UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

Alexandre Machado Aguiar Portela

Inspeção por Ressonância Magnética Nuclear de painéis-sanduíche compósitos de grau aeronáutico

São Carlos
2011

ALEXANDRE MACHADO AGUIAR PORTELA

Inspeção por Ressonância Magnética Nuclear de painéis-sanduíche compósitos de grau aeronáutico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Assoc. José Ricardo Tarpani

São Carlos

2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Portela, Alexandre Machado Aguiar.

P843i Inspeção por Ressonância Magnética Nuclear de painéis-sanduíche compósitos de grau aeronáutico. / Alexandre Machado Aguiar Portela ; orientador José Ricardo Tarpani. São Carlos, 2011. 135 páginas.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais)-- Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Ressonância Magnética Nuclear. 2. Inspeção não-destrutiva. 3. Painéis-sanduíche compósitos. I. Título.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Epitácio Machado Portela e Marlene Machado Aguiar, os quais, no período de desenvolvimento deste trabalho, me ajudaram com paciência, carinho e compreensão, demonstrando que a superação nos momentos difíceis é possível quando estamos ao lado de quem realmente se importa com o nosso sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo esforço e paciência sem limites.

Ao meu orientador, Prof. Assoc. José Ricardo Tarpani, por sempre acreditar no meu trabalho e em minha competência profissional.

Ao professor Alberto Tannús pelo apoio e por ter proporcionado boa parte do desenvolvimento deste trabalho em seu laboratório.

Aos funcionários, professores e amigos do Instituto de Física de São Carlos e Escola de Engenharia de São Carlos.

Aos meus amigos queridos, Marcela Tucci, Paulo Santos, Fabio Rocha, Bruno Braga, Julie Gai, Lelita Botelho, Maria Cristina A. Gatti e a Renata Neves Penha pelo apoio e paciência.

A todos que fazem parte do Grupo de Materiais Compósitos do SMM-EESC-USP – MatCom, pela colaboração quando esta foi necessária.

À CAPES e à Universidade de São Paulo, pelos suportes financeiro, acadêmico, de pesquisa e de desenvolvimento.

RESUMO

PORTELA, A. M. A. **Inspeção por Ressonância Magnética Nuclear de painéis-sanduíche compósitos de grau aeronáutico**. 135p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2011.

O presente trabalho objetivou desenvolver e implementar, em escala laboratorial, uma rotina experimental com base em Imageamento por Ressonância Magnética Nuclear (IRMN) de modo a verificar seu potencial como metodologia não-destrutiva aplicável à inspeção quali- e quantitativa de água e hidrocarbonetos líquidos aprisionados no interior de células de núcleos-colméia utilizados na confecção de painéis-sanduíche compósitos estruturais de grau aeronáutico. Tentativas foram também realizadas no sentido de se observarem e caracterizarem danos por amassamento de núcleos-colméia, assim como de se detectar a presença de resina polimérica na forma sólida, visando, desta feita, verificar o uso do IRMN na inspeção de componentes previamente reparados e/ou contendo excesso de resina por falha do processo de manufatura. Concluiu-se que IRMN é uma poderosa ferramenta para a detecção e a quantificação de líquidos puros e compostos, ricos em hidrogênio, contidos nas células de núcleos de amostras extraídas de painéis-sanduíche compósitos. O potencial do IRMN na identificação, e, portanto, na discriminação entre os diversos fluidos se mostrou bastante promissor, desde que se empreguem ferramentas de processamento e análise computadorizada de imagens a partir de programas computacionais de reconhecimento de padrões via redes neurais artificiais e/ou sistemas com base em conhecimento. A técnica de IRMN utilizada neste estudo não permitiu a captura de imagens de resina polimérica sólida, nem mesmo quando à esta foram adicionadas cargas de elementos intensificadores de sinais de RMN, tais como ferro e gadolíneo. Danos no núcleo-colméia tão pequenos quanto 1,0 mm de profundidade e 1,8 mm de diâmetro foram clara e inequivocamente imageados e delineados pela técnica IRMN, desde que estivessem permeados por fluido hidrogenado (ex. água). A quantificação de líquidos nos núcleos-colméia por intermédio de ferramentas computacionais simples (processadores e analisadores de imagens) foi muito bem sucedida no caso dos líquidos com relativamente alto ponto de fulgor, pois as massas fluidas se mantiveram constantes por períodos de tempo significativamente longos no interior das células analisadas.

Palavras-chave: Ressonância Magnética Nuclear, Inspeção não-destrutiva, Painéis-sanduíche compósitos.

ABSTRACT

PORTELA, A. M. A. **Nuclear Magnetic Resonance inspection of aeronautical grade composite sandwich panels**. 135p. M.Sc. Dissertation - Post-Graduation Interunits Program in Materials Science and Engineering, University of São Paulo, Sao Carlos-SP, Brazil, 2011.

This work intended to develop and implement in laboratorial scale an experimental routine funded in Nuclear Magnetic Resonance Imaging (NMRI) in order to verify its potential as a non-destructive methodology for quali- and quantitative inspection of liquid water and hydrocarbons entrapped in honeycomb core cells utilized to build up aeronautical grade structural composite sandwich panels. Attempts were also carried out to observe and characterize crush damage of honeycomb core, as well as to detect solid polymer resin towards the use of NMRI to assess previously repaired components and/or containing in excess resin amount due to manufacturing process faults. It has been concluded that NMRI is a powerful tool in detecting and quantifying hydrogen-rich pure and compound liquids contained in core cells of composite sandwich samples. The NMRI potential in identifying and, therefore, discriminating several fluids has shown very promising as long as computed image processing and analysis tools are employed from pattern recognition software via artificial neural networks and/or knowledge-based systems. The utilized NMRI technique failed in imaging solid polymer resin, even when the latter was loaded with NMR-signal intensifier elements such as iron and gadolinium. Honeycomb core damages as small as 1.0 mm in depth and 1.8 mm in diameter were clearly and unambiguously imaged and delineated by the NMRI technique since they were permeated with hydrogenated fluid (ex., water). The quantification of liquids in honeycomb cores by means of simple computational tools (image processor and analyzer) was very successful in case of relatively high flash point fluids, insofar as their masses remained constant within the analyzed cells for significantly long periods of time.

Keywords: Nuclear Magnetic Resonance. Non-destructive inspection. Composite sandwich panels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Emprego de painéis-sanduíche na construção da aeronave comercial A380, tal como indicados pelos componentes na coloração azul..... ***28***

Figura 02 – Estrutura básica de um painel-sanduíche com núcleo-colméia – *honeycomb*.....

Figura 03 – Analogia entre uma estrutura tipo-sanduíche e uma viga "I".... ***35***

Figura 04 – Eventos de impacto mecânico, e alguns dos principais danos resultantes em aeronaves: (A) Choque com pássaros; (B) Chuva de granizo em vôo; (C) Impacto com ave em vôo; (D) Choque entre aeronaves taxiando na pista; (E) Choque de fragmentos por atrito pneu/solo; (F) Choque de veículos de apoio..... ***44***

Figura 05 – Tipos de esforços mecânicos aos quais são submetidos os principais elementos estruturais de uma aeronave comercial de grande porte..... ***47***

Figura 06 – Movimento de precessão de um momento magnético..... ***49***

Figura 07 – Orientações dos *spins* atômicos relativamente ao campo magnético constante B_0..... ***51***

Figura 08 – Descrição do fenômeno de FID, decaimento do sinal de ressonância magnética..... ***52***

Figura 09 – Imagens obtidas por LAPLANTE et al (2005) na inspeção de uma placa de painel-sanduíche aeronáutico cuja colméia continha água em seu interior: (a) Vista geral da amostra; (b) Vista de topo de sete e meia células contendo água; (c) Imagem em perspectiva 3D das colunas d´água correspondentes às células anteriores, tal como reconstruida via análise computadorizada; (d) Vista da seção transversal das colunas d´água em tres células parcialmente preenchidas, onde

se observa a presença de meniscos..... ***55***

Figura 10 – Imagem obtida via RMN por KOTSIKOS et al (2007) de laminado sólido com matriz polimérica após imersão em água quente por 7000 h..... ***56***

Figura 11 – (a) Pequena porção de um painel-sanduíche estrutural com núcleo-colméia de células hexagonais, o qual é faceado por laminados planos e finos de resina epóxi reforçada com fibras de carbono. Uma amostra do padrão hexagonal das células de Nomex® é também ilustrada nesta figura; (b) Detalhe das células internas juntamente a uma escala de medição..... ***57***

Figura 12 – Etapa de preparo da amostra de painel-sanduíche através da injeção de água com seringa e agulha, a qual é introduzida lateralmente no núcleo-colméia..... ***60***

Figura 13 – Etapa de preparo da amostra de painel contendo água inserida célula a célula através da retirada de uma das faces laminadas e uso de uma seringa de pequeno volume..... ***61***

Figura 14 – Sistema de ensaios de compressão adaptado para impingir danos de modo controlado ao núcleo-colméia de uma amostra de painel-sanduíche: (a) Vista geral; (b) Detalhe do penetrador com ponta cônica de aço..... ***62***

Figura 15 – (a) Amostra de núcleo-colméia contendo 6 tipos/tamanhos distintos de danos por amassamento (denominados A-F), os quais foram introduzidos propositadamente por compressão quase-estática; (b) Inversão de tonalidade da figura anterior para se visualizarem mais precisamente as endentações. A seta verde e os números referentes à sua graduação indicam as várias posições (num total de 12) em que se realizou o imageamento por RMN da seção transversal (rigorosamente falando, seção longitudinal caso se considerem as dimensões no plano da amostra[1]) do painel (cuja espessura é ~ 10 mm). Um dos cortes tomográficos realizados é indicado por linha verde tracejada..... ***63***

Figura 16 – Exemplo de amostras virgens de painéis-sanduíche seladas nas suas laterais com vedante à base de silicone (setas azuis)..... ***65***

Figura 17 – Foto do recipiente especialmente construído para os ensaios de impregnação do espécime de painel-sanduíche com névoa. Note a presença do nebulizador elétrico à direita da câmara..... ***66***

Figura 18 – Amostra A1 de painel-sanduíche contendo água (retângulo azul), fluido hidráulico (vermelho) e querosene (verde)..... ***68***

Figura 19 – Amostra de painel-sanduíche contendo água adicionada com seringa hipodérmica, em estágio anterior à introdução de resina termorrígida (similar a A2)..... ***68***

Figura 20 – (a) Amostra A3 de painel-sanduíche contendo água (elipse tracejada verde), degelante (azul) e resina termorrígida Hysol® (amarela); (b) Métodologia de preparo da amostra..... ***69***

Figura 21 – Provetas utilizadas como amostras contendo água (4 superiores) e resina (4 inferiores): (a) Vista lateral; (b) No suporte para posicionamento na bobina do equipamento de RMN..... ***70***

Figura 22 – (a) Amostra de painel-sanduíche contendo água, fluido hidráulico e querosene (similar a A1); (b) Amostra de painel-sanduíche contendo água adicionada com seringa hipodérmica, em estágio anterior à introdução de resina termorrígida (similar a A2); Amostra de painel-sanduíche contendo degelante, água e resina termorrígida (similar a A3)..... ***73***

Figura 23 – Fotografia do magneto supercondutor horizontal com campo 2T da Oxford Instruments® utilizado para a realização das imagens no IFSC-USP..... ***75***

Figura 24 – (a) Bobina empregada para a obtenção das imagens RMN; (b) Detalhe de um espécime de painel-sanduíche compósito

alocado no interior da bobina..... ***76***

Figura 25 – Esquemático dos planos normais (em azul) e transversais (em vermelho) de inspeção por RMN das amostra de painel-sanduíche contaminadas internamente com líquidos, sólido ou danificadas..... ***77***

Figura 26 – Circuitos típicos de varredura para imageamento tomográfico segundo planos transversais (os quais correspondem àquele colorido em vermelho na Figura 25) aplicado a uma das amostras de painel-sanduíche inspecionadas por RMN no presente estudo (no caso, a amostra danificada internamente por endentação intencional e controlada): (a) *Slice* mais espesso; (b) Mais delgado..... ***78***

Figura 27 – Três planos ortogonais de corte tomográfico, e suas respectivas nomenclaturas derivadas da medicina..... ***80***

Figura 28 – Circuito de varredura, e de conseqüente excitação eletromagnética, projetado na face frontal da Amostra A1 que continha água (a), fluido hidráulico (b), e querosene (c)..... ***82***

Figura 29 – Primeiras imagens resultantes da inspeção de amostras de painéis-sanduíche interna e propositadamente impregnadas com água, obtidas no IFSC-USP. Cotas de altura aproximada dos planos tomográficos imageados, a partir da face inferior da amostra avaliada (devido ao *slice* empregado ser relativamente espesso, adota-se como cota a posição ocupada pelo plano médio da fatia tomográfica): (a) 1,5 mm; (b) 3,5 mm; (c) 5,5 mm; (d) 7,5 mm..... ***86***

Figura 30 – Resultado da inspeção não-destrutiva por RMN da amostra de painel-sanduíche em que as células individuais possuem níveis de preenchimento com água levemente distintos entre si..... ***88***

Figura 31 – Tomografias de RMN (em planos normais, paralelos às faces principais da amostra de 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 inferior da amostra, são: (a) 0,5 mm; (b) 3,5 mm; (c) 7,0 mm; (d) 9,5 mm..... ***92***

Figura 32 – Imagens de RMN relativas a planos normais, paralelos ao da face principal do painel-sanduíche: (a) Modo *single-slice*, em que uma fatia de magnetização corresponde exatamente à seção transversal integral do núcleo, cuja espessura era de 10 mm; (b) Modo *multiple-slice*, em que a fatia de magnetização / inspeção é fina relativamente à dimensão avaliada, correspondendo, no caso em voga, a uma posição no centro da amostra (5 mm a partir do revestimento inferior, ou superior do painel)..... ***93***

Figura 33 – Tomografias em vista de perfil da amostra com núcleo-colméia amassado, com algumas das principais regiões de danos indicadas por círculos verdes tracejados. Círculos magenta tracejados indicam a presença de bolhas/vazios. De acordo com a sequência de numeração de slices tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 12 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28B, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) Slice 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; e (l) 12..... ***95***

Figura 34 – Imageamento por RMN do interior do núcleo-colméia de amostras mantidas em meio saturado por névoa quente pelo período total de cerca de 1200 h: (a) Sem vedeção lateral na região dos nucleos; (b) Completamente vedada, e mesmo assim levando a um ganho percentual de massa aquosa líquida

de aproximadamente 6%..... ***90***

Figura 35 – Imagem de RMN (segundo vista em plano paralelo às faces principais do painel) do interior da Amostra A1 contendo, respectivamente, querosene (a), fluido hidráulico (b) e água (c)..... ***102***

Figura 36 – Imagem de RMN (segundo o plano de face do painel) do interior da Amostra A2 contendo, respectivamente, água (a) e resina (b)..... ***103***

Figura 37 – Resultado do teste na Amostra A3 contendo 3,0 ml de cada uma das substâncias: (a) resina polimérica termorrígida reticulada; (b) agente degelante, (c) água..... ***104***

Figura 38 – Experimento IRMN realizado com provetas contendo água e empregadas como padrão de qualidade de imagem..... ***107***

Figura 39 – Imagem obtidas a partir de oito provetas, sendo quatro delas à esquerda (a), contendo água pura (como padrão), e à direita (b), contendo resina pura e misturada a Gd em várias composições (1%, 5% e 10% em massa)..... ***108***

Figura 40 – Imagem de RMN revelando a presença das seis provetas-padrão contendo água. As provetas com 20% e 40% em massa de Gd na resina epóxi não são passiveis de imageamento por RMN, conforme indicado por um X na cor vermelha..... ***109***

Figura 41 – Imagem obtidas a partir de oito provetas, sendo quatro delas à esquerda (a), contendo água pura (como padrão), e à direita (b), contendo resina pura e misturada a Fe_2O_3 em várias composições (1%, 5%, 10% e 20%)..... ***110***

Figura 42 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene De acordo com a sequência de numeração de slices tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 13 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28B, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) Slice 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; e (m) 13..... ***102***

Figura 43 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A2 contendo água e resina termorrígida já reticulada. De acordo com a sequência de numeração de slices tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 13 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28B, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) Slice 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; e (m) 13..... ***116***

Figura 44 – Seqüência de 14 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A3 contendo resina termorrígida já reticulada, agente degelante e água. De acordo com a sequência de numeração de slices tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 14 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28B, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) Slice 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; (m) 13; e (n) 14..... ***120***

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Propriedades de algumas fibras de reforço..... ***39***

Tabela 02 – Defeitos típicos de manufatura observados nos laminados sólidos que revestem as estruturas do tipo painel-sanduíche..... ***42***

Tabela 03 – Causas mais comum de danos por impacto mecânico em serviço de estruturas aeronáuticas confeccionadas em materiais compósitos..... ***43***

Tabela 04 – Caracterização dos materiais deliberadamente introduzidos no interior dos núcleos-colméia empregados neste estudo..... ***58***

Tabela 05 – Caracterização dimensional dos danos tipo-amassamento gerados por endentação da amostra de núcleo-colméia..... ***64***

Tabela 06 – Composição das amostras de resina inseridas nas provetas similares às mostradas na Figura 21..... ***72***

Tabela 07 – Cálculo do volume de líquidos e de resina termorrígida nas Amostras A1, A2 e A3, por intermédio de mensurações computacionais realizadas a partir das imagens digitalizadas de RMN..... ***125***

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

B	Campo magnético
C	Celsius
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
END	Ensaios Não-Destrutivos
FID	*Free Induction Decay*
FOV	*Field of view*
IAM	*Inspeção Anual de Manutenção*
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IRMN	Imageamento por Ressonância Magnética Nuclear
kN	KiloNewton
ml	Mililitro
mm	Milímetro
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PEI	Poli-éter-imida
PMMA	Poli-metilmetacrilato
PP	Polipropileno
PPS	Poli-sulfeto de fenileno
PSU	Polisulfona
PVC	Poli-cloreto de vinila
RARE	*Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement*
RF	Radiofrequência
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SMM	Departamento de Engenharia de Materiais
TSE	Turbo Spin Eco
T_1	Tempo de relaxação longitudinal
T_2	Tempo de relaxação transversal
USP	Universidade de São Paulo
V	Volt

γ	Constante que depende da espécie do núcleo
3D	Tridimensional
º	Grau
μ	Momento magnético nuclear
μL	Microlitro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... *27*
1.1 Considerações Iniciais..... ***27***
1.2 Objetivo do Trabalho..... ***30***
1.3 Motivação e Justificativa..... ***30***
1.4 Estrutura do Trabalho..... ***32***

2. REVISÃO DA LITERATURA..... *35*
2.1 Estruturas Compósitas do Tipo Painel-Sanduíche..... ***35***
2.2 Materiais Empregados em Painéis-Sanduíche..... ***37***
2.2.1 Faces..... ***37***
2.2.2 Núcleo..... ***39***
2.3 Defeitos de Fabricação em Painéis Sanduíche..... ***40***
2.4 Danos por Impacto em Painéis Sanduíche..... ***37***
2.5 Ingresso de Líquidos em Painéis-Sanduíches..... ***45***
2.6 Inspeção em Painéis-Sanduíche Compósitos de Grau Aeronáutico.... ***46***
2.7 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)..... ***48***
2.7.1 Considerações Iniciais..... ***48***
2.7.2 O Fenômeno de Ressonância Magnética Nuclear..... ***48***
2.7.3 Formação da Imagem de Ressonância Magnética Nuclear..... ***50***
2.7.4 Estudos com Imageamento por RMN na Área de Inspeção Não-Destrutiva..... ***53***
2.7.4.1 Considerações Iniciais..... ***53***
2.7.4.2 Estudos de Casos de IRMN Aplicada à Engenharia Estrutural..... ***53***

3. MATERIAIS E AMOSTRAS..... *57*
3.1 Painéis-Sanduíche Estruturais Compósitos..... ***57***
3.2 Composição de Líquidos e Resina Empregados..... ***58***
3.3 Preparação das Amostras..... ***59***

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS..... *75*
4.1 Equipamento de Ressonância Magnética Nuclear..... ***75***
4.2 Protocolo Utilizado para Obtenção de Imagens por RMN..... ***76***
4.3 Protocolo Utilizado para Processamento de Imagens por RMN..... ***80***
4.4 Procedimento para a Quantificação do Conteúdo das Células..... ***81***

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... *85*
5.1 Testes Preliminares de IRMN..... ***85***
5.2 Ensaio de Painel Contendo Água Inserida Controladamente..... ***88***
5.3 Ensaio de Painel com Núcleo Danificado..... ***90***
5.3.1 Imageamento de Danos por RMN em Planos Normais
(Paralelos à Face Principal do Painel)..... ***90***
5.3.2 Imageamento de Danos por RMN em Planos Transversais
(Ortogonais à Face Frontal do Painel)..... ***93***
5.4 Ensaio de Painel Umidificado com Névoa Quente..... ***98***
5.5 Ensaios de Painéis Contendo Líquidos Distintos..... ***100***
5.6 Amostra para Ensaio de Painel com Resina Sólida em
Excesso (Pura ou Carregada com Agentes Contrastantes em Pó)..... ***106***
5.7 Quantificação do Conteúdo de Líquido nas Células-Colméia..... ***111***

6. CONCLUSÕES..... *127*

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... *129*

REFERÊNCIAS..... *131*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O setor aeronáutico se consolidou nas últimas décadas como o meio de transporte mais rápido e eficiente de cargas e passageiros. Neste sentido, o desenvolvimento de novos materiais, mais leves e resistentes, tanto em termos mecânicos quanto químicos (ex. resistência à corrosão dos metais, ou à degradação dos polímeros), tem contribuído significativamente para o crescimento e o aperfeiçoamento das aeronaves, mais especificamente no que se refere ao aumento da vida útil e do desempenho das estruturas e componentes aeronáuticos. Isto se reflete diretamente na redução dos custos envolvidos no estágio de manutenção, que inclui as tarefas de inspeção periódica não-destrutiva, e, em última instância, de análise e prevenção de falhas.

Os materiais compósitos (ou compostos) estruturais artificiais são formados por uma combinação racional (engenheirada) físico e/ou química de dois ou mais micro, ou macro-constituintes que diferem na forma e na composição química, e que são insolúveis uns nos outros (ASKELAND, 1995; FLOWER, 1995).

Uma das classes mais promissoras dos materiais compósitos são os chamados painéis-sanduíche, os quais que são atualmente amplamente utilizados nas indústrias aeronáutica, automotiva, marítima, petroquímica e de geração de energia eólica, graças à grande flexibilidade proporcionada em temos de projeto e construção. A Figura 01 mostra a mais moderna e maior aeronave da Airbus hoje em operação, a qual emprega painéis-sanduíche em grande parte de seus componentes estruturais primários e secundários.

A grande difusão dessa classe de materiais compósitos nos diversos campos da engenharia estrutural demanda necessariamente uma permanente e profunda investigação acerca da integridade estrutural dos painéis-sanduíche nos diversos ambientes experimentados pelos mesmos em condições reais de serviço.

Neste sentido, os ensaios destrutivos (mecânicos) e os não-destrutivos (que se baseiam na monitoração de propriedades físicas dos materiais) proporcionam

uma ampla gama de possibilidades na investigação do desempenho de materiais e estruturas de alto desempenho, tais como os painéis sanduíche.

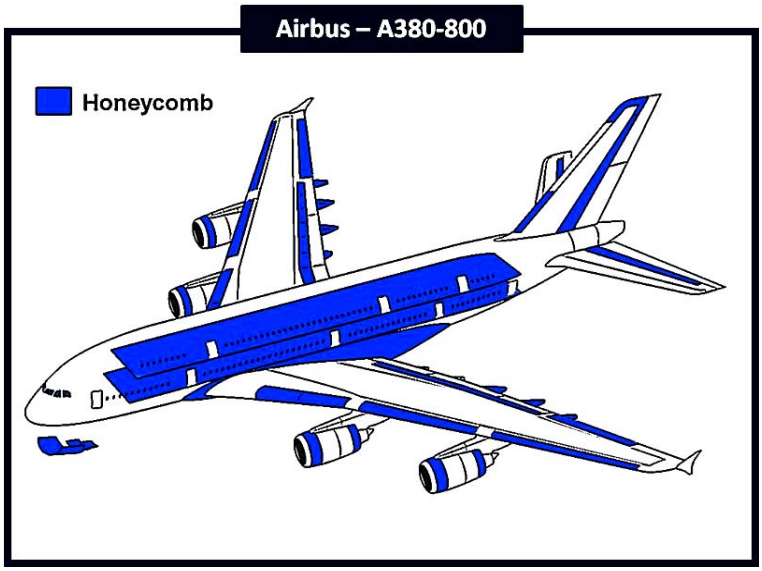


Figura 01 – Emprego de painéis-sanduíche na construção da aeronave comercial A380, tal como indicados pelos componentes na coloração azul (Extraído de http://www.flightglobal.com/articles/2005/06/14/199071/creating-a-titan.html).

Conforme MALDAGUE (2001), ensaios não destrutivos (END) são definidos como um conjunto de técnicas que possibilitam a análise e a caracterização dos materiais, componentes e estruturas, sem que se percam ou se maculem suas características físico-químicas originais. Em outras palavras, a realização de um END não pode alterar a geometria, o acabamento, a microestrutura e a integridade de uma peça, componente ou estrutura a ponto de interferir negativamente, ou seja, prejudicar seu processamento mecânico e seu tratamento térmico durante a manufatura, sua montagem, sua manutenção, seu reparo, e seu uso posterior em serviço.

Existe atualmente um grande esforço de se desenvolverem ou adaptarem END eficazes para a inspeção de materiais e estruturas compósitas, haja vista que

boa parte dos ensaios existentes advirem da indústria metalúrgica. Dentre as técnicas END que mais vêm alcançando sucesso quando aplicadas aos compósitos, em especial os de matriz polimérica, destacam-se a termografia infravermelha, a *shearografia*, a radiografia, o ultrasom, e a neutrongrafia (DOYUM & DÜRER, 2002; HSU, 2009), as quais possibilitam, de forma relativamente rápida e confiável, a detecção de danos e defeitos de manufatura (incluindo aí as etapas de manutenção e reparo), e de danos criados em condições de serviço.

Mais recentemente, estudos vêm avançando rapidamente nas áreas de Terahertz (STOIK et al, 2010; PARK et al, 2010), bem como de Imageamento por Ressonância Magnética Nuclear (IRMN), em especial visando a detecção de água em núcleos colméia de painéis-sanduíche empregados na indústria da construção aeronáutica – aeronaves e helicópteros (BEER et al, 2004; BALASKÓ et al, 2005; ABOU-KHOUSA et al, 2006; ISHIDA, 2009).

Entretanto, os dados disponíveis na literatura científica aberta não indicam, até o presente momento, uma ação mais efetiva por parte dos pesquisadores no sentido de uma caracterização mais apurada quanto à presença de líquidos, subentenda-se a detecção, a quantificação, e a potencial identificação e discriminação entre água e compostos hidrocarbonetos (tais como fluido hidráulico, solventes, querosene, degelantes, etc..., todos estes encontrados em grande quantidade no ambiente aeronáutico, por exemplo), por intermédio de técnicas de IRMN, em painéis-sanduíche estruturais com núcleos tipo-colméia.

A presente Dissertação de Mestrado trata especificamente da questão da detecção e quantificação de líquidos ricos em hidrogênio aprisionados em células de núcleos-colméia de painéis-sanduíche estruturais de grau aeronáutico empregando, nestas tarefas, a metodologia de IRMN. Visa-se, portanto, demonstrar o potencial de aplicação do IRMN como método de inspeção não-destrutiva no campo aeronáutico (em particular, mas não se restringido somente a esta área da mobilidade) através de vários experimentos que simulam, em escala de laboratório, situações típicas de contaminação, ou impregnação de estruturas compósitas tipo-sanduíche em ambiente de serviço.

1.2 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho objetiva desenvolver e implementar, em escala de laboratório, uma rotina experimental com base em Imageamento por Ressonância Magnética Nuclear (IRMN) de modo a verificar e confirmar, ou não, o seu potencial como uma ferramenta não-destrutiva para a inspeção quali- e quantitativa da presença de água e hidrocarbonetos líquidos no interior de células de núcleos-colméia utilizados na confecção de painéis-sanduíche estruturais de grau aeronáutico. Tentativas são também realizadas no sentido de se observarem e caracterizarem danos por amassamento de núcleos-colméia contendo água, assim como de se detectar a presença de resina polimérica na forma sólida, visando desta feita verificar o uso do IRMN na inspeção de componentes previamente reparados e/ou contendo excesso de resina por falha do processo de manufatura.

1.3 Motivação e Justificativa

A rigor, os painéis-sanduíche aeronáuticos são projetados, fabricados e finalmente embarcados e montados nos veículo aéreos 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 cheques periódicos da aeronave), 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 (líquido-sólido-líquido) causada por variações extremas da temperatura em serviço (*freeze-thaw cycle*), dentre outros tantos efeitos perniciosos. Nos veículos de asas rotativas (helicópteros), a presença de água e/ou fluido hidráulico na estrutura interna das pás de hélice 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 hão de ser considerados (SHAFIZADEH et al., 1999; LAPLANTE et al., 2005; 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 circulo 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, torna o processo degenerativo auto-acelerante.

Por outro lado, não se pode também desconsiderar a possibilidade de sabotagens durante o próprio processo de manufatura (ou reparo) dos painéis e estruturas do tipo-sanduíche. Pode-se, desta forma, aventar a possibilidade de o componente ser embarcado e instalado em uma aeronave em uma 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 ou difusão através da rede pré-existente (sabotada) 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 extração do fluido (por exemplo, através da aplicação simultânea de calor e vácuo) os mesmos caminhos por onde se verificou a entrada de vapores e líquidos (SHAFIZADEH & SEFERIS, 2003; LI et al., 2006), ou então, mais tradicionalmente, utilizam-se de pequenas perfurações controladamente realizadas nos laminados de revestimento do painel (ANON., 1997), seria grande a possibilidade de que a estrutura interna altamente comprometida de um painel, seja pela degradação provocada pelo fluido ingressante, seja por danos mecânicos provocados intencionalmente (sabotagem), permanecesse não-revelada durante as manutenções periódicas, implicando assim no risco à integridade do componente e, por conseguinte, do veículo aéreo, e obviamente à vida de seus passageiros e tripulantes. Daí a importância do desenvolvimento de técnicas END que possam não somente revelar fluidos contidos no núcleo-colméia durante manutenções de rotina, sendo a água e o óleo lubrificante aqueles com maior probabilidade de detecção em função da sua maior profusão no ambiente aeronáutico, mas também 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.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 discute-se brevemente o conceito de painéis estruturais compósitos do tipo sanduíche com núcleo-colméia (*honeycomb structural sandwich panels*), enfatizando-se a utilização dos END nesse tipo de matéria-estrutura. Destacam-se, portanto, neste primeiro capítulo, a importância do tema, assim como o objetivo principal da pesquisa e a motivação para sua condução.

No Capítulo 2 realiza-se a revisão da literatura sobre os painéis-sanduíche, citando-se as possíveis aplicações desta classe de materiais, em especial no campo aeronáutico. Discutem-se também os defeito e danos tipicamente observados nestes materiais-estruturas, o evento de ingresso de vapores e líquidos nos mesmo em condições de serviço, e as técnicas END comumente aplicadas na identificação do

problema. Por fim, o estado-da-arte da técnica de IRMN é descrita no que concerne à sua aplicação na detecção de compostos ricos em hidrogênio.

No Capítulo 3 detalha-se o tipo de material utilizado no estudo, assim como descreve-se os processos de preparação das amostras empregadas nos ensaios mecânicos, físico-químicos e de inspeção não-destrutiva.

No Capítulo 4 são estabelecidos os procedimentos experimentais relacionados à condução dos ensaios mecânicos, à realização da inspeção por Ressonância Magnética Nuclear e ao processamento dos dados e imagens resultantes.

No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, utilizando-se os princípios e conceitos abordados no Capítulo 2 de revisão da literatura.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões finais do estudo, enquanto que no Capítulo 7 são sugeridos possíveis trabalhos futuros no tema em questão.

As referências efetivamente consultadas para a confecção desta Dissertação de Mestrado são providas ao final do texto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estruturas Compósitas do Tipo Painel-Sanduíche

Dentre estes diversos tipos de compósitos destaca-se a classe dos chamados painéis-sanduíche, em que núcleos celulares, ou vazados, ex. do tipo colméia (*honeycomb*), são faceados por laminados compósitos sólidos (rígidos), estes últimos confeccionados com reforço de fibras, geralmente contínuas, embebidas em resina termorrígida ou em polímero termoplástico (Figura 02). Eles são amplamente empregados em estruturas de alto desempenho das indústrias aeronáutica, automotiva, marítima, petroquímica, de geração de energia eólica, dentre outras (DOT/FAA/AR-99/49, 1999; DOT/FAA/AR-03/75, 2004; FERABOLI, 2006; LI et al, 2006; ZHOU et al, 2006).

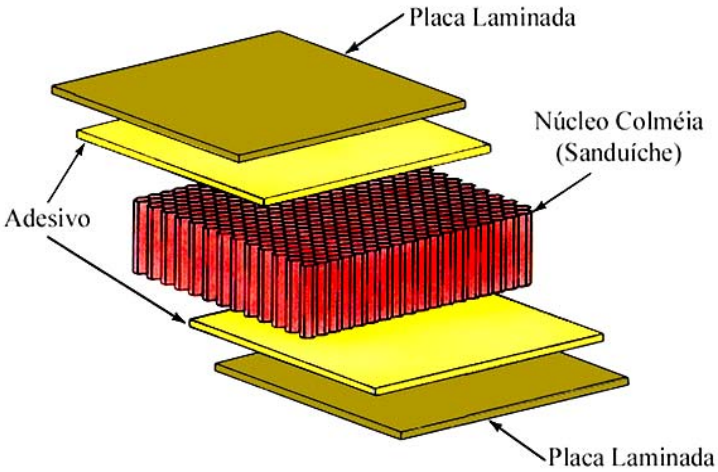


Figura 02 – Estrutura básica de um painel-sanduíche com núcleo-colméia - *honeycomb* (Adaptado de Askeland, 1995).

Os painéis-sanduíche exibem diversas propriedades atrativas, donde se destacam: peso reduzido associado a um ótimo desempenho mecânico em fadiga,

altas razões rigidez e resistência à flexão/densidade aparente (i.e. considerando-se o volume aparente), excelente capacidade de isolamento térmico e acústico, alto coeficiente de amortecimento de vibrações, boa resistência ao fogo, relativamente baixo custo de produção por unidade de volume (YEH et al., 2004; LAPLANTE et al., 2005; HEIMBS & PEIN, 2009).

O conceito básico de uma estrutura do tipo-sanduíche é que as faces laminadas sólidas devam resistir às cargas de flexão (decomposta em componentes trativa e compressiva, respectivamente), enquanto que o núcleo há de suportar as cargas cisalhantes, similarmente às vigas "I" utilizadas na construção civil (Figura 03). Desta forma, os núcleos servem como um enchimento que dá sustentação às faces laminadas, estabilizando-as contra empenamento e flambagem.

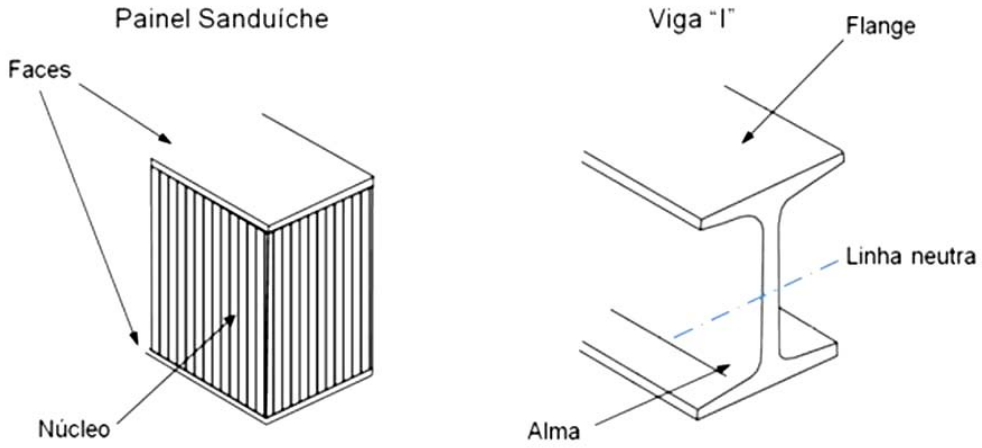


Figura 03 – Analogia entre uma estrutura tipo-sanduíche e uma viga "I" (Adaptado de CAMPBELL, 2006).

A construção de uma estrutura do tipo painel-sanduíche, em especial com núcleo tipo-colméia, exibe altíssima eficiência estrutural (i.e., relação desempenho/peso), principalmente em aplicações em que a rigidez é um fator preponderante, tais como nas superfícies de propulsão (hélices) e de controle (profundores, lemes, flapes, etc...) de aeronaves.

A desvantagem destes painéis vazados estaria na sua relativamente baixa resistência a carregamentos pontuais, tais como freqüentemente observados em soalhos da cabine e revestimentos em geral de compartimentos de carga (MITTELMAN, 1992; OFFRINGA & DAVIES, 1996).

2.2 Materiais Empregados em Painéis-Sanduíche

Conforme adiantado, os painéis-sanduíche são hoje largamente utilizados na indústria aeroespacial devido à grande flexibilidade proporcionada em temos de projeto e construção de superfícies aerodinamicamente eficientes, com baixo peso, elevadas rigidez e resistência mecânica específicas.

Os núcleos do tipo colméia (*honeycomb*) possuem uma estrutura celular cujas unidades básicas exibem, em geral, um formato hexagonal similar à estrutura dos favos de mel. Este núcleo colméia pode ser metálico ou polimérico. Os laminados sólidos de revestimento externo são geralmente constituídos por polímeros termorrígidos reforçados com fibras contínuas de vidro, para-aramida (Kevlar®) ou carbono, conforme já ilustrado na Figura 02. Obtém-se, desta forma, um painel extraordinariamente leve, decorrente do núcleo vazado (celular), porém exibindo excepcional resistência à flexão, a qual é proporcional à espessura do componente.

De acordo com REZENDE & BOTELHO (2000), a aplicação dos painéis-sanduíche no setor aeronáutico é, em média, da ordem de 20% do volume construído de uma aeronave, ou de um helicóptero, e, em menor escala, na estrutura de foguetes.

Conforme a necessidade da aplicação dos painéis sanduíche existe uma grande gama material que podem ser utilizados na confecção destes, podendo-se assim obterem-se as mais diversas combinações entre propriedades mecânicas, térmicas, químicas e acústicas.

2.2.1 Faces

As faces superior e inferior dos painéis sanduíche de grau aeronáutico são painéis rígidos, cuja espessura varia de frações até dezenas de milímetros,

formados geralmente pela combinação de duas fases distintas, quais sejam, uma matriz polimérica (termorrígida ou termoplástica) e um reforço cerâmico/polimérico (fibras de carbono, vidro, quartzo ou aramida), ou seja, são laminados compósitos sólidos ou monolíticos, porém há situações que requerem a utilização de chapas de aço, de ligas de alumínio, de titânio ou de magnésio (CAMPBELL, 2006), especialmente quando o núcleo colméia também é de natureza metálica.

No caso de uso de matriz polimérica, esta proporciona proteção mecânica contra o desgaste por abrasão das fibras, isolamento destas últimas contra agentes agressivos externos, suporte das fibras contra micro-flambagem, além de garantir a transferência das tensões para o elemento fibroso de reforço. Esta transferência se verifica por intermédio do atrito e/ou da adesão entre as fases matriz e reforço, e esta região em que se efetiva a transmissão de esforços mecânicos é denominada interface.

As matrizes poliméricas podem ser classificadas em dois tipos; termorrígidas e termoplásticas, conforme a influência da temperatura em suas propriedades físicas (CAMPBELL, 2006). As características mais importantes de uma resina polimérica aplicada como matriz estão associadas à sua capacidade de absorver energia de impacto e à sua habilidade de interagir física e quimicamente com o reforço fibroso. Embora existam vários tipos de resinas utilizadas em compósitos pela indústria aeronáutica, a maioria das peças estruturais ainda são feitas com resina termofixa, particularmente a classe dos epóxis. Alternativamente, têm-se as resinas bismaleimídicas, os poliésteres, as fenólica e as poliimidas, enquanto as termoplásticas de grau aeronáutico incluem o PEEK (poli-éter-éter-cetona), PEI (poli-éter-imida), PPS (poli-sulfeto de fenileno), PSU (polisulfona) (NIU, 1996; REZENDE & BOTELHO, 2000).

O uso de reforços contínuos (fibrosos) confere um caráter direcional (anisotrópico) às propriedades dos compósitos, daí a necessidade de uma distribuição balanceada dos arranjos e arquitetura do tipo tape (unidirecional) ou tecido (bi- ou tridirecionais). As fibras são mecanicamente resistentes, rígidas e leves, sendo as verdadeiras responsáveis pela tão desejável característica de elevada tolerância a danos exibida pelos compósitos fibrosos, quando comparados aos materiais monolíticos metálicos, cerâmicos ou poliméricos.

A Tabela 01 lista as principais propriedades mecânicas e físicas das fibras comumente utilizadas na fabricação de painéis sanduíche estruturais da indústria aeronáutica.

Tabela 01 – Propriedades de algumas fibras de reforço (Extraído de ASKELAND, 1995)

Material	Massa específica (kg/m³)	Limite resistência tração (MPa)	Modulo elasticidade (GPa)	Temperatura fusão (°C)	Modulo específico (MJ/kg)	Resistência específica (MJ/kg)
Kevlar®	*1.440*	*4.485*	*124*	*500*	*86,1*	*3,11*
Vidro-E	*2.550*	*3.450*	*72*	*< 1.725*	*28,2*	*1,38*
Vidro-S	*2.500*	*4.485*	*87*	*< 1.725*	*34,8*	*1,79*
Carbono de alta resistência	*1.750*	*5.660*	*276*	*3.700*	*158*	*3,23*
Carbono de alto módulo	*1.900*	*1.860*	*530*	*3.700*	*279*	*0,98*

2.2.2 Núcleo

Os painéis-sanduíche estruturais contém um núcleo que pode ser confeccionado ou com espuma rígida, possuindo células fechadas, como, por exemplo, os fabricados com resina termorrígida fenólica, e polímeros termoplásticos como o poli-cloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP) e o poli-metilmetacrilato(PMMA), ou do tipo colméia (CAMPBELL, 2006), que é objeto do presente estudo.

Os núcleos tipo colméia, também conhecidos como *honeycombs*, possuem estrutura celular aberta, cujas unidades básicas podem exibir vários formatos, tais como hexagonal, quadrado, retangular, triangular ou sinusoidal, e podem ser feitos a partir de ligas metálicas como a de alumínio, de titânio, ou então de fibras de vidro, de carbono, de aramida (meta-aramida, Nomex®), papel ou polietileno. Núcleos do tipo-colméia possibilitam uma maior capacidade de compressão e cisalhamento do

que os de espuma, possibilitando assim aplicações onde baixo peso associado a elevada rigidez são importantes critérios de projeto (NIU, 1996; YEH et al, 2004; MINAKUCHI et al, 2009; HSU, 2009). Usualmente, na indústria aeronáutica utilizam-se cada vez mais os núcleos de Nomex®; este material em especial atinge níveis de excelência em diversos requisitos de projeto de engenharia estrutural (LAPLANTE et al, 2005; NASSEH, 2007).

Não obstante os núcleos-colméia confeccionados com ligas de alumínio possuam propriedades de resistência à compressão e ao cisalhamento superiores quando comparados aos de colméia de meta-aramida; no entanto, o primeiro é mais pesado (ou seja, possui uma eficiência estrutural competitiva com o segundo), além de muito susceptível à ação corrosiva e de não possuir uma boa resistência tanto ao impacto quanto à fadiga (BEER, 2004; HUS, 2009).

Os núcleos-colméia feitos em papel industrial são substancialmente mais baratos do que os de Nomex®, porém são muito menos rígidos e só disponíveis em classes de baixa densidade, tendo, portanto, baixas propriedades mecânicas, além de exibirem sérios problemas com absorção de umidade, a qual reduz ainda mais as já pobres propriedades estruturais daquele material. Por fim, existem colméias fabricadas com polipropileno, material que não contempla os requisitos térmicos básicos exigidos para projetos de grau aeronáutico (NASSEH, 2007).

2.3 Defeitos de Fabricação em Painéis Sanduíche

Como todo produto manufaturado, mesmo empregando-se os mais exigentes critérios de controle de qualidade da matéria-prima, rígidos padrões de processamento e de inspeção destrutiva e não-destrutiva, várias classes de defeitos de fabricação ainda podem ocorrer no produto final.

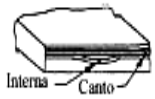
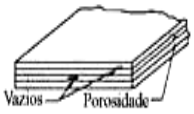
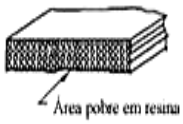
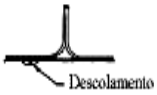
A Tabela 02 denomina, ilustra e descreve alguns dos principais tipos de defeitos a que estão sujeitos os laminados sólidos que revestem as faces dos painéis-sanduíche, como decorrência de seu processo de fabricação.

Com relação ao núcleo-colméia faceados por estes laminados sólidos, há de se destacarem os efeitos de amassamento devido a impactos de pequena e média intensidades que ocorrem com freqüência ao longo do processo de fabricação

destes componentes. Amassamento de núcleos (*core crush*) não é raro ocorrer durante o processo de fabricação de painéis-sanduíche ao longo do ciclo de cura em autoclave devido à pressão e/ou vácuo excessivos e/ou altamente localizados aplicados ao componente envolto em bolsa de vácuo. Estes eventos provocam uma redução significativa da taxa de produção destes componentes devido aos altos índices de rejeição efetuados pelo controle de qualidade, haja vista que estes danos são irreparáveis. Este defeito de fabricação também restringe a atuação do engenheiro estrutural, visto que ele tem que optar por núcleos mais densos e espessos no intuito de mitigar as causas e conseqüências dos amassamentos de núcleo. A possibilidade de danos intencionais (sabotagem) causados ainda no estágio de fabricação, também deve ser considerada quando se tratam de danos internos, irreversíveis e inacessíveis à inspeção visual dos painéis-sanduíche.

Também durante a cura dos painéis em autoclave, a matriz resinosa que impregna os laminados sólidos de revestimento torna-se menos viscosa, de forma que ela pode contaminar o núcleo-colméia adicionando massa inútil ao componente como um todo, diminuindo assim sua eficiência estrutural devido ao aumento de peso.

Tabela 02 – Defeitos típicos de manufatura observados nos laminados sólidos que revestem as estruturas do tipo painel-sanduíche (Adaptado de SHAFIZADEH et al., 1999; BALASKÓ et al., 2005)

Defeitos	Vistas	Descrição
1. Delaminações		Delaminações são separações entre camadas de um laminado e causadas por preparação imprópria da superfície, contaminação e incorporações de materiais estranhos
2. Inclusões		Inclusões são incorporações de materiais estranhos entre o material laminado
3. Vazios e porosidade		Vazios e porosidades consistem em ar e bolhas de gás aprisionadas e são causadas por substâncias voláteis, fluxo impróprio de resina e distribuição desigual de pressão. Os vazios são agrupados na resina, enquanto porosidades ocorrem em materiais sólidos
4. Área rica em resina		Áreas ricas em resina são localizadas, preenchidas com resina e com falta de fibras. Esses defeitos são causados por compactação ou gansramento impróprios
5. Área pobre em resina		Áreas pobres em resina estão localizadas onde há quantidade insuficiente de resina, como locais secos ou onde fibras são expostas. São causadas por compactação imprópria ou sangramento
6. Desalinhamento, flambagem, e rugosidade de fibras		Desalinhamento é uma distorção na camada de fibras resultando em mudança na orientação desejada, ou em flambagem e rugosidade das fibras. São causados por deposição imprópria das camadas
7. Fibras quebradas		São descontinuidades nas fibras. Causadas por manuseio impróprio
8. Descolamentos		Descolamentos ocorrem entre diferentes camadas da estrutura. Ocorrem devido à contaminação da superfície, pressão excessiva ou montagem imprópria

2.4 Danos por Impacto em Painéis Sanduíche

Além dos defeitos tipicamente oriundos do processo de fabricação, tais como os apresentados no item anterior, os painéis-sanduíche aeronáuticos estão também sujeitos a uma vasta gama de eventos de impacto em condições normais de serviço (vide Tabela 03), seja durante o vôo da aeronave, no seu taxiamento/corrida no solo,

quando estacionada, e, particularmente, durante as operações periódicas de manutenção e inspeção.

Tabela 03 – Causas mais comum de danos por impacto mecânico em serviço de estruturas aeronáuticas confeccionadas em materiais compósitos. (GWEON, 1992; FREITAS & REIS, 1998; WU, 2007)

Fonte do Dano	**Componente Afetado**
Aeronave em vôo	
Choque com pássaro	*Bocal da estrutura de contenção da turbina* *Radôme*
Chuva de granizo	*Radôme* *Entrada da turbina* *Asa superior e painéis fixos da empenagem* *Superfícies de controle de vôo*
Desintegração da turbina	*Estrutura de contenção da turbina* *Fuselagem* *Asa inferior e painéis fixos da empenagem*
Aeronave no solo	
Chuva de granizo	*Radôme* *Entrada da turbina* *Asa superior e painéis fixos da empenagem* *Superfícies de controle de vôo*
Separação do protetor de pneus	*Flapes* *Asa inferior e estruturas de acabamento aerodinâmico* *Portas do trem de pouso*
Fragmentos levantados pelo contato pneu/pista	*Flapes* *Asa inferior e estruturas de acabamento aerodinâmico* *Portas do trem de pouso*
Aeronave em manutenção	
Manuseio incorreto	*Contenção da turbina* *Bordos de ataque e de fuga da asa e da empenagem* *Portas do trem de pouso*
Transporte e manuseio	*Todos os componentes removíveis*

Estes impactos, dependendo da energia do objeto incidente e de sua natureza, do tipo e geometria estrutural do componente, bem como do material compósito que o constitui, além da localização do choque mecânico, podem originar, no caso dos laminados sólidos que constituem as faces dos painéis-sanduíche, danos como o trincamento da matriz polimérica, a quebra de fibras, o descolamento entre fibra e matriz (separação na interface), delaminações e mossa. Descolamentos entre estes laminados rígidos e o correspondente núcleo-colméia, além do amassamento do próprio *honeycomb*, chegando à penetração do componente estrutural e, numa condição limite, até mesmo à perfuração total do painel (ABRATE, 1991; BALASKÓ et al, 2005) podem também ocorrer dependendo das variáveis acima citadas.

A Figura 04 ilustra alguns dos eventos mais comuns de impacto a que estão sujeitas as aeronaves comerciais em condições de serviço.

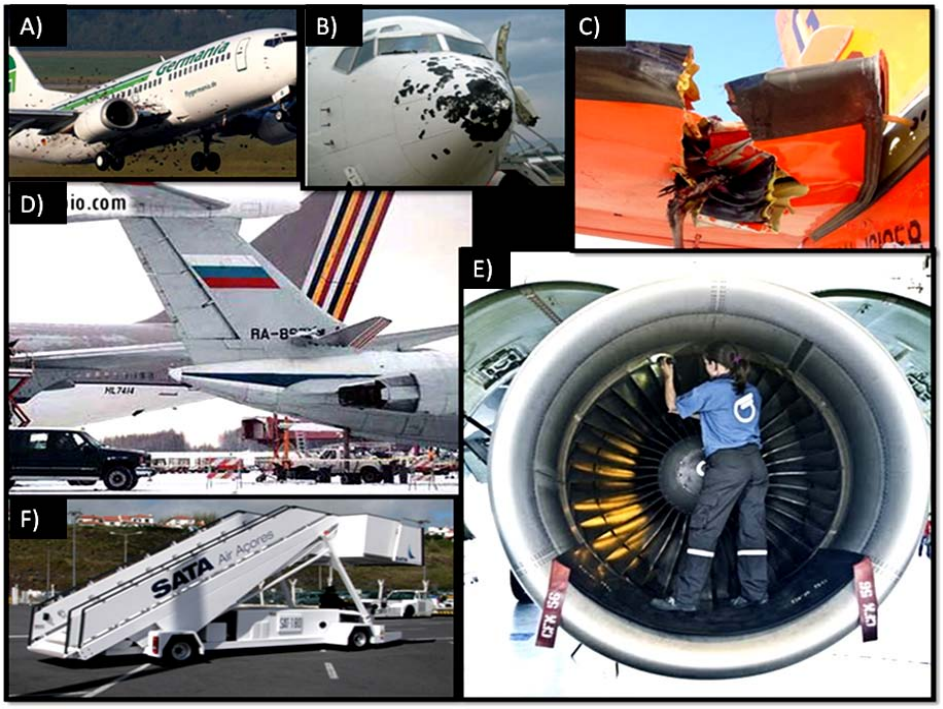


Figura 04 – Eventos de impacto mecânico, e alguns dos principais danos resultantes em aeronaves: (A) Choque com pássaros; (B) Chuva de granizo em vôo; (C) Impacto com ave em vôo; (D) Choque entre aeronaves taxiando na pista; (E) Choque de fragmentos por atrito pneu/solo; (F) Choque de veículos de apoio.

O chamado *tool box problem*, no qual danos advindos da queda acidental de ferramentas empregadas em operações de manutenção e reparo de aeronaves é já bem conhecido na área. Tipicamente, são originados nestes eventos o amassamento permanente dos núcleos-colméia e o descolamento dos revestimentos sólidos. Os danos do tipo descolamento entre revestimento e núcleo, amassamento do núcleo-colméia, além do descolamento ocorrendo entre as próprias células da estrutura colméia devido a cargas externas dinâmicas (ou decorrentes de falha do processo de manufatura dos painéis-sanduíche) constituem os principais caminhos de intrusão e percolação de água no interior destes componentes estruturais em serviço. Interessante observar que amassamento de núcleos, descolamentos núcleo/revestimento e delaminações do laminado rígido de revestimento são mecanismos de falha são, por vezes, fenômenos inter-relacionados, ocorrendo simultaneamente ou em rápida sucessão (QIN & BAO, 1996; DOT/FAA/AR-99/49, 1999; DOT/FAA/AR-03/75, 2004; FERABOLI, 2006; LI et al, 2006; HSIAO et al, 2006; ZHOU et al, 2006; CASTANIÉ et al, 2008; DULIEU-BARTON et al, 2010).

2.5 Ingresso de Líquidos em Painéis-Sanduíches

Conforme anteriormente referido, os painéis-sanduíche estruturais idealmente devem se manter íntegros (blindados) durante toda a vida em serviço a aeronave de forma a não serem contaminados por elementos gasosos e líquidos presentes em profusão no ambiente em que operam os veículos aéreos de asas fixas ou rotativas. No entanto, a inexorável presença de defeitos e danos por impacto e a inevitável existência de detalhes estruturais passantes propiciam condições adequadas para o desenvolvimento de uma cadeia de eventos que culminam no ingresso e na percolação de gases e/ou líquidos (tipicamente água, fluido hidráulico, querosene, lubrificantes, degelantes e solventes) nos interior de núcleos-colméia de painéis estruturais (SHAFIZADEH et al, 1999; BALASKÓ et al, 2005).

A presença destes compostos químicos prejudica significativamente a operação normal das aeronaves, trazendo prejuízos financeiros às companhias aéreas bem como sérios riscos à segurança das aeronaves, sua tripulação e

passageiros (SHAFIZADEH et al, 1999; DOYUM & DÜRER, 2002; BEER et al, 2004; BALASKÓ et al, 2005; LAPLANTE et al, 2005; MARBLE et al, 2009).

Boa parte dos esforços empreendidos durante a manutenção e inspeção periódica (*checks* A a D) das aeronaves e helicópteros compreende a procura por componentes estruturais contaminados por aqueles compostos químicos e o reparo ou substituição dos mesmos. Desta forma, grande investimento é realizado na aquisição de equipamentos de ensaios (inspeções) não-destrutivos e no treinamento de pessoal especializado em utilizá-los do modo mais rápido e eficiente possível. Neste sentido, novas formas de END estão sendo constantemente desenvolvidas e adaptadas especificamente para a inspeção dos painéis estruturais com núcleos colméia. Este assunto é tratado em maior profundidade no capítulo subseqüente desta Dissertação de Mestrado.

2.6 Inspeção em Painéis-Sanduíche Compósitos de Grau Aeronáutico

Periodicamente, as aeronaves civis e militares são submetidas a programas de inspeção denominados *IAM – Inspeção Anual de Manutenção* com intuito de atender as recomendações estabelecidas em manuais e certificados emitidos pelos fabricantes de todo o conjunto que constitui as aeronaves (ex. estrutura, trens de pouso, propulsores – turbinas e hélices, etc...), considerando-se o número de vôos e/ou as horas de vôo da aeronave, de modo a garantir a sua segurança em serviço (*airworthiness*) e/ou a extensão segura de sua vida-útil.

Estruturas aeronáuticas tipicamente construídas com painéis-sanduíche incluem radômes, superfícies de controle, carenagens dos motores, pás propulsoras de helicópteros, e, em alguns casos, até mesmo fuselagens (REZENDE & BOTELHO, 2000). A Figura 05 mostra, em termos de tipos 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 vôo. Note-se que uma grande proporção destes componentes estruturais é confeccionada com painéis do tipo-sanduíche com núcleo colméia.

Não bastasse a imensa gama de esforços de natureza estática (ou quase-estática), dinâmica (impacto) e cíclica (fadiga) a que estão submetidos os painéis

estruturais aeronáuticos, a natureza celular do seu núcleo-colméia os faz particularmente propensos ao ingresso de líquido e gases durante sua vida-útil operacional, levando a efeitos sinérgicos físicos-químicos-mecânicos deletérios que aceleram sua deterioração, com o conseqüente comprometimento de sua integridade e dos níveis de garantia de segurança em vôo, incrementando substancialmente o risco de falhas mesmo em condições tidas como normais de operação do veículo aéreo (LAPLANTE et al, 2005).

Na tentativa de minimizar estes riscos, vários métodos END vêm sendo concebidos, propostos, desenvolvidos, ou então adaptados para a inspeção desta classe especial de materiais de construção aeronáutica, destacando-se entre eles: Tap-Test (automatizado para audiometria), Radiografia (nas modalidades digital e tomográfica), Neutrongrafia, Ultrasom e Correntes Parasitas (ambos na modalidade "*phased-array*"), Termografia Infravermelha, *Shearografia*, TeraHertz, *Laser*-Ultrasônico (DOYUM & DÜRER, 2002; LAPLANTE et al, 2005; IQ et al, 2008; HSU, 2009).

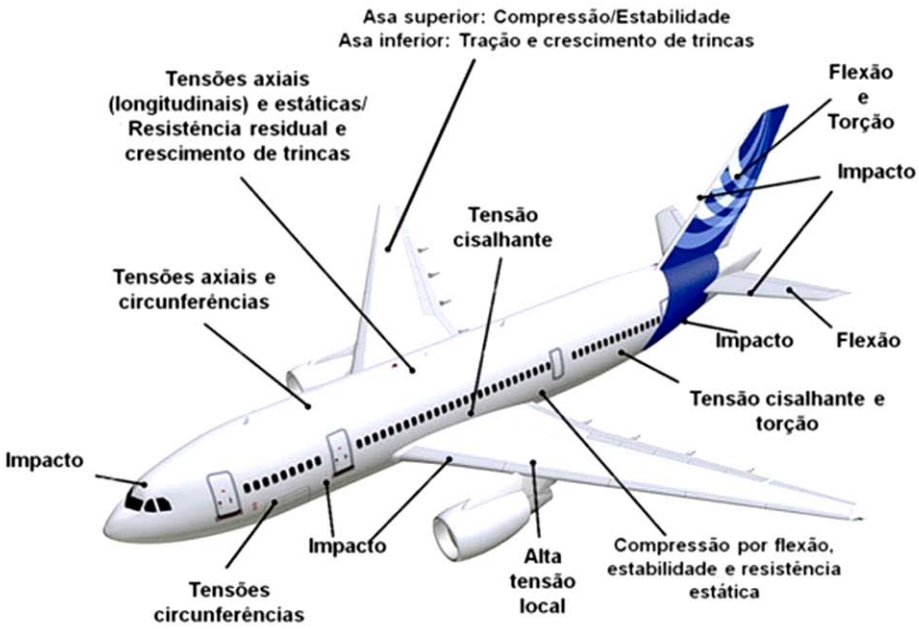


Figura 05 – Tipos de esforços mecânicos aos quais são submetidos os principais elementos estruturais de uma aeronave comercial de grande porte.

Mais recentemente, grandes avanços vêm sendo obtidos na área de imageamento por Ressonância Magnética Nuclear (RMN), em especial visando a detecção de água nos núcleos colméia (BEER et al, 2004; BALASKÓ et al, 2005; ABOU-KHOUSA et al, 2006).

No entanto, uma revisão da literatura pertinente ainda não revela ações direcionadas a uma caracterização mais apurada, por intermédio de IRMN, de líquidos disponíveis em grandes quantidades no ambiente aeronáutico (água e compostos hidrocarbonetos) e que comumente impregnam e contaminam os painéis-sanduíche estruturais utilizado na montagem de aeronaves.

A presente Dissertação de Mestrado pretende contribuir para a ampliação do campo de aplicação da técnica IRMN, desta feita como um método não-destrutivo de alta sensibilidade e confiabilidade para a indicação e a quantificação destes agentes contaminantes de estruturas de alta responsabilidade, em especial da indústria de construção aeronáutica, porém não se limitando exclusivamente a ela.

2.7 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

2.7.1 Considerações Iniciais

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

2.7.2 O Fenômeno de Ressonância Magnética Nuclear

Alguns núcleos atômicos existentes na natureza exibem uma propriedade fundamental para que exista o fenômeno da Ressonância Magnética Nuclear, qual seja, o chamado momento magnético nuclear (μ). Essa propriedade permite que um

determinado núcleo atômico seja capaz de se comportar como um pequeno imã, possuindo um movimento giratório em torno do seu próprio eixo (NOLL, 2001).

Um núcleo atômico submetido a um campo magnético externo B_0 produz um torque sobre o momento magnético nuclear, o qual altera sua direção e, como conseqüência, promove uma mudança de posicionamento e de movimentação dos *spins*, de sorte que o momento μ experimenta um movimento conhecido como precessão em torno do campo externo B_0 (Figura 06).

O movimento de precessão do núcleo atômico em reação ao campo magnético aplicado B_0, é descrito segundo a freqüência de Larmor pela Equação (1):

$$\omega = \gamma \cdot B_0 \qquad (1)$$

Onde ω representa a freqüência angular de precessão do núcleo atômico, γ é a constante que depende da espécie do núcleo, e B_0 corresponde ao valor do campo magnético estático externamente aplicado.

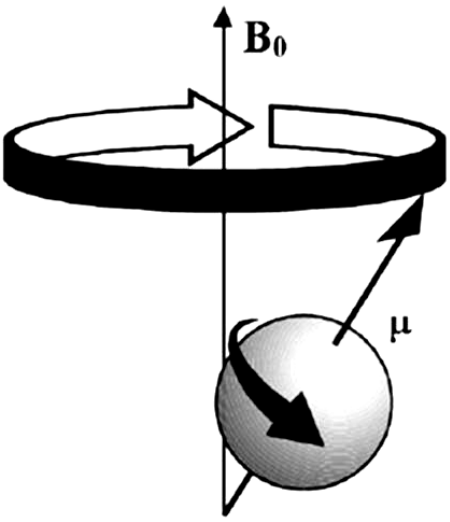


Figura 06 – Movimento de precessão de um momento magnético (POLLI, 2010).

O fenômeno de RMN baseia-se essencialmente na propriedade quântica do *spin* nuclear. Núcleos atômicos com um número ímpar de nêutrons, com um número ímpar de prótons, ou ambos, terão um momento magnético líquido e, portanto, são passíves do fenomeno de RMN (CALLAGHAN, 1991; MARBLE, 2009).

2.7.3 Formação da Imagem de Ressonância Magnética Nuclear

A RMN tem sido largamente empregada nos últimos anos para gerar imagens deslumbrantes sobre a anatomia dos tecidos moles do corpo humano, bem como também na investigação de anomalias em diversos frutos; tais aplicações são bastante atrativas pelo fato de os experimentos serem completamente não-invasivos (HAACKE et al, 1999; NOLL, 2001).

O princípio de formação de imagem leva em consideração o fenômeno de RMN, demandando o processo uma interação entre um campo magnético aplicado e um núcleo que possui momento magnético não-nulo.

Usualmente, para se obterem imagens utiliza-se o próton do elemento Hidrogênio (^{1}H), pois o efeito RMN é mais intenso (alta sensibilidade do método) em virtude da alta concentração deste elemento químico em diversos sistemas orgânicos e inorgânicos (MAZZOLLA, 2009).

Consideremos um objeto (volumétrico) que contenha muitos núcleos de hidrogênio, cada um destes núcleos possuindo um *spin* nuclear característico. Em um experimento de RMN, o objeto a ser “fotografado” é colocado sob a ação externa de um intenso campo magnético estático. O campo magnético estático é normalmente fornecido por um ímã supercondutor que permanece “ligado” continuamente. Nestas circunstâncias, os momentos magnéticos associados com o *spin* nuclear tendem a se alinhar paralelamente ou anti-paralelamente ao campo magnético estático, B_0, de acordo com o estado de energia (baixa ou alta) em que o próton se encontra (vide Figura 07). Uma pequena fração dos momentos magnéticos nucleares se alinha paralelamente ao campo magnético principal, B_0, formando uma rede paralela de magnetização para o mesmo, de sorte que a somatoria vetorial da

energia que envolve a rede forma um vetor magnetico não nulo na direção do campo B_0.

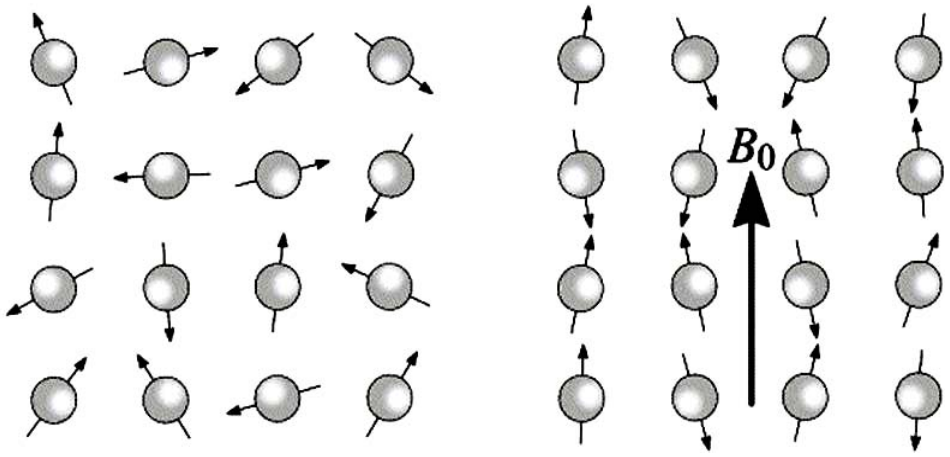


Figura 07 – Orientações dos *spins* atômicos relativamente ao campo magnético constante B_0 (POLLI, 2010).

Quando este volume de prótons é submetido a um segundo campo magnético externo oscilante numa frequência de ressonância, os *spins* absorverão energia e se excitarão. O campo magnético externo oscilante é denominado radiofrequência (RF), porque as frequências de oscilação são semelhantes às utilizadas nas transmissões de rádio. O resultado final de toda esta ação é uma magnetizaçao parcial, ou total no plano perpendicular ao campo magnético principal (CALLAGHAN, 1991).

Após a interação do *spin* atômico com um campo magnético estático B_0, dando origem ao fenômeno de precessão, e seguindo-se a interação deste com o campo de RF, uma bobina colocada próxima ao objeto de estudo pode detectar esta magnetização de precessão, a qual decairá com o passar do tempo. O sinal capturado pela bobina posicionada perpendicularmente ao plano de magnetização é chamado de FID – *Free Induction Decay* (POLLI, 2010*).*

Após a excitação, a magnetização retorna ao seu estado de equilíbrio de acordo com um decaimento exponencial no tempo. A precessão da magnetização no plano perpendicular ao campo estático B_0 também decai exponencialmente com o tempo, onde T_2 é a função que descreve a redução, no tempo, da magnetização

no plano transversal (Figura 08). Devido às interações entre os *spins* nucleares, o mecanismo subjacente é irrecuperável em termos de decaimento e da dispersão da fase do sinal.

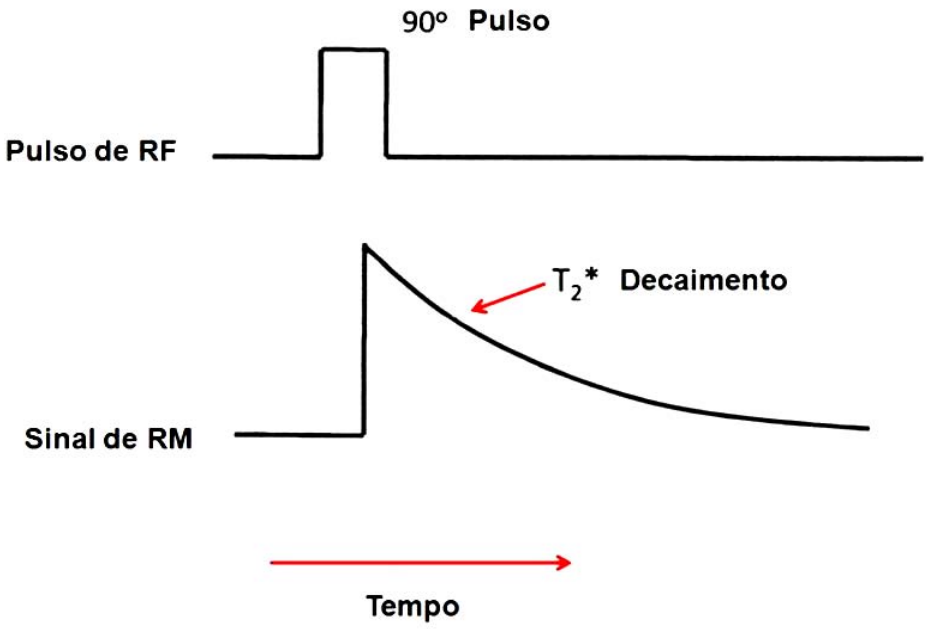


Figura 08 – Descrição do fenômeno de FID, decaimento do sinal de ressonância magnética (Adaptação MARBLE, 2009).

O decaimento da magnetização da rede faz com que o sistema perca a coerência da fase entre os *spins*, levando a uma rápida desmagnetização transversal. A subseqüente aplicação de um pulso magnético gera assim um sinal conhecido como eco de *spins*, e a captação ou detecção deste sinal, seguida da sua decodificação e reconstrução, possibilita a formação da imagem final (MARBLE, 2009).

Grande parte da ciência da Ressonância Magnética Nuclear se fundamenta na exploração das diferenças entre estes parâmetros de excitação para se desenvolver o contraste da imagem com base nas diferentes densidades do objeto

em estudo, o que, no caso específico da medicina se resume aos diferentes tecidos que constituem o corpo humano.

2.7.4 Estudos com Imageamento por RMN na Área de Inspeção Não-Destrutiva

2.7.4.1 Considerações Iniciais

Potencialmente, a RMN possibilita uma rápida obtenção de imagens com elevada resolução, permitindo a indicação, a identificação e a quantificando elementos indesejáveis no interior de componentes estruturais celulares aeronáuticos. Além disso, esta técnica não-destrutiva não opera com base em radiações letais (ionizantes), tal como o faz a radiografia por raios-X e raios-γ (gamagrafia), e a neutrongrafia, as quais são, de longe as metodologias mais empregada nestas inspeções de componentes aeronáuticos (ABOU-KHOUSA et al, 2006; SOARES, 2007; TARPANI et al, 2007; TARPANI et al, 2008; ANON., 2007; HSU, 2008; ANDREUCCI, 2009). A inexistência dos riscos de exposição dos operadores à radiação, no caso da RMN, elimina os altos custos e encargos relativos à proteção radiológica necessária às técnicas radiográficas (raios-X, raios γ, nêutrons, dentre outras técnicas não-destrutivas). Além disso, o emprego da RMN elimina também a necessidade de isolamento das áreas inspecionadas (chamadas áreas de balizamento), com a conseqüente suspensão de outras tarefas simultâneas à radiografia, o que trás óbvias vantagens ao emprego da RMN em termos de aumento da produtividade da planta industrial.

2.7.4.2 Estudos de Casos de IRMN Aplicada à Engenharia Estrutural

LAPLANTE et al (2005) utilizaram em seus estudos de RMNI dois tipos de painéis-sanduíche, o primeiro confeccionado com revestimento de laminado híbrido carbono/vidro reforçando resina termorrígida epóxi e com núcleo de Nomex®, e o segundo feito com revestimento de laminado de fibras de carbono-resina epóxi e com núcleo de alumínio. Eles empregaram no primeiro caso uma quantidade de água de 450 μL por célula, preenchendo no total apenas sete células. Já no segundo

painel, utilizaram 100 μL de água por célula, preenchendo desta feita dez células. Os pesquisadores utilizaram um equipamento portátil de RMN, O equipamento utilizado era um portátil. Os revestimentos e o núcleo-colméia, apesar de interferirem no campo magnético imposto aos espécimes investigados pelo equipamento de Ressonância Magnética Nuclear, não foram imageados durante os ensaios de inspeção dos painéis, segundo os autores devido ao predomínio da intensidade do sinal advindo da água aprisionadas no interior das células. Desta forma, conforme mostra a Figura 09, a despeito dos efeitos exercidos pelos materiais que constituem os laminados sólidos de revestimento, assim como os núcleos-colméia, no campo magnético externamente aplicado, somente água é observada nas imagens registradas. Elas revelam que as células não foram completamente preenchidas com água, como demonstra a presença de menisco no topo das células. As imagens por eles obtidas foram consideradas de muito boa qualidade apesar da presença de camadas eletricamente condutoras de carbono-epóxi nos laminados de revestimento. Concluíram os mesmos pela possibilidade de se obterem registros de sinais de RMN em qualquer posição no interior do painel-sanduíche com núcleo-colméia a despeito da presença daquele material condutor elétrico que reveste o componente. Tipicamente, LAPLANTE et al (2005) despenderam cerca de 1 h na aquisição de cada uma das imagens apresentadas abaixo.

MARBLE et al (2009) inspecionando painéis-sanduíche de uso aeronáutico determinaram o limite inferior de detecção da sonda magnética por eles empregadas como de duas a três células preenchidas com 200 μL deágua, correspondendo a 65% da capacidade volumétrica das mesmas. Eles enfatizam o fato de que é possível imagear o líquido contido nas células mesmo estando a região de interesse remotamente localizada com relação à bobina que produz o campo magnético.

KOTSIKOS et al (2007) empregaram o IRMN como ferramenta de caracterização dos processos de difusão de água absorvida por laminados sólidos com fibras de vidro embebidas em matriz polimérica de poliéster fabricados por laminação manual (*hand lay up*), processo que geralmente produz um nível de vazios e defeitos substancial, favorecendo assim a permeação do líquido nas falhas criadas em profusão no material compósito. O material foi condicionado durante 7000 horas (aproximadamente 300 dias) por imersão no líquido aquecido a 60°C.

Um exemplo de imagem obtida pelos pesquisadores é mostrado na Figura 10, e revela uma resolução (qualidade) relativamente pobre.

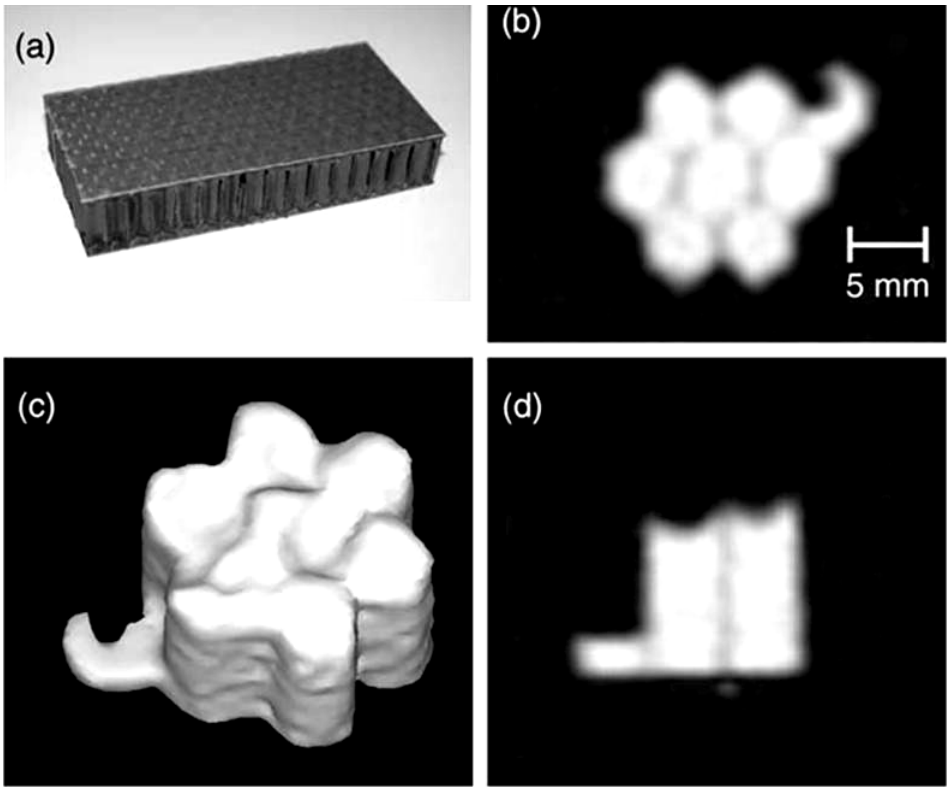


Figura 09 – Imagens obtidas por LAPLANTE et al (2005) na inspeção de uma placa de painel-sanduíche aeronáutico cuja colméia continha água em seu interior: (a) Vista geral da amostra; (b) Vista de topo de sete e meia células contendo água; (c) Imagem em perspectiva 3D das colunas d´água correspondentes às células anteriores, tal como reconstruida via análise computadorizada; (d) Vista da seção transversal das colunas d´água em tres células parcialmente preenchidas, onde se observa a presença de meniscos.

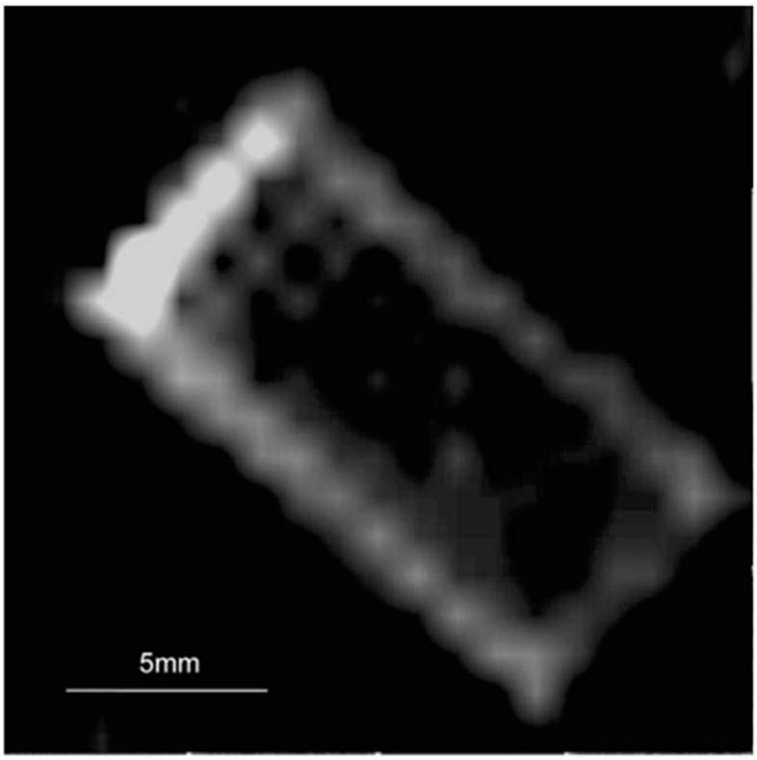


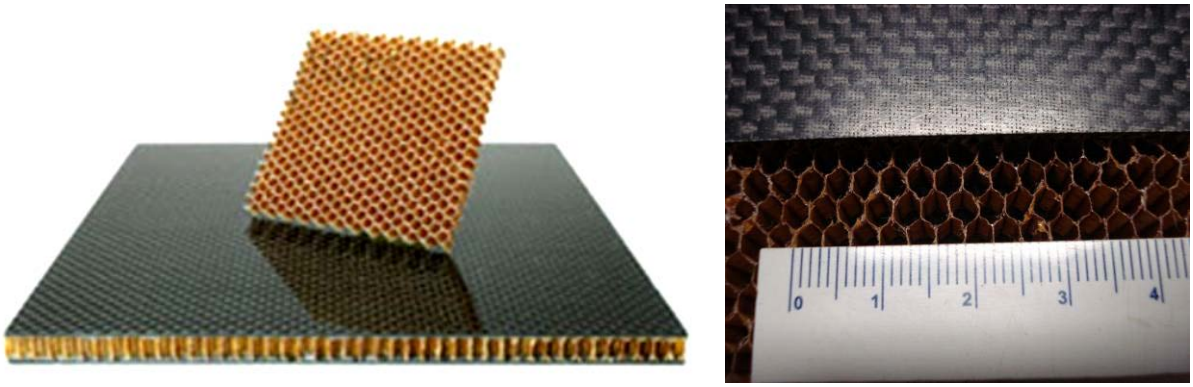
Figura 10 – Imagem obtida via RMN por KOTSIKOS et al (2007) de laminado sólido com matriz polimérica após imersão em água quente por 7000 h.

3 MATERIAIS E AMOSTRAS

3.1 Painéis-Sanduíche Estruturais Compósitos

Neste estudo, foram utilizados painéis-sanduíche estruturais com núcleo do tipo colméia (possuindo células no formato hexagonal), fabricados em meta-aramida (Nomex®) e revestidos/faceados com laminados planos rígidos confeccionados com resina epóxi reforçada com fibras contínuas de carbono. Os painéis foram confeccionados por intermédio da técnica de bolsa de vácuo em autoclave pela empresa Alltec Indústria de Componentes em Materiais Compostos Ltda, da cidade de São José dos Campos-SP, a qual gentilmente cedeu algumas unidades SMM-EESC-USP para a condução da presente pesquisa.

A Figura 11 mostra um pequeno espécime extraído de um painel-sanduíche estrutural, assim como uma amostra de sua colméia interna cujas células exibem geometria hexagonal, a qual pode ser perfeitamente dimensionada.



(a) (b)

Figura 1 – (a) Pequena porção de um painel-sanduíche estrutural com núcleo-colméia de células hexagonais, o qual é faceado por laminados planos e finos de resina epóxi reforçada com fibras de carbono. Uma amostra do padrão hexagonal das células de Nomex® é também ilustrada nesta figura; (b) Detalhe das células internas juntamente a uma escala de medição.

3.2 Composição de Líquidos e Resinas Empregados

A Tabela 04 fornece uma descrição mais rigorosa acerca dos líquidos e das resinas empregados no presente estudo.

Tabela 04 – Caracterização dos materiais deliberadamente introduzidos no interior dos núcleos-colméia empregados neste estudo.

Material	Estado físico	Composição química básica	Densidade a 22°C (g/cm³)
Água	*Líquido*	*H_2O + carbonatos, sulfatos, nitratos, Ca, K, Na, Mg, Cl*	*1,00*
Fluido hidráulico	*Líquido*	*Tributyl phosphate, dibutyl phenyl phosphate, butyl diphenyl phosphate, 2-ethylhexyl 7-oxabicycloheptane-3-carboxylate, 2,6-di-tert-butyl-p-cresol (Skydrol®)*	*1,09*
Querosene	*Líquido*	*$(C_2H_4)_n$, n entre 5 e 16, agentes antioxidantes, aiocidas e desativador de metais*	*0.80*
Degelante	*Líquido*	*$C_2H_4(OH)_2$ Mono-etileno-glicol, anticorrosivos e corante (Bardahl Rad Cool Plus®)*	*1,11*
Resina	*Sólido*	*Resina epóxi tenacificada bi-reagente contendo particulado de vidro (Hysol® EA 9309.3NA)*	*1,13*
Resina	*Sólido*	*Adesivo bicomponente à base de resina epóxi e cura rápida (Araldite Hobby® 10 min.)*	*1,15*

3.3 Preparação das Amostras

Na confecção das amostras avaliadas neste estudo, partiu-se de painéis-sanduíche íntegros que não exibiam quaisquer defeitos que pudessem ser externamente identificado por meio de inspeção visual. Amostras com dimensões de 70 mm de comprimento, 45 mm de largura e 10 mm de altura (espessura integral dos painéis) foram empregadas neste trabalho.

Elas foram extraídas dos painéis originais íntegros por meio de corte com serra de fita. As relativamente pequenas dimensões planares das amostras ensaiadas não-destrutivamente foram ditadas pelo reduzido tamanho (i.e., comprimento e diâmetro interno) da bobina empregada no equipamento de RMN para a produção do campo eletro-magnético durante as inspeções.

Basicamente, seis (06) tipos de amostras foram preparados para a condução do projeto, sendo eles:

(i) Amostra para Testes Preliminares

A amostra utilizada na primeira tentativa de se obter uma imagem de RMN no Instituto de Física de São Carlos (IFSC) foi preparada com o auxílio de uma seringa graduada equipada com uma agulha hipodérmica de grosso calibre, por intermédio da qual se perfurou lateralmente o núcleo da amostra de modo a preenchê-lo com água (Figura 12). Cabe destacar que foram infrutíferas as tentativas de perfuração do laminado de revestimento do painel através da agulha, haja vista que o compósito reforçado com fibras é bastante resistente à penetração. Além disso, cada perfuração, se possível ou viável fosse, daria acesso a apenas uma das células hexagonais que compõem o núcleo da estrutura sanduíche, lembrando que as células no interior do painel são, idealmente, completamente estanques.

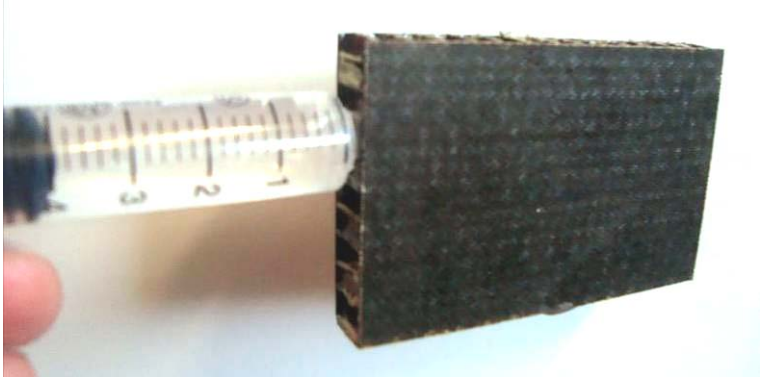


Figura 12 – Etapa de preparo da amostra de painel-sanduíche através da injeção de água com seringa e agulha, a qual é introduzida lateralmente no núcleo-colméia.

(ii) Amostra para Ensaio de Painel Contendo Água Inserida Controladamente

De modo a se obter um controle mais apurado da quantidade de água inserida no núcleo-colméia, bem como em cada célula individual do mesmo, além de uma distribuição mais adequada do líquido no interior da amostra de painel-sanduíche estrutural aeronáutico, optou-se por se descolar cuidadosamente o laminado superior de revestimento rígido do painel (utilizando-se de um estilete), e, também se utilizando da seringa e agulha anteriormente citadas, e injetar-se diretamente a água (Figura 13), respeitando-se um padrão pré-estabelecido de quantidade e distribuição da mesma em boa parte das células do núcleo. Subseqüentemente, o laminado de revestimento foi colado à face descoberta do núcleo, tomando-se todas as precauções para se assegurar um ajuste perfeito entre as partes, empregando-se nesta operação uma quantidade suficiente de resina polimérica comercial (Araldite®) de cura rápida.

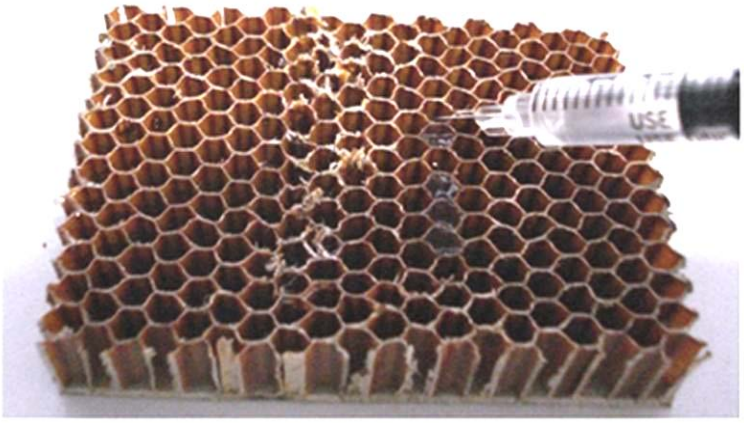
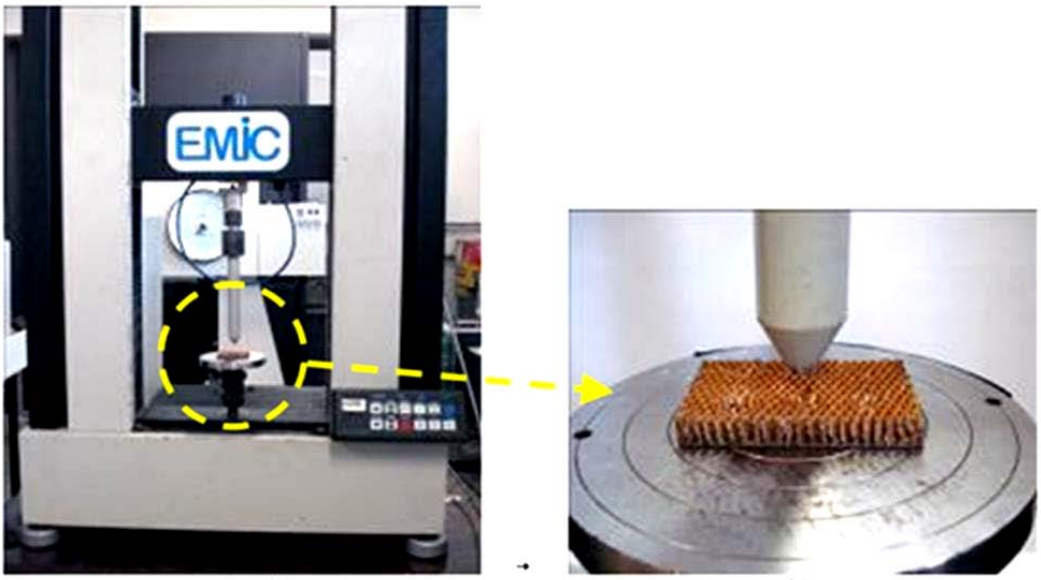


Figura 13 – Etapa de preparo da amostra de painel contendo água inserida célula a célula através da retirada de uma das faces laminadas e uso de uma seringa de pequeno volume.

(iii) Amostra para Ensaio de Painel com Núcleo Danificado

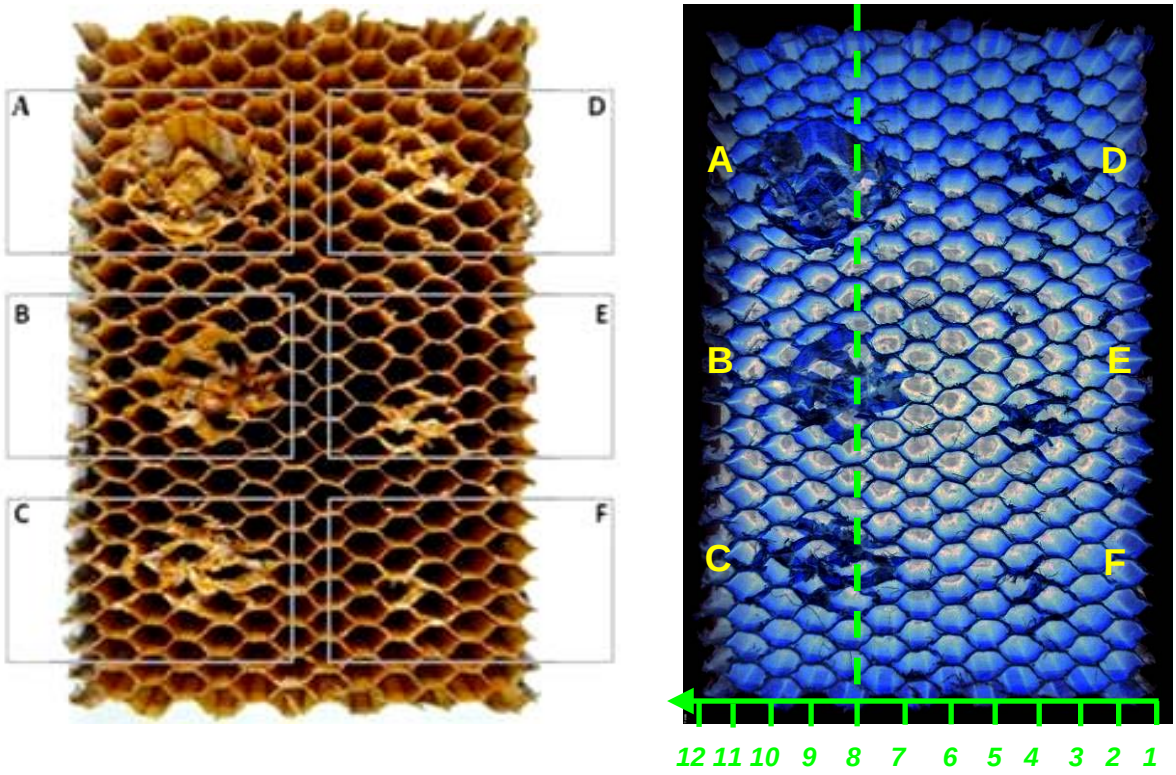
De maneira a se obter uma amostra de painel-sanduíche cujo núcleo contivesse danos do tipo amassamento (uma ocorrência contumaz na indústria de manufatura de painéis-sanduíche compósitos, com sérias implicações à integridade estrutural e resistência residual do componente), também se fez necessária a cuidadosa retirada de um dos revestimentos laminados de face. Após a extração, a amostra foi posicionada horizontalmente, com a face desprotegida voltada para cima, sobre a base plana de um equipamento de compressão da Emic® modelo DL 5000/10000 montado com uma célula de carga de 10 kN, na qual foi acoplado um eixo de ponta cônica. Por intermédio de controle de deslocamento do eixo, a ponta cônica foi pressionada diretamente contra o núcleo da amostra de painel-sanduíche, conforme ilustra o procedimento mostrado na Figura 14. O processo foi repetido em seis distintas posições do núcleo, aplicando-se em cada uma destas posições um determinado deslocamento vertical do eixo, de modo a se produzirem danos com diferentes profundidades e, conseqüentemente, com distintos diâmetros. Os danos causados pela endentação forçada do núcleo colméia são claramente revelados e

identificados na Figura 15, enquanto que o dimensional dos mesmos é fornecido na Tabela 05.



(a) (b)

Figura 14 – Sistema de ensaios de compressão adaptado para impingir danos de modo controlado ao núcleo-colméia de uma amostra de painel-sanduíche: (a) Vista geral; (b) Detalhe do penetrador com ponta cônica de aço.



(a) (b)

Figura 2 – (a) Amostra de núcleo-colméia contendo 6 tipos/tamanhos distintos de danos por amassamento (denominados A-F), os quais foram introduzidos propositadamente por compressão quase-estática; (b) Inversão de tonalidade da figura anterior para se visualizarem mais precisamente as endentações. A seta verde e os números referentes à sua graduação indicam as várias posições (num total de 12) em que se realizou o imageamento por RMN da seção transversal (rigorosamente falando, seção longitudinal caso se considerem as dimensões no plano da amostra[1]) do painel (cuja espessura é ~ 10 mm). Um dos cortes tomográficos realizados é indicado por linha verde tracejada.

---

[1] *Por motivo de simplificação, adotar-se-á neste trabalho unicamente a denominação "seção transversal", haja vista que somente uma das seções ortogonais das amostras foi tomograficamente avaliada.*

Tabela 05 – Caracterização dimensional dos danos tipo-amassamento gerados por endentação da amostra de núcleo-colméia

Dano	Profundidade [A] (mm)	Diâmetro máximo [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 da foto fornecida na Figura 15*

Após a inserção dos danos e a sua caracterização fotográfica, o laminado de revestimento que fora removido foi colado ao núcleo utilizando-se para isso resina epóxi comercialmente disponível (Araldite®), não sem antes adicionar água ao núcleo-colméia de forma a poder realizar-se o imageamento por RMN. Isso devido à necessária presença de prótons 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.

(iv) <u>Amostra para Ensaio de Painel Umidificado com Névoa</u>

Visando-se a inspeção de água tenuamente presente em painéis-sanduíche, uma amostra do material foi condicionada ambientalmente em um recipiente estanque de vidro no qual foi criada uma atmosfera super-saturada de vapor d´água (névoa) de forma a possibilitar o ingresso, a permeação ou difusão, e o acúmulo de

pequenas gotículas de água no interior do núcleo-colméia. Empregou-se, neste caso, uma amostra sem a presença de quaisquer tipos de danos detectáveis visualmente, a qual foi selada nas suas bordas livres com silicone convencional de uso industrial (Figura 16), de modo a que o ingresso de vapor, caso ocorresse, seria somente por difusão através das paredes dos painéis laminados sólidos compósitos de face.

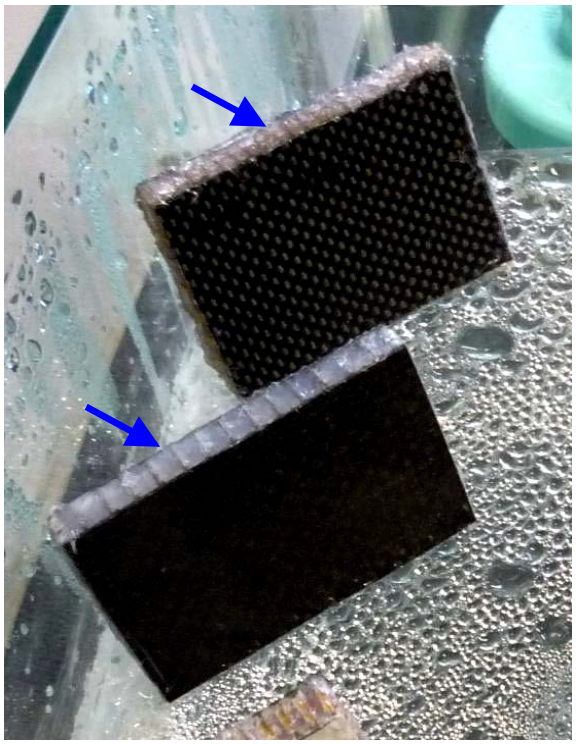


Figura 16 – Exemplo de amostras virgens de painéis-sanduíche seladas nas suas laterais com vedante à base de silicone (setas azuis).

A câmara empregada no condicionamento da amostra por impregnação de vapor d´água possuía dimensões aproximadas de 255x410x195 mm^3, contendo uma rampa, também de vidro, formando um plano com aproximadamente 6° de declive, com 268 mm de comprimento e 195 mm de largura (Figura 17), a qual atuava como suporte do espécime e ao mesmo tempo impedia o acúmulo indesejável de água na base das amostras.

A geração de vapor foi obtida por intermédio de um nebulizador comercialmente disponível, o qual na voltagem de 220 V era capaz de rapidamente elevar a temperatura do recipiente para cerca de 90ºC. De modo a vedar o sistema, impedindo a perda de vapor para o ambiente e otimizando o aproveitamento da água reciclada, empregou-se filme flexível de PVC, o qual cumpriu perfeitamente a função a ele destinada.

Tipicamente, o tempo total em que a amostra permaneceu sob tais condições foi de 48 dias, com o sistema de névoa permanecendo 36 h ligado e 12 h desligado, em ciclos sucessivos. O ganho de massa do espécime nessas condições foi de 5,94%.

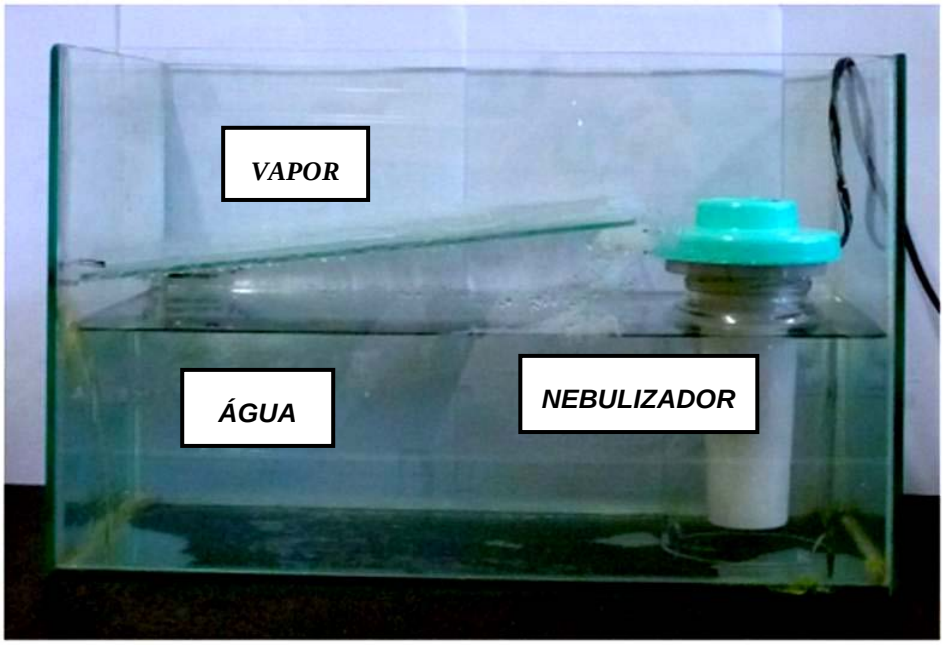


Figura 3 – Foto do recipiente especialmente construído para os ensaios de impregnação do espécime de painel-sanduíche com névoa. Note a presença do nebulizador elétrico à direita da câmara.

(v) Amostras para Ensaios de Painéis Contendo Líquidos Distintos

Objetivando-se verificar a habilidade da técnica de imageamento por RMN na potencial distinção de diferentes líquidos potencialmente contaminantes em ambientes aeronáuticos, fez-se necessário novamente arrancar uma das faces de revestimento rígido de amostras de painel-sanduíche, de forma a tornar irrestrito o acesso ao seu interior e melhor controlar o processo de inserção dos diversos materiais no estado líquido. Utilizando-se mais uma vez de uma pequena seringa de precisão, foram injetados, respectivamente, água, fluido hidráulico, querosene, degelante e resina em três (3) amostras, denominadas respectivamente A1, A2 e A3, sendo elas:

- Amostra A1, contendo água, fluido hidráulico e querosene (Figura 18);
- Amostra A2, preparada com água e resina termorrígida Araldite® no estado curado (reticulado) (Figura 19);
- Amostra A3, preenchida com água, agente degelante e resina termofixa (Figura 20).

Tipicamente, 3 ml de cada tipo de líquido (ou aproximadamente isso, no caso da resina inserida na forma pastosa para posterior cura ou solidificação) foram adicionados separadamente e ordenadamente nos núcleos-colméia, formando regiões geograficamente bem distintas, preenchendo-se total ou parcialmente várias células unitárias destes.

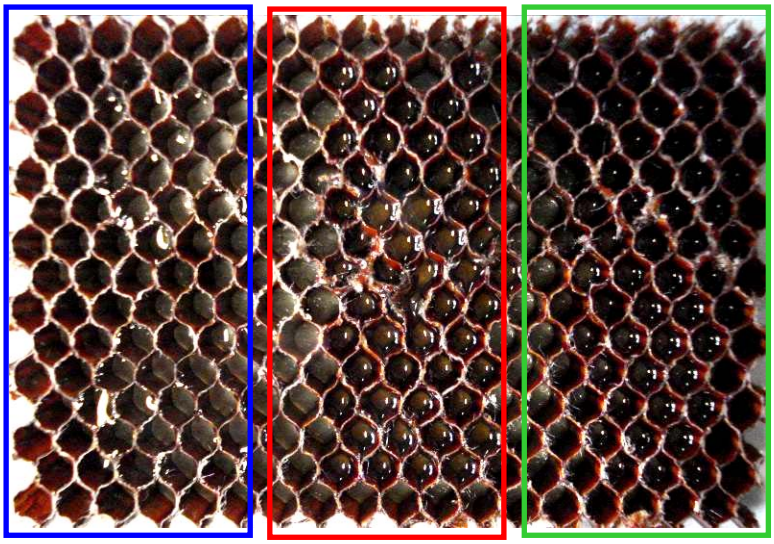


Figura 18 – Amostra A1 de painel-sanduíche contendo água (retângulo azul), fluido hidráulico (vermelho) e querosene (verde).

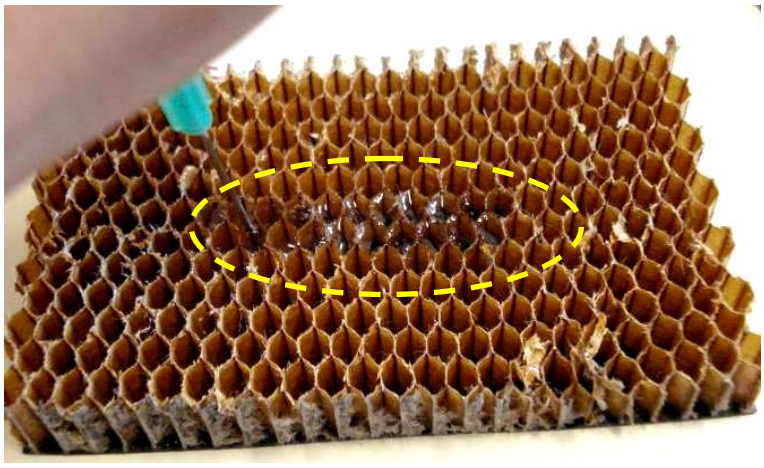
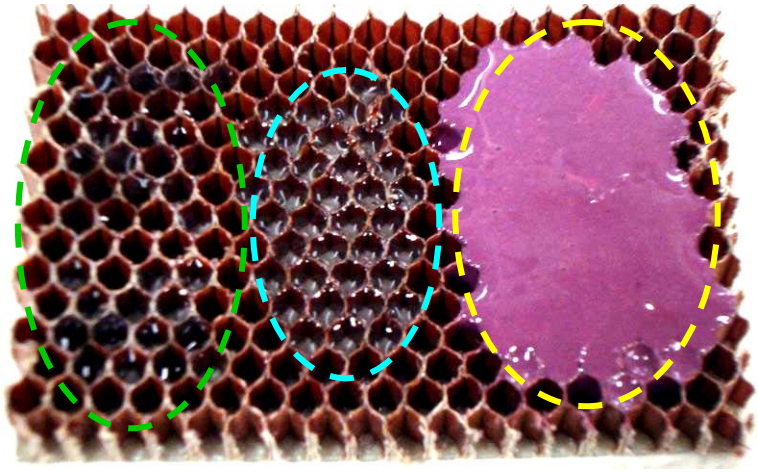
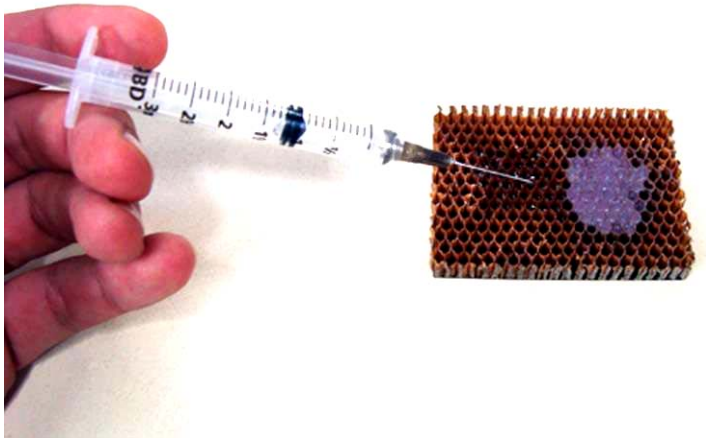


Figura 19 – Amostra de painel-sanduíche contendo água adicionada com seringa hipodérmica, em estágio anterior à introdução de resina termorrígida Araldite® (similar a A2).



(a)



(b)

Figura 20 – (a) Amostra A3 de painel-sanduíche contendo água (elipse tracejada verde), degelante (azul) e resina termorrígida Hysol® (amarela); (b) Métodologia de preparo da amostra.

Executadas as modificações nas amostras, os respectivos laminados de revestimento foram remontados e colados ao núcleo, utilizando-se novamente resina epóxi comercialmente disponível (Araldite®).

(vi) Amostras para Ensaio de Detecção de Resina Sólida em Excesso (Pura ou Carregada com Agentes Contrastantes em Pó)

Com o intuito de determinar a viabilidade do uso do IRMN na localização de reparos em painéis-sanduíche aeronáuticos, ocasião em que inevitavelmente há excesso de resina sólida no componente, situação esta que pode também resultar de falhas no processo de manufatura destes componentes (vide Capítulo 2), foram preparadas amostras do tipo provetas plásticas de volume 0,6 ml contendo, respectivamente, resina Hysol® de reparo aeronáutico e água (Figura 21), já que a deposição de quantidades controladas do polímero em amostras de núcleos de painel-sanduíche traria grandes dificuldades operacionais dada a viscosidade relativamente elevada do mesmo.

Apenas lembrado que no caso anteriormente descrito, resina sólida pura já havia sido introduzida no núcleo das amostras denominadas, respectivamente, A2 e A3.

(a) (b)

Figura 21 – Provetas utilizadas como amostras contendo água (4 superiores) e resina (4 inferiores): (a) Vista lateral; (b) No suporte para posicionamento na bobina do equipamento de RMN.

A resina utilizada foi, também neste caso, a Hysol® EA 9309.3NA (na proporção de 5 g da parte A para 1 g da parte B), a qual é amplamente empregada no reparo de estruturas compósitas aeronáuticas, especialmente em pás de hélices de helicópteros.

De modo a se intensificar o efeito de RMN e verificar a facilitação, ou não, do reconhecimento de misturas sólidas pelo equipamento, um novo conjunto de amostras do tipo-proveta foi preparado, desta feita contendo, além de resina pura, resina carregada com gadolíneo (Gd) ou óxido de ferro (Fe_2O_3) em diversas proporções mássicas. O Gd é um elemento lantanídeo, que é paramagnético em seu estado trivalente, e seu uso em imageamento por RMN se deve essencialmente ao seu efeito de forte redução nos tempos de relaxação T_1 em suas vizinhanças, alterando a intensidade de sinal nestes locais (http://www.mr-tip.com/serv1.php?type=db1&dbs=Gadolinium). Já a magnetita (mistura de óxido e trióxido ferricos) é um composto super-para-magnético, que causa um substancial encurtamento no tempo de relaxação T_2, levando a perda de sinal na região em que está presente na mistura (http://www.mr-tip.com/serv1.php?type=db1&dbs=Superparamagnetic%20Iron%20Oxide).

Feitos os cálculos necessários para se determinarem as porcentagem em massa das misturas resina + Gd e resina + Fe_2O_3, utilizou-se uma balança da marca Mettler® modelo H54AR/H542 com precisão de 0,01 mg para as respectivas pesagens dos elementos e compostos. O preparo das misturas foi feito manualmente utilizando-se um sistema do tipo pilão cerâmico.

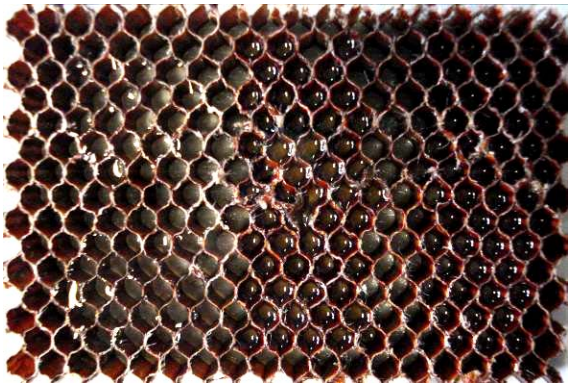
As composições em termos de percentual mássico destas novas amostras são listadas na Tabela 06.

Tabela 06 – Composição das amostras de resina inseridas nas provetas similares às mostradas na Figura 21.

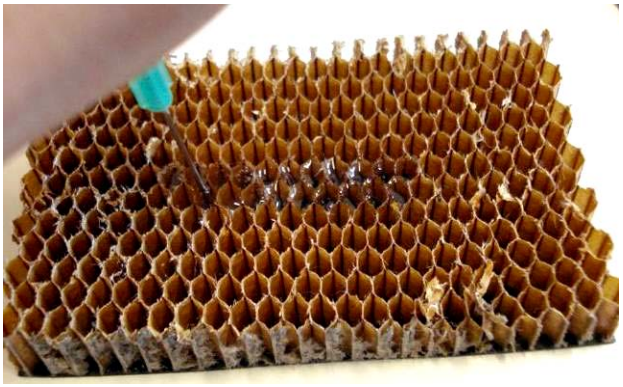
Amostra	Elemento ou composto	Concentração em massa do elemento intensificador de sinais RMN (%)
A	-	*0*
B	*Gd*	*1%*
C	*Gd*	*5%*
D	*Gd*	*10%*
E	*Gd*	*20%*
F	*Gd*	*40%*
G	Fe_2O_3	*1%*
H	Fe_2O_3	*5%*
I	Fe_2O_3	*10%*
J	Fe_2O_3	*20%*

(vii) Amostra para Quantificação do Conteúdo de Líquido nas Células-Colméia

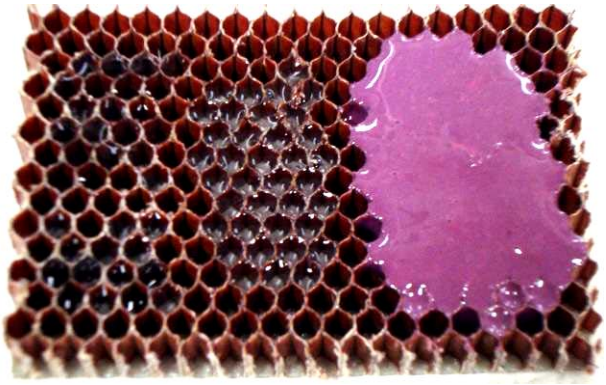
De modo a verificar a possibilidade de se estimar com bom grau de precisão o conteúdo de líquidos no interior de células de núcleos-colméia de painéis-sanduíche estruturais aeronáuticos, as amostras anteriormente denominadas A1, A2 e A3 (Figura 22) foram respectivamente submetidas a procedimentos específicos de tomadas de imagens RMN em planos transversais, ou ortogonais ao do laminado de face dos painéis.



(a)



(b)



(c)

Figura 22 – (a) Amostra A1 de painel-sanduíche contendo água, fluido hidráulico e querosene; (b) Amostra de painel-sanduíche contendo água adicionada com seringa hipodérmica, em estágio anterior à introdução de resina termorrígida Araldite® (similar a A2); (c) Amostra A3 de painel-sanduíche contendo degelante, água e resina termorrígida Hysol®.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

4.1 Equipamento de Ressonância Magnética Nuclear

Foi empregado neste estudo um equipamento de RMN concebido, projetado e construído no Centro de Imagens e Espectroscopia *in vivo* por Ressonância Magnética do Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo (IFSC-USP). Trata-se de um sistema baseado em um magneto supercondutor horizontal de 2.0 Tesla da Oxford Instruments®, modelo 65310HR, 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), e capaz de produzir gradientes de campo magnético de aproximadamente 30 Gauss/cm com tempo de estabelecimento de 160 microssegundos (Figura 23). Este sistema opera com uma eletrônica Bruker Biospin®, console Paravision® V e bobinas RF desenhadas localmente para aplicações em experimentos com pequenos primatas. Um exemplo de bobina empregada no presente estudo é ilustrado na Figura 24.

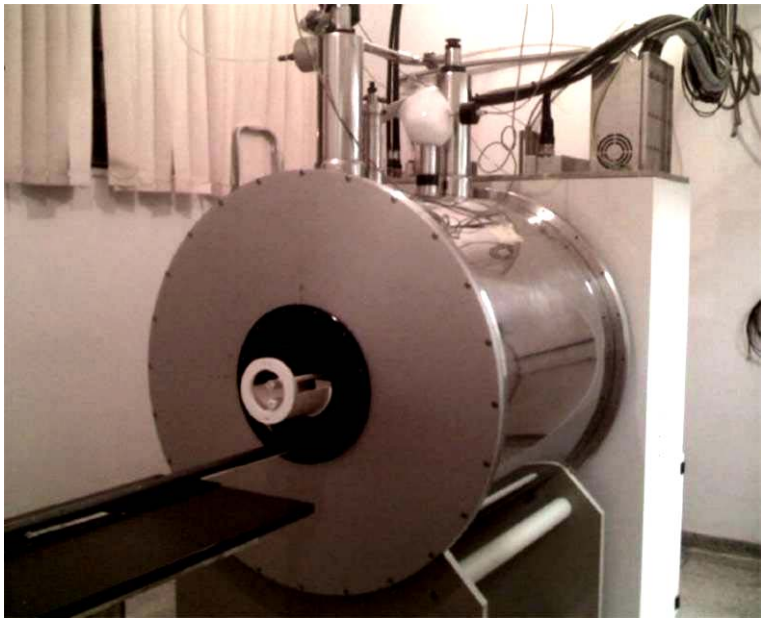
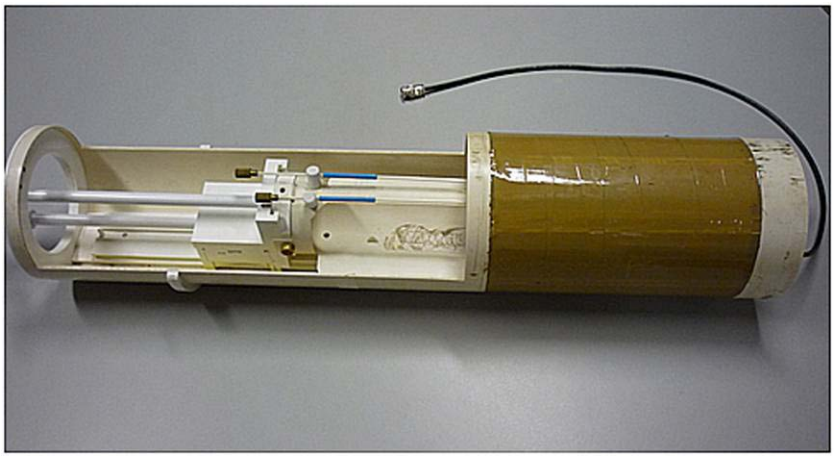
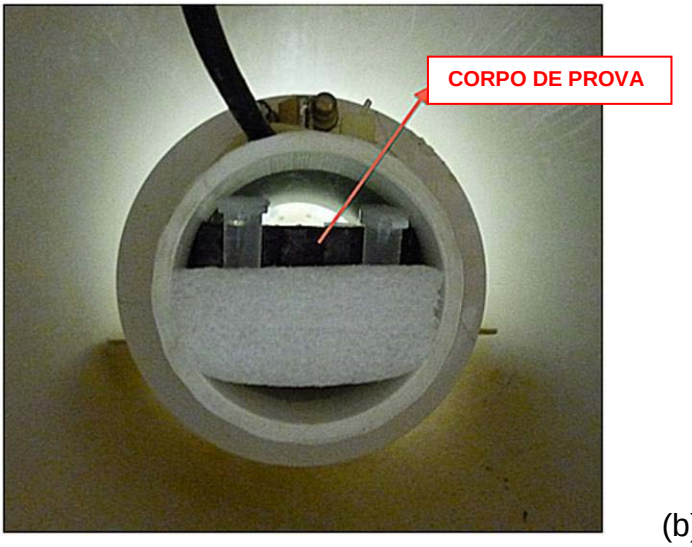


Figura 23 – Fotografia do magneto supercondutor horizontal com campo 2T da Oxford Instruments® utilizado para a realização das imagens no IFSC-USP.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Bobina empregada para a obtenção das imagens RMN; (b) Detalhe de um espécime de painel-sanduíche compósito alocado no interior da bobina.

4.2 Protocolo Utilizado para Obtenção de Imagens por RMN

Buscou-se desenvolver um protocolo de geração de imagem de alta definição que possibilitasse a inspeção das amostras compósitas contaminadas e permitisse a detecção e quantificação de líquidos aprisionados nas células internas das amostras de painéis-sanduíche. Adotou-se, portanto, a seqüência denominada *RARE - Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement*, conhecida também por seqüência Turbo Spin Eco (TSE).

A Figura 25 mostra como foi realizado o processo de varredura das amostras de painel-sanduíche para a obtenção de imagens planares segundo duas seções de corte ortogonais entre si, onde se destacam planos denominados paralelos (azul) e transversais (vermelho) ao da face principal (correspondente às faces de revestimento com laminados sólidos) do painel.

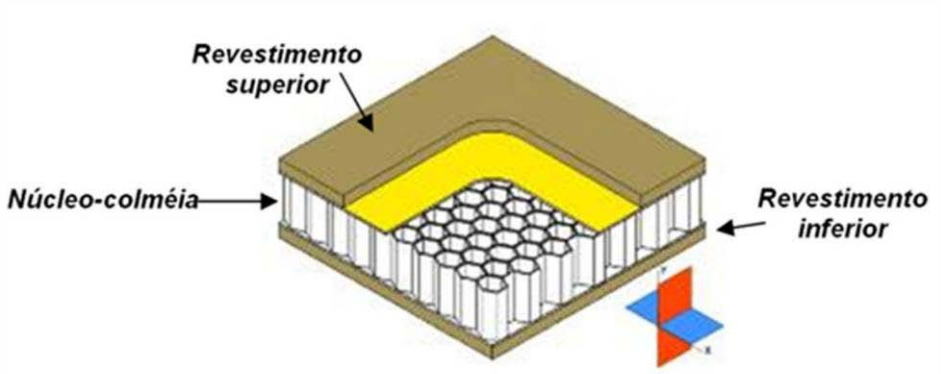
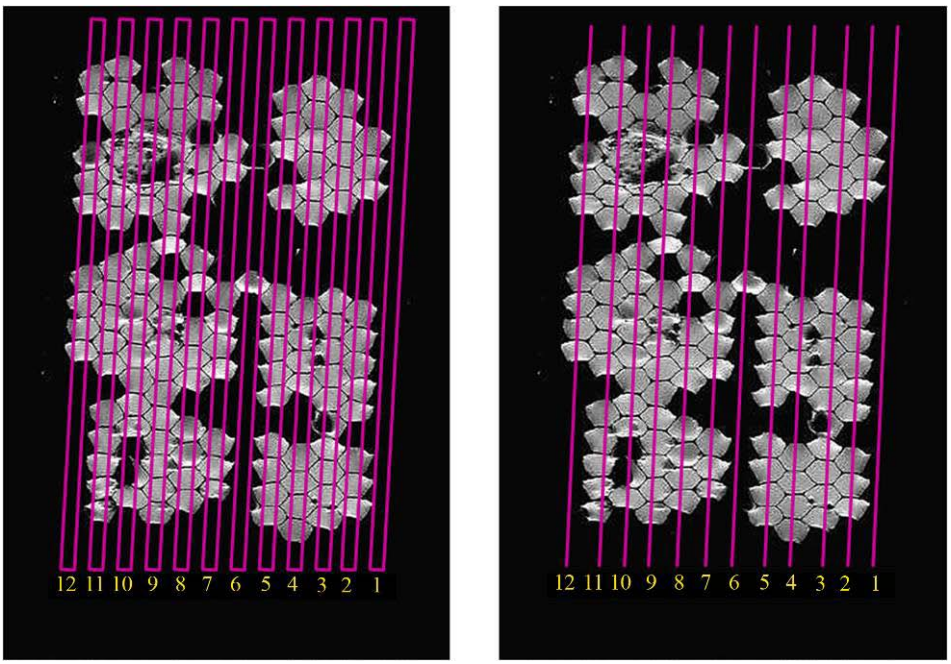


Figura 25 – Esquemático dos planos normais (em azul) e transversais (em vermelho) de inspeção por RMN das amostra de painel-sanduíche contaminadas internamente com líquidos, sólido ou danificadas.

Tipicamente, os *slices* (fatias) de inspeção ou varredura em planos normais e transversais possuíam aproximadamente 2 mm de espessura.

A Figura 26 mostra um exemplo de como foram distribuídas as projeção de 12 planos transversais (destacado na cor magenta e devidamente numerados) selecionados para a inspeção tomográfica por RMN de uma das amostras do

presente estudo (aquela à qual diversos danos foram impingidos por endentação mecânica), e tais como observados a partir da face frontal do espécime de painel-sanduíche. Este esquema já foi mostrado anteriormente na Figura 15, porém sobre a foto do núcleo-colméia seco. Note que a espessura de cada *slice* (fatia) de imageamento da amostra possibilita a análise de uma célula individualizada do núcleo-colméia, já que este possui um “diâmetro equivalente” maior que 2 mm.



(a) (b)

Figura 26 – Circuitos típicos de varredura para imageamento tomográfico segundo planos transversais (os quais correspondem àquele colorido em vermelho na Figura 25) aplicado a uma das amostras de painel-sanduíche inspecionadas por RMN no presente estudo (no caso, a amostra danificada internamente por endentação intencional e controlada): (a) *Slice* mais espesso; (b) Mais delgado.

Inicialmente o espécime foi posicionado em uma porta-amostra, uma espécie de bobina (antena), e em seguida o conjunto foi inserido no magneto, conectando-se a bobina ao sistema que realizou a aquisição e o processamento de todos os sinais. A fase subseqüente foi o ajuste da freqüência de operação do equipamento; após

este ajuste executou-se primeiramente uma série denominada *TRIPILOT*, cuja imagem resultante serve como parâmetro de posicionamento da amostra para, posteriormente, rodar-se o protocolo denominado *RARE*. Todas estas séries já estavam predefinidas no programa ParaVision version 5.0 pertencente ao Laboratório de imagem do CIERMag do IFSC-USP de São Carlos.

O tempo de aquisição de uma única imagem de RMN de área (FOV – *field of view*) de 8 x 8 cm^2 e espessura de 7 mm, sem considerar aquele gasto nos ajustes preliminares de freqüência, foi de aproximadamente 21 minutos. O tempo de um experimento completo é basicamente uma função do tempo de repetição, do número de codificações de fase, do número de excitações realizadas, além obviamente daquele despendido no posicionamento da amostra no interior da bobina, a sua conexão ao magneto, a sintonização em uma determinada freqüência de excitação eletromagnética. Por exemplo, tomando como base uma seqüência de 1 imagem tomográfica de área FOV de 8 x 8 cm^2, e espessura de *slice* de 7 mm, o tempo global de processo foi de 30 minutos em média, utilizando-se a seqüência *RARE*, e adotando-se 4 médias e uma matriz com 512 x 512 pixels.

O posicionamento de uma amostra do tipo painel-sanduíche com núcleo-colméia é um aspecto muito importante do procedimento, e o ideal é deixá-la com a sua face laminada numa posição perfeitamente horizontal, e situada no centro no magneto onde o campo magnético é mais homogêneo. Isso minimiza efeitos negativos, proporcionando uma imagem com boa definição das paredes do núcleo interno, já que estas são bem finas e em grande densidade areal, e qualquer desvio da posição horizontal do painel pode gerar imagens embaçadas devido à projeção (sombra) das paredes em planos paralelos ao do laminado sólido de face.

Uma das limitações atuais do equipamento de RMN empregado é quanto ao tamanho máximo possível da amostra inspecionada, além da massividade e da pequena mobilidade e flexibilidade de operação do equipamento, sem mencionar obviamente seu elevado preço. Esta é a razão pela qual seria muito importante o desenvolvimento de sistemas portáteis e robustos de varredura, em especial para operarem em ambientes industriais e/ou em campo, particularmente das engenharias da mobilidade aeronáutica e de energia eólica.

4.3 Protocolo Utilizado para Processamento de Imagens por RMN

Conforme adiantado, o *TRIPILOT* é uma seqüência de aquisição rápida de imagens que possibilita a sua obtenção nas seguintes orientações, axial, coronal e sagital (Figura 27), na posição isocentral do magneto. Esta seqüência tem a função básica de facilitar o posicionamento correto da amostra sendo inspecionada, assim como o estabelecimento do padrão mais adequado de varredura da região sob inspeção.

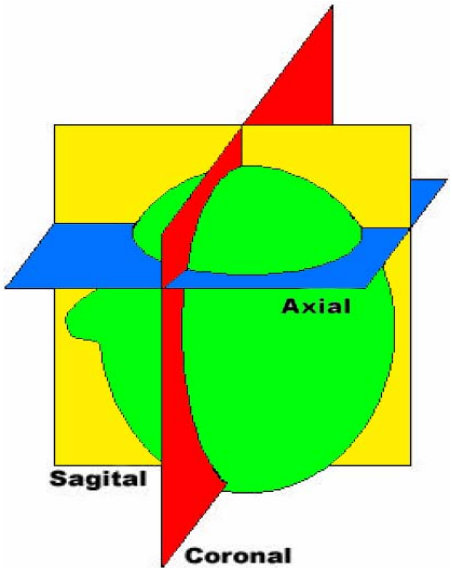


Figura 27 – Três planos ortogonais de corte tomográfico, e suas respectivas nomenclaturas derivadas da medicina.

O *RARE* – do inglês *Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement*, que se popularizou como Turbo Spin Eco (TSE) ponderada em T_2, é uma seqüência que utiliza múltiplos pulsos de radiofreqüência de 180º, combinando múltiplas codificações de fase dentro de um mesmo tempo de repetição. Basicamente, esta série é uma seqüência acelerada que permite controlar o número de *slices*, a posição destas fatias tomográficas, e sua respectiva espessura.

4.4 Procedimento para a Quantificação do Conteúdo das Células

A técnica de RMN permite a aquisição de varias formas de imagens. Com o objetivo de quantificar os líquidos presentes nas amostras de painéis-sanduíche, foram obtidas imagens de planos, respectivamente, perpendiculares e paralelos às superfícies principais dos espécimes, quais sejam, às das faces laminadas planas confeccionadas em resina polimérica reforçada com fibras contínuas. Foram assim inspecionadas as Amostras A1, A2 e A3.

As imagens digitais originais de RMN já fornecem uma escala calibrada e confiável, a qual serviu para a posterior calibração do sistema computadorizado de análise de imagens digitais empregado no estudo. No presente estudo, utilizou-se um programa computacional livremente disponível na Internet, o Image-Pro Plus®, que possibilita a visualização e o processamento das imagens adquiridas nos ensaios de RMN, além da criação de um sistema multi-direcional e calibrado de escalas, cuja base é a calibração linear das imagens digitais originais. A avaliação inicial foi realizada nas imagens fatiadas (tomográficas) segundo o padrão transversal relativamente à face do laminado de revestimento das amostras de painel sanduíche. Mediu-se a altura das colunas d´água (até o ponto de mínimo do respectivo menisco) contidas nas diversas células analisadas. Essa medida foi feita individualmente célula por célula que exibiam água na imagem avaliada. Houve de se garantir no procedimento que uma determinada célula contendo água fosse inspecionada uma única vez, de modo a não incorrer na supervalorização do conteúdo de líquido na respectiva amostra com núcleo-colméia. Admitiu-se também que a água preenchia toda célula até a posição do menisco, ou seja, desconsiderou-se qualquer possibilidade da presença de bolhas de ar e vazios nas colunas d´água. Empregando-se ferramentas apropriadas do Image-Pro Plus® determinou-se uma média representativa para a variável área da seção hexagonal das células de Nomex®, e, finalmente, realizou-se, célula a célula, o produto da altura da respectiva coluna d´água pela área média do hexágono (este último valor sendo assumido como uma constante das amostras do painel-sanduíche). A somatória dos valores individuais de volume de água (ou outro líquido) célular culminou no volume total de um determinado líquido em uma dada amostra inspecionada.

A Figura 28 mostra a distribuição dos planos (*slices*) transversais (os quais são destacado em cor magenta) selecionados e cotados pelo sistema RMN na face frontal de espécimes de painel-sanduíche (Amostras A1 e A3, respectivamente), de modo a que as células dos núcleos, e todo o seu conteúdo, fossem integralmente submetidas à excitação eletromagnética pelo equipamento.

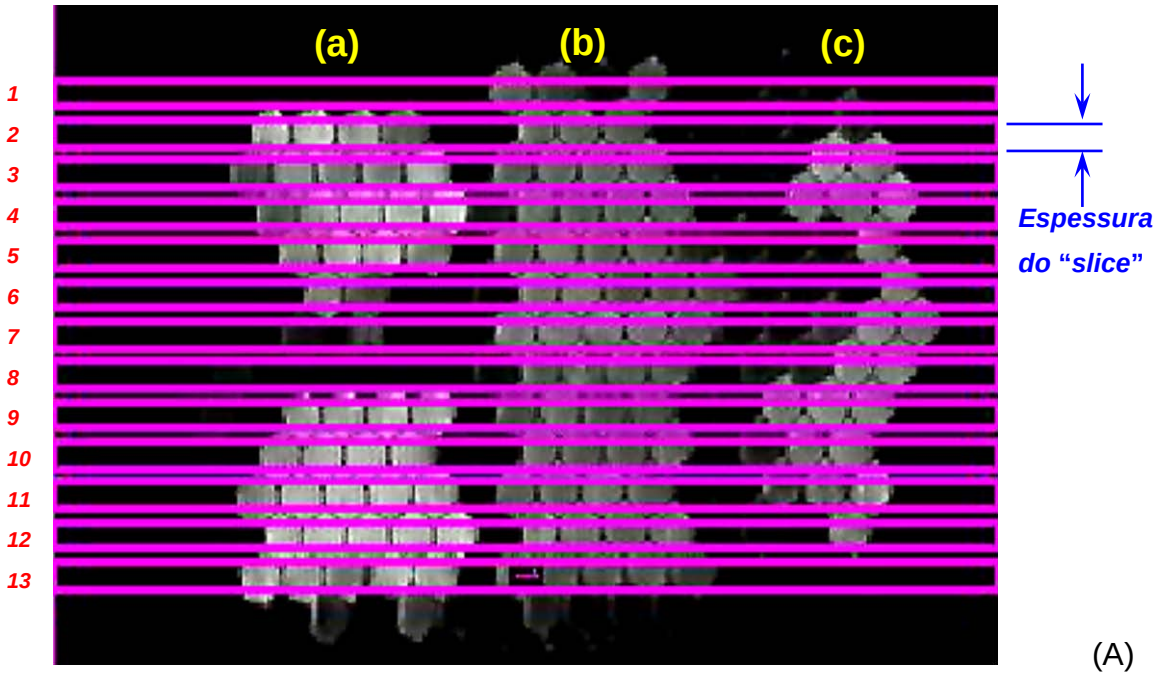
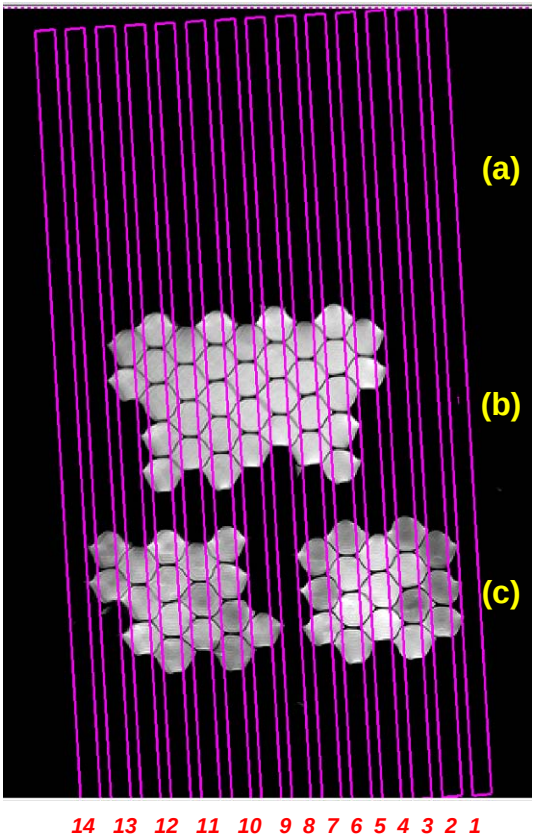


Figura 28 – (A) Circuito de varredura, e de conseqüente excitação eletromagnética, projetado na face frontal da Amostra A1 que continha, respectivamente, água (a), fluido hidráulico (b), e querosene (c); (B) Da amostra A3, que continha, respectivamente, resina sólida (a), degelante (b), e água (c). *(continua na próxima página)*

Continuação



(B)

Figura 28 – (A) Circuito de varredura, e de conseqüente excitação eletromagnética, projetado na face frontal da Amostra A1 que continha, respectivamente, água (a), fluido hidráulico (b), e querosene (c); (B) Da amostra A3, que continha, respectivamente, resina sólida (a), degelante (b), e água (c).

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes Preliminares de IRMN

A primeira imagem obtida no presente trabalho de inspeção não-destrutiva via imageamento por RMN de uma amostra de painel-sanduíche contaminada interna e propositadamente com líquido é ilustrada na Figura 29.

Conforme adiantado, não houve na ocasião do preparo da amostra um controle rígido da quantidade e do posicionamento de deposição da água no núcleo-colméia.

Entretanto, as regiões contendo líquido são claramente identificáveis, em especial no caso das células mais cheias (Figuras 29a,b), possibilitando inclusive a verificação do formato hexagonal das unidades celulares.

Note que as imagens correspondem a cortes tomográficos em planos normais à amostra (plano colorido em azul na Figura 25), porém em distintas posições ao longo de sua espessura, a partir da face inferior (29a), em direção à face superior (29d), conforme cotado na chamada da figura. Pode-se concluir das imagens que as células contêm diferentes percentuais de preenchimento com água, e que, como haveria de se esperar, a quantidade de água nos núcleos-colméia decresce, como um todo, na seqüência das fotos. Pode-se também inferir a existência de alguns bolsões de ar aprisionado durante a operação de inserção do líquido no núcleo-colméia. Isto é confirmado, por exemplo, quando a imagem de água em uma célula não aparece numa determinada cota de altura do núcleo-colméia, porém ressurge claramente numa imagem obtida em uma cota superior, tal como ocorre na célula indicada por seta amarela na Figura 29c.

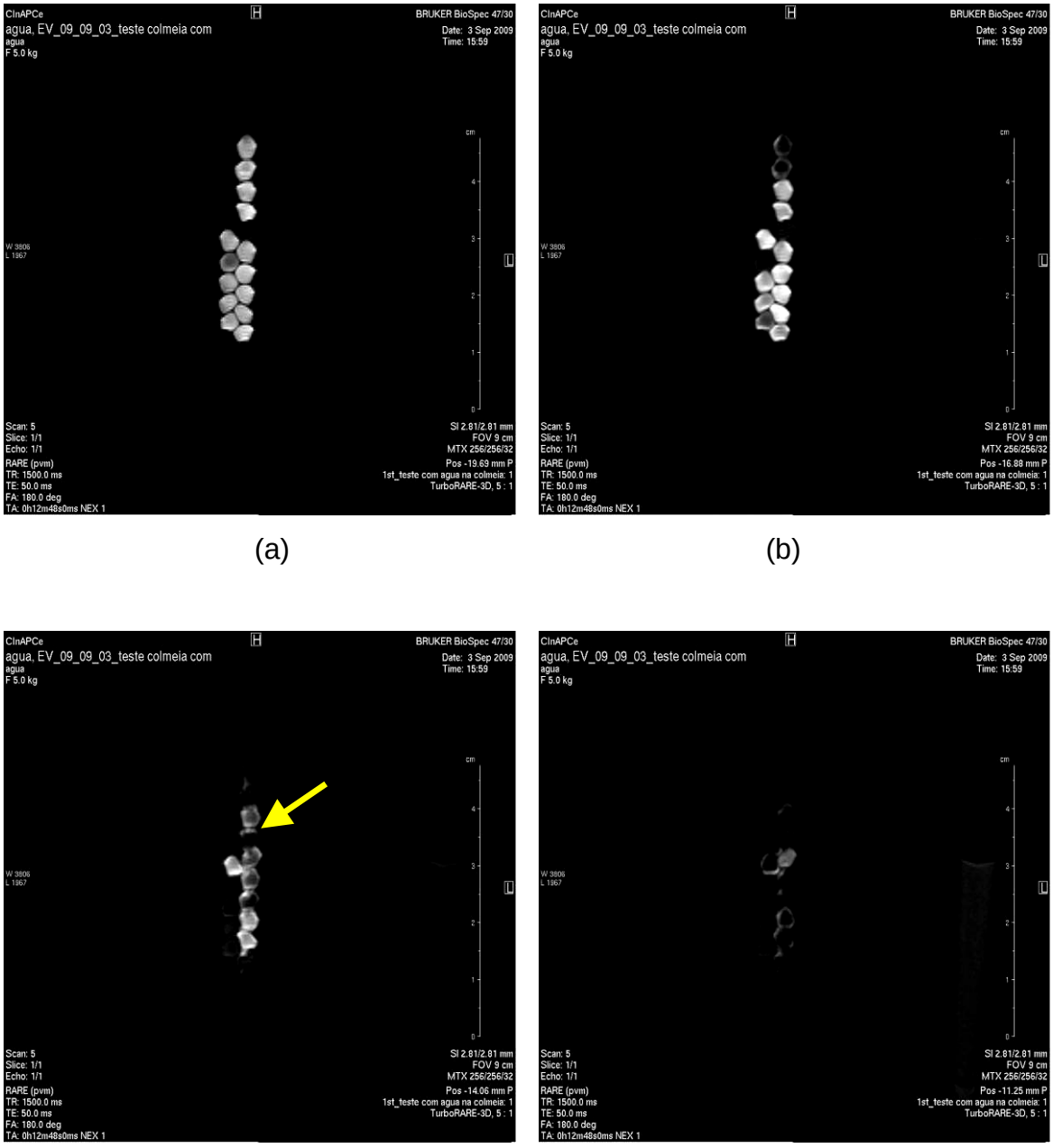


Figura 29 – Primeiras imagens resultantes da inspeção de amostras de painéis-sanduíche interna e propositadamente impregnadas com água, obtidas no IFSC-USP. Cotas de altura aproximada dos planos tomográficos imageados, a partir da face inferior da amostra avaliada (devido ao *slice* empregado ser relativamente espesso, adota-se como cota a posição ocupada pelo plano médio da fatia tomográfica): (a) 1,5 mm; (b) 3,5 mm; (c) 5,5 mm; (d) 7,5 mm.

Estes primeiros testes tiveram o objetivo também de auxiliar no estabelecimento de um protocolo otimizado de ensaios por RMN, que levasse em conta, ao mesmo tempo, uma resolução adequada de imagens para se detectarem, e quantificarem elementos no interior das células de núcleo-colméia, bem como o tempo total gasto na condução dos ensaios. Isto em virtude da relativamente pouca disponibilidade de tempo para operar-se o sistema RMN do IFSC-USP no período diurno, bem como do interesse no desenvolvimento de um procedimento rápido de inspeção não-destrutiva para uma eventual futura aplicação da técnica em ambiente de produção e manutenção de componentes e estruturas do tipo painéis-sanduíche compósitos.

Visto que o sinal de RMN está diretamente vinculado à quantidade de átomos disponíveis de hidrogênio (presente fartamente nas moléculas de água de de hidrocarbonetos), há de se concluir pela existência de uma quantidade, ou volume mínimo de água aprisionada em células de núcleo-colméia de painel-sanduíche estrutural para que seja efetivada a sua detecção pela técnica de Ressonância Magnética Nuclear.

Em princípio, poder-se-ia imaginar que este valor mínimo estaria correlacionado à cada célula individual, e não à massa total presente da amostra, e que a existência de uma única célula totalmente (ou até mesmo parcialmente) preenchida seria uma condição suficiente para sua clara e completa indicação, ou detecção por imageamento RMN. De fato, isso não correspondeu à realidade, conforme foi claramente observado em experimentos realizados com amostras contendo apenas uma, ou duas células completamente repletas de água, ocasiões em que nada foi detectado no interior das mesmas. Desta forma, confirmou-se a premissa acima estabelecida, qual seja, da existência de uma quantidade mínima de água (bem como de outras substâncias líquidas ricas em hidrogênio, tal como os hidrocarbonetos avaliados) de modo a que seja possível a obtenção de imagens que garantam inequivocamente a presença deles no interior das células dos núcleos-colméia. No caso em questão, este volume limite mínimo foi estimado em cerca de 3 núcleos, vizinhos, praticamente preenchidos. Estes resultados estão em linha com aqueles determinados por MARBLE et al (2009).

5.2 Ensaio de Painel Contendo Água Inserida Controladamente

Neste experimento, a amostra avaliada foi preparada com maior rigor no sentido da inserção de água em células vizinhas umas das outras, porém com níveis de preenchimento levemente distintos das mesmas com o líquido, de modo a verificar o efeito desta variável (altura da coluna de líquido) no imageamento por RMN. A Figura 30 apresenta a imagem obtida nesta etapa do trabalho.

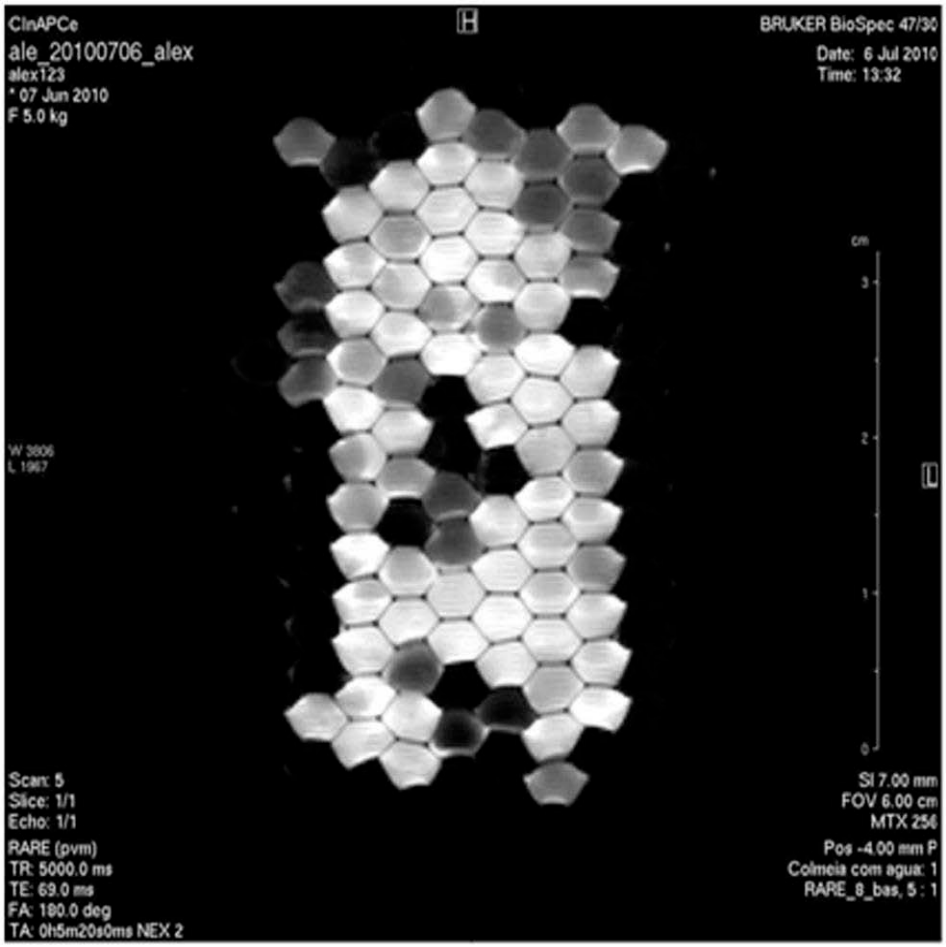


Figura 30 – Resultado da inspeção não-destrutiva por RMN da amostra de painel-sanduíche em que as células individuais possuem níveis de preenchimento com água levemente distintos entre si.

É possível observar a presença de água intencionalmente inserida nos núcleos, assim com uma muito boa definição dos limites de cada célula (paredes de Nomex® com geometria hexagonal), além de uma clara diferenciação nas tonalidades da escala de cinza (em que a cor branca indica preenchimento máximo - não necessariamente total, e a preta aponta para um preenchimento mínimo – não necessariamente nulo, da respectiva célula com água).

Uma resposta cabal relativamente à relação direta entre a tonalidade de cinza e o grau, ou o nível de preenchimento de determinada célula do núcleo-colméia pela água poderia talvez ser obtida por intermédio de *slices* (fatias ou cortes tomográficos) nos planos, respectivamente, paralelos ou transversais às faces principais da amostra de painel-sanduíche (vide Figura 25). Naturalmente, a árdua tarefa seria facilitada em alguma extensão pela adoção e análise de cortes transversais, preferencial aos *slices* paralelos, visto que, no último caso, seriam necessárias fatias tomográficas mais finas e em maior número que no primeiro caso de modo a se obter um mapeamento completo da distribuição da água nas diversas células que compõem o espécime. Tal estudo específico seria de grande interesse, porém teria utilidade apenas para a inspeção não-destrutiva subseqüente de um componente estrutural que fosse confeccionado exatamente com o painel-sanduíche do qual foi extraído a amostra avaliada (i.e., materiais e espessura).

Esta técnica poderia também ser empregada tentativamente na identificação da natureza do líquido, ou líquidos, aprisionados no interior das células do painel-sanduíche. Neste caso, o trabalho seria ainda mais complexo que o anteriormente vislumbrado, haja vista a existência de uma variável adicional à altura das colunas dos líquidos, sem mencionar os possíveis efeitos de interferência magnética ocorrendo entre os distintos líquidos proximamente localizados numa dada amostra, o que poderia causar, por si só, alterações significativas nas correlações entre tonalidades de cinza e altura de coluna de determinado líquido avaliado individualmente. Ainda, a dificuldade seria maior caso se considerassem todas as possíveis proporções, ou quantidades relativas, dos líquidos contidos na mesma amostra. Novamente, mesmo superando-se estas potenciais limitações, haveria ainda a limitação de os resultados obtidos serem úteis apenas e tão somente à

inspeção de determinado componente estrutural que fosse fabricado exatamente com aquele painel-sanduíche.

5.3 Ensaio de Painel com Núcleo Danificado

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

A Figura 31 mostra imagens obtidas em planos paralelos à face principal do painel-sanduíche que continha o núcleo intencionalmente e controladamente danificado por endentações. Foram inspecionados quatro diferentes planos paralelos ao longo da espessura da amostra, e os círculos tracejados em amarelo 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.

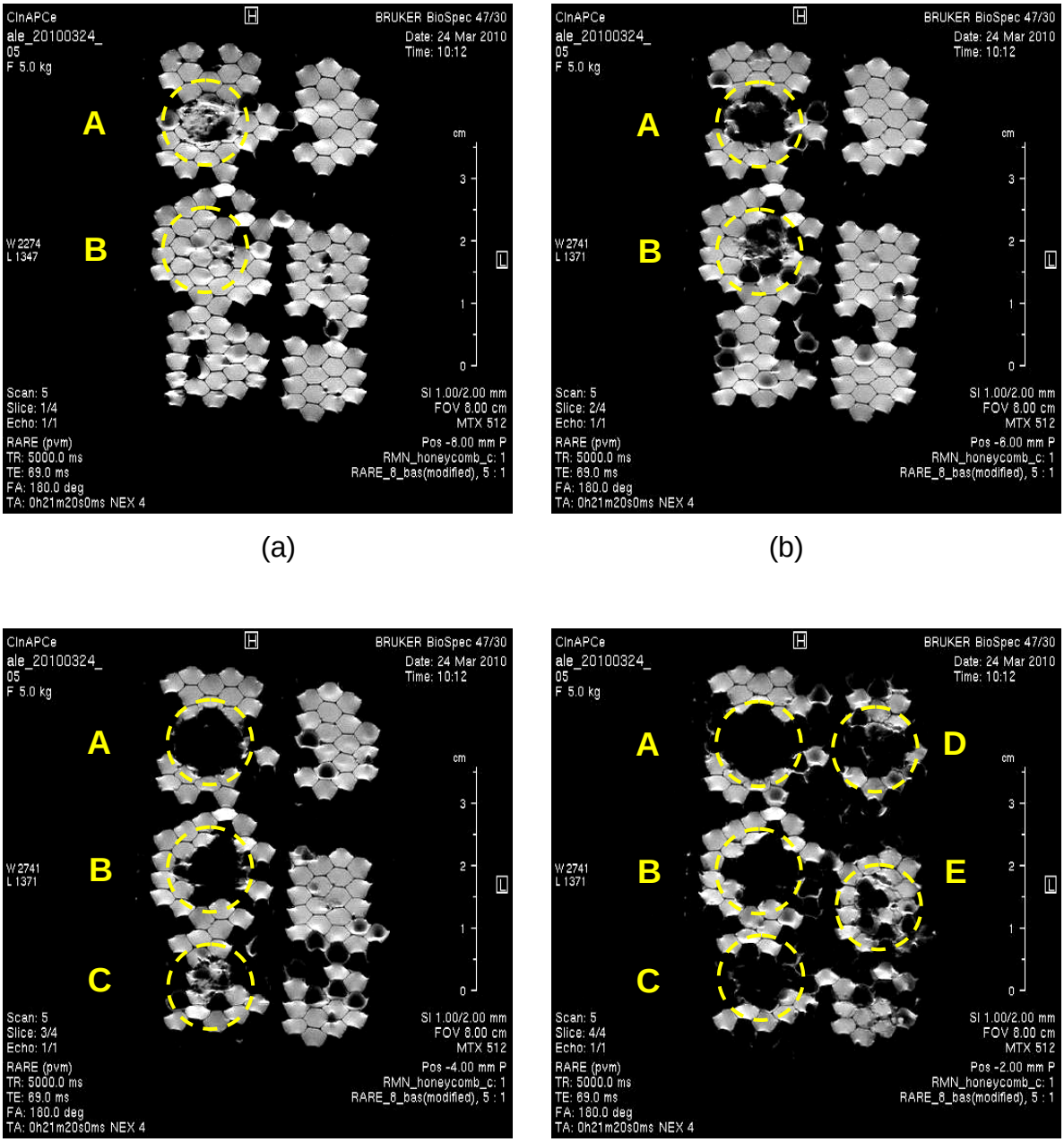
Por intermédio destas imagens, podem ser indicados inequivocamente os danos de maior monta (A-C), em que é nítida a destruição das paredes das células hexagonais que compõem o núcleo-colméia. Entretanto, há também sinais evidentes da presença dos danos menos extensos e profundos (D e E). Outro indicativo de anomalias no núcleo seria a distorção da geometria celular, originalmente perfeitamente hexagonal. Mudanças de tonalidade, brilho e de textura poderiam ser também adotados como critérios de grau de danificação, empregando-se para isso, idealmente, analisadores computadorizados de imagem com programas de reconhecimento automático de padrões de danos (os quais haveriam de ser desenvolvidos). 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, Fig.31a) revelam com mais propriedade os danos de maior monta, enquanto que os planos tomográficos mais elevados (Fig.31d) permitem, também, a identificação dos danos menos críticos (mais estreitos e proporcionalmente menos profundos).

Cabe destacar que a presença local de água é uma condição necessária para que o dano interno tipo-amassamento de núcleo seja revelado e caracterizado. Com

efeito, em algumas tomografias como as mostradas nas Figuras 31c,d), os danos A e B não apresentam os mesmos aspectos de quando visualizados nas Figuras 31a,b devido à migração de água para outras regiões no primeiro caso (em que a cota de altura do plano tomográfico de observação é mais elevada). Entretanto, a despeito desta menor quantidade de água no interior dos danos nas cotas mais elevadas (Figuras 31c,d), é ainda possível, em virtude da grande magnitude dos danos A e B impingidos por endentação, verificar os seus efeitos deletérios nas células circunvizinhas, destruindo-as ou deformando-as (mas ainda contendo alguma quantidade mínima necessária de água para o imageamento), permitindo inferir a existência dos referidos danos naquelas posições.

A Figura 32 mostra duas imagens em que, respectivamente, abordagens muito distintas de imageamento em planos normais foram empregadas. Na Figura 32a 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. Na obtenção da Figura 32b realizou-se uma única varredura segundo um plano paralelo à face do laminado de revestimento e localizado exatamente na meia espessura da amostra, empregando-se nesta tarefa um *slice* com 2 mm de espessura (*multiple-slice mode*).

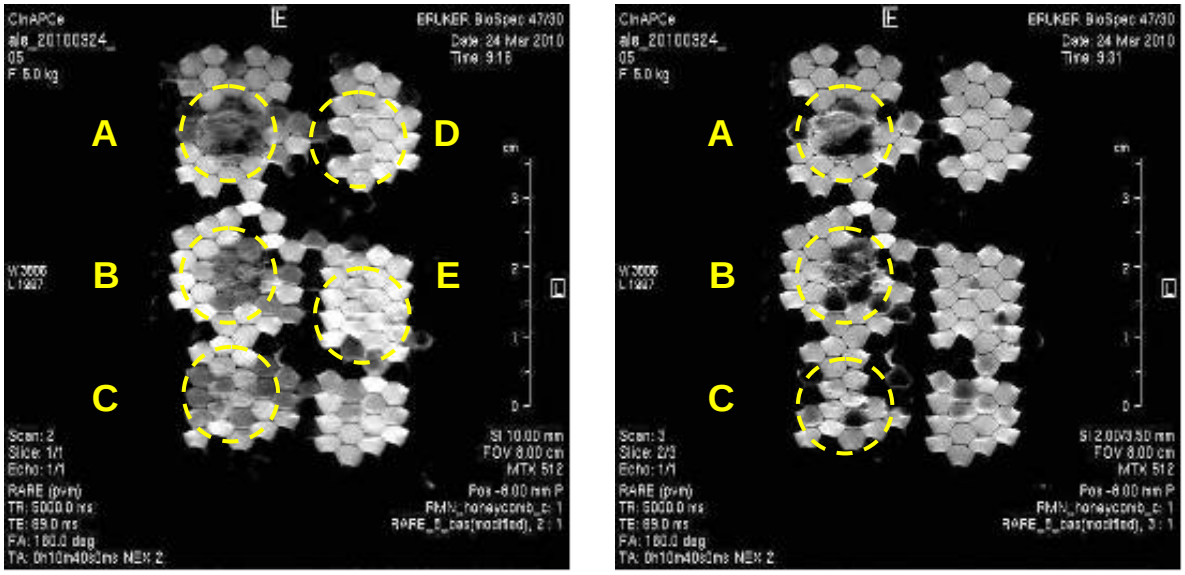
Visto que a primeira imagem (Figura 32a) incorpora em si, de modo condensado e sobreposto, todas as nuances e detalhamentos contidos no núcleo-colméia que foi intencional e controladamente danificado, e, portanto, demanda um tempo de varredura demasiadamente longo, a abordagem de uma varredura única, portanto bem 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 rapidamente a presença destes, uma varredura mais lenta, localizada, empregando-se *slices* tomográficos mais delgados (vide Figura 26a), e, por conseguinte, muito mais precisa, há de, subseqüentemente, estabelecer clara e inequivocamente a extensão, a intensidade e a posição daqueles danos, defeitos ou artefatos internos, conforme mostra a Figura 32b.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 31 – Tomografias de RMN (em planos normais, paralelos às faces principais da amostra de 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 inferior da amostra, são: (a) 0,5 mm; (b) 3,5 mm; (c) 7,0 mm; (d) 9,5 mm.



(a) (b)

Figura 32 – Imagens de RMN relativas a planos normais, paralelos ao da face principal do painel-sanduíche: (a) Modo *single-slice*, em que uma fatia de magnetização corresponde exatamente à seção transversal integral do núcleo, cuja espessura era de 10 mm; (b) Modo *multiple-slice*, em que a fatia de magnetização / inspeção é fina relativamente à dimensão avaliada, correspondendo, no caso em voga, a uma posição no centro da amostra (5 mm a partir do revestimento inferior, ou superior do painel).

5.3.2 Imageamento de Danos por RMN em Planos Transversais (Ortogonais à Face Frontal do Painel)

As Figuras 15 e 26 já indicaram como foram distribuidas as projeções dos 12 planos transversais selecionados para esta inspeção tomográfica por RMN. Os planos foram numerados em ordem crescente a partir da lateral direita da amostra de painel-sanduíche, de acordo com observação da mesma segundo uma vista de topo da sua face frontal.

A Figura 33 apresenta a seqüência das 12 imagens geradas durante este experimento de RMN, considerando-se os 12 corte tomográficos transversais da amostra presentemente avaliada. A espessura do *slice* (fatia) de imageamento

tomográfico da amostra foi de aproximadamente 2 mm. A direção da largura da página corresponde à espessura do painel-sanduíche estrutural, da ordem de 10 mm.

As Figuras 33a-f correspondem a tomografias realizadas transversalmente nas proximidades e sobre os danos respectivamente classificados como D, E e F, conforme mostrados na Figura 15. As Figura 33g-l correspondem aos danos denominados A, B, C, também de acordo com esquemático da Figura 15.

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

Rigorosamente falando, os danos de A-E são passíveis de uma clara e inequívoca definição e certeza quanto à sua presença no núcleo-colméia avaliado, em plena concordância ao que foi verificado e concluído da análise da Figura 31. Entretanto, uma análise da região correspondente ao dano de menor monta, denominado F, indica a ocorrência de certo grau de deformação das paredes, de sorte que ele também pode ser considerado como identificável, diferentemente do que foi inferido da Figura 31. Isto mostra, portanto, uma vantagem da tomografia em planos transversais relativamente aos planos paralelos aos de face do painel-sanduíche. Outro detalhe importante nas imagens da Figura 33 é a viabilidade de se revelarem os bolsões de ar que se formam no interior das células contendo líquido (tal como indicado por círculos tracejados na cor magenta), mesmo tomando-se todas as precauções durante o estágio de preparo dos espécimes para que isso não ocorresse.

Conclui-se, portanto, pelo ótimo potencial do imageamento por RMN na inspeção não-destrutiva de painéis-sanduíche aeronáuticos tanto para a tarefa de indicação, como para a quali- e a quantificação de danos causados por endentação/impacto de painéis-sanduíche e levando ao amassamento do núcleo-colméia. Enfatizando que esta potencialidade do IRMN é dependente da existência de água, ou outro líquido rico em hidrogênio, nas respectivas células da amostra ou componente de natureza celular.

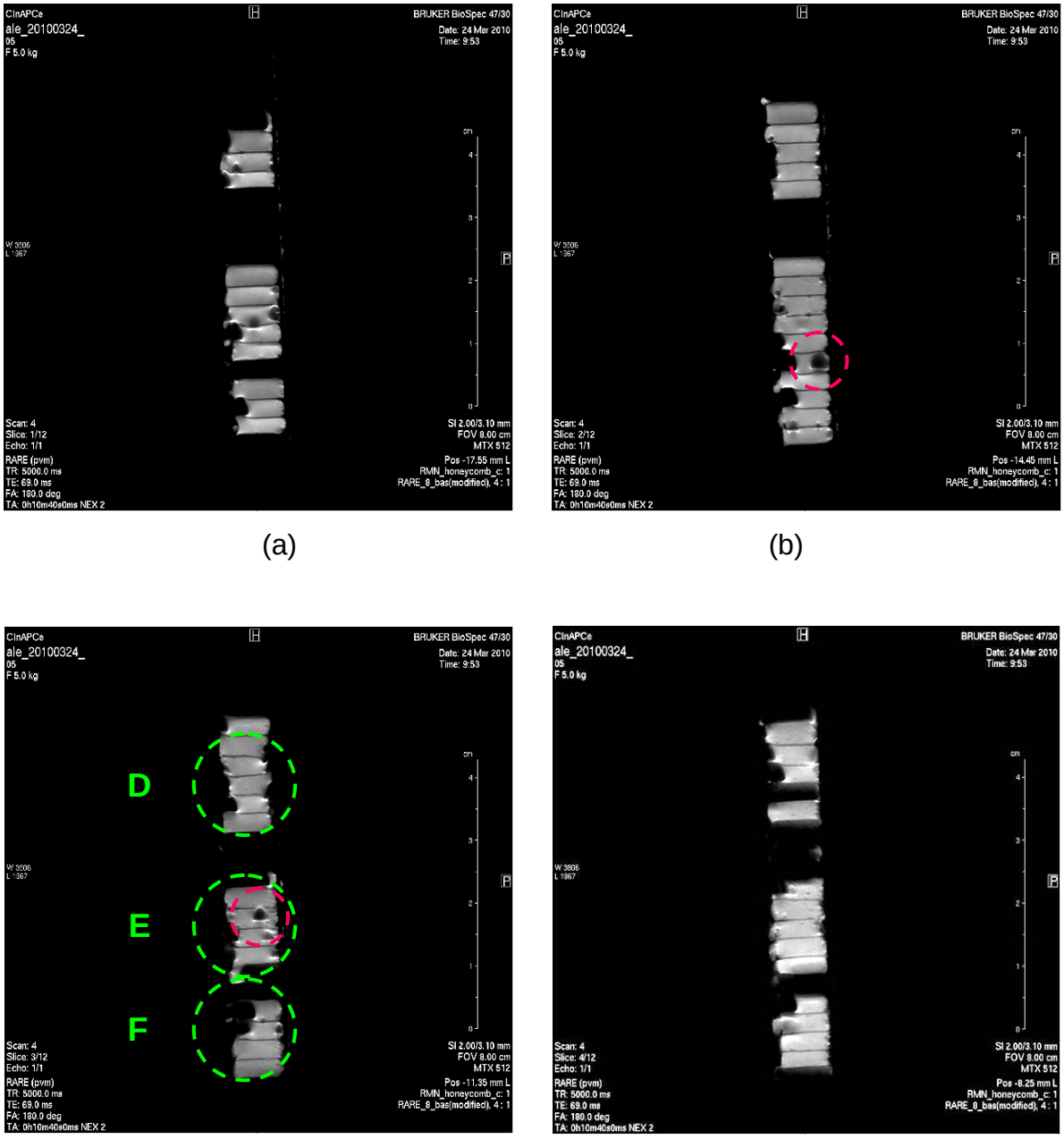
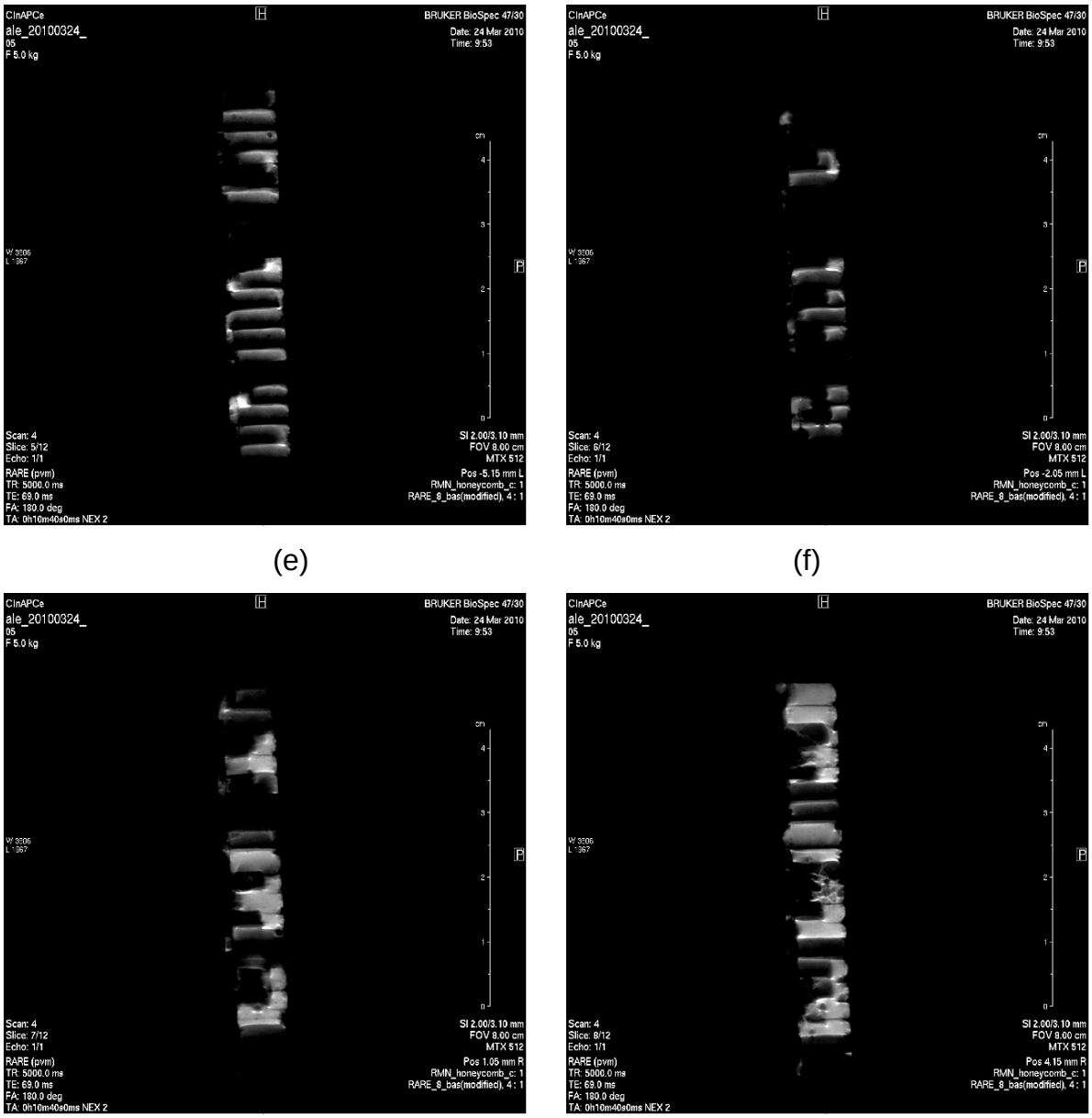


Figura 33 – Tomografias em vista de perfil da amostra com núcleo-colméia amassado, com algumas das principais regiões de danos indicadas por círculos verdes tracejados. Círculos magenta tracejados indicam a presença de bolhas/vazios. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 12 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15 e 26, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; e (l) 12. *(continua na próxima página)*

Continuação

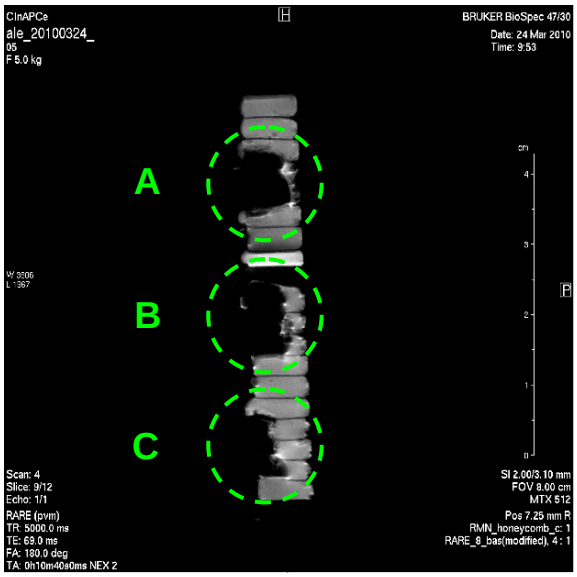


(e) (f)

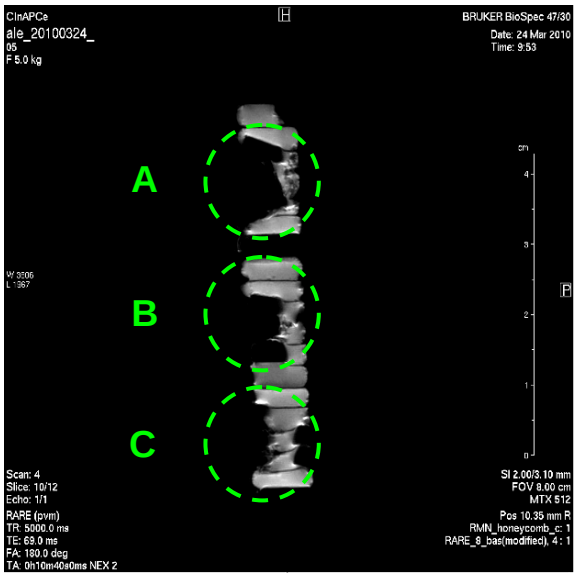
(g) (h)

Figura 33 – Tomografias em vista de perfil da amostra com núcleo-colméia amassado, com algumas das principais regiões de danos indicadas por círculos verdes tracejados. Círculos magenta tracejados indicam a presença de bolhas/vazios. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 12 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15 e 26, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; e (l) 12. *(continua na próxima página)*

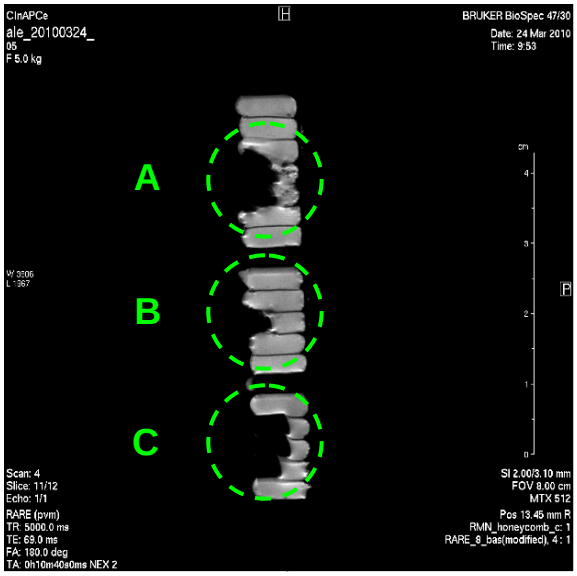
Continuação



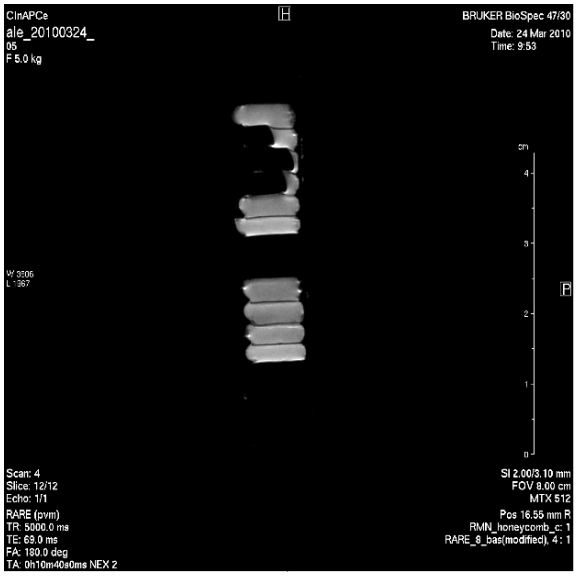
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 33 – Tomografias em vista de perfil da amostra com núcleo-colméia amassado, com algumas das principais regiões de danos indicadas por círculos verdes tracejados. Círculos magenta tracejados indicam a presença de bolhas/vazios. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 12 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28B, as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; e (l) 12.

Comparando-se as figuras acima com a Figura 09 que exibe imagens de RMN obtidas por LAPLANTE et al (2005) também durante a inspeção de painéis-sanduíche contendo água em seu interior, pode-se concluir pela excelente qualidade (definida em termos de densidade, contraste, definição e resolução) das imagens coletadas na presente Dissertação de Mestrado.

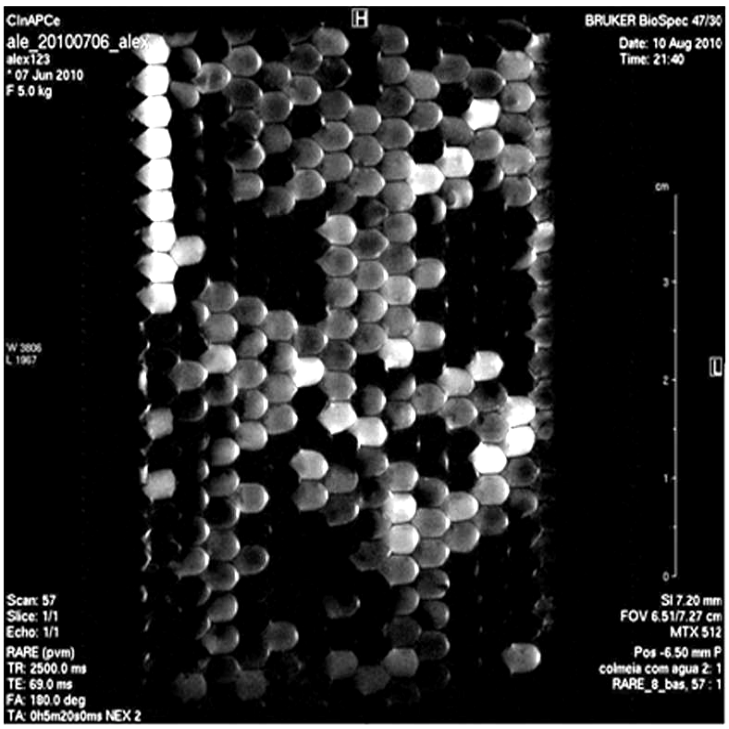
5.4 Ensaio de Painel Umidificado com Névoa Quente

A Figura 34a mostra a imagem obtida neste tipo de ensaio, na qual se vêem claramente as células do núcleo-colméia repletas de água formada por condensação do vapor d´água. Merece destacar que esta amostra foi um pré-teste do sistema de nebulização, sendo que ela estava vedada em suas faces principais pela presença dos laminados sólidos de revestimento, porém sem qualquer ação ter sido tomada no sentido de vedar suas faces laterais, formada por células do núcleo-colméia cortadas nas mais diversas posições considerando-se a seção trasnversal das mesmas. Já a amostra da Figura 34b, também fechada em ambas as suas faces por laminados sólidos firmemente colados, foi, diferentemente da anterior, vedada lateralmente com borracha termoplástica bam-bam.

Assim sendo, a amostra contendo somente a vedação de face pelos laminados rígidos permite concluir que uma quantidade substancialmente elevada de vapor d´água penetra e permeia por entre as paredes das células do núcleo-colméia confeccionado em polímero meta-aramida. Já a análise da segunda amostra indica que vapor penetrou através dos laminados sólidos compósitos de faces e/ou ingressou por intermédio de alguma falha de vedação lateral e/ou mesmo percolou via falha de colagem dos laminados de face, e difundindo-se pela estrutura celular interna durante o longo tempo de residência da amostra no recipiente vedado e saturado com vapor a cerca de 90°C, medidos na fase gasosa.

Este resultado, além de demonstrar a possibilidade da impregnação e contaminação de painéis-colméia vedados com extremo cuidado nas suas bordas laterais (indicando, desta forma, a posível presença de defeitos nos laminados sólidos de face, provavelmente vazios, bolhas e áreas pobres em resina, que os tornam permeáveis a gases), comprova o grande potencial da técnica de

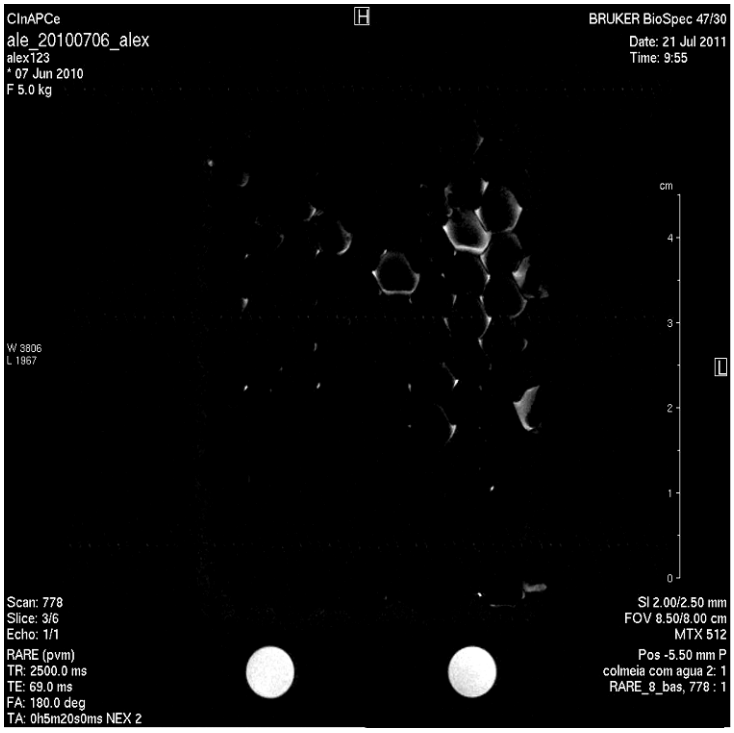
imageamento por RMN na detecção de água e, muito provavelmente, de líquidos hidrogenados em geral, que condensam no interior dos painéis-sanduíche celulares expostos a meios saturados de vapor por tempos relativamente longos.



(a)

Figura 34 – Imageamento por RMN do interior do núcleo-colméia de amostras mantidas em meio saturado por névoa quente pelo período total de cerca de 1200 h: (a) Sem vedeção lateral na região dos nucleos;; (b) Completamente vedada, e mesmo assim levando a um ganho percentual de massa aquosa líquida de aproximadamente 6%. *(continua na próxima página)*

Continuação



(b)

Figura 34 – Imageamento por RMN do interior do núcleo-colméia de amostras mantidas em meio saturado por névoa quente pelo período total de cerca de 1200 h: (a) Sem vedeção lateral na região dos nucleos;; (b) Completamente vedada, e mesmo assim levando a um ganho percentual de massa aquosa líquida de aproximadamente 6%.

5.5 Ensaios de Painéis Contendo Líquidos Distintos

A Figura 35 mostra o resultado de imageamento por RMN da Amostra A1 contendo, respectivamente, água, fluido hidráulico e querosene líquidos deliberadamente introduzidos no interior das células de seu núcleo-colméia.

A Figura 36 mostra o resultado obtido a partir da inspeção por IRMN da Amostra A2, a qual foi preparada através da inserção de, respectivamente, água líquida e resina pastosa posteriormente curada (endurecida) no interior das células do correspondente núcleo-colméia.

A Figura 37 mostra o resultado de IRMN da Amostra A3, preparada por intermédio da intrusão proposital de, respectivamente, resina pastosa posteriormente reticulada (solidificada), agente degelante e água líquidos no interior do respectivo núcleo-colméia.

Das figuras 35-37, conclui-se pelo ótimo potencial do imageamento por RMN durante a inspeção não-destrutiva de painéis-sanduíche aeronáuticos para a determinação da presença e da distribuição espacial de água e compostos hidrogenados líquidos em geral, os quais estejam aprisionados no interior das células de seus núcleos-colméia.

Na amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene (Figura 35) os resultados são bastante promissores, confirmando a elevada capacidade de detecção por RMN de todos os três líquidos. Na amostra A2 contendo água e resina (Figura 36) somente a água gera imagens bem delineadas, enquanto que a resina sólida produz sinais que evoluem numa escala de tempo não compatível com este experimento. Na amostra A3 contendo água, degelante e resina (Figura 37) novamente somente os líquidos ricos em hidrogênio geram imagens bem delineadas, enquanto que o polímero sólido não é detectado. Desta forma, nenhuma imagem do material sólido resulta do ensaio realizado sob as condições originalmente pré-estabelecidas neste estudo, as quais são particularmente dedicadas a materiais no estado liquido, apresentando, portanto, grande mobilidade atômica e/ou molecular.

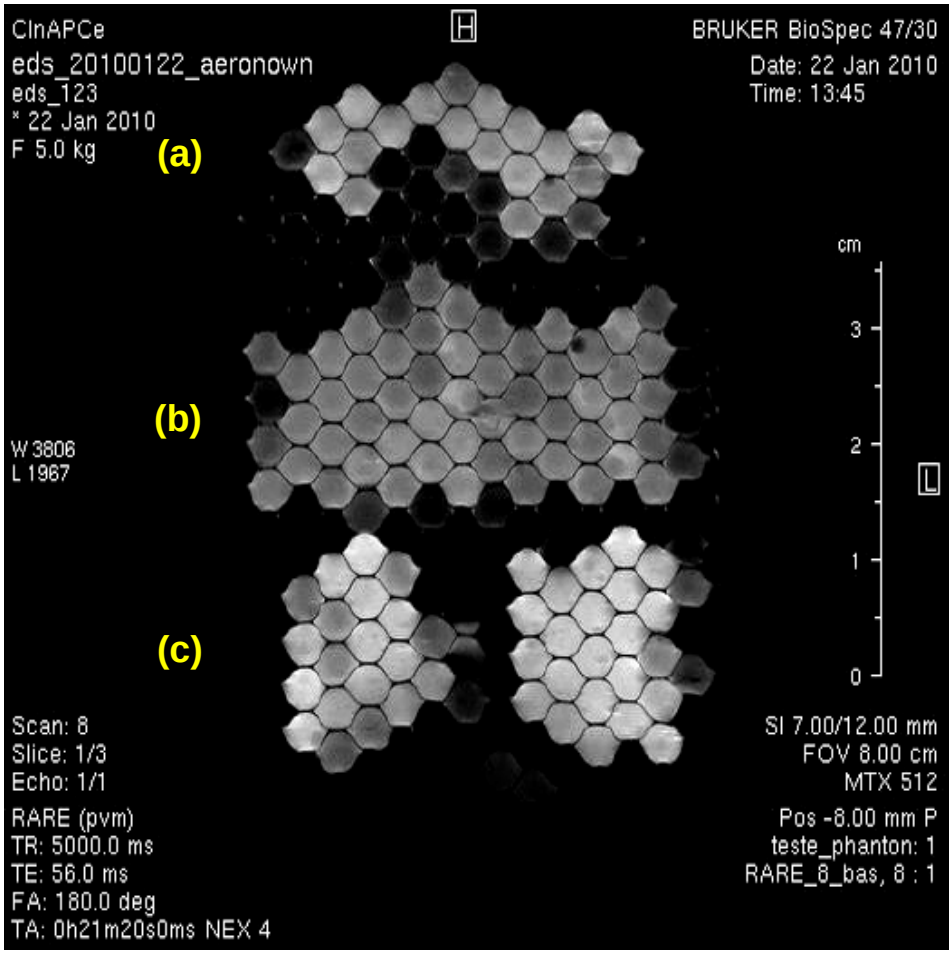


Figura 35 – Imagem de RMN (segundo vista em plano paralelo às faces principais do painel) do interior da Amostra A1 contendo, respectivamente, querosene (a), fluido hidráulico (b) e água (c).

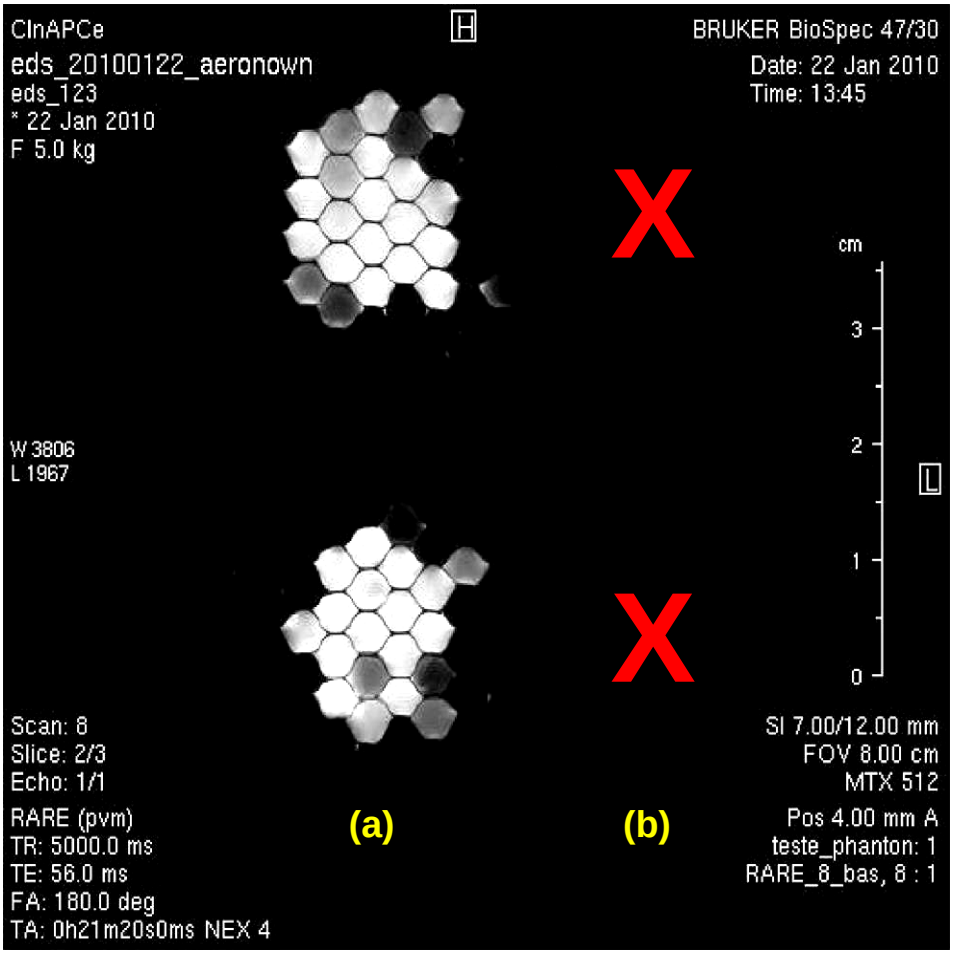


Figura 36 – Imagem de RMN (segundo o plano de face do painel) do interior da Amostra A2 contendo, respectivamente, água (a) e resina (b).

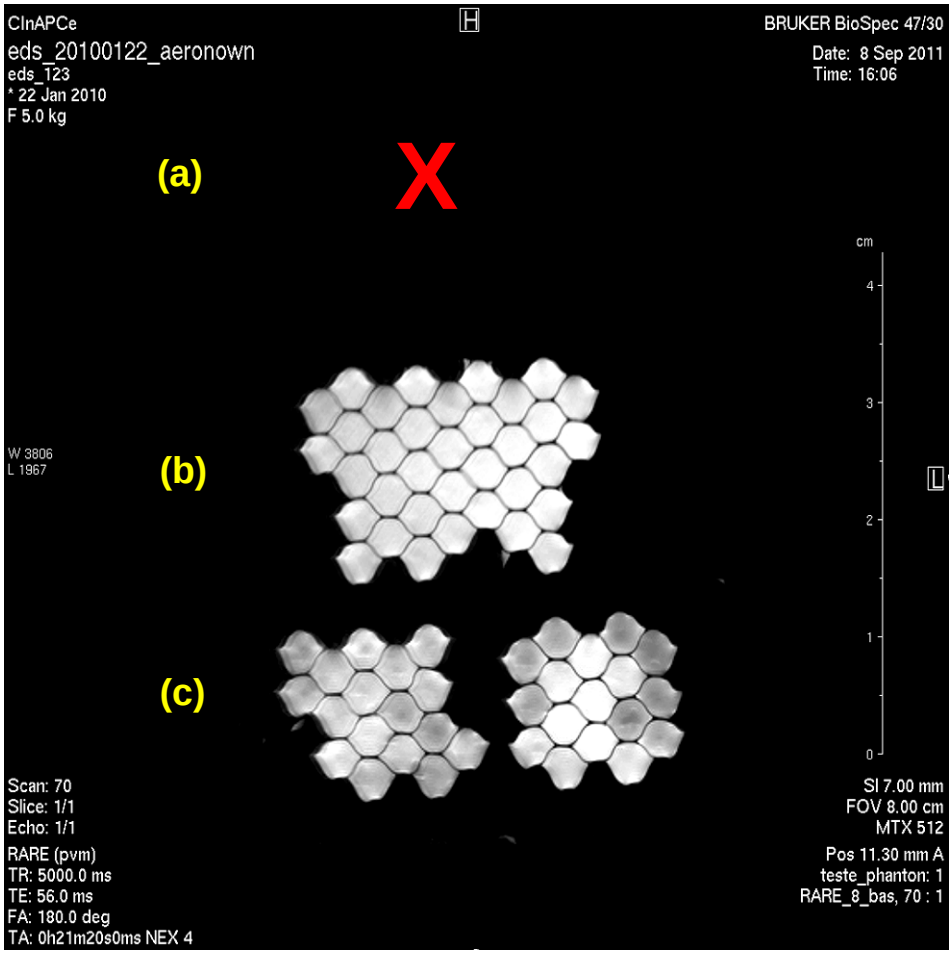


Figura 37 – Resultado do teste na Amostra A3 contendo 3,0 ml de cada uma das substâncias: (a) resina polimérica termorrígida reticulada; (b) agente degelante, (c) água.

Especificamente com relação à Figura 35, correspondente à Amostra A1 que contem três diferentes tipos de líquidos, é interessante mencionar a notável diferença na tonalidade das imagens nela fornecidas, a despeito das leves variações dos tons de cinza observadas para um mesmo líquido em função do nível de preenchimento das células com dado líquido, conforme já anteriormente discutido na Figura 30 deste texto. Com base nesta diferença de tonalidades entre as imagens dos três líquidos, pode-se inferir a possibilidade, de fato, a viabilidade da identificação (caracterização) dos mesmos por intermédio, por exemplo, de técnicas

de análise computadorizada de imagens. Isto, por sua vez, daria margem inclusive à eventual diferenciação entre os diversos líquidos presentes no painel através de programas computacionais especializados em reconhecimento de padrões em imagens (seja via coloração, tonalidade, textura, ou quaisquer outras características intrínsecas da imagem) com base em inteligência artificial (ex., sistemas mais simples baseados em conhecimento – *knowledge-based systems*, ou mais sofisticados como os fundados em redes neurais artificiais – *artificial neural network*s). Isto seria extraordinariamente útil, por exemplo, em inspeções não-destrutivas de componentes aeronáuticos, ou pás de turbinas eólicas, de modo a, além de se detectar, quantificar e identificar os líquidos presentes, também distingui-los de modo automatizado e com elevadas probabilidades de acerto. Cabe, entretanto, ainda verificar se, e como o aspecto visual da imagem (denotada por critérios tais como sua tonalidade, brilho, contraste, densidade, cor, textura, etc) gerado por um determinado elemento, ou composto químico depende da sua natureza, e do seu volume avaliado, como e na mesma extensão dos elementos/compostos que o acompanham no interior da mesma amostra de painel-sanduíche.

De fato, pode-se garantir de antemão que o brilho da imagem de uma substância avaliada por RMN está diretamente associado à densidade de núcleos com momentos magnéticos líquidos e dos parâmetros de relaxação (T_1 e T_2), desde que a espessura dos planos selecionados de varredura (*slices*) seja maior do que a altura das colunas preenchidas com os líquidos. Em outras palavras, de modo a evitar a dependência do brilho da imagem com os parâmetros acima citados, há de se garantir que nenhuma célula inspecionada contenha a fronteira da coluna de líquido no interior da espessura do plano selecionado, caso contrário haverá variação de brilho devido à quantidade de líquido naquela região, mesmo sendo um líquido com alta densidade de prótons, tal como a água, por exemplo. Este e outros aspectos estão sendo devidamente apreciados em experimentos atualmente em andamento, e serão objeto de discussão em futuras publicações do Grupo de Pesquisa em Ensaios Não-Destrutivos de Materiais Compósitos do SMM-EESC-USP.

5.6 Amostra para Ensaio de Painel com Resina Sólida em Excesso (Pura ou Carregada com Agentes Contrastantes em Pó)

A Figura 38 mostra as imagens obtidas por RMN a partir das 8 provetas contendo água, em que se confirma a indiscutível capacidade da técnica o imageamento deste tipo de composto hidrogenado.

Na seqüência, foram avaliadas quatro provetas contendo, respectivamente, resina pura Hysol®, resina carregada com 1% em massa de Gd, 5% em massa de Gd, e, finalmente, contendo 10% em massa de Gd, as quais foram alocadas em substituição a quatro provetas com água e cujos resultados já foram mostrados na Figura 38. De modo a se comparar os resultados de IRMN obtidos a partir destas misturas polímero-metal, foram mantidas quatro das provetas contendo água, sendo a imagem final mostrada na Figura 39.

Apesar do Gd ser altamente sensível, em meios líquidos, aos efeitos de RMN, no caso em que ele é misturado à resina, e esta é posteriormente curada/endurecida/solidificada, não há qualquer resultado satisfatório de imageamento.

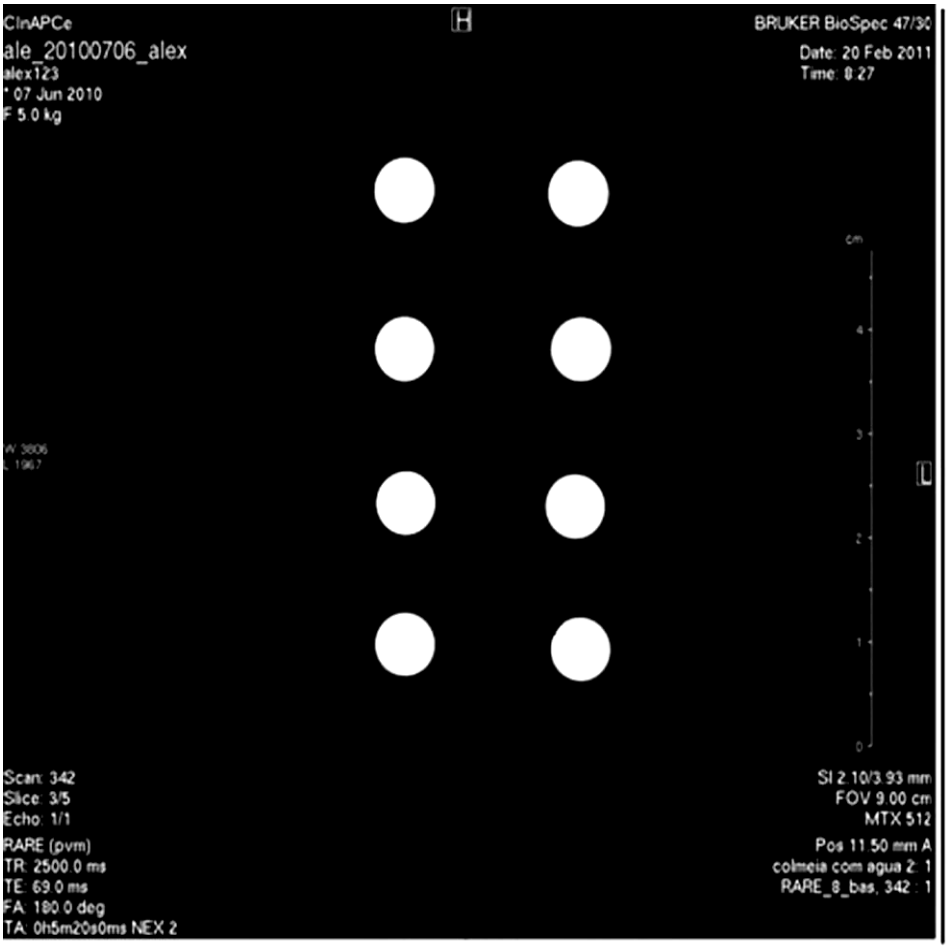


Figura 38 – Experimento IRMN realizado com provetas contendo água e empregadas como padrão de qualidade de imagem.

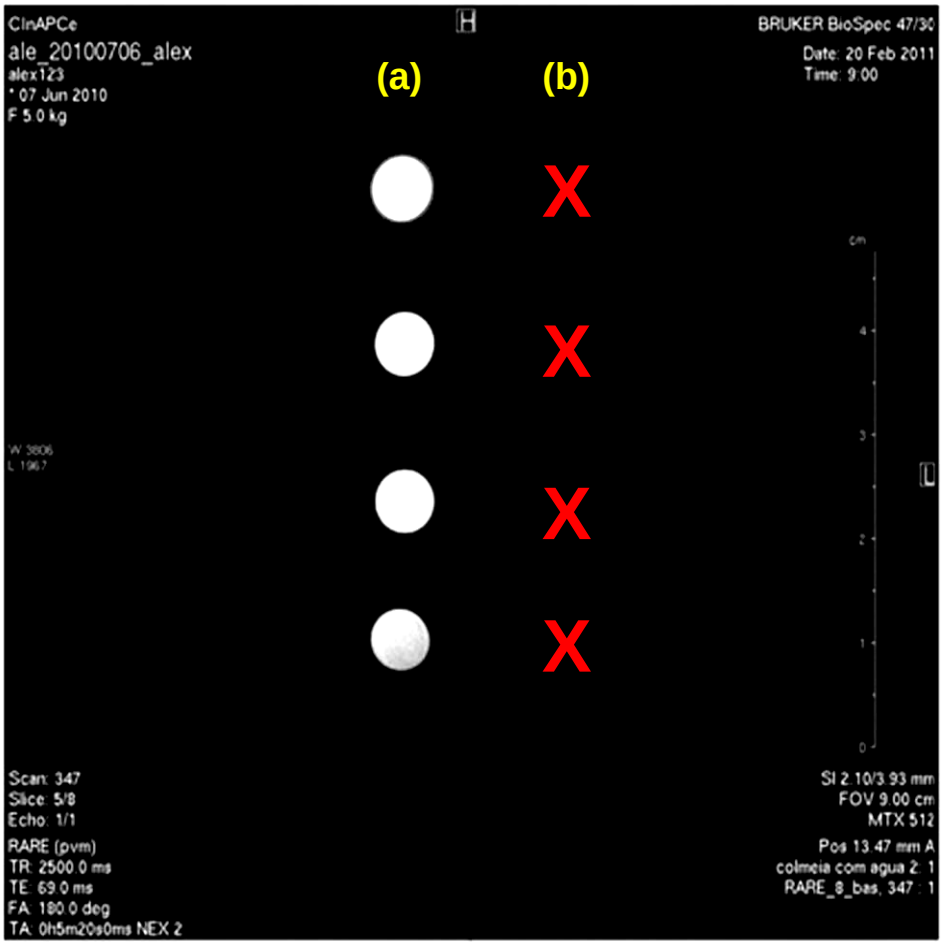


Figura 39 – Imagem obtidas a partir de oito provetas, sendo quatro delas à esquerda (a), contendo água pura (como padrão), e à direita (b), contendo resina pura Hysol® e misturada a Gd em várias composições (1%, 5% e 10% em massa).

Uma nova tentativa de imageamento de amostras contendo Gd foi realizada por intermédio do incremento da quantidade deste elemento na resina termorrígida epoxídica, respectivamente, de 20% e 40% de Gd em massa na mistura, maximizando-se desta forma o efeito de ressonância magnética exercido pelo metal terra rara no compósito polímero-metal. Estas duas amostras-proveta foram colocadas lado a lado de seis provetas-padrão contendo água pura, e a imagem resultante de RMN é mostrada na Figura 40.

Conforme pode ser notado, somente as provetas com água foram passiveis de imageamento por RMN.

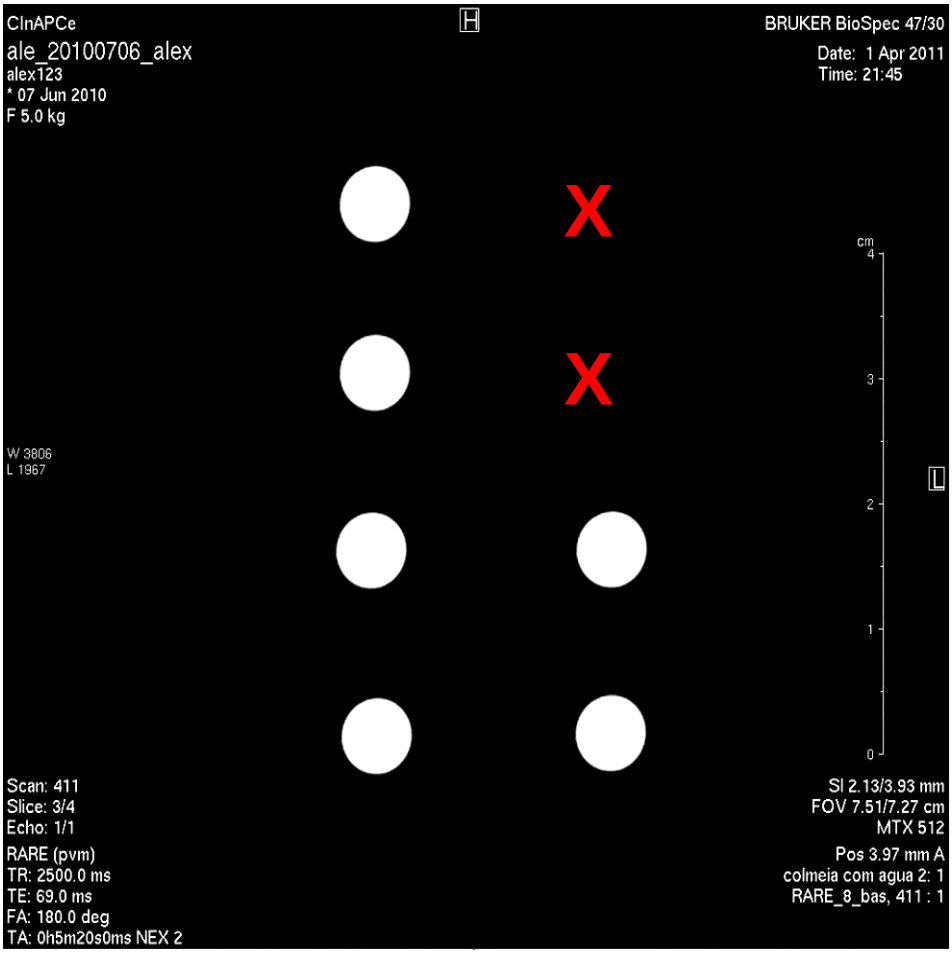


Figura 40 – Imagem de RMN revelando a presença das seis provetas-padrão contendo água. As provetas com 20% e 40% em massa de Gd na resina epóxi não são passiveis de imageamento por RMN, conforme indicado por um X na cor vermelha.

Na Figura 41 está o imageamento das amostras-proveta contendo, respectivamente, água (padrões) e resina contendo cargas de óxido de ferro nas concentrações de 1%, 5%, 10% e 20%, respectivamente.

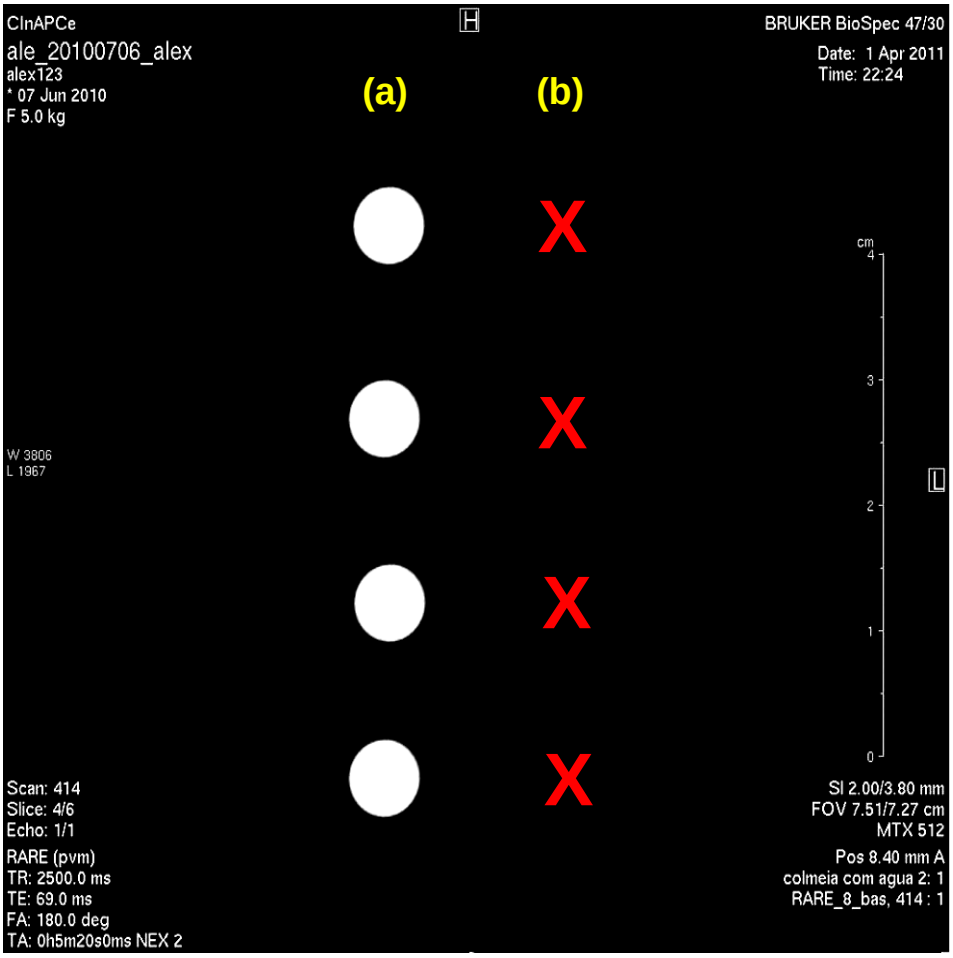


Figura 41 – Imagem obtidas a partir de oito provetas, sendo quatro delas à esquerda (a), contendo água pura (como padrão), e à direita (b), contendo resina pura Hysol® e misturada a Fe_2O_3 em várias composições (1%, 5%, 10% e 20%).

Apesar de na literatura científica haverem relatos de uma alta sensibilidade de ambos os gadolíneo e óxido de ferro na geração de contraste nos exames de RMN *in vivos*, isto provavelmente está associado ao fato dos tecidos avaliados conterem boa proporção de líquidos (tecidos moles). De fato, no caso em questão, estado sólido da mistura polímero-metal, e polímero-cerâmica, respectivamente, a mobilidade nuclear é muito mais limitada, de sorte que, embora o equipamento de RMN, nas condições e calibrações utilizadas, leia o sinal emitido pela resina sólida com e sem carga, ele não é capaz de gerar a imagem dos referidos sólido, já que o tempo de decaimento de sinal de ressonância magnética é muito rápido.

5.7 Quantificação do Conteúdo de Líquido nas Células-Colméia

As Figuras 42 a 44 apresentam seqüências das imagens geradas durante o experimento de RMN considerando-se a seção longitudinal, respectivamente, das Amostras A1, A2 e A3, em que se visualiza, na direção da largura da página, a espessura do painel-estrutural.

Note que, cada uma das 13 imagens apresentadas nas Figuras 42 e 43 (correspondentes às amostras A1 e A2, respectivamente), e das 14 relativas à Figura 44 (correspondentes à amostra A3), corresponde a um dos planos de seção longitudinal (ortogonais a face das Amostras A1, A2 e A3, respectivamente), tais como indicados em cor vermelha na Figura 25, e estabelecidos na cor magenta na Figura 28 para ambas as amostras A1 e A3, respectivamente.

Conforme anteriormente mencionado, a primeira amostra (A1) contém água, fluido hidráulico e querosene líquidos, a segunda (A2) contém água líquida e resina Araldite® solidificada, e a terceira (A3) contém resina Araldite® curada, e agente degelante e água líquidos.

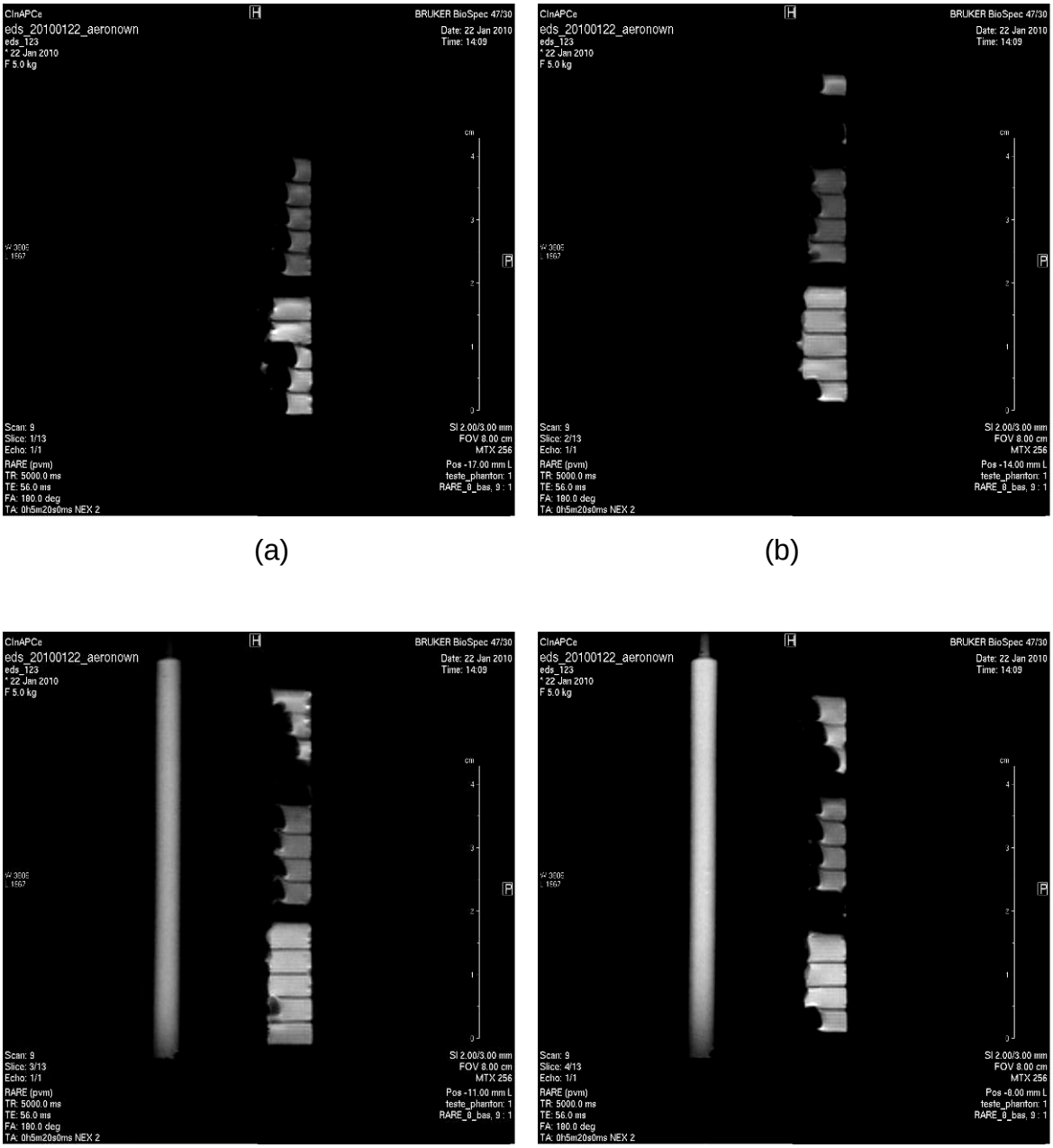
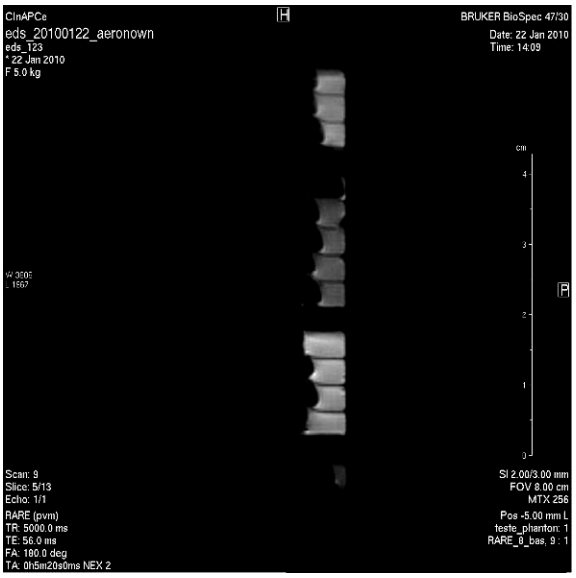
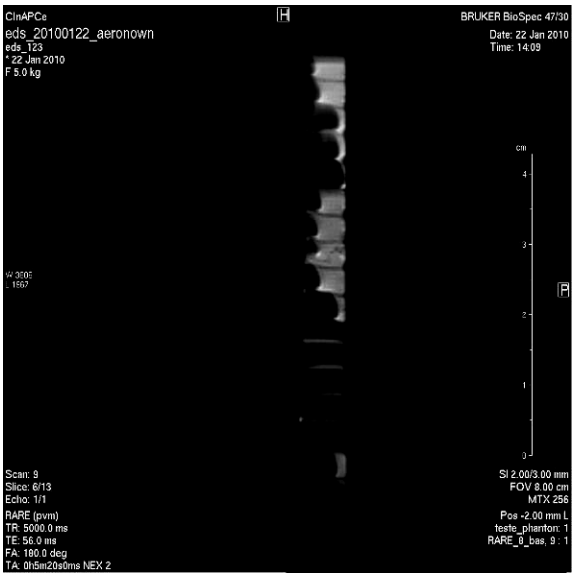


Figura 4 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene. *(continua na próxima página)*

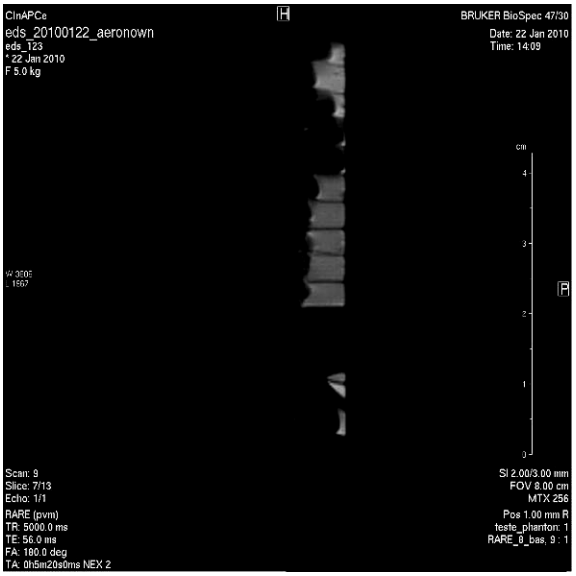
Continuação



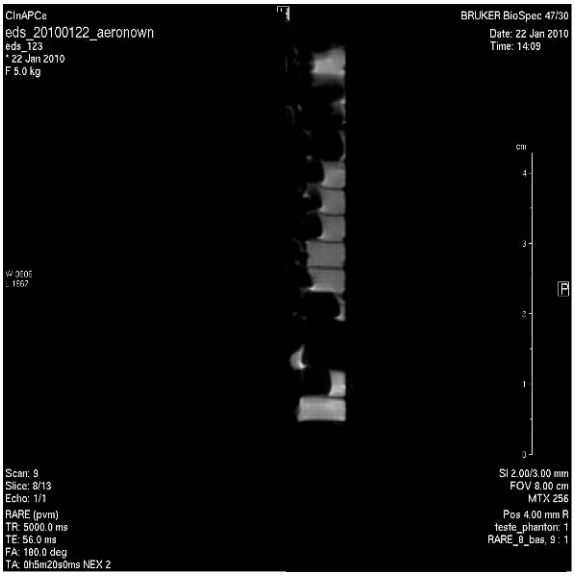
(e)



(f)



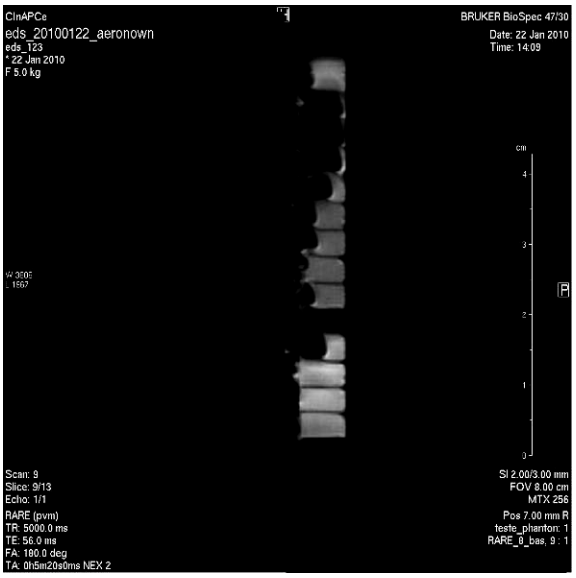
(g)



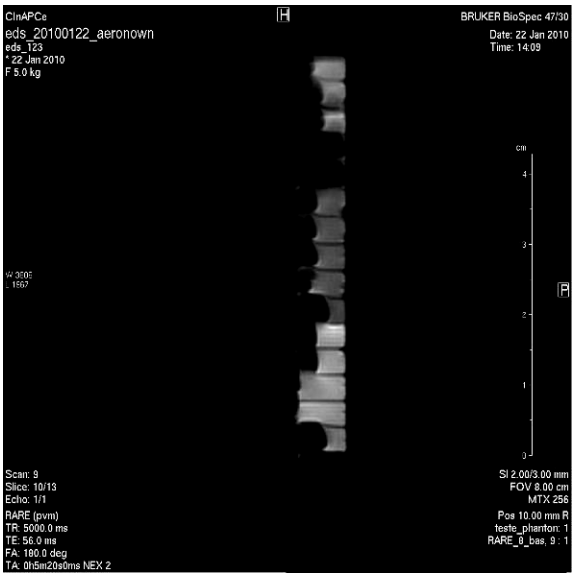
(h)

Figura 5 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene. *(continua na próxima página)*

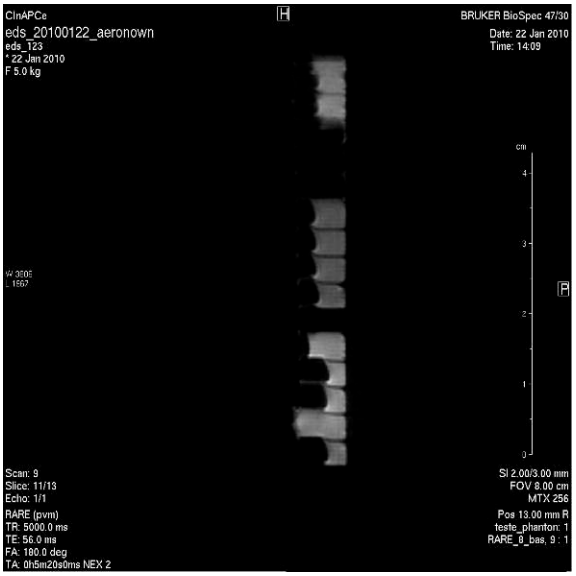
Continuação



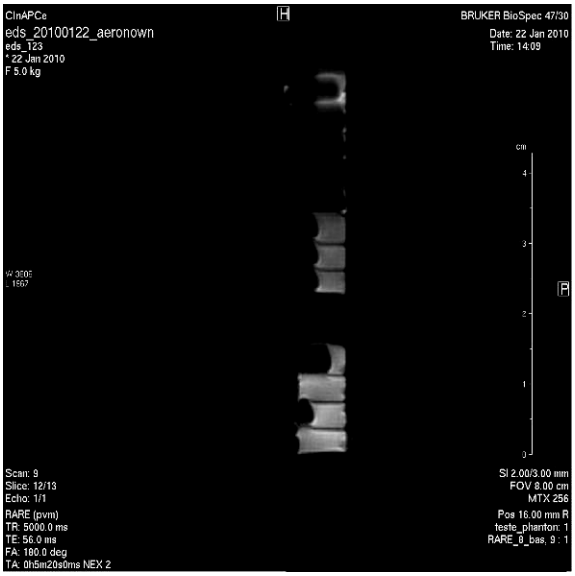
(i)



(j)



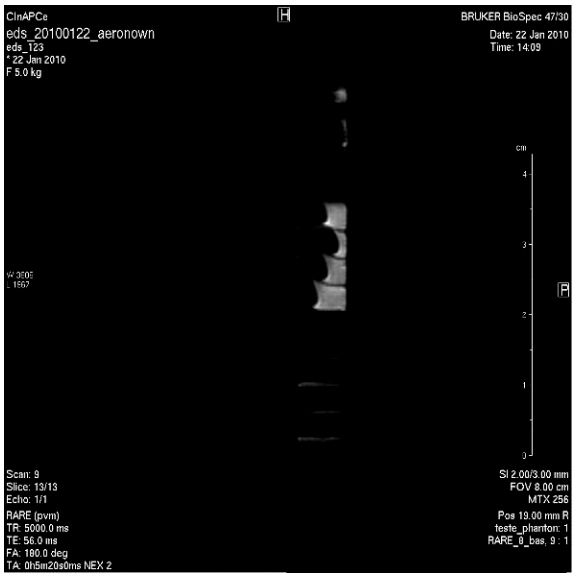
(k)



(l)

Figura 6 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene. *(continua na próxima página)*

Continuação



(m)

Figura 7 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A1 contendo água, fluido hidráulico e querosene. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 13 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28(B), as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; e (m) 13.

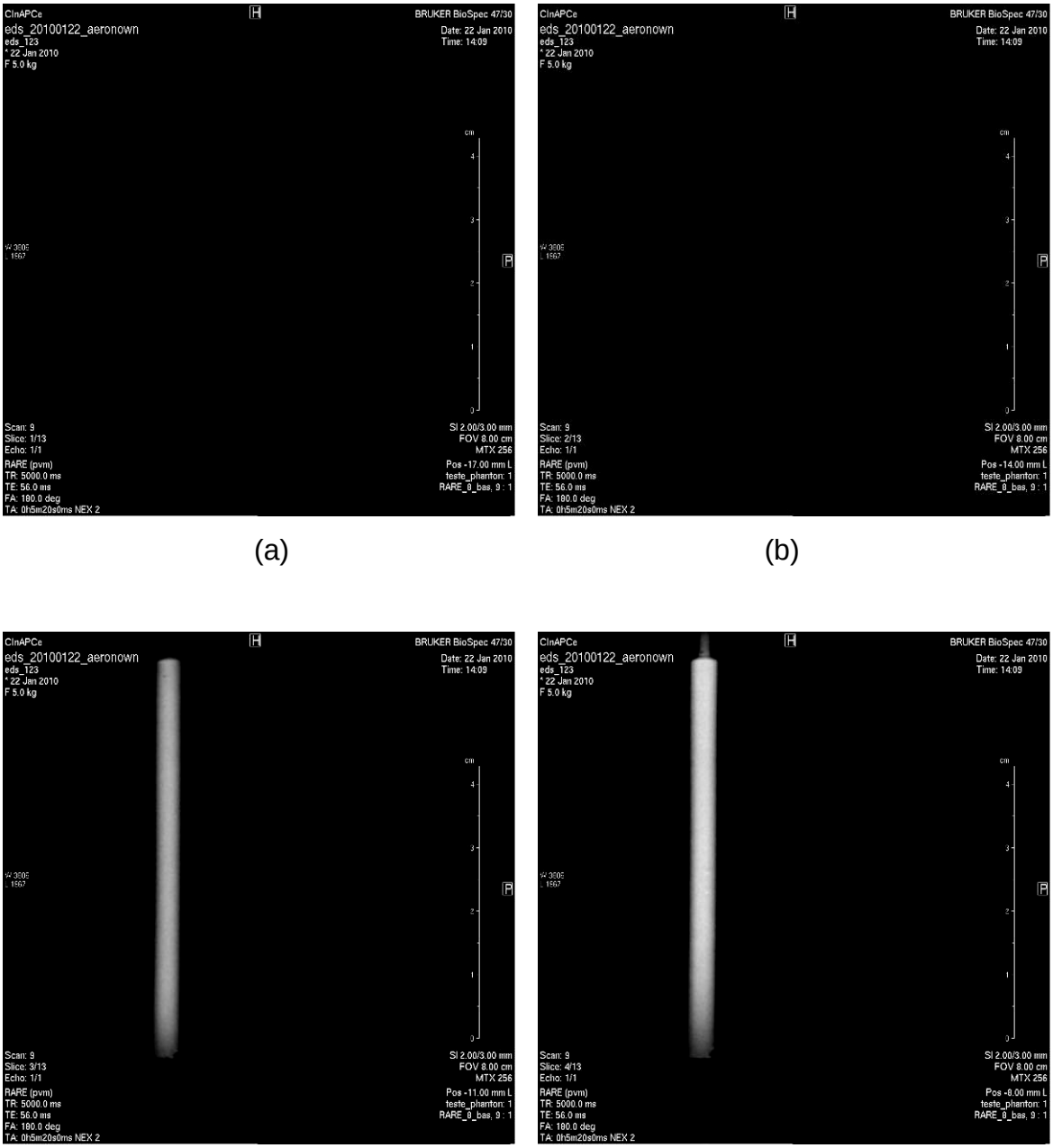
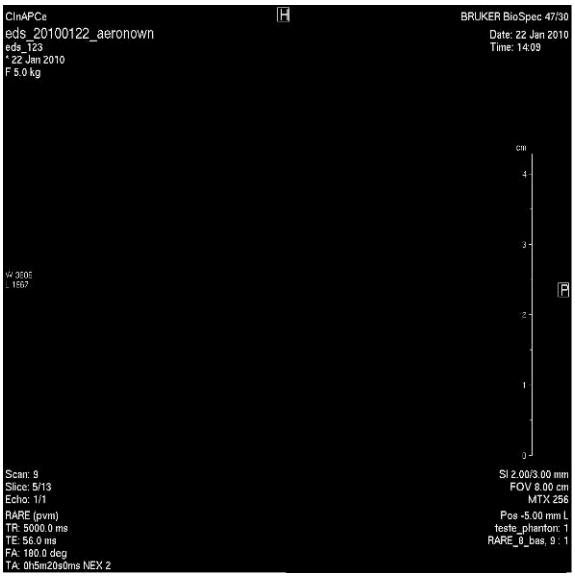
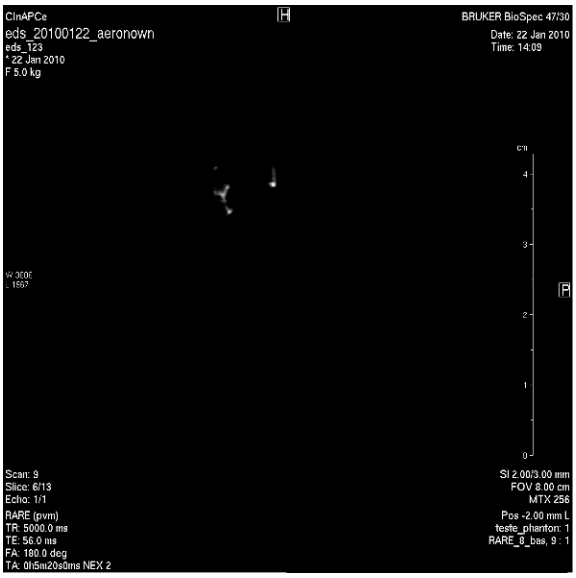


Figura 8 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A2 contendo água e resina termorrígida já reticulada continua. *(continua na próxima página)*

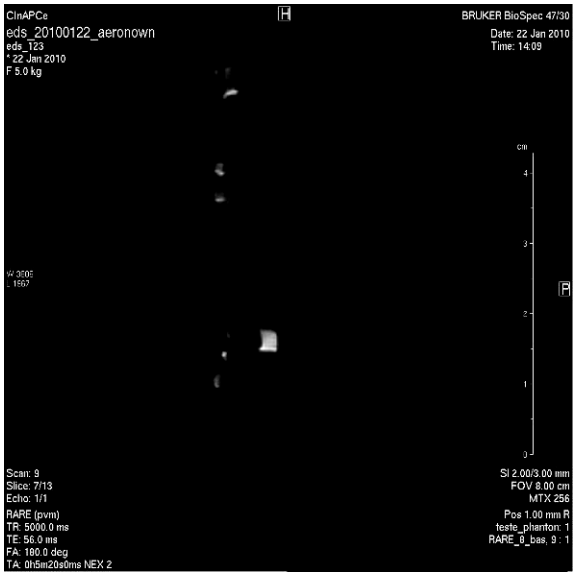
Continuação



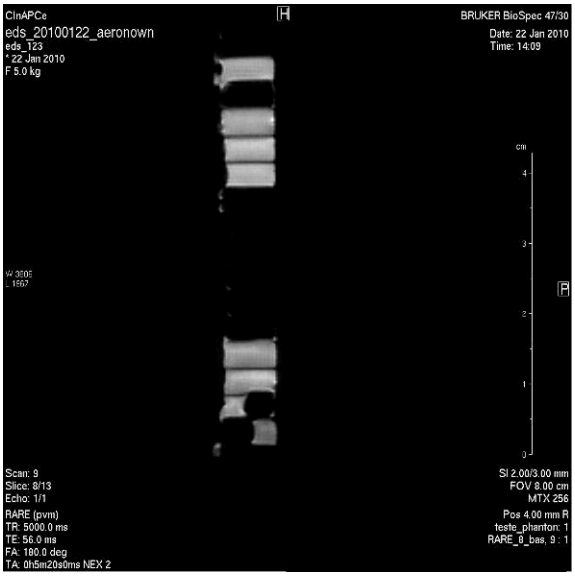
(e)



(f)



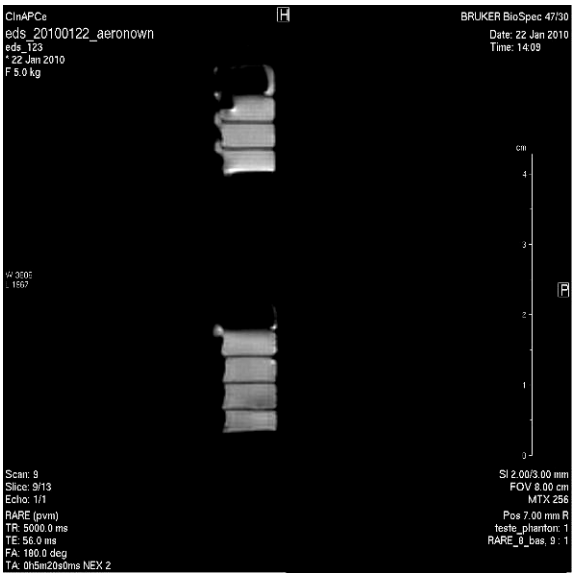
(g)



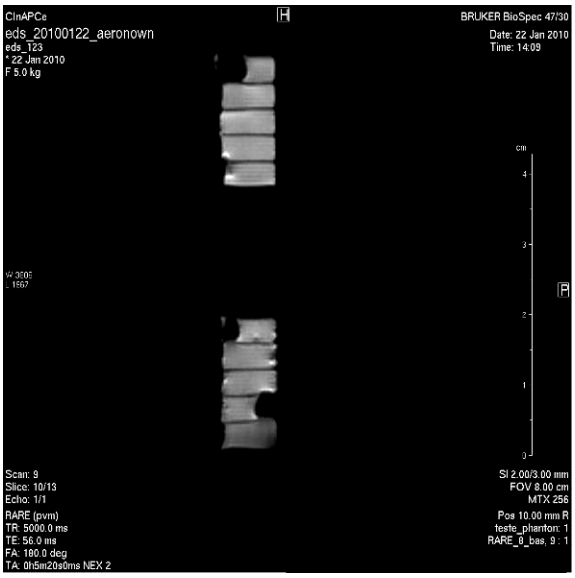
(h)

Figura 9 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A2 contendo água e resina termorrígida já reticulada. *(continua na próxima página)*

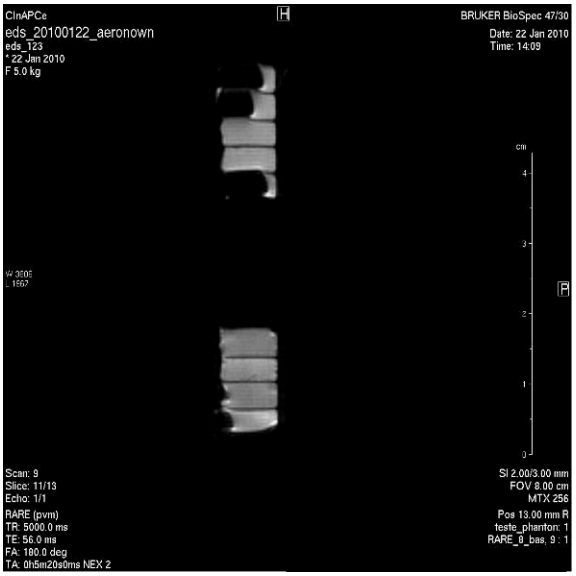
Continuação



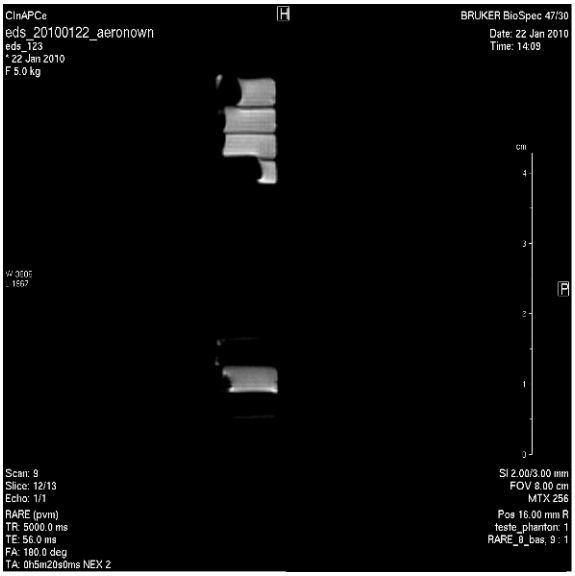
(i)



(j)



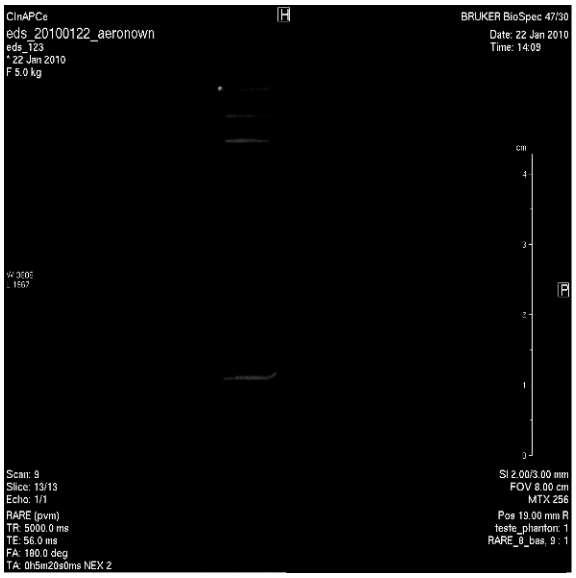
(k)



(l)

Figura 10 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A2 contendo água e resina termorrígida já reticulada. *(continua na próxima página)*

Continuação



(m)

Figura 11 – Seqüência de 13 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A2 contendo água e resina termorrígida já reticulada. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 13 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28(B), as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; e (m) 13.

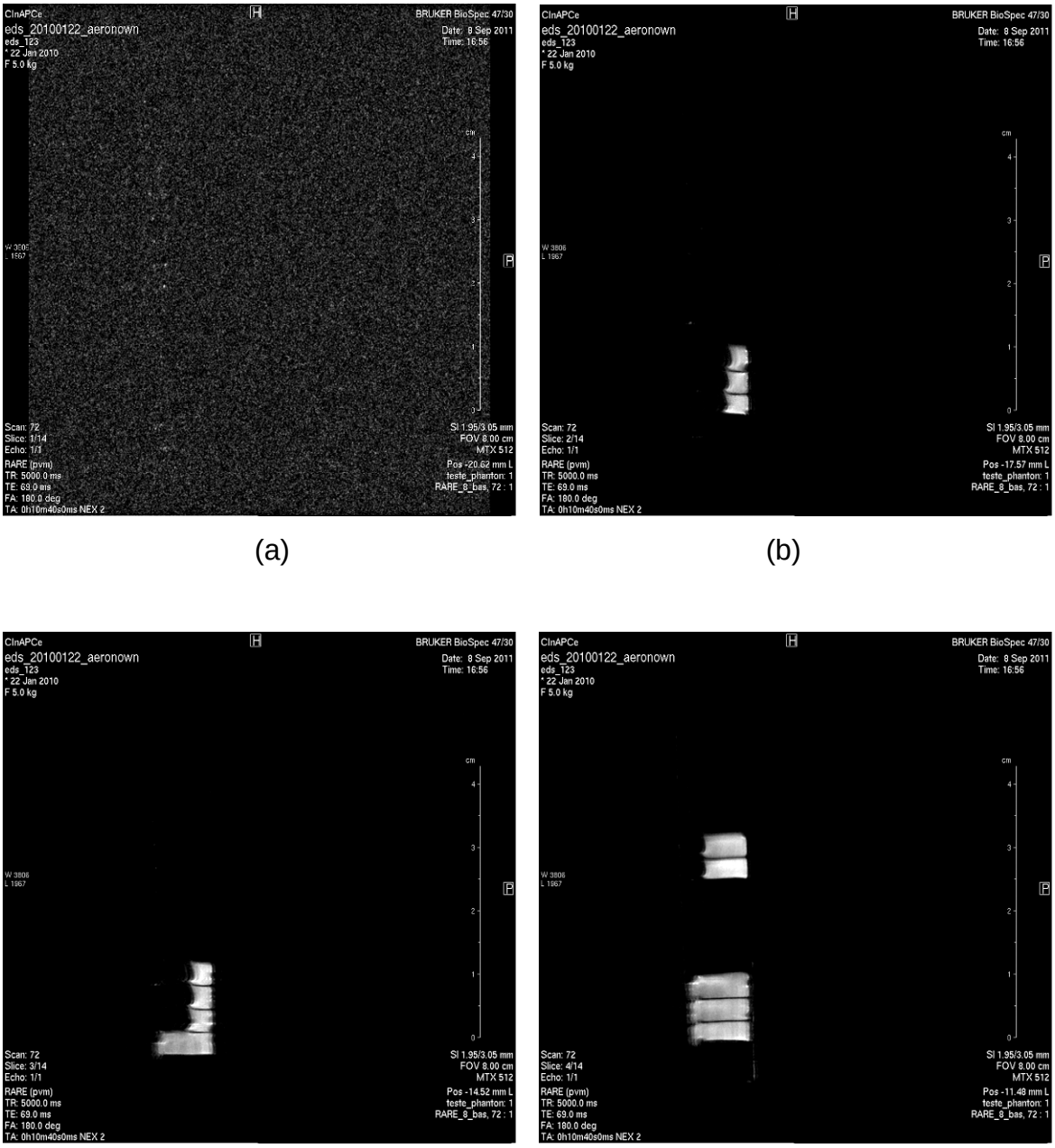
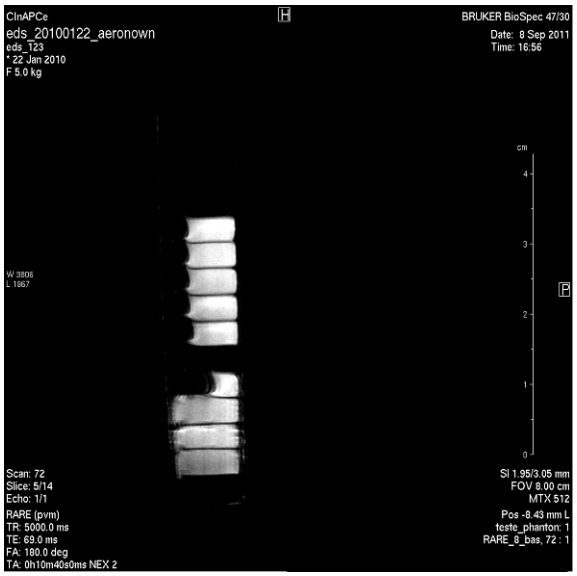
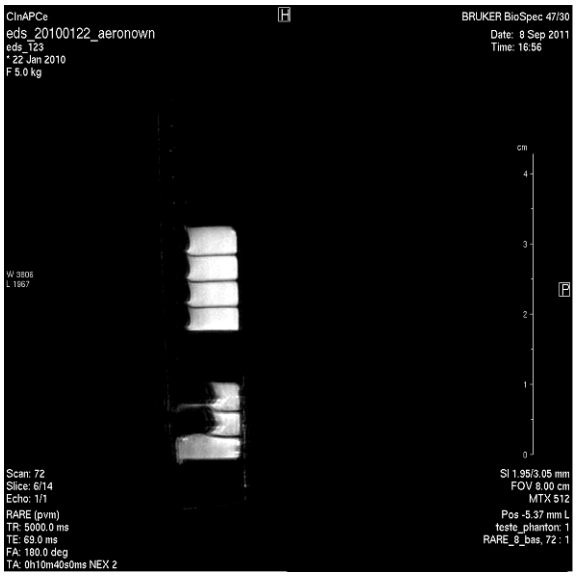


Figura 12 – Seqüência de 14 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A3 contendo resina termorrígida já reticulada, agente degelante e água. *(continua na próxima página)*

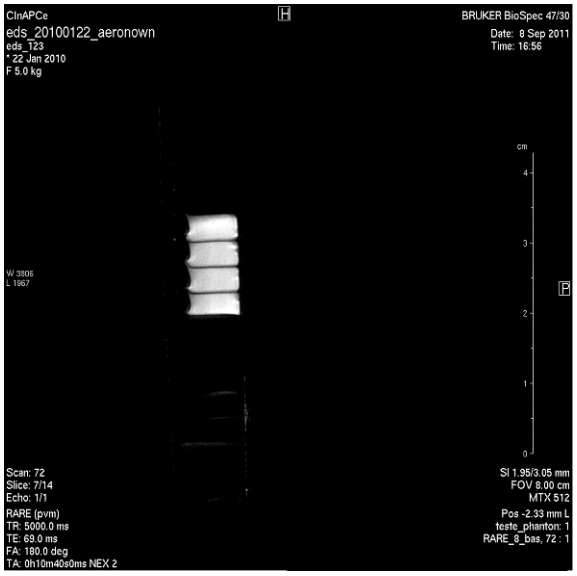
Continuação



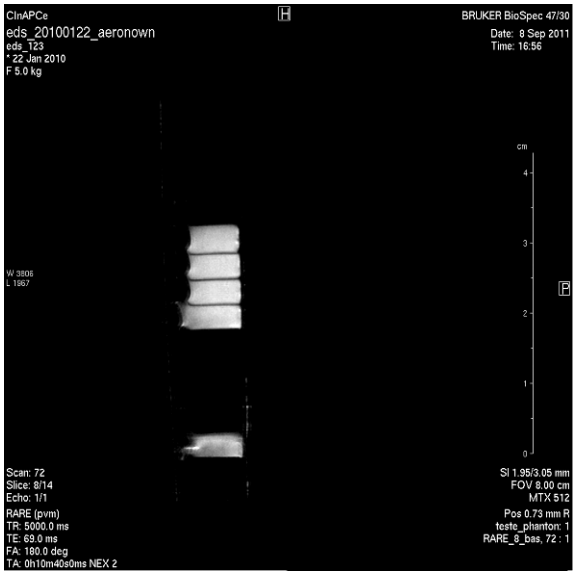
(e)



(f)



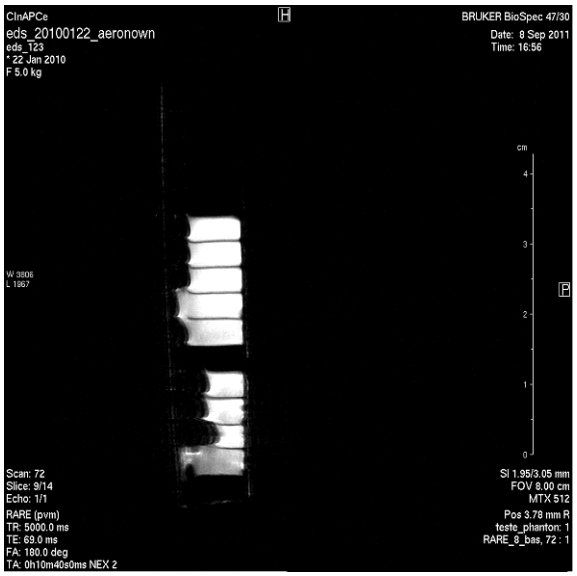
(g)



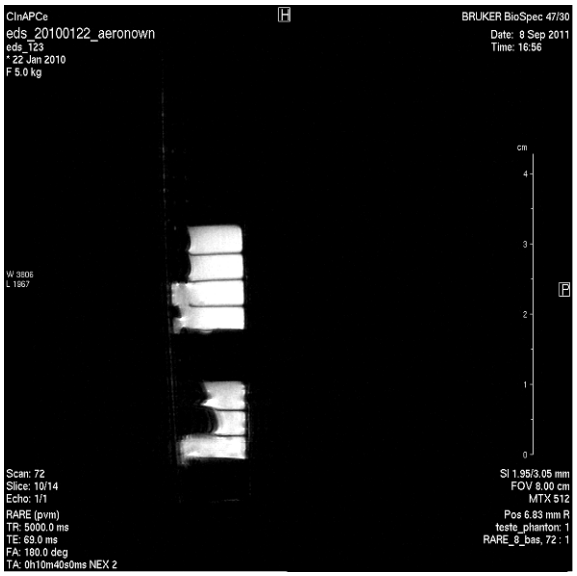
(h)

Figura 13 – Seqüência de 14 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A3 contendo resina termorrígida já reticulada, agente degelante e água continua. *(continua na próxima página)*

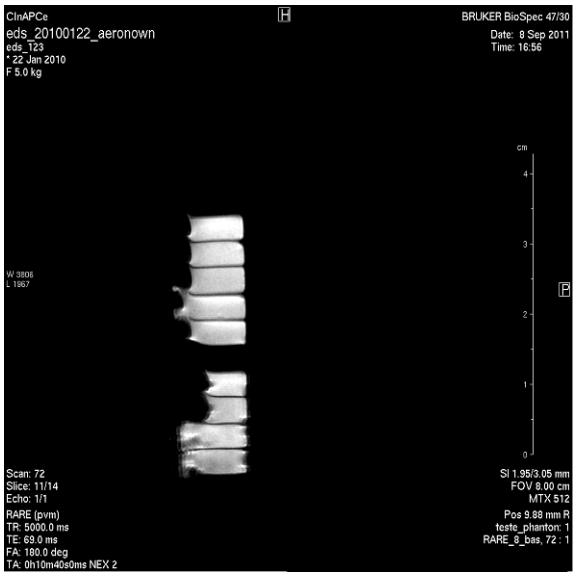
Continuação



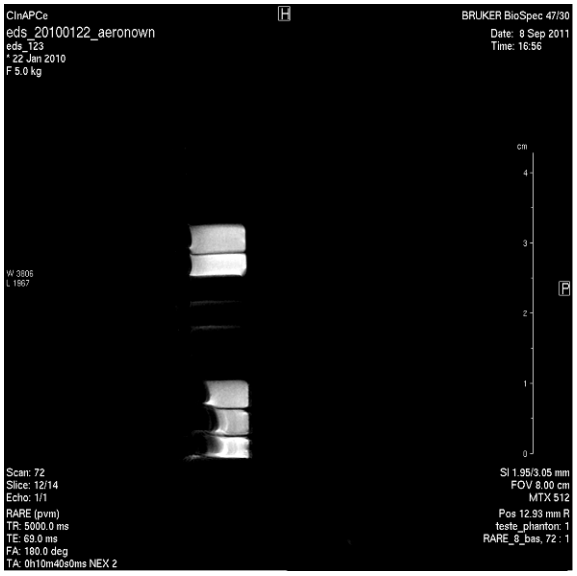
(i)



(j)



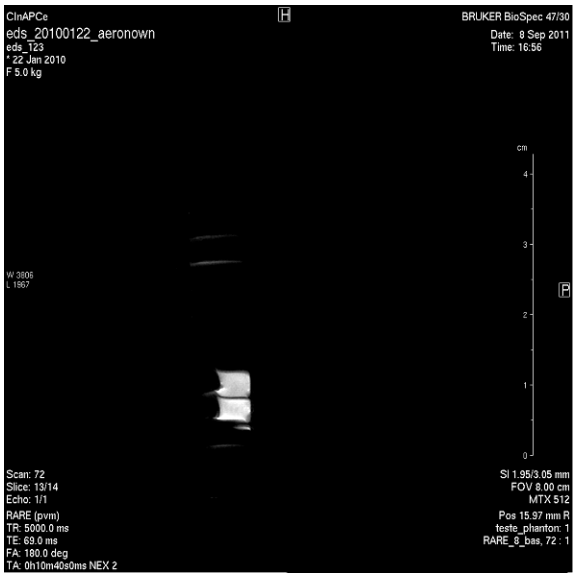
(k)



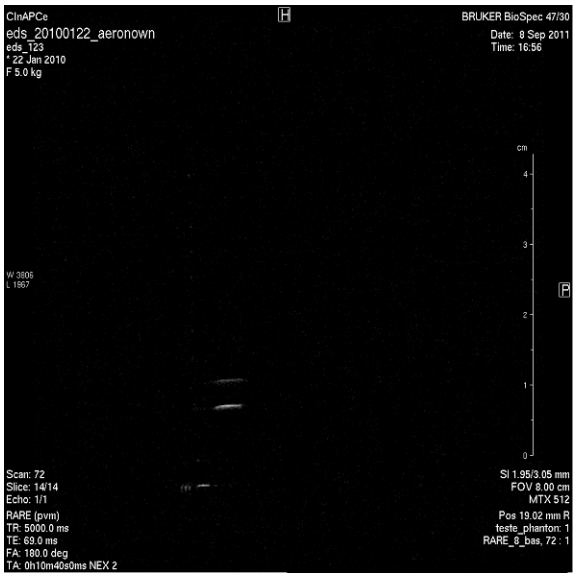
(l)

Figura 14 – Seqüência de 14 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A3 contendo resina termorrígida já reticulada, agente degelante e água. *(continua na próxima página)*

Continuação



(m)



(n)

Figura 15 – Seqüência de 14 imagens tomográficas de RMN (visualizando-se a espessura do painel na direção da largura da página) do interior da Amostra A3 contendo resina termorrígida já reticulada, agente degelante e água. De acordo com a sequência de numeração de *slices* tomográficos transversais, respectivamente de 1 a 14 da direita para a esquerda, conforme padrão estabelecido nas Figuras 15, 26 e 28(B), as seguintes correlações são estabelecidas: (a) *Slice* 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10; (k) 11; (l) 12; (m) 13; e (n) 14.

Além da indicação da presença dos líquidos, e do potencial demonstrado para sua identificação, a técnica RMN proporciona a oportunidade de quantificá-los, empregando-se, para isso, programas computacionais simples disponíveis na Internet (ex. Image-Pro Plus®) e procedimentos anteriormente descritos no item 4.4 da presente Dissertação.

Para esta contabilização do volume de líquidos foi necessária a varredura tanto da face do painel (planos paralelos aos laminados de revestimento) quanto da sua espessura (ortogonais aos laminados de revestimento), conforme esquemáticos

da Figura 25. Embora os dois processos tenham sido realizados independentemente um do outro, ou seja, em estágios separados, uma vez posicionada a amostra no equipamento de RMN não houve a necessidade de movimentá-la para a obtenção das imagens segundo as duas orientações, o que constitui um ponto altamente favorável à técnica de Ressonância Magnética Nuclear.

A partir de conjuntos de fotos tais como os apresentados nas Figuras 42 e 43 (e 43'), respectivamente, que permitem a clara definição das alturas de coluna d´água no interior das células individuais dos núcleos-colméia, e de imagens tais como a exibida na Figura 35, que permite a precisa mensuração da área de seção individual de cada célula (que por sua vez possibilita o cálculo de uma média representativa da larga amostragem de dados disponíveis), foram calculadas as quantidades de cada líquido avaliado nas várias amostras de painéis avaliadas.

A Tabela 07 mostra os resultados obtidos no processo de quantificação dos materiais introduzidos intencionalmente nos vários núcleos-colméia, lembrando que, no caso das Amostras A1, A2 e A3, a quantidade inserida de cada líquido e das duas diferentes classes de resina epoxídica na forma pastosa foi exatamente de 3,0 ml.

De modo geral, conclui-se pela boa precisão proporcionada pelo imageamento por RMN aliado ao método computacional de processamento de imagens digitais na determinação do volume de líquidos aprisionados nas amostras de painéis-sanduíche.

Há obviamente de se destacar, no caso específico do querosene, e devido ao seu baixo ponto de fulgor, que ocorreu forte evaporação principalmente durante o processo de preparo da Amostra A1, e até mesmo, porém em menor escala, após a colagem do painel de revestimento, resultando em grandes perdas de material volátil.

Também, fica novamente registrada a incapacidade de imageamento RMN do material sólido (resinas epoxídicas), impedindo assim a sua quantificação volumétrica.

Tabela 07 – Cálculo do volume de líquidos e de resinas termorrígidas nas Amostras A1, A2 e A3, por intermédio de mensurações computacionais realizadas a partir da imagens digitalizadas de RMN.

Amostra	Elemento	Quantidade calculada (ml)	Diferença percentual relativamente à quantidade inserida na amostra (%)
Amostra A1	**Água**	*3,01*	*+0,33*
	Fluido hidráulico	*2,95*	*-1,67*
	Querosene	*1,18*	*-60,67*
Amostra A2	**Água**	*3,00*	*0,00*
	Resina Araldite®	---	---
Amostra A3	**Água**	*3,00*	*0,00*
	Agente degelante	*2,98*	*-0,67*
	Resina Hysol®	---	---

6 CONCLUSÕES

Imageamento por Ressonância Magnética Nuclear (IRMN) foi empregado na detecção e na quantificação de líquidos contaminantes aprisionados no interior de células de núcleos-colméia, bem como na indicação e caracterização de danos por amassamento destes núcleos de meta-aramida (Nomex®) em painéis-sanduíche estruturais revestidos com laminados sólidos confeccionados com resina epóxi reforçada com fibras contínuas de carbono.

As principais conclusões extraídas do presente estudo, aplicado à inspeção não-destrutiva de painéis-sanduiche estruturais do tipo *honeycomb* de uso aeronáutico foram:

1. A técnica de Ressonância Magnética Nuclear se mostrou, para os líquidos puros e compostos presentemente avaliados, uma poderosa ferramenta de detecção e quantificação de líquidos aprisionados nas células abertas de núcleos de painéis-sanduíche de grau aeronáutico;

2. O potencial de identificação, e, portanto, de discriminação entre estes fluidos por intermédio de ferramentas de análise computadorizada de imagens RMN, utilizando-se, por exemplo, programas de reconhecimento de padrões de cores, tonalidades e/ou texturas via redes neurais artificiais e sistemas com base em conhecimento, se mostrou bastante promissor;

3. A técnica de RMN utilizada neste estudo não permitiu a observação de imagens da resina polimérica sólida, mesmo quando esta continha cargas de elementos e compostos reconhecidamente úteis em análises de Ressonância Magnética Nucelar, e estudos mais apurados deverão ser futuramente conduzidos de modo a verificar a possibilidade de se utilizarem metodologias de imageamento de fases sólidas contidas em núcleos do tipo-colméia;

4. Danos tão pequenos quanto 1,0 mm de profundidade e 1,8 mm de diâmetro (dano denominado E no estudo em questão) puderam ser clara e inequivocamente imageados no núcleo-colméia e delineados pela técnica IRMN, desde que permeados por fluido hidrogenado (água, no caso presentemente avaliado);

5. A necessidade da presença de água no núcleo-colméia para a execução da inspeção de danos internos, 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 ou, inversamente, a conseqüência do ingresso e presença do líquido;

6. A quantificação de líquidos no interior dos núcleos-colméia por intermédio de ferramentas computacionais simples (analisadores e processadores de imagens) foi muito bem sucedida no caso dos líquidos com relativamente alto ponto de fulgor, os quais exibem boa estabilidade térmica e baixa volatilidade, quando há a manutenção da massa fluida, por períodos de tempo significativamente longos, no interior das células;

7. Idênticas conclusões se aplicam com relação à presença de outros líquidos ricos em hidrogênio (tais como hidrocarbonetos) em painéis-sanduíche estruturais do tipo-colméia de uso aeronáutico, e hão de vigorar também para estruturas similares empregadas na construção, por exemplo, de pás de turbina para captação de energia eólica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, e tendo-se como referência a literatura utilizada para a confecção desta Dissertação de Mestrado, a qual é apresentada no Capítulo 8, podem-se propor alguns estudos complementares a serem conduzidos num breve futuro:

1. Projeto, desenvolvimento e implementação de um equipamento portátil (sensor, ou sonda) de RMN para a realização de inspeções nos sítios de manutenção/reparo (*on-site*) de componentes e estruturas compósitas do tipo painéis-sanduíche, e/ou durante a própria produção/manufatura destes últimos (*in-line*), de modo a que o sistema possa gerar resultados em tempo real (*on-line*) acerca de eventuais problemas (falhas, defeitos) tais como os avaliados no presente trabalho;

2. Desenvolvimento de um programa computacional dedicado, com base em sistemas de conhecimento e/ou redes neurais artificiais, que possa ser implementado no próprio equipamento de IRMN de modo a se realizarem indicações, identificações, diferenciações e quantificações de líquidos contaminantes/impregnantes, assim como de danos internos, em painéis-sanduíche estruturais compósitos;

3. Desenvolvimento de equipamento (*hardware*) e programa computacional (*software*) integrados que possibilitem o imageamento de resina polimérica sólida para o controle de qualidade dos processos de manufatura, de manutenção e de reparo destes componentes estruturais.

REFERÊNCIAS

ABOU-KHOUSA, M.A.; RYLEY, A.; KHARKOVSKY, S.; ZOUGHI, R.; DANIELS, D.; KREITINGER, N.; STEFFES, G. (2006) “Comparison of x-ray, millimeter wave, shearography and through transmission ultrasonic methods for inspection of honeycomb composites”, Report AFRL (Air Force Research Laboratory)-ML-WP-TP-2006-477, 11 p.

ANDREUCCI, R. (2009) “Radiologia industrial”, Apostila ABENDI - Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos e Inspeções, 117 p.

ANON. (2007) “Nondestructive active testing techniques for structural components, Military Handbook”, The United States of America Department of Defense, 72 p.

ANON. (1997) “Overhaul and repair instructions”, ORI N^{o}: 76150-007, Sec. III, Revision J, United Technologies, Main Rotor Blade.

ANON (1999) “Review of damage tolerance for composite sandwich airframe structures”, DOT/FAA/AR-99/49 Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591 J. Tomblin, T. Lacy, B. Smith, S. Hooper, A. Vizzini, S. Lee, Final Report.

ANON (2004) “Damage resistance and tolerance of composite sandwich”, DOT/FAA/AR-03/75 Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591 J. Tomblin, Suresh Raju, Gabriel Arosteguy, Final Report.

ASKELAND, D.R. (1994) “The science and engineering of materials”, New York: Wadsworth Publishing Company. 1032 p.

BALASKÓ, M.; SVÁB, E.; MOLNÁR, G.Y.; VERES, I. (2005) “Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades”, Nuclear Instruments and Methods on Physics Research A, v.542, p.45-51.

BEER, F.C.; COETZER, M.; FENDEIS, D.; COSTA e SILVA, A. (2004). “Neutron radiography and other NDE tests of main rotor helicopter blades”, Applied Radiation and Isotopes, v.61, p.609-616.

CALLAGHAN P.T. (1991) “Principles of nuclear magnetic resonance microscopy”, Clarendon Press, Oxford University Press. 516 p.

CAMPBELL, F. C. (2006) “Manufacturing technology for aerospace structural materials”, Elsevier Science. 616 p.

CASTANIÉ, B.; AMINANDA, Y.; BOUVET, C; BARRAU, J.J. (2008) Core crush criterion to determine the strength of sandwich composite structures subjected to compression after impact, Composite Structures, v.86, p.243-250.

DOYUM, A.B.; DÜRER, M. (2006) “Defect characterization of composite honeycomb panels by non-destructive inspection methods”, e-Journal of Nondestructive Testing, Elsevier Science, v.7, p.390-399.

DULIEU-BARTON, J.M.; CRUMP D.A.; GRIFFITHS D. (2010) Effect of core crush on honeycomb sandwich panels, 9th International Conference on Sandwich Structures (ICSS 9), Pasadena, CA-USA.

FERABOLI, P. (2006) Damage resistance characteristics of thick-core honeycomb composite panels, 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, p.2006-2169.

FLOWER, M.H. (1995) “High performance materials in aerospace”, 1st ed., London, UK. Chapman & Hall. 382 p.

HAACKE, E.M.; BROWN, R.W.; THOMPSON, M.R.; VENKATESAN, R. (1999) “Magnetic resonance imaging: physical principles and sequence design”. 1st ed., New York, USA, Wiley, 544 p.

HEIMBS, S.; PEIN, M. (2009) “Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts”, Composite Structures, v.89, p.575-588.

HSIAO H.M.; LEES. M.; BUYNY R.A. (2006) Core crush problem in manufacturing of composite sandwich structures: mechanisms and solutions, AIAA Journal, v.44, p.901-907.

HSU, D.K. (2008) “Nondestructive inspection of composite structures: methods and practice”, In: 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.

HSU, D.K. (2009) “Nondestructive evaluation of sandwich structures: A review of some inspection techniques”, Journal of Sandwich Structures and Material, v.11, p.275-291.

IQ, G.; LEI, H.; GENG, R.; JING, P. (2008) “Recent developments of aircraft nondestructive evaluation based on advanced sensor techniques”, In: 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.

ISHIDA, H. (2009) NMR imaging of composites (Ch.3), Characterization of ccomposite materials - technology & engineering, Eds. C. Richard Brundle, Charles A. Evans, Jr., Momentum Press, 277p.

KOTSIKOS, G.; GIBSON, A.G.; MAWELLA, J. (2007) “Assessment of moisture absorption in marine GRP laminates with aid of nuclear magnetic resonance imaging”, Plastics, Rubber and Composites, v.36, p.413-418.

LAPLANTE, G.; MARBLE, A. E.; MACMILLAN, B.; SULLIVAN, P.L.; COLPITIS, B.G.; BALCOM, B.J. (2005.) “Detection of water ingress in sandwich structures: a magnetic resonance approach”, NDT & E International, v.38, p.501-507.

LI, C.; UENO, R.; LEFEBVRE, V. (2006) “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.

MALDAGUE, X. (2001). “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, 1st ed., New York, USA, John-Wiley & Sons. 684 p.

MARBLE, A.E.; LAPLANTE, G.; MASTIKHIN, I.V.; BALCOM B.J. (2009) “Magnetic resonance detection of water in composite sandwich structures”, NDT & E International, v.42, p.404-409.

MAZZOLA, A.A. (2009) “Magnetic resonance: principles of image formation and applications in functional imaging”, Revista Brasileira de Física Médica, v.3, p.117-129.

MINAKUCHI, S.; TSUKAMOTO, H.; TAKEDA, N. (2009) “Detecting water accumulation in honeycomb sandwich structures by optical-fiber-based distributed temperature measurement”. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.20, p.2249-2255.

MITTELMAN, A. (1992) “Low-energy repetitive impact in carbon-epoxy composite”, Journal of Materials Science, v.27, n.9, p.2458-2462.

NASSEH, J. (2007) “Barcos: métodos avançados de construção em composites”, Rio de Janeiro, Catálogo de livros na fonte, 363 p.

NIU, Y.C.M. (1996) “Composite airframe structures: practical design information and data”, 2nd ed., Hong Kong, Conmilit Press Ltd., 664 p.

NOLL, D. (2001) “A primer on MRI and functional MRI”, University of Michigan, 14 p.

OFFRINGA, A.; DAVIES; C.R. (1996) “Gulfstream V floors: primary aircraft structure in advanced thermoplastics”, Journal of Advanced Materials, v.27, p. 2-10.

PARK J.W., IM K.H., HSU D.K., CHIOU C.P., BARNARD D.J. (2010) “Terahertz ray nondestructive characterizations in FRP composites”, Advanced Materials Research, v.123-125, p.839-842.

POLLI, S.R. (2010) “Imagens de ressonância magnética no estudo de epilepsia induzida por pilocarpina e ácido caínico: relaxometria e volumetria”, 80 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Neurologia e Neurocirurgia. São Paulo.

QIN Y.-W. , BAO N.-K. (1996) ”Infrared thermography and its application of NDT of sandwich structures”, Optics and Lasers in Engineering, v. 25, p.205-211.

REZENDE, M.C.; BOTELHO, C.E. (2000) “O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial”, Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, p.E4-E10.

SHAFIZADEH, J.E.; SEFERIS, J.C. (2003) “Evaluation of the mechanism of water migration through honeycomb core”, Journal of Materials Science, v.38, p.2547-2555.

SHAFIZADEH, J.E.; SEFERIS, J.C.; CHESMAR, E.F.; GEYER, R. (1999) “Evaluation of the in-service performance behaviour of honeycomb composite sandwich structures”, Journal of Materials Engineering and Performance, v.8, p.661-668.

SOARES, H.N.C. (2007) “Monitoração por raios-X de trincas de fadiga em juntas rebitadas de um laminado híbrido fibra-metal Glare”, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Paulo, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. São Carlos. Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani.

STOIK C., BOHN M., BLACKSHIRE J. (2010) Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy, NDT&E International, v.43, p.106-115.

TARPANI, J.R.; SHINOHARA, A.H.; SILVA, R.R.; LACERDA, N.V.; SWINKA F.V. (2007) “Computed vs. conventional radiography for detecting fatigue cracks in riveted lap joints of aeronautical grade hybrid fiber-metal laminate Glare”, In: Proceedings of the International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR2007), Lyon, France.

TARPANI, J.R.; SHINOHARA, A.H.; SILVA, R.R.; LACERDA, N.V.; SWINKA F.V. (2008) “Digital vs. conventional radiography for detecting fatigue cracks in riveted lap joints of aeronautical grade hybrid fiber-metal laminate Glare”, Materials Evaluation, v.66, p.1279-1286.

YEH, H.Y.; NGUYEN, S.V.; YEH H.L. (2004) “Failure analyses of polymer matrix composite (PMC) honeycomb sandwich joint panels”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, v.23, p.923-939.

ZHOU, G., HILL, M., LOUGHLAN, J., HOOKHAM, N. (2006) Damage characteristics of composite honeycomb sandwich panels in bending under quasi-static loading, Journal of Sandwich Structures and Materials, v.8, p.55-90.