

ALLAN HARADA

TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, POR MICROSCOPIA
ÓPTICA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, DE AÇOS BIFÁSICOS E
MULTIFÁSICOS APLICADOS À INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para
a obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá

2014

H254t Harada, Allan
Técnicas de caracterização microestrutural, por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, de aços bifásicos e multifásicos aplicados à indústria automobilística / Allan Harada – Guaratinguetá, 2014.

42 f : il.

Bibliografia: f. 40-41

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Aço – Metalografia 2. Indústria automobilística I. Título

CDU 669.14



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ALLAN HARADA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA”.

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

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA

Orientador / UNESP – FEG

Prof. Dr. TOMAZ MANABU HASHIMOTO

UNESP – FEG

Eng. MSc. CRISTINA SAYURI FUKUGAUCHI

UNESP – FEG

de modo especial, aos meus irmãos William e Brian,
que alegam os meus dias.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha mãe Érica, meu tio Marinho e meus avós Mario e Satie, por toda a educação, apoio e força durante a minha caminhada até aqui.

ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira, com o qual pude partilhar momentos cruciais da minha formação como engenheiro.

aos engenheiros e amigos Luiz Fernando Chiyoda, Ricardo Braga, Rafael Diniz e Marcelo Ribeiro, pela irmandade, ajuda e noites de estudo. Não esquecendo da Laís Horimoto, Fábio Catão, Heitor Carlésimo e Yuri Andrezza, por terem tornado meu intercâmbio mais fácil e agradável.

aos professores Tomaz Hashimoto, Roberto Cornetti e Carlos Ebinuma, pelo exemplo dado.

à aluna de doutorado Cristina Fukugauchi, por todo o auxílio técnico e teórico durante os estudos e pesquisas deste trabalho.

E por fim, mas não menos importante, à República Seis de Paus, seus moradores e ex-moradores, por fazerem parte de toda esta história.

“Seja rápido como o vento,
silencioso como uma floresta,
ousado como o fogo e
inabalável como uma montanha”

Sun Tzu.

HARADA, A. **Técnicas de caracterização microestrutural, por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, de aços bifásicos e multifásicos aplicados à indústria automobilística.** 2014. 42 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Neste projeto foram desenvolvidas técnicas de caracterização microestrutural de aços bifásicos (*dual-phase steel*) e multifásicos (*TRIP steel*) comerciais, fornecido por indústria automobilística, aplicados atualmente como matéria-prima na produção de veículos. Neste contexto está inserido o desenvolvimento de novos aços avançados de alta resistência em consonância com o projeto ULSAB-AVC, que visa a produção de veículos seguros, viáveis economicamente e eficientes no consumo de combustível para o século 21. Foi realizada a caracterização microestrutural dos aços bifásico e multifásico, através da identificação e quantificação das fases presentes em coexistência. Neste item, serão destacadas às técnicas de caracterização microestrutural, que foram realizadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Uma importante contribuição foi a utilização de diferentes reagentes químicos (Beraha, técnicas de “Heat-Tinting”), além dos reagentes convencionais (Nital, solução aquosa de metabissulfato de sódio e “LePera”), já utilizados pelo Grupo de Pesquisa em Caracterização Mecânica, Microestrutural e Fractográfica de Materiais da UNESP. As microestruturas foram correlacionadas com as propriedades mecânicas do material, que foram determinadas por intermédio de ensaios de tração, objetivando a determinação da resistência à tração, do limite de escoamento e do alongamento, tendo em vista que este material tem aplicação estrutural na indústria automobilística. Como resultado foi verificada a superioridade das propriedades mecânicas dos aços bifásicos e multifásicos, se comparados aos aços carbono convencionais. Além disso, foi observado um enorme potencial na utilização industrial da técnica de Heat-Tinting, devido à sua melhor diferenciação das fases e à sua maior reprodutibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Aços automobilísticos. Dual Phase steel. TRIP Steel. Metalografia.

HARADA, A. **Microstructural characterization technics using optical and scanning electron microscopy of dual-phase and multiphase steels applied to the automotive industry.** 2014. 42p. Undergraduate Coursework (Undergraduate on Mechanical Engineering) – Engineering School of Guaratinguetá Campus, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

This project developed microstructural characterization technics of commercial dual-phase and multi-phasic (TRIP) steels that were provided by the automotive industry and are currently used as the raw material for the production of automobiles. Inserted in this context, there is the development of the advanced high strength steels in consonance with the ULSAB-AVC project, which aims the production of safe, economically viable and efficient in terms of fuel consumption vehicles for the 21st century. The micro-structural characterization of biphasic and multiphase steels was done by the identification and quantification of the coexistent phases. In this item, a special attention was given to the technics that were performed using optic microscopy and scanning electron microscopy. An important contribution to this work was the utilization of different alternative chemical reagents (Beraha, “Heat-Tinting” technics) in addition to the classical ones (Nital and “LePera”) already used conventionally by the UNESP’s Group of Mechanical, Microstructural and Fractographic Characterization of Materials. The revealed microstructures were correlated with the materials' mechanical properties determined through traction tests, such as ultimate tensile strengths, yield strength and stretching important since the material has structural application in the automotive industry. As a result, it was observed the superiority concerning the studied mechanical properties for the biphasic and multiphase steels when compared to the conventional carbon steels. Besides, it was perceived a large potential for the industrial scale utilization of the Heat Tinting technics in this field, seen its differentiation of the existent phases and easy reproducibility.

KEYWORDS: Automobile steels. Dual Phase steel. TRIP Steel. Metallography

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do carro Smart ForTwo 2014, com destaque para os aços multifásicos.	12
Figura 2 – <i>Crash Test</i> Smart ForTwo, vista lateral do passageiro.....	13
Figura 3 – <i>Crash Test</i> Smart ForTwo, vista lateral do motorista.....	13
Figura 4 – Diagrama Ferro-Carbono.....	15
Figura 5 – Diagrama TTT de um aço eutetoide.	17
Figura 6 – Aplicações dos aços bifásicos na indústria automobilística.	18
Figura 7 – Aplicações dos aços multifásicos na indústria automobilística.....	19
Figura 8 – Serra de Fita Vertical, ROMARFRA.	24
Figura 9 – Máquina para embutimento, PANTEC.	24
Figura 10 – Politriz PANAMBRA INDUSTRIAL E TÉCNICA S.A.....	26
Figura 11 – Aço Bifásico. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500x.....	30
Figura 12 – Aço Bifásico. Ataque: LePera 1:1. Ampliação 500x.....	31
Figura 13 – Aço Bifásico. Ataque: Heat-Tinting. Ampliação 500x.	31
Figura 14 – Aço Multifásico. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500x.	32
Figura 15 – Aço Multifásico. Ataque: LePera 1:1. Ampliação: 500x.	33
Figura 16 – Aço Multifásico. Ataque: Heat-Tinting. Ampliação: 500x.	34
Figura 17 – Aço Bifásico. Análise MEV. Ampliação: 2000x.	35
Figura 18 – Aço Multifásico. Análise MEV. Ampliação: 5000x.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos aços em análise (% em peso).....	22
Tabela 2 – Frações volumétricas das fases coexistentes dos aços em análise.....	34
Tabela 3 – Propriedades mecânicas resultantes do ensaio de tração.....	37

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	AÇOS	15
2.2	AÇOS BIFÁSICOS	18
2.3	AÇOS MULTIFÁSICOS	19
2.4	MICROSCOPIA ÓPTICA	20
2.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	MATERIAIS	22
3.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	23
3.3	METALOGRAFIA	23
3.3.1	Coleta de Amostras	23
3.3.2	Embutimento	24
3.3.3	Lixamento	25
3.3.4	Polimento	25
3.4	ATAQUES QUÍMICOS	26
3.4.2	LePera 1:1	27
3.4.3	Heat-Tinting	28
3.5	MICROSCOPIA ÓPTICA	28
3.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	29
4.1.1	Análise Qualitativa	29
4.1.1.1	Aços Bifásicos	29
4.1.1.2	Aços Multifásicos	32
4.1.2	Análise Quantitativa	34
4.1.3	Análise MEV	35
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	37
5	CONCLUSÕES	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	40

1 INTRODUÇÃO

A inovação sempre esteve vinculada ao desenvolvimento tecnológico e para a indústria siderúrgica o marco foi nos anos 70 com o desenvolvimento de novos aços. Neste período, o principal objetivo das indústrias produtoras de aço foi fomentar as montadoras de veículos com um material avançado de alta resistência, para que fossem atingidos, em seu produto final, os seguintes requisitos: aumento da integridade estrutural e da resistência ao choque com redução do peso e do custo. A estes requisitos também poderia ser adicionada a demanda crescente dos consumidores por maior segurança e por maior quantidade de itens de conforto nos automóveis. Além disso, quando feita uma análise atual e global da utilização e das potencialidades do aço, deve-se incluir as questões ambientais envolvidas tais como redução no consumo de combustível, diminuição na emissão de poluentes e melhores condições de reciclagem do material. Quando avaliados do ponto de vista da matéria-prima, os automóveis são compostos, em média, de 70% de aços, sendo, o material predominante na indústria automobilística (PEREIRA, 2004).

Até hoje, a redução do peso dos veículos é um desafio para a indústria automobilística e, provavelmente, nenhum material oferece tanto potencial para reduzir massa e diminuir custos, aliado a significativas melhorias no desempenho estrutural de um veículo, como o aço. No auge da crise do petróleo, entre 1975 e 1985, a indústria automobilística norte-americana conseguiu reduções de peso no projeto de seus carros em cerca de 35%, passando de um peso total de 1936kg para 1260kg, em média (PEREIRA, 2004).

Em 1994, um consórcio dos principais produtores de aço mundiais uniu-se para desenvolver um novo conceito de fabricação de automóveis, denominado *Ultralight Steel Auto Body* (ULSAB). Este consórcio teve como principais objetivos o desenvolvimento de um automóvel leve, seguro e eficiente quanto ao consumo de combustíveis. Um dos pontos mais importantes foi à utilização de novos tipos de aços, a serem aplicados na fabricação deste veículo do futuro, entre os quais os aços de alta-resistência e os aços avançados de alta resistência. Dentre os aços de alta-resistência, destacam-se os aços bifásicos, os aços com ultra-baixo teor de carbono com interstícios livres (*interstitial-free steels* – IF) e os aços multifásicos (PEREIRA, 2004).

Para o século vinte e um, este desafio continua. A redução de peso foi conseguida atualmente, é baseada em três fatores: diminuição do tamanho dos veículos, substituição de

materiais convencionais por outro de menor densidade e a substituição do aço ao carbono tradicional pelos aços de alta-resistência, com propriedades mecânicas superiores. Ou seja, o desenvolvimento de novos tipos de aços em resposta ao desafio do racionamento de energia e aos novos materiais (PEREIRA, 2004).

Um exemplo que representa perfeitamente esta evolução e a adesão das indústrias à esses materiais avançados pode ser dado pelos carros da marca Smart, pertencentes ao grupo Mercedes-Benz. O modelo ForTwo 2014 possui um peso total de 1100 kg. A Figura 1 mostra a estrutura deste carro, onde os aços multifásicos estão destacados.

Figura 1 – Estrutura do carro Smart ForTwo 2014, com destaque para os aços multifásicos.



Fonte: <http://www.thesmart.ca/ca/en/index/smart-fortwo-electric-drive/safety.html>

Na Figura 1 possível observar que os principais componentes estruturais do veículo utilizam aços multifásicos, componentes como: viga do para-choque, viga da porta, coluna B, vigas de ligação, longarinas, entre outros elementos estruturais.

Em quesitos de segurança, ponto importante exigido pelos consumidores, o Smart ForTwo, passou em todos os testes de colisão. As figuras 2 e 3 mostram alguns dos resultados do *crash test* realizado com o veículo, em colisão frontal do motorista à 50 km/h contra um veículo, com o dobro do peso, à mesma velocidade.

Figura 2 – *Crash Test Smart ForTwo*, vista lateral do passageiro.



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=v708z67ALww>

Figura 3 – *Crash Test Smart ForTwo*, vista lateral do motorista.



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=v708z67ALww>

A Figura 2 mostra, em destaque, que a cabine dos passageiros ficou intacta após a colisão, na qual a maior parte da estrutura utiliza aços multifásicos. A Figura 3, vista do lado do condutor, confirma que mesmo no lado do choque a cabine de passageiros e principalmente a coluna A não apresentou recuo ou possuiu um recuo mínimo.

1.1 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Caracterização mecânica do aço fornecido pela montadora da área automobilística.
- Caracterização microestrutural do aço bifásico e do aço multifásico fornecido pela montadora, através de identificação e quantificação das fases presentes em coexistência.
- Contribuição para o desenvolvimento tecnológico de aços avançados de alta-resistência, através da geração de conhecimentos e técnicas nas Universidades, que serão publicados continuamente, acelerando uma possível transferência para o setor produtivo, em especial à indústria automobilística.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

As ligas ferro-carbono que contém de 0,008% a 2,11% de carbono são denominadas aços. Já para valores superiores a 2,11% obtemos os ferros fundidos. Os aços comerciais não são ligas binárias, pois apesar de serem constituídos predominantemente por ferro e carbono, possuem elementos residuais originados do processo de fabricação (CHIAVERINI, 1996).

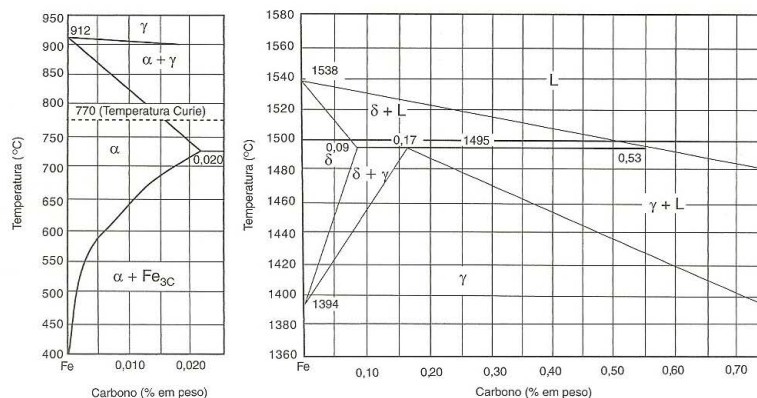
A microestrutura dos aços é responsável por suas características e propriedades mecânicas. O diagrama de fases Ferro-Carbono ou Ferro-Cementita, representado na Figura 4, mostra as fases que são formadas com o resfriamento do aço em condições de equilíbrio.

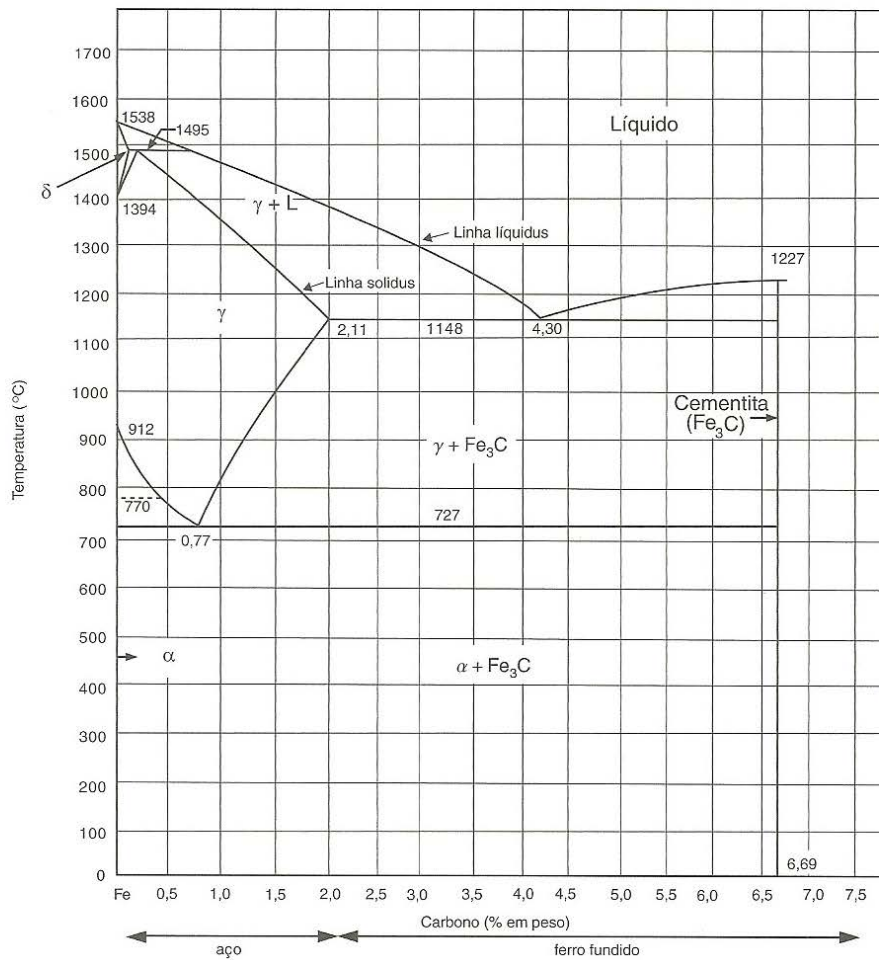
A ferrita α é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cúbica de corpo centrado - CCC (SILVA e MEI, 2010), possuindo baixa dureza e baixa resistência à tração, mas com excelente resistência ao choque e elevado alongamento (CHIAVERINI, 1996).

A austenita (γ) é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cúbica de face centrada – CFC, existindo entre as temperaturas de 727 e 1495°C (SILVA e MEI, 2010). Com o resfriamento do aço, a austenita é a fase que se transforma nas demais. Possui uma estrutura de grãos poligonais irregulares, com boa resistência mecânica e apreciável tenacidade (CHIAVERINI, 1996).

O carboneto de ferro (Fe_3C) ou cementita possui uma estrutura ortorrômbica, alta dureza, quebradiça. Assim, a cementita é a responsável pela elevada dureza e resistência dos aços com altos teores de carbono, bem como pela menor ductilidade (CHIAVERINI, 1996).

Figura 4: Diagrama Ferro-Carbono

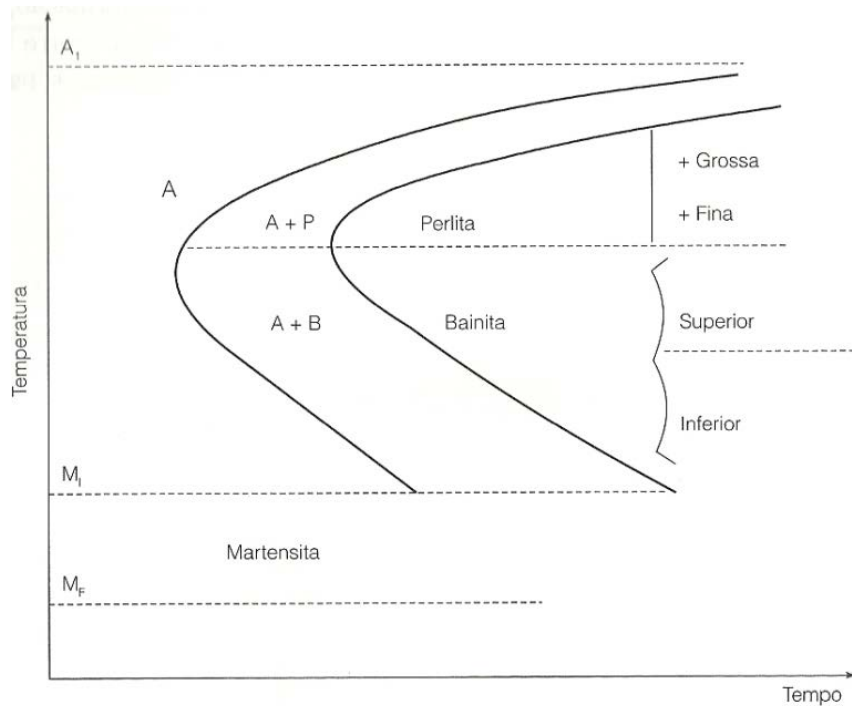




Fonte: SILVA e MEI, 2010.

Visando a otimização das propriedades dos aços, estes materiais são submetidos a tratamentos térmicos ou termomecânicos que alteram suas estruturas. Os tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento controlados que são baseados no diagrama TTT (Tempo-Temperatura-Transformação), onde para cada aço em específico, existe um diagrama diferente. A Figura 5, representa um diagrama TTT de um aço eutetoide (%C = 0,8%). Os tratamentos termomecânicos são aqueles que utilizam operações de aquecimento e resfriamento controlados, conjugados a etapas de conformação mecânica (SILVA e MEI, 2010). Dependendo do tipo de tratamento térmico realizado no material, outras microestruturas podem ser formadas, a martensita e a bainita.

Figura 5 – Diagrama TTT, Aço eutetóide



Fonte: SILVA e MEI, 2010.

A perlita não é uma fase, e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas dispostas alternadamente (SILVA e MEI, 2010). Suas propriedades são intermediárias entre a ferrita e a cementita, mas também dependem da espessura de suas lamelas, que é uma função da taxa de resfriamento do aço.

A martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita, sendo uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado – TCC. Os grãos dessa estrutura apresentam-se na forma de ripas em aços de menor teor de carbono ou de agulhas em aços com maiores teores de carbono (SILVA e MEI, 2010). Dentre as microestruturas presentes no aço, a martensita é a que apresenta maior dureza, resistência mecânica e fragilidade.

A bainita é formada por um processo misto que envolve difusão, como na formação da ferrita e da perlita, e forças de cisalhamento, como nas transformações martensíticas. É formada por ferrita e cementita, mas apresenta uma estrutura diferente da perlita (SILVA e MEI, 2010). Suas propriedades mecânicas são intermediárias a das estruturas perlíticas e martensíticas, gerando uma boa combinação de resistência e tenacidade.

2.2 AÇOS BIFÁSICOS

Os aços bifásicos, comumente chamados de *Dual-Phase* ou DP, são aços que possuem baixo teor de carbono, formados basicamente por ferrita e martensita, com teores desprezíveis de austenita retida e bainita. A fase ferrítica é a responsável pela ductilidade e conformabilidade e a fase martensítica é a responsável pela dureza e resistência mecânica. (PEREIRA, 2009; CINGARA, OSOSKOV, JAIN e WILKINSON, 2009).

Esse tipo de aço tem a capacidade de aliar propriedades antagônicas, a alta resistência mecânica com a boa conformabilidade. Possuem alta taxa de encruamento, escoamento contínuo (GORNI e BRANCHINI, 1989), boas propriedades dinâmicas (THYSSENKRUPP STEEL, 2008) e boas propriedades em fadiga (PEREIRA, 2009).

Os aços bifásicos são largamente aplicados na indústria automobilística para a produção de discos, aros de rodas, pára-choques, chassis, suspensão (GORNI e BRANCHINI, 1989), partes externas das portas e porta-malas (PEREIRA, 2009) ou ainda componentes estruturais e vigas (THYSSENKRUPP STEEL, 2008). Na Figura 6 são apresentados exemplos de aplicações dos aços bifásicos na indústria automobilística.

Figura 6 – Aplicações dos aços bifásicos na indústria automobilística



Fonte: SAMPAIO, 2011

2.3 AÇOS MULTIFÁSICOS

Os aços multifásicos, também denominados aços TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*) devido ao seu processo de produção, possuem uma microestrutura constituída de ferrita, martensita, bainita e austenita retida. A formação de austenita retida e bainita melhoram as propriedades mecânicas do material, sendo que ambas são responsáveis pela melhora da ductilidade e da conformidade e a segunda melhora também a resistência mecânica, compensando a perda de resistência mecânica devido a não formação de martensita (PEREIRA, 2009). Na Figura 7 são apresentados exemplos de aplicações dos aços multifásicos na indústria automobilística.

Figura 7 – Aplicações dos aços multifásicos na indústria automobilística



Fonte: SAMPAIO, 2011

2.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

Dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços, a mais comum é a microscopia óptica, onde emprega-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador (COLPAERT, 2008).

Existem dois fatores muito importantes na microscopia óptica. O primeiro é o aumento, cujo máximo neste tipo de análise é por volta de 1400x. Ampliações superiores a esta não fornecem informações adicionais àquelas obtida com o aumento de 1400x. O segundo é o foco e para que uma superfície possa ser analisada perfeitamente em foco, é necessário que ela seja bastante plana e esteja perfeitamente perpendicular ao eixo óptico, assim, cuidados com a planicidade da amostra e, em especial, com o possível arredondamento dos cantos durante o polimento, são preocupações básicas para obtenção de uma boa amostra (COLPAERT, 2008).

2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Diferentemente do microscópio óptico que emitem fótons em seu funcionamento, o microscópio eletrônico de varredura eletrônico (MEV) utiliza um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, que exploram a superfície da amostra ponto a ponto, por linhas sucessivas. Com isso, aparelhos modernos de microscopia eletrônica conseguem aumentos de até 300 mil vezes (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

O MEV é um equipamento que fornece informações sobre a morfologia e a constituição química do material sólido com alta resolução e precisão, isso devido as diferentes formas de interação entre a emissão de elétrons e a superfície da amostra (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007). As duas interações importantes para esse trabalho são: os elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE).

Os elétrons secundários resultam da interação do feixe de elétrons com o material da amostra gerando elétrons de baixa energia (inferiores à 50eV) e assim, formando imagens

com alta resolução. O contraste da imagem é dado, principalmente, pelo relevo da amostra, fazendo com que esta técnica seja o principal modo de formação de imagens do MEV.

Os elétrons retroespalhados fornecem elétrons com energia superior à 50eV e assim, as imagens geradas podem ser topográficas (em função do relevo) ou imagens de composição (em função do número atômico dos elementos presentes na amostra).

Os parâmetros que mais influenciam na resolução da imagem em um MEV são: tensão de aceleração dos elétrons, diâmetro do feixe, distância de trabalho (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho são: o aço bifásico DP-600 e o aço multifásico TRIP-800. Ambos os materiais são, atualmente, utilizados nas linhas de produção de montadoras de veículos comerciais. Esses aços foram fornecidos na forma de chapas de 300mm x 300mm, com 0,8mm de espessura.

A composição química dos materiais está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos aços em análise (% em peso).

Elementos	DP-600	TRIP-800
C	0,1334	0,205
Si	0,37	0,87
Mn	1,41	0,28
P	0,016	0,027
S	0,003	0,003
Cr	0,194	0,015
Ni	0,001	<0,001
Mo	0,102	0
Al	0,037	0,04
Cu	0,007	0
Ti	0,012	<0,001
V	0,002	<0,001
Nb	0,003	<0,001
B	0,0004	0

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

A facilidade de execução e a reprodutividade dos resultados tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios mecânicos de materiais metálicos (SOUZA, 1982).

A partir do material fornecido pela montadora, foram obtidos corpos-de-prova para a realização de ensaios de tração monotônica. Os corpos-de-prova foram usinados na Oficina de Apoio a Pesquisa do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG) da UNESP, criada através do projeto FAPESP (96/10289). Os corpos-de-prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E8M, 2011.

Neste ensaio foram avaliados os limites de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento do material.

3.3 METALOGRAFIA

A análise metalográfica foi realizada por meio de microscopia óptica, no Laboratório de Metalografia e Análise de Imagens dos Materiais – LAIMat da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da UNESP. As amostras foram confeccionadas de acordo com a norma ASTM E3, 2011. As amostras foram preparadas pelo seguinte procedimento:

3.3.1 Coleta de Amostras

A partir das chapas de aço foram seccionadas duas amostras transversais de cada tipo de aço. O corte das chapas foi realizado com a serra de fita vertical, do fabricante ROMARFRA – modelo RMF 400-S (Figura 8) da Oficina de Usinagem do DMT/FEG/UNESP.

Figura 8 – Serra de Fita Vertical, ROMARFRA.



Fonte : Autor do trabalho.

3.3.2 Embutimento

Todas as amostras seccionadas foram submetidas ao embutimento a quente durante um período de 30 minutos, utilizando a máquina do fabricante PANTEC – modelo PANPRESS 30 (Figura 9).

Figura 9 – Máquina para embutimento, PANTEC.



Fonte : Autor do trabalho.

As amostras analisadas por microscopia óptica foram embutidas com resina fenol-formol (baquelite) de cor preta, do fabricante BUEHLER – tipo Phenocure. Já as amostras submetidas a análises de microscopia eletrônica de varredura foram embutidas com resina fenol-formol condutora a base de grafite, para que não existisse reação entre o aço embutido e a baquelite, do fabricante Allied High Tech Products Inc.

3.3.3 Lixamento

As amostras embutidas e limpas foram lixadas com lixas d'água na sequência granulométrica de 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500 mash. A cada troca de lixa rotacionou-se a face do corpo-de-prova a ser lixado num ângulo de 90°, até que os riscos fiquem paralelos uns aos outros, sendo visível a eliminação dos riscos da lixa anterior.

A avaliação da superfície, durante o processo, foi feita com auxílio de um microscópio óptico de bancada.

3.3.4 Polimento

O polimento, responsável pelo acabamento da superfície, foi realizado com suspensão de sílica coloidal de 0,05 μ m, do fabricante Allied High Tech Products Inc., sobre um pano para polimento, do mesmo fabricante – modelo Chem-Pol Adhesive Back, tamanho de 8”.

Antes da utilização do pano para polimento, ele deve ser limpo com água destilada. A amostra deve ser levemente pressionada contra o pano, instalado em uma politriz. A máquina politriz utilizada é do fabricante PANAMBRA INDUSTRIAL E TÉCNICA S.A. – modelo DP-10 (Figura 10), em 300 rpm.

Figura 10 – Politriz PANAMBRA INDUSTRIAL E TÉCNICA S.A.



Fonte : Autor do trabalho.

O polimento deve ser efetuado até que a superfície em análise se apresente totalmente espelhada e sem riscos remanescentes do processo de lixamento. Para isso, foi utilizado o microscópio óptico de bancada para verificar a possível existência destes riscos.

Após todo o processo de polimento, a amostra foi limpa com álcool etílico por meio de um leve esfregamento com algodão, visando a remoção da sílica na superfície do material. Em seguida, a amostra foi seca com um jato de ar frio.

3.4 ATAQUES QUÍMICOS

Com a superfície polida, realizou-se os ataques químicos com o objetivo de diferenciar as microestruturas presentes no material, desta forma, permitindo sua identificação e quantificação.

Os ataques químicos realizados foram: Nital 2%, LePera 1:1, Metabissulfito de Sódio 10%, Beraha e Heat-Tinting, para cada um dos aços.

3.4.1 Nital 2%

O reagente Nital 2% é composto por 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico. As amostras foram atacadas por meio de esfregamento, durante um período de oito segundos para o aço bifásico e quatro segundos para o aço multifásico. Após esse período, a amostra foi lavada com água corrente para interromper o ataque químico e em seguida seca por meio de um jato de ar frio. Em caso de ataque excessivo, realizou-se novamente o processo de lixamento com a última lixa e posteriormente o polimento da amostra para um novo ataque. O ataque com Nital tem como finalidade revelar os contornos da microestrutura, propiciando o contraste entre as fases claras e escuras, onde para os aços bifásicos a fase clara é devido a presença de ferrita e a escura de martensita, e para os aços multifásicos as fases claras são identificadas como ferrita juntamente com austenita retida e as fases escuras como martensita com bainita (ANGELI, FÜREDER e KNEISSL, 2005).

3.4.2 LePera 1:1

O reagente LePera 1:1 é composto por uma solução de 1 para 1 de Picral 4% (4% de ácido pícrico em solução de álcool etílico) com metabissulfeto de sódio 1% em solução aquosa. As amostras foram atacadas por meio de imersão, durante um período de 12 segundos para o aço bifásico e 10 segundos para o aço multifásico. Após esse período, a amostra deve ser imersa em água, durante um período de dois minutos, para interromper o ataque e em seguida seca naturalmente por exposição ao ambiente. O ataque com LePera tem como finalidade diferenciar estruturas que não se destacam com o ataque com Nital. Assim, para o aço multifásico é possível determinar as estruturas ferríticas, bainíticas e martensíticas que se apresentam juntamente com as estruturas de austenita retida.

3.4.3 Heat-Tinting

O *Heat-Tinting* é uma técnica que visa analisar a microestrutura do material realizando um tratamento térmico no mesmo, depois de atacado. Para realização do Heat-Tinting, o material deve ser pré-atacado com Nital 2%, por um tempo de 2 segundos para o TRIP e 4 segundos para o DP, ou seja, o ataque não deve atingir o ponto ótimo do Nital 2%. Feito este pré-ataque, remove-se a baquelite do material e em seguida leva-se ao forno, a 260°C – Forno da marca Quimis, modelo Mufla com controlador digital - por um período de 2 horas para o DP e 3 horas para o TRIP. A vantagem desse tratamento sobre o Nital é que, o Nital é capaz de distinguir apenas duas fases num aço multifásico. Já o Heat-Tinting, quando a peça é pré-atacada e depois submetida ao forno, o ataque químico é corroído e assim, é possível distinguir três (bainita, ferrita e martensita com austenita retida) das quatro fases do aço TRIP.

3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA

Após os ataques químicos as micrografias foram obtidas no LAIMat do DMT/FEG/UNESP, tendo sido fotografadas utilizando o microscópio óptico Nikon EPIPHOT 200, acoplado a um microcomputador e uma câmera Axiocam ICc3-ZEISS.

Foram capturados 20 campos representativos do material, na ampliação de 500x, a mais adequada para analisar a microestrutura final dos aços DP e TRIP.

O processamento digital das imagens foi realizado utilizando o software ImageJ, possibilitando a quantificação das frações volumétricas das fases presentes nos aços em estudo.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise metalográfica por microscopia eletrônica de varredura foi realizada após um ataque químico com Nital 2%. Para o aço DP foram utilizados 12 segundos e para o aço TRIP 10 segundos.

Após os ataques químicos, as micrografias foram obtidas no LAIMat do DMT/FEG/UNESP, tendo sido utilizado o microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 com EDS Oxford Inca X-Act, usando o detector de elétrons secundários em alto vácuo.

Foram capturados campos na ampliação de 500x, 2000x, 5000x e 10000x, para ambos os aços. Para a análise da composição química foram obtidos dez espectros de cada material e em seguida calculada a média das concentrações de cada elemento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As análises de microscopia óptica, juntamente com os ataques químicos, forneceram tanto uma análise qualitativa, quanto quantitativa.

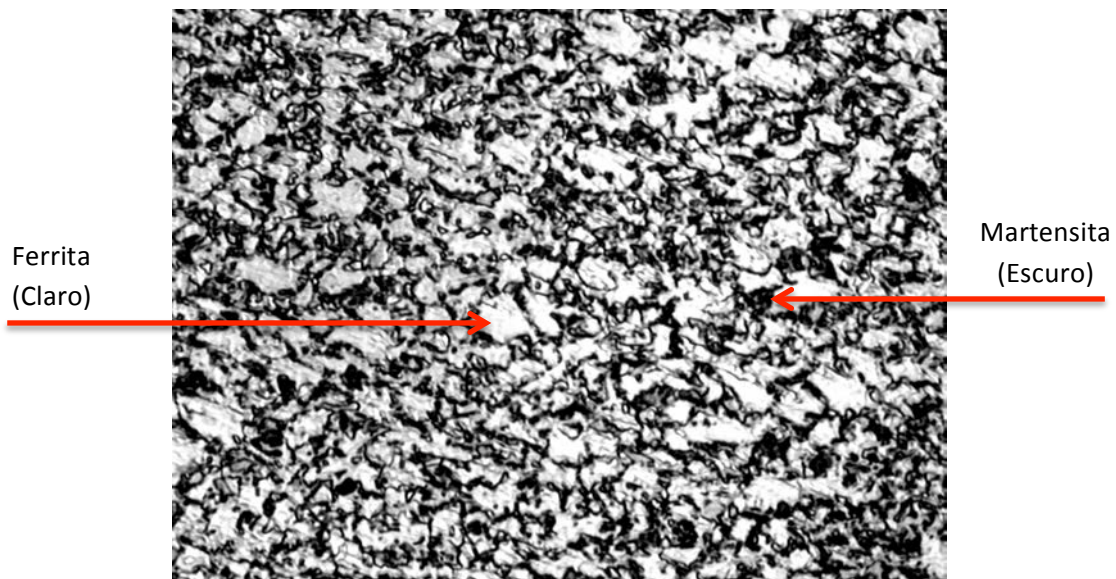
4.1.1 Análise Qualitativa

4.1.1.1 Aços Bifásicos

Para os aços bifásicos, tanto o ataque químico com Nital, quanto o ataque químico com LePera apresentaram resultados semelhantes, uma vez que a estrutura deste aço é composta basicamente de duas fases, a martensita e ferrita (com níveis desprezíveis de austenita retida), e ambas são identificadas por coloração diferente nos dois tipos de ataque.

A Figura 11 representa o aço bifásico submetido ao reagente químico Nital 2%. A Figura 12 representa o mesmo material submetido ao reagente LePera 1:1.

Figura 11 – Aço Bifásico. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500x.

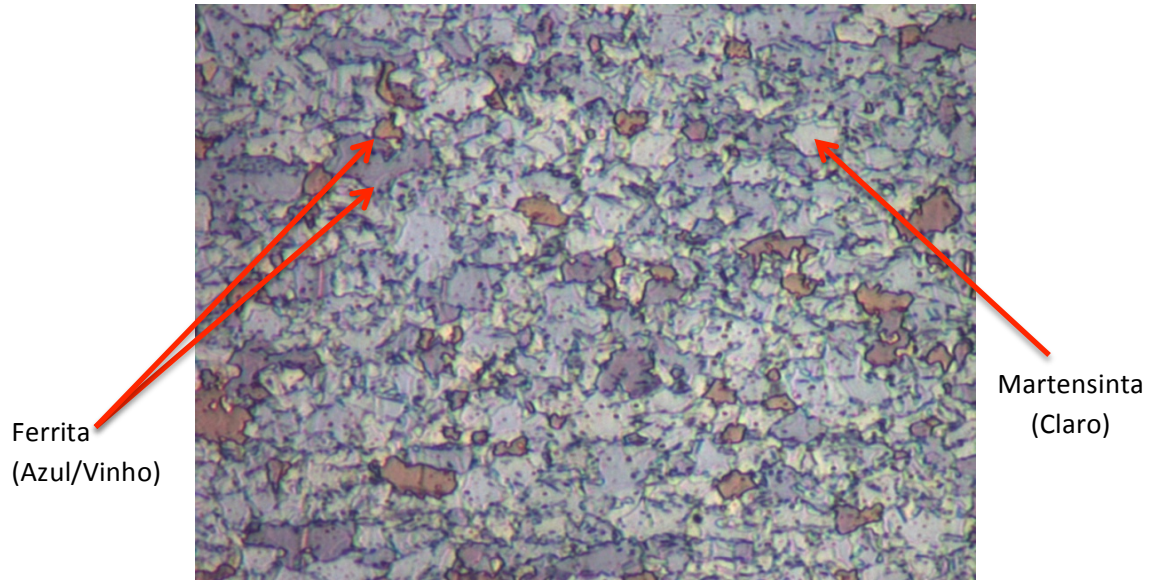


Fonte : Autor do trabalho.

Analisando a Figura 11, nota-se que no ataque com Nital há predomínio de regiões mais claras do que regiões escuras. As regiões claras representam as fases de ferrita, já as regiões escuras as fases de martensita.

Um raciocínio análogo pode ser aplicado ao reagente LePera. Analisando a Figura 12, observa-se o predomínio de regiões azuladas/avermelhadas ao invés de regiões esbranquiçadas. Onde as regiões azuladas/avermelhadas representam as fases de ferrita, já as regiões esbranquiçadas as fases de martensita. Deve-se destacar que: as fases de ferrita deveriam aparecer totalmente em tons azulados, a presença de grãos com coloração avermelhada é graças a alguma reação mais forte do reagente em alguns pontos da superfície, mas isso não descaracteriza os grãos de grãos ferríticos.

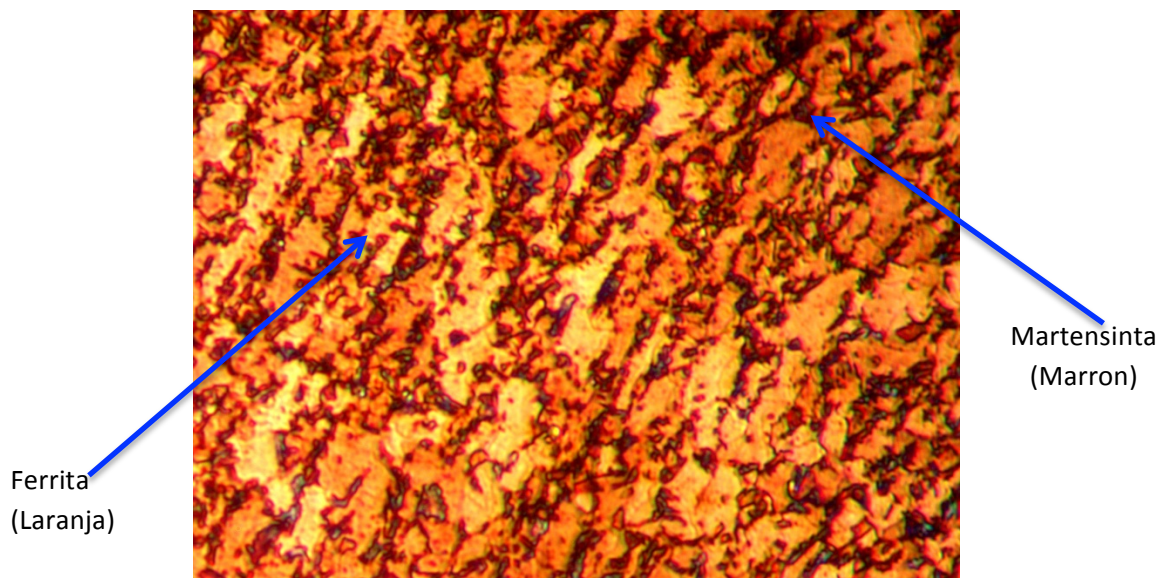
Figura 12 – Aço Bifásico. Ataque: LePera 1:1. Ampliação 500x.



Fonte : Autor do trabalho.

Analisando a Figura 13, ataque *Heat-Tinting*, verifica-se a existência de três tonalidades, uma cor mais clara (palha ou bege) meio alaranjada, marrom e azul. Visualmente a cor clara é predominante, representando a ferrita. Com as várias tentativas e experiências realizadas para obtenção de um resultado satisfatório, nota-se que superfícies super atacadas ou que foram expostas excessivamente ao forno, passam da tonalidade marrom (às vezes rosa escuro) para o azul, desta forma pode-se afirmar que o marrom, juntamente com o azul, representam a martensita. Fato que era esperado para um aço bifásico.

Figura 13 – Aço Bifásico. Ataque: Heat-Tinting. Ampliação: 500x.



Fonte : Autor do trabalho.

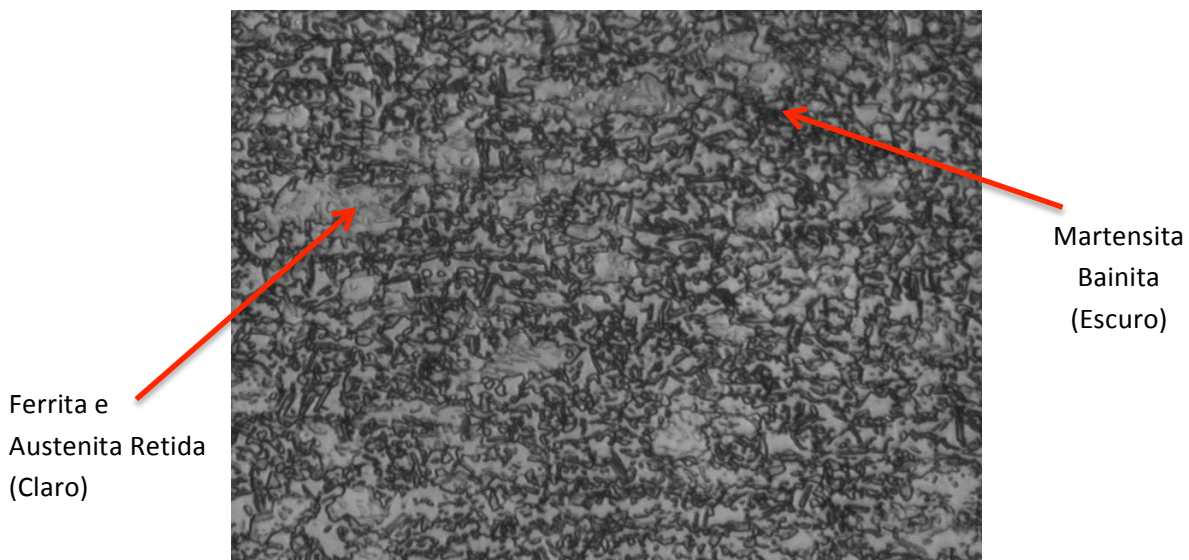
Um cuidado que deve ser tomado, é que esse tipo de ataque tende a empenar a amostra, uma vez que os corpos de prova estão submetidos às altas temperaturas e longos períodos no forno, dificultando a obtenção do foco na hora de fazer a análise microscópica, gerada pela falta de planicidade.

4.1.1.2 Aços Multifásicos

Para os aços multifásicos existe uma grande diferença entre o ataque químico com Nital e com LePera, pois o primeiro diferencia a estrutura em apenas duas colorações e assim, não é muito efetivo uma vez que a estrutura do aço TRIP apresenta quatro fases. Já o segundo apresenta um resultado mais significativo, pois diferencia a estrutura em três colorações.

A Figura 14 representa o aço TRIP submetido ao ataque químico com Nital 2%. A Figura 15 representa o mesmo material submetido ao reagente LePera.

Figura 14 – Aço Multifásico. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500x.



Fonte : Autor do trabalho.

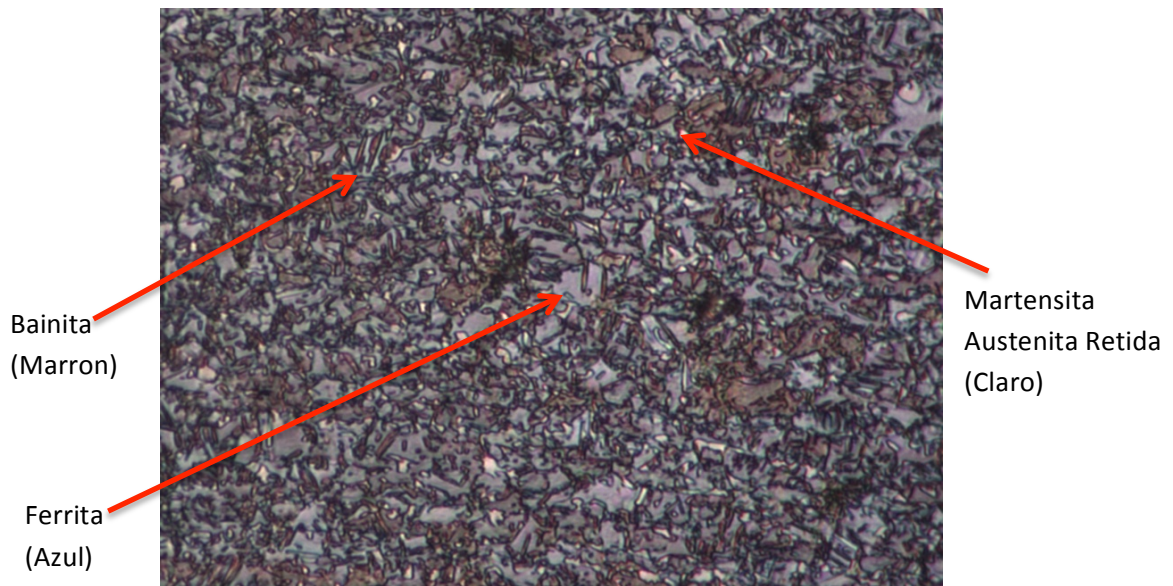
Analisando a Figura 14, observa-se que diferentemente do aço bifásico que apresentava um largo predomínio de regiões mais claras do que escuras, isso não acontece no aço multifásico, onde as regiões claras e escuras aparecem em razões próximas. Mesmo assim, analisando qualitativamente, existe um domínio das regiões mais claras, que são devido as

fases de ferrita e austenita retida, do que as regiões escuras que são as fases de martensita e bainita.

O fato de uma tonalidade representar duas fases, mostra a menor eficiência do ataque com reagente Nital.

Outra comparação que pode ser feita é em relação ao tamanho dos grãos, que no aço bifásico apresentam-se bem maiores que os grãos dos aços multifásicos.

Figura 15 – Aço Multifásico. Ataque: LePera 1:1. Ampliação: 500x.

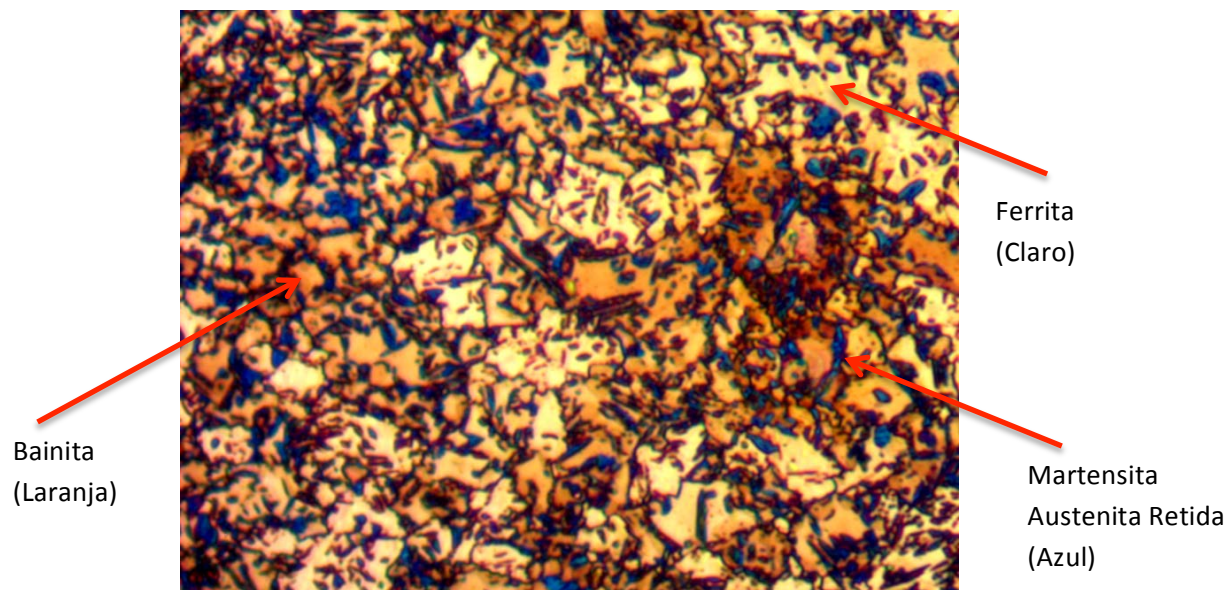


Fonte : Autor do trabalho.

Analisando a Figura 15 vê-se a diferença entre os ataques químicos Nital e LePera. Com o reagente LePera, conseguimos diferenciar três fases: as fases azuladas que representam os grãos de ferrita, as fases de tonalidade marron que representam os grãos de bainita e as tonalidades esbranquiçadas que representam os grãos de martensita juntamente com os grãos de austenita retida. Desta forma nota-se que existe um predomínio de estrutura ferrítica, seguido da estrutura bainítica e em menor quantidade a estrutura de martensita com austenita retida.

Analisando a Figura 16, nota-se a existência de três cores: uma cor bem clara, um alaranjado – diferente do aspecto visto na Figura 14, pois naquela situação a cor clara e o alaranjado se confundem, fato que não ocorre na Figura 16, podendo-se distinguir perfeitamente uma da outra – e o azul. Fazendo uma análise, seguindo a mesma linha de raciocínio do aço anterior, a cor clara, que é predominante, é ferrita. A cor alaranjada é a bainita e o azul é a martensita juntamente com austenita retida. Sendo assim, caracterizado, um aço multifásico.

Figura 16 – Aço Multifásico. Ataque: Heat-Tinting. Ampliação 500x.



Fonte : Autor do trabalho.

4.1.2 Análise Quantitativa

A quantificação das fases foi realizada por meio do software ImageJ, onde para cada amostra foram utilizados 20 campos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, na forma de fração volumétrica.

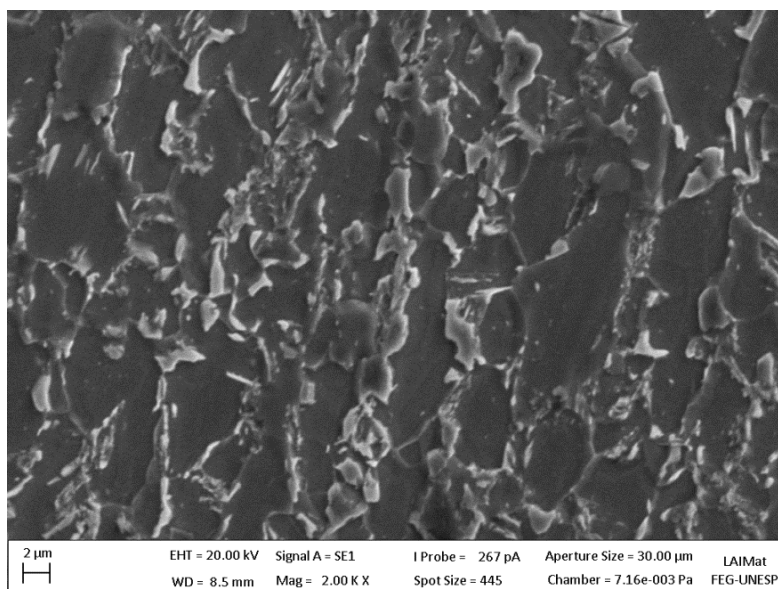
Tabela 2 – Frações volumétricas das fases coexistentes dos aços em análise.

Aço Bifásico DP-600				
Reagente	Ferrita		Martensita	
Nital 2%	78,9 % ± 0,91 %		21,1 % ± 0,91 %	
LePera 1:1	81,0 % ± 3,53 %		19,0 % ± 3,53 %	
Aço Multifásico TRIP-800				
Reagente	Ferrita	Austenita Retida	Martensita	Bainita
Nital 2%	57,63 % ± 2,71 %		42,37 % ± 2,71 %	
LePera 1:1	53,9 % ± 5,67 %	9,0 % ± 4,33 %		37,1 % ± 1,34 %

4.1.3 Análise MEV

Analisando o aço DP, Figura 17, por meio da interação de elétrons secundários (SE) é possível observar que se trata de uma matriz ferrítica com a presença de grãos de martensita. A matriz ferrítica é observada na tonalidade escura, que predomina no material. Em uma visão tridimensional, a ferrita aparenta estar localizada em mais profundamente, o que caracteriza ser a matriz do material. A granulação mais clara ou em relevo, por sua vez, é a martensítica

Figura 17 – Aço Bifásico. Análise MEV. Ampliação: 2000x.



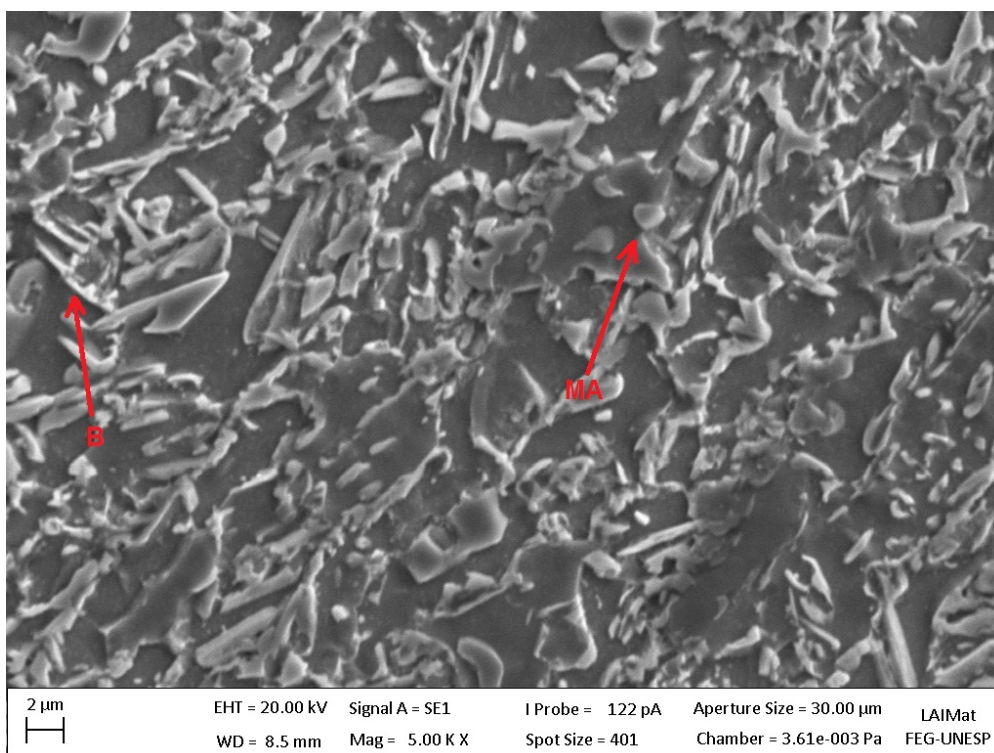
Fonte : Autor do trabalho.

Foi realizada uma análise de composição química do material e este aço apresentou 0,118%C em sua composição, juntamente com 0,202%Cr, 1,432%Mn e 0,536%Si, o que mostra resultados de qualidade na análise, devido à proximidade dos dados fornecidos pelo fabricante. O mais interessante é que o material apresenta-se perfeitamente homogêneo, uma vez que foram realizadas análises de composição química em diversas áreas do material e também nos diferentes grãos e esse percentual de carbono, cromo, manganês e silício se apresentou constante, mostrando assim a ótima qualidade do material. Graças ao baixo percentual de outros elementos, estes não puderam ser mensuráveis.

Analisando o aço TRIP, Figura 18, por meio da interação de elétrons secundários é possível observar que também se trata de uma matriz ferrítica, mas agora de um aço

multifásico, devido a existência de granulações de morfologias mais complexas e menores dimensões. As tonalidades escuras e mais profundas, são os grãos ferríticos. As tonalidades mais claras são mais difíceis de se avaliar, mas diferentemente do ataque com Nital e análise em microscopia óptica, o MEV possui grande ampliação e isso permite uma análise morfológica dos grãos.

Figura 18 – Aço Multifásico. Análise MEV. Ampliação 5000x.



Fonte : Autor do trabalho.

Os grãos claros mais arredondados e de menor dimensão são grãos de austenita retida com martensita, representados na Figura 18 pela sigla MA (martensita e austenita retida). Já os grãos claros e de formato mais longo e fino são estruturas bainíticas, representados pela sigla B (bainita).

Assim como para o DP, foi realizada a análise de composição química para o aço TRIP e o mesmo apresentou-se homogêneo em toda sua extensão, independentemente do tipo do grão, ferrítico, bainítico, austenítico ou martensítico.

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para avaliar as propriedades mecânicas dos aços foram realizados ensaios de tração. Foram ensaiados dois corpos de prova em cada seção: longitudinal, transversal e a 45° do sentido de laminação. Assim, foi possível obter os valores pra limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento, bem como determinar os índices de anisotropia (R) e de encruamento (n).

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas resultantes do ensaio de tração.

Aço Bifásico DP-600					
Bobina	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Índice R	Índice n
Transversal	623,8 ± 0,00	409,1 ± 0,65	23,34 ± 1,08	1,34 ± 0,13	0,15
Longitudinal	620,9 ± 0,75	405,2 ± 4,60	24,77 ± 0,53	1,14 ± 0,05	0,16
45°	626,3 ± 2,45	407,7 ± 2,00	22,05 ± 0,03	1,26 ± 0,10	0,15
Aço Multifásico TRIP-800					
Transversal	852,6 ± 2,45	538,6 ± 0,45	23,45 ± 0,05	1,04 ± 0,04	0,19
Longitudinal	852,6 ± 1,60	546,3 ± 1,95	23,8 ± 0,70	1,09 ± 0,01	0,19
45°	849,9 ± 0,50	541,2 ± 2,15	19,5 ± 0,04	1,03 ± 0,02	0,19
Aço Baixo Carbono (LC)					
Longitudinal	354	240	32	-	-

Analisando os resultados da Tabela 3 nota-se que os aços multifásicos apresentam limites de resistência à tração e limites de escoamento bem superiores (aproximadamente 30%) aos dos aços bifásicos com a mesma porcentagem de alongamento. Isso deve-se ao fato do aço TRIP apresentar uma estrutura contendo bainita e austenita retida, que melhoram as propriedades mecânicas do material.

Existem outros aços aplicados à indústria automobilística, como por exemplo o aço de baixo carbono (low carbon – LC), que apesar de apresentarem similaridade na composição química, possuem propriedades mecânicas bem inferiores aos dos aços bifásicos, como

resistência à tração de 354MPa, limite de escoamento de 240MPa e alongamento de 32% (PEREIRA, 2004).

Os aços LC apresentam uma estrutura predominantemente perlítica e ferrítica, fato que não pode ser observado nos aços bifásicos e multifásicos. A existência da estrutura martensítica, em substituição da estrutura perlítica, é o fator que justifica a superioridade de aproximadamente 100% na resistência à tração e limite de escoamento.

Desta forma, entende-se o motivo dos aços DP, e futuramente dos aços TRIP, serem largamente utilizados na indústria automobilística, pois estes materiais possuem a combinação de características antagônicas como: a boa resistência mecânica aliada a conformabilidade e a ductilidade.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos procedimentos experimentais, no levantamento bibliográfico e nos resultados das propriedades mecânicas e das micrografias dos aços bifásico e multifásico é possível concluir que:

- i. A caracterização mecânica, realizada por meio do ensaio de tração, mostrou que tanto os aços bifásicos quanto os aços multifásicos apresentam propriedades mecânicas superiores ao dos aços carbono convencionais, por exemplo, aços de baixo carbono.
- ii. Ambos os aços em análise neste projeto conseguem aliar duas propriedades antagônicas, a boa resistência mecânica com a boa ductilidade, justificando assim a larga aplicabilidade dos aços bifásicos no meio automobilístico e a potencial aplicação dos aços multifásicos no mesmo ramo da indústria.
- iii. Com a caracterização microestrutural foi possível observar que os aços bifásicos são compostos por ferrita e martensita, com o predomínio estrutural da ferrita.
- iv. Os aços multifásicos são compostos por mais estruturas que os aços bifásicos, sendo elas: ferrita, bainita, martensita e austenita retida. E por causa da existência dessa estrutura que os aços multifásicos apresentam melhores propriedades mecânicas se comparado com os aços bifásicos.
- v. Dentre todos os ataques químicos realizados, é possível afirmar que ainda não existe um reagente capaz de caracterizar todas as fases de um aço multifásico.
- vi. O Heat-Tinting é um ataque químico muito promissor, pois os ataques químicos que formam filme colorido sobre a amostra (LePera) são de difícil reprodutibilidade, o que pode tornar inviável sua utilização industrial. Como o Heat-Tinting utiliza o pré-ataque de Nital, que é de fácil realização, e ainda consegue distinguir fases que o Nital sozinho não distingue, pode-se dizer que o Heat-Tinting tem grande potencial para se tornar uma técnica largamente utilizada.
- vii. A análise de microscopia eletrônica de varredura é de grande utilidade para verificação da composição química e homogeneidade do material, fatores que influenciam diretamente em suas características mecânicas.
- viii. A grande vantagem da análise e utilização no MEV está no fato deste possuir uma grande ampliação, possibilitando assim a visualização da morfologia dos grãos que também tem influência direta na resistência mecânica do material.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 3**: Standard Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens , United States, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, United States, 2011.

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

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996. 576p.

CINGARA, G. A., OSOSKOV, Y., JAIN, M.K., WILKINSON, D.S.. **Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels. Elsevier, Materials Science and Engineering A**. 516. 7 – 16. 2009.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4.ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2008. 652p.

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

GORNI, A. A., BRANCHINI, O. L. G. **A produção de chapas de aço bifásico. Abril, Máquinas e Metais**. 84 – 89. 1989.

MARTINS, M.S. **Caracterização em Impacto e Fadiga o Aço Estrutural de Fases Complexas, Utilizado na Indústria Automotiva**. 176f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2011.

PEREIRA, M. S. **Novos aços para a indústria automobilística**. II Simpósio de Tecnologia – FATEC. 2009.

PEREIRA, M. S. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de um Aço Multifásico, em Consonância com o Projeto ULSAB-AVC**. 98 f. Tese (Livre Docência em Engenharia

Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2004.

SILVA, A. L. V. da C. e, MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. São Paulo: Editora Blucher. 2010. 646p.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 1.ed. São Paulo: Editora Blucher. 1982. 286p.

THYSSENKRUPP CATALOG. **DP-W® and DP-K® dual-phase steels for the manufacture of complex high-strength structural elements**. ThyssenKrupp Steel Europe, 2008.

ULTRALIGHT STEEL AUTO BODY FINAL REPORT, **ULSAB Executive Summary**, World Auto Steel, 1998.