

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 05/09/2020.

MARIA CRISTINA CARRUPT FERREIRA BORGES

**Influência do martelamento pneumático na microestrutura de juntas
soldadas em aço ABNT 4130**

Guaratinguetá

2018

MARIA CRISTINA CARRUPT FERREIRA BORGES

**Influência do martelamento pneumático na microestrutura de juntas
soldadas em aço ABNT 4130**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Co-orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

Guaratinguetá

2018

B732i	Borges, Maria Cristina Carrupt Ferreira Influência do martelamento pneumático na microestrutura de juntas soldadas em aço ABNT 4130 / Maria Cristina Carrupt Ferreira Borges. – Guaratinguetá, 2018. 135 f : il. Bibliografia: f. 107-110 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento Coorientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho 1. Juntas soldadas. 2. Pneumática. 3. Microestrutura I. Título. CDU621.791(043)
-------	--

MARIA CRISTINA CARRUPT FERREIRA BORGES

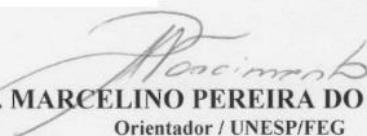
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

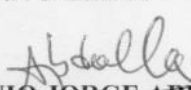
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

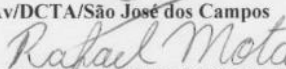
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr.ª Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
IEAv/DCTA/São José dos Campos


Prof. Dr. RAFAEL HUMBERTO MOTA DE SIQUEIRA
IEAv/DCTA/São José dos Campos

Setembro de 2018

DADOS CURRICULARES

MARIA CRISTINA CARRUPT FERREIRA BORGES

NASCIMENTO 22.03.1973 – VOLTA REDONDA / RJ

FILIAÇÃO Ataides Ferreira da Silva
Deyse Carrupt Ferreira

1998 - 2004 Curso de Graduação – Engenharia Metalúrgica
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da
Universidade Federal Fluminense (EEIMVR-UFF).

2005 - 2006 Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu*
Especialização em Gestão da Produção
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, da
Universidade Estadual Paulista (FEG-UNESP)

2010 - 2011 Licenciatura Plena em Mecânica
Programa Especial de Formação Pedagógica para as Disciplinas do
Currículo da Educação Profissional de Nível Médio.
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETPS)
Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá - SP

Ao meu marido Jorge Leonardo, por todo apoio, amor e companheirismo. E à minha filha Letícia, para que sirva de exemplo e inspiração para a sua vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por tudo que realizou em minha vida e por permitir mais esse passo na minha jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, pela dedicação, incentivo, paciência e amizade.

Às funcionárias da biblioteca e da secretaria de Pós-Graduação da FEG, em especial à Ana Cristina Figueiredo, Pâmella Benevides, Juciene Pedroso e Jaquelina Cesar, pelas orientações, pelo apoio, pela presteza e cordialidade no atendimento.

À Diretora da Fatec de Pindamonhangaba, Prof^a. Dr^a. Cristina Ayres Elisei, por permitir a utilização dos laboratórios de soldagem, metalografia e química.

Aos alunos de iniciação científica, do Curso de Tecnologia Mecânica – Processos de Soldagem da Fatec de Pindamonhangaba, Juliene Lacorte e Fabiano Assunção, pelo excelente trabalho no desenvolvimento da caracterização microestrutural do material estudado (ABNT 4130), pela parceria, pela dedicação e amizade. E aos técnicos, monitores e estagiários dos laboratórios de metalografia, química e soldagem da Fatec de Pindamonhangaba.

À Escola de Engenharia de Lorena, da Universidade de São Paulo (EEL-USP), por permitir a utilização dos laboratórios de metalografia (MEV). Ao Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa, por obter as imagens do MEV e ao técnico do laboratório de metalografia da EEL-USP, Sérgio, pela orientação e auxílio na preparação das amostras.

Agradeço ainda ao Diretor do Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv) e ao Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima, por permitirem a realização a utilização dos laboratórios. Ao Tenente Vitor Ribeiro Jardim, pela realização do ensaio de nanoindentação nas amostras e ao estagiário Cauê Carvalho pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Rafael Humberto Mota de Siqueira, pela orientação na produção das imagens metalográfica e nas diretrizes desse estudo.

À minha amiga, Prof^a. Me. Eliane da Silveira, pelo incentivo, pelo apoio e orientação.

BORGES, Maria Cristina C.F. **Influência do martelamento pneumático na microestrutura de juntas soldadas em aço ABNT 4130**. 2018. 131f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

RESUMO

Os processos de soldagem por fusão provocam alterações microestruturais importantes, nas regiões adjacentes a zona fundida, que resultam em propriedades mecânicas diferentes do restante do material que não foi afetado pelas elevadas temperaturas envolvidas no processo. O aquecimento localizado e as elevadas taxas de resfriamento fazem surgir nessa região tensões residuais que levam a redução da tenacidade à fratura e, algumas vezes, a formação de fases de elevada dureza. Isso faz dessa região uma área de fragilidade, que pode reduzir a vida útil do dispositivo. Neste trabalho, foi feita uma avaliação da influência do martelamento pneumático, aplicado para alívio de tensões residuais, na microestrutura e na dureza da zona de ligação entre a zona fundida e a zona termicamente afetada. O material escolhido foi o aço ABNT 4130, muito utilizado na indústria aeroespacial e de petróleo e gás. A espessura da chapa foi de 1,10mm, utilizada em componentes aeronáuticos. O processo de soldagem aplicado foi o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), popularmente conhecido como TIG (Tungsten Inert Gas). Para avaliar as possíveis mudanças microestruturais foram realizadas análises metalográficas por Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Para a caracterização mecânica, foi feito perfil de nanodureza na zona de ligação e perfil de microdureza ao longo da junta. As amostras foram analisadas nas seguintes condições: a) material como recebido; b) material soldado sem martelamento; c) material soldado e martelado a frio. O martelamento foi aplicado na zona de ligação. Os resultados revelaram que o martelamento pneumático promoveu uma alteração microestrutural importante na ZTA, próximo à zona de ligação.

PALAVRAS-CHAVE: ABNT 4130. Soldagem. Martelamento. Microestrutura. Nanodureza.

BORGES, Maria Cristina C.F. **Influência do martelamento pneumático na microestrutura de juntas soldadas em aço ABNT 4130**. 2018. 131f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

ABSTRACT

The fusion welding processes causes important microestructural changes on the regions near melted zone, which results in mechanical properties different from the rest of material, which was not affected by the high temperatures involved in the process. The local heating and the high cooling rates produce in this region residual stresses that lead to a reduction of fracture toughness and, sometimes, formation of high hardness phases. It makes this region an area of fragility which can reduce the service life of the device. In this study, an appreciation was made about the influence of pneumatic hammering, applied how stress relief, on hardness and microstructure of region between melted zone and thermally affected zone. The material chosen was the steel ABNT 4130, widely used in the aerospace and oil and gas industries. The thickness of plate was 1,10mm, used in aeronautical components. The welding process applied was GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), popularly known as TIG (Tungsten Inert Gas). To evaluate possible microstructural changes, was made metallographic analysis by optical (MO) and scanning electron microscopy (MEV), with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). For mechanical characterization, was made a nanohardness outline on region between melted zone and thermally affected zone and a microhardness outline through the welded joint, from melted zone until material base. The samples were analyzed under the following conditions: a) material as received; b) welded without hammering; c) welded and cold hammered. The hammering was applied in the connecting zone. The results showed that the pneumatic hammering made an important microstructural changes in the thermally affected zone, near to connecting zone.

KEY-WORDS: Welding. Hammering. Microstructure. Nanohardness.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Falhas relacionadas a acidentes aeronáuticos registrados entre 2010 e 2014.....	20
Figura 2 - Distribuição de tensões residuais durante o esmerilhamento.	23
Figura 3 - Tensão residual macroscópica.	23
Figura 4 - Tensões residuais do tipo microscópica.	24
Figura 5 - Defeitos cristalinos pontuais e lineares.....	25
Figura 6 - Ciclo técnico em soldagem.	26
Figura 7- Isotermas desenvolvidas durante a soldagem	26
Figura 8 - Distribuição da temperatura durante a soldagem.....	27
Figura 9 - Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas:	28
Figura 10 - Representação esquemática do desenvolvimento das tensões residuais durante a soldagem de uma junta de topo.	29
Figura 11- Regiões da ZTA nas ligas transformáveis	30
Figura 12 - Distribuição típica de tensões residuais em juntas de topo soldadas:.....	31
Figura 13 - Classificação dos métodos para alívio de tensões residuais	33
Figura 14 - Efeito das técnicas para alívio de tensão aplicadas em.....	35
Figura 15 - Efeito das técnicas para alívio de tensão aplicadas em juntas soldadas de filete longitudinal, livres de carregamento.	35
Figura 16 - Efeitos do martelamento na dureza superficial e na profundidade da camada encruada, para diferentes metais de adição	37
Figura 17 - Efeito do martelamento na distorção	38
Figura 18 - Classificação dos aços em função da composição e da microestrutura.	41
Figura 19 - Diagrama de equilíbrio do sistema Fe-C	42
Figura 20 - Micrografias das fases ferrita e austenita.....	43
Figura 21 - Representação esquemática da formação da perlita a partir da austenita	44
Figura 22 - Microestrutura perlítica nos aços eutetóides	45
Figura 23 - Microestrutura típica dos aços hipoeutetóides.....	45
Figura 24 - Microestrutura típica dos aços hipereutetóides.....	46
Figura 25 - Microestrutura martensítica	47
Figura 26 - Estrutura bainítica	48
Figura 27 - Formação das estruturas bainíticas	49
Figura 28 - Microestruturas bainíticas obtidas por microscopia ótica.....	49
Figura 29 - Ferritas primárias – alotriomórficas e idiomórficas.....	51

Figura 30 - Ferritas de Widmanstatten	51
Figura 31 - Ferrita alotriomórfica, ferrita idiomórfica e ferrita acicular	52
Figura 32 - Formação das ferritas na ZF	53
Figura 33 - Efeito endurecedor dos principais elementos de liga.....	55
Figura 34 - Efeito do percentual de carbono na microestrutura dos aços.....	56
Figura 35 - Influência dos elementos de liga no conteúdo de carbono e na.....	58
Figura 36- Efeito endurecedor dos carbonetos	59
Figura 37 - Microestruturas para o aço ABNT 4130.....	60
Figura 38 - Curva CCT para o aço ABNT 4130.....	63
Figura 39 - Resultados dos ensaios de tração em junta soldada em aço ABNT 4130.....	64
Figura 40 - Microestrutura presente na ZTA de uma junta soldada em aço ABNT 4130.....	64
Figura 41 - Efeitos da soldagem nas propriedades do aço ABNT 4130.....	65
Figura 42 - Etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho	66
Figura 43 - Preparação e montagem da junta para soldagem.	68
Figura 44 - Marteleiro pneumático utilizado	70
Figura 45 - Desenho representativo da chapa soldada e da posição de martelamento.....	71
Figura 46 - Linhas de indentação para o perfil de nanodureza.....	72
Figura 47 - Perfil de microdureza Vickers realizado na seção transversal.....	73
Figura 48 - Micrografias do metal base como recebido	75
Figura 49 - Micrografias da junta soldada não martelada	76
Figura 50 - Imagens da transição entre a ZF, a ZTA e o MB.....	77
Figura 51 - Microestruturas presentes na ZTA.....	78
Figura 52 - Micrografias da zona fundida.	79
Figura 53 - Micrografias da junta soldada e martelada	80
Figura 54 - Micrografias da zona termicamente afetada	82
Figura 55 - Micrografias da zona fundida	83
Figura 56 - Zona de ligação das amostras martelada e não martelada	84
Figura 57 - Evidenciação da camada gerada pós martelamento.....	85
Figura 58 - Camada formada pós martelamento	86
Figura 59 - Representação esquemática da endentação com ponta piramidal	97

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 1	87
Gráfico 2 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 2	88
Gráfico 3 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 3	89
Gráfico 4 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 4	90
Gráfico 5 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 5	91
Gráfico 6 - Espectro de energia dispersiva do ponto EDS 6	92
Gráfico 7 - Comparação entre os perfis transversais de microdureza Vickers.....	94
Gráfico 8 - Comparação entre os perfis de microdureza Vickers superficiais	95
Gráfico 9 - Valores médios de nanodureza	100

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1- Principais causas do aparecimento de tensões residuais macroscópicas.....	24
Quadro 2 - Efeitos do martelamento em diferentes metais de adição	39
Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4130.....	59
Tabela 2 - Tratamentos térmicos padrão para o aço ABNT 4130	61
Tabela 3 - Composição química das chapas utilizadas.....	67
Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração realizado no material como recebido	67
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem empregados.....	69
Tabela 6 - Análise da composição química do ponto EDS 1	88
Tabela 7 - Análise da composição química do ponto EDS 2	89
Tabela 8 - Análise da composição química do ponto EDS 3	90
Tabela 9 - Análise da composição química do ponto EDS 4	91
Tabela 10 - Análise da composição química do ponto EDS 5	92
Tabela 11 - Análise da composição química do ponto EDS 6	93
Tabela 12 - Valores médios de microdureza Vickers medidos na seção transversal das juntas soldadas	94
Tabela 13 - Valores médios de microdureza Vickers medidos na superfície das juntas.....	95
Tabela 14 - Comparação do perfil de microdureza entre as condições das juntas soldadas	96
Tabela 15 - Resultados da nanoindentação na amostra sem martelamento.....	98
Tabela 16 - Resultados da nanoindentação na amostra martelada	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	American Society for Metals
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HSLA	High-strength low-alloy
IEAv	Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica
SAE	Society of Automotive Engineers - USA
TIG	Tungsten Inert Gas
UNESP	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	19
1.3	OBJETIVOS	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	TENSÕES RESIDUAIS – ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO	22
2.2	TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO À SOLDAGEM	25
2.2.1	Desenvolvimento das tensões residuais na soldagem	27
2.2.2	Distribuição das tensões residuais na junta soldada	30
2.3	ALÍVIO DE TENSÃO POR MARTELAMENTO	32
2.3.1	Alívio de tensões por martelamento em juntas soldadas	34
2.4	O AÇO ABNT 4130.....	40
2.4.1	Classificação dos aços.....	40
2.4.2	Fases que compõem a microestrutura dos aços	40
2.4.3	O efeito da soldagem sobre a microestrutura dos aços	50
2.4.4	O desenvolvimento dos aços ARBL	53
2.4.5	Efeito dos elementos de liga nos aços ARBL	54
2.4.6	O aço ABNT 4130	59
2.4.7	O efeito da soldagem sobre o aço ABNT 4130	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	METAL BASE	66
3.2	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	67
3.2.1	Preparação da junta	67
3.2.2	Processo e procedimento de soldagem	68

3.2.3	Martelamento pneumático.....	69
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS	71
3.3.1	Caracterização mecânica do material.....	71
3.2.5	Caracterização microestrutural do material	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO MATERIAL COMO RECEBIDO	75
4.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS JUNTAS SOLDADAS.....	75
4.2.1	Junta soldada e sem martelamento	76
4.2.2	Junta soldada e com martelamento	80
4.2.3	Comparação entre as zonas de ligação das juntas martelada e não martelada....	83
4.2.4	Análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	87
4.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS JUNTAS SOLDADAS.....	93
4.3.1	Perfil de microdureza Vickers.....	93
4.3.2	Perfil de nanodureza	97
5	CONCLUSÕES.....	101
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXO A	107
	ANEXO B.....	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com Nascimento (2004), o berço-de-motor também é um componente de alta responsabilidade, submetido a carregamentos complexos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são frequentemente observadas. Devido a sua característica, os berços-de-motores de aeronaves monomotores são definidos como críticos à segurança de voo, pois sua fratura provoca a perda do controle de voo, podendo ocasionar acidentes fatais.

A vida de componentes estruturais é limitada pela sua habilidade em resistir aos efeitos das suas condições de uso que, na maioria das vezes, envolve sucessivos carregamentos e descarregamentos, que podem ocorrer sob uma frequência aleatória. Essas condições de uso fazem com que as propriedades dos mesmos sejam degradadas ao longo do tempo e essa degradação pode, eventualmente, resultar em falha. Um dos mecanismos pelos quais esse processo de degradação ocorre é a fadiga, por meio do surgimento e crescimento de trincas.

Além do berço-de-motor, partes do trem de pouso são confeccionados em aço ABNT 4130 e utilizam operações de soldagem na sua confecção, sendo estas operações as que necessitam de maiores cuidados. De acordo com o ASM Handbook (1992), as operações de soldagem para fabricação de componentes, reduzem significativamente a resistência à fadiga desses componentes.

Os processos de soldagem por fusão provocam alterações microestruturais importantes, tanto nas regiões adjacentes ao cordão de solda quanto da zona fundida (ZF), que resultam em propriedades mecânicas diferentes do restante do metal de base, que não foi afetado pelas elevadas temperaturas e taxas de resfriamento, envolvidas no processo. Segundo Neto et al (2015), a zona termicamente afetada (ZTA) e a ZF, de uma junta soldada em aço ABNT 4130, apresentam microestrutura martensítica, após a soldagem utilizando o processo *Tungsten Inert Gas* (TIG), formada pelo resfriamento rápido que ocorre durante o processo. Essa microestrutura é responsável pela elevada dureza e fragilidade.

Segundo Callister (2008), a microestrutura pode ser definida pelo número de fases presentes, pela proporção dessas fases e pela forma como estão distribuídas no material. Muitos autores relacionam a microestrutura com as propriedades mecânicas que os materiais apresentam, como resistência a tração, tenacidade, ductilidade, fragilidade etc. (PADILHA, 2000; CALLISTER, 2008; SMITH E HASHEMI, 2015).

Bultel e Vogt (2014), observaram que a microestrutura de tem forte influência na resistência a fadiga e no modo de propagação da trinca, quando avaliaram o comportamento em fadiga do aço ABNT 4130 com microestrutura bainítica e com microestrutura perlítica-ferrítica. Eles concluíram que o aço ABNT 4130 com microestrutura perlítica-ferrítica exibe maior endurecimento primário e secundário durante a sollicitação. Porém, com microestrutura bainítica, é mais estável após o estágio inicial de endurecimento. A resistência a fadiga é melhor no aço com microestrutura perlítica-ferrítica, quando a variação da tensão plástica é considerada. Mas, se for considerada a amplitude do carregamento cíclico, a liga com microestrutura bainítica é mais resistente. Com relação a nucleação e ao crescimento da trinca, o aço bainítico é mais favorável do que o perlítico-ferrítico.

Os processos de soldagem a arco, como o TIG, provocam o surgimento de tensões residuais no material, principalmente nas regiões adjacentes ao cordão de solda.

Segundo Kuo (2003), quando o material é submetido a mudanças não uniformes de temperatura, tensões residuais surgem e são chamadas de tensões térmicas. De acordo com Braga (2011), se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça soldada, ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões e/ou deformações podem se desenvolver.

A presença de tensões residuais em juntas soldadas, pode diminuir a vida útil de componentes, por torna-los suscetíveis à propagação de trincas, que o levarão à falha. Encontrar técnicas que possam ser aplicadas após a soldagem, para diminuir a presença de tensões residuais na região da junta soldada, é um desafio para a indústria de modo geral.

De acordo com Nascimento (2004), as normas aeronáuticas são extremamente restritivas e rigorosas com relação à qualidade do cordão de solda final, onde 100% das juntas soldadas são inspecionadas por meio de ensaio não destrutivo e o índice de defeitos, obrigatoriamente, tem que ser zero. Porém, a microestrutura do material é um fator que tem influência direta nas propriedades dos materiais e que não é avaliado pelos ensaios não destrutivos que são realizados nas estruturas.

Porém, o fato de uma junta soldada não apresentar defeitos, ou descontinuidade, quando avaliadas por meio de ensaios não destrutivos, não significa que a material esteja com as suas melhores condições de propriedades mecânicas, uma vez que está é afetada diretamente pela microestrutura final do material.

Nascimento (2004) sugere como trabalhos futuros, em sua tese de Doutorado, analisar os efeitos do tratamento de *shot peening*, ou de técnicas de tratamento de superfície, na resistência à fadiga de corpos de prova soldados/retrabalhados. Muitos estudos avaliam a

eficácia da aplicação de tratamentos mecânicos superficiais, como o *shot peening* e o martelamento, na melhoria das propriedades mecânicas de juntas soldadas, devido à redução de tensões residuais trativas. Mas, não há estudos abrangentes com relação ao efeito que esses tratamentos podem causar na microestrutura. Se a microestrutura da junta soldada for afetada por essas técnicas, pode haver uma melhora no tempo de vida útil dos dispositivos, uma vez que a microestrutura determina propriedades importantes nos materiais.

Para o desenvolvimento desse trabalho, o aço ABNT 4130 foi soldado e recebeu martelamento pneumático a frio, na zona de ligação entre a ZTA e a ZF, com o objetivo de avaliar a influência dessa prática na microestrutura da junta soldada.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A segurança de voo tem sido a principal preocupação das autoridades aeronáuticas em todo o mundo. Segundo o levantamento da Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC (2015), o número de acidentes aeronáuticos no Brasil caiu pelo segundo ano consecutivo, considerando dados da aviação geral, oficialmente registrados até 06 de janeiro de 2015.

De acordo com as estatísticas, em 2014 ocorreram 139 acidentes aeronáuticos. Esse número é 12,5% menor que os dados registrados em 2013, quando aconteceram 159 acidentes. Comparando com o ano de 2012, a redução em 2014 foi maior que 20,6%, pois há dois anos foram registrados 175 acidentes. O número de acidentes com fatalidades que ocorreram no Brasil em 2014 foi o menor em quatro anos.

De acordo com a ANAC (2015), a redução de acidentes ocorreu em cenário de expansão do número de movimentos de aeronaves da aviação geral, que cresceu 5,2% em 2014.

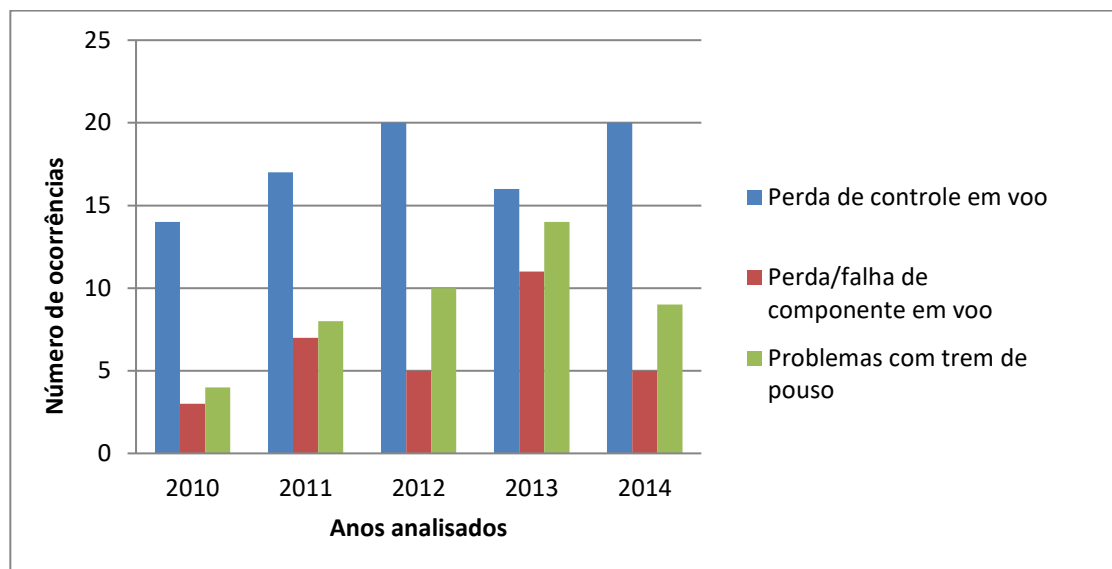
O Brasil também se manteve abaixo da média móvel – considerando-se um período de 5 anos – de acidentes fatais na aviação regular em comparação ao restante do mundo. Foram 0,19 por um milhão de decolagens em 2014, enquanto a média mundial está em 0,39 por um milhão de decolagens. (ANAC, 2015).

Embora os números sejam positivos, a Figura 1 mostra que as falhas em aeronaves brasileiras, relacionadas aos componentes confeccionados com o aço ABNT 4130 (berço-de-motor e trem de pouso) ainda apresentam números preocupantes.

Os dados mostram que, das três falhas que podem envolver o material pesquisado, a perda de controle em voo corresponde a maior ocorrência, seguida por problemas com o

trem de pouso. A perda do controle em voo pode ser provocada pela quebra do berço-de-motor.

Figura 1- Falhas relacionadas a acidentes aeronáuticos registrados entre 2010 e 2014.



Fonte: ANAC (2015)

Mesmo que, de acordo com Nascimento (2004), as normas aeronáuticas sejam extremamente restritivas e rigorosas com relação à qualidade do cordão de solda final (inspeção 100% por meio de ensaio não destrutivo), onde o índice de defeitos obrigatoriamente tem que ser zero, como dito anteriormente, estes ensaios não avaliam a tensão residual resultante do processo de soldagem e não avaliam também alterações microestruturais importantes que ocorrem no material, devido ao aquecimento e resfriamento durante a soldagem. É bem sabido que ambos os fatores, tensões residuais e microestrutura, têm forte influência sobre a propagação de trincas e sobre a resistência à fadiga, comprometendo a vida útil desses componentes.

Os levantamentos estatísticos de acidentes aéreos apresentados na Figura 1, ocorrem com aeronaves particulares, de uso agrícola e táxi aéreo. Nenhum dos dados apresentados refere-se a acidentes com aeronaves de transporte regular de passageiros. Isso nos leva a pensar que há um grande descuido com a manutenção e com a avaliação de danos que podem levar à falha, uma vez que a fiscalização sobre essas aeronaves possa não ser tão rigorosa como ocorre com aquelas que circulam nos aeroportos, transportando passageiros e cargas.

Diante desse fato, a aplicação de um procedimento pós-soldagem que seja economicamente viável e capaz de aliviar as tensões residuais na junta, será de extrema

importância para reduzir a propagação das trincas nessa região, aumentando a previsão de vida em fadiga por tolerância ao dano.

Se o procedimento se mostrar satisfatório nesse sentido, a incorporação dele no processo de fabricação de peças soldadas, que requerem confiabilidade, aumentara o tempo de vida em serviço.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar se a aplicação do martelamento pneumático, em uma junta soldada, tem influência sobre a sua microestrutura.

Para atingir esse objetivo geral, é necessário que os seguintes objetivos específicos sejam alcançados:

1. Aplicar o martelamento pneumático na zona de ligação (ZL);
2. Caracterizar a microestrutura presente na junta soldada antes e após o martelamento;
3. Avaliar a dureza da junta soldada, em escala micro e nano, antes e após a aplicação do martelamento.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo principal avaliar se o martelamento pneumático, aplicado para aliviar as tensões residuais causadas pelo processo de soldagem, teria influência sobre a microestrutura da junta soldada.

Os resultados foram satisfatórios e mostraram que o martelamento teve uma influência positiva em relação a microestrutura. O martelamento também alterou a geometria da zona de ligação, suavizando o ângulo formado entre o metal base e o cordão de solda.

Com base nesse objetivo e nos resultados apresentados, podemos concluir que:

1. O martelamento pneumático teve influência sobre a microestrutura da região onde foi aplicado. Isso pôde ser comprovado pelas imagens das micrografias, que mostraram uma mudança considerável na microestrutura da região martelada, em relação a mesma região da amostra não martelada. A redução nos valores de microdureza e nanodureza da amostra martelada, em relação a amostra não martelada, reforçam essa conclusão.
2. O efeito do martelamento sobre a dureza e a microestrutura foi superficial, não atingindo uma profundidade relevante, como mostraram os resultados dos perfis de microdureza, desenvolvidos na superfície da amostra e na seção transversal da junta, à uma determinada profundidade.
3. O martelamento produziu uma fina camada de óxido, que se formou sobre a região martelada. A formação dessa camada nos faz crer que o martelamento reduziu a energia livre, talvez devido ao realinhamento da microestrutura devido a deformação, favorecendo a combinação dos elementos de caráter metálico (Fe, Cr, Mn), com o oxigênio.

Pode-se dizer que o objetivo principal foi atingido. Porém, ficaram alguns questionamentos durante a avaliação dos resultados, que podem ser tema para trabalhos futuros.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Analisar se o martelamento aplicado a quente, nas mesmas condições empregadas nesse trabalho, terá resultados mais relevantes sobre a microestrutura e dureza.
2. Comparar a técnica de martelamento empregada nesse trabalho, como o martelamento aplicado sobre o cordão de solda, em todos os passes e em apenas no último passe.
3. Comparar a eficiência da técnica utilizada nesse trabalho, com outras técnicas de alívio de tensão, como shotpeening, vibração, ultrassom, na redução das tensões residuais e na influência sobre a microestrutura.
4. Avaliar a influência da técnica aplicada nesse trabalho sobre outras propriedades mecânicas, como resistência a fadiga e tenacidade ao impacto, por exemplo.
5. Avaliar a influência dessa técnica de martelamento sobre a resistência a corrosão sob tensão.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Properties and selection: irons steel and high performace alloys.** 10th ed. Ohio: ASM International. 1990. v.1. 2521 p.

ASM HANDBOOK. **Heat treating.** 9th ed. Ohio: ASM International. 1991. v. 4. 2173 p.

ASM HANDBOOK. **Welding, brazing and soldering.** 10th ed. Ohio: ASM International. 1992. v. 6. 2873 p.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures.** 9th ed. Ohio: ASM International. 1993. v. 9. 1627 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **QW-492:** art. IV - section IX: qualification standard for welding, brazing and fuzing procedures; welders; brazers; and welding, brazing and fuzing operators. New York, 2015.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in steels:** transformations, microstructure and properties. 2nd ed. London: IOM Communications Ltd., 2004.

BERGAMO, R.T. **Avaliação da eficácia do martelamento para o alivio de tensões em solda de aço.** 2006. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89478?locale-attribute=pt_BR>. Acesso em: 30 jun. 2017.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de soldagem TIG-GTAW.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

BRAGA, E.D. M. A vibração com elemento de alívio de tensão residuais em cordão de solda. In: WORKSHOP DE VIBRAÇÃO ACÚSTICA DA REGIÃO NORTE, Tucuruí, 1., 2011. **Anais...** Tucuruí, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. **Dados e estatísticas.** Brasília: ANAC, 2015. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

BUENO, R. S. **Análise microestrutural de junta soldada de aço baixa liga.** 2010. 77 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003623.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2017

BULTEL, H.; VOGT, J. Influence of heat treatment on fatigue behaviour of 4130 AISI steel. **Procedia Engineering,** 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810001001#>>. Acesso em: 07 jan. 2015.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 912 p.

CARMO, D.C. **Análise de tensões por ultra-som em barra de ação sob flexão.** 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em:

<<http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/-7/2006-1/463--440/file>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

CHUVAS, T.C. **Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012. Disponível em <<http://www.mec.uff.br/pdfteses/TatianedeCamposChuvass2012.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda. 2013. v. 3. 388p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p.

DEVAID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 60 p.

FONSECA, M.P.C. **Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga**. 2000. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pt/teses-e-dissertacoes>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

HACINI, L.; VAN LE, N.; BOCHER, P. Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

KOPSOV, I.E. Influence of hammer peening on fatigue in high-strength steel. **International Journal of Fatigue**, v.13, n. 6, p. 479-482. 1991. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014211239190483F>>. Acesso em: 07 jan. 2015.

KIRKHOPE, K. J. Weld detail fatigue life improvement techniques: part 1: review. **Marine Structures**. v. 12, n. 6, p. 447-474, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833999000131>>. Acesso em: 07 jan. 2015.

KWOFIE, S. Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief. **Materials science and engineering**. v. 516, p. 154-161, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509309003311>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

LACORTE, J. O. et al. Caracterização microestrutural e mecânica de junta soldada em aço médio carbono e baixa liga. In: INIC – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2016, São José dos Campos. **Anais...** Univap: São José dos Campos, 2016. Disponível em: <www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/1043_1349_01.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2018.

LAPTEC– Laboratório de Plasmas Tecnológicos. **Grupo de plasmas e materiais**. Campus Experimental de Sorocaba/UNESP, 2004. Disponível em: <<http://www2.sorocaba.unesp.br/gpm/HOME.htm>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

LIANG, W.; MURAKAWA, H.; DENG, D. Investigation of welding residual stress distribution in a thick-plate joint with an emphasis on the features near weld end-start. **Materials and Desing**, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 07 jan. 2015.

LIMA, F. B. **Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41XX: uma abordagem quantitativa**. 2006. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica - Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/37503116/FlaviaBarrosLima-aco-de-baixa-liga>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

MACEDO, Q. M. **Efeito dos parâmetros de austenitização sobre a microestrutura e as propriedades do aço SAE 4130 submetido a tratamentos térmicos por indução eletromagnética**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <<http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2007/efeito%20dos%20parametros.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

MARQUIS, G. B.; BARSOUM Z. A guideline for fatigue strength improvement of high strength steel welded structures using high frequency mechanical impact treatment. In: FATIGUE DESIGN CONFERENCE, 5., 2013, Senlis - France. **Proceedings...** Senlis, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. 2011. 27 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <www.demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2015.

MODENESI, P. J, MARQUES, P.V, SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. 2012. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <www.demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2015.

NASCIMENTO, M.P. **Efeitos de sucessivos reparos de solda TIG na resistência à fadiga alternada do aço ABNT 4130 empregado em aeronaves monomotores**. 2004. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

PADILHA, A.F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 2000. 352 p.

GRANT, P. V.; LORD, J.D.; WHITEHEAD, P.S. Measurement good practice guide: the measurement of residual stresses by the incremental hole drilling technique. **National Physical Laboratory**, v. 53, n. 2, 2006. Disponível em: <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/Good_Practice_Guide_53_-_Issue_2.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Amgh, 2015. 784 p.

SOUZA NETO, F. et al. **An analysis of the mechanical behavior of AISI 4130 steel after TIG and laser welding process**. *Procedia Engineering* 114. pp 181–188. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815016963>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

SINDO KUO. **Welding metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2003. 480 p.

SOUSA, D. A.. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2012. Disponível em: <https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Diogo_A_de_Sousa.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia ótica**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94429/souza_ga_me_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2018.

VOORT, G.V. **Metallography: principles and practice**. 4th ed. New York: ASM International, 2007. 751p.

ØYSTEIN GRONG. **Metallurgical modelling of welding**. 2nd ed. Norway: Norwegian University Science and Technology, Department of Metallurgy, 1997. 652 p.