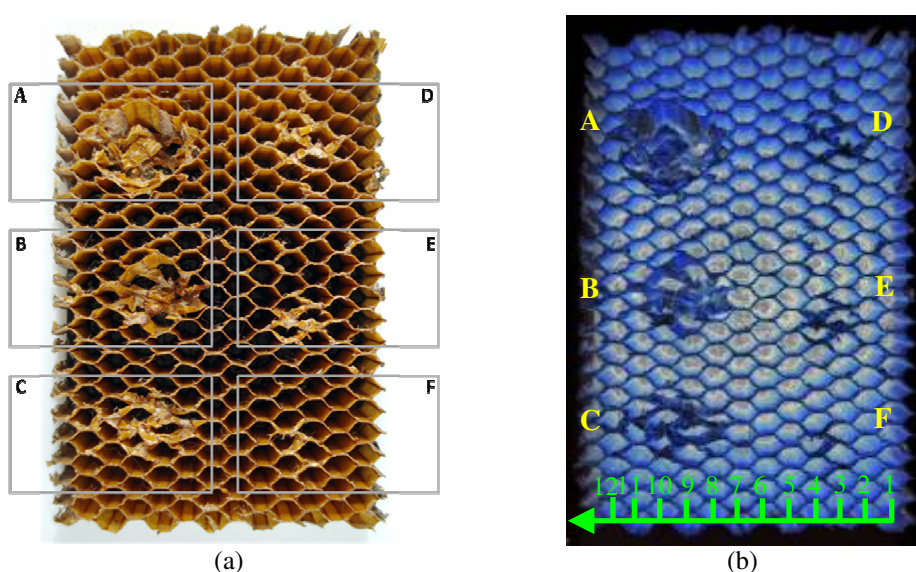


Figura 4. Núcleo-colméia contendo 6 tipos/tamanhos de danos por amassamento (denominado A-F), introduzidos propositalmente por compressão quase-estática; (b) Inversão de tonalidade da Figura 4a para se visualizar mais precisamente as endentações. A seta verde e os números referentes à sua graduação indicam as várias posições (total de 12) em que se realizou o imageamento por RMN da seção transversal do painel (cuja espessura é ~ 10 mm).

Tabela 1. Caracterização dimensional completa dos danos gerados pela endentação da amostra.

Tipo de Dano	Profundidade ^A , mm	Diâmetro ^B , mm
A	9,0	35,6
B	6,0	26,3
C	3,0	22,6
D	1,5	2,6
E	1,0	1,8
F	0,5	1,5

^A Estimada com base na penetração do cone (exclui possível recuperação dos danos)

^B Estimado a partir das fotos correspondentes à Figura 4

As regiões contendo os danos por amassamento foram preenchidas com água, de modo a disponibilizar núcleos de hidrogênio, com mobilidade e em quantidade suficiente, para excitação sob a aplicação de um campo magnético. Há de se observar que a presença de água associada a danos em painéis-sanduíche estruturais é uma condição assaz relevante e contumaz na indústria aeronáutica, justificando plenamente a abordagem empregada neste estudo.

3.2 Ressonância Magnética Nuclear

Foi empregado neste estudo um equipamento de RMN construído no Centro de Imagens e Espectroscopia *in vivo* por Ressonância Magnética do Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Trata-se de um sistema baseado em um magneto supercondutor horizontal de 2.0 Tesla, com 31 cm de diâmetro interno, provido de um conjunto de bobinas de gradiente de alta velocidade, com eficiência de 0.16 Gauss/(cm.Ampere), capaz de produzir gradientes de campo magnético de aproximadamente 30 Gauss/cm com tempo de estabelecimento de 160 microssegundos. Este sistema opera com uma eletrônica Bruker Biospin®, console Paravision V e bobinas de RF desenhadas localmente para aplicações em experimentos com animais (pequenos primatas).

A Figura 5 mostra como foi realizada a inspeção da amostra contendo no núcleo danificado por amassamento, quando a varredura foi conduzida em planos paralelos (azul) e transversais (vermelho) ao da face principal do painel.

Tipicamente, os *slices* (fatias) de inspeção ou varredura em planos normais possuíam 2 mm de espessura, enquanto que, nas varreduras transversais, empregaram-se *slices* com amplitude de 3,5 mm.

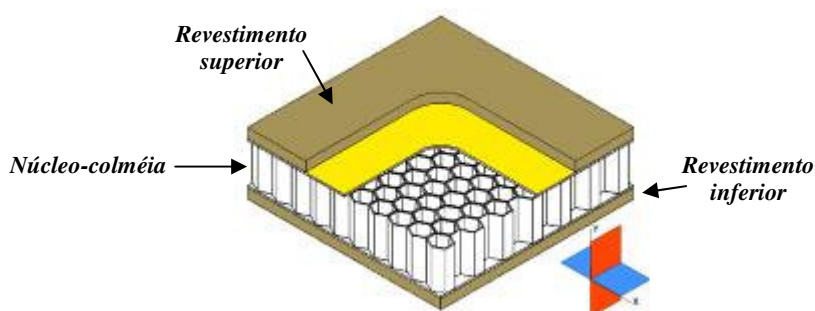


Figura 5. Esquemático dos planos normais (em azul) e transversais (em vermelho) de inspeção por RMN do painel-sanduíche.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Imageamento de Danos por RMN em Planos Normais (Paralelos à Face Principal do Painel)

A Figura 6 mostra imagens obtidas em planos paralelos à face principal do painel, em quatro diferentes posições ao longo da espessura da amostra, contadas a partir do revestimento superior. Os círculos tracejados indicam quais são os danos por amassamento efetivamente detectados através da técnica RMN. As regiões mais claras das figuras correspondem àquelas em que se configura a presença de água.

Por intermédio destas imagens, podem ser indicados inequivocamente os danos de maior monta (A-C), em que é nítida a destruição das paredes das células hexagonais que compõem o núcleo-colméia. Entretanto, há também sinais evidentes da presença dos danos menos extensos e profundos (D e E). Outro indicativo de anomalias no núcleo seria a distorção da geometria celular, originalmente perfeitamente hexagonal. Mudanças de tonalidade, brilho e de textura podem ser também adotados como critérios de danificação. Observa-se que a identificação mais clara e nítida de um ou outro dano depende do plano tomográfico ao longo da espessura do painel. Neste sentido, os planos mais rasos (i.e., mais próximos ao revestimento inferior da amostra) revelam com mais propriedade os danos menores, enquanto que os planos tomográficos mais elevados permitem uma identificação mais adequada dos danos mais críticos.

Cabe destacar que a presença local de água é condição fundamental para que o dano seja revelado. Com efeito, em algumas tomografias (ex. Figs 6c,d), os danos A e B não são visíveis devido à migração de água para outras regiões.

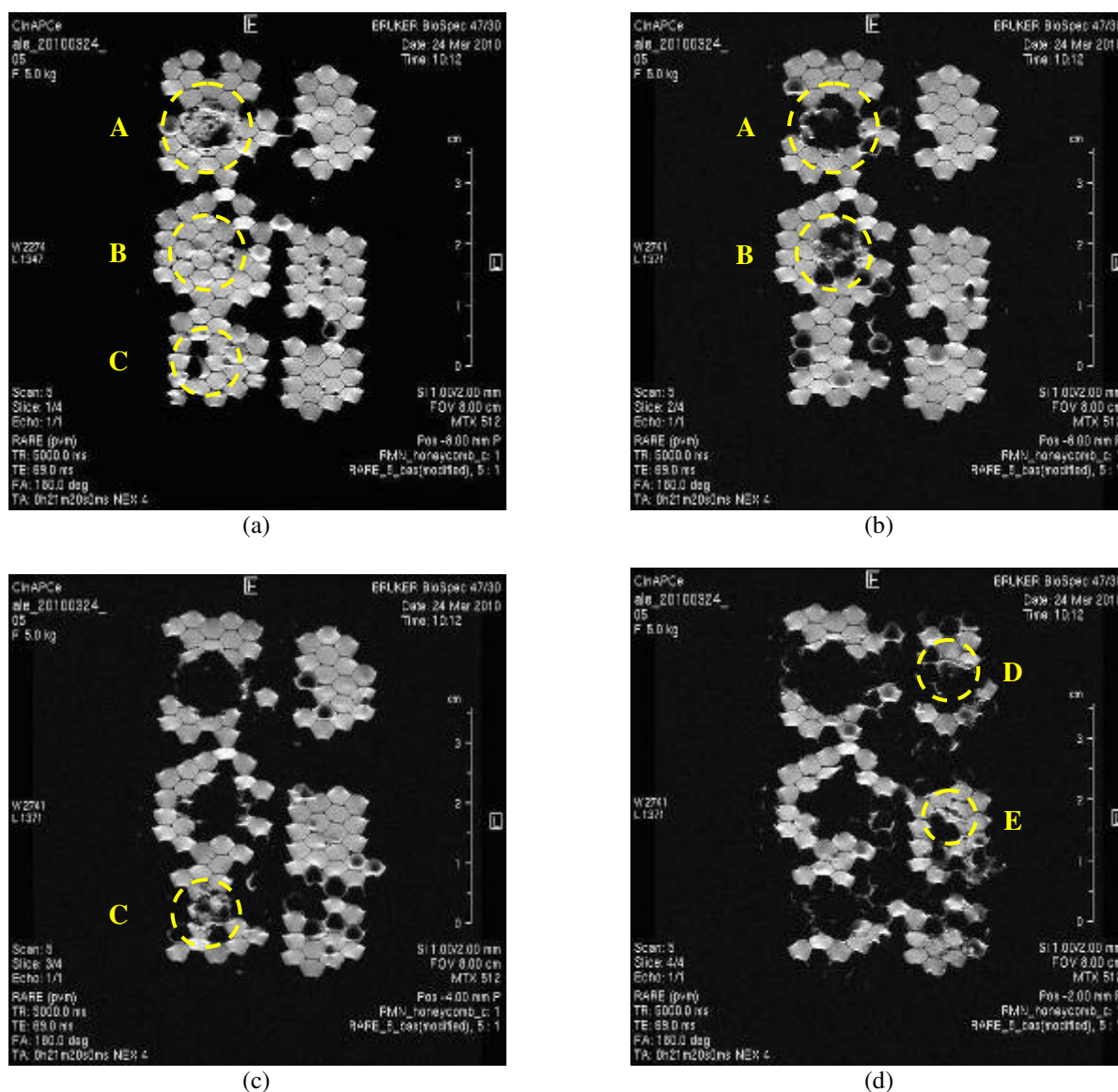


Figura 6. Tomografias de RMN (em planos normais, paralelos à face principal do painel-sanduíche) do interior da amostra contendo danos por amassamento do núcleo. As posições ou distâncias aproximadas de tomada das imagens, contadas a partir do revestimento superior da amostra, são: (a) 0,5 mm; (b) 3,5 mm; (c) 7,0 mm; (d) 9,5 mm.

A Figura 7 mostra duas imagens em que, respectivamente, abordagens muito distintas de imageamento em planos normais foram empregadas. Na Figura 7a utilizou-se um *slice* possuindo exatamente a espessura da amostra (*single-slice*), de sorte que a imagem obtida corresponde a uma média de todos os possíveis planos normais (paralelos à face do painel) da amostra, enquanto que para a obtenção da Figura 7b realizou-se uma varredura exatamente na meia espessura da amostra empregando-se um *slice* com 2 mm de espessura (*multiple-slice mode*).

Visto que a primeira imagem (7a) incorpora em si, de modo condensado e sobreposto, todas as nuances e detalhamentos contidos no núcleo-colméia intencionalmente danificado, a abordagem de uma varredura única, portanto mais rápida, se mostra bastante interessante e atrativa para a efetiva determinação da presença, ou não, de quaisquer danos, defeitos ou artefatos internos ao painel-sanduíche. Uma vez estabelecida a presença destes, uma varredura mais lenta, localizada e, por conseguinte, muito mais precisa há de, subsequentemente, estabelecer clara e inequivocamente a extensão e a posição daqueles danos, defeitos ou artefatos internos, conforme mostra a Figura 7b.

É desejável enfatizar que o equipamento RMN, por intermédio do controle apurado da espessura do *slice* de varredura (vide Figura 8), é capaz de prover imagens com altíssima definição e resolução que permitam medições extremamente precisas (através de *slices* cada vez mais delgadas) quanto à localização e a extensão dos danos detectados, contando-se, no caso da quantificação dos danos, com o auxílio de um sistema computadorizado de análise de imagens digitais (PORTELA et al, 2010).

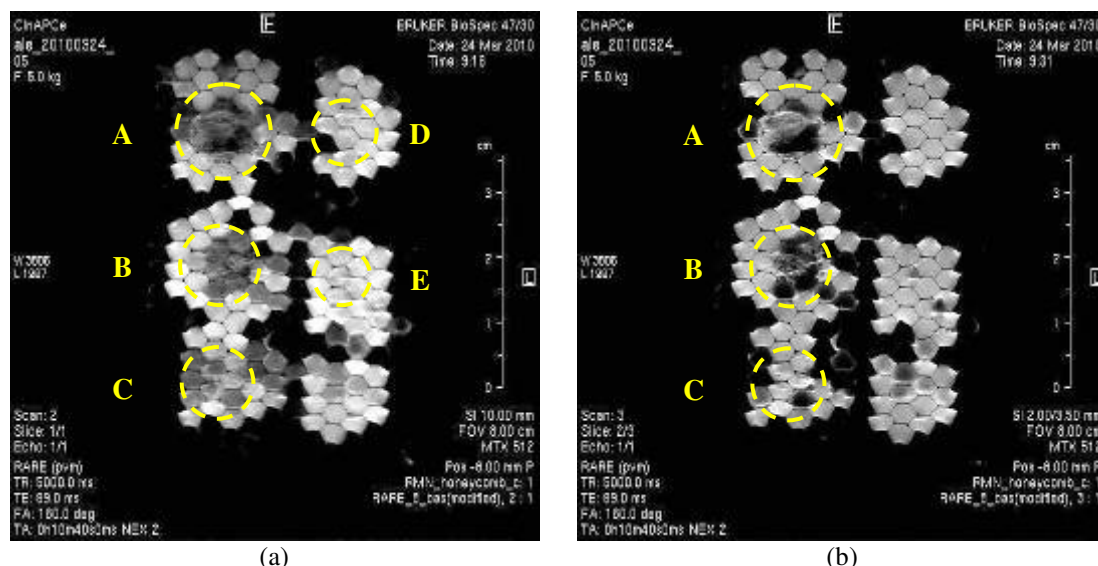


Figura 7. Imagens de RMN relativas a planos normais, paralelos ao da face principal do painel-sanduíche): (a) Modo *single-slice*, em que um *slice* de magnetização corresponde à seção transversal integral do núcleo, com espessura de 10 mm; (b) Modo *multiple-slice*, em que a fatia de magnetização / inspeção é fina relativamente à dimensão avaliada, correspondendo a uma posição no centro da amostra (5 mm a partir do revestimento superior do painel).

4.2 Imageamento de Danos por RMN em Planos Transversais (Ortogonal à Face Principal do Painel)

A Figura 8 mostra um exemplo de distribuição da projeção de 13 planos transversais (destacados em magenta e numerados em vermelho) selecionados para a inspeção tomográfica por RMN, tais como observados a partir da face frontal de amostra de painel-sanduíche. Note que a espessura do *slice* (fatia) de imageamento da amostra é indicada por setas azuis.

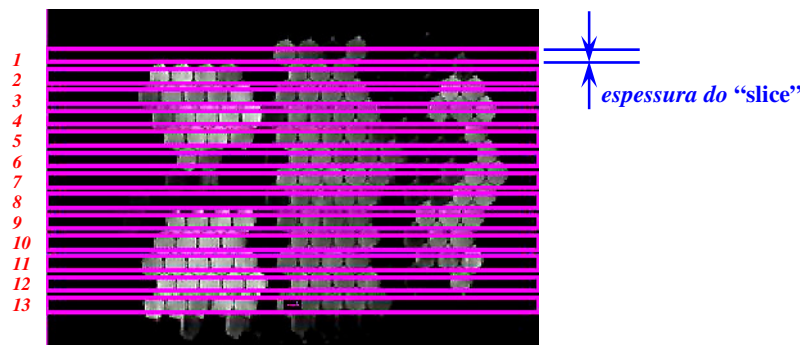


Figura 8. Circuito de varredura para imageamento tomográfico transversal de uma amostra de painel-sanduíche contendo vários tipos de líquidos nas células do núcleo-colméia (Extraído de PORTELA et al, 2010).

A Figura 9 apresenta seqüências das imagens geradas durante o experimento de RMN considerando-se a seção transversal da amostra presentemente avaliada, em que se visualiza, na direção da largura da página, a espessura do painel-estrutural. Note que as imagens apresentadas na Figura 9 correspondem aos planos de seção transversal (ortogonais a face da amostra), tais como exemplificadamente delineados e numerados na Figura 8, e cujos posicionamentos (12 planos ao todo) foram estabelecidos na graduação da seta verde da Figura 4b.

As Figuras 9a-c correspondem a tomografias realizadas transversalmente (e exatamente sobre) os danos classificados como D-F na Figura 4, enquanto que as Figuras 9d-f correspondem aos danos denominados A-C, também naquela figura.

Os círculos tracejados em verde indicam os danos que podem ser claramente identificados por estas vistas tomográficas das seções transversais do painel-sanduíche.

Rigorosamente, somente o dano de menor monta, denominado F, não é passível de uma clara definição e certeza quanto à sua presença no núcleo-colméia presentemente avaliado.

Conclui-se, desta maneira, que a técnica de imageamento por RMN de painéis-sanduíche aeronáuticos possui grande potencial para a indicação, qualificação e quantificação de danos por impacto quando da existência de água, ou outro líquido rico em hidrogênio (ex. hidrocarbonetos tais como fluido hidráulico, querosene, degelantes, etc PORTELA et al, 2010).

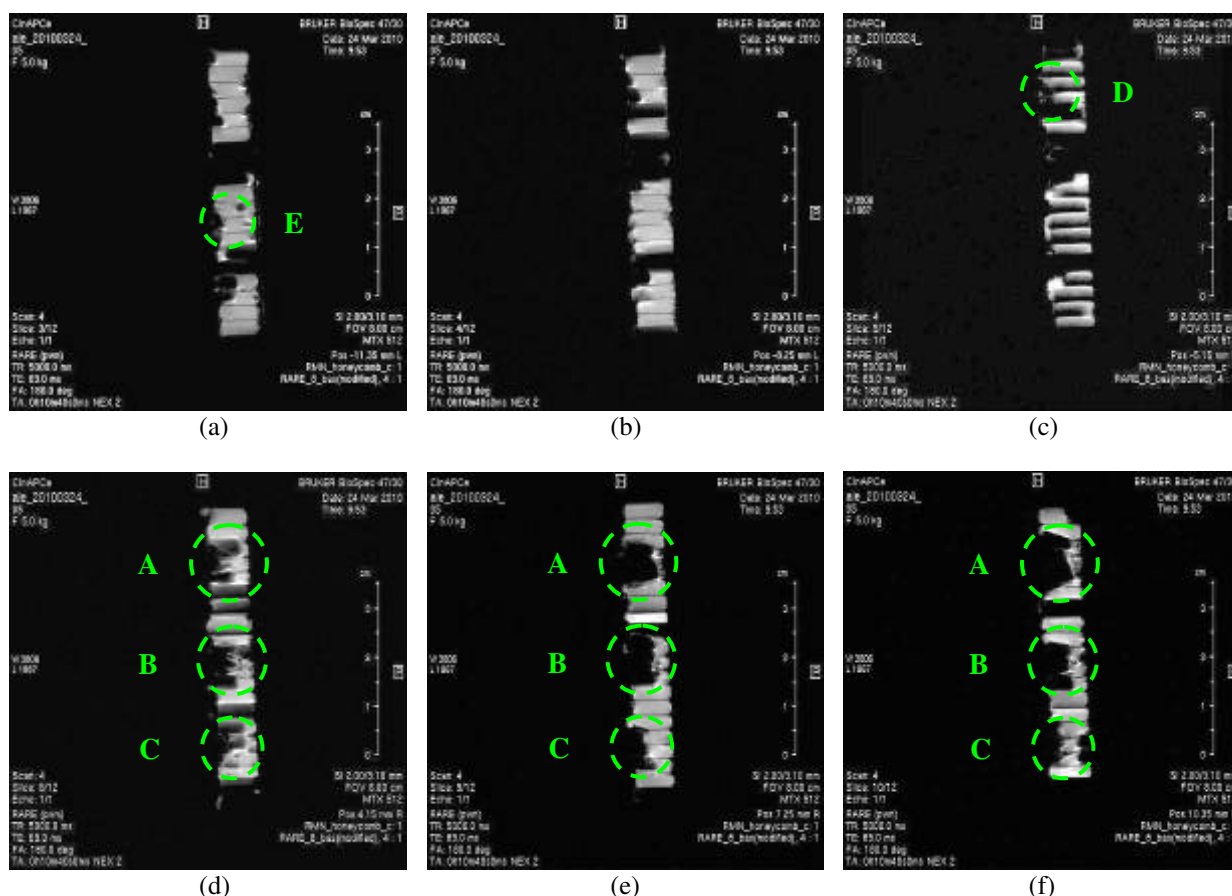


Figura 9. Tomografias de RMN, segundo planos ortogonais à face do painel, do interior da amostra contendo danos por amassamento do núcleo. As fotos (a), (b) e (c) correspondem a planos posicionados a, respectivamente, 2,5, 3,25 e 4,25 mm contados a partir da lateral direita do painel (vide eixo graduado na Figura 4b), enquanto que as fotos (d), (e) e (f) correspondem a planos posicionados a, respectivamente, 6,75, 7,5 e 8,5 mm, também contados a partir da lateral direita do painel (Figura 4b). As distâncias sempre correspondem ao centro do *slice* de varredura empregado, visto a fatia de inspeção por magnetização possuir espessura considerável (neste trabalho utilizaram-se amplitudes de 2, 3,5 e 10 mm).

5. CONCLUSÃO

Métodos de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) foram empregados no imageamento e na caracterização de danos por amassamento do núcleo de meta-aramida (Nomex[®]) em painéis-sanduíche estruturais revestidos com resina epóxi reforçada com fibras contínuas de carbono.

Danos tão pequenos quanto 1,0 mm de profundidade e 1,8 mm de diâmetro puderam ser clara e inequivocamente delineados pela técnica.

A necessidade da presença de água no núcleo-colméia para a execução da inspeção de danos, vista em princípio como uma limitação do método, não deve ser superestimada, visto que a existência de umidade é uma condição perfeitamente compatível com a presença de danos internos nos painéis-sanduíche aeronáuticos, sejam estes últimos a causa do ingresso do líquido, ou mesmo uma consequência deste ingresso.

Idênticas conclusões se aplicam com relação à presença de outros líquidos ricos em hidrogênio (tais como hidrocarbonetos) e a outros componentes estruturais que empregam painéis-sanduíche em sua construção, como, por exemplo, pás de turbina para captação de energia eólica.

Agradecimentos: À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à Alltec Indústria de Componentes em Materiais Compostos Ltda, e à FAPESP, financiadora do Centro de Imagens e Espectroscopia in vivo por RMN através do Programa CInAPCe.

6. BIBLIOGRAFIA

Abou-Khousa, M.A., Ryley, A., Kharkovsky, S., Zoughi, R., Daniels, D., Kreitinger, N., Steffes, G., "Comparison of x-ray, millimeter wave, shearography and throughtransmission ultrasonic methods for inspection of honeycomb composites", Report AFRL(Air Force Research Laboratory)-ML-WP-TP-2006-477, 11 p. 2006.

- Askeland, D.R., "The Science and Engineering of Materials", PWS Publ. Co, Boston (1994).
- Balaskó, M., Sváb, E., Molnár, G.Y., Veres, I., "Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades", Nuclear Instruments and Methods on Physics Research A, v.542, p.45-51. 2005.
- Beer, F.C., Coetzer, M., Fendeis, D., Costa e Silva, A., "Neutron radiography and other NDE tests of main rotor helicopter blades", Applied Radiation and Isotopes, v.61, p.609-616. 2004.
- Callaghan, P.T., "Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy", Clarendon Press, Oxford (1991).
- Doyum, A.B., Dürer, M. (2002) Defect characterization of composite honeycomb panels by non-destructive inspection methods, e-Journal of Nondestructive Testing, v.7, <http://www.ndt.net/v07n11.htm>.
- Heimbs, S., Pein, M., "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts", Composite Structures, v.89, p. 575-588. 2009.
- Hsu, D.K., "Nondestructive evaluation of sandwich structures: A review of some inspection techniques", Journal of Sandwich Structures and Material, v.11, p.275-291.2009.
- Laplante, G., Marble, A.E., Macmillan, B., Sullivan, P.L., Colpitts, B.G., Balcom, B.J., "Detection of water ingress in sandwich structures: a magnetic resonance approach", NDT & E International, v.38, p.501-507. 2005.
- Li, C., Ueno, R., Lefebvre, V., "Investigation of an accelerated moisture removal approach of a composite aircraft control surface", Society for the Advancement of Material and Process Engineering, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- Marble, A.E., Laplante, G., Mastikhin, I.V., Balcom B.J., "Magnetic resonance detection of water in composite sandwich structures", NDT & E International, v.42, p.404-409. 2009.
- Portela, A.M.A., Vidoto, E.L.G., Martins, M.J., Tannús, A., Tarpani, J.R. "Inspeção por ressonância magnética nuclear de painéis-sanduíche estruturais de grau aeronáutico", XXVIII Congresso Nacional de Ensaios Não-Destrutivos e Inspeção & XIV Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, Artigo n.076, Santos-SP, 2010.
- Rezende, M.C., Botelho, C.E. "O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial", Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, p.E4-E10. 2000.
- Shafizadeh, J.E., Seferis, J.C., Chesmar, E.F., Geyer, R., "Evaluation of the in-service performance behaviour of honeycomb composite sandwich structures", Journal of Materials Engineering and Performance, v.8, p.661-668. 1999.
- Shafizadeh, J.E., Seferis, J.C., "Evaluation of the mechanism of water migration through honeycomb core", Journal of Materials Science, v.38, p.2547-2555. 2003.
- Skoog, D.A., Holler, H.J., Nieman, T.A., "Princípios de análise instrumental". 5ª Ed. Porto Alegre. Bookman. p.434. 2002.
- United Technologies, "Overhaul and repair instructions", ORI No.: 76150-007, Sec. III, Rev.:J, Main Rotor Blade (1997).
- Yeh, H.Y., Nguyen, S.V., Yeh H.L., "Failure analyses of polymer matrix composite (PMC) honeycomb sandwich joint panel", Journal of Reinforced Plastics and Composites, v.23, p. 923-939. 2004.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



DAMAGE IMAGING AND CHARACTERIZATION OF AIRCRAFT HONEYCOMB SANDWICH-PANELS BY NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

¹ Alexandre M. A. Portela (portela@sc.usp.br)

² Edson L. G. Vidoto (evidoto@ifsc.usp.br)

² Mateus José Martins (mateus@ifsc.usp.br)

² Alberto Tannús (goiano@ifsc.usp.br)

¹ José R. Tarpani (jrpan@sc.usp.br)

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP

² Instituto de Física de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP

Abstract: In this work, Nuclear Magnetic Resonance (NMR) was employed for imaging and characterizing core crush damages in meta-aramid (Nomex[®]) honeycombs of structural panels with continuous carbon fiber-reinforced epoxy resin facesheets. The study aimed at verifying the ability of this promising nondestructive testing to possible future adoption in periodic inspection programs of high-demanding aeronautical components and structures. Results were very encouraging, and show that, under certain circumstances, NMR has a great potential to indicate, localize and quantify internal damage in honeycomb sandwich-panel structures.

Palavras-Chave: Aircraft components, Damaged sandwich-panels, Nondestructive inspection, Nuclear Magnetic Resonance.