

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2014

ERICA XIMENES DIAS

CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM AÇO DE FASES
COMPLEXAS (CP)

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá

2014

D54
1c

Dias, Erica Ximenes
Caracterização metalográfica de um aço de fases complexas (CP) /
Erica Ximenes Dias – Guaratinguetá : [s.n], 2014.
135 f : il.
Bibliografia: f. 123-135

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Aço 2. Microscopia I. Título

CDU 669.14(043)

ERICA XIMENES DIAS

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Boitelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / UNESP - FEG


Prof.ª Dr.ª. CRISTINA DE CARVALHO ARES ELISEI
FATEC


Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
UERJ

Janeiro de 2014

DADOS CURRICULARES

ERICA XIMENES DIAS

| | |
|------------|--|
| NASCIMENTO | 20.05.1982 – GUARATINGUETÁ/ SP |
| FILIAÇÃO | Antonio Carlos de Souza Dias Dione Ximenes |
| 2012/2013 | Curso de Pós-Graduação Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista |

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família que tanto amo por todo apoio e incentivo e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre esteve comigo nos momentos mais difíceis, me dando força e coragem para enfrentar todos os obstáculos durante esta caminhada.

A minha família por todo apoio, incentivo e confiança.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira pelo apoio, conselhos, dedicação, paciência, confiança e grande orientação.

Aos professores membros da banca examinadora, Prof(a). Dra. Cristina de Carvalho Ares Elisei e Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro pela contribuição para a melhoria deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Materiais e Tecnologia pelo apoio e pela colaboração.

Ao Departamento de Química pelo fornecimento dos reagentes para realização dos ensaios metalográficos.

Ao Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein pela ajuda em microscopia óptica.

A aluna da graduação Laís Yumi Rocha Horimoto pela contribuição nos ensaios de metalografia.

Aos meus amigos Renato Araujo Barros e Cristina Sayuri Fukugauchi pela ajuda, conselhos e amizade.

DIAS, E. X. **Caracterização Metalográfica de um aço de fases complexas (CP)**. 2014. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

O desenvolvimento dos aços avançados de alta resistência tornou-se fundamental na produção de veículos com peso reduzido, seguros e mais econômicos, dentro do contexto da indústria automobilística. Dentre os aços avançados de alta resistência destacam-se os aços de fases complexas (CP) que são caracterizados por apresentarem alta conformabilidade e alta capacidade de absorção de energia e deformação. Eles são considerados aços multifásicos por apresentarem uma microestrutura complexa formada por ferrita, bainita, martensita e austenita retida. O trabalho tem por objetivo caracterizar a microestrutura do aço de fases complexas. Foram empregadas metalografia convencional e colorida, utilizando os reagentes químicos Nital, Metabissulfito de Sódio e LePera para a identificação das fases presentes no material. As análises da microestrutura final foram feitas via microscopia óptica, utilizando-se a técnica mais clássica que é a iluminação em campo claro, mas também foram utilizadas algumas técnicas diferentes tais como, iluminação em campo escuro, contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada. Os resultados mostraram que, de maneira qualitativa, para os ataques químicos com os reagentes Nital, Metabissulfito de Sódio e LePera se mostraram eficientes, pois pode-se identificar as fases presentes no aço CP; de maneira quantitativa, para o ataque feito com Nital também se mostraram eficazes para as quatro condições de microscopia óptica, tais como iluminação em campo claro; em campo escuro; DIC e método de luz polarizada, por causa da estabilidade dos valores para o cálculo das frações de área das fases presentes neste material.

PALAVRAS-CHAVE: Aços avançados. Caracterização Microestrutural. Microscopia óptica.

DIAS, E. X. **Metallographic characteristics of a steel complex phase (CP)**. 2014. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The development of advanced high-strength steels became instrumental in the production of vehicles with reduced weight, insurance, and more economical, within the context of the automobile industry. Among the advanced high-strength steels are steels complex phase (CP) that are characterized by having high formability and high energy absorption capacity and deformation. They are considered multiphase steels for presenting a complex microstructure consisting of ferrite, Bainite, martensite and retained austenite. The work aims to characterize the complex phase steel microstructure. Were employed conventional metallography and colorful, using chemical reagents Nital, sodium metabisulfite and LePera for identification of phases present in the material. The final microstructure analyses were made via optical microscopy, using more classical technique that is the bright field lighting, but also some different techniques were used such as lighting in dark field, differential interference contrast (DIC) and method of polarized light. The results showed that, of qualitative way, for the chemical attacks with Nital reagents, sodium metabisulfite and LePera were efficient, as it can identify the phases present in the CP steel; quantitative manner, for the attack made with Nital also proved effective for the four conditions of optical microscopy, such as bright field lighting; in dark field; DIC and method of polarized light, because of the stability of the values for the calculation of area fractions of phases present in this material.

KEYWORDS: Steel advanced. Microstructural characterization. Optical microscopy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura de um veículo ULSAB..... | 21 |
| Figura 2 – Evolução dos aços convencionais e avançados de alta resistência..... | 22 |
| Figura 3 – Aços de alta resistência, conforme conceito de classificação do projeto ULSAB..... | 23 |
| Figura 4 – Proporção de aços avançados de alta resistência em comparação com os aços convencionais de indústria automotiva..... | 26 |
| Figura 5 – Componente externo da carroceria de um automóvel usado no projeto ULSAC..... | 28 |
| Figura 6 – Componente da suspensão de um automóvel usado no projeto ULSAS..... | 29 |
| Figura 7 – Representação do projeto ULSAB-AVC para veículo da Classe C Européia..... | 31 |
| Figura 8 – Representação do projeto ULSAB-AVC para veículo da Classe PNGV..... | 31 |
| Figura 9 – Percentual dos diferentes tipos de aços aplicados na estrutura do veículo Classe C Européia do projeto ULSAB-AVC..... | 32 |
| Figura 10 – Veículo desenvolvido durante o projeto FSV..... | 33 |
| Figura 11 – Tipos de aços da estrutura do corpo de BEV..... | 36 |
| Figura 12 - Distribuição da classe de aços da estrutura do corpo de BEV..... | 36 |
| Figura 13 - Distribuição das classes de aços da estrutura do corpo de PHEV20..... | 37 |
| Figura 14 - Distribuição das classes de aços da estrutura do corpo de FCEV e PHEV40..... | 37 |
| Figura 15 - Gráfico de resistências à tração x massa da estrutura do corpo do FSV em comparação com o ULSAB e ULSAB- AVC..... | 38 |
| Figura 16 - Gráfico de tipos de aços x massa em porcentagem do FSV para o ULSAB e ULSAB-AVC..... | 39 |
| Figura 17 - Fotomicrografia de um aço IF (<i>Interstitial Free</i>) atacado. Nital 2%..... | 41 |
| Figura 18 - Ciclo do processo de fabricação do aço <i>Bake Hardening</i> | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 - Fotomicrografia de um aço BH (<i>Bake Hardening</i>) atacado. Nital 2%..... | 44 |
| Figura 20 - Fotomicrografia de um aço DP (<i>Dual Phase</i>) com ilhas de martensita em uma matriz ferrítica. Em (a) esquemática e em (b) real..... | 46 |
| Figura 21 - Um esquema mostrando as fases presentes nos aços multifásicos (TRIP)..... | 47 |
| Figura 22 - Exemplos de algumas peças de um automóvel onde são aplicados aços multifásicos (TRIP)..... | 49 |
| Figura 23 - Perfil tempo x temperatura típico de um aço CP ou TRIP laminado a quente..... | 51 |
| Figura 24 - Um esquema representando o processamento termomecânico dos aços multifásicos TRIP e CP..... | 52 |
| Figura 25 - Esquema de recozimento intercrítico aplicável a aços CP ou TRIP laminados a frio..... | 54 |
| Figura 26 - Exemplos de aplicação de aços de fases complexas em componentes submetidos a impacto e fadiga. (a) Placa de assento para os bancos (b) Barra de proteção para portas (c) Reforço para túnel (d) Viga de pára-choque (e) Viga de pára-choques, a partir de outra vista e (f) Braço de suspensão..... | 56 |
| Figura 27 - Trecho de uma longarina que foi conformada em aço CP 800..... | 57 |
| Figura 28 - Uso de um aço de fases complexas em um reforço de colunas “B”..... | 57 |
| Figura 29 - Uso de um reforço produzido em aços de fases complexas, cujo objetivo foi aumentar a segurança dos ocupantes dos veículos..... | 58 |
| Figura 30 - Modelo de ataque de fases seletivo para aços multifásicos..... | 62 |
| Figura 31 - Imagem via microscópio óptico de um ataque Nital 3%. Aumento de 1000X..... | 63 |
| Figura 32 - Imagem de um ataque químico LePera, onde: Ferrita (azul esverdeada); Bainita (marrom) e Martensita e/ou Austenita Retida (branca)..... | 66 |
| Figura 33 - Imagem de um ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10%, onde: Austenita Retida apresenta uma tonalidade branca..... | 66 |
| Figura 34 - Fotomicrografia de um aço ao carbono. Ataque Nital 2%. Aumento de 200X..... | 68 |
| Figura 35 - Exemplo de uma aplicação de um aço de baixo carbono observada em (a) campo escuro e (b) campo claro. Aumento de 500X. Nital 2%..... | 69 |
| Figura 36 - Componentes básicos de um microscópio óptico utilizando luz polarizada..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 - Componentes básicos de um microscópio utilizando contraste por interferência diferencial (DIC)..... | 72 |
| Figura 38 - Máquina de corte por serra de fita vertical..... | 74 |
| Figura 39 - Nomenclatura das localizações de corte das amostras..... | 75 |
| Figura 40 - Embutidora a quente..... | 76 |
| Figura 41 - Marcação e identificação das amostras utilizando gravador vibrador..... | 77 |
| Figura 42 - Lixadeira manual para metalografia STRUERS..... | 78 |
| Figura 43 - Estereomicroscópio STEMI 2000 – ZEISS..... | 78 |
| Figura 44 - O polimento foi feito na POLITRIZ AP10 PANAMBRA..... | 79 |
| Figura 45 - (a) Ataque com Nital 3% por 15s em campo claro. Ampliação 500X. (b) Ataque com Nital 3% por 15s em campo escuro. Ampliação 500X..... | 83 |
| Figura 46 - (a) Imagem de DIC após ataque com Nital 3% por 15s. Ampliação 1000X. (b) Imagem de luz polarizada após ataque com Nital 3% por 15s. Ampliação 500X..... | 83 |
| Figura 47 - (a) Imagem em campo claro após ataque com Nital 3%. Ampliação 500X..... | 84 |
| Figura 47 - (b) Imagem em campo escuro após ataque com Nital 3%. Ampliação 500X..... | 84 |
| Figura 48 – (a) Ataque com Nital 2% durante 15s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X..... | 85 |
| Figura 48 – (b) Ataque com Nital 2% durante 15s em iluminação em campo escuro. Ampliação 1000X..... | 85 |
| Figura 48 – (c) Fotomicrografia de DIC após ataque com Nital 2% por 15s. Ampliação 1000X..... | 86 |
| Figura 48 – (d) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com Nital 2% por 15s. Ampliação 500X..... | 87 |
| Figura 49 - (a) Ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s em campo claro. Ampliação 500X. (b) Ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s em campo escuro. Ampliação 500X..... | 87 |
| Figura 50 - (a) Imagem de DIC após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s. Ampliação 1000X. (b) Imagem de luz polarizada após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s. Ampliação 500X..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51 - (a) Imagem em campo claro após ataque com Metabissulfito de Sódio 10%. Ampliação 500X..... | 89 |
| Figura 51 - (b) Imagem em luz polarizada após ataque com Metabissulfito de Sódio 10%. Ampliação 500X..... | 89 |
| Figura 52 - Ataque com Metabissulfito de Sódio 10% durante 20s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X..... | 90 |
| Figura 53 - Pré-ataque com Nital 2% seguido de um ataque com Metabissulfito de Sódio 10% em iluminação em campo claro. Ampliação 500X..... | 91 |
| Figura 54 - (a) Imagem com ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s em iluminação em campo claro. Ampliação 500X. (b) Imagem com ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s em iluminação em campo escuro. Ampliação 500X..... | 92 |
| Figura 55 - (a) Imagem de DIC após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por um tempo de 25s. Ampliação 500X. (b) Imagem de luz polarizada após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por um tempo de 25s. Ampliação 500X..... | 93 |
| Figura 56 - (a) Ataque com LePera por 30s em campo claro. Ampliação 1000X. (b) Ataque com LePera por 30s em campo escuro. Ampliação 1000X..... | 94 |
| Figura 57 - (a) Imagem de DIC após ataque com LePera por 30s. Ampliação 1000X. (b) Imagem de Luz polarizada após ataque com LePera por 30s. Ampliação 500X..... | 94 |
| Figura 58 - Ataque com LePera durante 30s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X..... | 95 |
| Figura 59 - (a) Ataque com LePera por um tempo de 20s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X. (b) Ataque com LePera por um tempo de 20s em iluminação em campo escuro. Ampliação 1000X..... | 96 |
| Figura 60 - (a) Imagem de DIC após ataque com LePera por um tempo de 20s. Ampliação 500X; (b) Imagem de Luz polarizada após ataque com LePera por um tempo de 20s. Ampliação 500X..... | 97 |
| Figura 61 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para a iluminação em campo claro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 104 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para a iluminação em campo escuro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 105 |
| Figura 63 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 106 |
| Figura 64 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 107 |
| Figura 65 - Gráfico das médias para as quatro condições de microscopia óptica em função de seus respectivos desvios padrões para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita..... | 108 |
| Figura 66 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para a iluminação em campo claro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 115 |
| Figura 67 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para a iluminação em campo escuro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 116 |
| Figura 68 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 117 |
| Figura 69 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos..... | 118 |
| Figura 70 - Gráfico das médias para as quatro condições de microscopia óptica em função de seus respectivos desvios padrões para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita..... | 119 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Realização do programa ou projeto FSV..... | 34 |
| Tabela 2 – Média de resistências à tração de aço para o FSV em comparação com o ULSAB e ULSAB-AVC..... | 39 |
| Tabela 3 – Composição química do aço CPW-800 (Renault, 2009)..... | 73 |
| Tabela 4 - Porcentagem de ferrita/austenita retida para Nital 3%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão..... | 100 |
| Tabela 5 - Porcentagem de bainita/martensita para Nital 3%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão..... | 103 |
| Tabela 6 - Porcentagem de ferrita/austenita retida para Nital 2%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão..... | 111 |
| Tabela 7 - Porcentagem de bainita/martensita para Nital 2%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão..... | 114 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| AAR | Aços de Alta Resistência |
| AAAR | Aços Avançados de Alta Resistência |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BH | Bake Hardening |
| CP | Complex Phase |
| CAE | Computer Aided Engineering |
| DIC | Differential Interference Contrast |
| DP | Dual Phase |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle |
| FSV | Future Steel Vehicle |
| HSLA | High Strength Low Alloy |
| HSS | High Strength Steel |
| IF | Interstitial Free |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MET | Microscópio Eletrônico de Transmissão |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| NVH | Noise Vibration Hardness |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| PNGV | Partnership for a New Generation |
| TRIP | Transformation Induced Plasticity |
| ULSAB | Ultra Light Steel Auto Body |
| ULSAB-AVC | Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts |
| ULSAC | Ultra Light Steel Auto Closures |
| ULSAS | Ultra Light Steel Auto Suspensions |
| UHSS | Ultra High Strength Steel |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|--|
| T_{γ} | temperatura de austenitização |
| TICA | temperatura intercrítica |
| A_1 | limite inferior da temperatura intercrítica |
| A_3 | limite superior da temperatura intercrítica |
| TIBT | temperatura de transformação isotérmica da bainita |
| M_s | transformação martensítica |
| ε | grau de deformação |
| $\dot{\varepsilon}$ | taxa de deformação |
| T | temperatura de deformação |
| t | tempo |
| α | ferrita |
| γ | austenita |
| γ_r | austenita retida |
| α_b | ferrita bainítica |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 20 |
| 1.1 Motivação..... | 23 |
| 1.2 Objetivos..... | 24 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 2.1.1 Histórico dos aços avançados..... | 25 |
| 2.1.2 Projeto <i>Ultra Light Steel Auto Body</i> (ULSAB) | 26 |
| 2.1.3 Projeto <i>Ultra Light Steel Auto Closures</i> (ULSAC)..... | 28 |
| 2.1.4 Projeto <i>Ultra Light Steel Auto Suspensions</i> (ULSAS)..... | 29 |
| 2.1.5 Projeto <i>Ultra Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Concepts</i> (ULSAB-AVC)..... | 30 |
| 2.1.6 Projeto <i>Future Steel Vehicle</i> (FSV)..... | 32 |
| 2.1.7 Aços de interstícios livres ou <i>Interstitial Free</i> (IF)..... | 39 |
| 2.1.8 Aços BH (<i>Bake Hardening</i> ou endurecíveis por meio de pintura)..... | 41 |
| 2.1.9 Aços bifásicos ou <i>Dual Phase</i> (DP)..... | 44 |
| 2.1.10 Aços TRIP..... | 46 |
| 2.1.11 Aços de fases complexas ou <i>Complex Phase</i> (CP)..... | 49 |
| 2.1.12 Processamento dos aços de fases complexas..... | 51 |
| 2.1.13 Aplicações dos aços de fases complexas na indústria automobilística..... | 55 |
| 2.2 Caracterização microestrutural dos aços de fases complexas (CP)..... | 58 |
| 2.2.1 Ataques químicos corrosivos..... | 60 |
| 2.2.2 Ataques químicos <i>tint etching</i> | 64 |
| 2.2.3 Técnicas de microscopia óptica..... | 66 |
| 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 73 |
| 3.1 Material..... | 73 |
| 3.2 Caracterização Microestrutural..... | 73 |
| 3.2.1 Técnicas de metalografia..... | 74 |
| 3.2.1.1 Seccionamento ou corte..... | 74 |
| 3.2.1.2 Embutimento..... | 75 |
| 3.2.1.3 Marcação ou identificação..... | 76 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.1.4 Lixamento..... | 77 |
| 3.2.1.5 Polimento..... | 79 |
| 3.2.2 Ataque químico..... | 80 |
| 3.2.3 Técnicas de microscopia óptica..... | 81 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 82 |
| 4.1 Técnica qualitativa..... | 82 |
| 4.2 Metalografia quantitativa..... | 97 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 120 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 122 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 123 |

1 INTRODUÇÃO

O setor automotivo é o maior cliente da indústria siderúrgica. Cerca de 10% do aço produzido no mundo é canalizado ao setor automobilístico. O aço representa de 55 a 60 % do peso do veículo e cerca de 4 a 6% do preço final do carro, ou seja, ele constitui a maior parte dos automóveis, e é pouco provável que um dia ele seja completamente excluído deste mercado. Isso estimulou as siderúrgicas a acionar mecanismos capazes de antecipar tendências em termos de novos materiais, buscando agregar maior conteúdo tecnológico ao aço consumido pelo setor automotivo (VEIGA; COVINO, 2000).

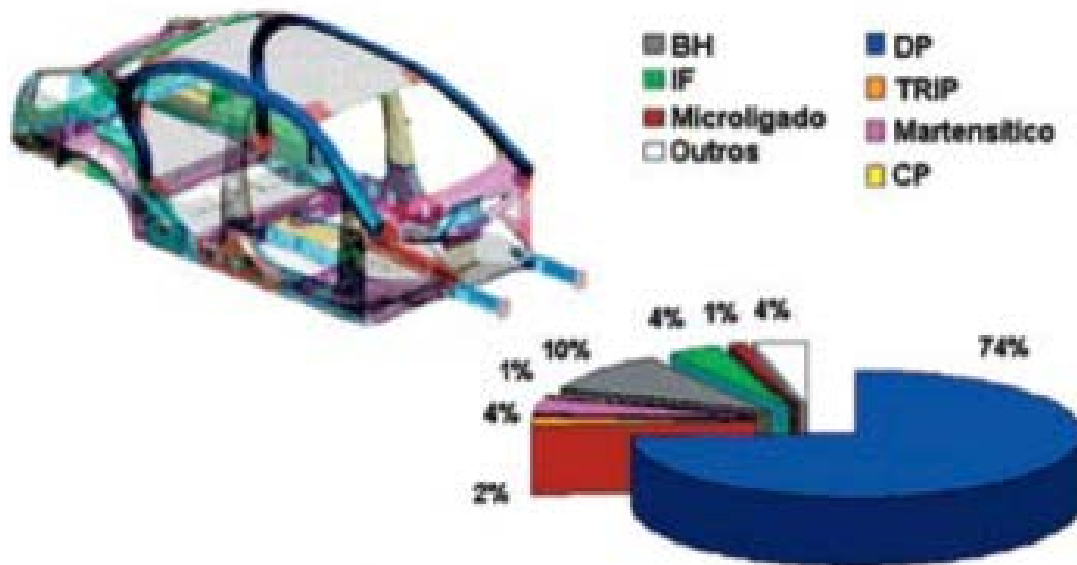
A indústria siderúrgica desenvolveu estudos e projetos de engenharia simultânea em parceria com a indústria automobilística, enfatizando o aço como matéria-prima básica, visando colocar à disposição do mercado mundial um veículo que consuma menos combustível, poluindo menos, bastante leve e que possa garantir em contrapartida, maior segurança, conforto e resistência ao impacto (SIMON, 1997; RABELO, 1999; JEANNEAU; PICHANT, 2000).

Entre 1994 e 1998, a indústria siderúrgica criou o projeto ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body*).

O projeto ULSAB é um projeto que deseja demonstrar a capacidade que o aço tem em reduzir o peso da estrutura da carroceria de um veículo e garantir, ao mesmo tempo, uma maior segurança com mais conforto, tudo a preços acessíveis (ARCELORMITTAL, 2010; USIMINAS, 2010).

Ele utiliza, em torno de 90% da estrutura, aços de alta e ultra-alta resistência, dentro dos diversos graus de aços existentes, como mostrado na Figura 1. Observa-se o uso massivo de aços bifásicos (*Dual Phase*), bem como o uso específico de aços TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*), aços martensíticos, aços de fases complexas (*Complex Phase*), aços de interstícios livres (*Interstitial Free*) e aços microligados. Há também a utilização de aços Bake Hardening em boa porcentagem, com aproximadamente 10%.

Figura 1- Estrutura de um veículo ULSAB.



Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2009).

A redução de peso deu-se por meio da substituição do aço ao carbono tradicional em aços com propriedades mecânicas superiores. Mediante a utilização de novos aços destacam-se os aços de alta resistência e os aços avançados de alta resistência (AMERICAN IRON E STEEL INSTITUTE, 2009).

Em meados da década de 90, as indústrias automotivas passaram a substituir os aços de alta resistência, que são os aços convencionais (HSS – *High Strength Steel*), como os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA – *High Strength Low Alloy*) e os de baixo carbono (*Low Carbon*), por aços avançados de alta resistência (AHSS – *Advanced High Strength Steel*), como os aços bifásicos (DP – *Dual Phase*), os aços de fases complexas (CP – *Complex Phase*), os aços TRIP (*Transformation Induced Plasticity*), dentre outros, conforme mostrado na Figura 2 (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

Figura 2 - Evolução dos aços convencionais e avançados de alta resistência.

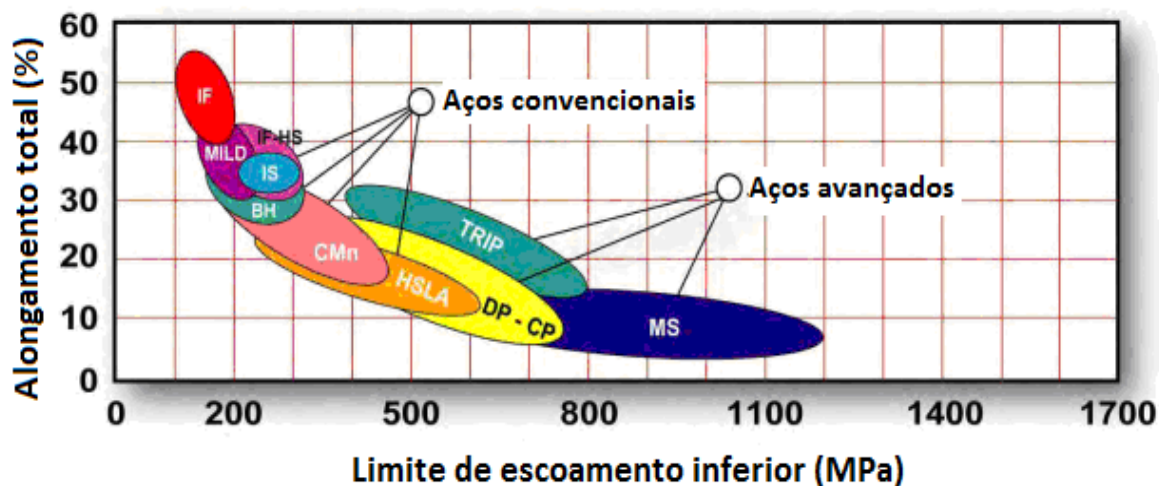


Fonte: (GORNI, 2008).

A principal diferença entre os aços convencionais de alta resistência e os aços avançados de alta resistência encontram-se em suas microestruturas. Os aços avançados de alta resistência apresentam microestruturas multifásicas, contendo ferrita e diferentes porções de martensita, bainita e/ou austenita retida em quantidades suficientes para produzir excelentes propriedades mecânicas. Já os aços de alta resistência apresentam matrizes ferríticas e perlíticas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2010).

A Figura 3, mostra uma classificação dos níveis de resistência em função do alongamento de diversos aços inseridos dentro do conceito de classificação de aços avançados de alta resistência para componentes automotivos, utilizados pelo projeto ULSAB.

Figura 3 - Aços de alta resistência, conforme conceito de classificação do projeto ULSAB.



Fonte: (ARMCO, 2006).

Aços avançados de alta resistência derivam de suas propriedades mecânicas superiores, devido à transformação de fases que resultam por combinar alta resistência com boa ductilidade assim como um aumento na tenacidade (RUUKKI, 2010).

1.1 MOTIVAÇÃO

Neste trabalho foram estudadas outras técnicas de microscopia óptica do aço de fases complexas, tais como, iluminação em campo claro, que é a mais comum; iluminação em campo escuro; método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC) para caracterizar a microestrutura deste material. Para a preparação das amostras, foram utilizadas técnicas de metalografia como seccionamento ou corte; embutimento; lixamento e polimento. Foram feitos ataques químicos utilizando três reagentes químicos como Nital; Metabissulfito de Sódio 10% e LePera para a identificação das fases presentes neste aço.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo utilizar diferentes técnicas de microscopia óptica como iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC) para caracterizar a microestrutura do aço de fases complexas (CP), a partir de uma análise qualitativa, para a identificação das fases presentes neste aço e de uma análise quantitativa, para a quantificação destas respectivas fases.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

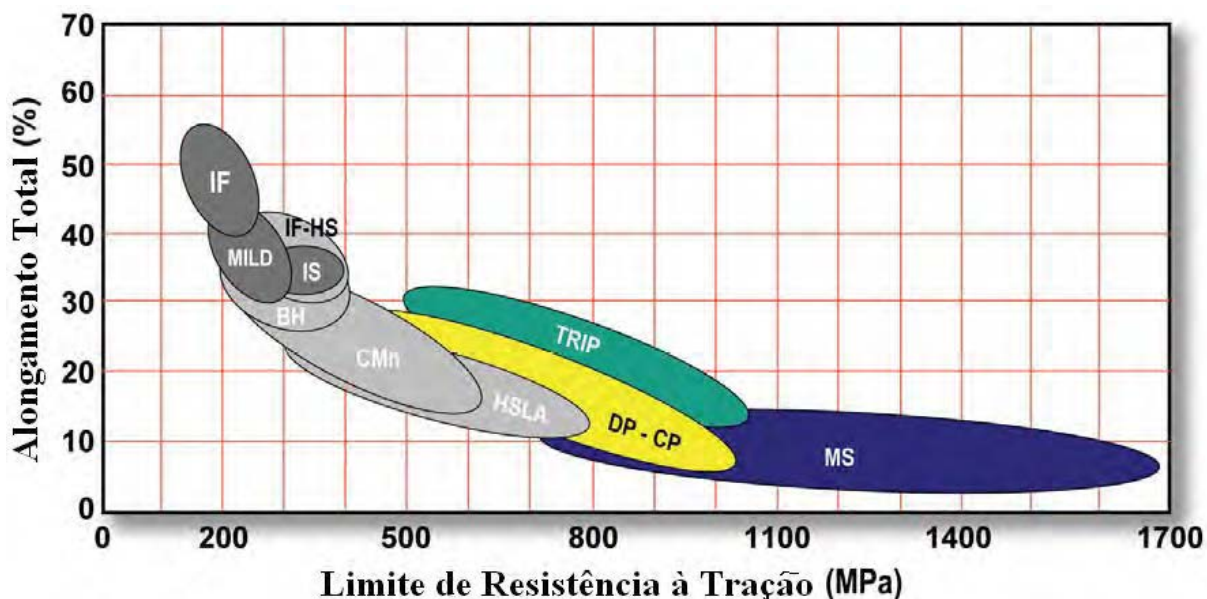
2.1.1 Histórico dos Aços Avançados

O principal objetivo das siderúrgicas foi de fornecer as indústrias automotivas aços avançados, com alta resistência, para que fosse atingido um aumento da integridade estrutural e da resistência ao choque com redução do peso e do custo. A estes requisitos também poderia acrescentar a demanda crescente dos consumidores por maior segurança e por grande quantidade de itens de conforto. Quando feita uma análise atual e global da utilização e das potencialidades do aço deve-se incluir as questões ambientais envolvidas (CASTRO, 2010).

De acordo com o *World Steel Association* (2010), os objetivos de se reduzir o peso dos veículos de modo a diminuir o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes, que contribuem para o efeito estufa, e de se obter uma maior segurança e conforto estão sendo atingidos a partir de uma combinação de uma filosofia inovadora relacionado à produção de aços avançados de alta resistência, em grande parte, resultados dos projetos *Ultra Light Steel Auto Body* (ULSAB), *Ultra Light Steel Auto Closures* (ULSAC), *Ultra Light Steel Auto Suspension* (ULSAS), *Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts* (ULSAB-AVC) e *Future Steel Vehicle* (FSV).

A Figura 4, mostra a proporção de aços avançados de alta resistência em comparação com os aços convencionais da indústria automotiva tomando como referência o alongamento total (%) e sua resistência a tração (MPa).

Figura 4 - Proporção de aços avançados de alta resistência em comparação com os aços convencionais de indústria automotiva.



Fonte: (ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL APPLICATION GUIDELINES, 2006).

Na Figura 4, a principal diferença entre os aços convencionais em diferentes tons de cinza e os aços avançados de alta resistência (em cores) está em sua microestrutura. Os aços convencionais apresentam uma fase chamada ferrita e perlita, já os aços avançados de alta resistência apresentam fases distintas chamadas ferrita, bainita, martensita e/ou austenita retida em quantidades suficientes para proporcionar excelentes propriedades mecânicas (ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL APPLICATION GUIDELINES, VERSION 4.1, 2009).

2.1.2 Projeto *Ultra Light Steel Auto Body* (ULSAB)

No início da década de 90, o grande marco foi à formação de um consórcio de 35 grandes siderúrgicas mundiais, visando o estabelecimento do projeto ULSAB (WORLD AUTO STEEL, 2009).

Os principais objetivos do projeto ULSAB foram (ULSAB OVERVIEW REPORT - PHASE 2, 1998):

- Desenvolver um novo conceito de fabricação de automóveis, focado na utilização de aços por meio da otimização dos processos de produção e das ligas;

- Proporcionar uma redução significativa de massa em comparação a um conceito de “veículo do futuro”, sem aumento significativo de custo final de produção;
- Atingir objetivos funcionais e estruturais, ou seja, garantir os índices de segurança e conforto do veículo;
- Disponibilizar conceitos que serão futuramente aplicáveis ao desenvolvimento de novos veículos.

Destacam-se no projeto ULSAB os aços de alta resistência (HSS) com limite de escoamento entre 210 e 550MPa e de ultra-alta resistência (UHSS) com limite de escoamento acima de 550MPa (WORLD AUTO STEEL, 2010).

Para facilitar seu desenvolvimento, o projeto ULSAB foi dividido em duas etapas. A etapa 1 referiu-se a análise conceitual, que consistiu de um estudo que permitisse desenvolver um projeto de uma carroceria de um automóvel utilizando a engenharia auxiliada por computador (CAE) e a análise por elementos finitos (MEF) para prever o comportamento das análises estáticas de resistência e deformação da estrutura e realizar simulações dinâmicas de choque, proporcionando assim uma correlação com os *crash tests*, permitindo prever o nível de segurança esperado pela carroceria em questão (WORLD AUTO STEEL, 2010).

Essa etapa consistiu em quatro metas fundamentais a serem atingidas, tais como, uma redução de 20% no peso dos automóveis, utilizando o aço como material principal, em um veículo médio, como o da classe sedan quatro portas, com um volume mínimo de produção de 100.000 unidades por ano; alcançar todos os objetivos previstos, quando avaliado o desempenho estrutural, ou seja, segurança, durabilidade, níveis de vibração e ruído; utilizar as mais recentes tecnologias de produção, para demonstrar que seria perfeitamente possível reduzir a massa de uma estrutura de um veículo automotivo e garantir que os desenvolvimentos tecnológicos possam ser aplicados em todos os programas de fabricação dos futuros automóveis (PEREIRA, 2009).

A etapa 2 é a da validação que consistiu na fabricação da estrutura desenvolvida na etapa da conceituação, ou seja, a estrutura, inicialmente desenvolvida, foi manufaturada, pesada e testada a fim de validar os resultados da fase conceitual.

Os objetivos funcionais da fase 2 foram os mesmos da fase 1, ou seja, redução de peso sem comprometimento da segurança ou rigidez estrutural. Sem alterar as metas de redução de massa e desempenho estrutural.

Essas análises mostraram que o projeto ULSAB satisfaz os requisitos de impacto vigentes. Nos casos de impacto frontal, os testes de impacto foram realizados em velocidades

que excederam os requisitos de segurança normalizados em até 17% e ainda assim, apresentaram resultados positivos (WORLD AUTO STEEL, 2010).

2.1.3 Projeto *Ultra Light Steel Auto Closures* (ULSAC)

Com o grande sucesso do projeto ULSAB, o consórcio mundial das siderúrgicas criou um novo projeto chamado de *Ultra Light Steel Auto Closures* (ULSAC), como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Componente externo da carroceria de um automóvel usado no projeto ULSAC.



Fonte: (FURTADO, 2006).

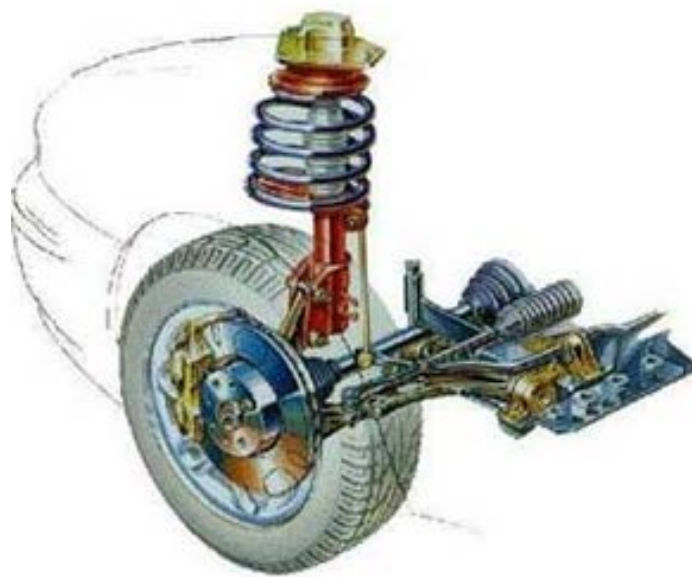
Tratou do projeto de portas, capôs, tampas traseiras, com relação a veículos hatches, ou tampas de porta-malas, com relação a veículos sedans. Estes componentes foram analisados tendo em vista representarem por volta de 6% da massa de um automóvel (BUCHHOLZ, 1998).

Com exceção da tampa traseira para veículos hatches, as dimensões baseadas no design do projeto ULSAB eram muito próximas às médias do projeto ULSAC (FURTADO, 2006).

2.1 .4 Projeto *Ultra Light Steel Auto Suspensions* (ULSAS)

O projeto *Ultra Light Steel Auto Suspensions* (ULSAS) foi o terceiro projeto criado pelo consórcio mundial das siderúrgicas, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Componente da suspensão de um automóvel usado no projeto ULSAS.



Fonte: (FURTADO, 2006).

Este projeto teve como objetivo mostrar a viabilidade da utilização de aços de alta resistência na concepção de veículos mais leves, menos poluentes e mais econômicos. Visou desenvolver sistemas de suspensão com alto desempenho, segurança e eficiência (FURTADO, 2006).

Um exemplo de como se pode ganhar com a aplicação destes materiais de alta resistência é a barra estabilizadora, cuja função é melhorar o refinamento das suspensões, no sentido de reduzir os balanços transversais de carroceria.

Outro exemplo de elemento de suspensão através do qual podemos mostrar a importância da evolução dos materiais de base são as rodas (VAUGHN; MARTIN, 2000).

2.1.5 Projeto *Ultra Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Concepts* (ULSAB-AVC)

Como uma extensão do projeto ULSAB, surgiu o projeto ULSAB-AVC que inclui, além da carroceria ultraleve, o desenvolvimento de painéis de cobertura e de suspensão, no qual foram desenvolvidos conceitos considerando a aplicação de novos tipos de aços, os chamados aços de ultra-alta resistência, como os aços multifásicos assistidos pelo efeito TRIP, os aços bifásicos ou *Dual Phase (DP)* e os aços de fases complexas ou *Complex Phase (CP)* (ANDRADE; TAISS; ROSA, 2002).

Este projeto se tornou diferente do projeto ULSAB, porque o ULSAB trabalhou utilizando materiais que estavam disponíveis no mercado na época, os chamados aços convencionais, como os aços de interstícios livres ou *Interstitial Free*, os aços endurecíveis através de pintura ou *Bake Hardening (BH)*, dentre outros, enquanto o ULSAB-AVC trabalhou com materiais inovadores, como os aços avançados de ultra-alta resistência (ADAM, 2002).

Os objetivos do projeto ULSAB-AVC foram (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

- Diminuição do consumo de combustível;
- Segurança;
- Responsabilidade ambiental;
- Viabilidade econômica.

Focou-se no desenvolvimento de uma única plataforma a ser utilizada por dois projetos: um da Classe C Européia, chamada de Classe do Golf e um da Classe PNGV (*U.S. Partnership for a New Generation*), conhecido como um sedan médio americano, conforme mostrado nas Figuras 7 e 8:

Figura 7 - Representação do projeto ULSAB-AVC para veículo da Classe C Européia.



Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2009).

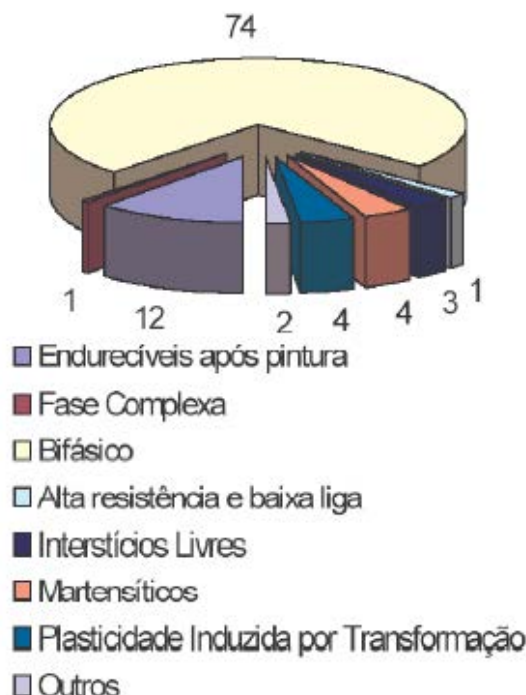
Figura 8 - Representação do projeto ULSAB-AVC para veículo da Classe PNGV.



Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2009).

A estrutura do projeto ULSAB-AVC foi construída com aços de alta resistência (AAR), sendo que cerca de 80% se tratavam de aços avançados de alta resistência (AAAR), como mostrado na Figura 9 (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Figura 9 - Percentual dos diferentes tipos de aços aplicados na estrutura do veículo Classe C Européia do projeto ULSAB-AVC.



Fonte: (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

O ULSAB-AVC forma uma base perfeita para veículos com um desempenho em segurança sem precedentes. Aços avançados de alta resistência melhoraram resultados nas simulações de impacto enquanto simultaneamente diminuíram a massa e o custo dos automóveis, o que faz com que ele se torne um padrão onde os futuros projetos de veículos deverão focar-se (CHAINER, 2002).

2.1.6 Projeto *Future Steel Vehicle* (FSV)

A direção futura do setor dos transportes está sendo influenciada por uma crescente demanda para uma melhor economia de combustível e redução da emissão de gases poluentes com efeito de provocar aquecimento global. Aumentar a eficiência do veículo e o uso do conteúdo de combustíveis alternativos de baixo carbono não vai apenas reduzir o consumo de petróleo, mas também vai diminuir a demanda de carbono associada com a queima de combustíveis fósseis. O uso de powertrains (motor-transmissão) avançados vai levar a um

maior enfoque na redução de peso dos automóveis e, portanto, na seleção de materiais (WORLD AUTO STEEL, 2010).

É focado na utilização de aços avançados de alta resistência combinados com motorizações elétricas, buscando uma redução no peso dos veículos e nas emissões de poluentes, como também uma maior segurança para os ocupantes sem comprometer os seus custos, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Veículo desenvolvido durante o projeto FSV.



Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE – OVERVIEW REPORT, 2011).

Os principais objetivos do programa FSV são (WORLD AUTO STEEL, 2011):

- Identificar powertrains avançados e seu impacto sobre a arquitetura do veículo;
- Investigar a capacidade dos aços, para atender as necessidades estruturais de powertrains avançados;
- Investigar a redução de peso dos veículos utilizando-se os aços avançados de alta resistência (AHSS); processos avançados de fabricação e o uso da otimização estrutural assistido por computador;

A grande meta do FSV é satisfazer critérios de desempenho do ano 2015-2020 ao atingir uma redução de 35% em massa.

As 17 siderúrgicas que fizeram parte deste consórcio mundial são as seguintes: Anshan Iron and Steel Group Corporation; Arcelor Mittal; Baoshan Iron & Steel Co. Ltd.; China Steel Corporation; Hyundai Steel Company; JFE Steel Corporation; Kobe Steel Ltd.; Nippon Steel Corporation; Nucor Corporation; Posco; SeverStal; Sumitomo Metal Industries Ltd.; Tata Steel & Corus; ThyssenKrupp Stahl AG; Usiminas; United States Steel Corporation e Voestalpine Stahl GmbH.

O projeto FSV consistiu em duas fases (FUTURE STEEL VEHICLE OVERVIEW REPORT, 2011):

Fase 1: Estudo de engenharia (2008-Julho de 2009).

Fase 2: Conceito de design (Agosto de 2009-2010).

O conteúdo da fase 1 foi uma identificação e uma avaliação abrangente de powertrains avançados e a futura tecnologia automotiva aplicável à produção de veículos para o ano de 2020.

A fase 2 produziu conceitos de projeto detalhado de um:

- Veículo elétrico a bateria (BEV): é acionado por um motor elétrico cuja energia é suprida por uma ou mais energias instaladas. Essas baterias são periodicamente recarregadas a partir da rede elétrica.
- Veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV): é um automóvel que possui um motor de combustão interna, geralmente a gasolina e um motor elétrico, cuja bateria utilizada para alimentar o motor elétrico pode ser recarregada diretamente por meio de uma tomada.
- Células de combustível de veículos elétricos (FCEV): é um veículo em que a energia elétrica é gerada através de processos eletroquímicos em que a energia do gás hidrogênio é transformada diretamente em eletricidade.

FSV - Redução de 35% em massa:

A estrutura do corpo do veículo elétrico a bateria (BEV) alcançou uma economia de massa de 102 Kg (35%) em comparação com a estrutura do corpo de linha de base, conforme mostrado na Tabela 1:

Tabela 1 - Realização do programa ou projeto FSV.

| Estrutura do corpo | FSV - BEV |
|---------------------------|------------------|
| Massa de referência | 290 |
| Massa pretendida | 190 |
| Massa alcançada | 187,7 |

A estrutura do corpo de linha de base é o mesmo ponto de referência usado para o ULSAB-AVC. A redução em massa foi realizado com o uso de aços avançados de alta resistência e um design otimizado. Qualquer aumento de custo pode ser associado com o uso de graus mais elevados de aço, incluindo em geral os custos de fabricação e montagem da estrutura de corpo FSV, é equilibrado pela, conseqüentemente, redução de peso alcançado. Além disso, a estrutura do corpo FSV também atende todas as metas estruturais para a resistência ao choque, NVH (Noise Vibration Hardness) e durabilidade; sem comprometer o desempenho da estrutura do corpo.

O peso das estruturas do corpo do projeto FSV são significativamente mais baixos: o veículo elétrico híbrido plug-in apresenta uma gama de toda a parte elétrica de 32 Km (20 milhas) - (PHEV20) é 176,4 Kg e o veículo elétrico híbrido plug-in com uma gama de toda a parte elétrica de 65 Km (40 milhas) - (PHEV40) é de 200,8 Kg e a célula de combustível de veículo elétrico (FCEV).

FSV - Utilização dos aços avançados de alta e ultra-alta resistência:

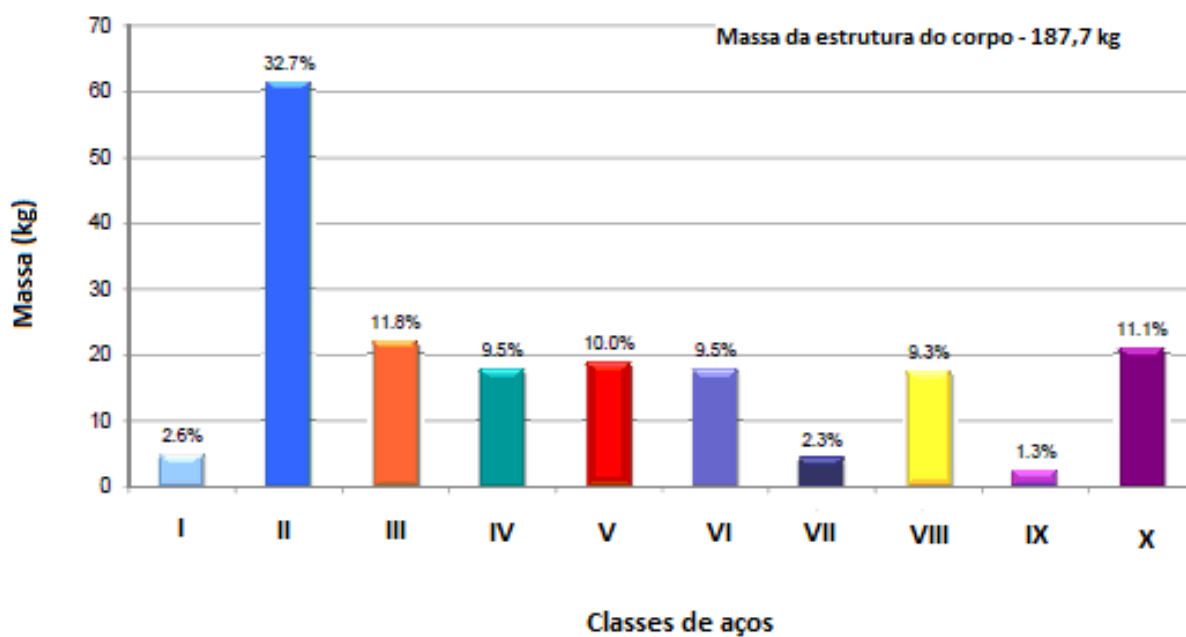
Os materiais de estrutura de corpo do projeto FSV selecionados foram escolhidos para alcançar as metas de desempenho e massa. A estrutura de corpo do projeto FSV demonstrou os melhores atributos do aço por uma ótima utilização dos aços avançados de alta e ultra-alta resistência. Os materiais incluíam alguns tipos de aços atualmente disponíveis. Estes tipos de aços utilizados no projeto Future Steel Vehicle são mostrados na Figura 11 (o esquema de cores das peças mostradas representam a codificação de cores do material). O projeto FSV utiliza mais de 97% de aços de alta e ultra-alta resistência da estrutura do corpo para melhorar o desempenho estrutural e reduzir a massa. Na Figura 12 é mostrada a distribuição da classe de aços da estrutura do corpo de BEV (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

Figura 11 - Tipos de aços utilizados no projeto Future Steel Vehicle.

| Aços: Classes metalúrgicas correspondentes | Códigos de cores |
|--|------------------|
| I - Aços de baixa resistência | |
| II - Aços de alta resistência e baixa liga | |
| III - DP 500, 600 | |
| IV - DP 800 | |
| V - DP 1000 | |
| VI - TRIP | |
| VII - TWIP | |
| VIII - Aços de fases complexas (CP) | |
| IX - Aços Martensíticos (MS) | |
| X - Aços por conformação a quente (HF) | |

Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

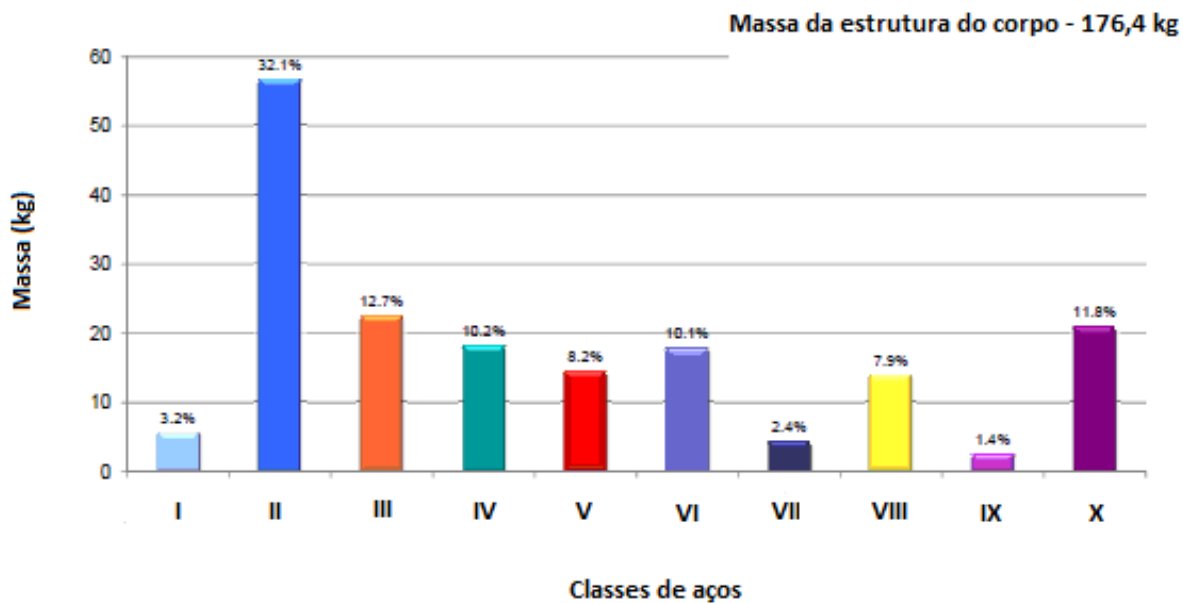
Figura 12 - Distribuição da classe de aços da estrutura do corpo de BEV.



Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

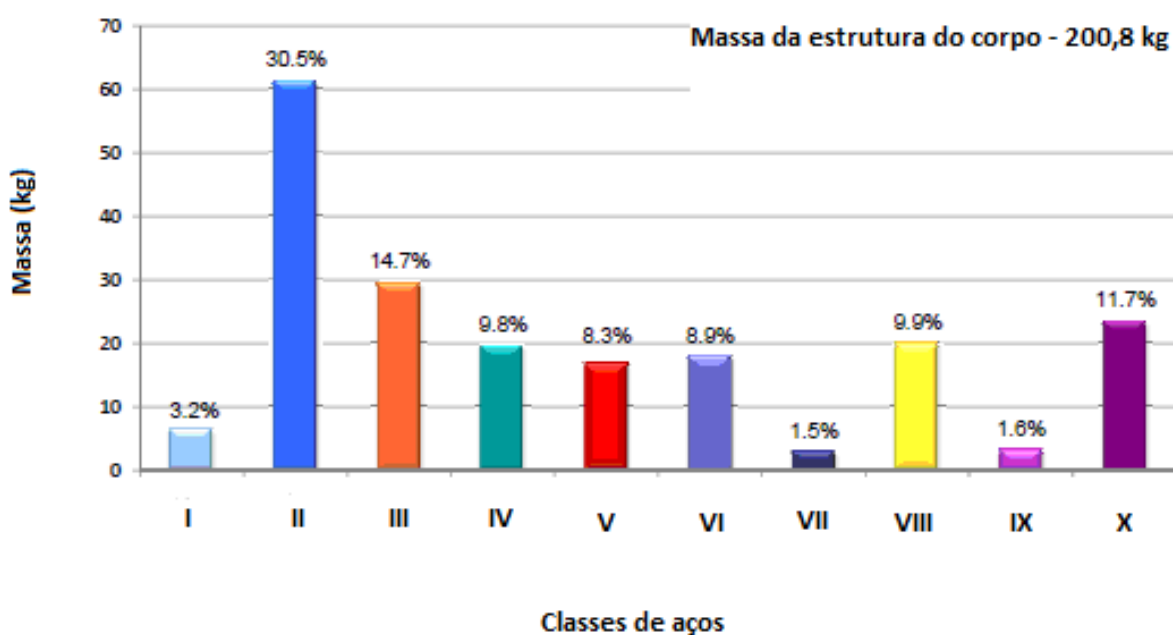
Na Figura 13 é mostrada a distribuição da classe de aços da estrutura do corpo de PHEV20 e na Figura 14 é mostrada a distribuição da classe de aços da estrutura do corpo de FCEV e PHEV40.

Figura 13 - Distribuição das classes de aços da estrutura do corpo de PHEV20.



Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

Figura 14 - Distribuição das classes de aços da estrutura do corpo de FCEV e PHEV40.



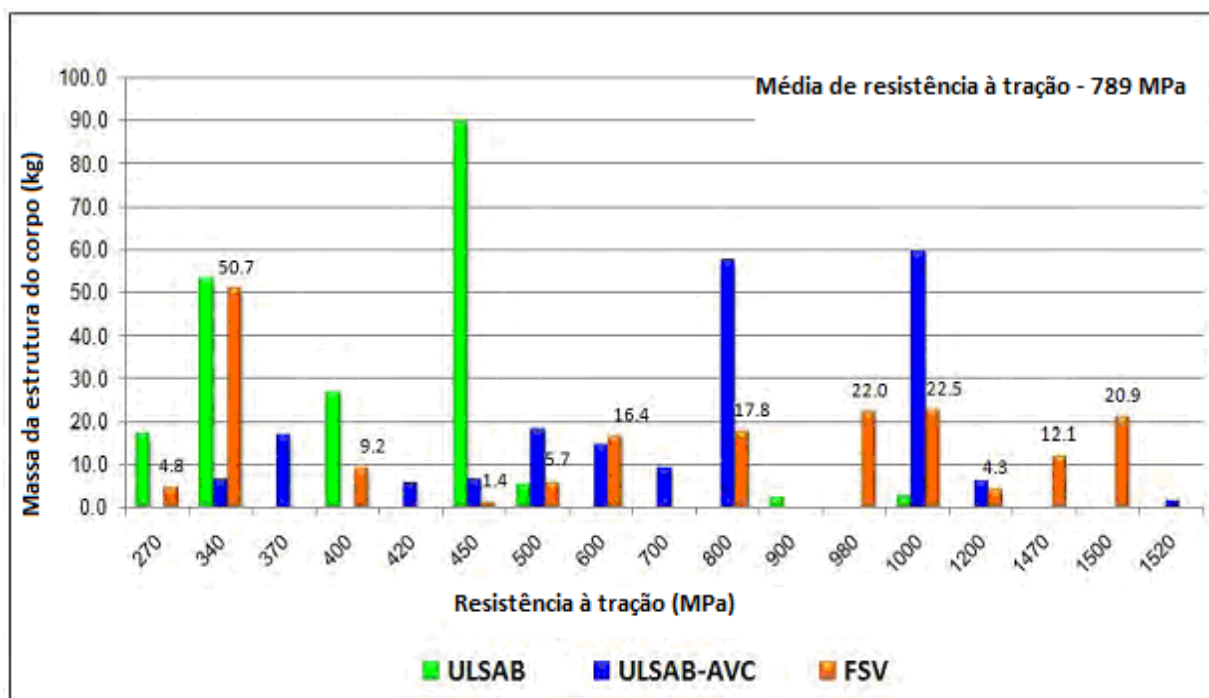
Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

FSV – Continuação da evolução dos aços avançados de alta e ultra-alta resistência:

Produtores de aço foram sempre na vanguarda dos esforços para responder aos desafios das montadoras ao redor do mundo: reduzir o peso das estruturas do corpo do veículo, mantendo seu desempenho e os custos. As vantagens do aço para combater este desafio já foram demonstradas no projeto ULSAB e ULSAB-AVC. No entanto, metas de redução de peso estão se tornando mais difíceis de cumprir, mantendo as características de desempenho do veículo com cada vez mais normas de segurança.

O FSV demonstrou a evolução contínua de aços de alta e ultra-alta resistência para atender as crescentes exigências de desempenho e maior meta de redução de massa, conforme mostrado na Figura 15. O FSV usa uma média de 0,98 mm e uma resistência à tração de 789 MPa em comparação com uma média de 1,16 mm e uma resistência à tração de 413 MPa para o ULSAB e uma média de 1,00 mm e uma resistência à tração de 758 MPa para o ULSAB-AVC, conforme mostrado na Tabela 2 (FUTURE STEEL VEHICLE, 2011).

Figura 15 - Gráfico de resistências à tração x massa da estrutura do corpo do FSV em comparação com o ULSAB e ULSAB- AVC.



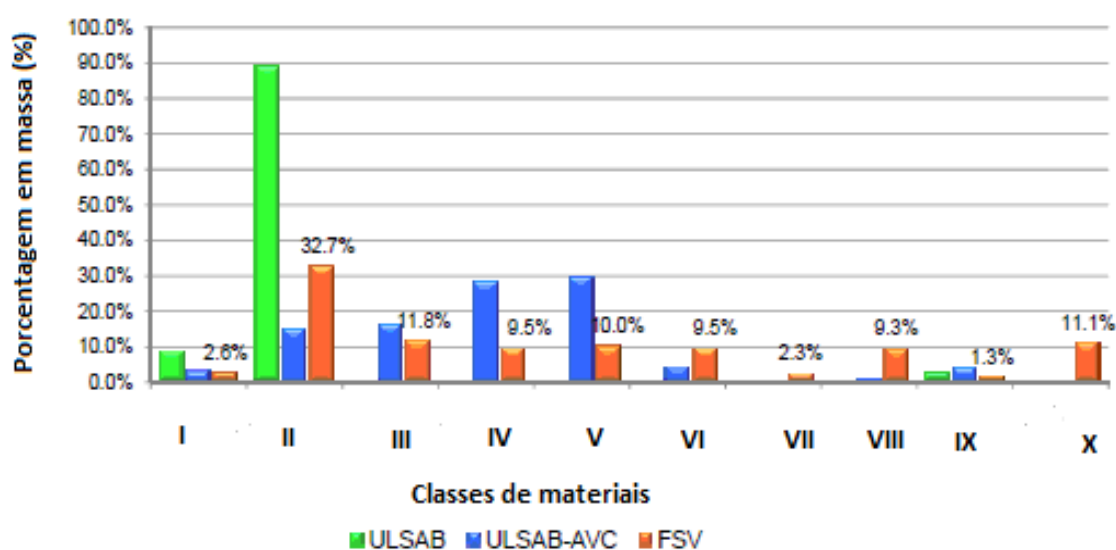
Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE OVERVIEW REPORT, 2011).

Tabela 2 - Média de resistências à tração de aço para o FSV em comparação com o ULSAB e ULSAB-AVC.

| Veículo | Resistência à tração (MPa) | Espessura média do material |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| ULSAB | 413 | 1.16 |
| ULSAB-AVC | 758 | 1.00 |
| FSV - BEV | 789 | 0.98 |

O FSV demonstrou os avanços na tecnologia de aço desde a conclusão do ULSAB e ULSAB-AVC, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico de tipos de aços x massa em porcentagem do FSV para o ULSAB e ULSAB-AVC.



Fonte: (FUTURE STEEL VEHICLE OVERVIEW REPORT, 2011).

2.1.7 Aços de interstícios livres ou *Interstitial Free* (IF)

Os aços IF (interstícios livres ou *Interstitial Free*) têm sido adotados com sucesso atualmente na fabricação de carrocerias de automóveis.

A principal característica dos aços IF (*Interstitial Free*) é a sua excelente conformabilidade em relação aos aços carbono-manganês e aos acalmados ao alumínio convencionais, proporcionando características fundamentais para fabricação de peças de difícil conformação para a indústria automobilística, como (MARQUES, 2008):

- Baixo limite de escoamento (LE);
- Alto valor de coeficiente de anisotropia normal (r_m);
- Resistência ao envelhecimento por precipitação.

Os aços IF notabilizam-se por apresentarem níveis ultrabaixos de elementos intersticiais como o carbono e o nitrogênio, o que é alcançado durante o processo de refino na aciaria e pela adição de elementos formadores de carbonetos e nitretos (elementos estabilizadores). A redução dos teores de carbono favorece a formação de uma textura de recristalização favorável à conformação de peças.

Podem existir aços IF e BH de alta resistência. O aumento de resistência dos aços IF pode ser conseguido por endurecimento por solução sólida, refino de grão ou partículas de segunda fase.

Os aços IF apresentam maiores índices de anisotropia planar (Δr). São mais empregados em materiais revestidos por imersão a quente, por apresentarem melhor aderência da camada de revestimento, aumentando a resistência durante a conformação não há perda de massa (MARQUES, 2008).

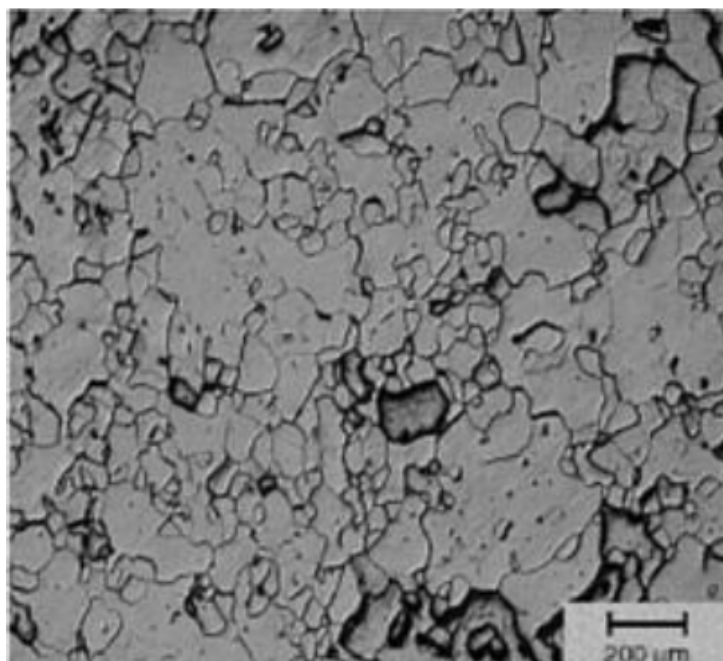
Os aços IF, laminados a frio e desgaseificados a vácuo, são caracterizados por apresentarem altos níveis no alongamento, no coeficiente de encruamento e no coeficiente de anisotropia, e menores níveis de limite de escoamento e na resistência à tração. Por possuírem características mecânicas de excelente estampagem profunda e de não-envelhecimento, eles deram a oportunidade das indústrias automotivas confeccionar partes “mais difíceis de conformar” (PEREIRA, 2006).

O processamento dos aços IF consiste na redução drástica dos teores totais de carbono e nitrogênio para níveis de dezenas de ppm (em peso), através da desgaseificação à vácuo. O nível desses elementos, em solução, é controlado pela adição de titânio e/ou nióbio, e podem ter efeito favorável sobre recristalização, segregação e demais propriedades. Em contraste com as composições classicamente empregadas, esses aços podem atingir as propriedades desejadas utilizando o processamento via tratamento de recozimento contínuo, uma grande vantagem do ponto de vista industrial. O controle das propriedades mecânicas tem exigido, cada vez mais, um controle rigoroso do teor total e em solução dos elementos residuais (SILVA; AVILLEZ, 2004).

Dentro do projeto ULSAB, os aços IF de alta resistência representam 4% do total de aços utilizados na estrutura principal da carroceria. Nestes componentes são utilizados estes tipos de aços com limite de escoamento de 300MPa e resistência à tração de 420MPa (PEREIRA, 2006).

Quanto à microestrutura, apresentam grãos ferríticos mais refinados e ligados a elementos endurecedores por solução sólida tais como silício, fósforo e manganês, como mostrado na Figura 17:

Figura 17 - Fotomicrografia de um aço IF (*Interstitial Free*) atacado. Nital 2%.



Fonte: (MARQUES, 2008).

2.1.8 Aços BH (*Bake Hardening* ou endurecíveis por meio de pintura)

Atualmente, entre os materiais que apresentam uma melhor solução de compromisso entre nível de resistência e estampabilidade estão os aços IF (*Interstitial Free*) e os aços BH (*Bake Hardening*). Os aços BH oferecem uma boa resposta aos requisitos impostos hoje para a fabricação de carrocerias, apresentando boa estampabilidade e resistência à deformação após o recozimento (MONTEIRO, 2009).

Bake Hardening (BH) refere-se ao aumento na tensão de escoamento devido ao tratamento térmico que ocorre durante a cura da pintura devido ao aquecimento das peças pintadas. O mecanismo primário que causa a adição de resistência é a imobilização das discordâncias pela segregação de átomos intersticiais, conhecido como envelhecimento após deformação (LOMBARDO, 2011).

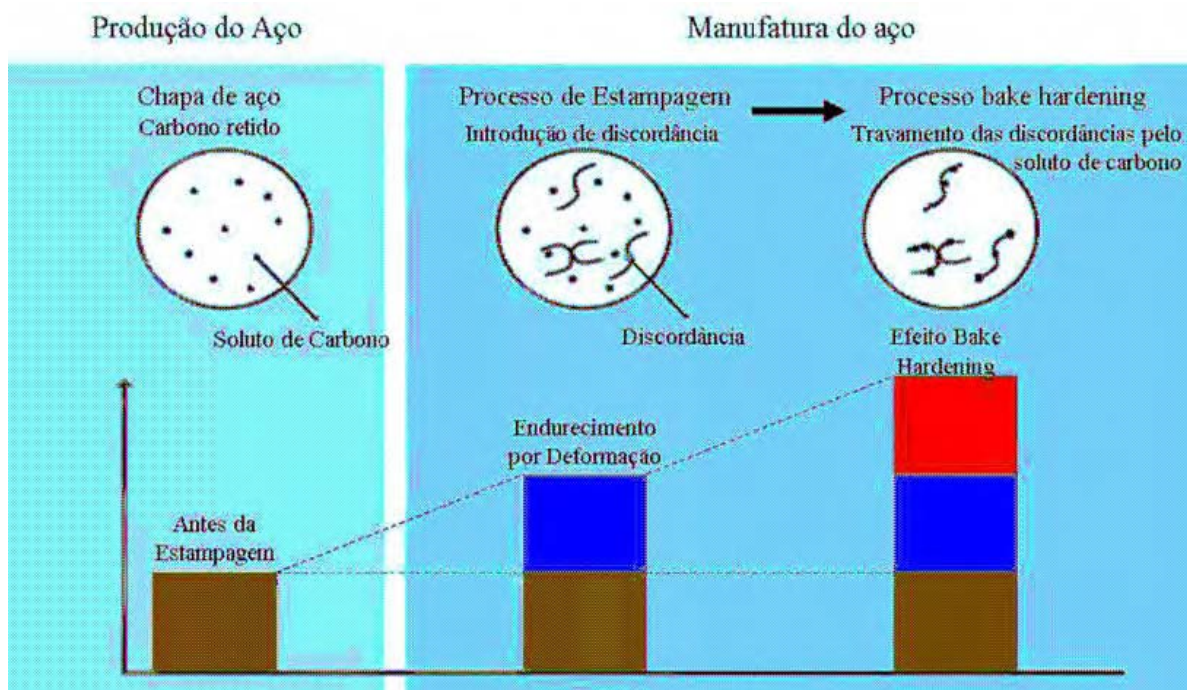
Antes do envelhecimento, os aços BH apresentam baixa tensão de escoamento e alto grau de deformação. Quando os aços BH são conformados e levados à cura após pintura, estes ganham resistência mecânica e resistência ao amassamento. A solução de carbono é responsável pelo efeito BH e o efeito de envelhecimento no processo, devido à precipitação de carbeto preferencialmente nas proximidades das discordâncias (LOMBARDO, 2011).

Para o mecanismo de envelhecimento por deformação ocorrer, as seguintes condições deve ocorrer simultaneamente (MONTEIRO, 2009):

1. O material deve conter discordâncias móveis (no qual são usualmente introduzidas por trabalho a frio);
2. Suficiente concentração de soluto deve estar presente na ferrita;
3. O soluto deve mover-se a temperatura de envelhecimento;
4. O processo de recuperação das discordâncias deve ser suficientemente lento para evitar significativo amolecimento.

A Figura 18 mostra o processo para se obter o endurecimento através do comportamento do soluto carbono durante a manufatura de componentes fabricados de aço BH, relacionando com a resistência mecânica (LORA, 2009):

Figura 18 - Ciclo do processo de fabricação do aço *Bake Hardening*.



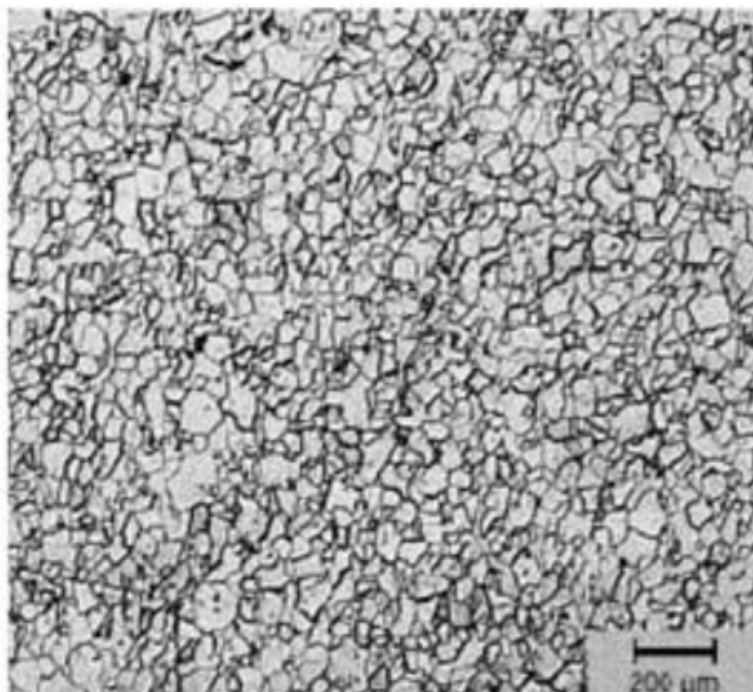
Fonte: (LORA, 2009).

Os aços BH apresentam uma adequada conformabilidade para suportar estampagem de moderada a profunda. As principais características desses aços são as de proporcionar boa resistência a pequenos amassados nas peças finais, mesmo quando submetidos a baixos níveis de conformação na sua fabricação, e redução de peso das peças (LIMA, 2005).

A escolha desta classe de aços para um particular nível de resistência, deve também levar em conta a pré-deformação a fim de que as vantagens individuais desta classe possam ser mais bem exploradas (THYSSEN KRUPP STEEL, 2010).

Estes aços, além de apresentarem baixo teor de carbono, também apresentam como fase predominante, a fase ferrita. A Figura 19 apresenta uma microestrutura típica de um aço BH, composta basicamente de grãos ferríticos (LIMA, 2005).

Figura 19 - Fotomicrografia de um aço BH atacado. Nital 2%.



Fonte: (LIMA, 2005).

Os aços BH, na indústria automotiva, são geralmente empregados em partes visíveis do automóvel, como portas, capôs, portas traseiras, pára-lamas dianteiro e tetos, além de peças estruturais como assoalhos automotivos, reforços, suportes transversais e peças anexas, onde se quer um aumento de resistência após a pintura (GORNI, 2008).

2.1.9 Aços Bifásicos ou *Dual Phase* (DP)

Um dos recursos disponíveis para se maximizar simultaneamente a ductilidade e resistência mecânica dos aços consiste no uso de microestruturas mais complexas do que ferríticas ou ferrítica-perlíticas, normalmente presentes nas ligas comuns de baixo carbono. No final da década de 1970 surgiu o primeiro desenvolvimento nesse sentido, o assim chamado aço bifásico (*Dual Phase*) que apresenta microestrutura constituída por uma matriz com 80 a 85% de ferrita poligonal macia mais 15 a 20% de martensita dura (TIGRINHO, 2011).

A presença de discordâncias livres na ferrita tem sido a principal explicação para escoamento contínuo em baixas tensões. As discordâncias seriam introduzidas devido à

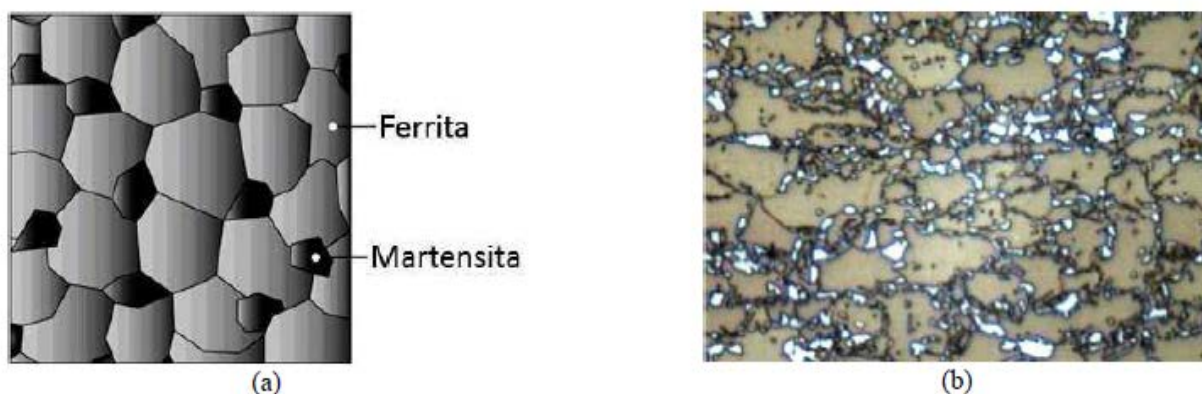
variação volumétrica em torno de 3 a 4%, associada à transformação da martensita dos grãos vizinhos, inicialmente austeníticos (RAY; DHUA, 1999).

Durante a produção dos aços bifásicos, tanto através da laminação de chapas a quente como de recozimento contínuo, a matriz ferrítica se forma em primeiro lugar, enriquecendo a austenita remanescente com C e outros elementos de liga. Esta, por sua vez, ganha temperabilidade suficiente para se transformar mais tarde em martensita, sob temperaturas bem mais baixas. Essa transformação atrasada da martensita induz tensões residuais de compressão na matriz ferrítica, as quais facilitam o processo de escoamento e, dessa forma, reduzem o valor do limite de escoamento e suprimem a ocorrência de patamar. Um resfriamento lento após a formação da martensita pode proporcionar a redução da fragilidade da martensita recém formada através de efeitos de revenido. Durante a deformação plástica o escoamento da matriz ferrítica macia através das ilhas de martensita dura encrua significativamente o material, contribuindo para aumentar sua resistência mecânica (TIGRINHO, 2011).

A ductilidade alta apresentada por estes aços está associada à alta plasticidade da ferrita. O termo bifásico vem da predominância de duas fases na sua microestrutura, apesar de também pequenas quantidades de outras microestruturas, como bainita, austenita retida e perlita estar presentes (LIBERTO, 2001).

A Figura 20, mostra uma microestrutura esquemática e real do aço DP, que contém ferrita e ilhas de martensita. A fase mole de ferrita é geralmente contínua, dando a estes aços uma excelente ductilidade. Quando esses aços se deformam a deformação é concentrada na fase de menor resistência (ferrita) em torno das ilhas de martensita, propiciando uma alta taxa de encruamento para esses aços (SUN; PUNGH, 2002).

Figura 20 - Fotomicrografia de um aço DP (*Dual Phase*) com ilhas de martensita em uma matriz ferrítica. Em (a) esquemática e em (b) real.



Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2009).

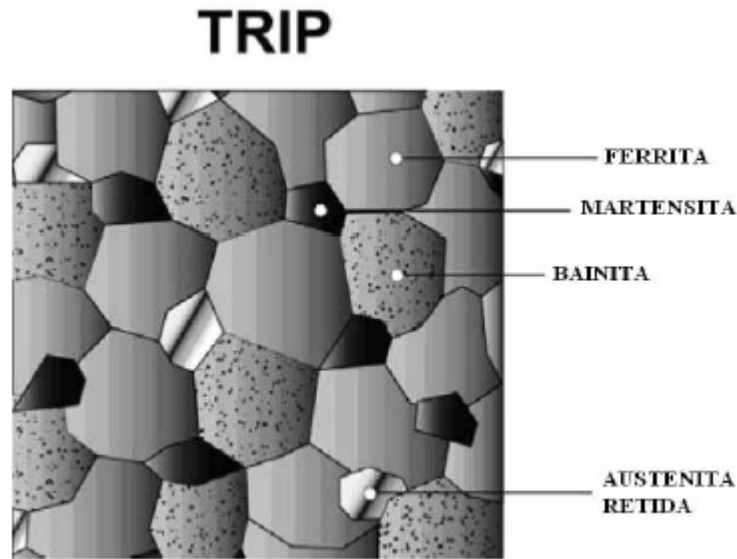
Devido ao fato dos aços apresentarem alta resistência à tração e ductilidade, eles possuem grande potencial para aplicação em diversos setores da indústria, principalmente na automobilística. Podem ser aplicados em partes de automóveis, tais como, em portas, pára-choques, barra de proteção lateral, aros e discos de rodas, fabricação de polias, coluna “A” e “B”, suporte de molas, armação de assento, pára-lamas, partes internas de painéis, itens de segurança, dentre outras (PEREIRA, 2009).

Um aspecto importante nos aços bifásicos é a incompatibilidade plástica entre os seus constituintes, pois enquanto a ferrita suporta grandes deformações, as ilhas de martensita só apresentam deformações visíveis após o aço ter atingido o máximo de deformação uniforme (PEREIRA, 2002).

2.1.10 Aços TRIP

A necessidade do desenvolvimento de aços com alta resistência e boa conformabilidade resultou no surgimento dos aços multifásicos, formados de ferrita, bainita, austenita retida e/ou martensita. Nesses aços tenta-se conseguir uma maior eficiência do efeito TRIP por meio da estabilização da austenita retida para que esta se transforme em martensita, em níveis mais elevados de tensão e deformação (JEONG; MATLOCK; KRAUSS, 1993). A Figura 21, mostra um esquema da microestrutura de um aço TRIP.

Figura 21 - Um esquema mostrando as fases presentes nos aços multifásicos (TRIP).



Fonte: (ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL – APPLICATION GUIDELINES VERSION 4.1, 2009).

Os aços multifásicos são obtidos através de uma austenização parcial ou total, seguida de um tratamento isotérmico na faixa de temperatura de transformação bainítica. Durante o tratamento isotérmico, parte da austenita é transformada em bainita, enquanto outra parcela da austenita residual se transforma em martensita, durante a têmpera em água. A ductilidade à temperatura ambiente depende do tempo de permanência na faixa de transformação bainítica, assim como da mistura de martensita, bainita e austenita retida dispersa na matriz ferrítica, obtida mediante a austenitização parcial. Certamente, a transformação bainítica, durante o processo isotérmico de obtenção de aços TRIP, permite o enriquecimento de carbono de parte substancial de austenita, que permanece estável após resfriamento até a temperatura ambiente (JACQUES; LADRIÈRE; DELANNAY, 2001).

O termo “aços assistidos pelo efeito TRIP” está sendo utilizado para designar os aços multifásicos que consistem em uma matriz de ferrita poligonal, bainita, martensita e uma significativa quantidade de austenita retida. Contém uma pequena fração volumétrica de austenita retida, ou seja, entre 5 e 15%, dependendo do histórico de processamento termomecânico e da composição química do aço em uma matriz ferrita e bainita (BLECK, 2002).

Estes aços são de grande interesse para a indústria automobilística pelo seu potencial de combinação de alta resistência e boa conformabilidade aliados a um preço competitivo. A alta resistência influencia diretamente nos resultados dos testes de impacto (*crash tests*) e redução

de peso da carroceria. Ele possui grande potencial de aplicação em peças de conformação mais severas tais como as de estampagem profunda (KANTOVISCKI, 2005).

Os aços de Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP) oferecem um compromisso atraente entre resistência e ductilidade devido à sua microestrutura complexa, que associa ferrita, bainita e frações significativas de austenita retida, gerada ao final de um esquema de tratamento térmico específico. Esta transformação constitui um mecanismo de endurecimento por deformação que possibilita o aumento do alongamento uniforme e da taxa de encruamento, resultando também, em uma maior absorção de energia no ensaio de impacto (FERRER, 2003).

Estas propriedades em aços TRIP e outros multifásicos não são apenas resultado do endurecimento por solução sólida, refino de grão, endurecimento por precipitação, mas também devido à existência de fases duras e macias em diferentes tamanhos de grão.

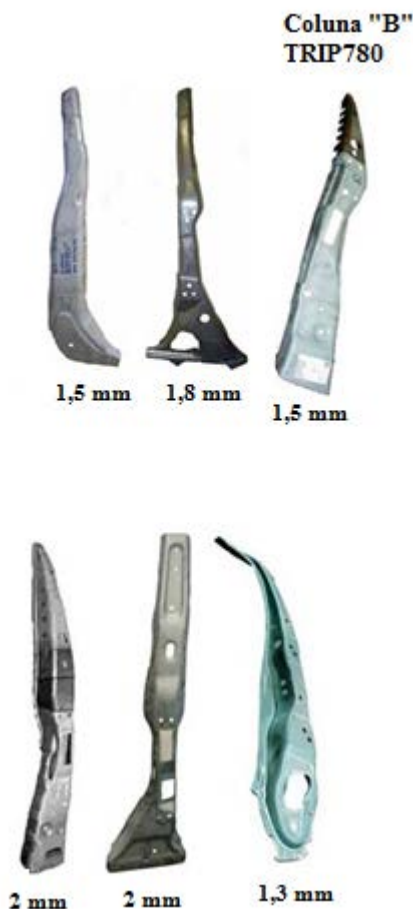
O efeito TRIP, como um mecanismo particular de deformação, constitui um dos aspectos chave do processamento destes materiais. Esta transformação constitui um mecanismo de endurecimento por deformação que evita a ocorrência de deformações localizadas, aumentando o alongamento uniforme e a taxa de encruamento. Os aços multifásicos assistidos pelo efeito TRIP constituem uma nova série de aços que apresentam excelentes propriedades mecânicas (FUKUGAUCHI, 2010)

A deformação provocada pela transformação da austenita retida em martensita não explica totalmente os altos valores de alongamento uniforme obtidos nos aços TRIP, os quais oscilam entre 15 e 30%. Nos aços de baixo carbono com efeito TRIP essa transformação promove deformação por tração de apenas 2%, devido às frações muito baixas de austenita retida presentes na microestrutura. A maior contribuição para a ductilidade desse material é o maior coeficiente de encruamento, devido à formação progressiva de martensita dura ao longo de toda a deformação (GORNI, 2008).

O refino da microestrutura dos aços TRIP é duplamente importante, garantindo simultaneamente a estabilidade da austenita retida e a imunidade à fragilidade que poderia ser induzida pela presença de martensita não-revenida (MARTINS, 2011).

A Figura 22, mostra algumas aplicações de aços TRIP em veículos, como por exemplo, portas, pára-choques e colunas “B”, com espessuras diferentes.

Figura 22 - Exemplos de aplicações de aços TRIP.



Fonte: (FURTADO, 2006).

2.1.11 Aços de Fases Complexas ou *Complex Phase* (CP)

Antigamente, a indústria siderúrgica passou por processo de transformação, buscando novos desafios para desenvolver os aços avançados de alta resistência em substituição aos aços convencionais. Esses aços eram denominados multifásicos por apresentarem um teor baixo de carbono, com isso, podendo ser laminados a frio ou a quente (THYSSEN KRUPP STEEL, 2010).

Essas fases apresentam em quantidades suficientes para produzir um material de alta resistência à tração, com limites de escoamento superiores a 550 MPa e um alto alongamento (entre 10 a 20%). Essas propriedades são importantes para projetar um automóvel que busca uma maior segurança aos passageiros, além de apresentarem uma redução de peso em relação aos aços convencionais (MARTINS, 2010; GORNI, 2008).

Esses novos aços chamados aços multifásicos, assim como o *Complex Phase* que será apresentado nesse trabalho quanto ao aspecto microestrutural, são constituídos de ferrita fina, bainita e martensita, eventualmente com uma pequena quantidade de austenita retida. Além disso, pequenas quantidades de precipitados, compostos por nióbio e/ou titânio, são utilizados como reforço no aço, alterando suas principais propriedades mecânicas (WORLD AUTO STEEL, 2010).

Para os aços com estruturas mais simples como os bifásicos, o reagente Nital era suficiente para a identificação das fases presentes. Porém, com o advento dos novos aços como os bainíticos, os multifásicos ou *Complex Phase*, foi preciso estabelecer novos reagentes para a identificação das fases, afinal não é possível fazer uma identificação global dos constituintes apenas com um ataque químico, por não existir um ataque que revele todas as fases (PEREIRA, 2003).

Caracterizados por apresentarem alta conformabilidade e alta capacidade de absorção de energia e deformação (MARTINS, 2011).

São obtidos por meio de tratamentos isotérmicos em temperaturas intermediárias, formando estruturas muito finas de ferrita e outros constituintes, reforçados por finos precipitados, visto à adição de pequenas quantidades de nióbio, titânio e vanádio (KARELOVA, 2009; KUZIAK, 2008; SCHAEFFLER, 2005; KRUPITZER, 2005).

Apresentam uma morfologia bastante peculiar de fases duras, como bainita e martensita, e de menor dureza, intercaladas, combinadas com precipitados finos e dispersos entre as fases (HAIRER, 2010; MUKHERJEE, 2009; XIAODONG, 2004; SCHAEFFLER, 2005; KRUPITZER, 2005).

A aplicação dos aços CP é favorecida pela sua alta capacidade de absorção de energia e resistência a fadiga, estas classes são particularmente adequadas para os componentes de segurança do automóvel (tais como pilares, vigas de impacto lateral e de pára-choque) exibindo boa resistência ao impacto, sendo apropriados também para componentes do sistema de suspensão (BHATTACHARYA, 2003).

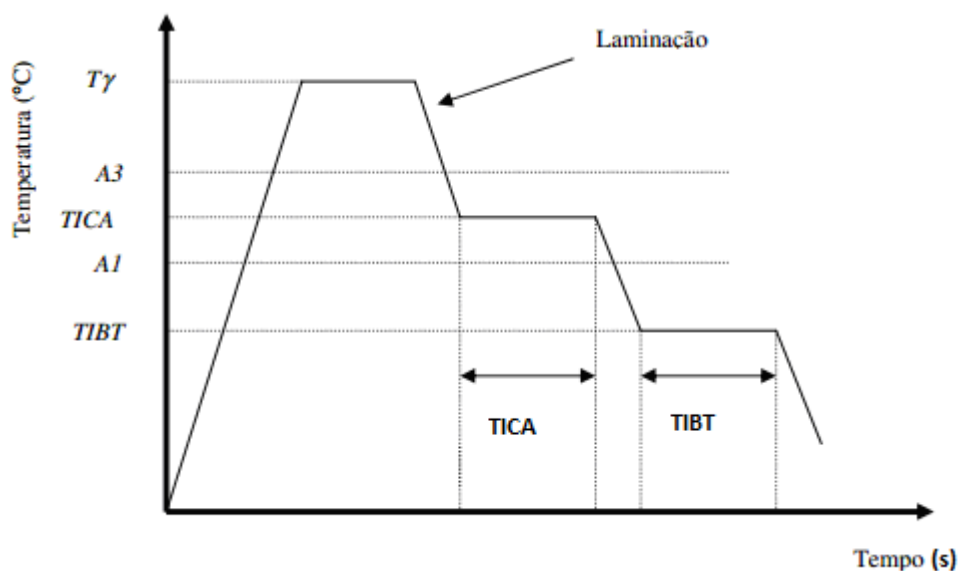
Nestes aços, com o aumento do limite de escoamento, a deformação plástica tende a diminuir, e a região de estrição torna-se menor. No entanto, em relação aos seus altos níveis de resistência a tração o aço *Complex Phase* mostra valores de alongamento elevados, o que indica boa conformabilidade para processos a frio (THYSSEN KRUPP STEEL, 2010).

2.1.12 Processamento dos aços de fases complexas

O desenvolvimento recente dos aços CP ou TRIP mostra que muitas das propriedades mecânicas apresentadas por estes materiais são dependentes em primeira análise da estabilidade de algumas fases residuais presentes em sua microestrutura (KANTOVISCKI, 2005).

Os aços de fases complexas são produzidos industrialmente a partir de duas diferentes rotas de produção: laminados a quente e/ou laminados a frio e recozidos (GORNI, 2011). A Figura 23, mostra um diagrama que demonstra o perfil de tempo x temperatura típica de um aço CP ou TRIP laminado a quente.

Figura 23 - Perfil tempo x temperatura típico de um aço CP ou TRIP laminado a quente.



Fonte: (EDITADO DE ENGL et al , 1998).

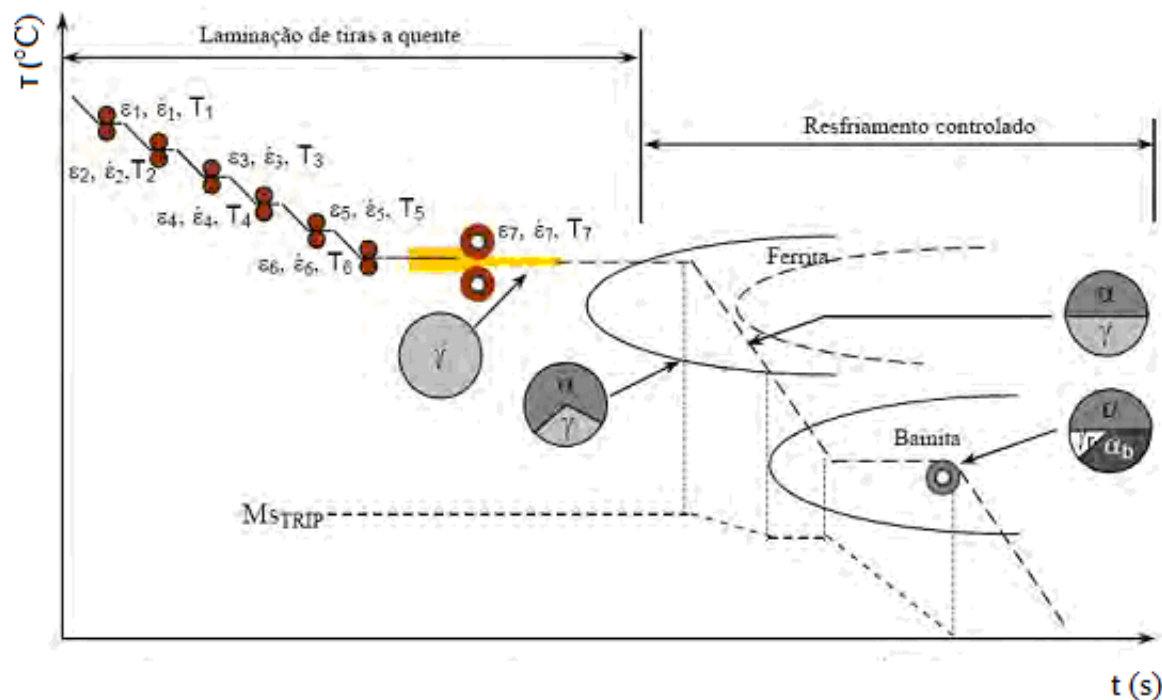
Primeiramente as placas são aquecidas e mantidas por tempo suficiente para que ocorra a homogeneização numa temperatura de austenitização (T_{γ}), seguido de decapagem e aplicação de deformações de laminação em temperaturas decrescentes. Em seguida, o material é recozido numa temperatura intercrítica (TICA) onde $A1 < TICA < A3$, durante um tempo denominado TICA, sendo A1 e A3 os limites inferiores e superiores da temperatura intercrítica respectivamente. Depois realizou-se um resfriamento rápido até uma temperatura para a transformação isotérmica da bainita denominada TIBT, onde $TIBT \sim 300-500^{\circ}C$, sendo $MS < TIBT \ll A1$. Durante o resfriamento rápido desde a temperatura intercrítica TICA para a temperatura de transformação isotérmica da bainita TIBT é esperado que uma certa

porcentagem da austenita retida se transforme em ferrita. O material é então bobinado quando se aproxima da temperatura de transformação isotérmica da bainita TIBT, permanecendo num estado isotérmico ou quase isotérmico durante algum tempo (GORNI, 2011).

Os principais aspectos do processamento dos aços de fases complexas laminados a quente está em desenvolver corretamente o resfriamento contínuo (FERRER, 2003; BLECK, 2002).

A microestrutura e as propriedades mecânicas destes materiais podem ser ajustadas durante a laminação, o qual os parâmetros como grau de deformação (ϵ), taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) e temperatura de deformação (T) são controlados, como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Um esquema representando o processamento termomecânico dos aços multifásicos TRIP e CP.



Fonte: (ANNIBAL, 2005).

Para os aços Dual Phase, a taxa de resfriamento deve ser baixa o suficiente de modo a possibilitar que aproximadamente 85% da austenita se transforme em ferrita, ocorrendo um enriquecimento de carbono da austenita remanescente. Ao mesmo tempo, a taxa de resfriamento deve ser alta o suficiente para evitar a formação de perlita e bainita e garantir a formação de martensita durante o bobinamento a temperaturas baixas. Portanto, neste esquema é necessário inserir um tratamento na faixa de temperaturas intercríticas de modo a se ter um controle da cinética de formação máxima da ferrita (KANTOVISCKI, 2005).

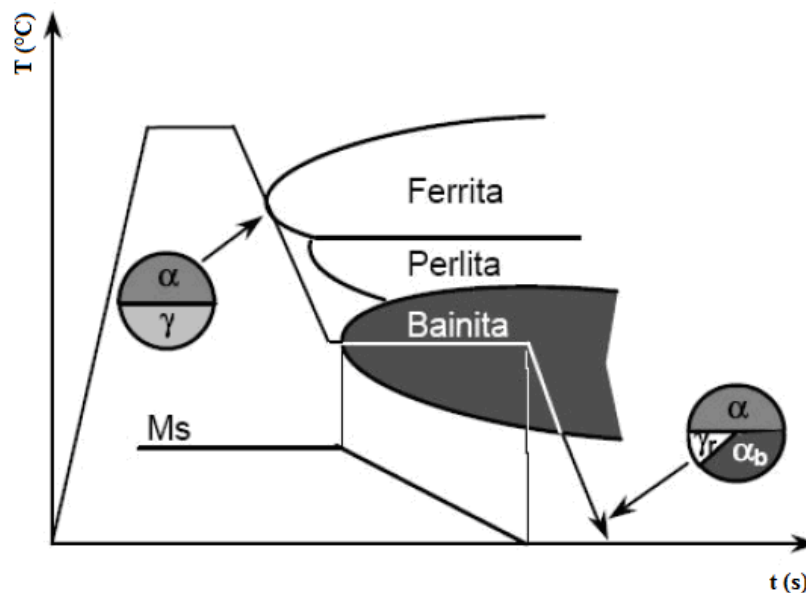
Para aços CP ou TRIP de baixa liga é aplicada uma taxa de resfriamento ainda mais baixa, uma vez que a formação da ferrita é atrasada devido ao efeito dos elementos de liga e às concentrações mais altas de carbono. Da mesma forma que ocorre nos aços Dual Phase, nos aços TRIP ou CP é necessário um controle da velocidade de resfriamento na mesa de acabamento do laminador de tiras a quente de modo a obter de 50 a 60% de ferrita pró-eutetóide. Entretanto, nos aços TRIP ou CP é necessário que o bobinamento seja realizado na faixa de temperatura da formação de bainita (ao redor de 400 a 500 °C), para se obter entre 25 a 40% de bainita entremeada de 5 a 15% de austenita retida (BLECK, 2002). A austenita retida é metaestável uma vez que o enriquecimento de carbono da austenita remanescente das transformações ferríticas (pró-eutetóide e bainítica) desloca a temperatura de início de formação de martensita para temperaturas menores que a temperatura ambiente.

Segundo Bleck (2002), quando se trata de laminação a frio é necessário que o estado de partida do aço TRIP apresente alta ductilidade, em virtude da presença de uma microestrutura constituída por ferrita e perlita. Essa microestrutura origina-se da aplicação de uma temperatura de bobinamento muito alta, ao redor de 700 °C.

Após a laminação a frio, o material é então submetido a um tratamento térmico (reaquecido no forno de recozimento) até uma temperatura intercrítica. Este tratamento intercrítico é composto por duas etapas, sendo a primeira um recozimento intercrítico na faixa de temperaturas entre 780 e 880 °C, seguido de um resfriamento rápido até atingir a faixa de temperatura entre 350 e 500 °C, onde a maior parte da austenita é transformada em bainita, seguido de um resfriamento ao ar (KANTOVISCKI, 2005).

A Figura 25, mostra um esquema do recozimento intercrítico aplicável a aços TRIP ou CP laminados a frio (BLECK, 2002).

Figura 25 - Esquema de recozimento intercrítico aplicável a aços CP ou TRIP laminados a frio.



Fonte: (BLECK, 2002).

A microestrutura após o recozimento intercrítico apresenta uma porcentagem aproximadamente igual de ferrita e austenita, mas ao contrário da microestrutura dos aços TRIP ou CP laminados a quente, parte da ferrita já estava na microestrutura antes do recozimento sendo que, outra parte se formou durante o resfriamento a partir da temperatura intercrítica. De um modo geral, as frações volumétricas dos diferentes produtos de transformação, obtidas através do recozimento intercrítico (após a laminação a frio) são análogas às obtidas nos aços multifásicos laminados a quente (GORNI, 2011).

O resfriamento é interrompido acima da temperatura de início de transformação martensítica (M_s). Taxas muito baixas de resfriamento podem diminuir a fração de austenita retida com conseqüente aumento das quantidades de ferrita e perlita. Altas taxas não são favoráveis à transformação austenítica. Se o nível de carbono remanescente na austenita é baixo, ocorre a formação de martensita, gerando altos níveis de resistência à tração e baixa ductilidade. Até 400°C , temperatura de início de solubilização, ocorreu pouca ou nenhuma transformação bainítica, o teor de carbono na austenita é baixo e conseqüentemente a transformação martensítica é alta, gerando martensita e alta resistência à tração com baixa fração de austenita (KANTOVISCKI, 2005).

Grãos de austenita retida maiores do que $1\mu\text{m}$ são instáveis, e não contribuem significativamente com a ductilidade do material. Por outro lado, as ilhas de austenita retida, que são menores do que submicron tem uma baixa tendência para transformar em martensita, e, portanto, também não contribuem para a ductilidade (TIMOKHINA; HODGSON; PERELOMA, 2004; DIMATTEO et al, 2006).

2.1.13 Aplicações dos aços de fases complexas na indústria automobilística

Atualmente, os aços de fases complexas (CP) têm aumentado sua participação na indústria automobilística mundial.

Os aços CP apresentam excelentes propriedades mecânicas e uma microestrutura multiconstituída com uma dureza homogênea, combinado com precipitados finos e dispersos. São particularmente adequados para a manufatura dos componentes necessários para garantir a segurança dos ocupantes dos veículos em caso de acidentes, como barras anti-colisão em portas, suportes de pára-choques, coluna “B”, longarinas e barras de travamento da estrutura (MARTINS, 2010; HEBESBERGER, 2010; PICHLER, 2010; KARELOVA, 2009; GORNI, 2008; KUZIAK, 2008; ZRNÍK, 2006; ADAMCZYK, 2007; XIAODONG, 2004; ZUIDEMA, 2001).

Devido a sua microestrutura diferenciada, são utilizados em itens de segurança dos automóveis, pois possuem características de absorção de impactos e excelentes resultados de fadiga. A Figura 26, mostra alguns exemplos de aplicação de aços de fases complexas que podem ser utilizados em componentes que são submetidos a impacto e fadiga (ARCELOR MITTAL, 2010).

Figura 26 - Exemplos de aplicação de aços de fases complexas em componentes submetidos a impacto e fadiga. (a) Placa de assento para os bancos (b) Barra de proteção para portas (c) Reforço para túnel (d) Viga de pára-choque (e) Viga de pára-choques, a partir de outra vista e (f) Braço de suspensão.



Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2010).

Por apresentarem grande potencial para serem utilizados em componentes conformados como longarinas nos automóveis, pois estas peças possuem raios de conformação bastante reduzidos e também estão sujeitos a choques. A Figura 27, mostra um trecho de uma longarina que foi conformado utilizando um aço CP - 800.

Figura 27 - Trecho de uma longarina que foi conformada em aço CP 800.



Fonte: (MARTINS, 2010).

Segundo Martins (2010), o uso de um aço de fases complexas como reforço das colunas “B” nos veículos quando submetido a choque poderá apresentar o dobro da resistência de um aço convencional. Na Figura 28 é mostrado um reforço das colunas “B”.

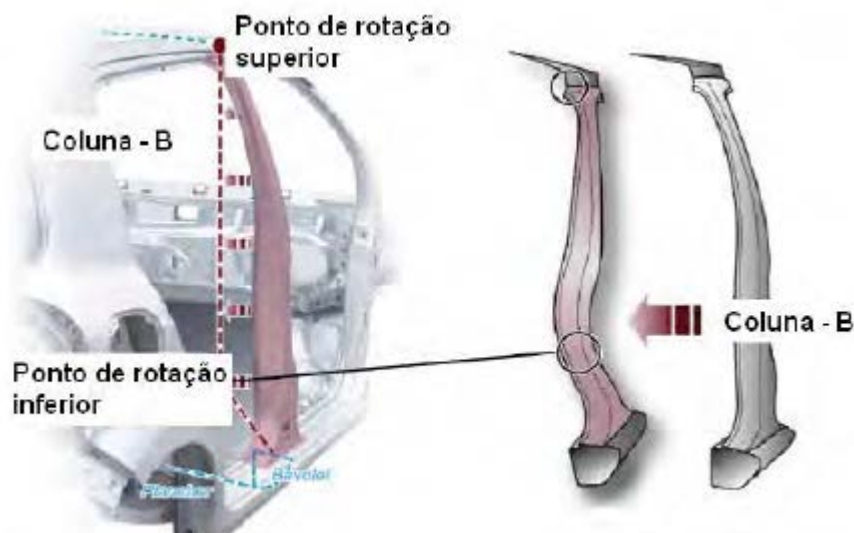
Figura 28 - Uso de um aço de fases complexas em um reforço de colunas “B”.



Fonte: (THYSSENKRUP, 2009).

A Figura 29, mostra o comportamento da coluna “B” em situação de impacto, onde a intrusão reduzida devido à absorção de energia gerada durante o choque.

Figura 29 - Uso de um reforço produzido em aços de fases complexas, cujo objetivo foi aumentar a segurança dos ocupantes dos veículos.



Fonte: (MARTINS, 2010).

Segundo World Auto Steel (2010), as indústrias automotivas Porsche e Volkswagen estão utilizando cada vez mais os aços avançados de alta resistência, dentre eles, os aços de fases complexas (CP). A utilização deste aço tem sido empregada como viga de travamento da estrutura inferior dos automóveis, pois eles apresentam bons resultados em situações de impacto, com isso trazem uma boa rigidez e apresentam uma redução de peso comparada ao aço convencional.

2.2 Caracterização Microestrutural dos aços de fases complexas (CP)

A tecnologia moderna depende fortemente do uso de materiais de engenharia. Sua estrutura e propriedades são determinadas por muitos recursos, que se estende desde as distâncias atômicas medidas em nanômetros, para os produtos finais, medidos em centímetros ou até metros. Essa escala de tamanho, que abrange várias ordens de grandeza, começa com a estrutura cristalina e inclui as configurações nano, micro e macro escala de todos os que contribuem para o amplo espectro de propriedades (PETZOW, 2001).

Para se obter os efeitos da microestrutura sobre as propriedades físicas e mecânicas dos aços, o material deve ser submetido a um exame metalográfico para a compreensão e

identificação das propriedades do material em estudo (GIRAULT et al, 1998; ROS-YÁÑEZ; HOUBAERT; MERTENS, 2001; SMALLMAN; BISHOP, 1999).

A correlação propriedade-microestrutura feita através da investigação metalográfica pode envolver uma análise qualitativa, tal como observação da morfologia e homogeneidade das estruturas, assim como uma análise quantitativa, através da medição de parâmetros microestruturais como, por exemplo, fração volumétrica das fases presentes, distribuição e tamanho de grão das microestruturas. Dessa forma, muitas vezes é de suma importância que a técnica metalográfica revele finos detalhes dessas estruturas, enquanto outras vezes, têm-se simplesmente como finalidade segregar, de maneira eficiente, os diferentes constituintes do material. (SOUZA, 2008).

Segundo Voort (1984), as técnicas utilizadas na metalografia como processos de preparação de amostras, procedimentos de separação de fases a partir de ataques químicos e também métodos de análise qualitativa e quantitativa, necessitam de um determinado grau de habilidade e paciência para executar as atividades pelo operador.

As técnicas convencionais para a preparação das amostras são seccionamento, embutimento, lixamento e polimento, após estes processos as amostras são submetidas à microscopia óptica para a análise das imagens.

Para caracterizar as transformações de fases e as microestruturas do material analisado pode ser através de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microscopia eletrônica de transmissão e técnicas como a dilatométrica e a análise térmica (PADILHA, 2000; KRAUSS, 2005; BRAMFITT; BENSCOTER, 2006).

Utiliza-se mais comumente a microscopia óptica para se fazer a análise metalográfica das estruturas, cujas ampliações podem variar entre 50 a 2000 vezes. Quando são necessárias ampliações maiores pode-se utilizar a microscopia eletrônica que pode ser de varredura ou de transmissão. Quando se emprega a microscopia óptica utilizando-se a iluminação em campo claro é possível observar determinadas características e certos detalhes na microestrutura de uma amostra que está somente polida, ou seja, sua superfície não foi submetida por nenhum tratamento térmico ou processo químico, desde que o polimento tenha sido da maneira correta para que apresente diferenças de reflexibilidade da luz. Com isso, pode-se dizer que a microscopia óptica não substitui a microscopia eletrônica de varredura ou de transmissão quando se deseja obter certos detalhes na microestrutura do material (BRAMFITT; LAWRENCE, 2004; ABDALLA et al, 2008).

Vários recursos da microscopia óptica como luz polarizada ou aplicação de campo escuro podem auxiliar na identificação de estruturas de amostras na condição polida (VOORT, 1984).

Os estudos metalográficos, são feitos com ataques químicos para a identificação de determinadas fases presentes nos aços de fases complexas. Essa identificação é obtida pelo microscópio óptico, cujo objetivo é revelar por meio de fotomicrografias diferentes estruturas nos aços multiconstituídos (GIRAULT et al, 1998; PEREIRA et al, 2002; DE; SPEER; MATLOCK, 2003; TIMOKHINA; HODGSON; PERELOMA, 2004; SILVA; LOPES; SANTOS, 2006, ANAZAWA et al, 2006; OLIVEIRA; ANDRADE; COSTA, 2007).

Existem outras técnicas via microscopia óptica utilizadas para caracterizar a microestrutura do material, que são a iluminação de campo escuro, método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC).

Na análise metalográfica de aços são geralmente utilizados processos químicos para a identificação ou segregação dos constituintes do material, os quais podem ser divididos em dois grupos, com base em seus princípios ativos: os ataques químicos corrosivos e os ataques químicos denominados *Tint Etching* (SOUZA, 2008).

2.2.1 Ataques químicos corrosivos

Um grande número de ataques foi desenvolvido para identificar a microestrutura de um determinado material, dentre eles, o ataque químico é considerado o mais fácil e o mais comumente utilizado. Utiliza-se um processo de corrosão controlada conduzida pelas diferenças de potencial eletroquímico entre as áreas de superfícies com heterogeneidades químicas ou físicas. O ataque induz a dissolução seletiva ou a coloração preferencial das fases presentes (GIRAULT et al, 1998).

Uma superfície polida (sem revestimento) entra em contato com uma solução eletrolítica, ou seja, com algum reagente químico como Nital ou Picral, os íons metálicos podem passar diretamente para a solução. Esse processo é chamado de dissolução ativa ou “ataque” do material. O grau de ataque depende da composição química das fases individualmente da microestrutura e da taxa de dissolução, aquela onde os metais são submetidos e regidos pela estrutura cristalina da superfície. Sabe-se da eletroquímica que os elementos de liga de um aço baixa liga influenciam a erosão relativa à superfície do material

e, portanto, à velocidade de erosão. Em termos de ataque microscópico, isto significa que existem diferenças no comportamento da dissolução e, conseqüentemente, as características de erosão irão depender da composição química dos componentes da microestrutura. A propensão de metais para entrar em solução depende da sua posição dentro da série eletroquímica e, portanto, de suas diferenças de potencial. Isso também é válido para as fases de diferentes composições químicas que também possuem essas diferenças (FUKUGAUCHI, 2010).

Dessa forma, a microestrutura é revelada pela dissolução seletiva da estrutura, iniciada na superfície, sendo que diferenças na taxa de ataque revelam a microestrutura (ANGELI; FÜREDER; KNEISSL, 2006; VANDER VOORT, 1999).

Devido ao fato dos aços CP obterem uma microestrutura complexa formada por ferrita, bainita, martensita e/ou austenita retida, a identificação das fases deve ser precisa para caracterizar os importantes efeitos da composição química e do processamento destes materiais (DE; SPEER; MATLOCK, 2003).

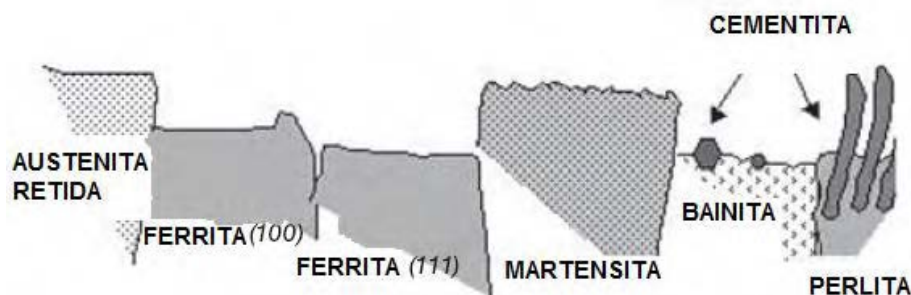
Qualquer corrosão localizada não pode ser atribuída somente às composições químicas locais diferentes. Isso é resultado também dos efeitos físicos ou como consequência de uma mistura de influências químicas e físicas. Assim, os contornos de grãos, contornos de subgrãos, contornos de fases, precipitados e discordâncias, são defeitos da configuração da rede cristalina e, portanto, permitem uma visualização mais fácil da erosão causada pelo ataque do que regiões sem defeitos dentro dos grãos devido à ligação mais fraca dos átomos. A martensita distingue-se da austenita retida porque tem defeitos de reticulado intensos (subcontornos de grão, tensões internas) e, portanto, deve ser ligeiramente menos inerte do que a austenita (embora o teor de carbono seja o mesmo) (MARTINS, 2011).

De acordo com Fukugauchi (2010), e com base nos fundamentos apresentados e considerações feitas sobre o comportamento do ataque apresentado por diferentes fases em aços multifásicos, é possível conceber o modelo indicado na Figura 30 para a erosão seletiva por corrosão, ocasionada por ataques químicos, onde a ordem da corrosão é do menor para o maior.

- Austenita: baixa a nenhuma erosão, o que permite uma topografia bastante suave;
- Martensita: baixa erosão, muito semelhante ao da austenita; o ataque é também uma função do conteúdo de carbono na martensita;
- Martensita revenida: comportamento entre martensita e bainita;
- Bainita: erosão como da ferrita, relativamente intensa;

- Ferrita: erosão mais intensa, maior dependência da orientação de grãos, estrutura de contornos de grãos bem visíveis.

Figura 30 - Modelo de ataque de fases seletivo para aços CP.



Fonte: (FUKUGAUCHI, 2010).

Os ataques químicos usualmente possuem três componentes principais: um agente corrosivo, como por exemplo ácido hidrocloreto, sulfúrico, fosfórico ou acético, um modificador, como por exemplo álcool ou glicerina e um oxidante como por exemplo peróxido de hidrogênio (VANDER VOORT, 1999).

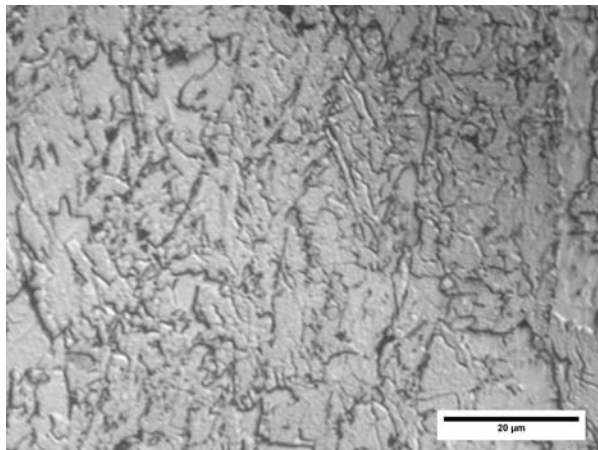
Existem dois tipos de análise metalográfica que são a convencional e a colorida. A metalografia convencional é aquela que revela a microestrutura de um determinado material com um contraste em preto e branco. Ela envolve ataques químicos corrosivos a partir de alguns reagentes químicos como Nital, Picral e Villela. Apesar de revelar imagens com um contraste adequado, a identificação das fases em tons de cinzas pode ser de difícil observação e pode enganar muitas das vezes. Com isso, criou-se a metalografia colorida, aquela que revela a microestrutura de um determinado material com uma vasta gama de cores, podendo identificar as fases de uma maneira mais confiável, por causa de uma grande possibilidade de cores. Alguns exemplos de ataques coloridos são LePera e Metabissulfito de Sódio. Além disso, os ataques coloridos podem evitar ambiguidades de interpretação sobre as fases da matriz (RAY; DHUA, 1996).

Desde a década de 80, a metalografia colorida está sendo utilizada mais comumente. Algumas técnicas de microscopia óptica como iluminação em campo escuro, método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC) estão produzindo várias tonalidades de cores. As microestruturas de metais com estruturas cúbicas não-cristalinas podem ser examinadas sem ataque, utilizando luz polarizada, mas as cores nem sempre são observadas (VANDER VOORT, 2004; GIRAULT et al, 1998).

Segundo Souza (2008), os ataques corrosivos mais utilizados em aços carbono e aços liga são baseados em três famílias de reagentes químicos: soluções à base de ácido nítrico (Nital), ácido pícrico (Picral) e soluções oxidantes (reagente Marshall).

O Nital é considerado um dos reagentes químicos mais antigos aplicados em aços. Ele é usado em uma proporção de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico para revelar os contornos de grãos da fase ferrita e da austenita retida, onde a ferrita e a austenita retida geralmente são identificadas pela tonalidade clara e as demais fases como bainita e martensita pela tonalidade escura. Dependendo dos parâmetros de tratamentos térmicos ao qual o aço tenha sido submetido, a presença de microestruturas complexas, contendo outras fases além da ferrita e da martensita, após o ataque de Nital, a identificação dessas estruturas em microscópio óptico torna-se difícil (VANDER VOORT, 2004; SAMUELS, 2003; BRAMFITT; LAWRENCE, 2004). Foi feito um ataque químico com o reagente Nital 3% em um aço de fases complexas (CP) como mostrado na Figura 31, podendo-se observar a fase ferrita e a austenita retida como a fase clara e não permitiram distinguir bainita e martensita.

Figura 31 - Fotomicrografia via microscópio óptico de um ataque Nital 3%. Aumento de 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

O reagente químico Nital pode também ser utilizado como pré-ataque em ataques coloridos como LePera e Beraha, com o objetivo de revelar os contornos de grãos das fases presentes na microestrutura de uma determinada amostra (BRAMFIT; LAWRENCE, 2004; VANDER VOORT, 1999).

O reagente químico Marshall (solução oxidante) é composto de duas soluções, onde a primeira é de 5mL de ácido sulfúrico e 8g de ácido oxálico, diluídos em 100mL de água e a segunda é de peróxido de hidrogênio (30%), cujo objetivo é identificar os contornos de grãos

da fase ferrita como o reagente Nital, mas com uma diferença, ele é mais preciso e apresenta um contraste melhor. Podendo também revelar carbonetos como a cementita (ASTM E 407, 2007).

O reagente químico Picral é geralmente composto de uma mistura de 4g de ácido pícrico e 96mL de álcool etílico. Usado em aços carbono e aços liga para atacar perlita, podendo identificar as fases bainita, martensita temperada e a cementita e outros carbonetos (BRAMFIT; LAWRENCE, 2004).

2.2.2 Ataques químicos *Tint Etching*

Os aços de fases complexas são compostos de quatro fases como ferrita, bainita, martensita e/ou austenita retida, formando uma microestrutura muito fina, podendo ficar difícil a identificação das mesmas somente através dos ataques que revelam uma tonalidade de cor cinza, com isso, para que possa haver o isolamento das fases para uma melhor identificação, os ataques *tint etching* estão sendo utilizados (GIRAULT et al, 1998).

A técnica de ataques químicos *Tint Etching* é aquela particularmente utilizada na metalografia colorida, ou seja, por possuir um contraste colorido na microestrutura do material, onde um fino filme estável, que pode ser de óxido, sulfeto, molibdato, cromato ou selênio, é depositado na superfície da amostra devidamente polida, com espessura variando de 40 a 500 nm, dependendo da sua natureza anódica ou catódica e do tipo de reagente químico utilizado. A espessura do filme controla a coloração produzida através da interferência da luz branca emitida pelo microscópio óptico (ASTM E 407, 2007).

Um dos ataques químicos coloridos mais usualmente utilizados é o reagente químico Metabissulfito de Sódio, cujo objetivo é revelar a fase austenita retida com uma tonalidade branca, ou seja, a austenita retida não é atacada, a fase ferrita apresenta uma tonalidade azul esverdeado e a fase martensita apresenta tonalidades de marrom. Podendo ser usado em concentrações de até 20g de metabissulfito de sódio diluído em 100mL de água. Quando usado em aços bifásicos ou DP, cujas fases são a ferrita, martensita e austenita retida, ele pode ser utilizado para distinguir a martensita da austenita retida. Este tipo de ataque químico pode ser composto de um pré-ataque de Nital com uma porcentagem de 5% e também pode ser utilizado com uma solução de 10% de metabissulfito de sódio. Este pré-ataque tem como

objetivo identificar os contornos de grãos na microestrutura e dar uma leve escurecida nas fases bainita e martensita.

Klemm e Beraha desenvolveram os ataques coloridos mais comumente utilizados baseados em sulfeto utilizando tiosulfato de sódio, metabissulfito de sódio e metabissulfito de potássio para atacar uma variedade de ligas metálicas. Esses ataques podem ser usados para colorir ferrita e martensita em ferros fundidos, aço ao carbono e aços baixa liga (VANDER VOORT, 2004).

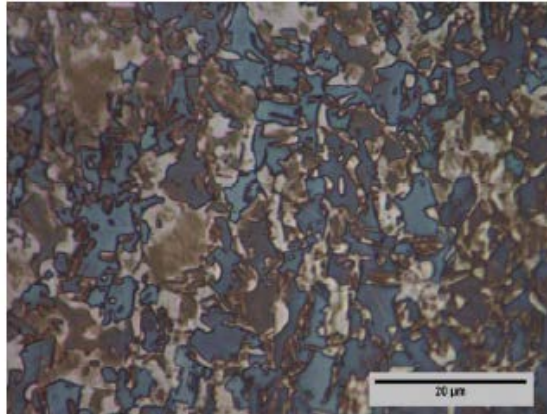
Combinações dessas técnicas de ataques químicos, assim como, variações dos tipos e quantidades de reagentes, podem ser aplicadas para possibilitar a análise simultânea das características específicas e diferentes fases constituintes dos aços (SOUZA, 2008).

LePera (1980) propôs uma mistura, em partes iguais, de duas soluções como 1% de metabissulfito de sódio diluído em água e 4% de ácido pícrico diluído em álcool para revelar a martensita em aços bifásicos de alta resistência. A preparação feita para o efetivo ataque com o reagente LePera é feita primeiramente através de um polimento, para que não haja nenhum risco na superfície da amostra e segundo, esta amostra pode ou não ser pré-atacada por um reagente Nital 2%, cujo objetivo deste pré-ataque é revelar os contornos de grãos de uma estrutura multifásica, por exemplo, e possibilitar que o ataque químico utilizando o reagente LePera, possa obter um contraste maior na caracterização de sua microestrutura. Neste ataque químico com o reagente LePera, os aços multifásicos como o TRIP e os de fases complexas verifica-se a presença de três colorações diferentes que representam a fase ferrita, bainita, martensita e/ou austenita retida.

Na Figura 32 é mostrada a microestrutura de um aço multifásico, atacada com LePera, cuja fase ferrita revela uma tonalidade azul esverdeada, a fase bainita um tom marrom e as fases austenita retida e/ou martensita apresentam coloração branca.

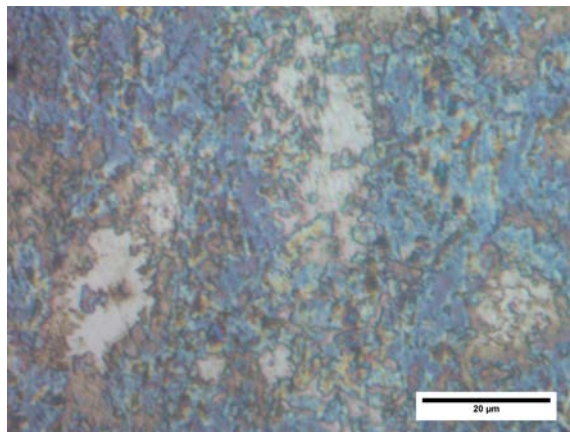
Na Figura 33 é mostrada a microestrutura de um aço multifásico, atacada com Metabissulfito de Sódio, cuja fase austenita retida revela uma tonalidade branca.

Figura 32 - Fotomicrografia de um ataque químico LePera, onde: Ferrita (azul esverdeada); Bainita (marrom) e Martensita e/ou Austenita Retida (branca).



Fonte: (FUKUGAUCHI, 2010).

Figura 33 - Fotomicrografia de um ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10%, onde: Austenita Retida apresenta uma tonalidade branca.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

2.2.3 Técnicas de microscopia óptica

Embora numerosas ferramentas eletrônicas sofisticadas estejam disponíveis para um pesquisador metalográfico, o microscópio óptico continua sendo um instrumento muito importante. Enquanto que o microscópio eletrônico de transmissão (MET) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) superaram duas das mais importantes limitações do microscópio óptico: a resolução e a profundidade de foco, eles não reduziram a importância do microscópio óptico. Além disso, as limitações do MET e do MEV são os pontos fortes do microscópio óptico e vice-versa, com isso, o microscópio óptico e eletrônico são técnicas complementares ao invés de competitivas (TOY, 1990).

O microscópio óptico tem numerosas aplicações. A aplicação mais importante é a determinação das fases estruturais presentes e a constituição do material (modo e maneira da distribuição das fases, composições e características). Estas observações são importantes porque a estrutura e a constituição têm uma forte influência no comportamento do material. Nestes estudos, a superfície de um material corretamente preparado é examinada antes ou depois do ataque, ou em ambas as condições.

A maioria dos estudos metalográficos utiliza a iluminação em campo claro para analisar as fotomicrografias de aços de fases complexas (CP) que foram atacados por um determinado reagente químico para caracterizar a microestrutura deste material. Juntamente com esta técnica, outras técnicas especiais como a iluminação em campo escuro; método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC) estão sendo aplicadas particularmente para a análise metalográfica.

Estas técnicas microscópicas produzem imagens que têm a resolução e o contraste necessário para a observação de detalhes estruturais. A técnica utilizada depende da natureza do problema, da habilidade do observador e do equipamento disponível. Os métodos microscópicos para aumento do contraste incluem os seguintes (BURGGRAAF, 1985):

- Iluminação em campo claro e campo escuro;
- Método de luz polarizada;
- Contraste por interferência diferencial (DIC).

Iluminação em campo claro:

Esta iluminação é mais comumente aplicada para analisarmos a microestrutura de um material, no caso de aços CP, é possível identificar as fases presentes neste material.

Este tipo de iluminação, às vezes pode ser chamado também de iluminação vertical, ou seja, a superfície da amostra é normal ao eixo óptico do microscópio, e a luz branca é usada. A palavra normal, na verdade se refere ao ângulo com que o feixe de luz incide sobre a amostra. Porém, no modo de iluminação de campo claro a luz viaja ao longo do eixo óptico, através da objetiva em direção à amostra que está sendo observada. A amostra então é vista pela luz que ela reflete (VANDER VOORT, 1984).

Para amostras essencialmente bidimensionais e que tenham características diferenciáveis pela refletividade, textura estrutural ou cor geralmente se utiliza a iluminação

em campo claro. É considerado um excelente modo para se examinar uma superfície polida. Filtros especiais são utilizados para abrandar a luz e aumentar o contraste (PIERCY, 1989).

A Figura 34, mostra uma micrografia de um aço ao carbono, podendo revelar microconstituintes com uma nitidez e contraste satisfatórios em iluminação em campo claro, a partir de uma superfície devidamente polida e plana.

Figura 34 - Fotomicrografia de um aço ao carbono. Ataque Nital 2%. Aumento de 200 X.



Fonte: (TOY, 1990).

Iluminação em campo escuro:

No modo de iluminação em campo escuro a luz é direcionada para o exterior do cone que a objetiva compreende para iluminar a lâmina obliquamente. Somente a luz que é refletida ou difratada pelas características da amostra entra na objetiva. Assim, a amostra aparece como um fundo preto com as características refletidas ou difratadas aparecendo com brilho (MASI, 1988).

A iluminação em campo escuro dá um contraste completamente reverso ao daquele obtido por iluminação em campo claro, ou seja, as características que são brilhantes no campo claro aparecerão escuras no campo escuro e as características que são escuras no campo escuro aparecerão brilhantes no campo claro.

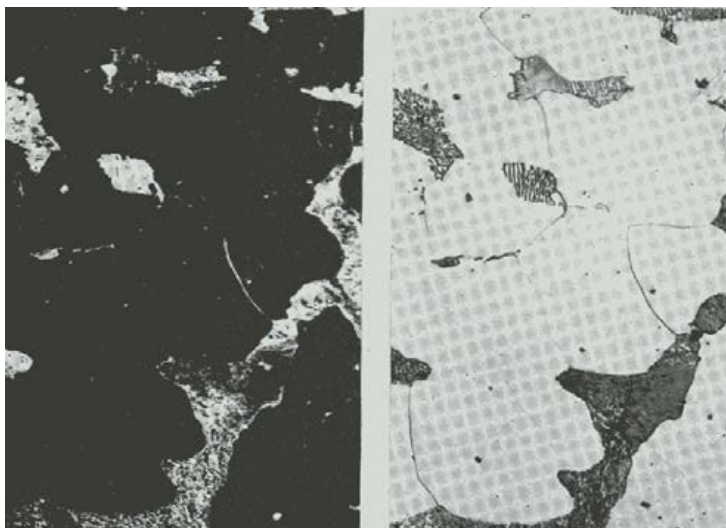
Aumenta a visibilidade de detalhes que são frequentemente ignorados pela iluminação em campo claro. Mesmo detalhes estruturais pequenos, que se encontram abaixo do limite de resolução da objetiva, são visíveis com campo escuro (BURGGRAAF, 1985).

A mesma resolução geralmente é obtida pelas duas técnicas, mas o que ocorre com mais frequência é que as características que apresentam um contraste mais “pobre” no campo claro terão seu contraste consideravelmente aumentado no campo escuro. A iluminação em campo escuro pode ser chamada de iluminação oblíqua, ou seja, é a luz projetada sobre o espécime de um ângulo inclinado para revelar características com contraste mais alto em comparação à visualização com iluminação em campo claro.

A microscopia de campo escuro é uma técnica excelente para uma varredura rápida, com um amplo campo de visão, para partículas, ranhuras ou resíduos químicos (MASI, 1988).

A Figura 35 mostra um exemplo de uma aplicação em um aço de baixo carbono utilizando-se as técnicas de iluminação em campo claro e campo escuro.

Figura 35 - Exemplo de uma aplicação de um aço de baixo carbono observada em (a) campo escuro e (b) campo claro. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.



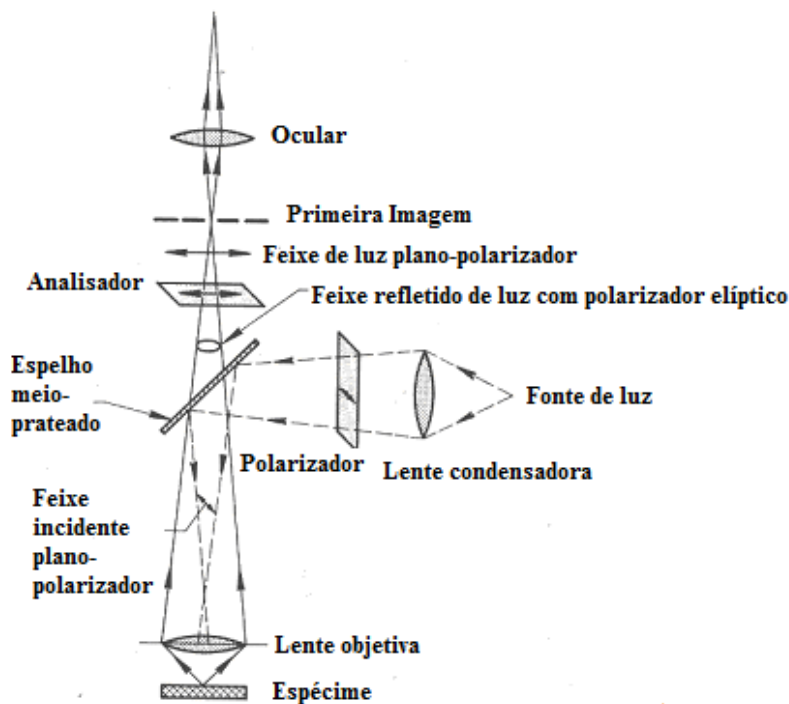
Fonte: (MASI, 1988).

Método de luz Polarizada:

A luz polarizada é particularmente utilizada em estudos metalográficos, pois muitos metais e fases metálicas e não-metálicas são opticamente anisotrópicos, ou seja, é o meio óptico no qual as propriedades ópticas variam na mesma direção cristalográfica. Gera um contraste colorido propiciando uma complementaridade na identificação das fases presentes na microestrutura.

É obtida colocando-se um polarizador na frente das lentes condensadoras do microscópio e um analisador atrás da ocular, como mostra a Figura 36. Usando-se este arranjo, a amostra é iluminada pela luz plano-polarizada (ROHDE, 2010).

Figura 36 - Componentes básicos de um microscópio óptico utilizando luz polarizada.



Fonte: (ROHDE, 2010).

Quando esta luz é refletida por uma superfície isotrópica, ela se torna plano-polarizada e é completamente extinguida quando o analisador é rodado. Por outro lado, a luz que é refletida por uma superfície anisotrópica tem uma componente que é perpendicular ao plano de polarização da luz incidente, e assim a imagem não será extinta quando o analisador é girado, mas ocorrem mudanças alternadamente de escuro para claro sempre que se tem 90° de rotação. Isto ocorre porque as propriedades ópticas dos materiais anisotrópicos variam com a direção cristalográfica (ROHDE, 2010).

A luz polarizada é interessante na metalografia para revelação de estrutura granular e maclas em metais anisotrópicos e ligas para identificação de fases anisotrópicas e inclusões. Também é usada para observação direta de transformação de fase em ligas nas quais uma ou mais fases são anisotrópicas (VANDER VOORT, 1984).

Contraste por interferência diferencial (DIC):

Com o sistema de contraste por interferência diferencial (DIC) pode-se observar pequenas variações no relevo ou topografia na superfície da amostra.

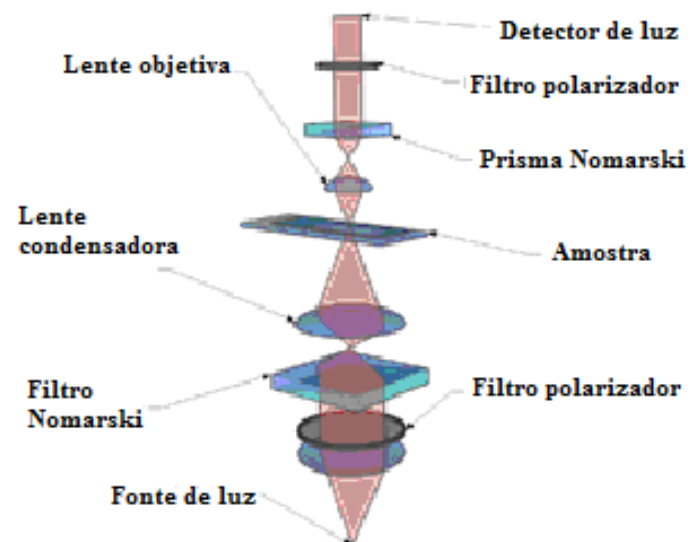
A microscopia que utiliza o contraste por interferência diferencial revela diferenças nos feixes refletidos de luz polarizada separada por um prisma. Pode ser visto um efeito tridimensional sobre a reflexão da amostra. Em adição, devido à diferença nos caminhos ópticos, uma amostra vista com microscopia de interferência frequentemente aparece colorida pelo sistema óptico (MASI, 1988).

Em outras palavras, a diferença de fase dos feixes de luz está usualmente associada com a topologia da lâmina. Assim, a microscopia de interferência revela, em uma visão parecida com a tridimensional, detalhes na superfície da lâmina tais como buracos, fissuras e falhas, que são comumente invisíveis na iluminação comum de luz refletida (PIERCY, 1989).

As opções de iluminação em campo escuro e em campo claro geralmente combinadas com o modo de interferência diferencial são usualmente disponíveis no mesmo microscópio e um operador pode facilmente trocar um pelo outro. Além disso, tem-se a possibilidade de escolha entre luz incidente ou transmitida.

A Figura 37, mostra os componentes básicos de um microscópio óptico utilizando contraste por interferência diferencial. A luz polarizada introduz o filtro ou prisma Nomarski e é separada em dois raios polarizados em 90° para uns com os outros. O filtro Nomarski faz com que os dois raios cheguem a um ponto focal fora do corpo do prisma e permita uma maior flexibilidade ao configurar o microscópio óptico, ou seja, o prisma ou filtro pode ser ativamente focado. Com isso, os dois raios concentram-se para passagem por meio da amostra (ROHDE, 2010).

Figura 37 - Componentes básicos de um microscópio utilizando contraste por interferência diferencial (DIC).



Fonte: (ROHDE, 2010).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material

O material utilizado neste trabalho foi um aço de fases complexas (também chamado de CP - *Complex Phase*), mais comumente da classe CPW-800. Caracterizado como um aço de baixo carbono e baixa liga, com microestrutura multifásica. Ele apresenta um limite de escoamento elevado entre 600 e 720 MPa e limite de resistência à tração entre 800 e 950 MPa. Mais comumente utilizado para a produção de peças com baixo peso, por conformação a frio e sujeitas à grande impacto. Suas principais aplicações estão destinadas à indústria automobilística.

Este material foi cedido por uma indústria automobilística ao Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP, Campus de Guaratinguetá, e sua composição química é dada na Tabela 3:

Tabela 3 - Composição química do aço CPW-800 (Renault, 2009).

| Elementos de Liga | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | Cu | Ti | V | Nb | Sn | B |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|---|
| % em Peso | 0,120 | 0,560 | 1,570 | 0,013 | 0,006 | 0,003 | 0,018 | 0,005 | 0,034 | 0,000 | 0,096 | 0,005 | < | 0,000 | < |

3.2 Caracterização Microestrutural

Para caracterizar a microestrutura do aço de fases complexas (CP) foram utilizadas outras técnicas de microscopia óptica como iluminação em campo escuro, método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC), além da técnica mais clássica que é a iluminação em campo claro. As técnicas de microscopia óptica foram executadas a partir de

técnicas metalográficas para a preparação das amostras e com a utilização de ataques químicos.

3.2.1 Técnicas de metalografia

As técnicas de metalografia utilizadas na preparação das amostras foram às seguintes: seccionamento ou corte; embutimento; marcação ou identificação; lixamento e polimento.

3.2.1.1 Seccionamento ou corte

Com relação a este trabalho, as amostras foram extraídas de uma chapa plana do aço CPW-800, com espessura de 2,3 mm. Foram cortadas com o auxílio de uma máquina de corte por serra de fita vertical, modelo RMF 400-S, fabricada pela ROMARFRA, do Laboratório de Usinagem do DMT/FEG/UNESP como mostrado na Figura 38.

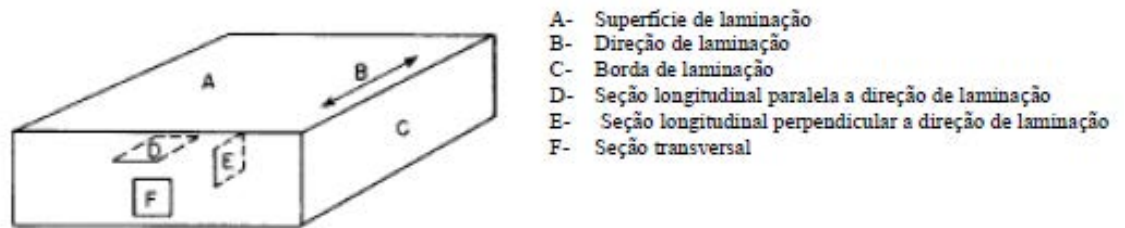
Figura 38 - Máquina de corte por serra de fita vertical.



Fonte: (DMT/FEG/UNESP).

Foram extraídas amostras em três sentidos diferentes, tais como, seção longitudinal paralela a direção de laminação (Item D); seção longitudinal perpendicular a direção de laminação (Item E) e seção transversal (Item F), como mostrado na Figura 39:

Figura 39 - Nomenclatura das localizações de corte das amostras.



Fonte: (ASTM E3-01, 2007).

Utilizou-se este serramento com serra por fita, pois este processo não gera calor suficiente para mudar a microestrutura do aço CP.

3.2.1.2 Embutimento

O embutimento a quente foi realizado na embutidora a quente do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Embutidora a quente.



Fonte: (DMT/FEG/UNESP).

Utilizou-se resina fenólica também chamada de baquelite fornecida pela AROTEC Indústria e Comércio. O tempo aproximado do processo completo de embutimento a quente foi de trinta minutos.

3.2.1.3 Marcação ou identificação

Principalmente na preparação de amostras em maior número e em séries, é importante por motivos óbvios uma identificação clara das mesmas; de um modo geral, o gravador elétrico vibrador, com ponta de metal duro, é a melhor escolha produzindo marcações com as propriedades desejáveis. Aconselha-se para qualquer marcação que possa produzir rebarbas, eliminar as mesmas por lixamento posterior conforme mostrado na Figura 41. As amostras foram identificadas quanto à seção das quais foram obtidas, seguidas de uma numeração seqüencial, como por exemplo, para o sentido transversal à laminação (T1, T2, T3, T4, T5); para o sentido longitudinal paralelo à laminação (L1, L2, L3, L4, L5) e para o sentido perpendicular ou superficial à laminação (S1, S2, S3, S4, S5).

Figura 41 - Marcação e identificação das amostras utilizando gravador elétrico vibrador.



Fonte: (FUKUGAUCHI, 2010).

3.2.1.4 Lixamento

A técnica do lixamento consistiu em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção 90° em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

Foram utilizadas lixas d'água com diferentes granulometrias, tais como # 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh respectivamente.

O processo de lixamento deste trabalho foi realizado em uma lixadeira manual para metalografia STRUERS, no DMT/FEG/UNESP como mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Lixadeira manual para metalografia STRUERS.



Fonte: (DMT/FEG/UNESP).

Para cada interrupção do processo de lixamento, foi feita uma limpeza das amostras em água corrente e elas foram secas por meio de ar frio forçado.

A avaliação qualitativa da superfície lixada foi controlada por meio de um estereomicroscópio STEMI 2000 – ZEISS como mostrado na Figura 43, com ampliação de 50X.

Figura 43 - Estereomicroscópio STEMI 2000 – ZEISS.



Fonte: (DMT/FEG/UNESP).

3.2.1.5 Polimento

O polimento foi feito manualmente na POLITRIZ AP10 PANAMBRA como mostrado na Figura 44, com uma rotação de 150 rpm.

Figura 44 - O polimento foi feito na POLITRIZ AP10 PANAMBRA.



Fonte: (DMT/FEG/UNESP).

Utilizou-se pano para polimento OP-NAP e a mistura de água destilada e suspensão de sílica coloidal para materiais ferrosos, essa sílica é chamada de OP-U Suspension ($0,25\mu\text{m}$), ambos fabricados pela STRUERS. Para melhoria do processo e melhor deslizamento das amostras à superfície do pano de polimento. O giro da amostra com relação ao disco de polimento foi feito no sentido anti-horário.

A avaliação qualitativa da superfície polida foi controlada com auxílio do microscópio óptico de bancada STEMI 2000 - ZEISS, com o objetivo de uma superfície plana e sem riscos. A limpeza das amostras foi feita com água destilada e foram secas com ar frio forçado.

3.2.2 Ataque Químico

Foram realizadas algumas técnicas de ataques químicos para caracterizar a microestrutura do aço CP.

Utilizou-se dois métodos de ataque químico: imersão e esfregamento.

O método de esfregamento foi feito utilizando-se uma determinada solução que foi atacada, embebida em um chumaço de algodão, passando lentamente sobre a superfície da amostra e da maneira mais uniforme possível.

O método de imersão foi feito mergulhando-se a amostra numa determinada solução com a face voltada para baixo, tomando o devido cuidado de não encostá-la no fundo do recipiente.

Após os ataques químicos, as amostras foram lavadas em água corrente e secas por meio de ar frio forçado e naturalmente.

Os métodos de secagem das amostras foram realizados da seguinte maneira: utilizando-se ar frio forçado próximo da superfície da amostra, ou seja, a uma distância de aproximadamente 10 cm da superfície da amostra; utilizando-se ar frio forçado, com o secador a uma distância de aproximadamente 40 cm da superfície da amostra e sem a utilização do secador, ou seja, naturalmente (ao ar).

A amostra que foi seca naturalmente foi lavada em água corrente e depois colocada para secar na posição vertical até que secasse totalmente.

Foram utilizados três tipos de reagentes químicos tais como, Nital (2% e 3%), Metabissulfito de Sódio 10% e LePera.

- Nital 2%: A proporção utilizada na preparação deste reagente químico foi de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico.

- Nital 3%: Ele não ataca a fase ferrita e a austenita retida, tornando-as com tonalidade clara e gera um contraste das fases bainita e martensita, tornando-as com tonalidade escura. A proporção utilizada na preparação deste reagente químico foi de 3% de ácido nítrico e 97% de álcool etílico.

- Metabissulfito de Sódio 10%: O ataque químico com metabissulfito de sódio não ataca a fase austenita retida que aparece em tonalidade branca. O ataque à base de metabissulfito de sódio é feito com 10% de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ diluído em água destilada.

- LePera: O ataque químico LePera não ataca as fases austenita retida e/ou martensita. A proporção utilizada na preparação do reagente químico LePera é composta de uma mistura,

em partes iguais, ou seja, 1:1, de duas soluções. A primeira solução é de 1% de metabissulfito de sódio diluído em água destilada e a segunda solução é de 4% de ácido pícrico diluído em álcool etílico.

3.2.3 Técnicas de microscopia óptica

A obtenção das fotomicrografias para a identificação das fases foi realizada no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMAT) do Departamento de Materiais e Tecnologia - FEG/UNESP. Os campos foram fotografados em iluminação em campo claro, iluminação em campo escuro, método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC) utilizando um microscópio óptico NIKON MODELO EPIPHOT 200, acoplado a um PC e a uma câmera digital AXIO CAM 1CC3 ZEISS, usando-se o software AXIO VISIO – ZEISS.

Após cada ataque químico foram fotografados:

Iluminação em campo claro:

- 20 campos para uma ampliação de 1000X;
- 20 campos para uma ampliação de 500X;
- 20 campos para uma ampliação de 200X.

Iluminação em campo escuro:

- 20 campos para uma ampliação de 1000X;
- 20 campos para uma ampliação de 500X;
- 20 campos para uma ampliação de 200X.

Método de luz polarizada:

- 10 campos para uma ampliação de 1000X;
- 10 campos para uma ampliação de 500X;
- 10 campos para uma ampliação de 200X.

Variando-se as tonalidades como vermelho, laranja, verde, azul e amarelo.

Contraste por interferência diferencial (DIC):

- 10 campos para uma ampliação de 1000X;
- 10 campos para uma ampliação de 500X;
- 10 campos para uma ampliação de 200X.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

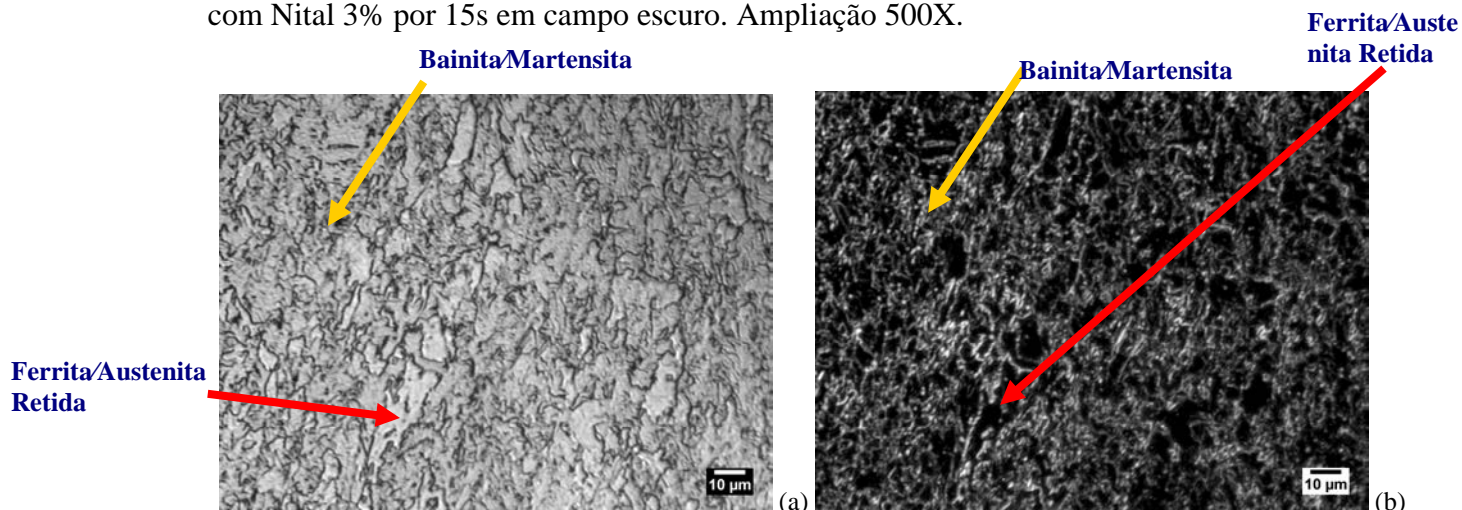
A análise metalográfica para caracterizar a microestrutura do material mostrou ter eficiência tanto de maneira qualitativa como quantitativa, pois a partir das fotomicrografias obtidas por microscopia óptica, não houve nenhuma deformação e risco na superfície da amostra.

4.1. Técnica Qualitativa:

Nesta primeira etapa foram apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho, sob um aspecto qualitativo, referente à identificação das fases presentes no aço de fases complexas.

Na Figura 45(a), a amostra foi atacada com Nital 3%, utilizando-se o método de ataque por esfregamento, por um tempo de 15s, no sentido longitudinal paralelo à laminação e seca ao ar frio forçado a uma distância de aproximadamente 10cm da superfície da amostra, onde se evidenciou duas tonalidades das fases presentes, uma mais clara e uma mais escura. Para a iluminação em campo claro, a mais clara corresponde à fase ferrita e austenita retida, enquanto a mais escura corresponde à martensita e bainita. Foi possível delinear os contornos de grãos, os quais para o aço de fases complexas são mais refinados. Na Figura 45(b), a amostra foi atacada também utilizando-se o método de ataque por esfregamento com o reagente químico Nital 3% em iluminação em campo escuro, pode-se observar o inverso das tonalidades das fases presentes. A mais escura corresponde à fase ferrita e austenita retida enquanto a mais clara corresponde à fase martensita e bainita. Pode-se observar contornos de grãos bem definidos e homogêneos.

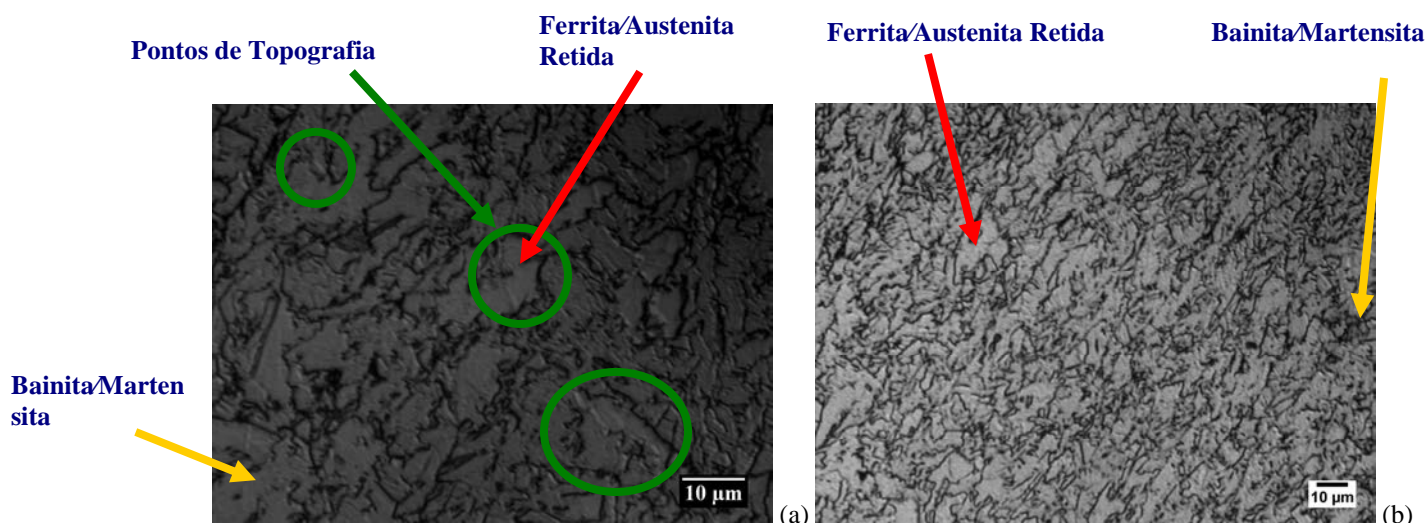
Figura 45 - (a) Ataque com Nital 3% por 15s em campo claro. Ampliação 500X. (b) Ataque com Nital 3% por 15s em campo escuro. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 46(a), a amostra foi atacada por esfregamento com Nital 3% por 15s, usando o contraste por interferência diferencial (DIC), pode-se observar pequenas diferenças de topografia ou de altura na superfície da amostra. Foi possível definir os contornos de grãos, os quais são homogêneos e refinados. Destacou-se a fase ferrita e austenita retida nos pontos de topografia e a fase bainita e martensita nos pontos que não há topografia (ROHDE, 2010). Na Figura 46(b), a amostra foi atacada com o reagente químico Nital 3%, usando o método de luz polarizada, identificou-se tonalidades de cinza, em que o cinza mais claro representa à fase ferrita e austenita retida e o cinza mais escuro representa à fase bainita e martensita. Foi possível observar grãos mais refinados, característica do aço de fases complexas.

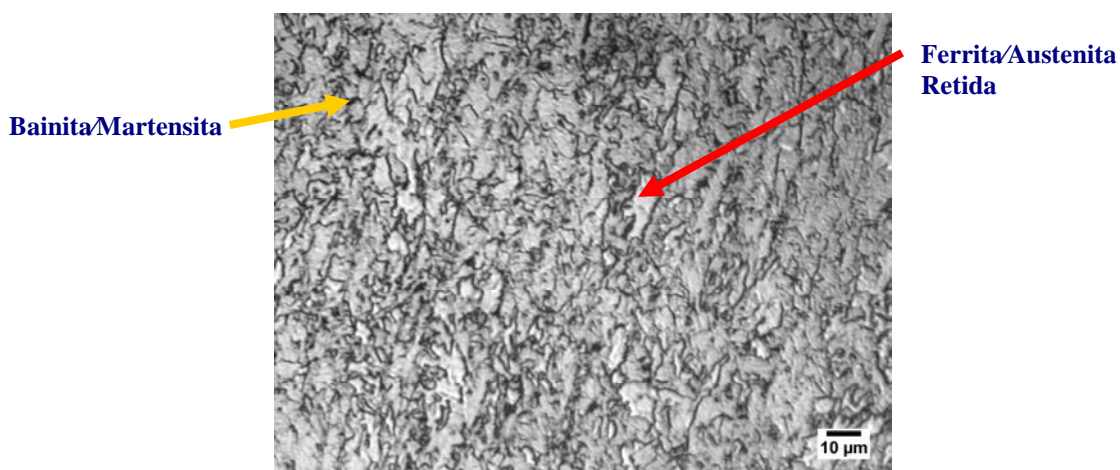
Figura 46 - (a) Fotomicrografia de DIC após ataque com Nital 3% por 15s. Ampliação 1000X. (b) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com Nital 3% por 15s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

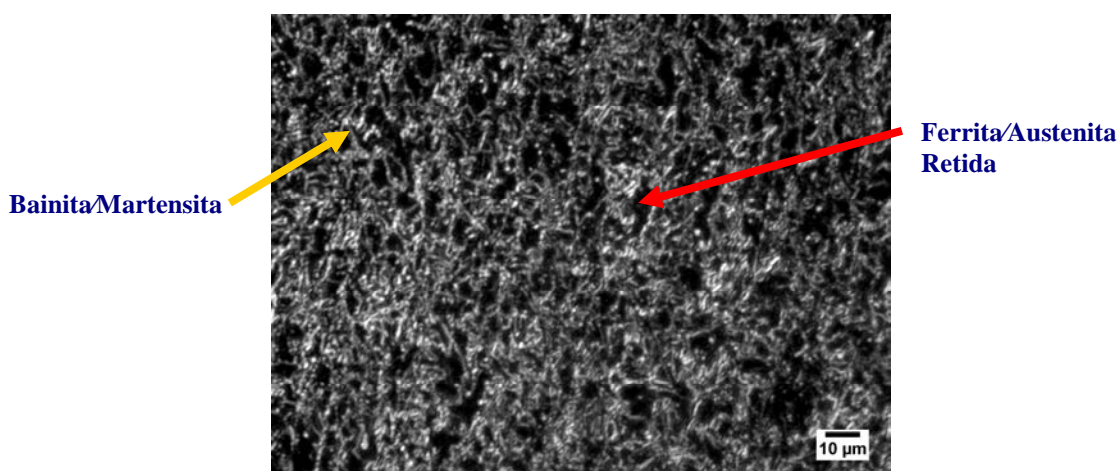
A Figura 47(a), utilizando técnica de iluminação de campo claro, no sentido longitudinal paralelo à laminação, e na Figura 47(b), em iluminação em campo escuro, estão representadas as amostras deste ataque. Para a fotomicrografia com iluminação em campo claro, as fases ferrítica e austenítica são as fases mais claras, e a mais escura corresponde à fase martensita e bainita. A fotomicrografia em campo escuro promove um efeito reverso à técnica de campo claro. Desta maneira, na Figura 47(b), martensita e bainita, estão contidas na fase mais clara, enquanto a fase mais escura é a fase ferrita e austenita retida, notando-se o inverso das tonalidades das fases.

Figura 47 – (a) Imagem em campo claro após ataque com Nital 3%. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Figura 47 – (b) Imagem em campo escuro após ataque com Nital 3%. Ampliação 500X.

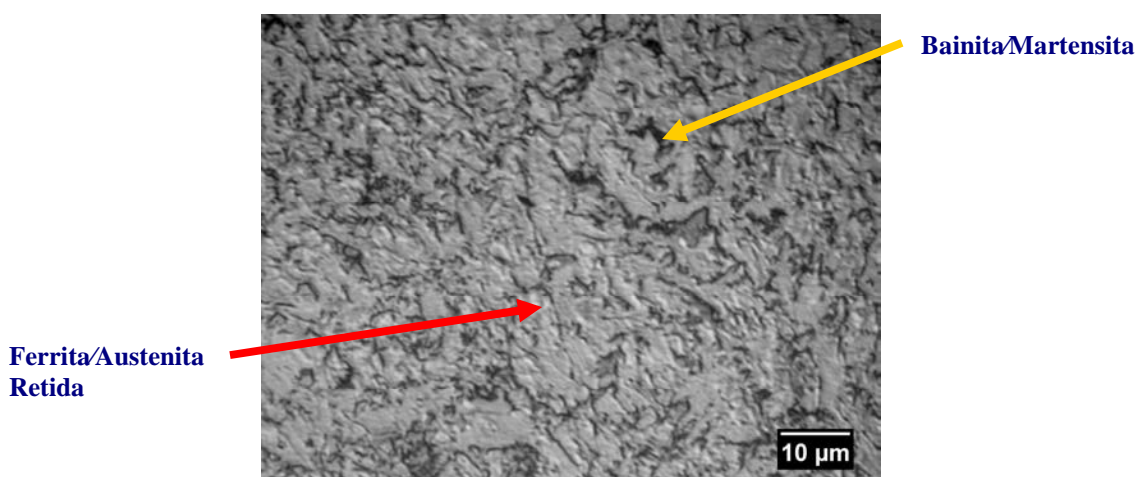


Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 48(a), observou-se a microestrutura da amostra do aço de fases complexas, no sentido superficial ou longitudinal perpendicular à laminação, submetida a ataque químico

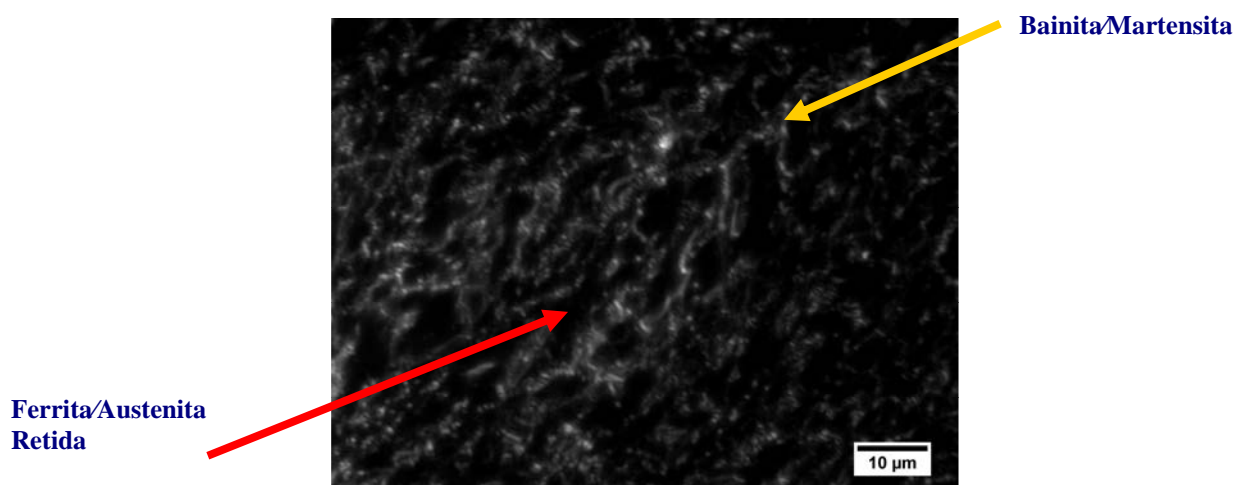
com Nital 2% por um tempo de 15s e seca com ar frio forçado a uma distância aproximadamente 10cm da superfície da amostra. Foi possível observar os contornos de grão delineados bem como identificar a fase ferrita e austenita retida como fase clara e a fase bainita e martensita como fase escura, por meio da iluminação em campo claro. Na Figura 48(b), foi feito um ataque com Nital 2% por um tempo de 15s e seca com ar frio forçado próximo da superfície da amostra. Pode-se observar a fase ferrita e austenita retida com tonalidade escura e a fase bainita e martensita com tonalidade clara, bem como identificar os contornos de grãos homogêneos.

Figura 48 – (a) Ataque com Nital 2% durante 15s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

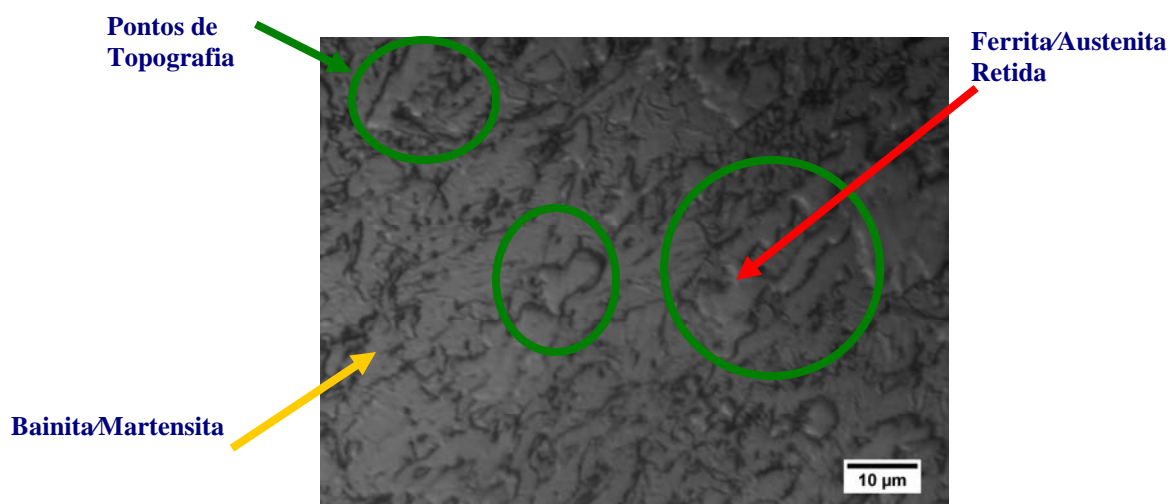
Figura 48 – (b) Ataque com Nital 2% durante 15s em iluminação em campo escuro. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

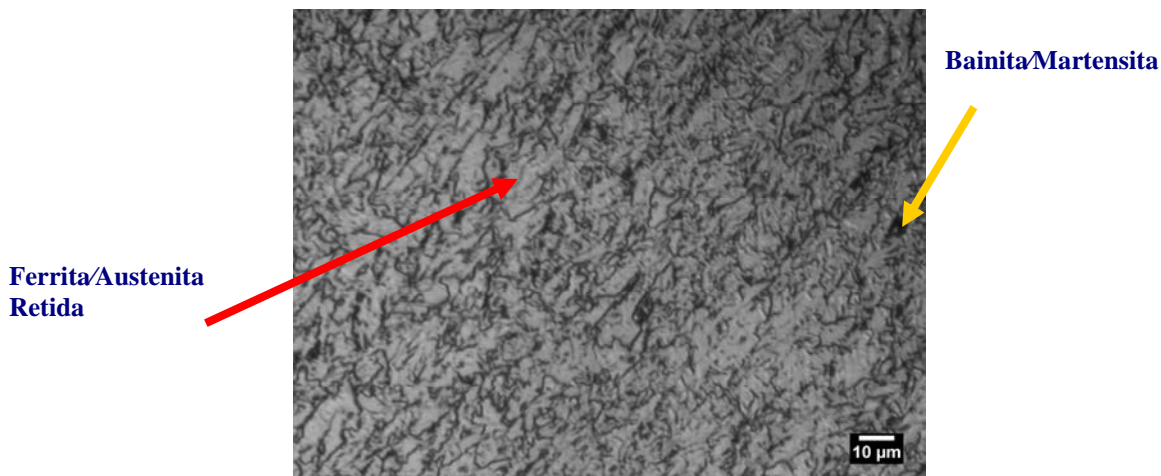
Na Figura 48(c), a amostra foi atacada por esfregamento com o reagente Nital 2% por um tempo de 15s, no sentido superficial à laminação, utilizando-se a técnica de contraste por interferência diferencial (DIC), em que observou-se pontos de topografia e altura na superfície da amostra. Pode-se destacar a fase ferrita e austenita retida nos pontos de topografia e a fase bainita e martensita onde não há pontos de topografia (ROHDE, 2010). Na Figura 48(d), pode-se observar a microestrutura do aço de fases complexas, em que a amostra foi submetida por ataque com o reagente Nital 2% por um tempo de 15s e seca com ar frio próximo da superfície da amostra, utilizando-se o método de luz polarizada, em que a fase ferrita e austenita retida é a fase cinza claro e a fase bainita e martensita é a fase cinza escuro, devido a um contraste maior de tons de cinza. Identificou-se contornos de grãos mais refinados e homogêneos.

Figura 48 – (c) Fotomicrografia de DIC após ataque com Nital 2% por 15s. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

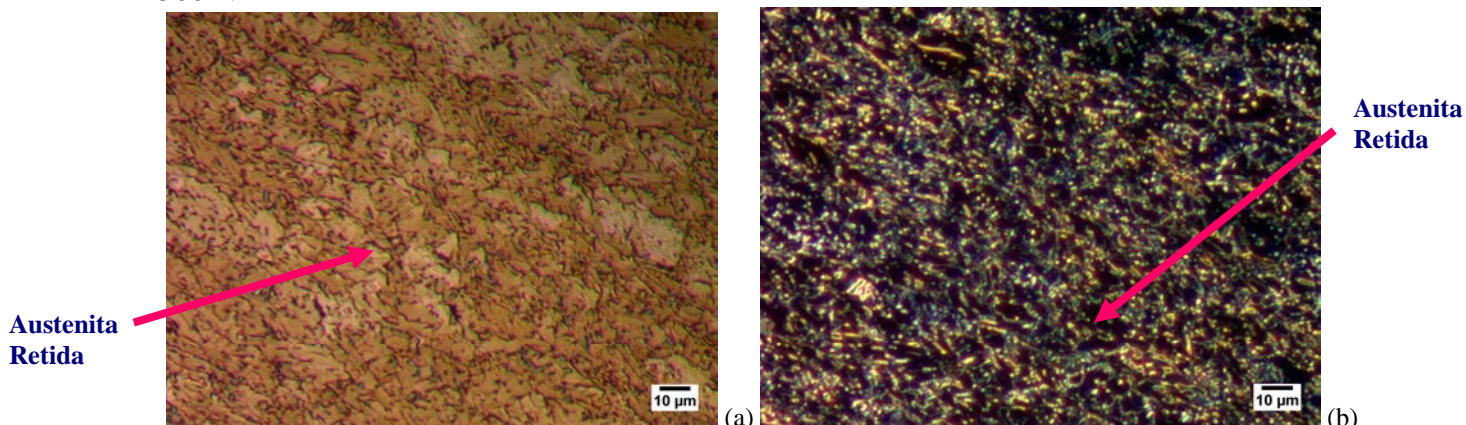
Figura 48 – (d) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com Nital 2% por 15s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 49(a), a amostra foi atacada utilizando-se o método de ataque por imersão, no caso Metabissulfito de Sódio 10%, por um tempo de 25s, no sentido longitudinal paralelo à laminação em iluminação em campo claro e seca ao ar frio forçado a uma distância de aproximadamente 40 cm da superfície da amostra. O filme formado neste caso, apesar de ter sido homogêneo em toda a superfície da amostra, só foi suficiente para delinear algumas fases presentes. Pode-se identificar a fase austenita retida caracterizada pelas regiões brancas. Na Figura 49(b), a amostra foi atacada por imersão com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s em iluminação em campo escuro, pode-se evidenciar o contraste reverso da iluminação em campo claro, ou seja, a fase austenita retida foi caracterizada pelas regiões pretas.

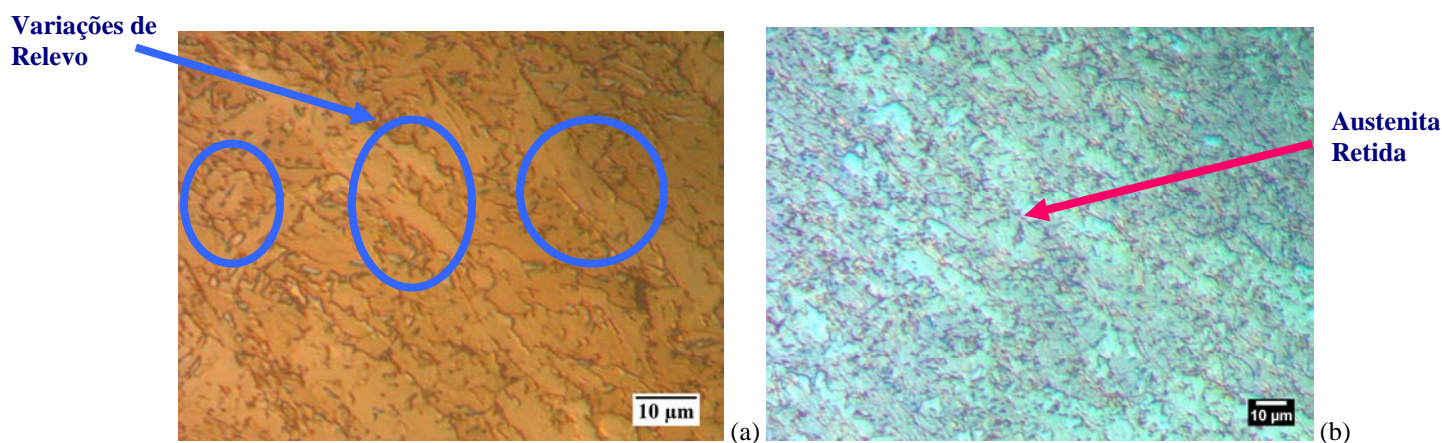
Figura 49 - (a) Ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s em campo claro. Ampliação 500X. (b) Ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s em campo escuro. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 50(a), a amostra foi atacada por imersão com o reagente Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s, através do uso do filtro Nomarski para o contraste por interferência diferencial, pode-se observar pequenas variações de relevo na superfície da amostra que está devidamente plana através dos processos de lixamento e de polimento. Na Figura 50(b), a amostra foi atacada com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10%, usando o método de luz polarizada, evidenciou-se a fase austenita retida como azul claro devido às variações de cores. Pode-se observar a homogeneidade do filme formado na superfície da amostra e os contornos de grãos mais refinados e complexos.

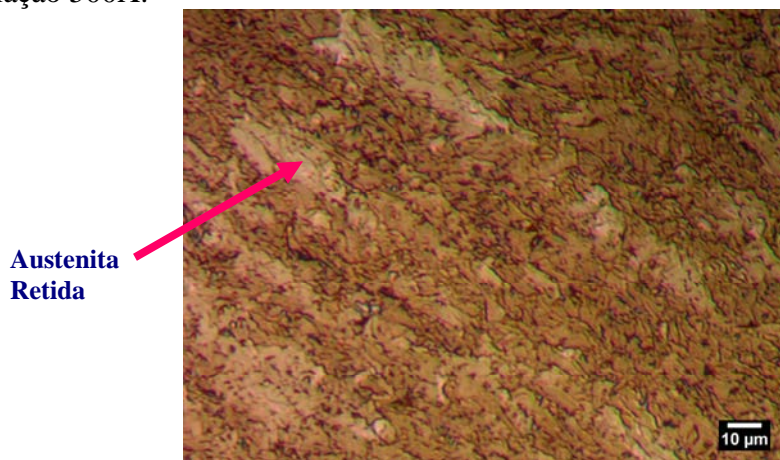
Figura 50 – (a) Fotomicrografia de DIC após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s. Ampliação 1000X. (b) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por 25s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

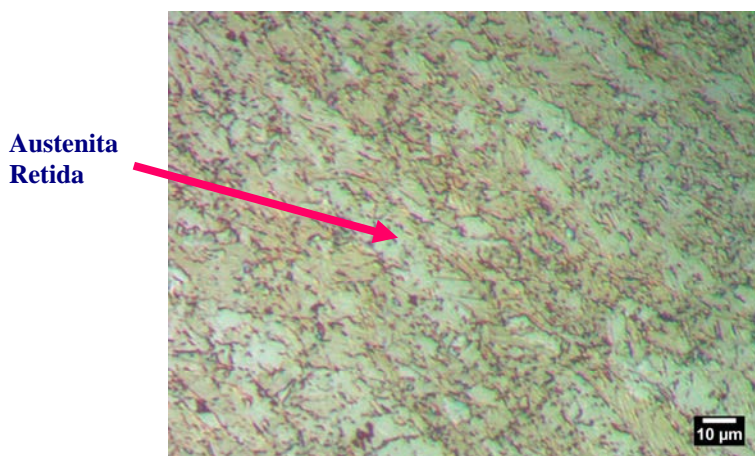
Na Figura 51(a), por iluminação de campo claro, no sentido longitudinal paralelo à laminação, a austenita retida é identificada pelas regiões brancas. Na Figura 51(b), a fotomicrografia da amostra atacada com Metabissulfito de Sódio 10% é feita com o método de luz polarizada, que gerando um contraste colorido, diferenciou em tons de verde claro a austenita retida.

Figura 51 - (a) Fotomicrografia em campo claro após ataque com Metabissulfito de Sódio 10%. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Figura 51 - (b) Fotomicrografia em luz polarizada após ataque com Metabissulfito de Sódio 10%. Ampliação 500X.



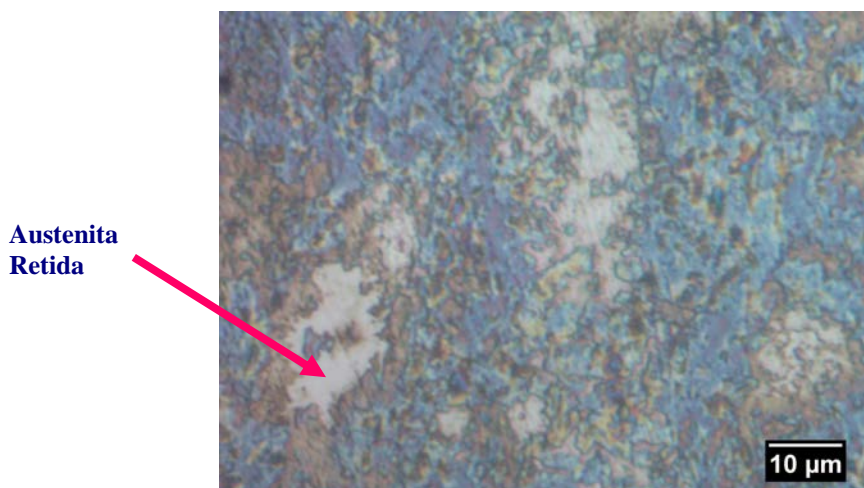
Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Os ataques com os reagentes químicos Metabissulfito de Sódio 10% e LePera foram feitos utilizando a técnica de aplicação por imersão, pois estes ataques depositam um filme de natureza frágil na superfície da amostra.

Na Figura 52, pode-se observar a microestrutura do aço CP, no sentido transversal à laminação, submetida a ataque químico com Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 20s e seca com ar frio forçado a uma distância aproximadamente 40cm da superfície da amostra, devido ao filme de natureza frágil que é depositado na superfície da amostra, através da iluminação em campo claro. Observou-se a presença dos contornos de grão bem definidos,

destacando a fase austenita retida como fase clara. O filme na superfície da amostra foi homogêneo, possibilitando um contraste e uma nitidez satisfatória.

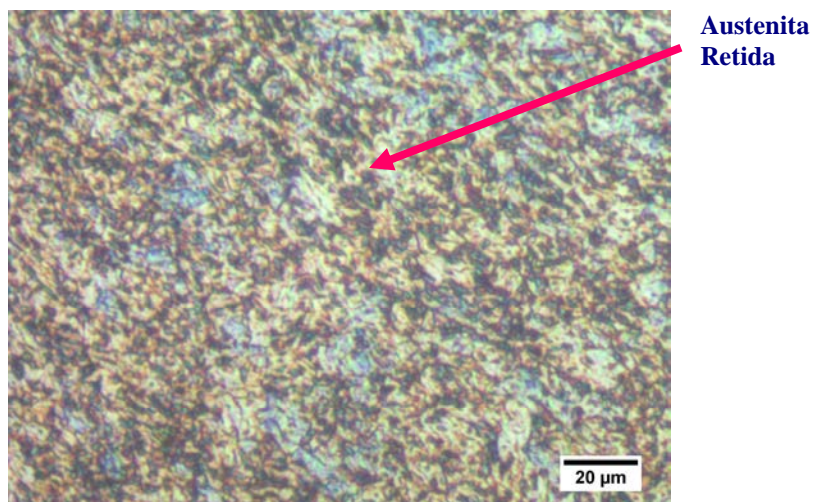
Figura 52 - Ataque com Metabissulfito de Sódio 10% durante 20s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 53, primeiramente foi feito um pré-ataque utilizando-se o reagente Nital 2%, utilizando-se o método de ataque por esfregamento, por um tempo de 7s, no sentido transversal à laminação. Posteriormente, a amostra foi atacada com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10 %, utilizando-se o método de ataque por imersão, por um tempo de exposição de 25s, seca naturalmente, em iluminação em campo claro. Pode-se observar contornos de grãos mais homogêneos. Houve um contraste de cores maior, pode-se identificar tons mais azulados. Porém, a fase austenita retida foi identificada com coloração branca, com isso, o objetivo deste ataque químico com Metabissulfito de Sódio 10% junto de um pré-ataque com o reagente químico Nital 2% foi satisfatório.

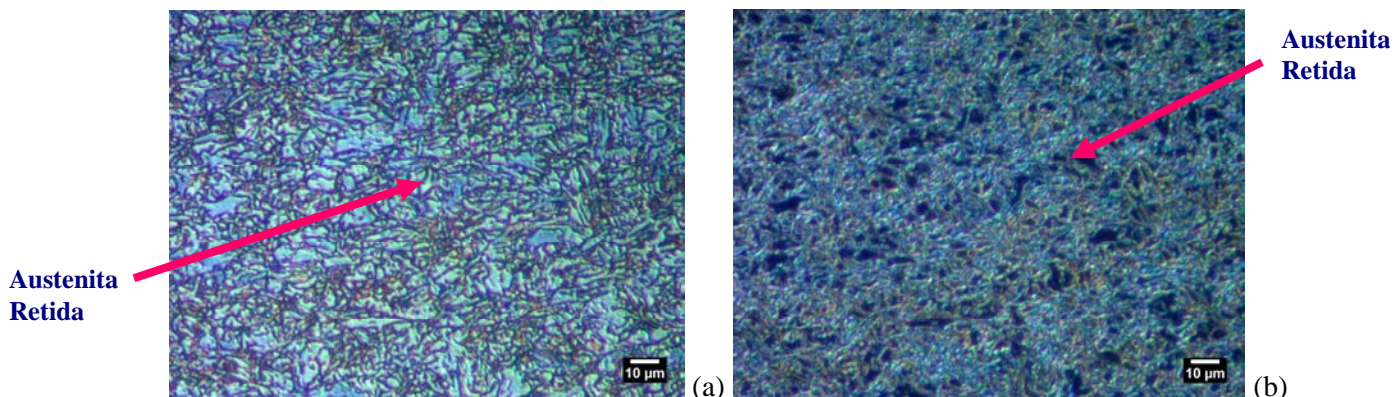
Figura 53 - Pré-ataque com Nital 2% seguido de um ataque com Metabissulfito de Sódio 10% em iluminação em campo claro. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 54(a), observou-se a microestrutura de um aço Complex Phase, onde uma amostra foi atacada com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10%, feito utilizando-se o método de ataque por imersão, por um tempo de exposição de 25s, seca naturalmente, no sentido transversal à laminação, com a técnica de microscopia óptica chamada iluminação em campo claro. Com este ataque químico e devido a este tempo de 25s foi possível observar um contraste de cores maior, ou seja, apresentou algumas tonalidades diferentes de cores, porém, pode-se dizer que o resultado obtido é satisfatório, pois com ele foi identificada a fase austenita retida como fase clara, ou seja, a austenita retida não é atacada. Os contornos de grãos são mais refinados e complexos. Na Figura 54(b), a amostra foi submetida a um ataque químico com o reagente Metabissulfito de Sódio 10%, por um tempo de exposição de 25s, seca naturalmente e utilizando a iluminação em campo escuro. Foi observado o inverso da microestrutura em iluminação em campo claro, com isso, identificou-se a fase austenita retida como fase escura, o que é previsto quando se utiliza a iluminação em campo escuro. Observou-se contornos de grãos mais refinados e um contraste e uma nitidez satisfatórios.

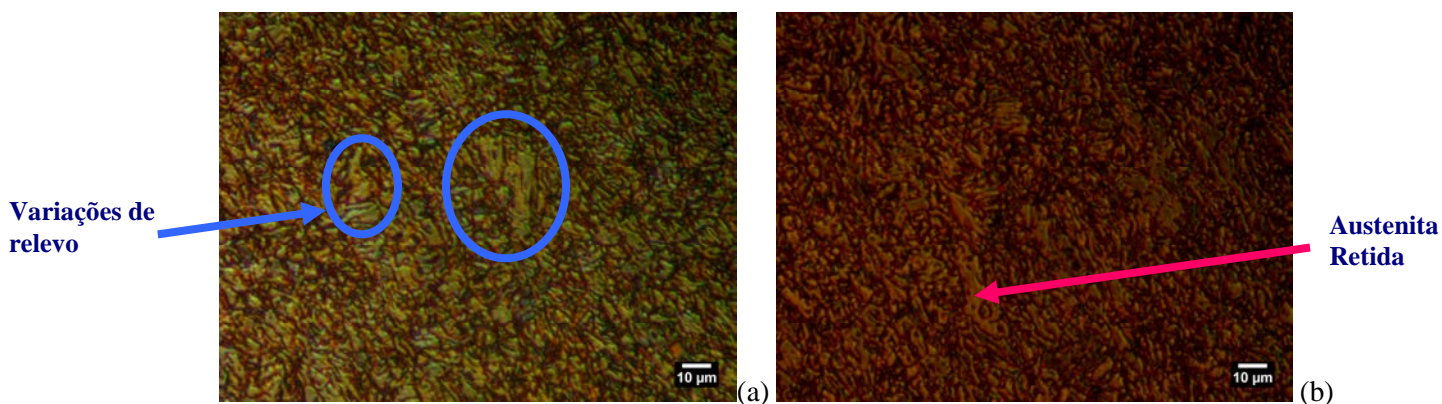
Figura 54 - (a) Fotomicrografia com ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s em iluminação em campo claro. Ampliação 500X. (b) Fotomicrografia com ataque químico de Metabissulfito de Sódio 10% por um tempo de 25s em iluminação em campo escuro. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 55(a), a amostra foi atacada com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10%, por um tempo de exposição de 25s, seca naturalmente, no sentido transversal à laminação. Utilizando a técnica de microscopia óptica chamada contraste por interferência diferencial, com o uso de um filtro chamado Nomarski, pode-se observar variações de relevo na superfície da amostra, apesar de estar numa ampliação menor (500X), podendo ser melhor a visualização numa ampliação de 1000X, por essa microestrutura ser bem refinada. Na Figura 55(b), a amostra foi submetida a um ataque com o reagente químico Metabissulfito de Sódio 10%, usando outra técnica de microscopia óptica chamada de luz polarizada, a qual foi evidenciada a fase austenita retida como laranja claro devido às variações de cores. Foi possível observar a homogeneidade do filme formado na superfície da amostra e os contornos de grãos mais refinados e complexos.

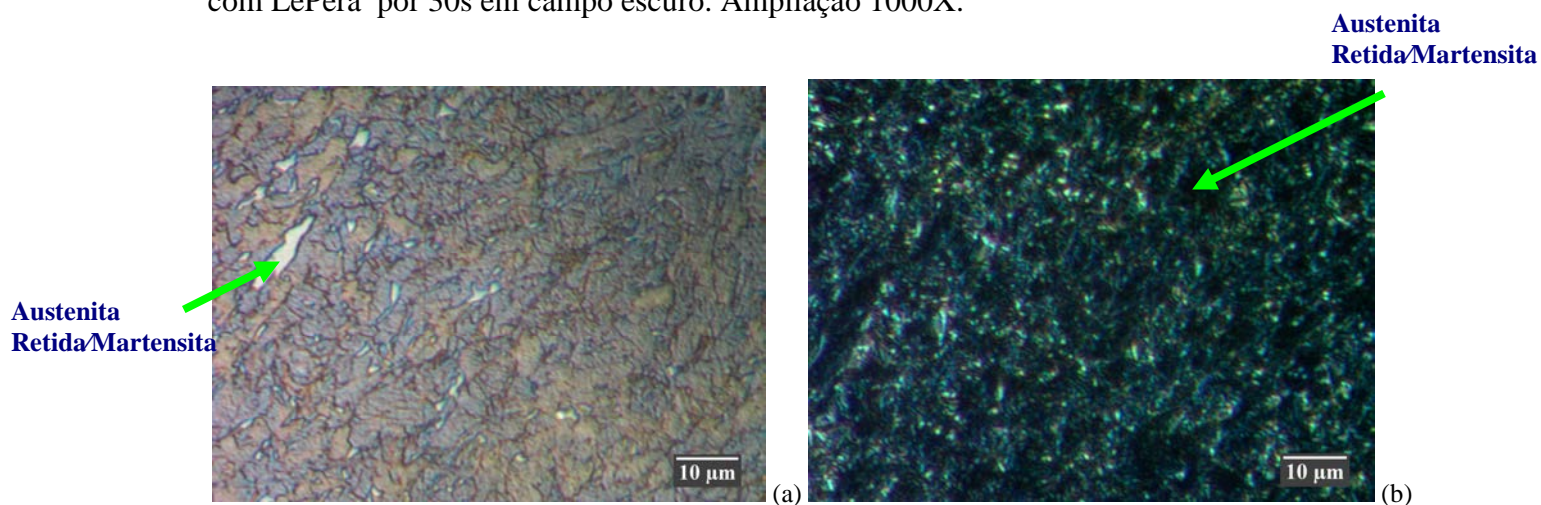
Figura 55 - (a) Fotomicrografia de DIC após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por um tempo de 25s. Ampliação 500X. (b) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com Metabissulfito de sódio 10% por um tempo de 25s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 56(a), a amostra do aço CP foi submetida a um ataque químico com o reagente LePera, utilizando-se o método de ataque por imersão por um tempo de 30s, no sentido longitudinal paralelo à laminação em iluminação em campo claro e seca naturalmente. Ela apresentou uma melhor nitidez e tonalidades mais contrastadas. É possível visualizar a existência de colorações diferentes das fases presentes, com isso, pode-se observar a homogeneidade do filme. As fases contendo martensita e austenita retida não podem ser diferenciadas facilmente, pois aparecem em tom de branco. Na Figura 56(b), a amostra que foi atacada com o reagente LePera em iluminação em campo escuro, destacou o contrário da iluminação em campo claro, ou seja, as fases martensita e austenita retida aparecem em tom de preto, não podendo ser diferenciadas facilmente. Pode-se observar que o filme na superfície da amostra é homogêneo.

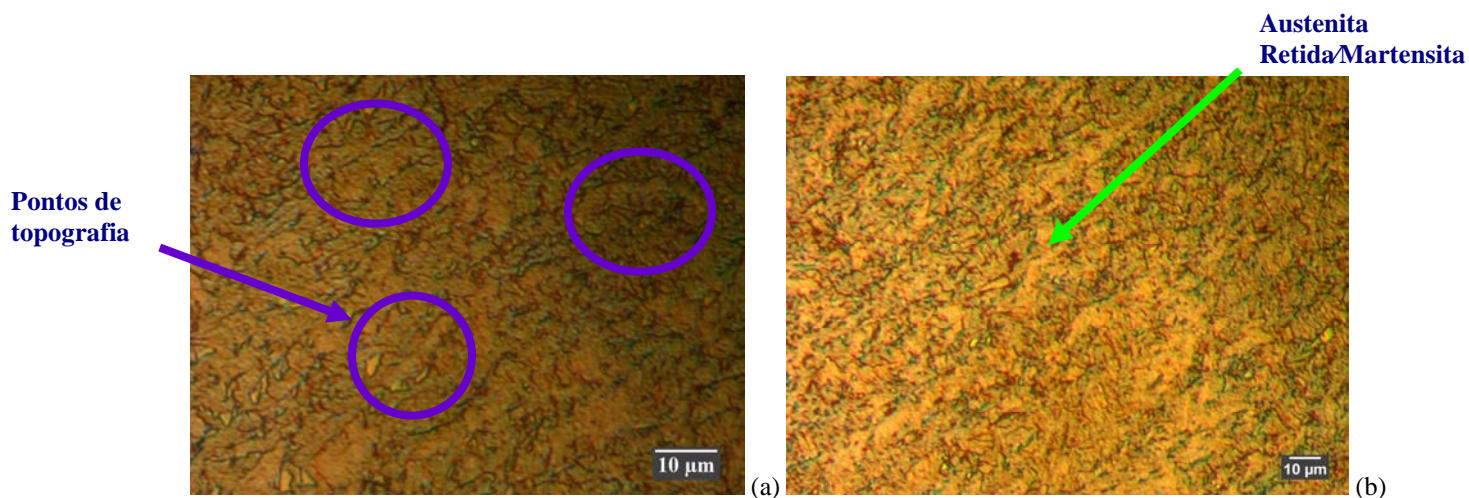
Figura 56 - (a) Ataque com LePera por 30s em campo claro. Ampliação 1000X. (b) Ataque com LePera por 30s em campo escuro. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 57(a), a amostra do aço de fases complexas foi submetida a um ataque químico por imersão com o reagente LePera por um tempo de 30s, usando o sistema de contraste por interferência diferencial através de um filtro Nomarski para revelar pequenos relevos na superfície da amostra. Pode-se observar os contornos de grãos bem delineados, refinados e homogêneos. Na Figura 57(b), a amostra que foi atacada com o reagente LePera por um tempo de 30s, usando o método de luz polarizada revelou através de diferenças nas cores que a fase austenita retida e martensita apresentam uma coloração amarelo claro. Observou-se também contornos de grãos bem refinados, característica do aço CP.

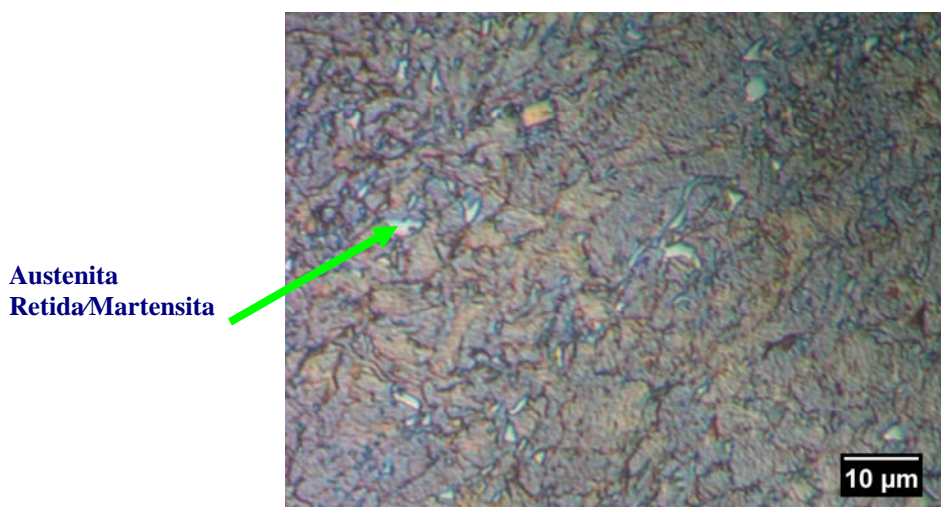
Figura 57 - (a) Fotomicrografia de DIC após ataque com LePera por 30s. Ampliação 1000X. (b) Fotomicrografia de luz polarizada após ataque com LePera por 30s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 58, foi observada a microestrutura do aço multifásico (CP), no sentido longitudinal paralelo à laminação, submetida a ataque químico com LePera por um tempo de 30s e seca com ar frio forçado a uma distância aproximadamente 40cm da superfície da amostra, utilizando a iluminação em campo claro. Foi possível destacar nitidamente a fase austenita retida e a fase martensita com coloração branca. Pode-se observar a presença de grãos bem refinados e complexos.

Figura 58 - Ataque com LePera durante 30s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X.

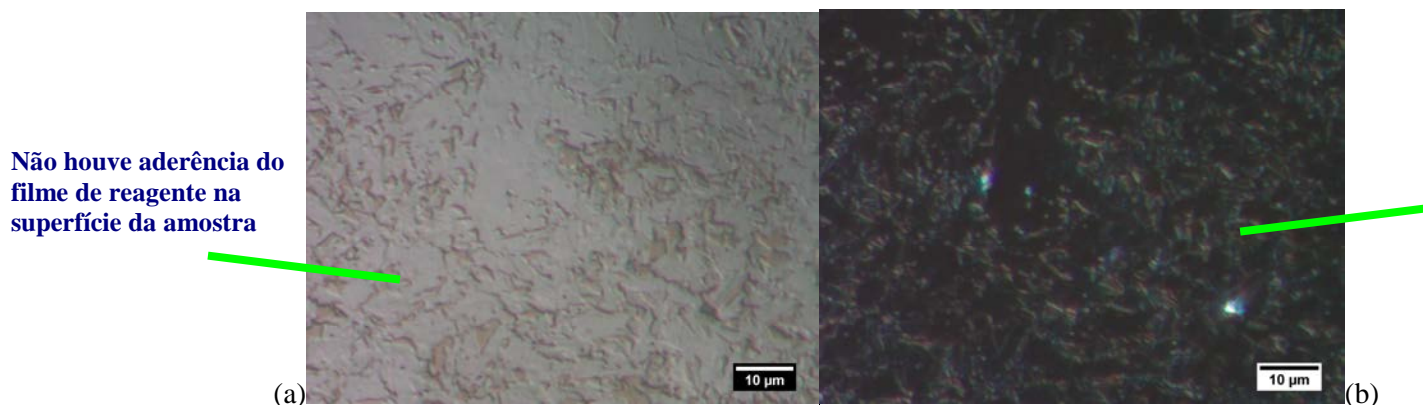


Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 59(a), observou-se a microestrutura de um aço de fases complexas de uma amostra atacada com o reagente químico LePera, utilizando-se o método de ataque por imersão por um tempo de exposição de 20s, secado ao ar frio forçado à uma distância de aproximadamente 10cm da superfície da amostra, no sentido superficial à laminação e em iluminação em campo claro. Observou-se que os contornos de grãos não foram identificados e o contraste das fases presentes não permitiram distingui-las, devido a não aderência do filme de reagente na superfície da amostra, que pode ter sido causada pelo tempo de exposição baixo ou secado ao ar frio forçado a uma distância de aproximadamente 10 cm da superfície da amostra, deslocando assim o filme. A nitidez não foi satisfatória. Na Figura 59(b), uma amostra foi atacada com o reagente LePera por imersão, por um tempo de exposição de 20s, secado ao ar frio forçado à uma distância de aproximadamente 10cm da superfície da amostra, no sentido superficial à laminação, utilizando-se à iluminação em campo escuro. A iluminação em campo escuro é aquela contrária a iluminação em campo claro, neste caso, como pode-se observar que não houve a aderência do filme de reagente na superfície da

amostra, ficou difícil distinguir o contraste das fases presentes na amostra, a nitidez não foi satisfatória e não foi possível identificar os contornos de grãos.

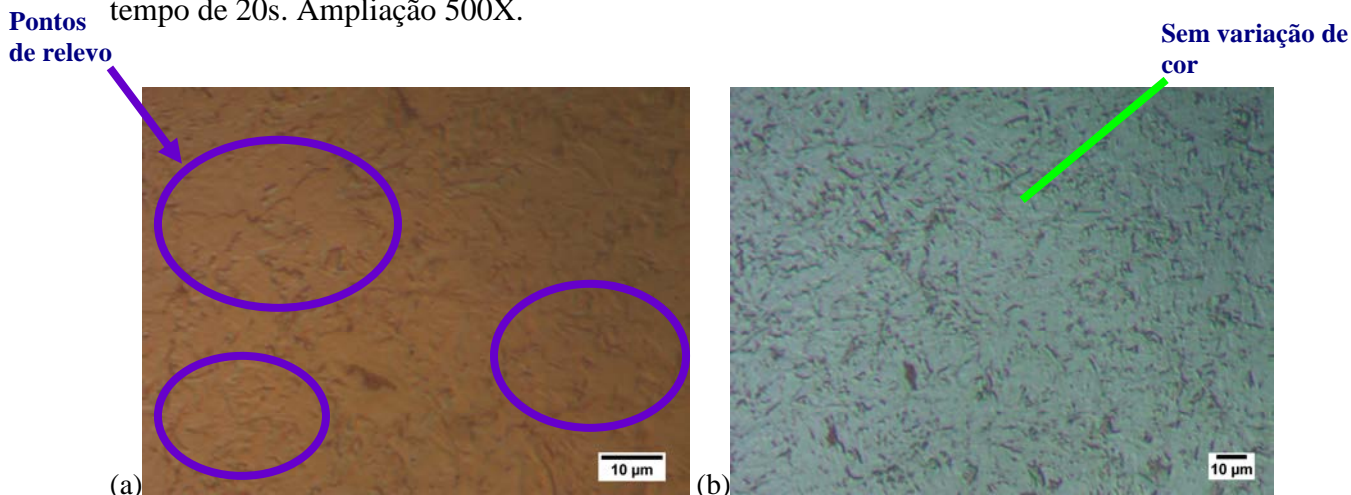
Figura 59 - (a) Ataque com LePera por um tempo de 20s em iluminação em campo claro. Ampliação 1000X. (b) Ataque com LePera por um tempo de 20s em iluminação em campo escuro. Ampliação 1000X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Na Figura 60(a), a amostra do aço de fases complexas foi submetida a um ataque químico por imersão com o reagente LePera por um tempo de exposição de 20s, secado ao ar frio forçado à uma distância de aproximadamente 10cm da superfície da amostra, utilizando a técnica de microscopia óptica chamada contraste por interferência diferencial por meio de um filtro Nomarski pode-se revelar pequenos pontos de relevo na superfície da amostra. Observou-se contornos de grãos. Na Figura 60(b), a amostra foi atacada com o reagente LePera por um tempo de exposição de 20s, secado ao ar frio forçado à uma distância de aproximadamente 10cm da superfície da amostra, utilizando o método de luz polarizada, por não ter havido aderência do filme de reagente na superfície da amostra, não foi possível observar as diferenças de tonalidades; os contornos de grãos puderam ser observados.

Figura 60. (a) Fotomicrografia de DIC após ataque com LePera por um tempo de 20s. Ampliação 1000X; (b) Fotomicrografia de Luz polarizada após ataque com LePera por um tempo de 20s. Ampliação 500X.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

4.2. Metalografia Quantitativa:

Nesta segunda etapa do trabalho serão apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes à quantificação das fases presentes no aço Complex Phase.

Utilizando-se ferramentas de processamento digital de imagens foi possível calcular as frações de área da fase ferrita/austenita retida e da fase bainita/martensita, a partir dos campos obtidos pelos ataques químicos com os reagentes químicos Nital 3% e Nital 2%.

Para o processamento digital de imagens utilizou-se o software Image J. O nível de segmentação ou também chamado de threshold significa o limiar em que toda a fase, ou seja, o local certo da quantificação é demarcada pelo usuário, de maneira que o software Image J possa contabilizar a área selecionada.

Os cálculos das frações de área da fase ferrita/austenita retida e da fase bainita/martensita utilizando-se o reagente químico Nital 3% para as quatro condições de microscopia óptica tais como, iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada foram feitos da seguinte forma:

Nital 3% (Fase ferrita/austenita retida):

- Para a iluminação em campo claro: foram obtidos 22 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase ferrita/austenita retida e a fase escura como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 4, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 61,8% até 70,1%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 65,8% e 2,0.

- Para a iluminação em campo escuro: foram obtidos 18 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase bainita/martensita e a fase escura como fase ferrita/austenita retida. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 4, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 63,5% até 71,8%,

e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 67,3% e 3,4.

- Para o contraste por interferência diferencial (DIC): foram obtidos 10 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase que apresenta pontos de topografia como fase ferrita/austenita retida e a fase que não apresenta pontos de topografia como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 4, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 63,4% até 69,0%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 65,6% e 2,1.

- Para o método de luz polarizada: foram obtidos 12 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase cinza mais claro como fase ferrita/austenita retida e a fase cinza mais escuro como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 4, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 60,7% até 70,6%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 64,7% e 3,1.

Tabela 4 - Porcentagem de ferrita/austenita retida para Nital 3%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão.

| % Ferrita/Austenita Retida (Nital 3%) | Campo Claro | Campo Escuro | DIC | Luz Polarizada |
|--|--------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| | 69,0 | 68,7 | 66,3 | 66,1 |
| | 66,1 | 70,4 | 63,4 | 60,7 |
| | 70,1 | 66,3 | 64,8 | 64,7 |
| | 66,8 | 71,0 | 63,9 | 62,8 |
| | 68,5 | 64,2 | 68,0 | 61,8 |
| | 67,0 | 69,5 | 67,9 | 69,3 |
| | 63,8 | 70,8 | 63,5 | 61,5 |
| | 63,5 | 70,5 | 63,9 | 65,8 |
| | 64,9 | 71,6 | 69,0 | 65,9 |
| | 65,3 | 67,8 | 65,2 | 70,6 |
| | 65,5 | 71,8 | | 62,0 |
| | 61,8 | 65,6 | | 64,8 |
| | 68,4 | 63,5 | | |
| | 65,7 | 67,4 | | |
| | 66,1 | 63,7 | | |
| | 65,2 | 62,0 | | |
| | 65,9 | 63,3 | | |
| | 65,8 | 63,1 | | |
| | 66,3 | | | |
| | 62,4 | | | |
| | 64,8 | | | |
| | 64,8 | | | |
| média (fração de área) | 65,8 | 67,3 | 65,6 | 64,7 |
| desvio padrão (fração de área) | 2,0 | 3,4 | 2,1 | 3,1 |

Nital 3% (Fase bainita/martensita):

- Para a iluminação em campo claro: foram obtidos 21 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase ferrita/austenita retida e a fase escura como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 5, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 34,3% até 42,8%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 38,6% e 2,2.

- Para a iluminação em campo escuro: foram obtidos 18 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase bainita/martensita e a fase escura como fase ferrita/austenita retida. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 5, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 32,7% até 42,7%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 37,1% e 3,6.

- Para o contraste por interferência diferencial (DIC): foram obtidos 10 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase que apresenta pontos de topografia como fase ferrita/austenita retida e a fase que não apresenta pontos de topografia como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 5, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 34,5% até 40,3%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 38,1% e 2,1.

- Para o método de luz polarizada: foram obtidos 12 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase cinza mais claro como fase ferrita/austenita retida e a fase cinza mais escuro como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

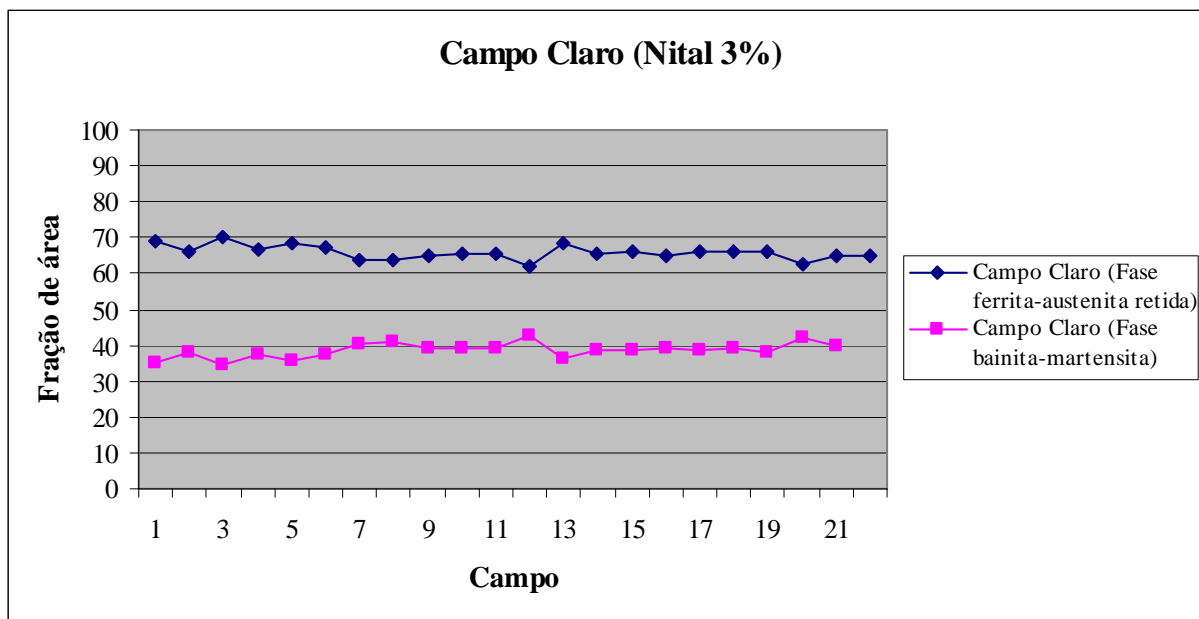
Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 5, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 34,4% até 43,0%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 39,0% e 3,1.

Tabela 5 - Porcentagem de bainita/martensita para Nital 3%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão.

| % Martensita/Bainita (Nital 3%) | Campo Claro | Campo Escuro | DIC | Luz Polarizada |
|--|--------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| | 35,1 | 35,7 | 37,2 | 37,3 |
| | 38,1 | 33,7 | 40,3 | 43,0 |
| | 34,3 | 38,1 | 38,8 | 38,7 |
| | 37,3 | 33,0 | 39,8 | 40,7 |
| | 35,7 | 40,2 | 35,6 | 42,0 |
| | 37,2 | 34,7 | 35,8 | 34,4 |
| | 40,5 | 33,6 | 40,2 | 42,3 |
| | 41,2 | 33,8 | 39,9 | 37,8 |
| | 39,4 | 32,7 | 34,5 | 37,9 |
| | 39,3 | 36,6 | 38,4 | 33,2 |
| | 39,3 | 32,4 | | 41,8 |
| | 42,8 | 38,6 | | 39,0 |
| | 36,0 | 41,1 | | |
| | 38,8 | 37,0 | | |
| | 38,6 | 40,9 | | |
| | 39,0 | 42,7 | | |
| | 38,4 | 41,3 | | |
| | 38,9 | 41,7 | | |
| | 38,2 | | | |
| | 42,1 | | | |
| | 39,6 | | | |
| Média (fração de área) | 38,6 | 37,1 | 38,1 | 39,0 |
| desvio padrão (fração de área) | 2,2 | 3,6 | 2,1 | 3,1 |

A partir das Tabelas 4 e 5, pode-se obter a Figura 61, um gráfico para a iluminação em campo claro, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 3%. A Figura 61 mostrou que tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida quanto para uma porcentagem de bainita/martensita houve uma estabilidade em toda a extensão do gráfico, devido aos valores da fração de área terem sido bem próximos.

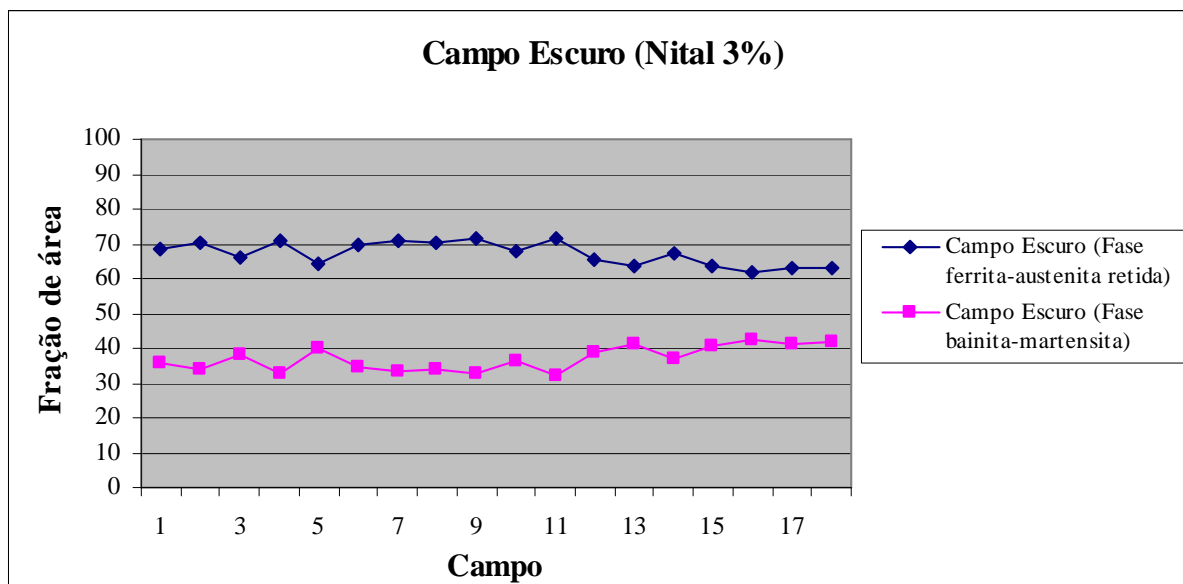
Figura 61 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para a iluminação em campo claro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 4 e 5, pode-se obter a Figura 62, um gráfico para a iluminação em campo escuro, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 3%. A Figura 62 mostrou também uma estabilidade em toda extensão do gráfico, tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita. O que era esperado, pois a iluminação em campo escuro é o contraste reverso da iluminação em campo claro, com isso, esta estabilidade mostrou esta coerência entre estas duas condições.

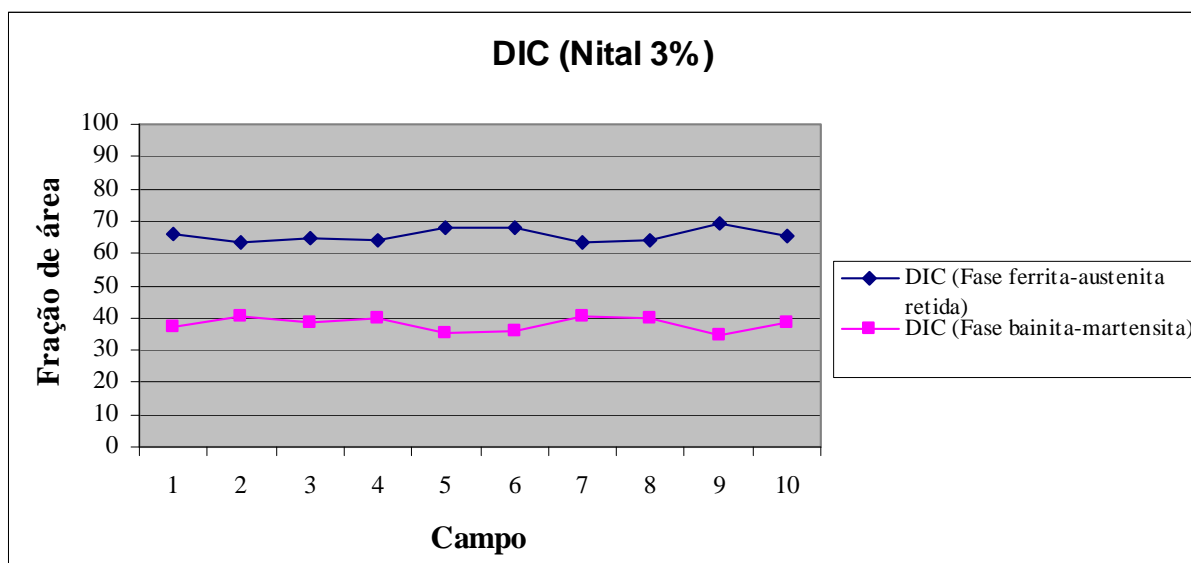
Figura 62 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para a iluminação em campo escuro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 4 e 5, pode-se obter a Figura 63, um gráfico para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 3%. A Figura 63 mostrou uma tendência de estabilidade bem maior tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita, ou seja, esta condição se mostrou ser bastante eficiente quando se deseja variação de relevo na microestrutura do aço de fases complexas.

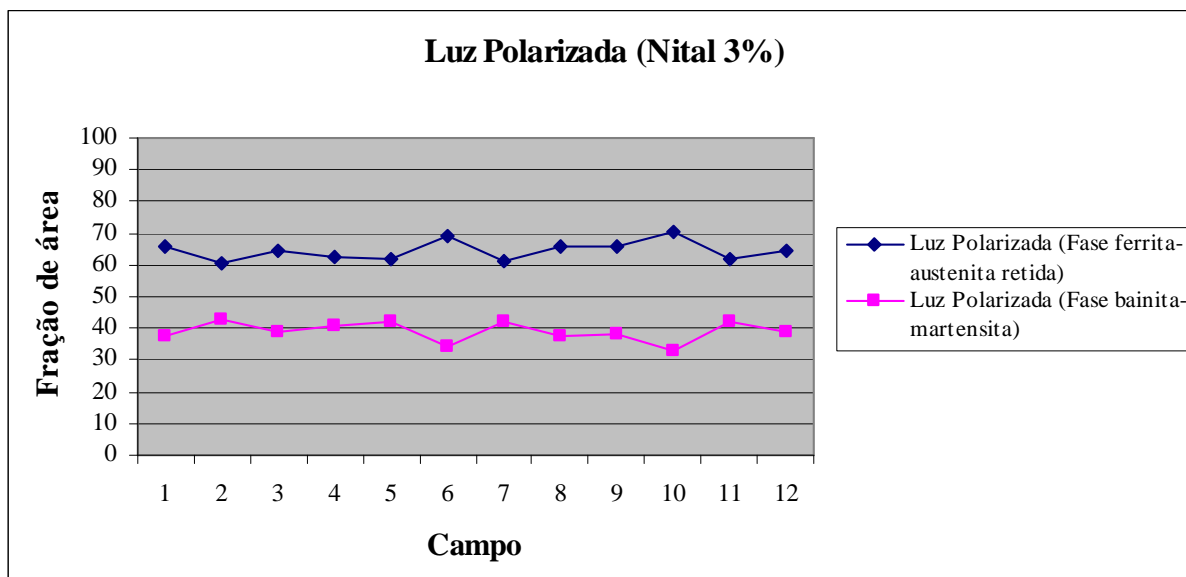
Figura 63 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 4 e 5, pode-se obter a Figura 64, um gráfico para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 3%. A Figura 64 mostrou uma estabilidade um pouco menor tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita, porém, esta condição pode ser considerada coerente quando se quer variação de tonalidade por apresentar em alguns pontos alguma tendência de estabilidade.

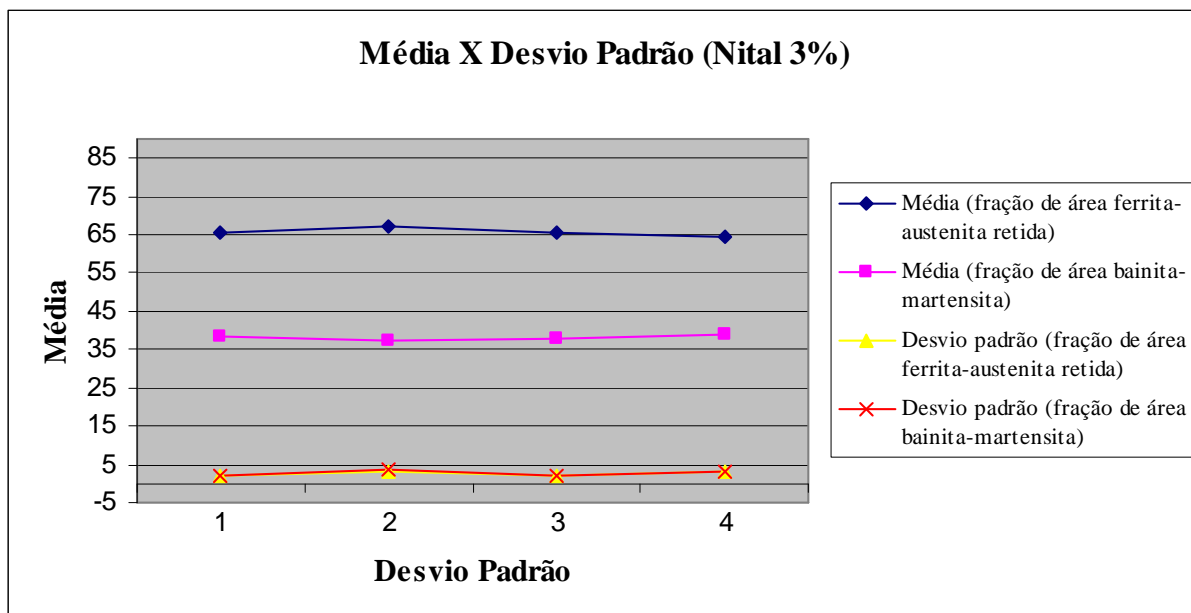
Figura 64 - Gráfico do ataque químico com Nital 3% para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A Figura 65, mostra um gráfico de todas as médias para as quatro condições de microscopia óptica, tais como, iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada em função de seus respectivos desvios padrões. Com este gráfico pode-se notar uma linearidade bastante grande das médias com seus respectivos desvios padrões tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita, o que mostra que a variação do número de campos para cada condição de microscopia óptica não afeta na eficiência e coerência dos resultados. Pode-se observar que os desvios padrões variaram entre 2,0 e 3,0.

Figura 65 - Gráfico das médias para as quatro condições de microscopia óptica em função de seus respectivos desvios padrões para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

O que diferenciou este ataque com Nital 2% do ataque com Nital 3% foi com relação à morfologia, de maneira qualitativa, pois o ataque químico com Nital 3%, os contornos de grãos ficaram bem mais delineados e refinados. Sua microestrutura ficou mais homogênea.

Os cálculos das frações de área da fase ferrita/austenita retida e da fase bainita/martensita utilizando-se o reagente químico Nital 2% para as quatro condições de microscopia óptica tais como, iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada foram feitos da seguinte forma:

Nital 2% (Fase ferrita/austenita retida):

- Para a iluminação em campo claro: foram obtidos 10 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase ferrita/austenita retida e a fase escura como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 6, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 66,3% até 73,0%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 69,9% e 2,9.

- Para a iluminação em campo escuro: foram obtidos 16 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase bainita/martensita e a fase escura como fase ferrita/austenita retida. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 6, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 62,2% até 74,7%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 68,2% e 3,7.

- Para o contraste por interferência diferencial (DIC): foram obtidos 11 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase que apresenta pontos de topografia como fase ferrita/austenita retida e a fase que não apresenta pontos de topografia como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 6, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 58,3% até 70,9%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 65,3% e 3,7.

- Para o método de luz polarizada: foram obtidos 11 campos para a fase ferrita/austenita retida com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase cinza mais claro como fase ferrita/austenita retida e a fase cinza mais escuro como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase ferrita/austenita retida (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase ferrita/austenita retida.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 6, pode-se notar que a porcentagem da fase ferrita/austenita retida variou entre 56,3% até 69,4%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 63,5% e 3,9.

Tabela 6 - Porcentagem de ferrita/austenita retida para Nital 2%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão.

| % Ferrita/Austenita Retida (Nital 2%) | Campo Claro | Campo Escuro | DIC | Luz Polarizada |
|--|--------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| | 68,5 | 74,7 | 61,7 | 66,2 |
| | 73,0 | 69,3 | 67,7 | 63,0 |
| | 67,5 | 62,2 | 69,0 | 63,3 |
| | 66,3 | 64,8 | 68,0 | 61,6 |
| | 70,0 | 69,3 | 64,7 | 59,4 |
| | 75,0 | 71,7 | 70,9 | 62,5 |
| | 67,6 | 65,1 | 66,6 | 63,7 |
| | 71,0 | 68,3 | 63,6 | 64,1 |
| | 67,6 | 66,0 | 65,7 | 56,3 |
| | 72,8 | 66,6 | 61,7 | 69,3 |
| | | 62,4 | 58,3 | 69,4 |
| | | 71,0 | | |
| | | 65,9 | | |
| | | 74,4 | | |
| | | 69,6 | | |
| | | 69,1 | | |
| Média (fração de área) | 69,9 | 68,2 | 65,3 | 63,5 |
| Desvio padrão (fração de área) | 2,9 | 3,7 | 3,7 | 3,9 |

Nital 2% (Fase bainita/martensita):

- Para a iluminação em campo claro: foram obtidos 22 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase ferrita/austenita retida e a fase escura como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 7, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 30,5% até 38,9%, e a

partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 35,4% e 3,0.

- Para a iluminação em campo escuro: foram obtidos 16 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase clara como fase bainita/martensita e a fase escura como fase ferrita/austenita retida. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 7, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 30,7% até 43,6%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 38,0% e 3,8.

- Para o contraste por interferência diferencial (DIC): foram obtidos 11 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase que apresenta pontos de topografia como fase ferrita/austenita retida e a fase que não apresenta pontos de topografia como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 7, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 35,0% até 47,2%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 40,1% e 3,7.

- Para o método de luz polarizada: foram obtidos 11 campos para a fase bainita/martensita com uma ampliação de 1000X, a partir destes campos foi feita uma análise, no sentido de destacar a fase cinza mais claro como fase ferrita/austenita retida e a fase cinza mais escuro como fase bainita/martensita. Com isso, pode-se fazer uma contagem destas fases utilizando o software Image J. Este procedimento foi feito da seguinte maneira:

- Foram selecionados três campos aleatórios no Image J;

- Para cada um destes campos foi feito um threshold, ou seja, a fase bainita/martensita (fase desejada) foi demarcada, ajustando-se nas setas esta fase, anotando assim, o valor do threshold onde a fase que foi segmentada se mostrou próxima no campo original.

- A partir destes valores dos três campos, calculou-se a média.

- Com o valor da média foi feito um novo threshold, só que agora para todos campos, inclusive os três campos já citados, e a partir dele pode-se calcular a fração de área para a fase bainita/martensita.

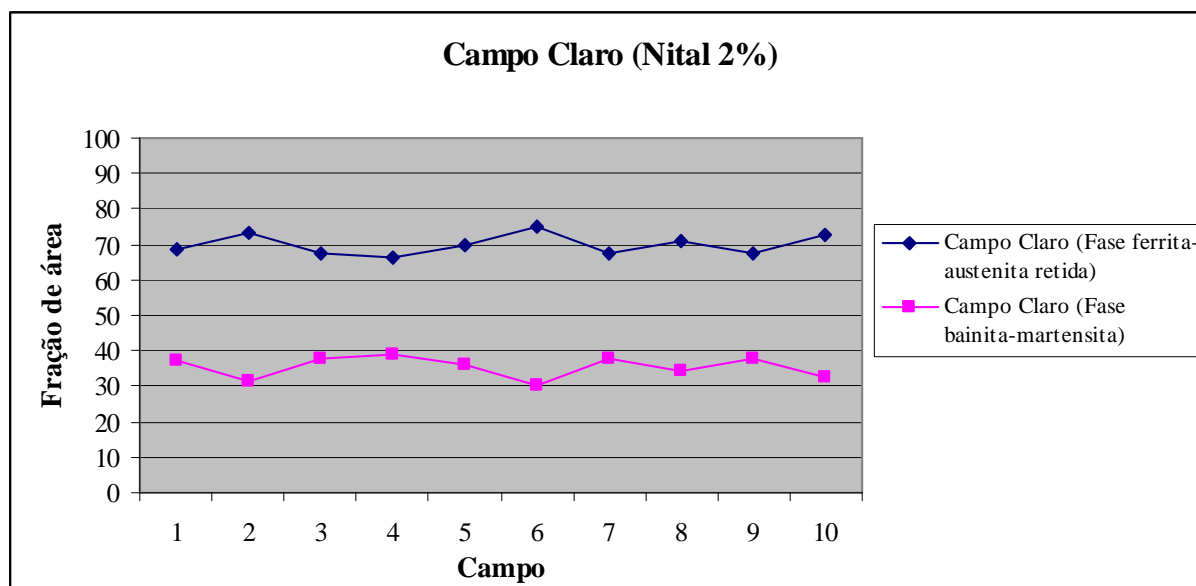
Com os valores das frações de área obtidos no Image J, como mostrado na Tabela 7, pode-se notar que a porcentagem da fase bainita/martensita variou entre 33,4% até 46,4%, e a partir destes valores, foi calculada a média e o desvio padrão, cujos valores são respectivamente, 39,2% e 3,8.

Tabela 7 - Porcentagem de bainita/martensita para Nital 2%, com relação às quatro condições de microscopia óptica, com suas respectivas médias e desvios padrão.

| % Martensita/Bainita (Nital 2%) | Campo Claro | Campo Escuro | DIC | Luz Polarizada |
|--|--------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| | 37,1 | 30,7 | 43,4 | 36,7 |
| | 31,6 | 36,9 | 37,5 | 39,6 |
| | 37,9 | 43,6 | 36,2 | 39,3 |
| | 38,9 | 42,0 | 37,5 | 41,1 |
| | 35,9 | 36,7 | 41,0 | 43,3 |
| | 30,5 | 34,4 | 35,0 | 40,2 |
| | 37,7 | 41,5 | 38,6 | 38,9 |
| | 34,1 | 37,6 | 41,9 | 38,7 |
| | 37,7 | 39,8 | 39,5 | 46,4 |
| | 32,5 | 39,4 | 43,4 | 33,5 |
| | | 43,4 | 47,2 | 33,4 |
| | | 35,0 | | |
| | | 40,7 | | |
| | | 32,5 | | |
| | | 36,2 | | |
| | | 37,3 | | |
| Média (fração de área) | 35,4 | 38,0 | 40,1 | 39,2 |
| Desvio padrão (fração de área) | 3,0 | 3,8 | 3,7 | 3,8 |

A partir das Tabelas 6 e 7, pode-se obter a Figura 66, um gráfico para a iluminação em campo claro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e para uma porcentagem de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 2%. Na Figura 66 pode-se notar uma pequena tendência de estabilidade tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita.

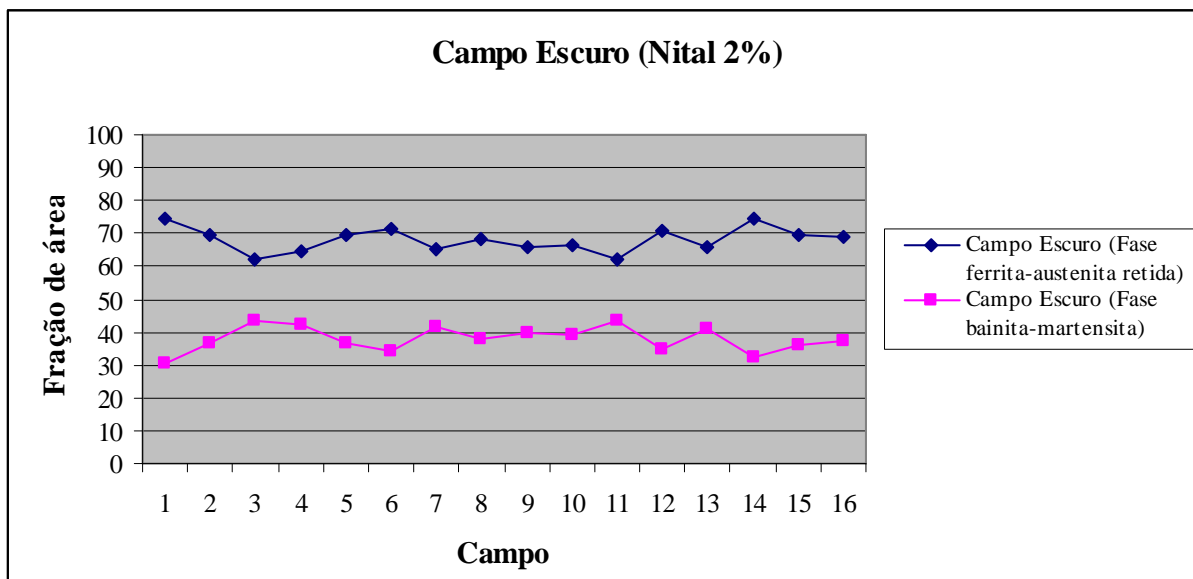
Figura 66 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para a iluminação em campo claro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 6 e 7, pode-se obter a Figura 67, um gráfico para a iluminação em campo escuro, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 2%. Para o gráfico para iluminação em campo escuro tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita pode-se notar também uma pequena tendência de estabilidade, o que mostra uma coerência entre as duas condições de microscopia óptica, pois a iluminação em campo claro é o inverso da iluminação em campo escuro, visto na teoria.

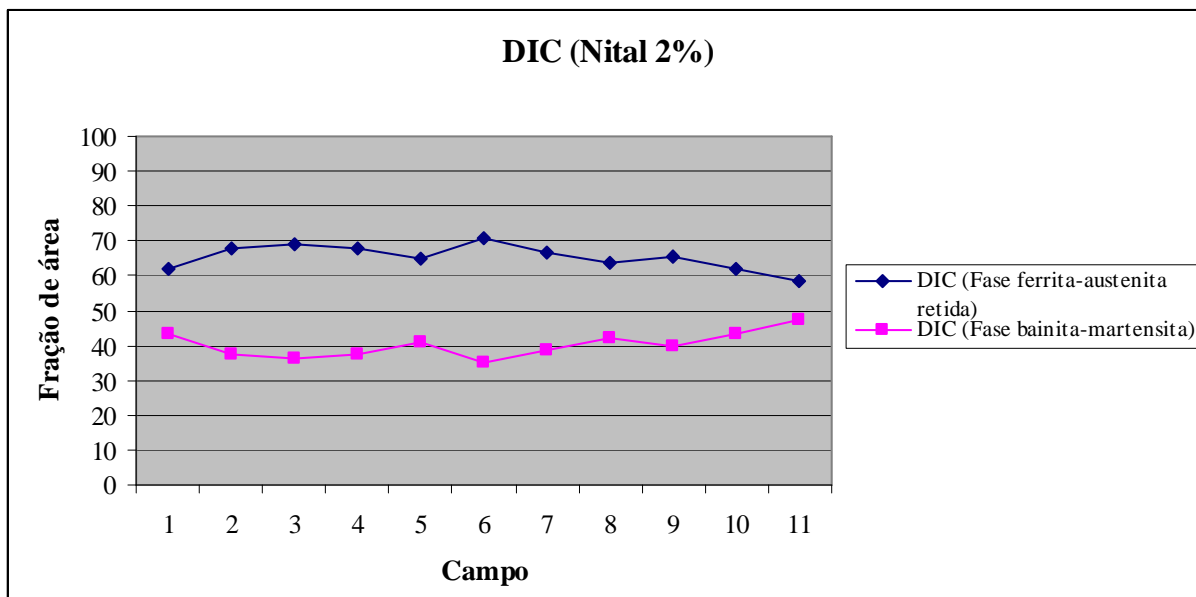
Figura 67 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para a iluminação em campo escuro para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 6 e 7, pode-se obter a Figura 68, um gráfico para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 2%. A Figura 68 mostrou uma tendência de estabilidade um pouco menor com relação ao ataque feito com Nital 3%, porém, esta condição se mostrou ser eficaz quando se quer pontos de topografia na superfície da amostra.

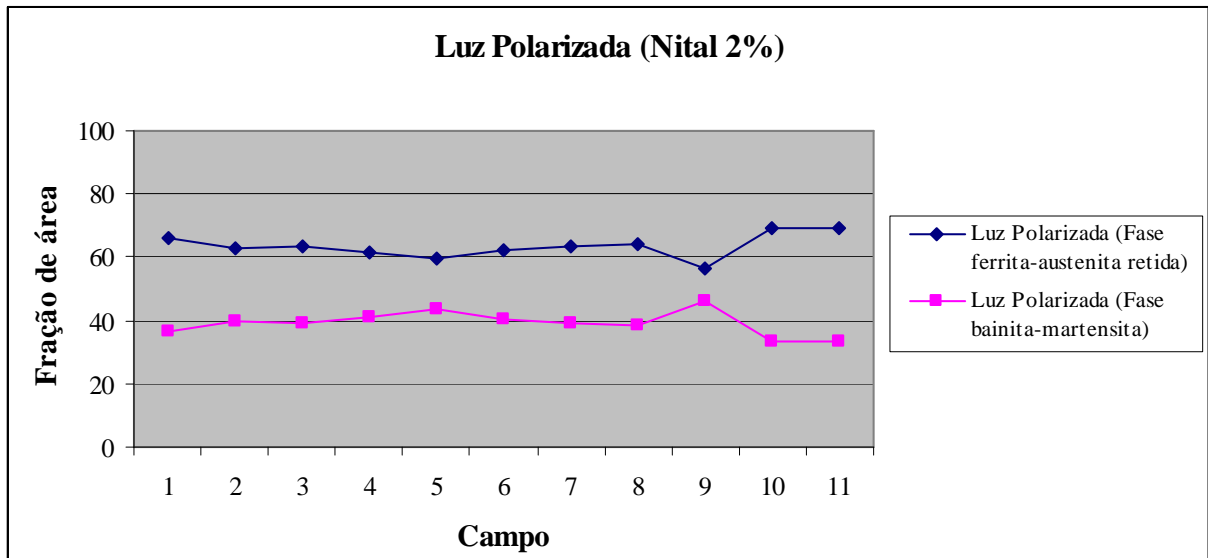
Figura 68 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para o contraste por interferência diferencial (DIC) para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A partir das Tabelas 6 e 7, pode-se obter a Figura 69, um gráfico para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos, por meio do ataque químico com o reagente Nital 2%. A Figura 69 mostrou uma tendência de estabilidade grande, com isso, pode-se dizer que o método de luz polarizada se mostrou eficaz quando se deseja variação de cor.

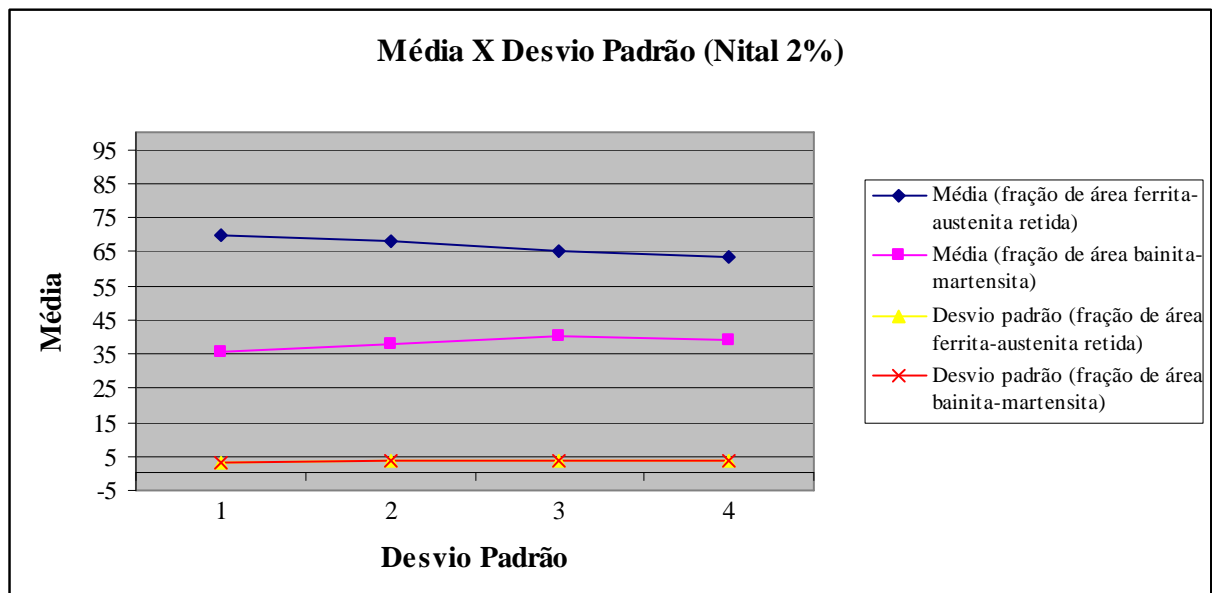
Figura 69 - Gráfico do ataque químico com Nital 2% para o método de luz polarizada para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita, da fração de área em função do número de campos.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A Figura 70, mostra um gráfico de todas as médias para as quatro condições de microscopia óptica, tais como, iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada em função de seus respectivos desvios padrões. Com este gráfico pode-se notar uma pequena linearidade das médias tanto para uma porcentagem de ferrita/austenita retida como para uma porcentagem de bainita/martensita; já com relação aos desvios padrões, pode-se notar uma linearidade relativamente grande, o que mostra também que a variação do número de campos para cada condição de microscopia óptica não afeta os resultados, mostrando assim, ser eficaz. Pode-se observar que os desvios padrões variaram entre 3,0 e 4,0.

Figura 70 - Gráfico das médias para as quatro condições de microscopia óptica em função de seus respectivos desvios padrões para uma porcentagem de ferrita/austenita retida e de bainita/martensita.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

5 CONCLUSÕES

Buscando desenvolver uma análise metalográfica de qualidade para caracterizar a microestrutura do aço de fases complexas (CP), utilizando quatro condições de microscopia óptica, tais como, iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada, através da utilização de algumas técnicas na preparação das amostras, pode-se concluir que:

Modos de secagem:

- Utilizando ar frio forçado a uma distância de aproximadamente 10 cm da superfície da amostra foi eficaz para ataque químico com o reagente químico Nital 2% e 3%.
- Utilizando ar frio forçado a uma distância de aproximadamente 40 cm da superfície da amostra ou naturalmente (ao ar) foi coerente para ataques químicos com os reagentes químicos Metabissulfito de Sódio 10% e LePera.

Modos de ataques químicos:

- O modo de esfregamento foi eficiente para ataque químico com o reagente químico Nital 2% e 3%.
- O modo de imersão foi eficaz para ataques químicos com os reagentes químicos Metabissulfito de Sódio 10% e LePera.

Técnica Qualitativa:

- Nital 3% e 2%: os resultados foram eficazes quanto à identificação das fases presentes no aço CP para as quatro condições de microscopia óptica tais como iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; método de luz polarizada e contraste por interferência diferencial (DIC).
- Metabissulfito de Sódio 10%: os resultados foram eficientes, pois a sua finalidade é destacar a fase austenita retida, para as quatro condições de microscopia óptica.
- LePera: os resultados apresentaram as fases presentes no aço de fases complexas, diferenciadas por cores, destacando a qualidade da metalografia realizada com eficiência, para as quatro condições de microscopia óptica.

Metalografia Quantitativa:

- Nital 3%: Com relação à fração de área da fase ferrita/austenita retida para as quatro condições de microscopia óptica tais como iluminação em campo claro; iluminação em campo escuro; contraste por interferência diferencial (DIC) e método de luz polarizada se mostraram eficientes.
- Nital 3%: Com relação à fração de área da fase bainita/martensita para as quatro condições de microscopia óptica foram coerentes e eficazes.
- Nital 2%: Com relação à fração de área da fase ferrita/austenita retida para as quatro condições de microscopia óptica mostraram ter eficiência.
- Nital 2%: Com relação à fração de área da fase bainita/martensita para as quatro condições de microscopia óptica mostraram ser coerentes e eficazes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar as frações de área das fases presentes para os ataques químicos utilizando os reagentes químicos Metabissulfito de Sódio 10% e LePera.

- Analisar a caracterização microestrutural utilizando outros recursos como o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. J. ; ANAZAWA, R. M.; CARRER, G. R.; PEREIRA, M. S.; HASHIMOTO, T. M.; BRANDAO, S. **Desenvolvimento de Ataques Químicos para a Caracterização Microestrutural de Aços Aeronáuticos**. In: Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do IEAV, 8, 2008, São José dos Campos-SP. ANAIS... São Paulo: 2008. v. 1, p. 59-59.

ADAM, H. **The whole is more than the sum of its parts**. AutoTechnology, n. 5, p. 68-71, 2002.

ADAMCZYK, J; GRAJCAR, A. **Heat Treatment and Mechanical Properties of Low-Carbon Steel with Dual-Phase Microstructure** - Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007.

ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL (AHSS) APPLICATION GUIDELINES, Version 3 – **International Iron & Steel Institute - Committee on Automotive Applications**, 2006.

ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL APPLICATION GUIDELINES, VERSION 4.1, **International Iron & Steel Institute - Committee on Automotive Applications**, 2009.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ULSAB Overview Report Phase 2 Findings – March 1998**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsab/>>. Acesso em setembro de 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 407**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 2007.

ANAZAWA, R. M.; ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S. Efeito dos Tratamentos Intercrítico e Isotérmico Sobre as Propriedades Mecânicas e a Estrutura no Aço 300M. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 25, n. 2, 93-97, Jun. 2006.

ANNIBAL JR, E. G.; ROTELLI, R. M.; OLIVEIRA JR, J. E. G.; FERRER, M. H. **Desenvolvimentos Recentes em Aços TRIP Aplicáveis na Indústria Automotiva: Uma Revisão**. In: Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica 12, 2005, Ilha Solteira – SP. Disponível em: <www.dem.feis.unesp.br/cdrom_creem2005/pdf/cm02.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2009.

ANDRADE, S. L.; TAISS, E. J. M.; ROSA, L. K. Os aços no projeto ULSAB-AVC. **Revista Metalurgia e Materiais**, p. 689-694, Out. 2002.

ANGELI, J.; FUREDOR, E.; KNEISS, A. C. Etching Techniques for Characterizing the Phases of Low-Alloy Dual-Phase and TRIP Steels. *Prakt. Metallogr, Munchen*, v.43, n.4, p.127-142, Fev. 2006.

ARCELORMITTAL, disponível em: <http://www.arcelormittal.com/automotive/sheets/catalogue.pl?id_sheet=C&header=&language=EM>. Acesso em 05 de julho de 2010.

ARMCO, disponível em: <www.armco.com.br>. Acesso em 09 de julho de 2006.

BHATTACHARYA, D., FONSTEIN, N., GIRINA, O., GUPTA, I., YAKUBOVSKY, O. *A Family of 590 MPa, Advanced High Strength Steels with Various Microstructures*. 45th MWSP Conference Proceedings, Vol. XLI. MS&T, 2003.

BLECK, W. **Using the TRIP Effect - The Dawn of a Promising New Group of Cold Formable Sheets**. In: International Conference on TRIP-aided High Strength Ferrous Alloys, Ghent: GRIPS-Proceeding, p.13-23. 2002.

BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. **Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels**. In:____. **ASM Handbook - Metallography and Microstructures**. .Ohio: ASM International, v.9, p.608-627. 2004.

BRAMFITT, B. L.; BENSCOTER, A. O. **Metallographer`s Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**. 2.ed. Ohio, American Society for Metals. ASM International, 354p. 2006.

BUCHHOLZ, K. **ULSAB proves lighter is stronger**. Automotive Engineering International, v. 106, n. 5, p. 36-38, May. 1998.

BUCHHOLZ, K. **Lightweight body panel materials**. Automotive Engineering International, v. 106, n. 12, p. 19-24, Dec. 1998.

BURGGRAAF, P. **"Guidelines for Optical Microscopy"**, Semiconductor International, v. 8, n. 2, p. 54-62. 1985.

CASTRO, I. **Aços Avançados de Alta Resistência: Uma Experiência na Usiminas – 47° Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos**, ABM, Brasil, 2010.

CHAINER, J. **Inovattion in Motion – ULSAB Advanced Vehicle Concepts**. Steel Technology, p. 69-73, July/Aug. 2002.

DE, A. K.; SPEER, J. G.; MATLOCK, D. K. Color Tint-Etching for Multiphase Steels. **Advanced Materials & Processes**. p. 27-30, Feb. 2003.

DIMATTEO, A.; LOVICU, G.; DESANCTIS, M.; VALENTINI, R.; SOLINA, A. Microstructures and Properties of Transformation Induced Plasticity Steels. **La metallurgia italiana**. p. 37-41. 2006.

FERRER, M. H. **Estudo das Transformações de Fase de Aços TRIP ao Si-Mn Microligados com Nb**. 2003. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FUKUGAUCHI, C. S. **Metodologia para caracterização metalográfica de um aço TRIP por microscopia óptica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – UNESP, Campus de Guaratinguetá, 2010.

FURTADO, A. E. **Influência do processamento térmico sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de um aço XC48 aplicado a componentes automotivos visando atendimento ao projeto ULSAB**. Guaratinguetá: UNESP, 2006.

FUTURE STEEL VEHICLE. **Engineering Report, Phase 2**. World Auto Steel, 2011.

FUTURE STEEL VEHICLE OVERVIEW REPORT. **Nature's is way to mobility**. World Auto Steel, 2011.

GIRAULT, E.; JACQUES, P.; HARLET, P.; MOLS, K.; VAN HUMBEECK, J.; AERNOUDT, E.; DELANNAY, F. Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels. **Materials Characterization**, v.40, p. 111-118. 1998.

GORNI, A. A. **Engenharia Microestrutural das Chapas de Aços Avançados de Alta Resistência** – 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Porto Alegre, 2008.

GORNI, A. A. **Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas**. Corte & Conformação de Metais, São Paulo, p.26-57, Dez. 2008.

GORNI, A. A. **Aços Avançados com Alta Resistência Mecânica para Aplicações Automotivas**. ABM, São Paulo, 2011.

HAIRER, F.; et al. **Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Bainitic Single and Complex Phase Steel** - Christian Doppler Research Association (CDG), 2010.

HEBESBERGER, T; et al. **Cold-Rolled Complex-Phase Steels: AHSS Material with remarkable Properties** - Voestalpine Stahl GmbH, VOEST-ALPINE Strase 3, A-4031 Linz, Austria, 2010.

JACQUES P.; LADRIÈRE J.; DELANNAY F. **On the Influence of Interactions between Phases on the Mechanical Stability of Retained Austenite in Transformation – Induced Plasticity Multiphase Steel**. Metallurgical and Materials Transactions, volume 32A, p. 2759 – 2768, 2001.

JEANNEAU, M.; PICHANT, P. **The Trends of steel products in the european automotive industry**. La Révue de Métallurgie, n. 11, p. 1399-1408, Nov. 2000.

JEONG, W. C.; MATLOCK, D. K.; KRAUSS, G. **Observation of Deformation and Transformation behavior of Retained Austenite in a 0,14C- 1,2Si-1,5Mn Steel with Ferrite-Bainite-Austenite Structure.** Materials Science and Engineering, A165, p. 1-8. 1993.

KANTOVISCKI, A. R. **Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga TRIP 800.** cap.1, f.1-4. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KARELOVA, A. et al. **A Hole Expansion of Dual-phase and Complex- Phase Steels -** Steel Research int. 80, 2009.

KUZIAK, R.; KAWALLA, R. **Advanced high strength steels for automotive industry –** Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008.

KRAUSS, G. History and Primary Steel Processing. In:____. **Steels: Processing, Structure, and Performance.** Ohio: ASM International, p.7-13. 2005.

KRUPITZER, R; HEIMBUCH, R. **Raising the Bar –** Metal Forming Magazine, 2005.

LEPERA, F. S. Improved Etching Technique to Emphasize Martensite and Bainite in High-Strength Dual-Phase Steel. **Journal of Metals**, p. 38-39, Mar. 1980.

LIBERTO, R. C. N. **Vida em fadiga de aços carbono com estrutura bifásica ferrita-martensita.** São Paulo: FEI, 2001.

LIMA, L. C. S.; NETO, C. M. Aços "*Bake Hardening*", São Jose dos Campos, 09 Julho de 2005.

LOMBARDO, S. **Estudo do envelhecimento após deformação em um aço Complex Phase**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – UNESP, Campus de Guaratinguetá, 2011.

LORA, F. A. **Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 200 utilizado na Indústria Automotiva**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MARQUES, R. J. A. **Avaliação da resistência à corrosão de aços IF revestidos com zinco e ligas de zinco-ferro destinados à indústria automobilística**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas na área de Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MARTINS, M. S. et al. **Complex Phase Steel: a new generation of flat steel for the automotive industry** – SAE International Paper, 2010.

MARTINS, M. S. **Caracterização em impacto e fadiga do aço estrutural de fases complexas, utilizado na Indústria Automotiva**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais) – UNESP, Campus de Guaratinguetá, 2011.

MASI, C. G. "**Selecting an Optical Microscope**", Test & Measurement World, v. 8, n. 2, p. 47-67. 1988.

MONTEIRO, C. B. **Aço Bake Hardening**. Seminário Metalurgia Física, Guaratinguetá, Jul. 2009.

MUKHERJEE, K; HAZRA, S. S; MILITZER, M. **Grain Refinement in Dual- Phase Steels** - Metallurgical and Materials Transactions A, 2009.

OLIVEIRA, F. L. G.; ANDRADE, M. S.; COSTA, A. B. Kinetics of Austenite Formation During Continuous Heating in a Low Carbon Steel. **Materials Characterization**, n. 58, p. 256-261. 2007.

PADILHA, A. F. Os Materiais de Engenharia. In:____. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. Curitiba: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A, p.13-32. 2000.

PEREIRA, M. S.; GARCIA, P. E. L.; HASHIMOTO, T. M. **Microscopy Society of América**, Metallographic Procedure to Microstructural Characterization of a Multiphase Steel Applied to Pipelines Industry by Optical Microscopy, v. 8, n. 2, 1328-1331. 2002.

PEREIRA, M. S. et al. **Aplicações de ataques químicos alternativos para revelação por cores da microestrutura de um aço multifásico**. Anais da I Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico – TTT 2003, p. 303-311, Nov. 2003.

PEREIRA, M. S. **Desenvolvimento de aços bifásicos, multifásicos e IF em consonância com o projeto ULSAB-AVC**. Guaratinguetá: UNESP, 2006.

PEREIRA, M. S. **Desenvolvimento de novos aços para indústria automobilística.** Guaratinguetá: UNESP, 2009.

PETZOW, G. **Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography.** 2.ed. Ohio, American Society for Metals. ASM International, 240p. 2001.

PICHLER, H. et al. **Dual-Phase and Complex-Phase Steels – AHSS Material for a Wide Range of Applications** - Voestalpine Stahl GmbH, voestalpineStr. 3, A4020 Linz, Austria, 2010.

PIERCY, R. "**Small Spot Surface Analysis Techniques**", Microeletronic Manufacturing and Testing, v. 12, n. 11. 1989.

RAY, A.; DHUA, S. K. Microstructural Manifestations in Color: Some Applications for steels. **Materials Characterization**, v. 37, p. 1-8, 1996.

RAY, A.; DHUA, S. K. **Microstructural Manifestations in Color: Some Applications for Steels.** Materials Characterization, v. 37, p. 1-8, 1999.

ROHDE, R. A. **Metalografia: Preparação de Amostras.** p. 20-21, Out. 2010.

ROS-YÁÑEZ, T.; HOUBAERT, Y.; MERTENS, A. Characterization of TRIP Assisted Multiphase Steel Surface Topography by Atomic Force Microscopy. **Materials Characterization**, n. 47, p. 93– 104. 2001.

RUUKKI, disponível em: <www.ruukki.com>. Acesso em 07 de junho de 2010.

SAMUELS, L. E. **Light Microscopy of Carbon Steels**. 2.ed. Ohio, American Society for Metals. ASM International. 502p. 2003.

SILVA, A. L. V. C.; AVILLETZ, R. R. Um banco de dados termodinâmicos para aços IF (*Interstitial Free*). **Revista ABM**, v. 1, n. 1, p. 64-68, Jul. 2004.

SILVA, F.; LOPES, N. I. A.; SANTOS, D. B. Microstructural Characterization of the C-Mn Multiphase High Strength Cold Rolled Steel. **Materials Characterization**, n. 56, p. 3-9. 2006.

SIMON, R.W. **New steel products for the automotive industry**. Steel Times International, p. 44-50, Nov. 1997.

SOUZA, G. A. **Caracterização Microestrutural de um Aço Médio Carbono e Baixa Liga (com Estrutura Bainítica / Martensítica) via Microscopia Óptica**. 2008. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SUN, S., PUNGH, M.; **Properties of thermomechanically processed dual-phase steels containing fibrous martensite**. Materials Science and Engineering. A335, p. 298-308. 2002.

SCHAEFFLER, D.J. **Introduction to advanced high-strength steels - Part I** – The Fabricator, 2005.

SMALLMAN, R. E.; BISHOP, R. J. The Characterization of Materials. In:____. **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering – Science, Process, Applications**. Oxford: Butterworth-Heinemann, p.125-167. 1999.

TIGRINHO, L. M. V. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões.** (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Concentração Manufatura) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

TIMOKHINA, I. B.; HODGSON, P. D.; PERELOMA, E. V. Effect of Microstructure on the Stability of Retained Austenite in Transformation-Induced-Plasticity Steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 35A, p.2331-2341, Aug. 2004.

THYSSEN KRUPP STEEL. Disponível em:
<<http://www.worldautosteel.org/SteelBasics/Steel-Types.aspx>>. Acesso em 12 de abril de 2010.

TOY. D. A. "Confocal Microscopy: The Ups and Downs of 3-D Profiling", Semiconductor International, v. 13, n. 5, p. 120-123. 1990.

ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, **ULSAB Executive Summary**, World Auto Steel, 1998.

ULSAB – AVC OVERVIEW REPORT. **Safe, affordable, fuel efficient vehicle concepts for the 21st century designed steel**, World Auto Steel, 2002.

USIMINAS, disponível em:
<http://www.usiminas.com/irj/go/km/docs/prtl_doc/triosunidos/pt/SalaDeImpressa/PublicacoesEspeciais/ForaDeSerieAutomotivo/ForaDeSerieAutomotivo04.pdf>. Acesso em 06 de julho de 2010.

VAUGHN, P.; MARTIN, D. **High and Ultra-High Strength steel crucial to lightweight, cost saving suspension designs**. Detroit. Maio de 2000. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsas/>>. Acesso em setembro de 2009.

VEIGA, J. P. C.; COVINO, M. **Da Carroça ao estado da arte**. Metalurgia e Materiais, v. 56, n. 500, p. 388-398, Jul. 2000.

VANDER VOORT, **Metallography Principles and Practice**. Mc Graw Hill, 1984.

VANDER VOORT, G. F. **Metallography, Principles and Practice**. New York: McGraw-Hill, 752p. 1999.

VANDER VOORT, G. F. Color Metallography, In:____. **ASM Handbook -Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, v. 9, p. 332-354. 2004.

XIAODONG, Z.; ZHAOHUI, M.; LI, W. **Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-Making and its Development in Baosteel**. Baosteel.com, 2004.

WORLD AUTO STEEL. **Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Versão 4.1**. Disponível em: <www.worldautosteel.org>. 2009.

WORLD AUTO STEEL. **Inside Scoop on the Volvo XC90 And Porsche Cayenne Body Structures** – World Auto Steel, 2010.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Basics: TRIP.** Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/SteelBasics/Steel-Types/TRIP.aspx>>. Acesso em 14 de setembro de 2010.

WORLD AUTO STEEL. **Automotive Steel Definitions.** Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org>>. 2011.

ZRNIK, J. et al. **Recent progress in high strength low carbon steels** – Metalurgija, 2006.

ZUIDEMA, B. K.; DENNER, S. G.; ENGL, B.; SPERLE, J. **New High Strength Steels Applied to the Body Structure of ULSAB-AVC.** In: SAE World Congress, 2001, Detroit. SAE Paper 2001-01-3042: SAE International, 2001.