

NATÁLIA CHAVES OSIDACZ

PRISCILA FOLKL

**ANALISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL EM ESTRUTURAS TUBULARES
AERONÁUTICAS SOLDADAS DE AÇO ABNT 4130**

Guaratinguetá

2011

NATÁLIA CHAVES OSIDACZ

PRISCILA FOLKL

ANALISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL EM ESTRUTURAS TUBULARES
AERONÁUTICAS SOLDADAS DE AÇO ABNT 4130

Trabalho de Graduação apresentado ao
Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais da Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá

2011

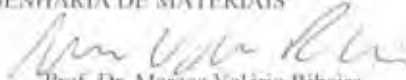
O82a	Osidacz, Natália Chaves Análise mecânica e microestrutural em estruturas tubulares aeronáuticas soldadas de aço ABNT 4130 / Natália Chaves Osidacz, Priscila Folkl. – Guaratinguetá: [s.n], 2011 43 f.: il. Bibliografia : f. 41-43 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011 Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Aço 2. Microestrutura 3. Folkl, Priscila I .Título. CDU 669.14
------	---

ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL EM ESTRUTURAS TUBULARES
AERONÁUTICAS SOLDADAS DE AÇO ABNT 4130

NATÁLIA CHAVES OSIDACZ
PRISCILA FOLKI

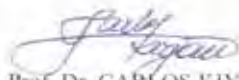
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. CARLOS KIYAN
UNESP-FEG


Ma. MARIANA CASSIANO FERREIRA
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

NATÁLIA CHAVES OSIDACZ

NASCIMENTO	04.11.1985 – SANTOS/SP
FILIAÇÃO	Maria Cristina Chaves Osidacz Bohdan Osidacz
1990/1998	Ensino Fundamental Colégio Santa Cecília – Santos/SP
1999/2002	Ensino Médio Colégio Reino de Educação Básica – Serra Negra/SP
2006/2011	Curso de Graduação Engenharia de Materias – UNESP/FEG

DADOS CURRICULARES

PRISCILA FOLKL

NASCIMENTO	09.02.1985 – SÃO BERNARDO DO CAMPO/SP
FILIAÇÃO	Lais Chang Obara Folkl Roberto Folkl
1991/2000	Ensino Fundamental Colégio Ábaco – São Bernardo do Campo/SP
2000/2003	Ensino Médio Colégio Objetivo ABC – São Bernardo do Campo/SP
2006/2011	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – UNESP/FEG

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pelas nossas vidas, inteligência, pelas famílias e um agradecimento especial às amigas-irmãs da Espelunca.

Ao nosso orientador *Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento*, que jamais nos deixou desanimar e que sempre se preocupou conosco. Sem seu auxílio e dedicação jamais teríamos terminado este trabalho.

Aos nossos pais, por nos terem dado suporte durante a vida toda, não apenas financeiro, mas também psicológico, principalmente nas horas que mais necessitávamos.

Agradecemos também a todos os funcionários e professores do campus da UNESP de Guaratinguetá. Aos funcionários da biblioteca pela delicadeza e compreensão nos dadas. Aos funcionários da limpeza por sempre deixarem a faculdade em ordem. E aos professores por nos ensinarem com tanto carinho e dedicação.

Não poderíamos esquecer-nos de agradecer os técnicos *Celio José de Souza, Wilson Roberto Monteiro, Domingos Hasmann Neto e José Manoel Bernardes* que nos ajudaram neste projeto, pois sem eles jamais teríamos feito a parte prática.

OSIDACZ, N. C.; FOLKL, P. **Avaliação das propriedades mecânicas de tubos, de aço AISI 4130, normalizado e cru, e análise microestrutural destes tubos e de suas juntas soldadas com um retrabalho.** 2011. 46 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Berços de motores de aviões têm geometrias complexas, necessitando de diferentes junções entre diferentes tubos com angulações variáveis por soldagem TIG. Além de suportarem o motor em balanço, estes componentes mantêm fixo o trem de pouso do nariz em outra extremidade nas aeronaves T-25 Universal e T- 27 Tucano (EMBRAER/FAB). São, por isso, considerados críticos à segurança de vôo e, por esta razão, as normas aeronáuticas são muito rígidas em sua fabricação, impondo um cordão de solda final com “zero defeito”. Essas estruturas podem conter retrabalho e reparos de solda, sendo que os efeitos disso não são computados. Neste trabalho foi analisado o aço 4130 normalizado e cru, de tubos para berço de motor foram realizadas. Primeiro a microscopia e microanálise do aço base e posteriormente da junta soldada. Ensaio mecânico de tração foi realizado para avaliar a diferença entre propriedades mecânicas dos materiais com tratamento térmico de normalização e sem esse tratamento. Constatou-se que o material normalizado possui uma microestrutura mais homogênea que o material ao normalizado.

PALAVRAS-CHAVE: Aço AISI 4130. Tração. Microestrutura. Microanálise. Tubo de aço normalizado. Tubo de aço cru.

OSIDACZ, N. C.; FOLKL, P. **Evaluation of mechanical properties of pipes, steel AISI 4130, standardized and raw, and microstructural analysis of these pipes and their welded joints with one rework.** 2011. 46 f. Graduation Work (Degree in Materials Engineering) – Engineering College of Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

Airplane Motor Cradles have a complex geometry, since they require different combinations between different tubes and TIG welded in several angles. In T-25 aircraft and Universal T-27 Tucano (EMBRAER / FAB), besides having to bear the engine balance, these components maintain fixed the nose landing gear in another extremity. They are considered critical to flight safety, and for this reason, the aviation standards are extremely rigid in their production, imposing a "zero index" of defects on the final weld metal quality. These structures may be containing an historical of welding repairs, whose effects on their structural integrity are not computed. In this work we analyzed the standardised AISI 4130 steel and the raw steel of tubes to the Airplane Motor Cradles. First of all, microscopy and microanalysis of the base steel, then we analyzed the effects of the TIG weld. Tensile testing was conducted to measure the difference between the mechanical properties of standardised steel and without this treatment.

KEYWORDS: AISI 4130 steel. Tensile testing. Microscopy. Microanalysis. Standardised steel. Raw steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Berço-do-motor da aeronave	17
Figura 2: Regiões da ZAC de uma solda monopasse [5]	22
Figura 3: Corte 1 da amostra para embutimento	25
Figura 4: Corte 2 da amostra para embutimento	25
Figura 5: Isomet 1000 durante o corte da amostra	25
Figura 6: Corte do Metal de acordo com a Norma ASTM E 8M	26
Figura 7: Corpos de prova para ensaio de tração	26
Figura 8: Lubrificação do equipamento de embutimento	27
Figura 9: Cortes para embutimento	27
Figura 10: Encaixe da peça solta de metal para o embutimento com bom acabamento para o equipamento Arotec	27
Figura 11: Encaixe da peça solta de metal para o embutimento com bom acabamento para o equipamento Pantec	27
Figura 12: Equipamento para Embutimento Arotec (modelo PRE 30M)	28
Figura 13: Solda embutida superficialmente e transversalmente	28
Figura 14: Equipamento Shimadzu	30
Figura 15: Equipamento INSTRON	30
Figura 16: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 200 vezes (Ataque Nital)	31
Figura 17: Microestrutura 2 para o aço normalizado em corte transversal, com ampliação de 200 vezes (Ataque Nital)	31
Figura 18: Microestrutura 2 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 500 vezes (Ataque Nital)	31
Figura 19: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 1000 vezes (Ataque Nital)	31
Figura 20: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte superficial, com ampliação de 200 vezes	31
Figura 21: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 200 vezes	32

Figura 22: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 500 vezes	32
Figura 23: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 500 vezes	32
Figura 24: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 1000 vezes	32
Figura 25: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 1000 vezes	32
Figura 26: Microestrutura 1 para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes	32
Figura 27: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 200 vezes	32
Figura 28: Microestrutura 1 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 500 vezes	33
Figura 29: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 500 vezes	33
Figura 30: Microestrutura 1 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 1000 vezes	33
Figura 31: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 1000 vezes	33
Figura 32: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 200 vezes.....	33
Figura 33: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes.....	33
Figura 34: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes.....	34
Figura 35: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes.....	34
Figura 36: Ataque Nital na Solda do Aço Cru com em corte transversal aumento de 200 vezes	34
Figura 37: Ataque Nital na Solda do Aço Cru em corte transversal com aumento de 1000 vezes	34
Figura 38: Ataque Nital na Solda do Aço cru em corte transversal com aumento de 500 vezes	34

Figura 39: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 200 vezes.....	35
Figura 40: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 500 vezes.....	35
Figura 41: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 1000 vezes e polarizada	35
Figura 42: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 200 vezes.....	35
Figura 43: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes.....	35
Figura 44: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes.....	36
Figura 45: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes.....	36
Figura 46: Microestrutura para o aço em corte superficial normalizado, com ampliação de 200 vezes.....	36
Figura 47: Microestrutura para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 200 vezes.....	36
Figura 48: Microestrutura para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 500 vezes.....	36
Figura 49: Microestrutura para o aço em corte superficial normalizado, com ampliação de 1000 vezes.....	36
Figura 50: Microestrutura polarizada para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 500 vezes	37
Figura 51: Microestrutura polarizada para o aço em corte superficial, normalizado, com ampliação de 200 vezes	37
Figura 52: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes	38
Figura 53: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes	38
Figura 54: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes	38
Figura 55: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes	38

Figura 56: Microestrutura para o aço normalizado em corte superficial, com ampliação de 200 vezes.....	38
Figura 57: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes	38
Figura 58: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes	39
Figura 59: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes	39
Figura 60: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes	39

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	OBJETIVO	14
1.2.	MOTIVAÇÃO.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1.	Aço AISI 4130	15
2.2.	Berço do Motor	17
2.3.	Solda TIG.....	19
2.4.	Metalografia, Micrografia e Microanálise	20
2.4.1.	Classificação dos Microconstituintes do Metal de Solda (VOOT, 2011; NASCIMENTO, 2004).....	21
2.5.	Ensaio de Tração	22
2.6.	Fadiga em Aeronaves.....	23
3.	Materiais e Métodos	24
3.1.	Materiais e Equipamentos.....	24
3.2.	Métodos	25
3.2.1.	Corte	25
3.2.2.	Embutimento	26
3.2.3.	Lixamento.....	29
3.2.4.	Polimento.....	29
3.2.5.	Ataque	29
3.2.6.	Microscopia e Microanálise Amostral.....	30
3.2.7.	Ensaio de Tração	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1.	Ataque Nital	31
4.1.1.	Em Aço Base	31

4.1.2. Na Solda	34
4.2. Ataque Picral.....	35
4.2.1. No Aço Base:.....	35
4.2.2. Na Solda	38
4.3. Tração	39
5. conclusão.....	40
6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	41

1. INTRODUÇÃO

O aço aeronáutico AISI 4130 pertence à família de aços 41XX, sendo um aço de baixa liga e alta resistência mecânica a altas temperaturas, chamado aço ultra-alta resistência, capaz de fornecer um limite de escoamento mínimo de 1380 MPa.. É uma liga de aço cromo-molibdênio que possui diversos usos, geralmente aplicado em situações críticas onde a integridade da peça é muito importante, como por exemplo, em aeronaves. Sendo assim, as maiores exigências para este tipo de aço são os requisitos de resistência mecânica, ductilidade adequada, resistência ao impacto e tenacidade, resistência à fadiga e boa soldabilidade.

O uso em aeronaves inclui os berços de motores de aviões, estruturas com geometria complexa soldadas em vários ângulos. Este equipamento suporta o motor do avião e mantém fixo o trem de pouso do nariz fixo. Tem uma responsabilidade muito grande, submetido a ciclos de carregamentos intensos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são constantemente observadas, sendo crítico à segurança de voo.

O processo de solda utilizada para a fabricação dos berços de motor de aviões é a solda TIG (Tungsten Inert Gas). Este método consiste na utilização um eletrodo de tungstênio não-consumível e cria um arco junto com a peça a ser soldada, produzindo uma solda de alta qualidade. É o processo mais comum na fabricação de estruturas aeronáuticas.

Neste trabalho foi realizado o estudo do comportamento aço AISI 4130 em ensaio de tração, análise de sua microestrutura e qualquer modificação que a soldagem TIG pode causar.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar as alterações microestruturais decorrentes do processo de soldagem TIG em aço aeronáutico AISI 4130 usado em berços de aviões. Como este aço é de utilização crítica e sofre cargas cíclicas constantes, é de extrema importância a determinação dos efeitos provocados pela solda na qualidade estrutural desse componente aeronáutico, como também conhecer a microestrutura do material sem solda, e este estudo está relacionado com estas necessidades. A primeira parte do trabalho é fazer ensaios de tração no aço base, para então estudar a microestrutura do aço base e os danos que a solda pode causar em sua integridade. Assim, os resultados obtidos ao final desta pesquisa serão analisados em microscópio óptico e estes dados fornecerão conhecimentos de microestrutura do aço aeronáutico e da solda.

1.2. MOTIVAÇÃO

Uma aeronave está sujeita a uma série de influências que podem afetar a sua capacidade estrutural em suportar os rigores do voo. O aço estudado é um aço de ultra-alta resistência, muito utilizado em equipamentos aplicados pela indústria aeronáutica, o que torna seu estudo muito importante para a avaliação da vida útil da estrutura da aeronave. Sendo assim, o processo de solda deste componente precisa de análises e cuidados, e este estudo está ligado a esta necessidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aço AISI 4130

A família de aços 41XX engloba aços de baixa liga e alta resistência, como especificado pelo instituto americano do ferro e do aço (AISI). Os elementos liga incluem cromo e molibdênio, e em consequência estes materiais são chamados frequentemente de aços “chromoly”. Embora essa classe de aço contenha cromo, não é uma quantidade suficientemente grande o bastante para fornecer a resistência à corrosão vista em aços inoxidáveis.

Uma das mais importantes características dos aços da classe 41XX é sua capacidade de serem endurecidos por carburação de superfície. O núcleo do material mantém suas propriedades, enquanto na superfície se pode reduzir o desgaste e a propagação de trinca na peça. Isso torna este tipo de aço excelente para uso em engrenagens, pinos de pistão e virabrequins (OBERG et al., 2004).

A família de aços baixa liga tem a característica ultra-alta resistência, mas essa designação não é regulada pois ainda não existe um consenso universal que determine o nível de resistência para tal termo. Aços com limites de resistência mecânicos cada vez mais altos são foco de estudos atuais, portanto a faixa de resistência para a qual esta designação é utilizada aumenta com frequência (QUITES, 2004).

O aço tipo AISI 4130 é conhecido por suas propriedades de alta resistência mecânica a altas temperaturas. É uma liga de aço cromo-molibdênio, usada em esqueletos de carros de corrida, quadros de bicicletas e motos, estruturas de tubulações e até usos petroquímicos [OBERG et al. 2004; METAL FORMING MAGAZINE ARCHIVE, 2001]. Recentemente tem sido sugerido o emprego desse aço na fabricação de eixos ferroviários, devido suas melhores propriedades mecânicas (SODRÉ, 2008). São usados também em aeronaves, e essa classe é, muitas vezes, referida como a classe “da tubulação do avião” (OBERG et al., 2004).

Quando normalizado, é utilizado em berços de motores de aviões. Essa estrutura tem uma grande responsabilidade, sendo crítico à segurança de voo, pois se fraturada pode causar descontrole da aeronave até acidente fatal (NASCIMENTO et al, 2001; NASCIMENTO et al. 2002).

Normalmente, esta liga contém cerca de 0,30% C, colocando-o no final da lista das ligas de baixo carbono, onde a solda começa a se tornar difícil. A adição de cerca de 0,75% Cr e 0,25% Mo fornece uma força adicional de resistência à tração em temperaturas altas (QUITES, 2004).

Aços ultra-alta resistência mecânica são aqueles capazes de fornecer um limite de escoamento mínimo de 1380 MPa (METALS HANDBOOK, 1990). As maiores exigências para este tipo de aço são os requisitos de resistência mecânica, ductilidade adequada, resistência ao impacto e tenacidade, resistência à fadiga e boa soldabilidade (PICKERING, 1978).

Este tipo de aço pode ser usado em temperaturas de até 370°C, acima dela sua resistência mecânica cai rapidamente com o aumento da temperatura (METALS HANDBOOK, 1990). Dependendo do tratamento térmico a microestrutura obtida é diferente, podendo ser ferrito-perlítica, martensítica temperada ou até mesmo bainítica (BULTEL & VOGT, 2010). O AISI 4130 está sujeito a uma transição no comportamento de dúctil para frágil a baixas temperaturas. Este aço não é suscetível a fragilização ao revenido e pode ser nitretado. O forjamento pode ser realizado entre 1100 e 1200°C, sendo que a temperatura de acabamento não deve ser inferior a 980°C (METALS HANDBOOK, 1990).

Os seguintes padrões de tratamentos térmicos podem ser aplicados (METALS HANDBOOK, 1991):

- 1) Normalização: Se aquece a temperatura de austenização do aço e mantém no mínimo por uma hora ou 15 a 20 minutos a cada 25 mm de espessura máxima da seção. Resfriamento ao ar.
- 2) Recozimento: Se aquece entre 830 e 870°C e mantém por uma hora para cada 25 mm de espessura da seção, seguido de resfriamento ao forno a uma taxa de 15°C/h, até atingir uma temperatura entre 480 e 540°C, após resfriar ao ar.
- 3) Têmpera: Se realiza a austenização do aço a uma temperatura entre 845 e 870°C, e mantém no mínimo por uma hora ou 15 a 20 minutos a cada 25 mm de espessura máxima da seção (tempo de encharque) e então realiza a têmpera em água, ou se austeniza a uma temperatura entre 860 e 885°C, se espera o tempo de encharque e então se realiza têmpera em óleo.

4) Revenimento: Realizado na temperatura de 200 a 700°C, se espera o tempo de encharque e então se resfria em água ou ao ar. A temperatura de revenimento e o tempo dependem, principalmente, da dureza ou do nível de resistência mecânica desejada.

5) Esferoidização: Se aquece entre 760 e 775°C e mantém a temperatura por 6 a 12 horas. Depois, se esfria lentamente.

2.2. Berço do Motor

Os berços dos motores de aviões possuem uma geometria complexa, envolvendo junções de diferentes tubos e em vários ângulos, por soldagem. Além de suportar o motor em balanço, estes equipamentos também possuem a função de manter fixo o trem de pouso do nariz em outra extremidade. São de fundamental importância e, por esse motivo, as normas aeronáuticas são extremamente rígidas em sua fabricação, principalmente no controle e na qualidade do processo de soldagem, cujos cordões de solda devem ser inspecionados em 100% por meio de ensaios não destrutivos (NASCIMENTO et al, 2001; NASCIMENTO et al. 2002).



Figura 1: Berço-do-motor da aeronave

A ocorrência de falha estrutural em voo normalmente está ligada à fadiga do material, erro de projeto ou sobrecarga aerodinâmica (GORANSON, 1993). Muitas das fraturas de materiais por fadiga são decorrentes de projetos inadequados ou entalhes gerados durante a fabricação ou a manutenção das aeronaves (WENNER & DRURY, 2000). Erros em operações de manutenção, especialmente, têm resultado em sérios problemas de segurança e causas de acidentes fatais (LATORELLA & PRABHU, 2000).

Uma aeronave está sujeita a uma série de influências que podem afetar a sua capacidade estrutural em suportar os rigores do voo. Uma vez que um dano estrutural ou uma falha em potencial é identificado, o setor de manutenção deve ser capaz de avaliar a sua extensão, determinar a sua causa, tomar a ação corretiva necessária e implementá-la. Em muitos casos, a ação corretiva necessária se traduz na forma de um reparo estrutural (GARCIA, 1998).

O berço-de-motor é um componente com uma responsabilidade muito grande, submetido a ciclos de carregamentos intensos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são constantemente observadas. São definidos como críticos à segurança de voo, pois sua fratura provoca a perda do controle de voo, podendo ocasionar acidentes fatais. Confeccionado de tubos do aço AISI 4130, o berço-de-motor tem nas operações de solda o processo que necessita mais análises e cuidados. Assim, as normas aeronáuticas são extremamente restritivas e rigorosas em relação à qualidade do cordão de solda final (inspecionado em 100%), cujo índice de defeitos obrigatoriamente tem de ser “zero”. Desta forma, em atendimento às normas, mesmo durante a fabricação de componentes novos pode-se obter estruturas aeronáuticas soldadas isentas de defeitos e aprovadas por ensaios não destrutivos, porém contendo históricos de re-soldagens, cujos efeitos na integridade do conjunto não são conhecidos. Por outro lado, estas estruturas também são submetidas a reparos de solda ao longo de sua vida útil, a solda de manutenção (NASCIMENTO et al, 2001; NASCIMENTO et al. 2002).

O controle do processo de solda em aeronaves é fundamental, já que esses componentes são submetidos a cargas cíclicas. O processo de fadiga é cumulativo e a falha pode ocorrer sem que ninguém espere. O processo é influenciado pelo meio agressivo e pela temperatura (HOO, 2002). Com o tempo ocorre o enfraquecimento progressivo e localizado, decorrente da aplicação de cargas, podendo resultar na ruptura do material após certo número de ciclos de carga (DIETER, 1981). Em um processo de falha por fadiga em metais, depois de transcorrida a nucleação, formam-se microtrincas que coalescem e crescem até tornarem-se macrotrincas e propagarem-se até a ruptura do componente (VOORWALD & PASTOUKHOV, 1994). Muitos fatores influenciam o processo de fratura, como o acabamento da superfície, concentradores de tensão, tensões residuais, estrutura, fabricação ou tratamentos superficiais (DIETER, 1981). Esses fatos tornam o estudo da microestrutura do metal, da solda e da re-solda fundamental para o conhecimento da vida útil do material.

2.3. Solda TIG

Soldagem é uma tecnologia importante de união, sendo altamente dependente da escolha do processo, consumíveis usados, parâmetros operacionais e proficiência do operador. Em uma peça soldada, três regiões principais devem ser observadas: a região do metal base, a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de solda. O calor do processo pode variar muito com o tipo de soldagem e é influenciado pela espessura das peças a serem unidas (VOOT, 2011).

A fabricação de estruturas metálicas requer o uso extensivo de vários processos de soldagem. A tecnologia de soldagem a ser utilizada é uma parte importante no desenvolvimento de um material. A soldagem do tipo TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza um eletrodo de tungstênio não-consumível e cria um arco junto com a peça a ser soldada. Este processo é uma das tecnologias mais populares de soldagem de materiais finos, pois produz soldas de alta qualidade (CHERN et al., 2010).

O processo de soldagem TIG oferece as seguintes vantagens: elevada taxa de deposição, alta manobrabilidade, grande disponibilidade, baixo custo, compatibilidade com uma ampla gama de materiais, endurecimento seletivo, parte mínima distorcida e profundidade controlada (CHEN, 2009; TOFFOLO, 2008). Tem sido relatado que este processo pode ser efetivo no tratamento de superfícies, quando aditivos apropriados são utilizados (CHEN, 2009). No processo de modificação das propriedades de superfície, a soldagem TIG pode oferecer um endurecimento, e com este método é possível obter superfícies mais duras e melhores em termos de desgaste. Sendo assim, o processo de modificação de superfície tem sido muito utilizado para reparar superfícies desgastadas de peças em várias aplicações industriais, como mineração, química e indústrias de petróleo (CELIC et al., 2011). O gás inerte de tungstênio é o processo mais comum na fabricação de estruturas aeronáuticas, sendo apropriado para soldar metais finos, permitindo o controle das principais variáveis e resultando em alta qualidade, quase isento de defeitos nas juntas soldadas (ALVES, 2010).

Apesar de ser amplamente utilizada e de oferecer as vantagens citadas, também existem alguns problemas associados a este tipo de solda, como porosidade, carência de fusão, penetração incompleta e rachaduras (ALVES, 2010).

A microestrutura final do metal de solda depende do teor de elementos de liga, da concentração, da composição química, da distribuição e do tamanho de inclusões não-metálicas, da microestrutura de solidificação, do tamanho de grão e do ciclo térmico de soldagem. O aço AISI 4130 tem em sua composição cromo e molibdênio, que melhoram a tenacidade do metal de solda. Esses elementos de liga atrasam a transformação da austenita,

baixando sua temperatura de decomposição. O molibdênio favorece a reação bainítica e, desde que o manganês seja superior a 0,8%, aumenta o teor de ferrita acicular, característica que melhora as propriedades mecânicas. Deve se lembrar que a quantidade ideal de ferrita acicular deve estar no intervalo de 65 a 80% (BRANDI, 2000).

Na ZTA ocorre o crescimento de grão, o que aumenta a temperabilidade dos aços e favorece os microconstituintes formados em temperaturas baixas, inferiores a 500°C. Perto da zona de crescimento de grão, existe outra região onde o grão é refinado, diminuindo a temperabilidade do aço nessa região. A ZTA de um aço-carbono, como o AISI 4130, pode ser descrita da seguinte forma: região de crescimento de grão, refino de grão, transformação parcial e de esferoidização de carbonetos, além do metal-base não afetado (BRANDI, 2000).

2.4. Metalografia, Micrografia e Microanálise

A metalografia é um processo de preparação de alguns metais para a microscopia e microanálise, onde será possível distinguir os microconstituintes do metal (NEVES et al., 2006). A microestrutura de um metal está diretamente ligada às propriedades mecânicas do material metálico, por esta razão é de grande importância identificar quais são os microconstituintes de um aço e quais são suas mudanças após soldagem e/ou deformação (CALLISTER, 2003).

Materiais extrudados sem nenhum tratamento térmico possuem grãos alongados, enquanto materiais extrudados com normalização possuem grãos mais bem definidos e redondos. O estudo dos grãos é de grande importância para que o produto esteja nas especificações do cliente (ABUD et al., 2004).

Após a preparação metalográfica, é necessário fazer um ataque químico capaz de revelar as fases presentes no aço. O ataque nital, ácido nítrico em álcool, revela contorno de grão, ferrita em cores claras e estruturas com cementita na cor escura. O ataque picral, ácido pícrico em álcool, permite uma revelação mais detalhada de martensita, perlita e bainita.

A microscopia óptica é capaz de identificar os grãos e as fases presentes, com o uso de programas específicos para este estudo, podem-se contar grãos, identificar constituintes, entre outros.

Quando se solda um metal, mudanças microestruturais ocorrerão, podendo fragilizar o material, e este fato é de extrema importância em um material usado em estruturas de segurança, sendo assim, os efeitos da solda devem ser estudados (VOOT, 2011). A zona termicamente afetada (ZTA) e a região do metal de solda são as principais regiões que alteram as propriedades mecânicas de um material.

Ao contrário do metal de solda, na zona termicamente afetada do metal-base não é possível a mudança de composição química; é necessário escolher aços com teores de carbono e elementos de liga capazes de atender as propriedades mecânicas exigidas no projeto. Na ZTA ocorre um crescimento de grão, aumentando a temperabilidade dos aços e favorecendo os microconstituintes formados em temperaturas baixas (inferiores a 500°C). Adjacente à zona de crescimento de grão existe outra região onde ocorre o refino de grão, diminuindo nesta região a temperabilidade do aço. Existem outras regiões na ZTA que possuem curvas de resfriamento contínuo diferentes da curva do material-base. A ZTA de um aço-carbono pode ser decomposta nas seguintes regiões: de crescimento de grão; refino de grão; transformação parcial e de esferoidização de carbonetos, além do metal-base não afetado (NASCIMENTO, 2004).

2.4.1. Classificação dos Microconstituintes do Metal de Solda (VOOT, 2011; NASCIMENTO, 2004)

Ferrita Primária: Pode ocorrer em ferrita de contorno de grão ou ferrita poligonal intragranular.

Ferrita Acicular: É constituída por pequenos grãos de ferrita não alinhados no interior do grão de austenita primária. A relação comprimento/largura deve ser menor que 4:1 para duas ripas adjacentes ou não-alinhadas.

Ferrita com Segunda Fase: Pode ocorrer sob duas formas: ferrita com segunda fase alinhada, onde ocorrem duas ou mais ripas adjacentes e a relação comprimento/largura é maior que 4:1; e ferrita com segunda fase não alinhada, a qual circunda regiões de ferrita acicular.

Agregado ferrita/carboneto: Estrutura de ferrita fina e carbonetos, que pode ser uma precipitação interface, como perlita.

Martensita: Este microconstituente pode apresentar-se sob duas formas: martensita ripada ou martensita maclada.

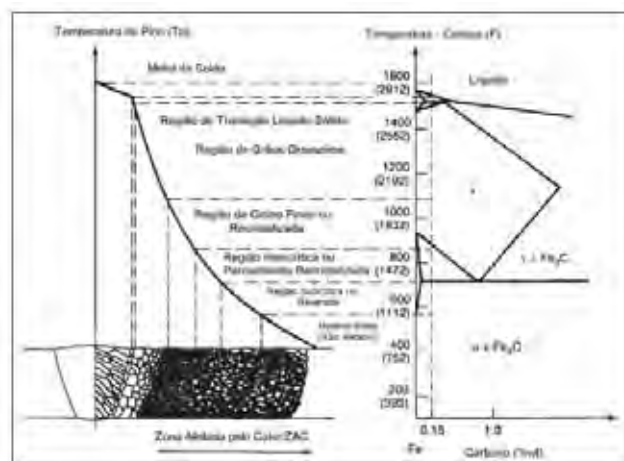


Figura 2: Regiões da ZAC de uma solda monopasse [5]

2.5. Ensaio de Tração

O teste de tração é utilizado para obter resultados sobre a resistência de materiais. É um ensaio mecânico destrutivo que consiste em aplicar uma força uniaxial que tende a deformar o corpo de prova ou a amostra, lentamente, até se produzir a ruptura, registrando-se a carga e a variação de comprimento durante o ensaio.

O ensaio de tração determina o grau de adesão de um recobrimento a um substrato, ou a força coesiva de um recobrimento sendo aplicada uma força normal à superfície. O teste é feito em temperatura ambiente (ALVES, 2010).

Os resultados são gerados a partir de um gráfico “tensão x deformação”, mostrando as características do material analisado:

- Ductilidade: é a capacidade dos materiais de se deformar sem se romper. Pode ser medida por meio do alongamento ou da estricção, ou seja, a redução na área da seção transversal do corpo-de-prova. Quanto mais dúctil o material, maior será a redução de área ou o alongamento antes da ruptura.

- Tenacidade: é uma medida da energia que a amostra absorve antes e durante o processo de fratura. Trata-se de um parâmetro muito importante para a caracterização do material, uma vez que ele diz respeito à resistência à fratura do material.

- Elasticidade: é a capacidade de o material voltar à sua forma original em ciclo de carregamento e descarregamento. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a tensão é removida.

A deformação elástica é consequência da movimentação dos átomos constituintes da rede cristalina do material, desde que a posição relativa desses átomos seja mantida.

- Plasticidade: é a deformação permanente provocada por tensão igual ou superior a tensão de escoamento, resistência associada ao limite de elasticidade. É o resultado de um

deslocamento permanente dos átomos que constituem o material, diferindo, portanto, da deformação elástica, em que os átomos mantêm as suas posições relativas. A deformação plástica altera a estrutura interna do metal, tornando mais difícil o escorregamento posterior e aumentando a dureza do metal (TOFFOLO, 2008).

Após ter começado a estrição, um carregamento mais baixo é suficiente para a deformação do corpo-de-prova até a sua ruptura. Os materiais dúcteis, como o aço, são caracterizados por apresentarem estrição ou ‘pescoço’.

2.6. Fadiga em Aeronaves

Um problema sério de segurança ocorrido em aeronaves, que recebe muita atenção de projetistas e autoridades aeronáuticas é a fadiga. Inúmeros são os fatores que influenciam o processo de fadiga, portanto a avaliação do desempenho da estrutura aeronáutica é muito complicada. As cargas aplicadas durante a aterrissagem e a decolagem são tão severas quanto às cargas de vôo, sendo assim, também devem ser examinados na verificação dos danos por fadiga (PAYNE, 1976).

A análise do desempenho da aeronave em fadiga com carregamento de amplitude constante depende do tipo de material, tratamentos térmico e superficial, geometria do corpo-de-prova, acabamento superficial e fixação, no caso de juntas soldadas. A vida útil também é afetada por esses fatores quando se tem carregamento de amplitude variável, mas neste caso deve ser comparada com outro elemento que sofreu o mesmo carregamento. No caso de uma aeronave, os carregamentos podem variar acima e abaixo do limite de fadiga da estrutura, portanto, ocorre carregamento de amplitude variável (NASCIMENTO, 2004).

O acúmulo de danos causados pela variação do carregamento faz com que ocorram falhas na estrutura aeronáutica, já que temos ciclos com diferentes amplitudes e frequências. As tensões sofridas na decolagem e no pouso têm frequência muito menor das tensões sofridas em manobras severas e ventanias. No segundo caso, as variações de carga são menores, mas a frequência é maior, com menos de um ciclo por vôo, e este fato torna difícil sua determinação, pois este ciclo é diferente do esperado e se torna invisível.

Problemas ambientais, como o mau tempo, têm grande importância na avaliação da resistência à fadiga de aeronaves, já que, com o passar do tempo, essas estruturas foram se tornando cada vez mais complexas. Temperatura, corrosão e vibração são variáveis que devem ser cuidadosamente estudadas para que a fadiga seja evitada.

O processo de fratura, geralmente, está associado aos esforços que a estrutura foi submetida em serviço, e a ruptura está quase sempre relacionada com uma carga que excedeu

o limite de resistência. No entanto, pode ser que a fratura ocorra sem que esse limite seja ultrapassado, e é exatamente isso que acontece em uma fratura por fadiga. Este processo se dá a partir de uma trinca ou imperfeição superficial que vai enfraquecendo o material ao longo do tempo, desenvolvendo uma fratura. Assim, a fratura vai se espalhando conforme os esforços são aplicados, em um processo cumulativo, até que toda a peça seja comprometida (NASCIMENTO, 2004).

Neste contexto, a prevenção e o controle do processo de fadiga em aeronaves são de extrema importância, já que todo o equipamento é submetido à cargas cíclicas e a fratura pode ocorrer imprevisivelmente (PAYNE, 1976).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais e Equipamentos

- Amostra de tubo usado na aeronave de aço normalizado e cru após extrusão; Lixas com granulação 300, 600, 1000, 1200 e 1500; Panos de Polimento: Marca Arotec (modelos: DBM e MAR); Abrasivo: Pasta de diamante 6μ e $\frac{1}{4}\mu$ da marca Arotec;

Alumina branca: número 2, Fábrica Maic Industria e Comercio, $0,3\mu$, dissolvida em água (4:1); Água destilada, álcool etílico (99%) e detergente; Nital 2% para ataque; Picral 4% para ataque; Aço AISI 4130 usado em condições reais; Aço AISI 4130 usado para estudo; Baquelite; Algodão; Água destilada; Secador; Pinça; Vidro de relógio; Embutidoras: marca Pantec (modelo: Panpress 30) e marca Arotec (modelo: Pre 30M); Equipamento de polimento com rotação de 620 rpm: marca Struers (modelo: AP2); Equipamento de corte: marca Bueheler (modelo: Isomet 1000); Microscópio EPICOT; Equipamentos para ensaio de tração SHIMADZU e INSTRON (modelo 8801).

O material utilizado nas estruturas tubulares dos vários modelos de aeronaves de pequeno/médio porte é o aço ABNT 4130. As amostras foram adquiridas junto à Indústria Aeronáutica Neiva S.A., tubos extrudados do aço ABNT 4130 de $\varnothing 15,8$ mm ($\varnothing 5/8''$) e $\varnothing 12,7$ mm ($\varnothing 1/2''$), ambos contendo 0,89mm (0,035") de espessura de parede, para posterior confecção dos corpos-de-prova para análise metalográfica e ensaio de tração.

Foram obtidos oito corpos de prova para tração e oito corpos de prova para metalografia.

3.2. Métodos

3.2.1. Corte

Foram feitos um corte transversal e um superficial de cada amostra metalográfica, seguindo o padrão das figuras a seguir:



Figura 3: Corte 1 da amostra para embutimento



Figura 4: Corte 2 da amostra para embutimento

A figura 4 ilustra o equipamento Isomet 1000 durante o corte da amostra.



Figura 5: Isomet 1000 durante o corte da amostra

Posteriormente ao corte, foi feito o embutimento para facilitar a manipulação da amostra durante os procedimentos posteriores.

Para o ensaio de tração, usou-se a norma ASTM E 8M, sendo oito corpos de prova (cdps) cortados como na figura 5 e de acordo com a laminação da chapa. Na figura 6 temos dois corpos de prova reais.

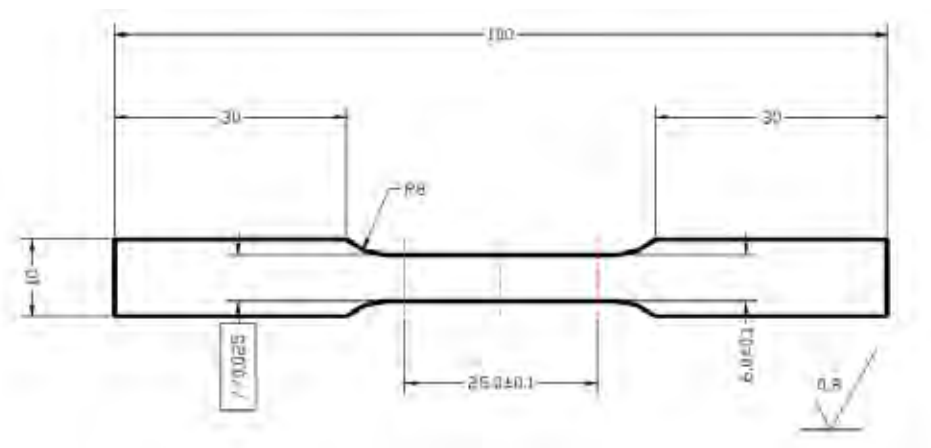


Figura 6: Corte do Metal de acordo com a Norma ASTM E 8M



Figura 7: Corpos de prova para ensaio de tração

Todos os cdps foram submetidos a acabamento superficial com lixa de granulometria 600 (máx.), nas faces e laterais, seguindo o sentido de laminação, resultando em rugosidade média $R_a = 0,73 \mu\text{m} \pm 0,12 \mu\text{m}$.

3.2.2. Embutimento

Cada equipamento trabalhava com uma forma diferente de pressionar a amostra junto à baquelite, mas o princípio de embutimento é o mesmo.

Primeiramente se limpa bem o equipamento, então o lubrifica com vaselina líquida com o auxílio de um algodão ou usando um lubrificante em lata, como na figura a seguir:



Figura 8: Lubrificação do equipamento de embutimento

Coloca-se a amostra na posição desejada, como na figura a baixo:

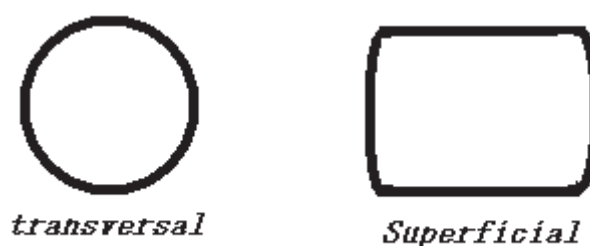


Figura 9: Cortes para embutimento

Após a amostra estar em sua posição correta, coloca-se aproximadamente 20 ml de baquelite com o auxílio de um béquer. Então se põe a segunda peça de metal do equipamento para permitir melhor acabamento à amostra embutida (figuras 9 e 10).



Figura 10: Encaixe da peça solta de metal para o embutimento com bom acabamento para o equipamento

Arotec



Figura 11: Encaixe da peça solta de metal para o embutimento com bom acabamento para o equipamento

Pantec

Fecha-se o equipamento pressionando a amostra até a pressão que o manual do equipamento indica (figura 11), ou através do acionamento de uma luz. A temperatura máxima para o embutimento desta baquelite, de ambos os equipamentos, é de 140°C.



Figura 12: Equipamento para Embutimento Arotec (modelo PRE 30M)

Durante o aquecimento é necessário atenção, pois entre 80°C e 110°C a pressão diminui rapidamente, e se não houver pressão suficiente, a amostra terá um embutimento de má qualidade.

Após serem atingidos a temperatura máxima e o tempo necessário para a fusão da baquelite, a água é acionada e, a 40°C, se pode retirar a amostra.

A figura 12 mostra a amostra embutida já pronta da parte soldada do aço, sendo uma amostra superficial e uma transversal.



Figura 13: Solda embutida superficialmente e transversalmente

3.2.3. Lixamento

O lixamento é um processo simples onde a amostra embutida é lixada para retirar qualquer baquelite sobre ela, além de deixar a amostra em um único plano (não abaulada) para facilitar o polimento e futura microscopia.

A amostra deve ser lixada primeiramente na granulação mais grossa (100) até todos os riscos estarem paralelos. Para visualizar os riscos, um microscópio com 50 vezes de ampliação é suficiente.

Após todos os riscos estarem paralelos, passa-se para a próxima lixa (220), seguindo o mesmo procedimento, mas girando a amostra em 90°. Isso deve ocorrer até chegar à lixa de granulação mais fina (1500).

Quando o lixamento for finalizado, passa-se para o polimento.

3.2.4. Polimento

As amostras de solda foram polidas em pano Arotec MAR e com a pasta de diamante, para melhorar o polimento foi usado álcool etílico (99%). Já a amostra do aço usado em condições reais, foi polida em alumina branca número 2 (dissolvida em água destilada na proporção 4:1), no pano Arotec DBM, com uma gota de detergente e água destilada.

O polimento tem como objetivo retirar todos os riscos da amostra. Durante o procedimento, toda vez que a superfície da amostra é visualizada, deve-se fazer um procedimento meticuloso de secagem para não ocorrer mancha. Para que isso não ocorresse, usou-se lavagem com água, depois álcool foi jogado sobre a amostra e então ela foi secada com secador (jato de ar frio).

3.2.5. Ataque

Foram realizados dois tipos de ataques: Nital e Picral. O nital revela contornos de grão e o picral diferencia de forma bem definida as fases presentes na amostra. Em todas as amostras, o ataque de nital foi feito entre 10 e 12 segundos, enquanto o do picral foi feito entre 13 e 15 segundos. Como ambas são soluções ácidas, a luva é uma forma de proteção e o ataque foi feito dentro de uma capela para não ocorrer inalação de vapor.

O ataque foi feito da seguinte forma:

Primeiramente, colocou-se o reagente no vidro de relógio;

- A amostra foi segurada com uma mão e na outra uma pinça com algodão na ponta foi mergulhada na solução;

- A solução foi levemente depositada na superfície da amostra pelo tempo já dito, então foi lavada em água corrente por aproximadamente 5 segundos e posteriormente secada.

Após o ataque, foram realizados os processamentos das imagens da microestrutura da amostra.

3.2.6. Microscopia e Microanálise Amostral

As imagens foram efetuadas com ampliação de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, para então serem analisadas.

3.2.7. Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado em duas partes. Primeiramente, na máquina de ensaios universal Shimadzu (figura 13), sendo que três de seis dos cdps de aço normalizado foram ensaiados neste equipamento. Na segunda parte deste experimento, foi usado o equipamento INSTRON, modelo 8801 (figura 14). Nesta máquina foram tracionados os três cdps restantes.



Figura 14: Equipamento Shimadzu



Figura 15: Equipamento INSTRON

Os dois equipamentos possuem um computador acoplado, onde os dados dos ensaios foram salvos e posteriormente gravados em um CD para serem analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens foram feitas logo após cada ataque para que não ocorresse oxidação. As ampliações usadas foram de 200, 500 e 1000 vezes.

4.1. Ataque Nital

4.1.1. Em Aço Base

Obtivemos as seguintes imagens para a amostra transversal do aço base normalizado com ataque Nital:



Figura 16: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 200 vezes (Ataque Nital)



Figura 18: Microestrutura 2 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 500 vezes (Ataque Nital)



Figura 17: Microestrutura 2 para o aço normalizado em corte transversal, com ampliação de 200 vezes (Ataque Nital)



Figura 19: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte transversal , com ampliação de 1000 vezes (Ataque Nital)

De acordo com as figuras acima, pode-se observar que os grãos do aço são mais homogêneos e seus contornos de grão são bem mais definidos. Isso ocorre porque o aço AISI 4130 é normalizado, a maior prova está nas imagens a seguir (figuras 19 a 24), onde no corte superficial os grãos seguem o mesmo padrão do corte transversal.



Figura 20: Microestrutura 1 para o aço normalizado em corte superficial, com ampliação de 200 vezes



Figura 21: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 200 vezes



Figura 22: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 500 vezes



Figura 23: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 500 vezes



Figura 24: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 1000 vezes

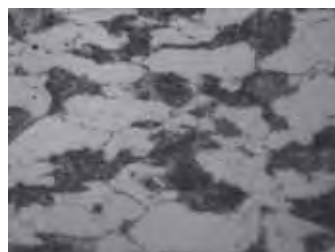


Figura 25: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial usado em condições reais, com ampliação de 1000 vezes

O aço para estudos provavelmente não foi normalizado, pois existe uma grande diferença no formato dos grãos. No corte transversal observamos grãos mais arredondados e muito pequenos enquanto no superficial se observa grãos alongados, provando que após ser extrudado, o tubo não sofreu normalização. Outra razão de se concluir que o aço não foi normalizado é que os grãos na amostra são muito pequenos se comparados ao normalizado (figuras acima). Nas figuras a seguir temos o ataque de nital para o aço cru no corte transversal.

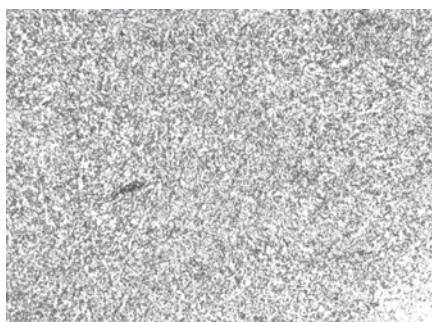


Figura 26: Microestrutura 1 para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes

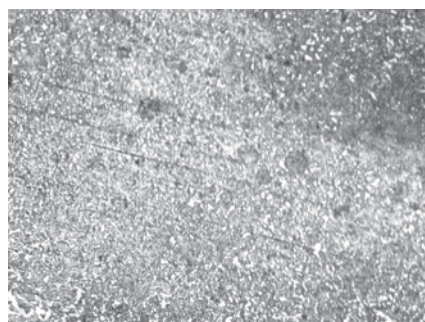


Figura 27: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 200 vezes

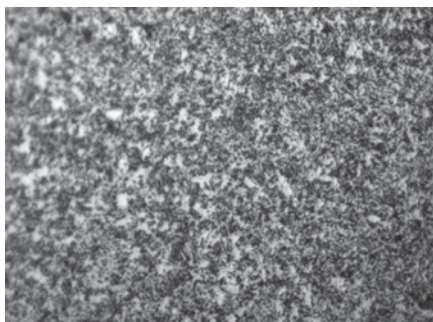


Figura 28: Microestrutura 1 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 500 vezes

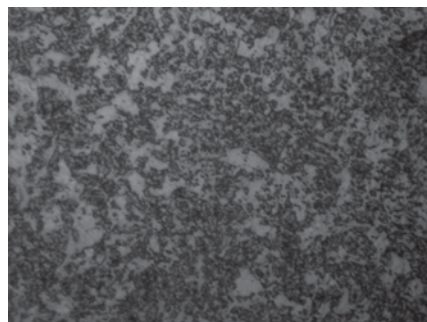


Figura 30: Microestrutura 1 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 1000 vezes

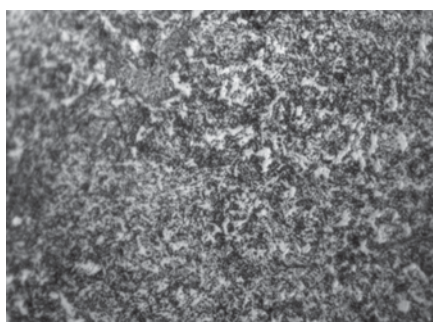


Figura 29: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 500 vezes

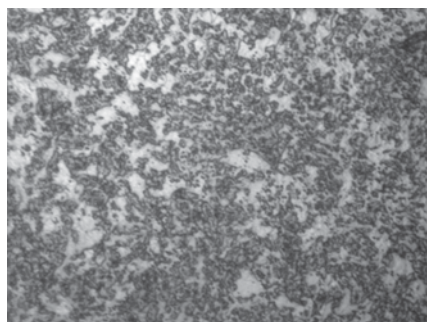


Figura 31: Microestrutura 2 para o aço em corte transversal para estudos, com ampliação de 1000 vezes

Como será visto nas figuras 31 a 34, a seguir, o aço cru tem predominância da fase perlita em relação à ferrita. Se comparado às figuras 25 a 30, a cima, do corte transversal do aço normalizado, pode-se ver claramente que os grãos do aço cru não estão homogeneizados.

A amostra do corte superficial tem um comportamento diferente, pois sem o tratamento térmico de normalização, o tubo tem seus grãos alongados ao ser extrudado, como nas figuras a seguir:



Figura 32: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 200 vezes



Figura 33: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes



Figura 34: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes



Figura 35: Microestrutura 2 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes

O nital não permitiu a visualização efetiva dos contornos de grãos do aço cru, mas observa-se o alongamento deles nas figuras 31 a 34.

4.1.2. Na Solda



Figura 36: Ataque Nital na Solda do Aço Cru com em corte transversal aumento de 200 vezes



Figura 37: Ataque Nital na Solda do Aço Cru em corte transversal com aumento de 1000 vezes



Figura 38: Ataque Nital na Solda do Aço cru em corte transversal com aumento de 500 vezes

Analisando as imagens acima, pode-se perceber que os grãos do aço base continuam alongados, mas a presença de outras fases (escuras) aparece em maior quantidade. A figura 36 ilustra a diferença de fases entre a base e a ZTA.

Devido a problemas, não foi possível analisar o corte transversal da solda do aço normalizado, pois nenhum ataque foi bem sucedido na amostra. Foram feitos quatro ataques e nada foi possível perceber. O mesmo ocorreu com a amostra superficial do aço cru.



Figura 39: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 200 vezes

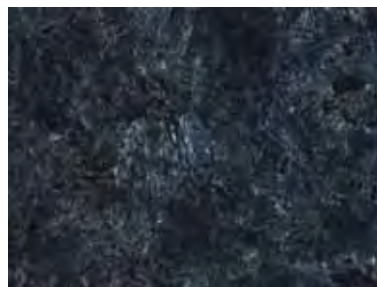


Figura 40: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 500 vezes

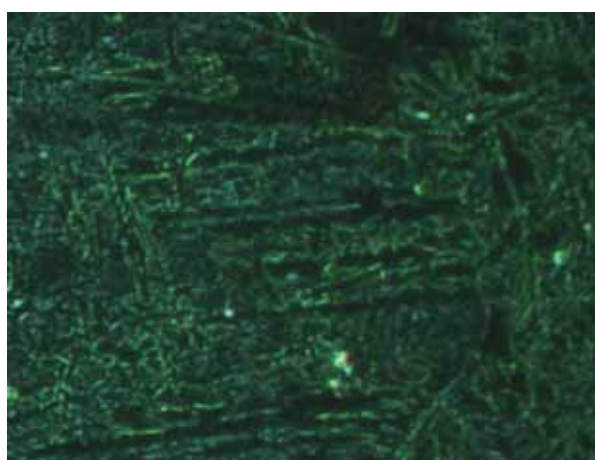


Figura 41: Ataque Nital na Solda do Aço normalizado em corte superficial com aumento de 1000 vezes e polarizada

Através de análises das imagens, é possível observar que mesmo no aço normalizado os grãos da ZTA se alteram, pois não há material diferente de adição. Isso provoca a aparição de martensita e bainita e ocorre devido à alta taxa de calor e resfriamento rápido na região da solda, e também na zona termicamente afetada por ela.

4.2. Ataque Picral

4.2.1. No Aço Base:

As figuras seguintes fornecem como os grãos do aço cru se comportam no corte superficial:

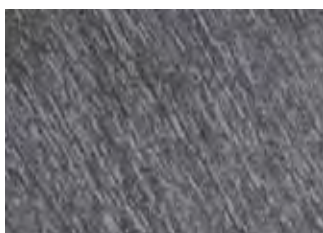


Figura 42: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 200 vezes

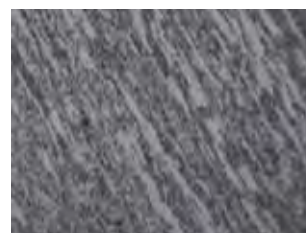


Figura 43: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 500 vezes



Figura 44: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes



Figura 45: Microestrutura 1 para o aço em corte superficial para estudos, com ampliação de 1000 vezes

Devido a problemas durante o polimento pode ser observado um pequeno abaulamento na amostra, por isso algumas partes estão mais bem focalizadas que outras.

Pode ser observado que o corte superficial possui grãos alongados em qualquer ampliação. Outro fato curioso sobre as figuras 41 e 44 é a observação de forma relativamente clara da fase perlita, diferente dos cortes superficial e transversal da amostra normalizada (usada em condições reais), como mostra as figuras a seguir.



Figura 46: Microestrutura para o aço em corte superficial normalizado, com ampliação de 200 vezes



Figura 48: Microestrutura para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 500 vezes



Figura 47: Microestrutura para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 200 vezes



Figura 49: Microestrutura para o aço em corte superficial normalizado, com ampliação de 1000 vezes

A partir da figura 45 até 48, podemos entender que os grãos do aço normalizado são mais bem definidos e de maior tamanho.

Enquanto o ataque nital não polariza a amostra, o ataque picral permite essa oportunidade. A polarização permite uma distinção de fases de forma mais clara porque cada fase reflete um comprimento de onda diferente, como nas figuras seguintes.

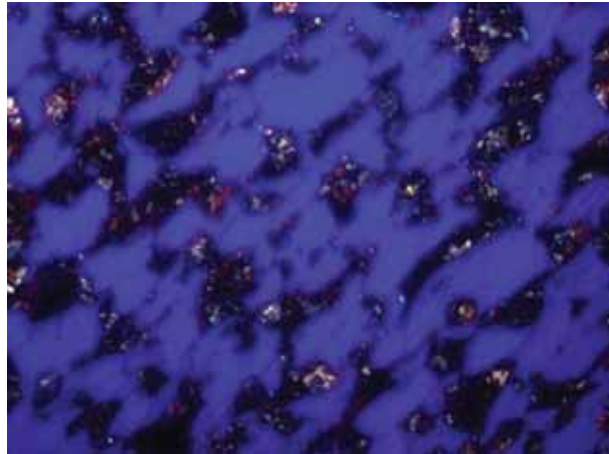


Figura 50: Microestrutura polarizada para o aço em corte transversal normalizado, com ampliação de 500 vezes

De acordo com a figura 49, a ferrita está polarizada em azul. Já na figura 50 (abaixo) a ferrita se encontra em laranja.

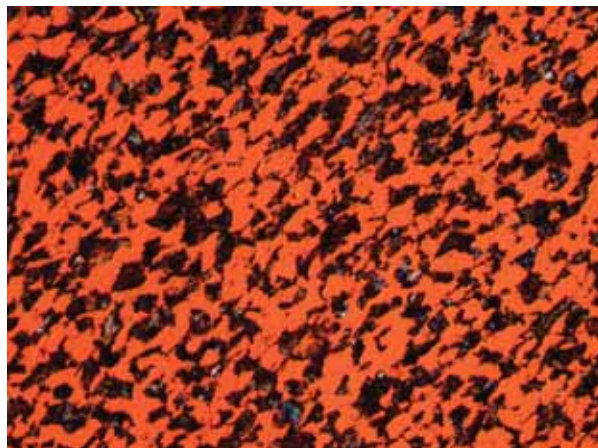


Figura 51: Microestrutura polarizada para o aço em corte superficial, normalizado, com ampliação de 200 vezes

Em ambas as figuras polarizadas, temos que a perlita é escura com algumas partes mais claras e brilhantes.

A amostra de aço cru do corte transversal apresentou resultados diferentes das outras amostras, como mostrado nas figuras a seguir:

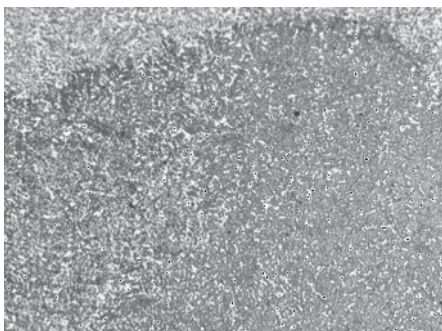


Figura 52: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes

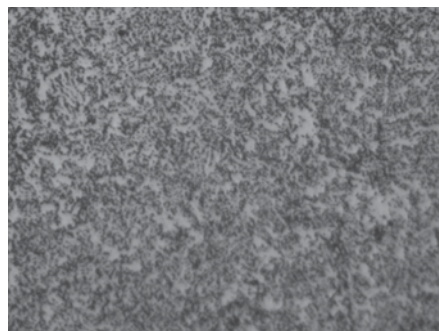


Figura 54: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes

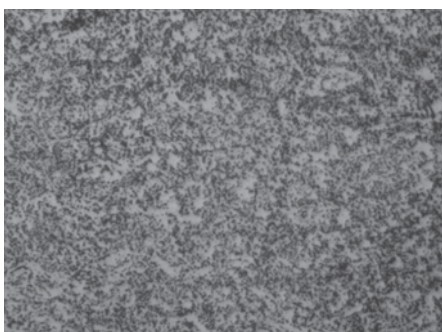


Figura 53: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes

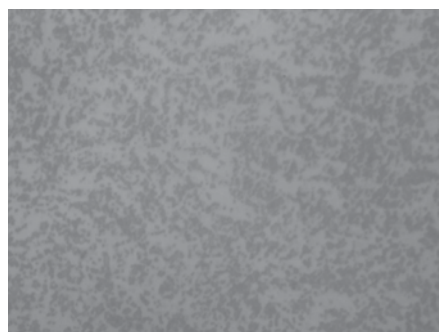


Figura 55: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes

O ataque picral revelou de forma mais perceptível a diferença entre as fases. Na amostra normalizada, foi usada a polarização, que ajuda a diferenciar de forma mais bem definida estas fases. O picral mostrou como pequenos são os grãos do aço cru.

4.2.2. Na Solda

Assim como no nital, não foi possível atacar a amostra transversal do aço normalizado.



Figura 56: Microestrutura para o aço normalizado em corte superficial, com ampliação de 200 vezes

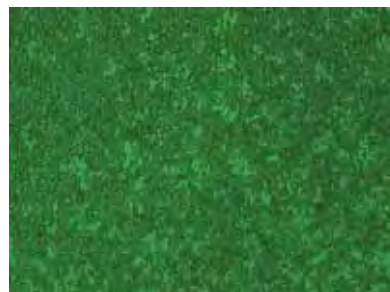


Figura 57: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 200 vezes



Figura 58: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 500 vezes

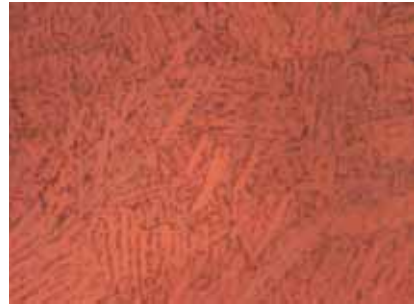


Figura 60: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes

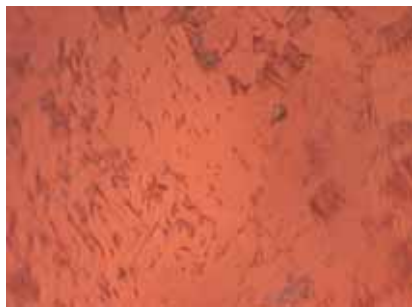


Figura 59: Microestrutura para o aço cru em corte transversal, com ampliação de 1000 vezes

Foi usado filtro azul e luz polarizada nas figuras acima. As figuras 55 e 56 foram feitas na solda do aço, enquanto as outras foram feitas na ZTA. As partes escuras são perlita, bainita e martensita, enquanto as fases claras são grãos de ferrita. Pode-se observar que há menos martensita na ZTA que na solda.

4.3. Tração

Durante a gravação dos dados de ensaio de tração, houve um problema e a deformação não foi gravada, por esta razão não foi possível plotar o gráfico de tensão por deformação que seria capaz de fornecer dados importantes como módulo de elasticidade e outros.

5. CONCLUSÃO

Aços baixo carbono como o AISI têm maior presença de ferrita como microconstituente. O aço de um tubo cru após extrusão possui grãos alongados na direção da extrusão, quando esse aço é normalizado, seus grãos são refinados se tornando mais homogêneos e com contorno de grãos mais bem definidos. Por ser um aço usado em berço de motor de avião e de extrema importância na segurança de vôo, o controle de suas microestruturas é de fato algo relativo à segurança de muitas vidas, ainda mais que o berço é um componente que necessita de solda em vários ângulos. Um grão alongado e deformado pela extrusão pode possuir microtrincas que fragilizam o material, além de conter mais defeitos devido a essa deformação.

A soldagem, nesse tipo de aço e para o esse fim, muda de forma drástica as microestruturas presentes e outras novas aparecem principalmente na zona termicamente afetada e na própria solda. Microconstituintes como martensita são um problema, pois, em um componente que a fadiga é a principal razão de falha, a martensita diminui vida em fadiga apesar de aumentar a resistência à tração, isso porque ela aumenta significativamente a dureza do material.

A bainita foi uma fase presente na ZTA e na região de solda, esse tipo de microestrutura possui partículas menores de ferrita e cementita, aumentando a dureza do material, mas não como a martensita, ou seja, aumenta a dureza mas sem diminuir muito a tenacidade do material. Em um aço que está sob carregamento cíclico constante, a presença de bainita pode ser uma desvantagem assim como a martensita, independentemente de ser uma fase mais tenaz ou não.

6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABUD, I.C.; NASCIMENTO, J.L.; PIRES, F.S.; CAMINHA, I.M.V.; CAMPOS, A.A. Determinação do Grau de Bandejamento de Produtos Semi-Acabados por Análise Automática de Imagens. **59º Congresso Anual de ABM**, São Paulo, jul. 2004.

ALVES, H.R. **Avaliação da Aderência de Recobrimentos de Biomateriais Produzidos por Aspersão Térmica a Plasma Atmosférico em Aço Inoxidável AISI 316L Utilizando-se Ensaio de Riscamento e Ensaio de Tração**. Tese de Doutorado, UFOP – REDEMAT, out. 2010, 280 p.

BRANDI, S. D.; Processo TIG. In: WAINER, E., **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo, Edgard Blücher. Cap. 2c, p. 60-98, 2000.

BULTEL, H.; VOGT, J.B.; Influence of Heat Treatment on Fatigue Behavior of 4130 AISI Steel, **Procedia Engineering**, Lille, p. 917-924, mar. 2010.

CALLISTER JR., W.D.; **Materials Science and Engineering**. 7.ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 724 p.

CELIC, O.N. et al. Effects of Graphite on the Microstructure and Wear Properties of an AISI 8620 Steel Surface Modified by Tungsten Inert Gas (TIG). **Surface and Coatings Technologies**, Turkey, p. 1423-1429, set. 2011

CHEN, J.H. et al. Characterization of Multi-Element Alloy Claddings Manufactured by the Tungsten Inert Gas Process. **Surface & Coatings Technologies**, Taiwan, p. 2983-2988, ap.2009.

CHERN, T.S.; TSENG, K.H.; TSAI, H.L.; Study of the Characteristics of Duplex Stainless Steel Activated Tungsten Inert Gas Welds. **Materials & Design**, Taiwan, p. 255-263, jun.2010.

DIETER, G. E., **Metalurgia Mecânica**, 2a ed., Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro/RJ, 1981.

GARCIA, A. N.; **Reparos Rebitados em Estruturas Aeronáuticas Tolerantes a Dano**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica (Área de Mecânica dos Sólidos e Estruturas), Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA – São José dos Campos – SP, 1998.

GORANSON, U. G., Fatigue Issues in Aircraft Maintenance and Repairs, **International Journal of Fatigue**, v. 19, p. S3-S21, 1993.

HOO, C. Y., Falhas por Fadiga em Helicópteros, Centro Técnico Aeroespacial - CTA/IAE/AMR, **Curso de Segurança de Voo** - SIPAER - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos - CENIPA, Ministério da Aeronáutica - SIPAER, Estado Maior da Aeronáutica.

LATORELLA, K. A., PRABHU, P. V., A Review of Human Error in Aviation Maintenance and Inspection, **International Journal of Industrial Ergonomics**, 26 (2000) 133-161.

Metal Forming Magazine Archive, by Wyatt Swaim Consultant, The Lincoln Electric Co, Cleveland, OH, Jan. 2001.

METALS HANDBOOK - Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys. Vol 1, 10th Ed.; ASM International. Handbook Committee, 1990.

METALS HANDBOOK – Heat Treating. Vol 4, ASM International. Handbook Committee, 1991.

NASCIMENTO, M.P.; **Retrabalhos em Estruturas Aeronáuticas Soldadas do Aço ABNT 4130 - Em foco: (Berços de Motores de Aeronaves)**, UNESP, Guaratinguetá, 2004, 239 p.

NASCIMENTO, M. P., RIBEIRO, R. B., VOORWALD, H. J. C., PEREIRA, C. P. M., Efeitos de Reparos de Solda TIG na Integridade Estrutural do Aço Aeronáutico - ABNT 4130, **57º Congresso Anual da ABM Internacional**, São Paulo/SP, CD-ROM, pp. 1155-1164, 2002.

NASCIMENTO, M. P., RIBEIRO, R. B., VOORWALD, H. J. C., Estudo da Propagação de Trincas por Fadiga em Aço Aeronáutico ABNT 4130 Soldado, **56º Congresso Anual da ABM Internacional**, Belo Horizonte/MG, CD-ROM, pp. 1751-1761, 2001.

NEVES, E.M; ALBANI, J.; VUROBI JR., S.; CINTHO, O.M.; Caracterização Metalográfica de um Aço AISI H13 por meio de Metalografia Convencional e Contraste por Interferência Diferencial (DIC), **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, nov. 2006.

OBERG, E et al., "Machinery's Handbook," 27th ed., **Industrial Press Inc.**, 2004.

PAYNE, A. O., The fatigue of Aircraft Structures, Engineering Fracture Mechanics, v. 8, p. 157-203, 1976.

PICKERING, F. B.; **Physical Metallurgy and the Design of Steels**. 1st ed., Applied Science Publisher Ttd, 1978.

QUITES, V. R.; **Avaliação da Tenacidade à Fratura e da Resistência à Fadiga de Aço Tipo AISI/SAE 4140 Utilizado em Parafusos de Bombas de Polpa de Minério de Ferro, em Função de Tratamentos Térmicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT, 2004, 145p

SODRÉ, R.T.M.; **Avaliação da Tenacidade à Fratura e da Resistência à Fadiga de dois Aços utilizados em Eixos de Carros Torpedos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT, 2008, 100p.

TOFFOLO, R.V.B.; **Estudo Comparativo dos Aços Microligados API-5L-X60 e API-5L-X70, Usados Para Confeção de Tubos, Quanto à Tenacidade à Fratura**. Dissertação de Mestrado, UFOP – REDEMAT, mar. 2008.

VANDER VOOT, G.F.; Metallography of welds. **Advanced Materials & Processes**. Ohio, p. 19 – 23, jun. 2011

VOORWALD, H. J. C., PASTOUKHOV, V. A., **Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural**, Editora UNESP, São Paulo/SP, Junho/1994.

WENNER, C. A., DRURY, C. G., Analysing Human Error in Aircraft Ground Damage Incidents, **International Journal of Industrial Ergonomics**, 26, p. 177-199, 2000.