

**GUSTAVO THOMAS NERY FARIA DE PAIVA**

**ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS DECORRENTES DOS SUCESSIVOS  
REPAROS DE SOLDA TIG APLICADOS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE UMA  
ESTRUTURA AERONÁUTICA CRÍTICA À SEGURANÇA DE VÔO.**

Guaratinguetá

2011

P149a	<p>Paiva, Gustavo Thomas Nery Faria de</p> <p>Alterações microestruturais decorrentes dos sucessivos reparos de solda TIG aplicados ao longo da vida útil de uma estrutura aeronáutica crítica à segurança de vôo / Gustavo Thomas Nery Faria de Paiva – Guaratinguetá : [s.n], 2011.</p> <p>55 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 53-55</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento</p> <p>1. Microestrutura I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.18</p>
-------	--

GUSTAVO THOMAS NERY FARIA DE PAIVA

ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS DECORRENTES DOS SUCESSIVOS  
REPAROS DE SOLDA TIG APLICADOS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE UMA  
ESTRUTURA AERONÁUTICA CRÍTICA À SEGURANÇA DE VÔO.

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá

2011

ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS DECORRENTES DOS SUCESSIVOS  
REPAROS DE SOLDA TIG APLICADOS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE UMA  
ESTRUTURA AERONÁUTICA CRÍTICA À SEGURANÇA DE VÔO.


GUSTAVO THOMAS NERY FARJA DE PAIVA


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


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

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA-

  
Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Carlos Kiyari  
UNESP-FEG

  
Ma. Mariana Cassiano Ferreira  
Membro externo

Dezembro de 2011

## **DADOS CURRICULARES**

### **GUSTAO THOMAS NERY FARIA DE PAIVA**

NASCIMENTO	22.11.1987-SÃO PAULO/SP
FILIAÇÃO	Mônica Julia de Souza Nery Antonio Carlos Faria de Paiva
2006/2011	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – UNESP/FEG

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pelo carinho, compreensão e confiança durante todos os anos do curso de engenharia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento pelo seu auxílio neste trabalho com sua experiência e seu bom humor.

Aos meus amigos da república Seupossemia que sempre estiveram presentes na minha trajetória e me proporcionaram momentos esquecíveis e inesquecíveis.

A minha amiga e companheira Natália Osidacz por esses 5 anos de compreensão e dedicação, além de toda ajuda nesse trabalho.

Agradeço também a minha amiga Priscila Folkl, que estive comigo ao longo deste trabalho e durante o curso nos bons e maus momentos.

A todos os professores e funcionários da universidade, pois sem eles nada existiria.

PAIVA, G. T. N. F. de **ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS DECORRENTES DOS SUCESSIVOS REPAROS DE SOLDA TIG APLICADOS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE UMA ESTRUTURA AERONÁUTICA CRÍTICA À SEGURANÇA DE VÔO.**

2011. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## RESUMO

O aço tipo AISI 4130 (aço ultra-alta resistência) é uma liga de baixo teor de carbono e seus principais elementos de liga são o cromo e o molibdênio, que melhoram a tenacidade do metal de solda. Tem inúmeras aplicações, principalmente onde há a necessidade de alta resistência mecânica. É muito utilizado em equipamentos aplicados pela indústria aeronáutica, como berços-de-motor, e esta é a motivação deste estudo. Os berços são de fundamental importância, pois suportam o motor em balanço e mantém fixo o trem de pouso. Esse equipamento é submetido a ciclos de carregamentos intensos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são constantemente observadas. Serão determinados os efeitos provocados pelas re-soldagens na estrutura do material aeronáutico, e também será estudada a microestrutura do metal sem solda. Os estudos serão feitos em material usado na aeronave, que foi cedido para estudos. Os resultados obtidos fornecerão conhecimento de microestrutura para avaliar qualquer tipo de fratura que pode ser causada por fadiga. A fadiga é a principal causa dos incidentes e acidentes aeronáuticos ocorridos, o que torna o estudo da microestrutura do metal, da solda e da re-solda fundamental para o conhecimento da vida útil do material. A prevenção e o controle do processo de fadiga em aeronaves são fundamentais, já que os componentes de maior responsabilidade são submetidos a cargas cíclicas.

**Palavras-chave:** aço AISI 4130, re-soldagem, fadiga, microestruturura.

PAIVA, G. T. N. F. de **ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS DECORRENTES DOS SUCESSIVOS REPAROS DE SOLDA TIG APLICADOS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE UMA ESTRUTURA AERONÁUTICA CRÍTICA À SEGURANÇA DE VÔO.**

2011. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

**ABSTRACT**

The steel type AISI 4130 (ultra-high strength steel) is an alloy of low carbon and its main alloying elements are chromium and molybdenum, which improves the toughness of the weld metal. It has numerous applications, especially where the need for high mechanical strength. It is widely used in equipment used by the aviation industry, such as cradle-to-motor, and this is the motivation for this study. Cots are of fundamental importance, because the engine supports and maintains balance in the fixed landing gear. This equipment is subjected to intense loading cycles, whose fractures caused by fatigue are constantly observed. Will be determined the effects caused by re-welding the structure of aeronautical equipment, and will also study the microstructure of the metal without welding. The studies will be done on materials used in aircraft, which was given to study. The results provide knowledge of microstructure to evaluate any type of fracture that maybe caused by fatigue. Fatigue is a major cause of aircraft accidents and incidents occurred, which makes the study of the microstructure of the metal, weld and re-solder the knowledge essential to the life of the material. The prevention and control of the process of fatigue in aircraft are critical, since the components are subjected to greater responsibility cyclic loading.

**Keywords:** AISI 4130, re-welding, fatigue, microstructure.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Berço-do-motor da aeronave .....	13
Figura 2: Corpos-de-prova para ensaio de tração .....	21
Figura 3: Corte 1 da amostra para embutimento .....	22
Figura 5: Isomet 1000 durante o corte da amostra .....	23
Figura 6: Embutidora Aerotec – modelo PRE 30M.....	23
Figura 7: Solda embutida (esquerda transversal e direita superficial) .....	24
Figura 8: Corte do Metal de acordo com a Norma ASTM E 8M .....	26
Figura 9: Equipamento Shimadzu.....	26
Figura 10: Equipamento INSTRON.....	27
Figura 11: Corte Superficial – Zona Termicamente Afetada (ZTA) .....	28
Figura 12: Corte Transversal - ZTA.....	29
Figura 13: Corte Superficial – Região não afetada termicamente. ....	29
Figura 14: Corte Transversal – Região não afetada termicamente. ....	30
Figura 15: Corte Superficial – ZTA.....	30
Figura 16: Corte Transversal – ZTA.....	31
Figura 17: Corte Superficial – Região não afetada termicamente. ....	31
Figura 18: Corte Transversal – Região não afetada termicamente. ....	32
Figura 19: Corte Superficial – ZTA.....	32
Figura 20: Corte Transversal – ZTA.....	33
Figura 21: Corte Superficial – Região não afetada termicamente. ....	33
Figura 22: Corte Transversal – Região não afetada termicamente. ....	34
Figura 23: Corte Superficial – ZTA.....	34
Figura 24: Corte Transversal – ZTA.....	35
Figura 25: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	35
Figura 26: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.....	36
Figura 27: Corte Superficial – ZTA.....	36
Figura 28: Corte Transversal – ZTA.....	37
Figura 29: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	37
Figura 30: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.....	38
Figura 31: Corte Superficial – ZTA.....	39
Figura 32: Corte Transversal – ZTA.....	39
Figura 33: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	40

Figura 34: Corte Transversal - Região não afetada termicamente. ....	40
Figura 34: Corte Superficial – ZTA. ....	41
Figura 35: Corte Transversal – ZTA. ....	41
Figura 36: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	42
Figura 37: Corte Transversal - Região não afetada termicamente. ....	42
Figura 38: Corte Superficial – ZTA. ....	43
Figura 39: Corte Transversal – ZTA. ....	43
Figura 40: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	44
Figura 41: Corte Transversal - Região não afetada termicamente. ....	44
Figura 42: Corte Superficial – ZTA. ....	45
Figura 43: Corte Transversal – ZTA. ....	45
Figura 44: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	46
Figura 45: Corte Transversal - Região não afetada termicamente. ....	46
Figura 46: Corte Superficial – ZTA. ....	47
Figura 47: Corte Transversal – ZTA. ....	47
Figura 48: Corte Superficial - Região não afetada termicamente. ....	48
Figura 49: Corte Transversal - Região não afetada termicamente. ....	48
Figura 50: Região não afetada termicamente. ....	49
Figura 51: Grãos diminuindo ao ser aproximado da ZTA. ....	49
Figura 52: Região escura (bainita). ....	50
Figura 53: Os grão estão muito menores que na região não afetada termicamente. ....	50
Figura 54: Zona termicamente afetada – Grãos alongados. ....	51
Figura 55: ZTA – região da solda sem retrabalho. ....	51
Figura 56: ZTA – região da solda com três retrabalhos. ....	51

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	OBJETIVO.....	10
3.	MOTIVAÇÃO .....	11
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4.1.	Aço AISI 4130 .....	12
4.2.	Berço do Motor .....	13
4.3.	Solda TIG.....	15
4.4.	Metalografia, Micrografia e Microanálise .....	17
4.5.	Ensaio de tração .....	18
4.6.	Classificação dos Microconstituintes do Metal de Solda .....	19
5.	Materiais e METODOLOGIA .....	20
5.1.	Materiais e Equipamentos.....	20
5.2.	Métodos .....	21
5.2.1.	Corte .....	21
5.2.2.	Embutimento .....	23
5.2.3.	Lixamento.....	24
5.2.4.	Polimento.....	25
5.2.5.	Ataque .....	25
5.2.6.	Microscopia e Microanálise Amostral.....	25
5.2.7.	Ensaio de Tração .....	25
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
6.1.	Ataque Nital .....	28
6.1.1.	Ampliação de 50 X.....	28
6.1.2.	Ampliação de 100 X.....	30
6.1.3.	Ampliação de 200 X.....	32
6.1.4.	Ampliação de 500 X.....	34
6.1.5.	Ampliação de 1000 X.....	36

6.1.6.	Comentários.....	38
6.2.	Ataque Picral.....	38
6.2.1.	Ampliação de 50 X.....	38
6.2.2.	Ampliação de 100 X.....	40
6.2.3.	Ampliação de 200 X.....	42
6.2.4.	Ampliação de 500 X.....	44
6.2.5.	Ampliação de 1000 X.....	46
6.2.6.	Comentários.....	48
6.3.	Ataque Le Pera.....	49
6.3.1.	Comentários.....	51
6.4.	Comparação entre amostra com retrabalho e sem retrabalho de solda.....	51
6.4.1.	Comentário .....	52
7.	CONCLUSÃO .....	52
8.	BIBLIOGRAFIA.....	53

## **1. INTRODUÇÃO**

O aço é utilizado em diversos equipamentos, desde utensílios do dia-a-dia até equipamentos de alta tecnologia. Pesquisas são realizadas pelo mundo todo com objetivo de melhorar este material, analisando possíveis falhas, aumento de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, soldabilidade, novas aplicações, entre outras.

O aço tipo AISI 4130 é conhecido por suas propriedades de alta resistência mecânica a altas temperaturas. É uma liga de aço cromo-molibdênio de ultra-alta resistência e muito usado em para confecção de tubos.

Este aço é muito usado pela indústria aeronáutica, um exemplo é o “berço-de-motor” do avião, que é um componente de alta responsabilidade e submetido a carregamentos complexos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são constantemente constatadas. Os “berços” são críticos à segurança de vôo, pois sua fratura provoca a perda do controle da aeronave, podendo ocasionar acidentes fatais. São confeccionados com tubos de aço aeronáutico AISI 4130 soldados em geometrias complexas, e por este motivo são alvo de muitas 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.

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar as alterações microestruturais decorrentes dos sucessivos retrabalhos de solda TIG (comumente aplicados ao longo da vida útil de estruturas aeronáuticas) e seus efeitos na integridade estrutural de um componente aeronáutico crítico à segurança de vôo. Os resultados obtidos poderão fornecer subsídios às empresas fabricantes de aeronaves e às oficinas homologadas de manutenção e revisão aeronáuticas sobre a permissividade ou não de tal procedimento de reparo com base no comprometimento da integridade de uma estrutura aeronáutica, bem como poderão auxiliá-las no planejamento de inspeções periódicas a serem realizadas com previsão do tempo de vida útil do componente baseado na filosofia de “Tolerância ao Dano”.

### 3. MOTIVAÇÃO

Durante o vôo, as aeronaves estão sujeitas a cargas repetidas das mais variadas grandezas e frequências. As condições de operação envolvem decolagem e aterrissagem a altas cargas e vôo em altas velocidades. O avião hoje projetado é o resultado de critérios de cálculos em que são analisadas não só a resistência da estrutura, mas também a extensão da sua vida. O berço-de-motor de aviões é um componente de alta responsabilidade e submetido a carregamentos complexos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são constantemente constatadas. Devido a sua característica, os “berços” de aeronaves monomotores são definidos como críticos à segurança de vôo, pois sua fratura provoca a perda do controle de vôo, 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 retrabalhos, 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 (solda de manutenção). Torna-se, portanto, de extrema importância a determinação das alterações microestruturais provocadas pelos retrabalhos de solda e consequentes efeitos na integridade estrutural de componentes aeronáuticos, particularmente aqueles críticos à segurança de vôo, e este estudo vem ao encontro desta necessidade.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Aço AISI 4130

O aço AISI 4130 pertence a família dos aços 41XX, que são caracterizados como aços de baixa liga e alta resistência. Essa família possui dois elementos de liga, que são o cromo e o molibdênio, que melhoram a resistência a tração do material em altas temperaturas. Os aços 41XX normalmente são chamados de aços ‘chromoly’, devido aos elementos de liga contido neles (cromo e molibdênio).

A classe 41XX possui importantes características como a capacidade de serem endurecidos por carburação de superfície e a ultra-alta resistência. A carburação da superfície mantém o núcleo com suas mesmas 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 [1]. 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 [2].

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 [1,3]. Recentemente tem sido sugerido o emprego desse aço na fabricação de eixos ferroviários, devido suas melhores propriedades mecânicas [4]. São usados também em aeronaves, e essa classe é, muitas vezes, referida como a classe “da tubulação do avião” [1]. Quando normalizado, é utilizado em berços de motores de aviões. Essa estrutura tem uma grande responsabilidade, sendo crítico à segurança de vôo, pois se fraturada pode causar descontrole da aeronave até acidente fatal [5,6].

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 [2].

Aços ultra-alta resistência mecânica são aqueles capazes de fornecer um limite de escoamento mínimo de 1380 MPa [7]. 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 [8].

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 [7]. Dependendo do tratamento térmico a microestrutura obtida é diferente, podendo ser ferrito-perlítica, martensítica temperada ou até mesmo bainítica [9]. 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 [7].

#### **4.2. 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 [5,6].



**Figura 1: Berço-do-motor da aeronave**



A ocorrência de falha estrutural em vôo normalmente está ligada à fadiga do material, erro de projeto ou sobrecarga aerodinâmica [10]. Muitas das fraturas de materiais por fadiga são decorrentes de projetos inadequados ou entalhes gerados durante a fabricação ou a manutenção das aeronaves [11]. Erros em operações de manutenção, especialmente, têm resultado em sérios problemas de segurança e causas de acidentes fatais [12].

Uma aeronave está sujeita a uma série de influências que podem afetar a sua capacidade estrutural em suportar os rigores do vôo. 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 [13].

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 vôo, pois sua fratura provoca a perda do controle de vôo, 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 [5,6].

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 [14]. 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 [15]. 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 [16]. Muitos fatores influenciam o processo de fratura, como o acabamento da superfície, concentradores de tensão, tensões residuais, estrutura, fabricação ou tratamentos superficiais [15]. Esses fatos tornam o estudo da microestrutura do metal, da solda e da re-solda fundamental para o conhecimento da vida útil do material.

### **4.3. Solda TIG**

O processo de soldagem consiste na junção de metais por fusão, assegurando na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas.

Existem alguns obstáculos para esse processo ocorrer, como irregularidades, rugosidades, camadas de óxidos, umidades, gordura e poeira, na superfície dos materiais, caso esses obstáculos existem irá resultar em ligações químicas incompletas na superfície.

Em uma peça soldada,, três regiões principais devem ser observadas: a região do metal base, a zona afetada pelo calor (ZAC) 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 [17].

A soldagem do tipo TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza um eletrodo de tungstênio não-consumível e cria um arco entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Este processo é uma das tecnologias mais populares de soldagem de materiais finos, pois produz soldas de alta qualidade [18].

Existem diversas aplicações da solda TIG na indústria como: soldagem de precisão ou de elevada qualidade, soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro, execução de passes de raiz em tubulações e soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos. Além das diversas aplicações de seu uso, também é muito utilizada por suas vantagens: excelente controle da poça de fusão, permite soldagem sem uso de metal de adição, permite mecanização e automação do processo, usado para soldar a maioria dos metais, solda de alta qualidade e acabamento, pouco ou nenhum respingo, pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem e soldagem em qualquer posição.

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 [20]. 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 [21].

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 [26].

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% [22].

Na ZAC (zona afetada pelo calor) 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 ZAC 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 [22].

#### **4.4. 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 [23]. 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 [24].

Materiais extrudados sem nenhum tratamento térmico possuem grãos alongados enquanto matérias 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 [25].

Após a preparação metalográfica é necessário fazer um ataque químico capaz de revelar as fases presentes no aço. O ataque nital 5%, ácido nítrico com álcool, revela contorno de grão, ferrita em cores claras e estruturas com cementita na cor escura. O ataque picral 4%, ácido pícrico com álcool, permite uma revelação mais detalhada de martensita, perlita e bainita. O ataque Le Pera,, picral 4% e metabissulfito de sódio 1%, revela na coloração marrom claro para ferrita, marrom escuro para bainita e branco para martensita e austenita retida.

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

Quando se solda um metal, mudanças microestruturais ocorrerão, podendo fragilizar o material, o que para um material usado em estruturas de segurança, é de extrema importância que os efeitos da solda, das suas correções e de retrabalhos sejam estudados [17]. Existem 3 regiões no aço após a soldagem, o metal base, a ZTA (zona termicamente afetada) e o metal de solda [28]. A ZTA e a região do metal de solda são as principais regiões que alteram as propriedades mecânicas de um material.

#### **4.5. 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 revestimento a um substrato, ou a força coesiva de um revestimento sendo aplicada uma força normal à superfície. O teste é feito em temperatura ambiente [21].

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 [19].

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’’.

#### **4.6. Classificação dos Microconstituintes do Metal de Solda**

Ferrita Primária: Pode ocorrer em ferrita de contorno de grão ou ferrita poligonal intragranular.[17,26]

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.[17,26]

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.[18,28]

Agregado ferrita/carboneto: Estrutura de ferrita fina e carbonetos, que pode ser uma precipitação interface, como perlita.[17,26]

Martensita: Este microconstituente pode apresentar-se sob duas formas: martensita ripada ou martensita maclada.[17,26]

## 5. MATERIAIS E METODOLOGIA

### 5.1. Materiais e Equipamentos

- Amostra de tubo tipo usado na aeronave de aço normalizado;
- Lixas com granulação 300, 600, 1000, 1200 e 1500;
- Panos de Polimento: Marca Arotec (modelos: DBM e MAR);
- Abrasivo: Pasta de diamante  $6\mu$  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 5% para ataque;
- Picral 4% para ataque;
- LePera constituído de Picral 4% e metabissulfito de sódio 1%, na proporção 1:1;
- Aço AISI 4130 usado em condições reais;
- 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 EPICPHOT;
- Equipamento para ensaio de tração SHIMADZU e INSTRON (modelo 8801).

Dimensões do material utilizado: tubos extrudados do aço AISI 4130 de  $\phi 15,8$  mm ( $\phi 5/8''$ ) e  $\phi 12,7$ mm ( $\phi 1/2''$ ), ambos contendo  $0,89$ mm ( $0,035''$ ) de espessura de parede, para posterior confecção dos corpos-de-prova para análise metalográfica e ensaio de tração.

## 5.2. Métodos

O estudo será desenvolvido em juntas soldadas e retrabalhadas de um componente real (AISI 4130), crítico à segurança de vôo, cedido pela empresa NEIVA/EMBRAER S.A., e que atingiu a sua vida útil de projeto. Portanto, tal componente possui um histórico de retrabalhos e de esforços suportados ao longo de aproximadamente 20 anos de vida operacional. Foram realizadas análises de tração e micrografia das juntas soldadas - metal de solda (MS) e zona afetada pelo calor (ZAC) -, submetidas a três retrabalhos de solda e atacadas com os reagentes Nital 5%, Picral 4% e Le Pera (picral 4% + metabissulfito de sódio 1%). As análises foram comparadas a juntas soldadas com apenas um retrabalho.

### 5.2.1. Corte

Para análise de resistência à tração do material estudado, foram confeccionados seis diferentes corpos-de-prova conforme figura 2:



**Figura 2:** Corpos-de-prova para ensaio de tração

Para análise metalográfica foram feitos dois cortes, um corte na transversal e um corte superficial, como nas figuras 3 e 4:





**Figura 3:** Corte 1 da amostra para embutimento



**Figura 4:** Corte 2 da amostra para embutimento

Foi utilizado o equipamento Isomet 1000 para realizar os corte do material aeronáutico, conforme figura 5:



Figura 5: Isomet 1000 durante o corte da amostra

### 5.2.2. Embutimento

Posteriormente ao corte, foi feito o embutimento nos corpos-de-prova para análise metalográfica para facilitar a manipulação da amostra.

Primeiramente se limpa bem o equipamento (embutidora Aerotec), então o lubrifica com vaselina líquida com o auxílio de um algodão ou usando um lubrificante em lata, em seguida coloca a amostra juntamente com a baquelite, aproximadamente 20 ml.

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



Figura 6: Embutidora Aerotec – modelo PRE 30M

Durante o aquecimento, é necessária atenção, pois entre 80°C e 110°C, a pressão cai rapidamente e se não houver pressão suficiente a amostra terá um embutimento de má qualidade, para aumentar a pressão movimentar a alavanca (figura 6) para cima e para baixo.

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



**Figura 7: Solda embutida (esquerda transversal e direita superficial)**

### 5.2.3. 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 lixa com 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 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.

#### 5.2.4. Polimento

A amostra do aço usado em condições reais, foi polido 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 visualiza a superfície da amostra, deve-se fazer um procedimento meticuloso de secagem para não ocorrer mancha de secagem, 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).

#### 5.2.5. Ataque

Foram realizados três tipos de ataques: Nital, Picral e Le Pera. O nital revela contornos de grão, o picral diferencia de forma bem definida as fases presentes na amostra e o le pera é utilizado para observar as diferentes fases que esse aço possui. Todos os ataques foram feitos com luva como uma forma de proteção e dentro de uma capela.

O ataque foi feito da seguinte forma:

- Primeiramente, colocou-se o reagente no vidro de relógio;
- A solução foi friccionada com o auxílio de um algodão na superfície da amostra, então lavada em água corrente por cerca de 5 segundos e seca com o secador.

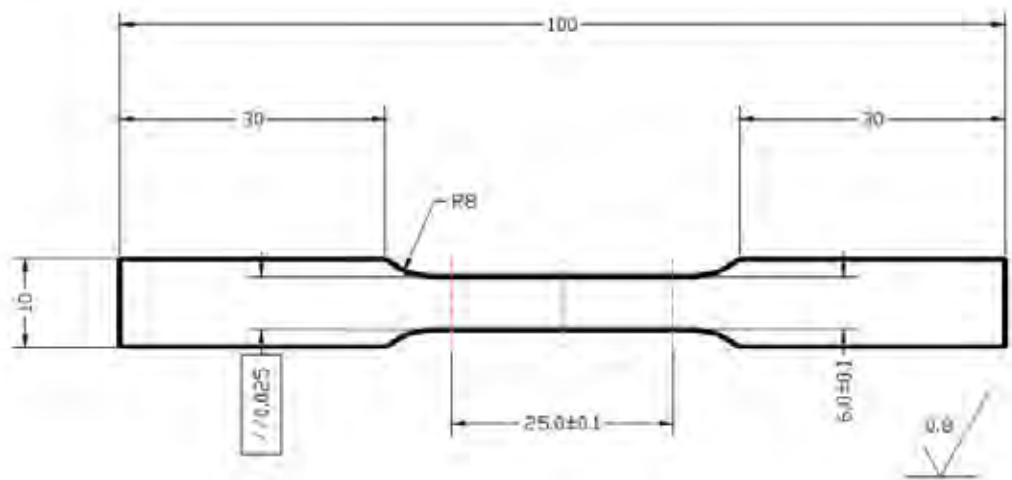
Esse processo se repete para cada ataque até todas as fotos serem obtidas.

#### 5.2.6. Microscopia e Microanálise Amostral

As imagens foram feitas com ampliação de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes e analisadas em diferentes regiões da amostra, para obter o máximo de informações possíveis das mudanças causadas pelos retrabalhos da solda.

#### 5.2.7. Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração, usou-se a norma ASTM E 8M sendo 6 corpos-de-prova com na figura 8.



**Figura8: Corte do Metal de acordo com a Norma ASTM E 8M**

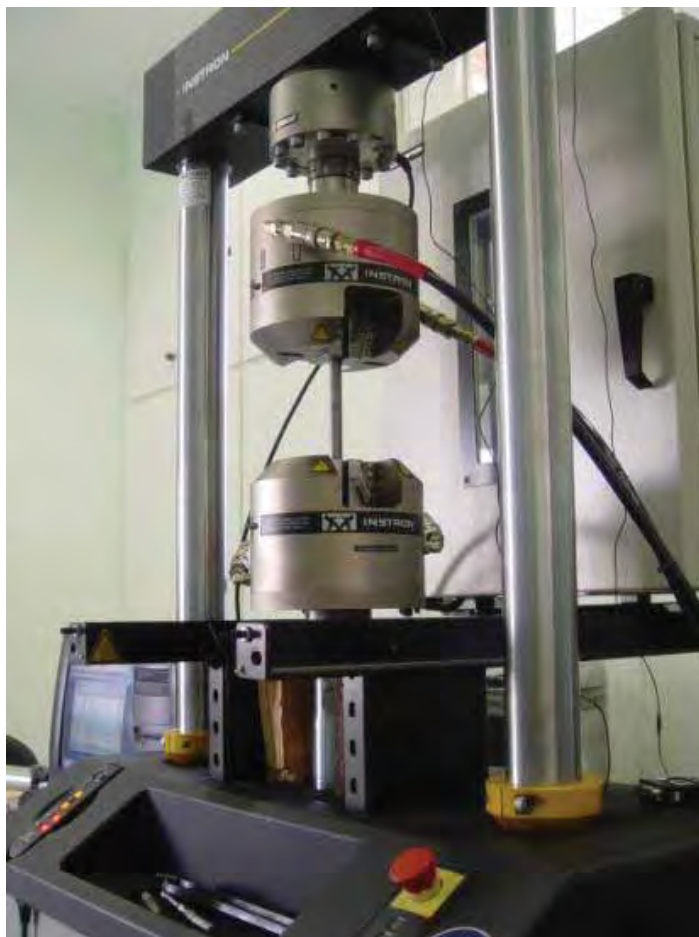
O ensaio de tração foi feito primeiramente no equipamento Shimadzu (figura 9), sendo que três dos seis corpos-de-prova foram ensaiados neste equipamento.



**Figura 9: Equipamento Shimadzu**

Os dados do ensaio foram gravados no computador acoplado ao equipamento e posteriormente gravados em um CD para serem analisados.

O equipamento INSTRON, modelo 8801 (figura 10), foi usado para fazer o ensaio de tração nos três corpos-de-prova restantes.



**Figura 2: Equipamento INSTRON**

Assim como a SHIMADZU, esse equipamento possui um computador acoplado a ele, onde os dados são gravados e então passados a um CD, para que eles sejam analisados.

Todos esses ensaios foram realizados pelos técnicos da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campos de Guaratinguetá.

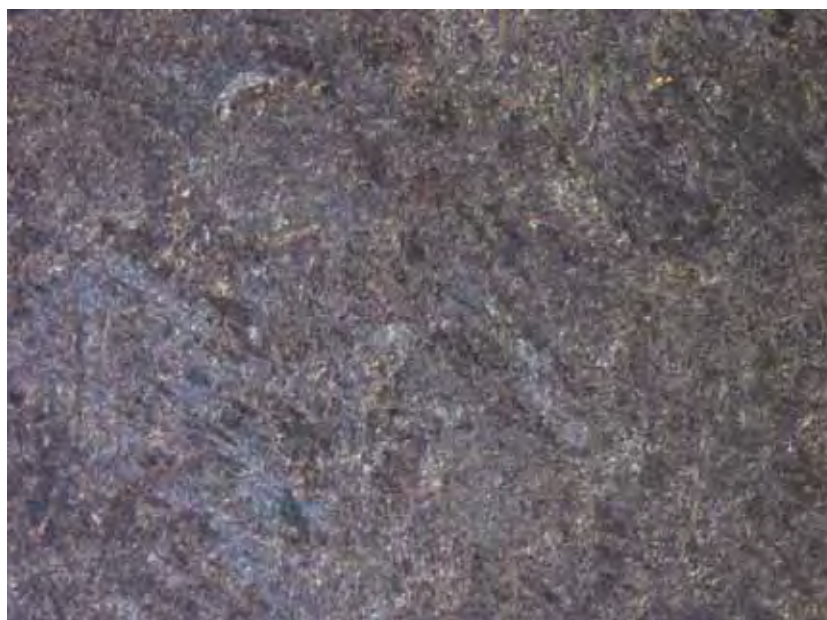
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentadas as imagens feitas no Epicphot comparando as amostras cortadas transversalmente e superficialmente, com diferentes tipos de ataques.

### 6.1. Ataque Nital

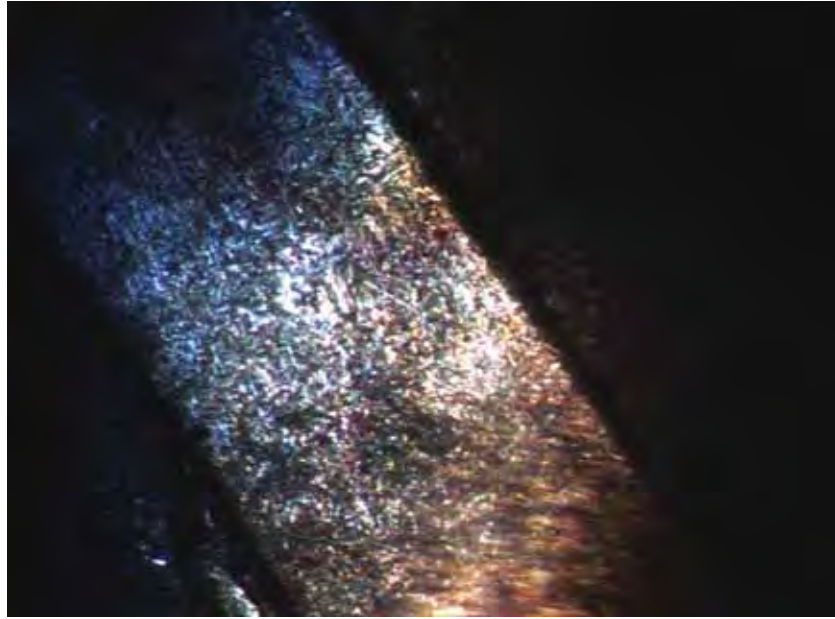
#### 6.1.1. Ampliação de 50 X

Figuras 11 e 12, mostram a Zona Termicamente Afetada do material.



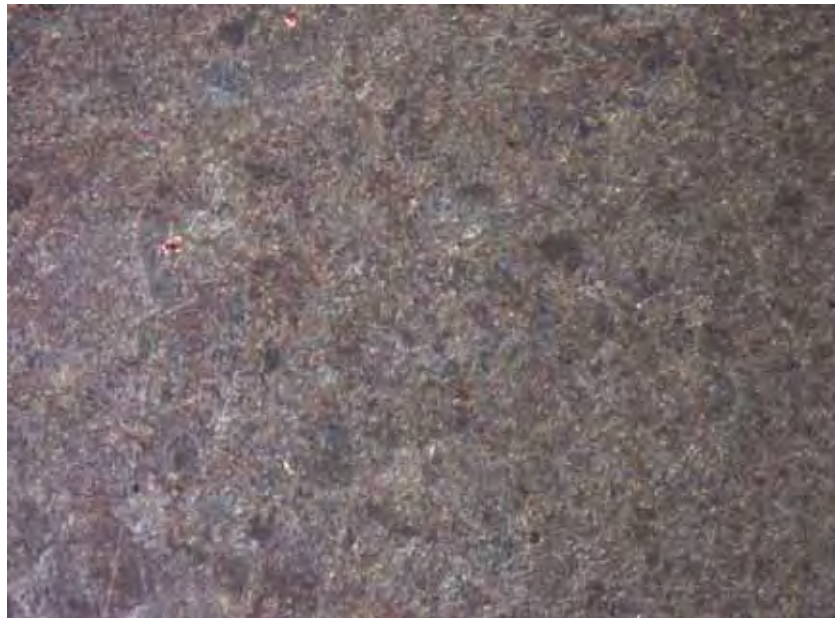
**Figura 11: Corte Superficial – Zona Termicamente Afetada (ZTA)**





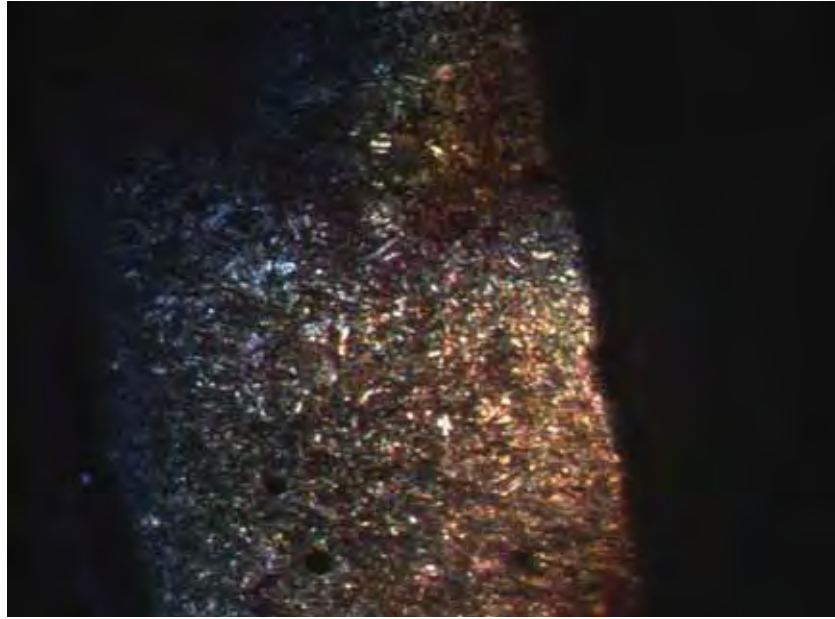
**Figura 12: Corte Transversal - ZTA**

Figuras 13 e 14, mostram a região na afetada do material base.



**Figura 13: Corte Superficial – Região não afetada termicamente.**

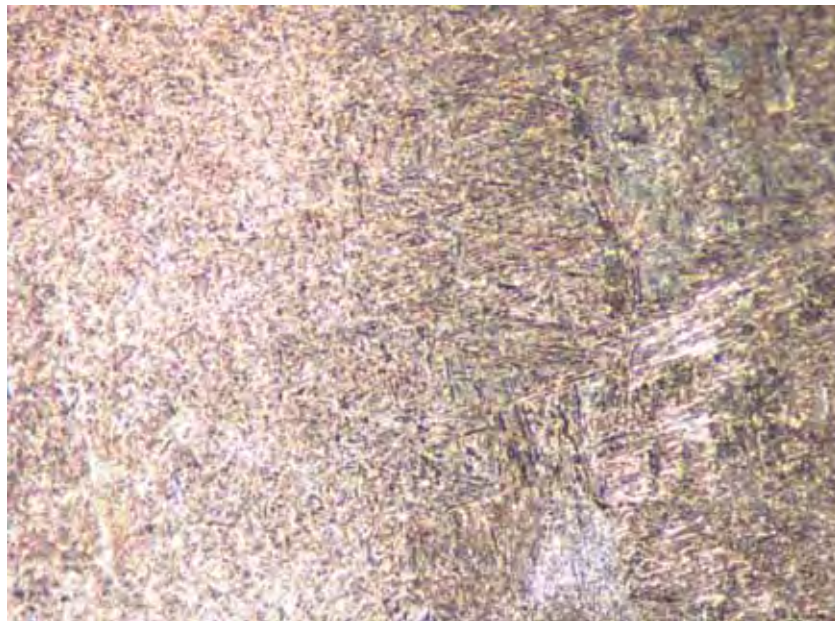




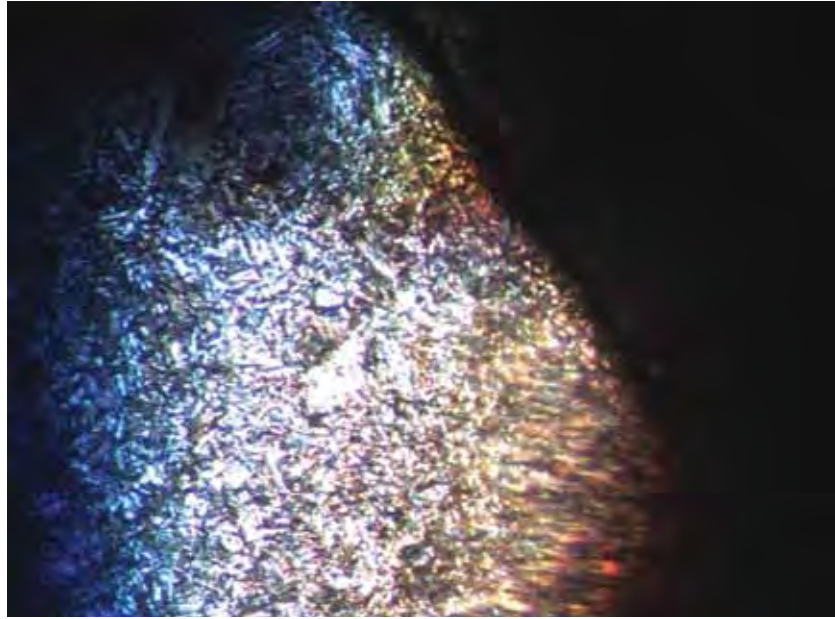
**Figura 14: Corte Transversal – Região não afetada termicamente.**

### **6.1.2. Ampliação de 100 X**

Figuras 15 e 16, mostram a ZTA.

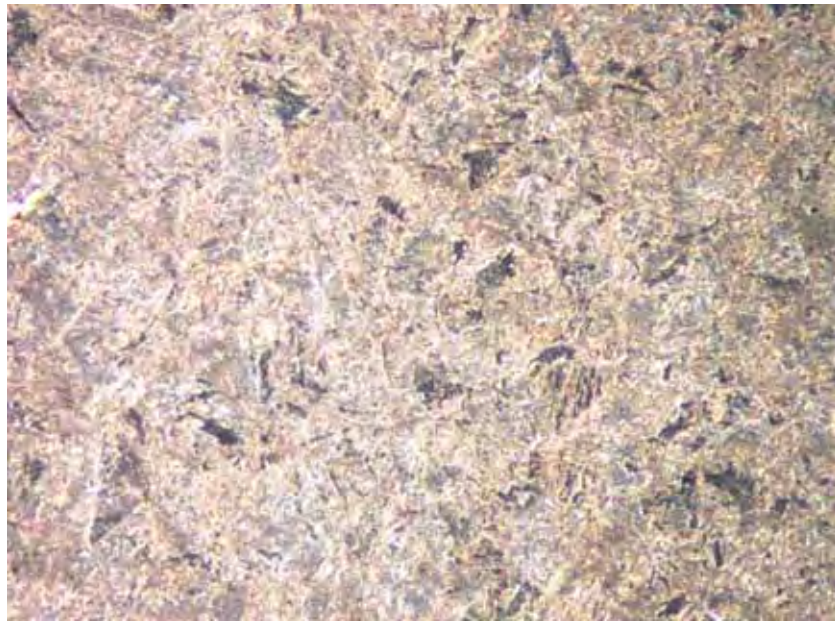


**Figura 15: Corte Superficial – ZTA.**



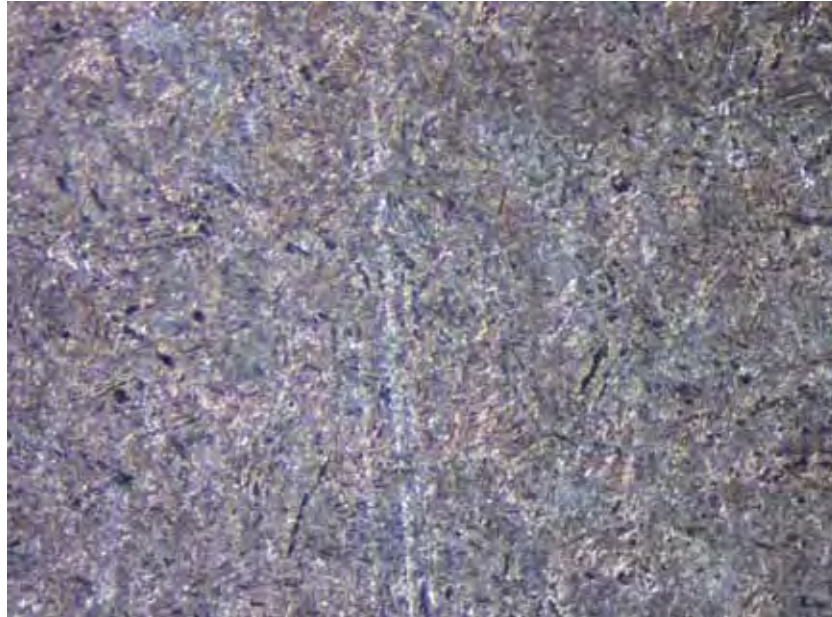
**Figura 16: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 17 e 18, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 17: Corte Superficial – Região não afetada termicamente.**

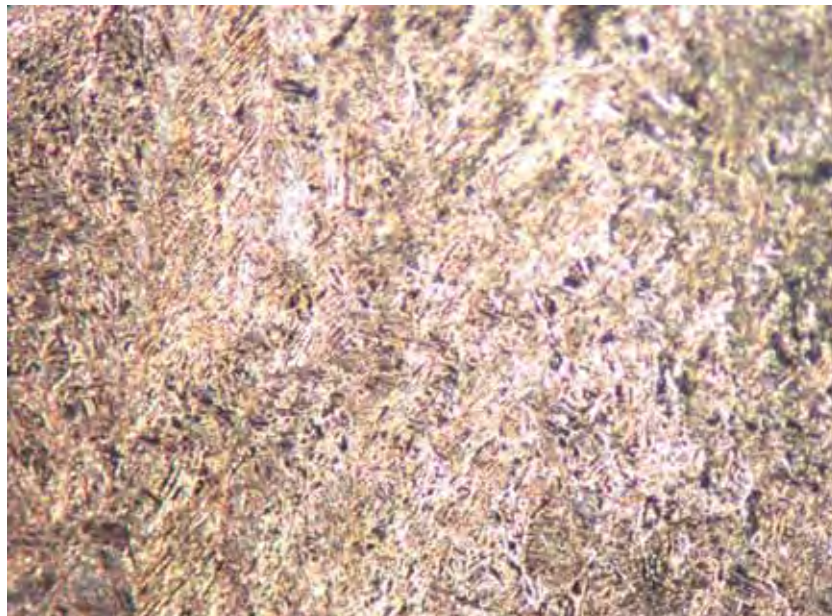




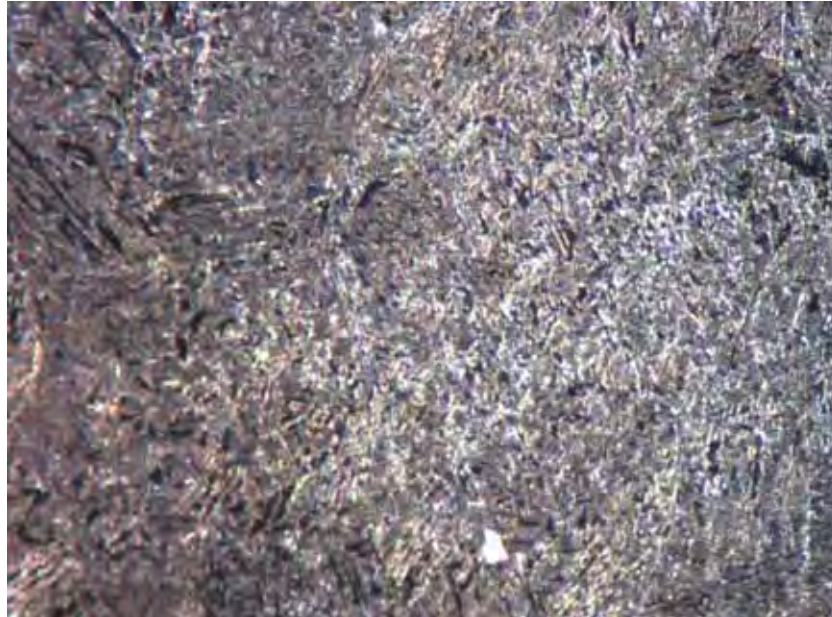
**Figura 18: Corte Transversal – Região não afetada termicamente.**

### 6.1.3. Ampliação de 200 X

Figuras 19 e 20, mostram a ZTA.

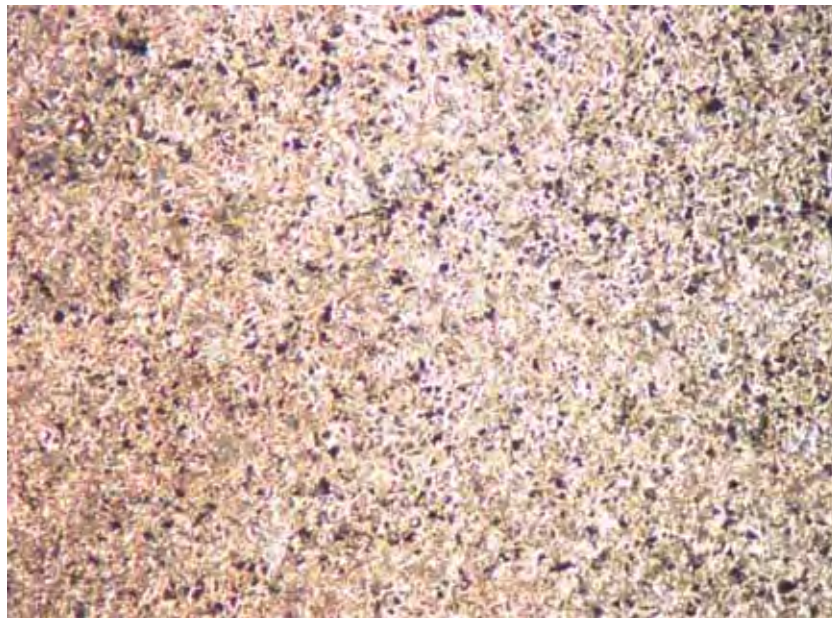


**Figura 19: Corte Superficial – ZTA.**



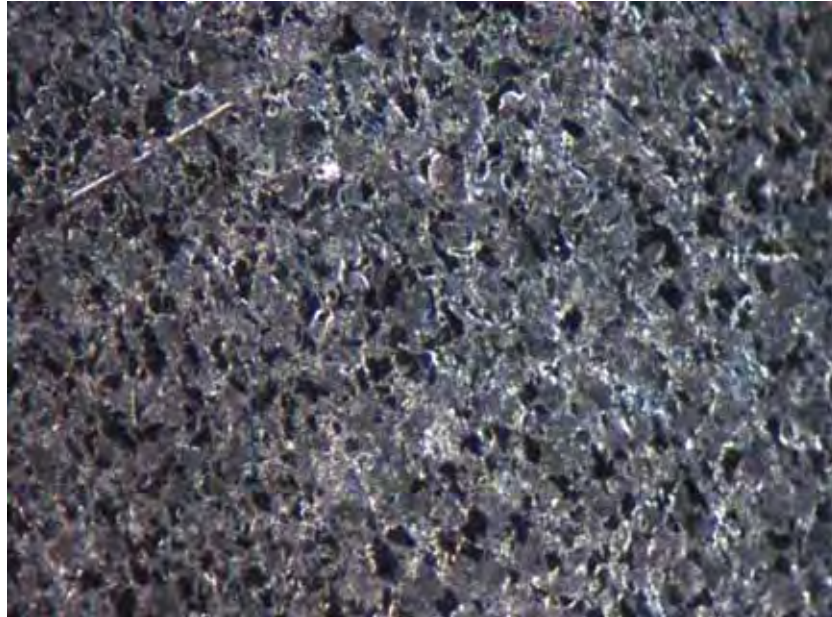
**Figura 20: Corte Transversal – ZTA.**

Figura 21 e 22, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 21: Corte Superficial – Região não afetada termicamente.**

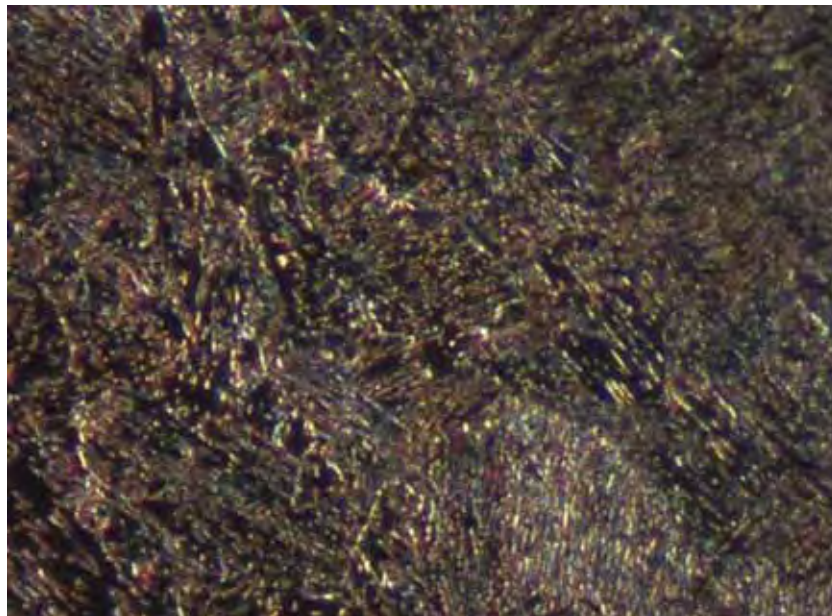




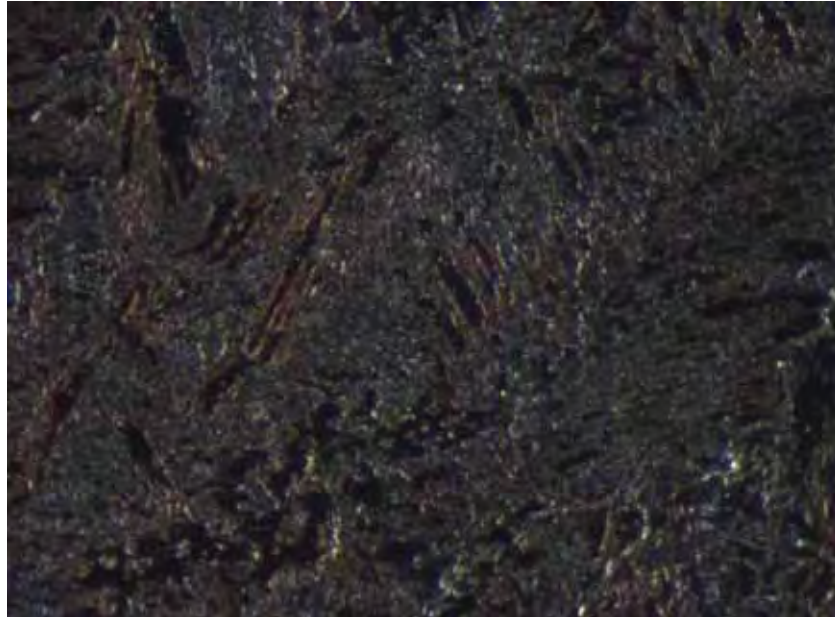
**Figura 22: Corte Transversal – Região não afetada termicamente.**

#### **6.1.4. Ampliação de 500 X**

Figuras 23 e 24, mostram a ZTA.

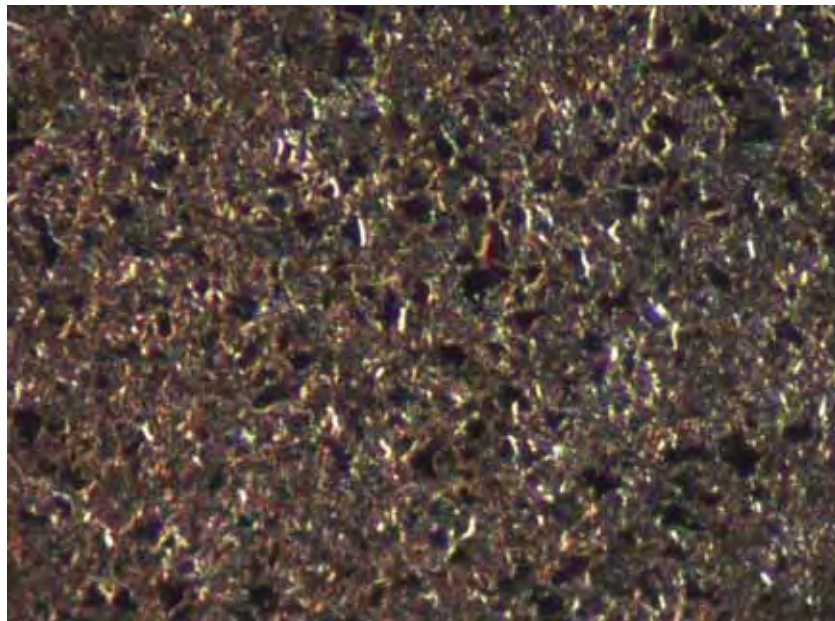


**Figura 23: Corte Superficial – ZTA.**

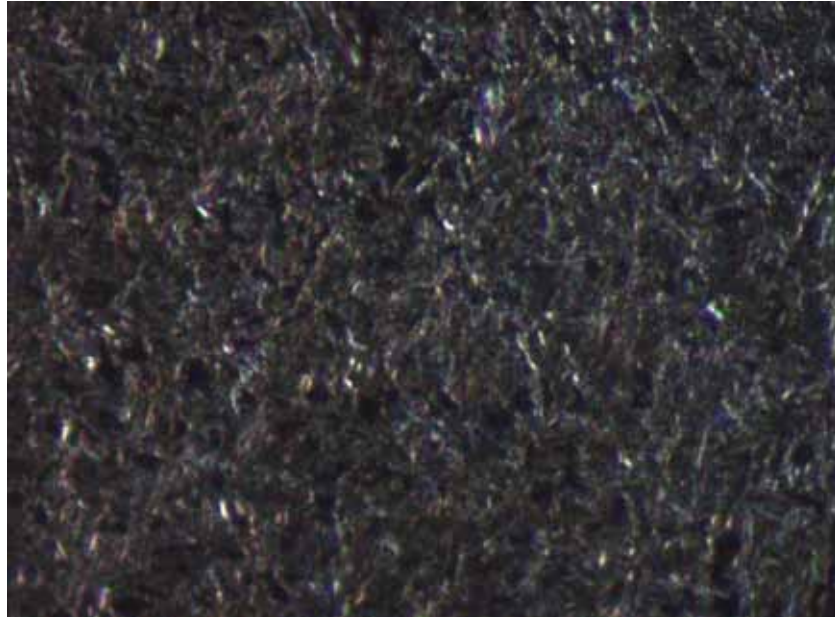


**Figura 24: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 25 e 26, mostram a região não afetada termicamente.



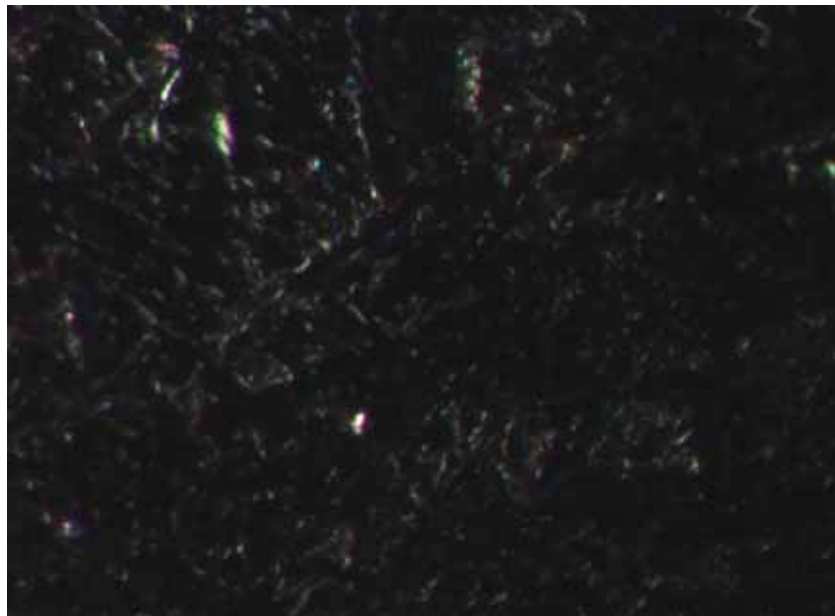
**Figura 25: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**



**Figura 26: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

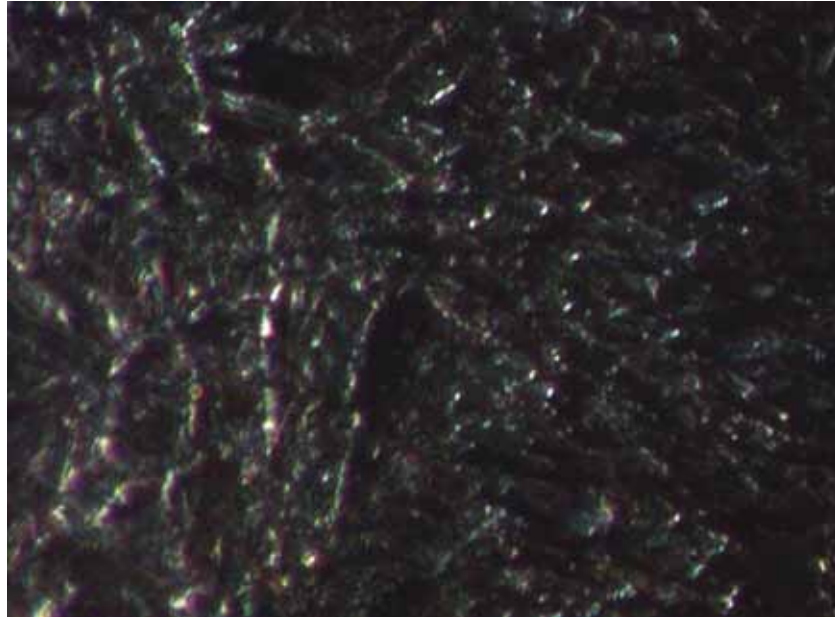
#### **6.1.5. Ampliação de 1000 X**

Figuras 27 e 28, mostram a ZTA.



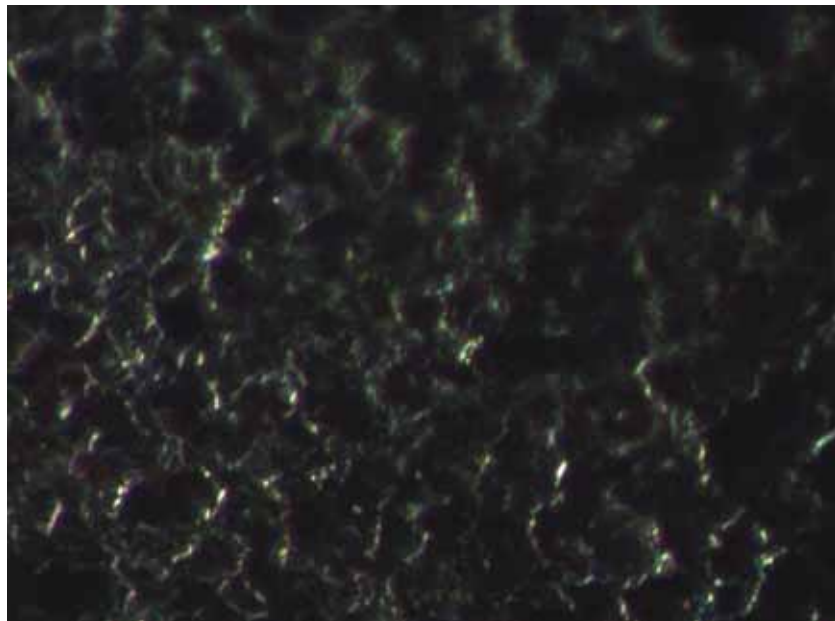
**Figura 27: Corte Superficial – ZTA.**





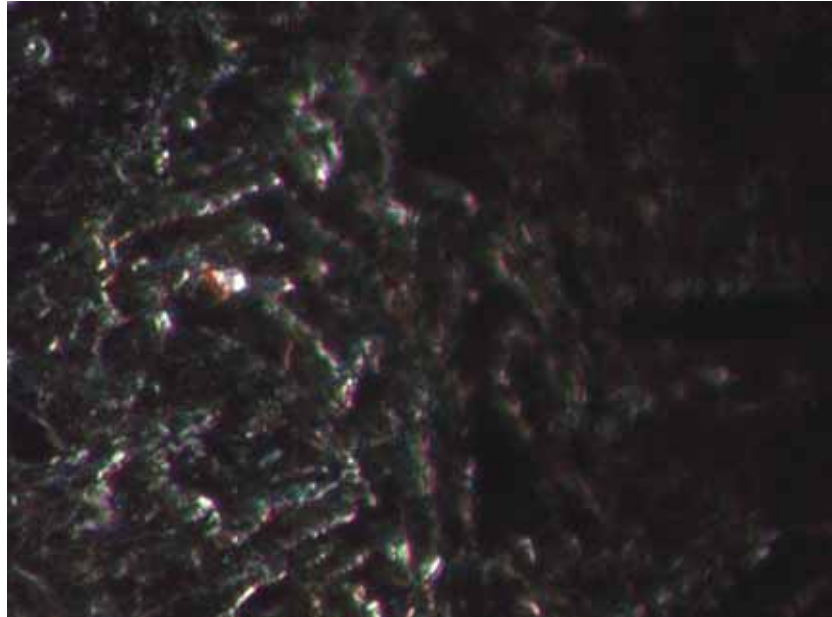
**Figura 28: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 29 e 30, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 29: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**





**Figura 30: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

#### **6.1.6. Comentários**

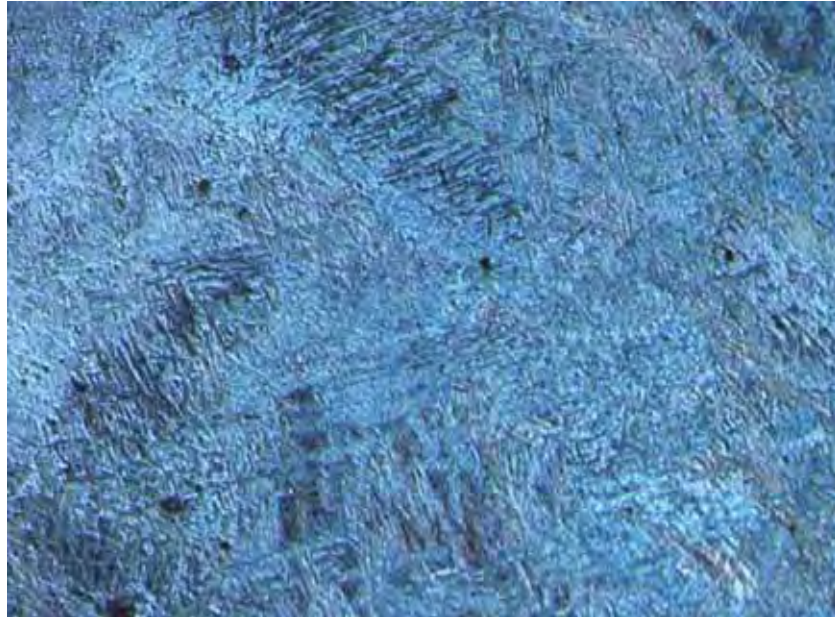
A partir das fotos foi possível visualizar a diferença na quantidade de ferrita (cor branca) da cementita (cor preta) ao longo do material até a região da solda.

Na região da solda é encontrado mais cementita, que torna material menos dúctil e deixando-o mais frágil para impactos.

#### **6.2. Ataque Picral**

##### **6.2.1. Ampliação de 50 X**

Figuras 31 e 32, mostram a ZTA.



**Figura 31: Corte Superficial – ZTA.**



**Figura 32: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 33 e 34, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 33: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**



**Figura 34: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

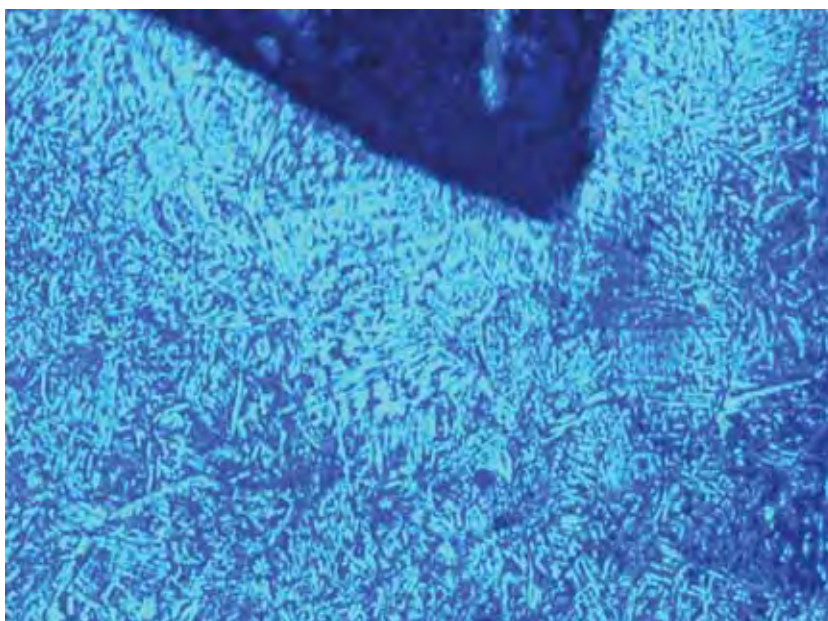
### 6.2.2. Ampliação de 100 X

Figuras 34 e 35, mostram a ZTA.





**Figura 34: Corte Superficial – ZTA.**



**Figura 35: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 36 e 37, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 36: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**

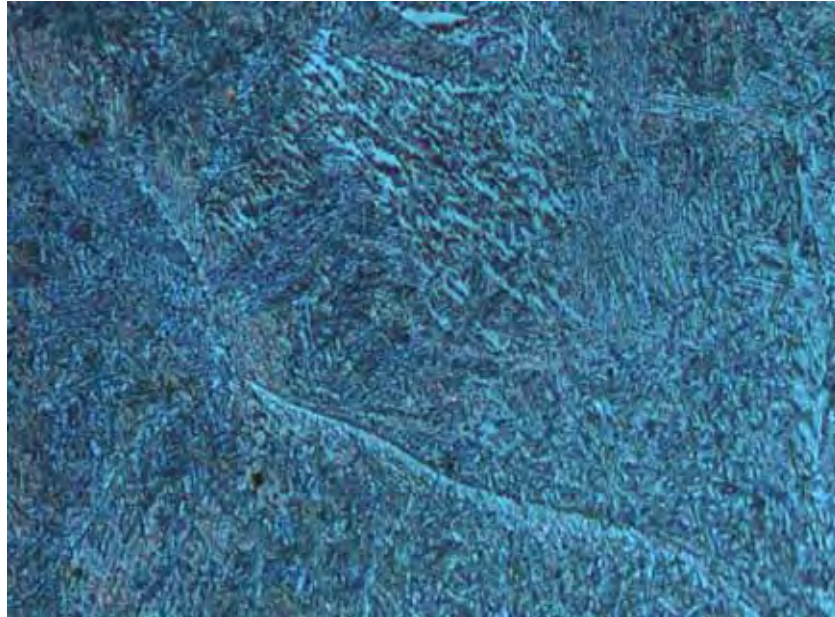


**Figura 37: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

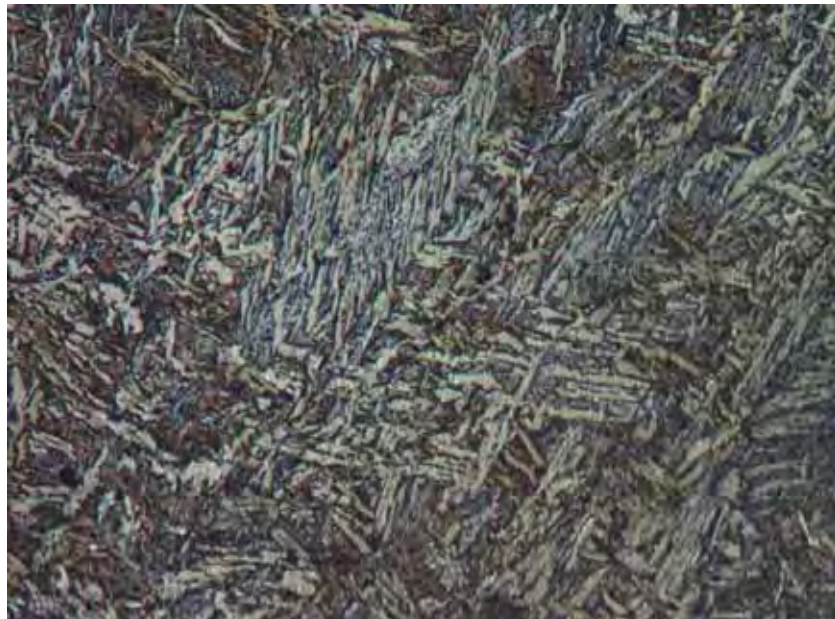
### 6.2.3. Ampliação de 200 X

Figuras 38 e 39, mostram a ZTA.



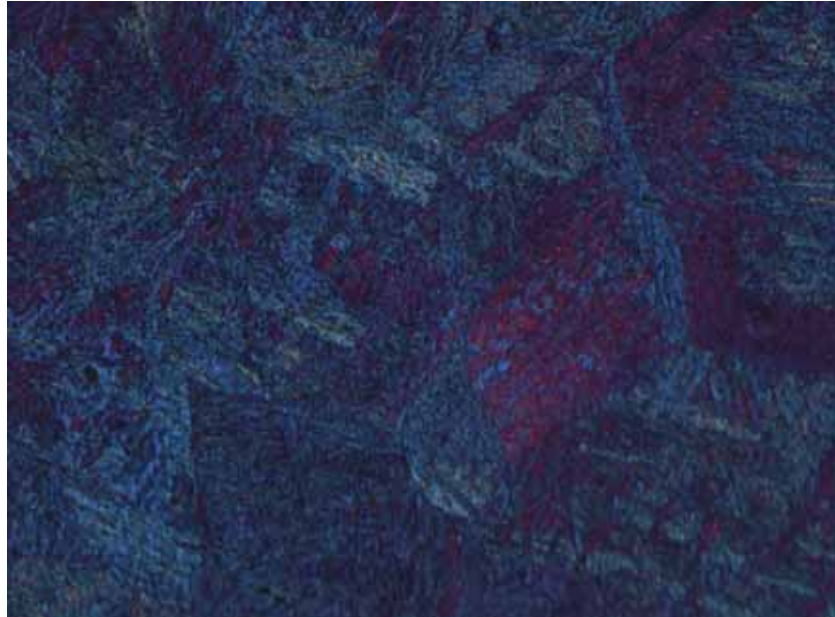


**Figura 38: Corte Superficial – ZTA.**



**Figura 39: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 40 e 41, mostram a região não afetada termicamente.



**Figura 40: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**

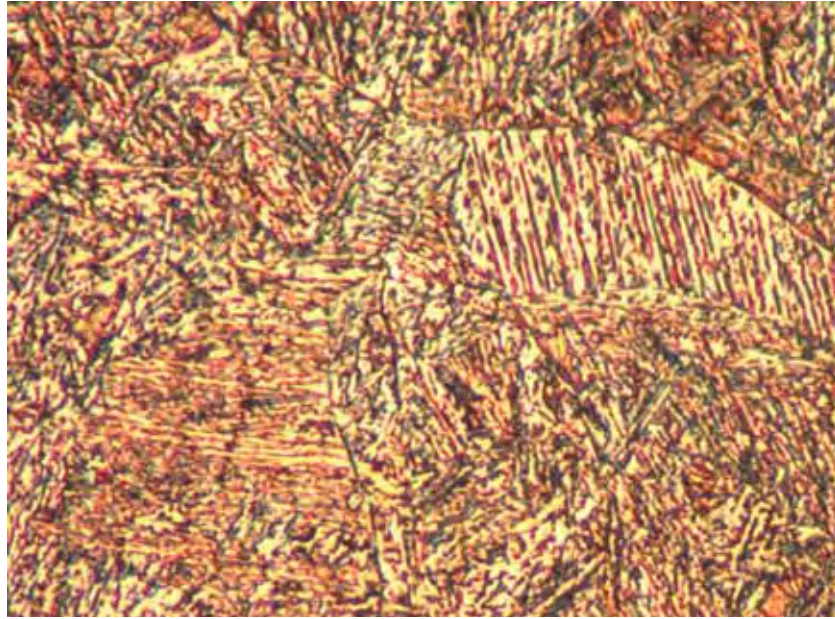


**Figura 41: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

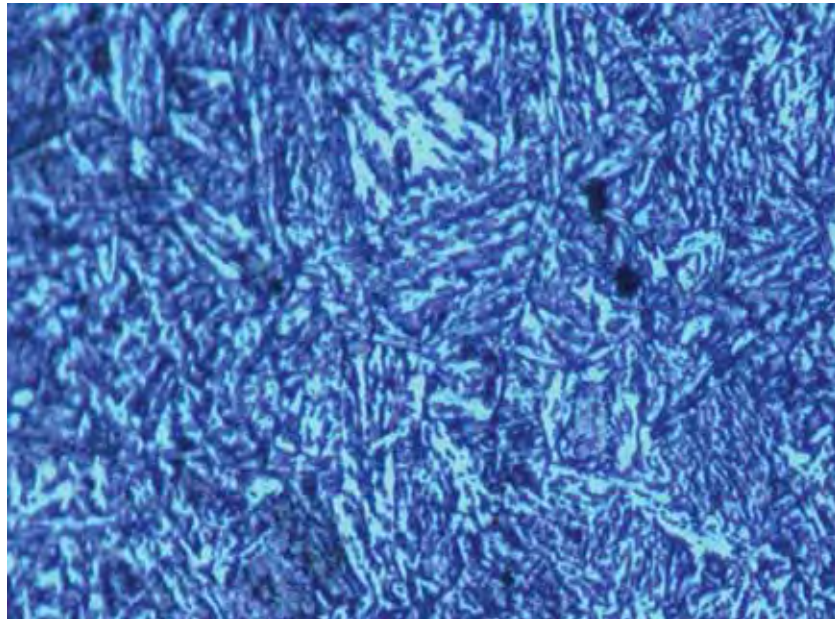
#### **6.2.4. Ampliação de 500 X**

Figuras 42 e 43, mostram a ZTA.





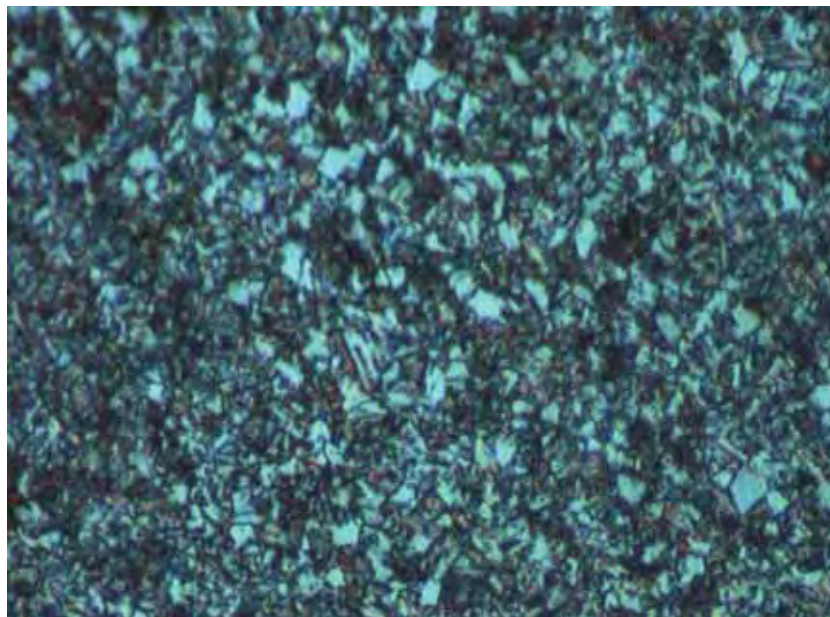
**Figura 42: Corte Superficial – ZTA.**



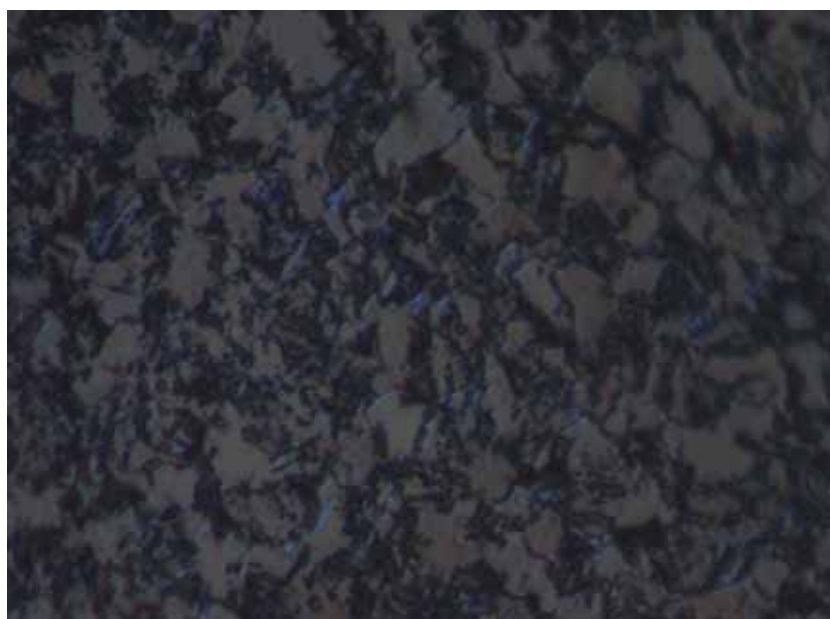
**Figura 43: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 44 e 45, mostram a região não afetada termicamente.





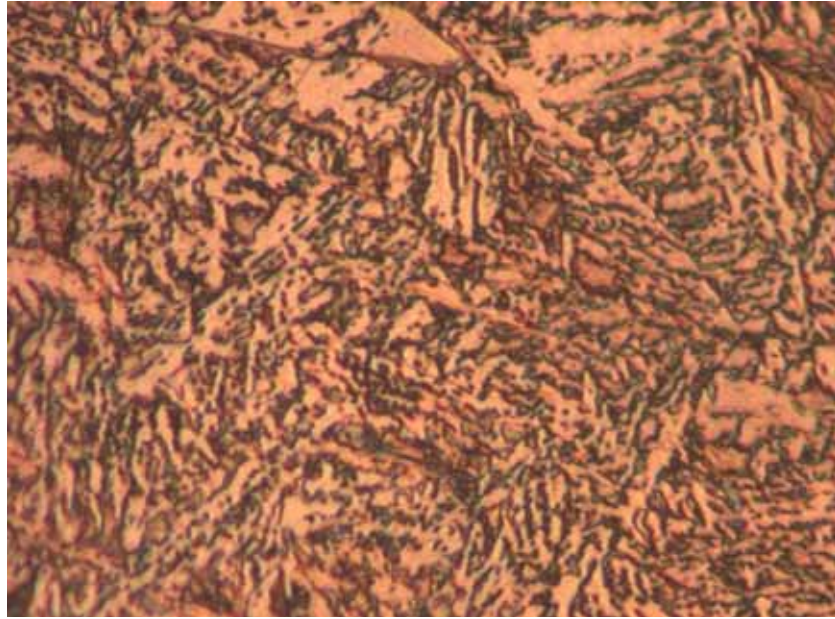
**Figura 44: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**



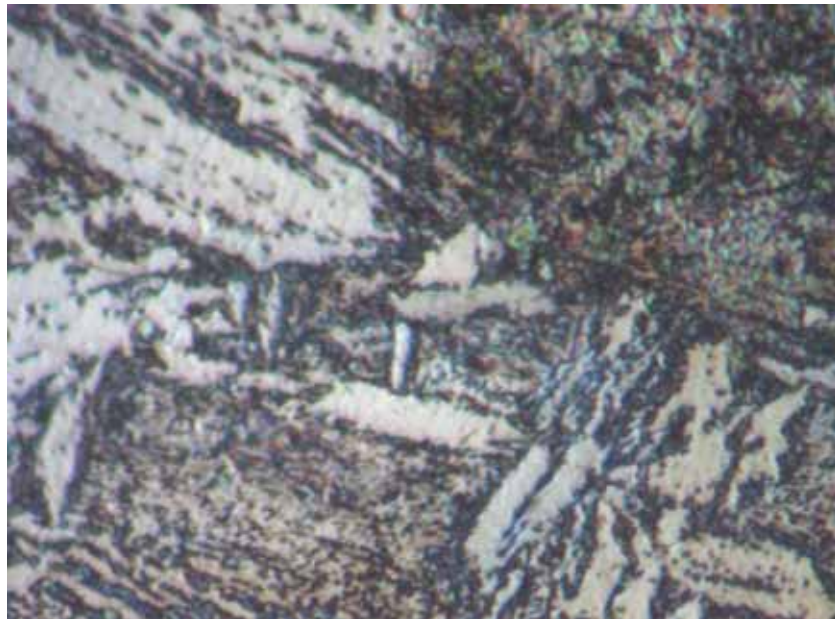
**Figura 45: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

#### **6.2.5. Ampliação de 1000 X**

Figuras 46 e 47, mostram a ZTA.



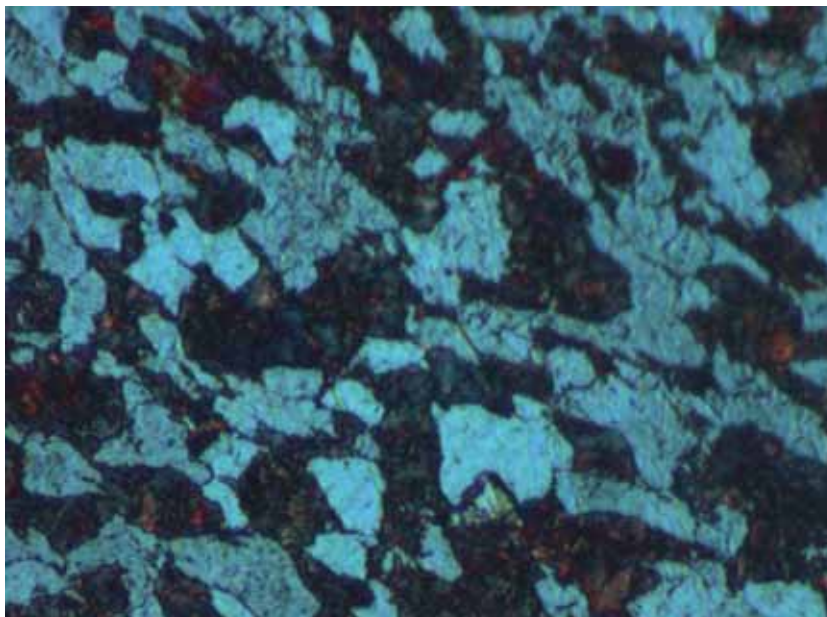
**Figura 46: Corte Superficial – ZTA.**



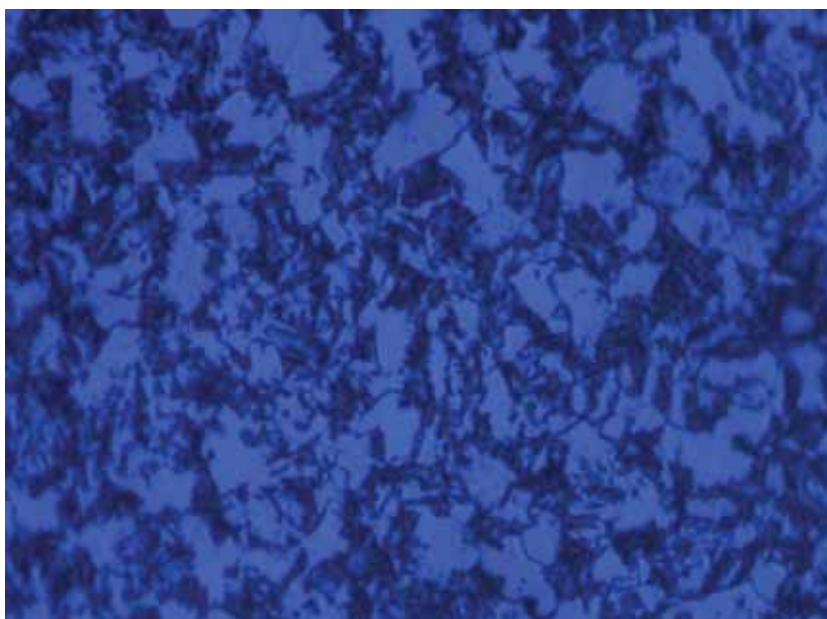
**Figura 47: Corte Transversal – ZTA.**

Figuras 48 e 49, mostram a região não afetada termicamente.





**Figura 48: Corte Superficial - Região não afetada termicamente.**



**Figura 49: Corte Transversal - Região não afetada termicamente.**

#### **6.2.6. Comentários**

O ataque com o picral revelou melhor o contorno do grão e deixando clara a existência de martensita, grãos escuros na forma de agulha, na ZTA. Revelou também a existência de bainita na região próxima a solda.

Outra vantagem desse ataque foi a possibilidade de utilizar luz polarizado, que como vista na figura 48 realçou a ferrita no material.

### 6.3. Ataque Le Pera

O ataque Le Pera não foi bem sucedido na amostra superficial, porém na amostra transversal foi possível visualizar a variação do tamanho do grão ao se aproximar da solda. Nas figuras abaixo será mostrado o aumento gradativo do grão com uma ampliação de 500 X.

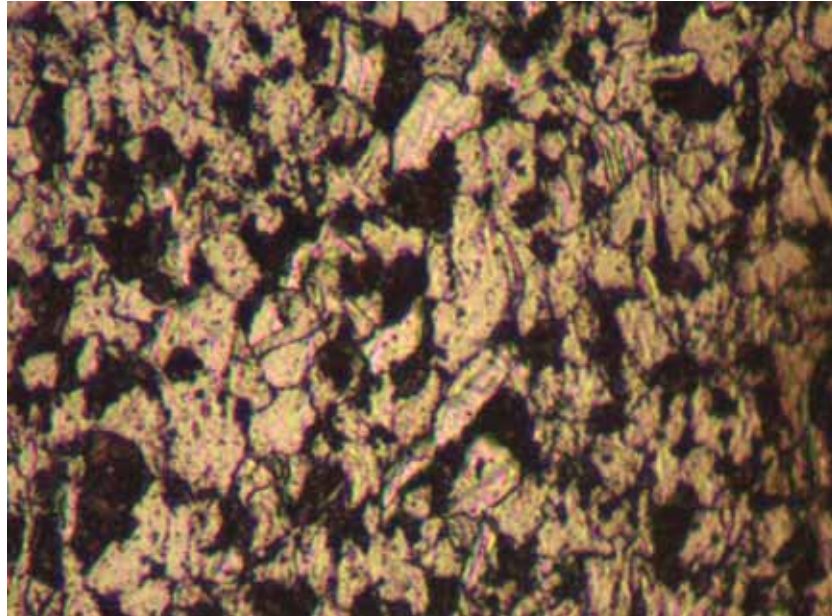


Figura 50: Região não afetada termicamente.

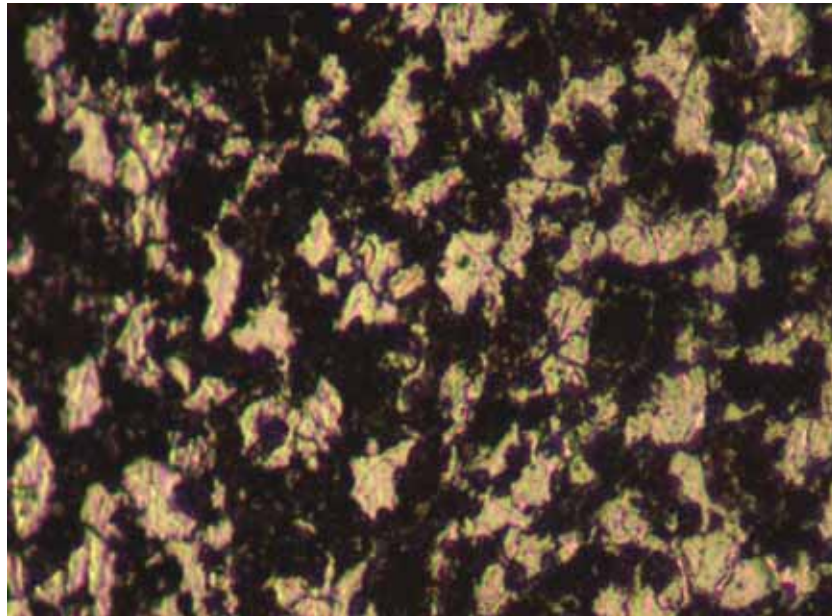
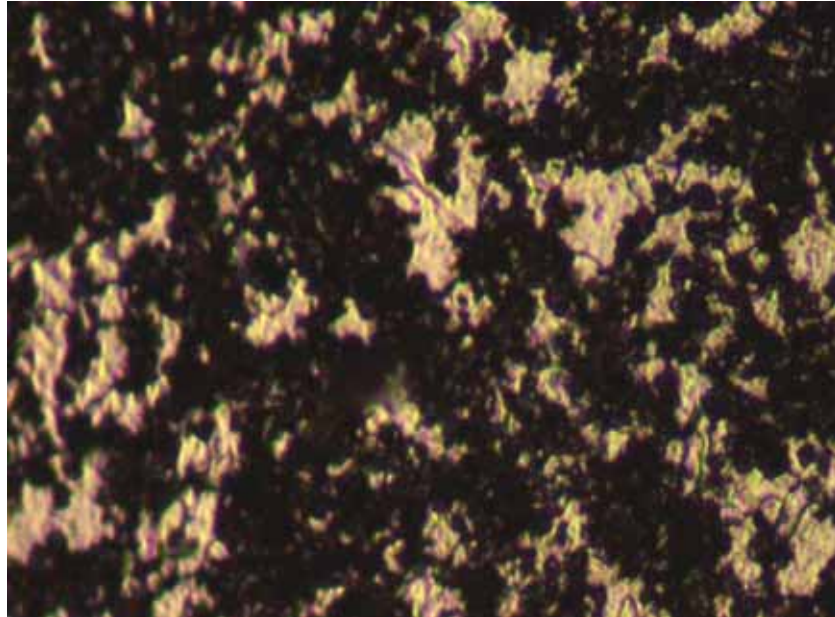
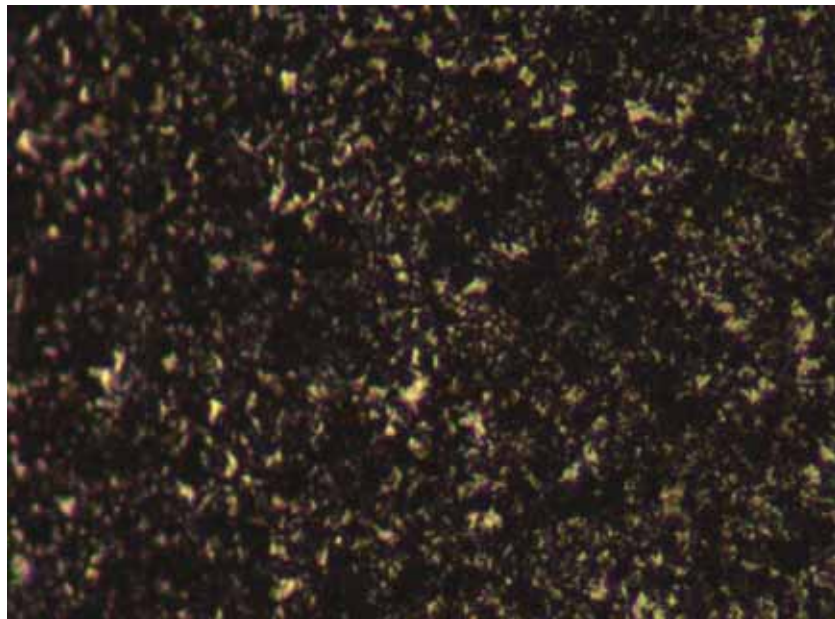


Figura 51: Grãos diminuindo ao ser aproximado da ZTA.

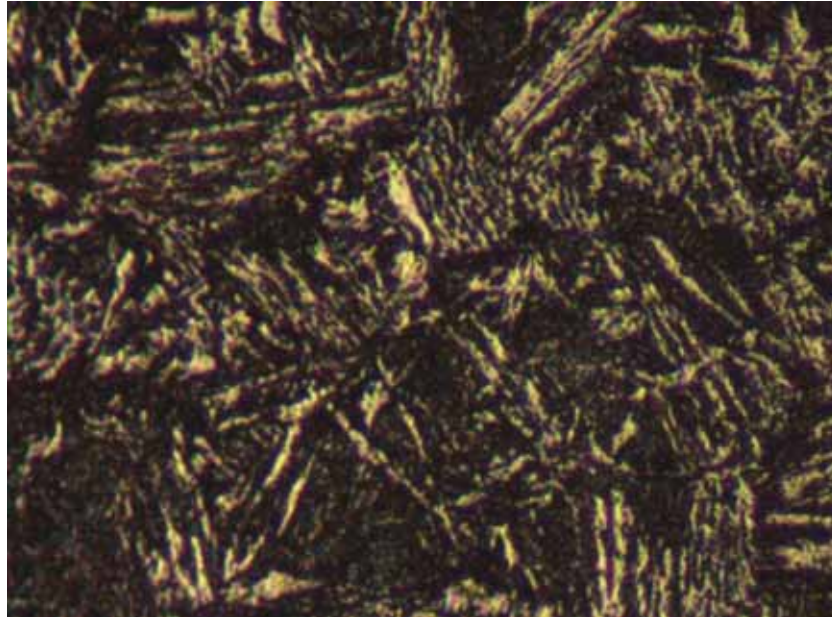




**Figura 52: Região escura (bainita).**



**Figura 53: Os grão estão muito menores que na região não afetada termicamente.**

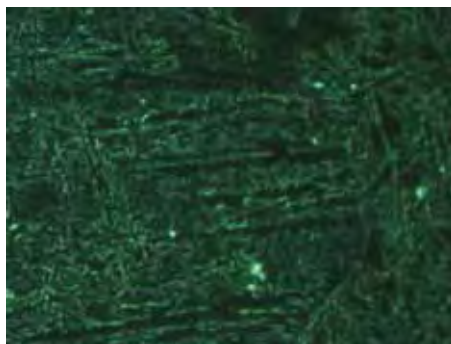


**Figura 54: Zona termicamente afetada – Grãos alongados.**

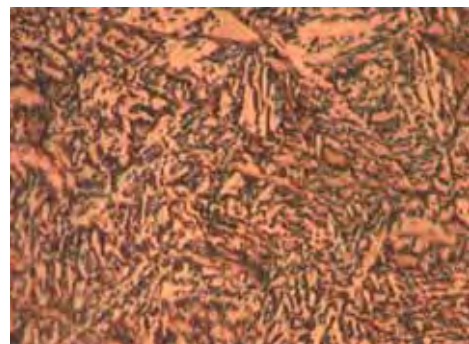
### 6.3.1. Comentários

Nesse ataque apesar de não ter obtido sucesso com a amostra superficial, foi possível mostrar o aumento do tamanho do grão ao se aproximar da área de solda como em nenhum outro ataque feito antes nesse trabalho.

### 6.4. Comparação entre amostra com retrabalho e sem retrabalho de solda



**Figura 55: ZTA – região da solda sem retrabalho.**



**Figura 56: ZTA – região da solda com três retrabalhos.**

#### 6.4.1. Comentário

Ambas as figuras acima foram tiradas com uma ampliação de 500X na região termicamente afetada pela solda. Pode-se verificar que o tamanho de grão varia de uma imagem para outra. Na figura 55, os grãos são mais alongados e mais largos, diferente da figura 56, que possui grãos menores tanto no comprimento quanto na largura. Isso ocorreu porque a amostra da figura 56 possui três retrabalhos enquanto a amostra da figura 55 possui apenas um cordão de solda.

### 7. CONCLUSÃO

A região da solda do berço-de-motor se mostrou uma área crítica para falhas decorrentes da criação de novas fases, que diminuem algumas propriedades do material como resistência a tração, ductilidade e tenacidade.

O ataque com nital revelou de forma clara os contornos de grãos e destacou em cor clara a ferrita, fase com pouco carbono e que proporciona maior tenacidade e ductilidade ao aço.

O ataque com o picral revelou martensita e bainita. O aparecimento dessas fases é de extrema importância para determinar a vida-útil do berço. Ficou muito visível o contorno de grão na região do material base, possibilitando verificar os materiais contidos em cada região.

O ataque com o LePera revelou aumento do grão ao aproximar-se da região da solda, a ocorrência dessa mudança facilita verificar onde o material está mais sujeito a falhar. Esse ataque provou a existência de bainita no material.

Na comparação entre as amostras com retrabalho e com apenas um cordão de solda, verificou-se que, quanto mais reparos são feitos na solda, maior é a modificação do tamanho do grão, fato que fragiliza o material.

Todas essas informações se tornam muito ricas para verificar onde será preciso maior atenção e cuidados na estrutura do material, e também onde é necessário ocorrer melhorias no material e no processo de soldagem, que é o causador das modificações estruturais.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Erik Oberg, et al., "Machinery's Handbook," 27th ed., **Industrial Press Inc.**, 2004.
- [2] 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
- [3] **Metal Forming Magazine Archive**, by Wyatt Swaim Consultant, The Lincoln Electric Co, Cleveland, OH, Jan. 2001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] **METALS HANDBOOK** - Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys. Vol 1, 10<sup>th</sup> Ed.; ASM International. Handbook Committee, 1990.
- [8] PICKERING, F. B.; **Physical Metallurgy and the Design of Steels.** 1<sup>st</sup> ed., Applied Science Publisher Ttd, 1978.
- [9] BULTEL, H.; VOGT, J.B.; Influence of Heat Treatment on Fatigue Behavior of 4130 AISI Steel, **Procedia Engineering**, Lille, p. 917-924, mar. 2010.
- [10] GORANSON, U. G., Fatigue Issues in Aircraft Maintenance and Repairs, **International Journal of Fatigue**, v. 19, p. S3-S21, 1993.
- [11] WENNER, C. A., DRURY, C. G., Analysing Human Error in Aircraft Ground Damage Incidents, **International Journal of Industrial Ergonomics**, 26, p. 177-199, 2000.
- [12] 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.
- [13] 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.

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

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

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

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

[18] 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

[19] 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.

[20] ÇELIC, 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

[21] 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.

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

[23] 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.

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

[25] 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.

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