

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 23/12/2016.

**CRISTINA SAYURI FUKUGAUCHI**

**Estudo dos Principais Parâmetros da Caracterização Microestrutural de Aços  
de Alta Resistência utilizando o Método de Taguchi**

Guaratinguetá - SP  
2016

**Cristina Sayuri Fukugauchi**

**Estudo dos Principais Parâmetros da Caracterização Microestrutural de Aços  
de Alta Resistência utilizando o Método de Taguchi**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá  
2016

F961e Fukugauchi, Cristina Sayuri  
Estudo dos principais parâmetros da caracterização microestrutural de aços de alta resistência utilizando o método de Taguchi / Cristina Sayuri Fukugauchi. – Guaratinguetá, 2016.  
232 f. : il.  
Bibliografia : f. 217-232

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Aço de alta resistência 2. Micrografia 3. Taguchi, Metodo de (Controle de qualidade) I. Título

CDU 669.14 (043)

*CRISTINA SAYURI FUKUGAUCHI*

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

*BANCA EXAMINADORA:*

  
Prof. Dr. MARCELOS DOS SANTOS PEREIRA  
Orientador / UNESP/FEG

  
Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA  
UNESP/FEG

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

  
Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO  
FATEA/Lorena

*Junho de 2016*

**DADOS CURRICULARES**  
**CRISTINA SAYURI FUKUGAUCHI**

NASCIMENTO	07.02.1979 – OSASCO / SP
FILIAÇÃO	Jorge Fukugauchi Helena Satio Hirayama Fukugauchi
1994/1998	Curso Técnico em Metalurgia Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”
1999/2007	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista
2009-2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

## AGRADECIMENTOS

Um longo caminho foi percorrido antes de este trabalho ser impresso: muita pesquisa, discussão, dúvidas, dedicação, suor e noites de sono perdidas. E mesmo com todo este esforço, ainda assim, as discussões que são realizadas neste trabalho não foram esgotadas, tampouco, são definitivas. Como poderiam ser? Se a cada década, ano, mês, semana, dias, ... as inovações na área de Materiais nos surpreendem!

Contudo, (como é necessário) do melhor modo possível, fecho este trabalho e esta etapa da minha vida, agradecendo a todas as pessoas que contribuíram para essa conquista:

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira, pelo constante apoio, incentivo, aprendizado, "puxões de orelha" e pelas "constantes" conversas;

ao Prof. Dr. Messias Borges Silva pelo inestimável apoio, paciência e conhecimento compartilhados durante a realização de todo Projeto;

ao Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro por todos os momentos de discussão deste trabalho;

ao Departamento de Química – FEG/UNESP pelo auxílio e fornecimento dos reagentes para ensaios metalográficos, em especial à Conceição Aparecida Matsumoto Dutra;

agradecimento especial ao aluno de graduação Antonio dos Reis de Faria Neto pela amizade e colaboração em todas as etapas deste projeto;

às funcionárias da biblioteca pela ajuda constante na busca por referências bibliográficas;

às funcionárias da seção de Pós-Graduação;

e, por fim, mas não menos importante: agradeço aos meus amigos que me ampararam e me suportaram nos bons e maus momentos, maus momentos esses muitas vezes ocasionados pelas palavras: "**ineditismo, pró-ativo e inovação**".

## RESUMO

O desempenho dos aços multifásicos é estreitamente relacionado com seus microconstituintes. Assim, a caracterização e controle efetivo da microestrutura desses materiais são cruciais, sendo que os processos de ataques químicos são essenciais para que isso ocorra. Neste contexto, com o intuito de discutir como os fatores envolvidos nos processos de ataques químicos com os reagentes de Nital e LePera influenciam na caracterização metalográfica dos aços TRIP800, DP600 e CP800, este estudo foi realizado. A utilização do Método de Taguchi para a realização deste trabalho possibilitou a geração de resultados com respaldo estatístico, confiabilidade, ao mesmo tempo em que o estudo foi otimizado, tanto no que concerne ao número de ensaios realizados quanto pela existência de ferramentas para a realização da análise dos resultados. Para os experimentos com o reagente Nital, os fatores considerados foram: concentração da solução de reagente, tempo e modo de ataque, e modo de limpeza. Para os ensaios realizados com o reagente LePera, as variáveis analisadas foram: concentração da solução de picral e metabissulfato de sódio, pré-ataque, modo de secagem e tempo de ataque. Comprovou-se a influência do fator concentração da solução de Nital nos experimentos realizados com os três materiais analisados, contudo, para o aço CP 800, o fator tempo de ataque não apresentou impacto relevante para o processo. A realização de limpeza utilizando solução de bicarbonato de sódio das amostras após ataque com o reagente Nital se mostrou relevante para os processos envolvendo os aços DP e CP. Em relação aos experimentos envolvendo o reagente LePera, sugeriu-se o emprego de uma escala qualitativa (IQ - índice de qualidade) para classificar as imagens obtidas nos experimentos realizados. O uso do IQ possibilitou a análise dos dados de maneira quantitativa e identificação das variáveis que possuem maior impacto sobre o processo. Comprovou-se também, a influência dos fatores ruído (temperatura e umidade relativa).

**PALAVRAS-CHAVE:** Aços Avançados. Aço TRIP. Aço Complex Phase. Aço Dual Phase. Micrografia. Ataque químico. Nital. LePera. Taguchi.



## ABSTRACT

The performance of the multiphase steels is closely related to their microconstituents. Therefore, the characterization and effective control of these materials microstructure are crucial, being that the processes of chemical etching are essential for this to occur. In order to discuss how the factors involved in the chemical etching with the Nital and LePera reagents influence in the metallographic characterization of the TRIP800, DP600 and CP800 steels, this study was conducted. The use of the Taguchi method for conducting of this study allowed the generation of results with statistical support, reliability, and at the same time the study was optimized, both as regards to the number of tests carried out as for existence of tools for carrying out the analysis of the results. For the experiments with Nital reagent, the considered factors were: concentration of the reagent solution, time and method of etching besides cleaning method. For the tests performed with LePera reagent, the analyzed variables were: concentration of picral and sodium metabisulfite solution, pre-etching, drying method and the etching time. It was proved the influence of the concentration of Nital solution in the carried experiments with the three analyzed materials, however, for the CP 800 steel, the etching time factor showed no significant impact on the process. The performance of cleaning using sodium bicarbonate the samples after etching with Nital reagent proved to be relevant for processes involving DP and CP steels. Regarding the experiments involving the LePera reagent, it was suggested the use of a qualitative scale (IQ - Quality Index) to classify the images obtained in the experiments. The use of IQ allowed the analysis of the data in a quantitative manner and the identification of the variables that have the most impact on the process. It also proved the influence of noise factors (temperature and relative humidity).

**KEYWORDS:** Advanced Steels. TRIP Steel. Complex Phase Steel. Dual Phase Steel. Micrography. Chemical Etching. Nital. LePera. Taguchi.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Composição média da distribuição de materiais em um veículo - 2014.....	20
Figura 1.2 -	Participação em peso de diferentes materiais em um automóvel norte americano, em 1995 e em 2020 (estimativa) .....	22
Figura 1.3 -	Previsão de utilização de AHSS e UHSS em veículos norte-americanos ...	22
Figura 2.1 -	Classificação dos aços automotivos quanto à resistência mecânica .....	25
Figura 2.2 -	Desenvolvimento de aços avançados - 3ª geração (2017-2025) .....	26
Figura 2.3 -	Caracterização das microestruturas dos AHSS - 1ª geração via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura .....	27
Figura 2.4 -	Diagrama TTT de materiais classificados como AHSS de 1ª geração .....	28
Figura 2.5 -	Efeitos dos principais elementos de liga no processamento de aços assistidos pelo efeito TRIP, CP, DP e martensíticos .....	29
Figura 2.6 -	Microestrutura típica de um aço DP. Ataque: reagente Nital .....	29
Figura 2.7 -	Exemplo de aplicação de aços DP em carroceria de um automóvel .....	32
Figura 2.8 -	Exemplo de aplicação de aços DP: roda - aço DP600 laminado a quente ..	32
Figura 2.9 -	Microscopia eletrônica de varredura de uma microestrutura típica de um aço ferrítico-bainítico. Ataque: reagente Nital .....	33
Figura 2.10 -	Microestrutura típica de um aço assistido pelo efeito TRIP: Ferrita Poligonal ( $\alpha$ ), Bainita ( $\alpha_b$ ), Martensita e Austenita Retida ( $\gamma$ ) .....	34
Figura 2.11 -	Formação da martensita durante deformação plástica (ensaio de tração) ...	35
Figura 2.12 -	Tratamentos térmicos utilizados para gerar a microestrutura de aços assistidos pelo efeito TRIP .....	38
Figura 2.13 -	Exemplos de aplicações de aços assistidos pelo efeito TRIP .....	38
Figura 2.14 -	Microestrutura típica de um aço CP: Ferrita (F); Bainita (B), Martensita (M) e Austenita Retida (R.A.) .....	39
Figura 2.15 -	Exemplos de aplicações de aços CP .....	41
Figura 2.16 -	Microscopia óptica de uma microestrutura típica de um aço martensítico. Ataque: reagente Nital .....	42
Figura 2.17 -	Exemplos de aplicações de aços martensíticos .....	43
Figura 2.18 -	Microestruturas de aços: a) TRIP; b) TWIP e c) TRIPLEX .....	44
Figura 2.19 -	Diferente tipos de plasticidade induzida por deformação devido a mudanças microestruturais .....	45

Figura 2.20 - Microscopia óptica de um aço laminado a quente, após deformação a 300°C. As setas indicam a ocorrência de maclas ( <i>twins</i> ). Ataque: reagente Nital .....	46
Figura 2.21 - Diagrama tensão-deformação- aços TRIP e TWIP .....	47
Figura 2.22 - Aços HMS em estudo .....	48
Figura 2.23 - Exemplos de aplicações de aços HF1050 .....	51
Figura 2.24 - Microscopia Eletrônica de Varredura - aço DP: $d_f$ : tamanho de grão da ferrita .....	51
Figura 2.25 - Microestrutura de aços TRIP. Ataque: reagente Klemm .....	53
Figura 2.26 - Microscopia óptica de microestruturas bainíticas obtidas por transformação isotérmica a 250°C (T=tempo de reação; V=dureza).....	54
Figura 2.27 - Representação esquemática do processo Q&P em dois estágios .....	55
Figura 2.28 - Microscopia Eletrônica de Transmissão da microestrutura de um aço Q&P .....	56
Figura 2.29 - Comparação de propriedades mecânicas de aços obtidos via Q&P e outros AHSS.....	57
Figura 2.30 - Microscopia eletrônica de transmissão de um aço Fe-0,2C-5Mn (% em peso) .....	58
Figura 2.31 - Aço DP .....	59
Figura 2.32 - Modelo de ataque de fases seletivo para aços multifásicos .....	62
Figura 2.33 - Ilha de austenita retida em uma matriz ferrítica - aço TRIP, ataque: nital. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	62
Figura 2.34 - Aço DP - martensita em uma matriz ferrítica: ataque seletivo da fase com nital .....	63
Figura 2.35 - Aço DP600 .....	64
Figura 2.36 - Aço TRIP 800 .....	65
Figura 2.37 - Microscopia óptica de um aço CP, com 0,1% C (em peso), atacado com o reagente nital .....	66
Figura 2.38 - Microscopia óptica de aços CP atacados com o reagente nital .....	66
Figura 2.39 - Aços TRIP e DP. Ataque: reagente nital 5% .....	67
Figura 2.40 - Microestruturas das amostras atacadas com nital 3% .....	68
Figura 2.41 - Microestruturas das amostras atacadas com reagente LePera .....	68
Figura 2.42 - Representação esquemática do sistema de interferência formado entre ar-	

	filme-metal .....	69
Figura 2.43 -	Amostra atacada com reagente Beraha I .....	71
Figura 2.44 -	Amostra atacada com reagente Beraha I .....	72
Figura 2.45 -	Amostra antes e após ser atacada com reagente Beraha I.....	73
Figura 2.46 -	Microscopia da amostra atacada .....	74
Figura 2.47 -	Micrografias do aço SAE 4118HM, atacado durante diferentes intervalos de tempo com o reagente Beraha I .....	75
Figura 2.48 -	Formação de linhas de ataque nos grãos de ferrita de um aço baixo carbono, devido ao prolongado tempo de ataque, reagente: Beraha .....	76
Figura 2.49 -	Modelo de ataque anódico e catódico em um aço multifásico envolvendo depósitos de reagente .....	78
Figura 2.50 -	Aço TRIP .....	78
Figura 2.51 -	Aço DP atacado com o reagente LePera .....	79
Figura 2.52 -	Aço TRIP - Imagens do efeito do ataque com LePera .....	80
Figura 2.53 -	Aço DP atacado com o reagente LePera .....	80
Figura 2.54 -	Aço DP600 atacado com reagente LePera .....	81
Figura 2.55 -	Aço TRIP800 atacado com reagente LePera .....	83
Figura 2.56 -	Aços DP atacados com o reagente LePera .....	84
Figura 2.57 -	Microscopia óptica de aços após ataque com o reagente LePera .....	85
Figura 2.58 -	Microscopia óptica dos aços (c) e (d) .....	86
Figura 2.59 -	Aços DP com diferentes composições químicas atacados com reagente LePera .....	86
Figura 2.60 -	Aço TRIP800 .....	87
Figura 2.61 -	Modelo geral de um processo ou sistema .....	89
Figura 2.62 -	Matriz de experimentos .....	91
Figura 2.63 -	Experimento fatorial .....	92
Figura 2.64 -	Matriz ortogonal considerando fatores de ruído ( <i>outer array</i> ).....	96
Figura 2.65 -	Gráficos lineares do arranjo ortogonal $L_8$ .....	97
Figura 2.66 -	Função perda de Taguchi.....	99
Figura 2.67 -	Representação gráfica dos efeitos médios dos fatores .....	100
Figura 3.1 -	Fluxograma da metodologia empregada.....	104
Figura 3.2 -	Arranjo Ortogonal $L_8$ de Taguchi e respectivo Gráfico Linear - Experimento A.....	107

Figura 3.3 -	Arranjo Ortogonal $L_{16}$ de Taguchi e respectivo Gráfico Linear - Experimento B.....	108
Figura 3.4 -	Nomenclatura das localizações de áreas mostradas em fotomicrografias....	112
Figura 4.1 -	Aço TRIP800: Microscopia óptica. Ataque: nital 2%. Aumento 500x.....	118
Figura 4.2 -	Aço TRIP800: Fração volumétrica da fase escura (martensita+bainita) x número de campos. Imagens com aumento de 500x.....	119
Figura 4.3 -	Aço TRIP800: Microscopia óptica. Ataque: nital 2%. Aumento 1000x.....	120
Figura 4.4 -	Aço TRIP800: Fração volumétrica da fase escura (martensita+bainita) x número de campos. Imagens com aumento de 1000x.....	120
Figura 4.5 -	Aço CP800: Microscopia óptica. Ataque: nital 2%.....	121
Figura 4.6 -	Aço CP800: Fração volumétrica da fase escura (martensita+bainita) x número de campos. Imagens com aumento de 500x.....	122
Figura 4.7 -	Aço DP600: Microscopia óptica. Ataque: nital 2%. Aumento de 500x.....	122
Figura 4.8 -	Aço DP600: Fração volumétrica da fase escura (martensita) x número de campos. Imagens com aumento de 500x.....	123
Figura 4.9 -	Aço CP800: Microscopia óptica. Ataque: LePera. Aumento 500x.....	124
Figura 4.10 -	Aço CP800: Microscopia óptica. Ataque: LePera. Aumento 1000x.....	124
Figura 4.11 -	Aço TRIP800: Microscopia óptica. Ataque: LePera. Aumento 1000x.....	125
Figura 4.12 -	Aço TRIP800: Fração volumétrica x número de campos. Imagens com aumento de 1000x.....	126
Figura 4.13 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 2%. Tempo de ataque 11s.....	127
Figura 4.14 -	Aço TRIP800: Aplicação do <i>auto threshold "Moments"</i> para estimativa da fração volumétrica.....	130
Figura 4.15 -	Aço TRIP800: Fração volumétrica x imagens (Experimento 6, triplicata).	131
Figura 4.16 -	Aço TRIP800: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a média das medianas da fração volumétrica.....	137
Figura 4.17 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 3%. Tempo de ataque 14s. ....	138
Figura 4.18 -	Aço TRIP800: Concentração da solução de nital x modo de ataque.....	140
Figura 4.19 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 2%. Tempo de ataque 11s.....	140
Figura 4.20 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 3%. Tempo de ataque 11s.....	141
Figura 4.21 -	Aço TRIP800: Concentração da solução de nital x tempo de ataque.....	142
Figura 4.22 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 2%. Tempo de ataque 14s.....	142
Figura 4.23 -	Aço TRIP800: Interação entre os fatores modo de ataque e tempo de	

	ataque.....	143
Figura 4.24 -	Aço TRIP800: Reagente: nital 3%. Tempo de ataque 14s.....	143
Figura 4.25 -	Aço TRIP800: Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital 2%) sobre a mediana da fração volumétrica do aço TRIP.....	144
Figura 4.26 -	Aço DP600: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a média das medianas da fração volumétrica.....	146
Figura 4.27 -	Aço DP600: Tempo de ataque 11s. Reagente: nital 2%.....	147
Figura 4.28 -	Aço DP600: Tempo de ataque: 15s. Reagente: nital 3%.....	147
Figura 4.29 -	Aço DP600: Tempo de ataque 15s. Reagente: nital 2%.....	148
Figura 4.30 -	Aço DP600: Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital 2%) sobre a média da fração volumétrica.....	148
Figura 4.31 -	Aço DP600: Tempo de ataque 15s. Reagente: nital 3%.....	149
Figura 4.32 -	Aço DP600: Tempo de ataque x modo de ataque.....	151
Figura 4.33 -	Aço DP600: Concentração da solução de nital x tempo de ataque.....	151
Figura 4.34 -	Aço DP600: Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital) sobre a média da fração volumétrica.....	152
Figura 4.35 -	Aço DP600: Modo de ataque: imersão. Tempo: 15s.....	153
Figura 4.36 -	Aço DP600: Concentração da solução de nital x modo de ataque.....	153
Figura 4.37 -	Aço DP600: Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital 3%) sobre a média da fração volumétrica.....	154
Figura 4.38 -	Aço DP600: Tempo de ataque 11s. Reagente: nital 3%.....	154
Figura 4.39 -	Aço CP800: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a mediana das médias da fração volumétrica.....	156
Figura 4.40 -	Aço CP800: Tempo de ataque 10s. Reagente: nital 3%.....	157
Figura 4.41 -	Aço CP800: Reagente: nital 2%. Modo de ataque: imersão.....	157
Figura 4.42 -	Aço CP800: Tempo de ataque 10s. Reagente: nital 3%.....	158
Figura 4.43 -	Aço CP800: Tempo de ataque 10s. Reagente: nital 2%. .....	159
Figura 4.44 -	Aço CP800: Concentração da solução de nital x modo de ataque.....	159
Figura 4.45 -	Aço CP800: Tempo de ataque 6s. Modo de ataque: esfregamento.....	160

Figura 4.46 - Aço CP800: Concentração da solução de nital e tempo de ataque.....	161
Figura 4.47 - Aço TRIP800: Experimentos que permitiram caracterização satisfatória...	168
Figura 4.48 - Aço DP600: Experimentos que permitiram caracterização satisfatória.....	169
Figura 4.49 - Aço DP600: Reagente: nital 2%. Tempo de ataque 11s.....	170
Figura 4.50 - Aço CP800: Experimentos que permitiram caracterização satisfatória.....	171
Figura 4.51 - Aço TRIP800: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Interno ( <i>Inner Array</i> ).....	179
Figura 4.52 - Aço TRIP800: Condições de ataque: pré-ataque (nital 2%), secagem natural, temperatura: 15 ±25°C, umidade relativa: 55±90%.....	180
Figura 4.53 - Aço TRIP800: Condições de ataque: LePera (picral 4%, mb sódio 1%), pré-ataque (nital 2%), temperatura: 25 ±40°C, umidade relativa: 55±90%.	181
Figura 4.54 - Aço TRIP800: Imagens dos experimentos com índice de qualidade igual a 5.....	183
Figura 4.55 - Aço TRIP800: Imagens dos experimentos com índice de qualidade igual a 4. ....	184
Figura 4.56 - Aço TRIP800: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a razão SN - Arranjo Interno .....	187
Figura 4.57 - Aço TRIP800: Concentração da solução de picral x modo de secagem.....	188
Figura 4.58 - Aço TRIP800: Experimento 9 - condições de ataque: LePera (picral 4%, mb sódio 0,5%), sem pré-ataque, secagem natural, tempo 25s.....	189
Figura 4.59 - Aço TRIP800: Gráfico dos efeitos dos fatores não controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Externo ( <i>Outer array</i> ).....	190
Figura 4.60 - Aço TRIP800: Gráfico dos efeitos dos fatores não controláveis sobre a razão SN do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Externo.....	190
Figura 4.61 - Aço DP600: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Interno.....	193
Figura 4.62 - Aço DP600: Condições de ataque: sem pré-ataque, secagem natural, temperatura: 15 ±25°C, umidade relativa: 30±55%.....	194
Figura 4.63 - Aço DP600: Condições de ataque: LePera (picral 2%, mb sódio 0,5%), secagem natural, temperatura: 25±40°C, umidade relativa: 55±90%.....	195
Figura 4.64 - Aço DP600: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a razão SN – Arranjo Interno.....	198

Figura 4.65 - Aço DP600: Concentração da solução de picral x pré-ataque .....	199
Figura 4.66 - Aço DP600: Relação dos experimentos realizados e seus respectivos resultados.....	200
Figura 4.67 - Aço DP600: Pré-ataque x tempo de secagem.....	201
Figura 4.68 - Aço DP600: Imagens dos experimentos 13 e 14.....	203
Figura 4.69 - Aço DP600: Gráfico dos efeitos dos fatores não controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Externo.....	205
Figura 4.70 - Aço CP800: Gráfico dos efeitos e interações dos fatores controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Interno.....	206
Figura 4.71 - Aço CP800: Condições de ataque: LePera (picral 4%; mb sódio 0,50%), sem pré-ataque, temperatura:25 ±40°C, umidade relativa: 55±90%.....	208
Figura 4.72 - Aço CP800: Imagens dos experimentos 12 e 15.....	209
Figura 4.73 - Aço CP800: Concentração da solução de picral x pré-ataque.....	211
Figura 4.74 - Aço CP800: Modo de secagem x tempo de ataque .....	212
Figura 4.75 - Aço CP800: Gráfico dos efeitos dos fatores não controláveis sobre a média do índice de qualidade (IQ) – Arranjo Externo.....	213



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Composição química e propriedades mecânicas de aços bifásicos.....	30
Tabela 2.2 -	Composições químicas de aços de baixa liga assistidos pelo efeito TRIP (% em peso) .....	36
Tabela 2.3 -	Composição química e propriedades mecânicas de aços CP800.....	40
Tabela 2.4 -	Composição química e propriedades mecânicas de aços martensíticos.....	42
Tabela 2.5 -	Composições químicas típicas de aços Q&P (barras e chapas).....	56
Tabela 2.6 -	Composições químicas das amostras analisadas (% em peso).....	68
Tabela 2.7 -	Características das diversas composições de reagentes LePera testadas.....	88
Tabela 2.8 -	Arranjos ortogonais de Taguchi.....	95
Tabela 2.9 -	Matriz ortogonal $L_4$ .....	95
Tabela 2.10 -	Matriz ortogonal $L_8$ .....	95
Tabela 2.11 -	Arranjo ortogonal $L_4$ utilizado como exemplo para cálculo do efeito médio do fator.....	99
Tabela 2.12 -	Efeito médio dos fatores.....	100
Tabela 2.13 -	Dados típicos para um experimento com um fator.....	101
Tabela 3.1 -	Composição química dos materiais utilizados (% em peso).....	103
Tabela 3.2 -	Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	103
Tabela 4.1 -	Aço TRIP800: Estimativa da fração volumétrica da fase escura (Experimento 6, triplicata).....	130
Tabela 4.2 -	Aço DP600: Fração volumétrica da fase escura (Experimento A - reagente: nital).....	132
Tabela 4.3	Aço TRIP800: Fração volumétrica da fase escura (Experimento A - reagente: nital) .....	133
Tabela 4.4 -	Aço CP800: Fração volumétrica da fase escura (Experimento A - reagente: nital) .....	134
Tabela 4.5 -	Aço TRIP800: Efeito médio dos fatores. Experimento A. ....	136
Tabela 4.6 -	Aço TRIP800: ANOVA (em relação à média das medianas da fração volumétrica da fase escura). ....	139
Tabela 4.7 -	Aço TRIP800: Resumo: interações entre os fatores em estudo sobre a fração volumétrica da fase escura - Experimento A .....	144
Tabela 4.8 -	Aço DP600: Efeito médio dos fatores. Experimento A.....	145

Tabela 4.9 - Aço DP600: ANOVA (em relação à média). .....	150
Tabela 4.10 - Aço DP600: Resumo: interações entre os fatores em estudo - Experimento A.....	155
Tabela 4.11 - Aço CP800: Efeito médio dos fatores. Experimento A.....	155
Tabela 4.12 - Aço CP800: Resumo: interações entre os fatores em estudo - Experimento A.....	161
Tabela 4.13 - Aço CP800: ANOVA (em relação à média). .....	161
Tabela 4.14 - Comparação entre os efeitos médios dos fatores dos aços TRIP, DP e CP.	162
Tabela 4.15 - Fatores que impactam a variável de resposta nos materiais analisados.....	163
Tabela 4.16 - Aço TRIP800: ANOVA (em relação à razão sinal-ruído) .....	165
Tabela 4.17 - Aço CP800: ANOVA (em relação à razão sinal-ruído).....	166
Tabela 4.18 - Aço DP600: ANOVA (em relação à razão sinal-ruído).....	166
Tabela 4.19 - Aço TRIP800: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores controláveis. ....	185
Tabela 4.20 - Aço TRIP800: ANOVA (em relação à razão sinal-ruído) dos fatores controláveis.....	186
Tabela 4.21 - Aço TRIP800: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores não controláveis. ....	190
Tabela 4.22 - Aço TRIP800: Porcentagem de contribuição.....	191
Tabela 4.23 - Aço DP600: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores controláveis.....	196
Tabela 4.24 - Aço DP600: ANOVA (em relação à razão sinal-ruído) dos fatores controláveis .....	197
Tabela 4.25 - Aço DP600: Porcentagem de contribuição .....	202
Tabela 4.26 - - Aço DP600: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores não controláveis .....	205
Tabela 4.27 - Aço CP800: Efeito médio dos fatores. Experimento B.....	207
Tabela 4.28 - Aço CP800: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores controláveis.....	210
Tabela 4.29 - Aço CP800: Porcentagem de contribuição.....	211
Tabela 4.30 - Aço CP800: ANOVA (em relação à média dos IQs) dos fatores não controláveis .....	213

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Principais elementos de liga presentes nos aços DP .....	30
Quadro 2.2 - Materiais utilizados - Composição química (% em massa) .....	61
Quadro 2.3 - Diferenças de potencial calculadas para componentes microestruturais ....	61
Quadro 2.4 - Reagentes para ataque micrográfico, suas composições e indicações .....	77
Quadro 2.5 - Resultados da quantificação das fases presentes no aço DP600.....	82
Quadro 2.6 - Resultados da quantificação das fases presentes no aço TRIP800 .....	84
Quadro 2.7 - Composições químicas (% em peso) dos aços estudados .....	85
Quadro 2.8 - Análise de variância para um experimento com um fator .....	101
Quadro 3.1 - <i>Check list</i> para o planejamento dos experimentos: ataques químicos dos aços AHSS .....	105
Quadro 3.2 - Descrição de fatores e níveis para o Arranjo Ortogonal do método de Taguchi - Experimento A .....	106
Quadro 3.3 - Descrição de fatores e níveis do Arranjo Ortogonal do método de Taguchi - Experimento B (arranjo interno) .....	106
Quadro 3.4 - Descrição de fatores e níveis do Arranjo Ortogonal L <sub>4</sub> do método de Taguchi - Experimento B (arranjo externo) .....	107
Quadro 3.5 - Arranjo ortogonal para a realização do Experimento A .....	109
Quadro 3.6 - Arranjo ortogonal para a realização do Experimento B .....	110
Quadro 4.1 - Aço DP600: Arranjo ortogonal para a realização do Experimento A .....	132
Quadro 4.2 - Aço TRIP800: Arranjo ortogonal para a realização do Experimento A.....	133
Quadro 4.3 - Aço CP800: Arranjo ortogonal para a realização do Experimento A.....	134
Quadro 4.4 - Escala para classificação das imagens - Experimento B (LePera).....	174
Quadro 4.5 - Aço TRIP800: Resultado do Índice de Qualidade das imagens obtidas por ataque com o reagente LePera.....	176
Quadro 4.6 - Aço DP600: Resultado do Índice de Qualidade das imagens obtidas por ataque com o reagente LePera.....	177
Quadro 4.7 - Aço CP800: Resultado do Índice de Qualidade das imagens obtidas por ataque com o reagente LePera.....	178

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1	MOTIVAÇÃO.....	21
1.2	OBJETIVOS.....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1	AÇOS AVANÇADOS AUTOMOTIVOS .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Aços Avançados - 1ª geração</b> .....	27
2.1.1.1	Aços bifásicos ( <i>Dual Phase Steels - DP</i> ) .....	29
2.1.1.1.1	<i>Microestrutura e composição química</i> .....	29
2.1.1.1.2	<i>Processamento</i> .....	31
2.1.1.1.3	<i>Propriedades mecânicas e aplicações</i> .....	31
2.1.1.2	Aços com plasticidade induzida por transformação ( <i>Transformation Induced Plasticity Steels - TRIP</i> ) .....	34
2.1.1.2.1	<i>Microestrutura e composição química</i> .....	34
2.1.1.2.2	<i>Processamento</i> .....	37
2.1.1.2.3	<i>Propriedades mecânicas e aplicações</i> .....	38
2.1.1.3	Aços de fase complexa ( <i>Complex Phase Steels - CP</i> ) .....	39
2.1.1.3.1	<i>Microestrutura e composição química</i> .....	<b>39</b>
2.1.1.3.2	<i>Processamento</i> .....	40
2.1.1.3.3	<i>Propriedades mecânicas e aplicações</i> .....	40
2.1.1.4	Aços martensíticos ( <i>Martensitic Steels</i> ) .....	41
2.1.1.4.1	<i>Microestrutura e composição química</i> .....	41
2.1.1.4.2	<i>Processamento</i> .....	43
2.1.1.4.3	<i>Propriedades mecânicas e aplicações</i> .....	43
<b>2.1.2</b>	<b>Aços Avançados - 2ª geração</b> .....	44
2.1.2.1	HMS-TWIP / HMS-TRIP.....	46
2.1.2.2	AÇOS TRIPLEX.....	49
<b>2.1.3</b>	<b>Aços Avançados - 3ª geração</b> .....	50
2.1.3.1	Aços bifásicos aprimorados ( <i>Enhanced DP Steels</i> ) .....	51
2.1.3.2	Aços TRIP modificados .....	52
2.1.3.3	Aços bainíticos com grãos ultrafinos .....	53
2.1.3.4	Têmpera e Partição ( <i>Quenching &amp; Partitioning - Q&amp;P</i> ) .....	54

2.1.3.5	Aços TRIP com médio teor de Mn .....	57
2.2	PRÁTICAS METALOGRAFICAS - MICROSCOPIA ÓPTICA (CAMPO CLARO) .....	58
<b>2.2.1</b>	<b>Ataque por dissolução seletiva de fases</b> .....	59
2.2.1.1	Caracterização microestrutural de aços multifásicos utilizando o reagente de nital.....	63
<b>2.2.2</b>	<b>Ataque por deposição química</b> .....	69
2.2.2.1	Principais reagentes empregados para obtenção de metalografia colorida....	76
2.3	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	88
<b>2.3.1</b>	<b>Introdução</b> .....	88
<b>2.3.2</b>	<b>Fundamentos e conceitos</b> .....	90
<b>2.3.3</b>	<b>Método de Taguchi</b> .....	93
2.3.3.1	Matriz/Arranjo ortogonal ( <i>Orthogonal array</i> ) .....	94
2.3.3.2	Razão sinal-ruído - SN ( <i>Signal-to-noise ratio</i> ) .....	97
2.3.3.3	Função perda ( <i>Loss function</i> ) .....	98
<b>2.3.4</b>	<b>Análise das observações experimentais</b> .....	99
2.3.4.1	Efeito médio do fator ou efeito sobre a média .....	99
2.3.4.2	ANOVA (acrônimo para <i>analysis of variance</i> ) .....	101
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	103
3.1	MATERIAIS.....	103
3.2	METODOLOGIA.....	104
<b>3.2.1</b>	<b>Planejamento experimental - Fase Pré-Planejamento</b> .....	104
<b>3.2.2</b>	<b>Delineamento do planejamento experimental (Determinação de um modelo de planejamento de experimento)</b> .....	107
<b>3.2.3</b>	<b>Execução dos experimentos</b> .....	111
3.2.3.1	Especificação dos dados a serem coletados e os procedimentos para sua coleta.....	111
3.2.3.2	Preparação das amostras metalográficas.....	111
3.2.3.2.1	<i>Seccionamento</i> .....	112
3.2.3.2.2	<i>Embutimento</i> .....	112
3.2.3.2.3	<i>Lixamento</i> .....	113
3.2.3.2.4	<i>Polimento</i> .....	114
3.2.3.2.5	<i>Ataques químicos</i> .....	115

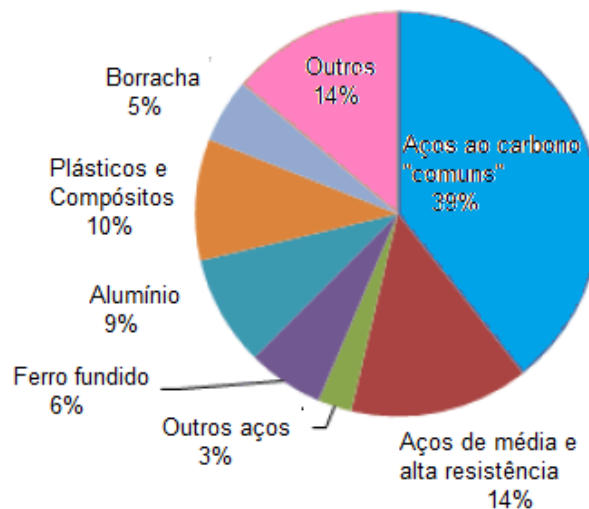
3.2.3.2.6	<i>Obtenção de imagens (Microscopia Óptica)</i> .....	116
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	117
4.1	DETERMINAÇÕES DO NÚMERO DE IMAGENS NECESSÁRIAS PARA ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	117
<b>4.1.1</b>	<b>Experimento A - Ataques utilizando o reagente de nital</b> .....	118
<b>4.1.2</b>	<b>Experimento B - Ataques utilizando o reagente LePera</b> .....	123
<b>4.1.3</b>	<b>Considerações relativas aos itens 4.1.1 e 4.1.2</b> .....	126
4.2	EXPERIMENTO A (REAGENTE NITAL) .....	128
<b>4.2.1</b>	<b>Estimativas das frações volumétricas</b> .....	128
<b>4.2.2</b>	<b>Aço TRIP800</b> .....	136
<b>4.2.3</b>	<b>Aço DP600</b> .....	145
<b>4.2.4</b>	<b>Aço CP800</b> .....	155
<b>4.2.5</b>	<b>Análise comparativa entre os aços TRIP800, DP600 e CP800</b> .....	162
<b>4.2.6</b>	<b>Cálculo do efeito dos fatores em relação à taxa/razão sinal-ruído</b> .....	165
<b>4.2.7</b>	<b>Caracterização dos materiais analisados</b> .....	166
4.3	EXPERIMENTO B (REAGENTE LEPERA) .....	172
<b>4.3.1</b>	<b>Elaboração e definição do "Índice de Qualidade - IQ"</b> .....	173
<b>4.3.2</b>	<b>Aço TRIP800</b> .....	179
<b>4.3.3</b>	<b>Aço DP600</b> .....	192
<b>4.3.4</b>	<b>Aço CP800</b> .....	206
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	214
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	216
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	217

## 1 INTRODUÇÃO

O aço é um material caracterizado pelas amplas propriedades (resistência à tração de 100 a 5000 MPa, temperaturas de utilização de até 650°C, podendo ser submetidos a atmosferas de corrosão ácidas, alcalinas e salinas), amplas aplicações (do setor de construção a transporte, máquinas e equipamentos, energia, marítima, proteção ambiental, bélica, entre outros), de fácil reciclagem (a sucata de aço sendo utilizada para produzir aços de alta qualidade) e baixo custo (DONG et al., 2011). Além disso, é caracterizado pela produção em massa, sendo que, em 2015, a produção mundial de aço bruto foi de 1,622 bilhões de toneladas, dos quais 33,2 milhões de toneladas foram produzidos no Brasil (*WORLD STEEL ASSOCIATION - WSA*, 2016).

Estes materiais compõem aproximadamente 60% da massa total de um automóvel, Figura 1.1, e é sem dúvida a base para os veículos terem alto desempenho, menor peso e segurança. Eles são usados na produção da carroceria do carro e carcaça do motor (*enclosure*), sistema de transmissão, chassi, partes da suspensão, etc (BELLO, 2014; DE COOMAN; CHIN; KIM, 2011; GAN, 2011; KIM et al, 2009).

Figura 1.1 - Composição média da distribuição de materiais em um veículo - 2014



Fonte: Adaptado de Bello (2014)

Atualmente, o desenvolvimento de aços automotivos ocorre de maneira tão acelerada que não se pode imaginar o progresso futuro precisamente. A partir da década de 2000, os aços da série AHSS (*Advanced High Strength Steel*), como os aços assistidos pelo efeito TRIP

(*TRIP-aided steel* - TRIP: *Transformation Induced Plasticity*), DP (Bifásicos - *Dual-Phase*) e aços martensíticos estampados a quente passaram a ser empregados.

A principal característica desses materiais encontra-se em suas microestruturas. Os aços da série AHSS possuem microestruturas multifásicas, podendo conter ferrita e diferentes frações volumétricas de martensita, bainita e/ou austenita retida em quantidades suficientes para produzir propriedades mecânicas únicas (ANGELI; FÜREDER; KNEISSL, 2006; KUZIAK; KAWALLA; WAENGLER, 2008).

É possível alterar as propriedades mecânicas dos aços multifásicos, e adaptá-los para a respectiva aplicação prevista ajustando fases, morfologia, orientação e, acima de tudo, frações volumétricas, tamanho e distribuição das diferentes fases. Além disso, a microestrutura ou algumas fases dentro da microestrutura podem ser mecanicamente instáveis, o que resulta em transformações induzidas por deformação. Estas transformações melhoram a conformabilidade por significativo encruamento e favorecem o comportamento de deformação uniforme (BLECK; PHU-ON, 2009).

A aplicação destes aços modernos permite a redução de massa do automóvel, por meio da diminuição da espessura das chapas dos materiais e/ou reduzindo suas densidades específicas, permitindo reduções consideráveis de emissões a custos acessíveis (MATLOCK et al, 2012; SAMEK; KRIZAN, 2012).

Além da redução de peso, as normas relativas à segurança dos automóveis também têm estado em foco (BLECK; PHU-ON, 2009; MATLOCK et al, 2012).

Esses materiais são usados em componentes da produção do *body-in-white*, sistema de transmissão, chassis, suspensão, entre outras partes (DE COOMAN; CHIN; KIM, 2011).

A pesquisa de aços destinados à indústria automobilística em um futuro próximo poderia ser principalmente focada nas propriedades relativas à colisão e economia de energia (combustível), com boas propriedades não apenas de resistência, mas também alta ductilidade (DONG et al., 2011).



## 6 CONCLUSÕES

Considera-se que o método adotado neste trabalho para determinar o número de imagens necessárias a serem obtidas em cada experimento para posterior realização da análise de dados foi satisfatória, visto que, análises prévias demonstraram que a partir de 20 campos distintos há baixa variação da fração volumétrica da fase analisada, independentemente do número de campos utilizados para se realizar a estimativa.

O processo de ataque químico corrosivo utilizando o reagente nital foi analisado visando comprovar estatisticamente resultados que são amplamente conhecidos, ou seja, quais são os fatores e possíveis interações entre os mesmos que maximizam o grau de ataque dos materiais em estudo, a fim de melhor administrá-los durante o processo. Para tanto, a variável de resposta escolhida foi a fração volumétrica da fase escura (martensita+bainita) presente no material após realização do ataque químico. Desse modo, concluiu-se que:

a) Os fatores que têm significância no processo (probabilidade igual ou superior a 95% de impactar a variável de resposta) de ataque dos aços estudados, quando é considerada a maximização do grau de ataque são:

a<sub>1</sub>) Aço TRIP800: concentração da solução de nital (2% e 3%), modo de ataque (imersão e esfregamento), tempo de ataque e interação entre a concentração da solução de nital e modo de ataque.

a<sub>2</sub>) Aço DP600: concentração da solução de nital, modo de ataque, tempo de ataque, modo de limpeza (água ou lução de água com bicarbonato de sódio) e interação entre modo e tempo de ataque.

a<sub>3</sub>) Aço CP800: concentração da solução de nital, modo de ataque e modo de limpeza.

b) O fator modo de limpeza quando ajustado no nível 2 (solução de água com bicarbonato de sódio), diferente do esperado, se mostrou relevante principalmente para os experimentos com os aços DP600 e CP800.

c) Além de possibilitar identificar os fatores e respectivos níveis que mais possuem influência sobre a variável de resposta, os resultados obtidos permitem o ajuste dos níveis dos fatores de forma a se obter o resultado esperado, como por exemplo: imagens que caracterizem o material analisado.

Em relação aos experimentos envolvendo o reagente LePera, o objetivo foi "mensurar" o impacto das variáveis na variável de resposta, visto que ao ter se considerado 5 fatores e as

combinações possíveis entre as mesmas há um número elevado de variáveis. Entretanto, não se buscou explicar o porquê de cada fator influir de uma determinada maneira, ou mesmo, justificar o porquê determinadas interações entre variáveis possuem impacto no processo, devido à extensão que tal estudo teria, sendo, portanto, uma sugestão para realização de trabalhos futuros. Assim, após análise concluiu-se que:

a) A utilização do Índice de Qualidade (IQ) para análise qualitativa dos dados se mostrou eficiente e eficaz para a finalidade para a qual foi proposta.

b) Dentre as variáveis analisadas, as que possuem probabilidade superior a 95% de influenciar o desempenho do processo são:

b<sub>1</sub>) Aço TRIP800: concentração da solução de picral (porcentagem de contribuição: 20,95%) e a interação entre a concentração da solução de picral e modo de secagem (porcentagem de contribuição: 27,49%). A variável modo de secagem, apesar de não ter apresentado significância de acordo com a ANOVA, possui porcentagem de contribuição de 19,66%.

b<sub>2</sub>) Aço DP600: concentração da solução de picral (porcentagem de contribuição: 31,15%) e pré-ataque (porcentagem de contribuição: 19,25%). A interação entre a concentração da solução de picral e pré-ataque apresentou porcentagem de contribuição de cerca de 12%.

b<sub>3</sub>) Aço CP800: interação entre a concentração da solução de picral e pré-ataque (porcentagem de contribuição: 16,77%) e tempo de ataque (porcentagem de contribuição: 16,35%). A interação entre o modo de secagem e tempo de ataque apresentou porcentagem de contribuição de cerca de 12%.

c) Devido à sensibilidade do processo de ataque químico com o reagente LePera, mesmo tendo a variável (fator de entrada ou combinação entre fatores) apresentado porcentagem de contribuição baixa (10% ou menos), a alteração do nível da mesma, afeta a variável de processo.

d) apesar dos fatores ruidos (temperatura e umidade relativa) não terem apresentado probabilidade superior a 95% de influenciar o desempenho do processo, comprovou-se que estas variáveis possuem elevada influência no processo de ataque químico utilizando o reagente LePera. O fator umidade relativa apresentou maior impacto nos experimentos envolvendo os aços TRIP800 e DP600, enquanto, o fator temperatura teve mais influência nos ataques químicos do aço CP800.

O emprego do método de Taguchi neste estudo otimizou a realização dos experimentos e possibilitou a realização da análise estatística dos dados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARNTS, R. A. et al. Microstructural quantification of multi-phase steels (Micro-quant) - **Final report**. Luxembourg: European Commission – Research Fund for Coal and Steel, 2011. 127p.
- ABRAHAM, A. Metallic material trends in the North American light vehicle. In: GREAT DESIGNS IN STEEL, 14, 2015, Livonia. **Proceedings...** AISI, 2015. Livonia: Disponível em: <<http://www.autosteel.org/great-designs-in-steel/past-gdis-presentations/gdis-2015.aspx>>. Acesso em: 16 jun. 2015.
- 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**. v.22, n.1, p. 13-20, May 2007.
- AHIALE, G. K. et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes. **Met. Mater. Int.**, v.19, n.5, p. 933-939. 2013.
- ALIYA, D. Metallography sectioning and specimen extraction. In: VANDER VOORT, G. F. (Ed.). **ASM Handbook - Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. v.9, p.229-241.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Contrast enhancement and etching. In: VANDER VOORT, G. F. (Ed.). **ASM Handbook - Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. v.9, p.294-312.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 3-11**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E407-07**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E562-11**: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1079-13<sup>e2</sup>**: Standard specification for steel sheet, Complex Phase (CP), Dual Phase (DP) and Transformation Induced Plasticity (TRIP), zinc-coated (galvanized) or zinc-iron alloy-coated (galvannealed) by the hot-dip process. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1088-13**: Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Complex Phase (CP), Dual Phase (DP) and Transformation Induced Plasticity (TRIP). 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1245-03 (Reapproved 2008)**: Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis, 2008.

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, Feb. 2006.

ARCELORMITTAL CATALOG, **Dual Phase steels** – Automotive Worldwide, European Edition, 2015.

ARCELORMITTAL CATALOG, **Transformation Induced Plasticity Steel** –Automotive Worldwide, European Edition, 2013.

ARCELORMITTAL CATALOG, **MartINsite steels** –Automotive Worldwide, European Edition, 2014a.

ARCELORMITTAL CATALOG, **Update - client magazine**, ArcelorMittal Europe - Flat Products, May 2014b.

ASGHARI, A.; ZAREI-HANZAKI, A.; ESKANDARI, M. Temperature dependence of plastic deformation mechanisms in a modified transformation-twinning induced plasticity steel **Materials Science and Engineering A**, n.579, p.150-156, 2013.

AYAZ, M.; KHAKI, D. M.; ARAB, N. B. M. Improvement of grain size and dome height of microalloyed steels using Taguchi method based on grey relational grade in controlled rolling. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 12, n.20, p.115-123, 2013.

AZEVEDO, C. **Planejamento e análise estatística de experimentos em blocos completos**. Notas de aula. 2013. Disponível em: < <http://www.ime.unicamp.br/~cnaber/>>. Acesso em 20 maio 2014.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4.ed. Bookman Editora, 2010. 414p.

BELLO, M. **New NIST Research center helps the auto industry 'lighten up'** (data da última atualização: 26 ago 2014). Disponível em: < <http://nist.gov/lightweighting/ncalfeature.cfm>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

BERAHA, E.; SHPIGLER, B.; **Color metallography**. 1st ed. Ohio: American Society for Metals, 1977. 160p.

BHADESHIA, H.K.D.H.; EDMONT, D.V. **The Bainit Transformation in a Silicon Steel**. Metallurgical Transactions, v.1, 1979.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. Thermomechanical treatment of steels. In:\_\_\_\_. **Steels: microstructure and properties**. London: Elsevier Ltd, 2006. p, 209-234.

BHATTACHARYA, D. Metallurgical perspectives on advanced sheet steels for automotive applications. In: WENG, Y.; DONG, H.; GAN, Y (Ed.). **Advanced steels - the recent scenario in steel science and technology**. 1st ed. Beijing: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011. cap.18, p. 163-175.

BIAN, J. et al. Aplicação de aços de alto desempenho visando à redução de peso e aumento da eficiência de veículos comerciais (tradução de: Antonio Augusto Gorni). **Corte e Conformação**, p. 28-43. Ano XI, n.125. Set. 2015

BILLUR, E.; DYKEMAN, J.; ALTAN, T. Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II. **Stamping Journal**, p.12-13. Jan/Feb. 2014. Disponível em: <<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/664-2.pdf>>. Acesso em 24 ago. 2015.

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, 2002, Gand. **Proceedings...** Gand: Mainz, 2002. p.13-23.

BLECK, W.; PHU-ON, K. Effects of microalloying in multi phase steels for car body manufacture. In: HALDAR, A.; SUWAS, S.; BHATTACHARJEE, D. (Ed.). **Microstructure and texture in steels and other materials**. 1st ed. London: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2009. cap.9, p. 145-163.

BOUAZIZ, O.; GUELTON, N. Modelling of TWIP effect on work-hardening. **Materials Science and Engineering A**, v. 319-321, p.246-249, 2001.

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, 2006. 354p.

BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels. In: VANDER VOORT, G. F. (Ed.). **ASM Handbook - Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. v.9, p.608-627.

BRANAGAN, D. J. et al. Material breakthroughs leading toward next generation AHSS. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW DEVELOPMENTS IN ADVANCED HIGH-STRENGTH SHEET STEELS. 2013, Vail. **Proceedings...** Vail: AIST, 2013. CD-ROM.

BRANDON, D.; KAPLAN, W. D. **Microstructural Characterization of Materials**. 3ed. Chichester: John Wiley & Sons.1999. 409p.

BRITZ, D.; HEGETSCHWEILER, A.; MÜCKLICH, F. Opening the door to fundamental understanding of structure and color metallography - a correlative microscopy study on steel. **Microscopy and Microanalysis**, v.20 (Suppl 3), p. 834-835, 2014.

BURGER, W.; BURGE, M. J. Digital Image Processing - An Algorithmic Introduction Using Java. 1st ed. New York: Springer, 2007. 564p.

CABALLERO, F. G. et al. Design of novel high strength bainitic steels: part 1. **Materials Science and Technology**, v.17, p. 512-516, 2001a.

CABALLERO, F. G. et al. Design of novel high strength bainitic steels: part 2. **Materials Science and Technology**, v.17, p. 517-522, 2001b.

CABALLERO, F. G.; BHADSHIA, H. K. D. H. Very strong bainite. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v.8, p. 251-257, 2004.

CABALLERO, F. G. et al. Toughness deterioration in advanced high strength steels. **Materials Science and Engineering A**, v.525, p. 87-95, 2009a.

CABALLERO, F. G. et al. Theoretical design and advanced microstructure in super high strength steels. **Materials and Design**, v.30, p. 2077-2083, 2009b.

CALCAGNOTTO, M. et al. Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p.2738-2746, 2010.

CAMPOSECO-NEGRETE, C. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. **Journal of Cleaner Production**, n.53, p.195-203, 2013.

CAO, W. et al. The 3rd generation automobile sheet steels presenting with ultrahigh strength and high ductility. In: WENG, Y.; DONG, H.; GAN, Y. (Ed.). **Advanced steel - the recent scenario in steel science and technology**. 1st ed. Beijing: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011. cap. 22. p. 209-227.

CAO, W. et al. Microstructures and mechanical properties of the third generation automobile steels fabricated by ART-annealing. **SCIENCE CHINA Technological Sciences**, v.55, n.7, p. 1814-1822, July 2012.

CHEN, L.; ZHAO, Y.; QIN, X. Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, v.26, n.1, p. 1-15, Feb. 2013.

CHOI, K. et al. Effect of aging on the microstructure and deformation behavior of austenite base lightweight Fe-28Mn-9Al-0,8C steel. **Scripta Materialia**, v.63, p. 1028-1031, 2010.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v.35, n.1, p.1-12, Feb. 1993.

COLLIN, L. R. O; PAMPLONA, E. O. A utilização da função perda de Taguchi na prática do controle estatístico de processo. In: ENEGEP, 1997, Rio Grande do Sul. **Anais... RJ: Abepro**, 1997. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/publicacoes/index.asp?pchave=&ano=1997>>. Acesso em: 17 out. 2013.

COLPAERT, H. Técnica metalográfica - Micrografia. In: \_\_\_\_. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2008. p.67-82.

COLPAERT, H. Aços avançados para conformação mecânica. In: \_\_\_\_. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2008. p.420-447.

CURTZE, S.; KUOKKALA, V. T. Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate. **Acta Materialia**, n.58, p.5129-5141, 2010.

ÇIÇEK, A.; KIVAK, T.; SAMTAS, G. Application of Taguchi method for surface roughness and roundness error in drilling of AISI 316 stainless steel. **Journal of Mechanical Engineering**, n.58, v.3, p.165-174, 2012.

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

DE COOMAN, B. C.; CHIN, K.; KIM, J. High Mn TWIP steels for automotive industry. In: CHIABERGE, M. (Ed.). **New Trends and developments in automotive engineering**. 1st ed. Índia: InTech, 2011. p.101-127. Disponível em: < www.intechopen.com>. Acesso em: 10 set. 2013.

DE MOOR, E. et al. Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.39A, p. 2586-2595, Nov. 2008.

DE MOOR, E. et al. Austenite stabilization through manganese enrichment. **Scripta Materialia**. v.64, p. 185-188, 2011.

DE MOOR, E. et al. Quenching and partitioning of CMnSi steels containing elevated manganese levels. **Steels Research International**. v.83, n.4, p. 322-327, 2012.

DEAN, A.; VOSS, D. **Design and analysis of experiments**. 8.ed. New York, Springer-Verlag, 1999. 740p.

DELINCÉ, M. et al. Structure-property optimization of ultrafine-grained dual-phase steels using a microstructure-based strain hardening model. **Acta Materialia**, n.55, p.2337-2350, 2007.

DIAS, F. C. **Uso do software Image J para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. 2008. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

DIMATTEO, A. et al. Microstructures and properties of transformation induced plasticity steels. **la metallurgia italiana**. p. 37-41, 2006.

DOBZANSKI, L. A.; GRAJCAR, A.; BOREK, W. Microstructure evolution of high-manganese steel during the thermomechanical processing. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 37, n.2, p.69-76, June 2009.

DOBZANSKI, L. A.; BOREK, W. Processes forming the microstructure evolution of high-manganese austenitic steel in hot-working conditions. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v.37, n.2, p. 397-407, Dec. 2009.

DOBZANSKI, L. A.; BOREK, W. Mechanical properties and microstructure of high-manganese TWIP, TRIP and TRIPLEX type steels. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v.55, n.2, p. 230-238, Dec. 2012.

DOBRZAŃSKI, L. A.; BOREK, W.; ONDRULA, M. Thermo-mechanical processing and microstructure evolution of high-manganese austenitic TRIP-type steels **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v.53, n.2, p. 59-66, Aug. 2012.

DONG, H. et al. On the performance improvement of steels through M3 structure control. In: WENG, Y.; DONG, H.; GAN, Y. (Ed.) **Advanced steel: the recent scenario in steel science and technology**. 1st ed. Beijing: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011. cap. 6, p. 35-57.

DURAND-CHARRE, M. Grains, Grain Boundaries and Interfaces. In: \_\_\_\_\_. **Microstructure of Steels and Cast Irons**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. p.151-162.

DURAND-CHARRE, M. Plain Carbon and Low Alloy Steels. In: \_\_\_\_\_. **Microstructure of Steels and Cast Irons**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. p.289-296.

ENGL, B. Advanced high-strength sheet steels with high manganese contents. **Steel Grips - Journal of Steel and Related Materials**, v.9, p. 251-258, 2011. Disponível em: <www.steel-grips.com>. Acesso em 27 mar. 2014.

FAZANO, C. A. Determinando-se o tamanho de grãos em ligas de cobre-zinco através da análise de imagem. **Revista Analytica**, n.27, p.50-58, fev/mar. 2007.

FERRER, M. H. **Estudo das transformações de fase de aço 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.

FLAXA, V.; SHAW, J. Material applications in ULSAB-AVC (Advanced vehicle concepts). In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXHIBITION AND AUTOMOTIVE & TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONGRESS, 2002, Detroit. **SAE Paper 2002-01-2074**. Detroit: SAE International, 2002.

FONSTEIN, N. **Advanced High Strength Sheet Steels**. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 396p.

FROMMEYER, G.; BRÜX, U.; NEUMANN, P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes. **ISIJ International**, v.43, n.3, p. 438-446, 2003.

FROMMEYER, G.; BRÜX, U. Microstructures and mechanical properties of high-strength Fe-Mn-Al-C light-weight TRIPLEX steels. **Steel Research International**, v.77, n.9-10, p. 627-633, 2006.

FUKUGAUCHI, C. **Metodologia para caracterização metalográfica de um aço TRIP por microscopia óptica**. 2010. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.



FÜREDER, E. et al. Classical etching techniques and their applications in the quantitative phase determination of modern and ultrahigh-strength steel. **Prakt. Metallogr**, München, v. 47, p. 374-387, 2010.

GALÁN, J. et al. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia**, v. 48, n.2, p. 118-131, Mar-Apr. 2012.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

GAN, Y. Advanced steel and our society: better steel, better world (opening address and the introduction of the specific proceedings). In: WENG, Y.; DONG, H.; GAN, Y (Ed.). **Advanced steels - the recent scenario in steel science and technology**. 1st ed. Beijing: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011. cap.1, p. 3-7.

GARCIA-MATEO, C.; CABALLERO, F. G.; BHADESHIA, H. K. D. H. Development of hard bainite. **ISIJ International**, v.43, n.8, p. 1238-1243, 2003a.

GARCIA-MATEO, C.; CABALLERO, F. G.; BHADESHIA, H. K. D. H. Acceleration of low-temperature bainite. **ISIJ International**, v.43, n.11, p. 1821-1825, 2003b.

GARCIA-MATEO, C.; CABALLERO, F. G.; BHADESHIA, H. K. D. H. Low temperature bainite. **Journal de Physique IV**, v.112, p. 285-288, 2003c.

GARCIA-MATEO, C.; CABALLERO, F. G. The role of retained austenite on tensile properties of steels with bainitic microstructures. **Materials Transactions**, v.46, p. 1839-1846, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6.ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2011. 360p.

GIBBS, P. J. et al. Austenite stability effects on tensile behavior of manganese-enriched-austenite transformation induced plasticity steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.42A, p. 3691-3702, Dec. 2011.

GIESBRECHT, F. G.; GUMPERTZ, M. L. **Planning, construction, and statistical analysis of comparative experiments**. 1.ed. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2004. 693p.

GIRAULT, E. et al. Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of TRIP-assisted steels. **Materials Characterization**, New York, v. 40, p. 111-118, 1998.

GIRAULT, E. et al. Comparison of the effects of silicon and aluminium on the tensile behavior of multiphase TRIP-assisted steels. **Scripta Materialia**, v. 44, p.885 - 892, 2001.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte & Conformação de Metais**, p.26-57, dez. 2008.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. In: CONGRESSO DE CORTE E CONFORMAÇÃO DE METAIS, 5, 2009, São Paulo.

**Anais...** São Paulo: **Aranda Eventos**, 2009. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/publ.html#dp>>. Acesso em: 17 out. 2013.

GRAJCAR, A.; KUZIAK, R.; ZALECKI, W. Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v.12, p. 334-341, 2012.

GRANBON, Y. **Structure and mechanical properties of dual phase steels - an experimental and theoretical analysis**. 2010. 56f. Thesis (Doctorate in Materials Science and Engineering – Mechanical Metallurgy) – Royal Institute of Technology, *KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm, 2010.

GRÄSSEL, O. et al. High strength Fe-Mn-(Al-Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application. **International Journal of Plasticity**. v.16, p. 1391-1409, 2000.

GREENE, N. D.; RUDAW, P. S.; LEE, L. Principles of metallographic etching. **Corrosion Science**, v.6, p.371-379, 1966.

HAIRER, F. et al. Etching techniques for the microstructural characterization of complex phase steels by light microscopy. In: INTERNATIONAL DOCTORAL SEMINAR, 2008, Smolenice. **Materials Science and Technology (ISSN: 1335-9053)...** Smolenice: STU Faculty of Materials Science and Technology, 2008. Disponível em: <[http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy\\_casopis/2008/4mimorc/haier.pdf](http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2008/4mimorc/haier.pdf)>. Acesso em 15 jun. 2011.

HAMADA, A. S. **Manufacturing, mechanical properties and corrosion behaviour of high-Mn TWIP steels**. 2007. 54f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) – Faculty of Technology, University of Oulu, Oulu- Finland, 2007.

HAN, H. N. et al. Design method for TRIP-aided steel based on a microstructure-based modelling for transformation-induced plasticity and mechanically induced martensitic transformation. **Materials Science and Engineering A**, n.499, p.462-468, 2009.

HANZAKI, A. Z; HODGSON, P. D.; YUE, S. Hot deformation characteristics of Si-Mn TRIP steels with and without Nb microalloy additions. **ISI International**, v.35, n.3, p. 324-331, 1995.

HASHIMOTO, T. M.; SILVA, A. P.; PEREIRA, M. S.; ABDALLA, A. J. Caracterização microestrutural de aços multifásicos por técnica de trílice ataque. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DO SMATERIAIS, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...**, 2006. p1-7.

HE et al. Effect of strain rate on deformation behavior of TRIP steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 2141-2147, 2012.

HOWELL, R. A. **Microstructural influence of dynamic properties of age hardenable FeMnAl alloys**. 2009. 249f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Metallurgical Engineering) – Faculty of the Graduate School - Missouri University of Science and Technology, Missouri, 2009.

HÜSEYİN, A.; HAVVA, K. Z.; CEYLAN, K. Effect of intercritical annealing parameters on dual phase behavior of commercial low-alloyed steels. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 17, n.4, p.73-78, 2010.

JACQUES, P. J. et al. The developments of cold-rolled TRIP-assisted multiphase steels. Low silicon TRIP-assisted multiphase steels. **ISIJ International**, v.41, n.9, p. 1061-1067, 2001.

JACQUES, P.J. et al. On measurement of retained austenite in multiphase TRIP steels - results of blind round robin test involving six different techniques. **Materials Science and Technology**, v.25, n.5, p. 567-574, 2009.

JÄHNE, B. **Practical Handbook on Image Processing for Scientific Applications**. 1ed. Florida, CRC Press LLC, 1997. 589p.

JANG, J. H.; KIM, I. G.; BHADESHIA, H. K. D. H.  $\epsilon$ -carbide in alloy steels: first-principles assessment. **Scripta Materialia**, v. 6, p. 121-123, 2010.

JIN, Y. S. Development of advanced high strength steels for automotive applications. **la metallurgia italiana**. n.6, p. 43-48, 2011.

KAMYABI-GOL, A.; SHEIKH-AMIRI, M. Spheroidizing kinetics and optimization of heat treatment parameters in CK60 steel using Taguchi robust design. **Journal of Iron and Steel Research, International**. v.17, n.4, p. 45-52. 2010.

KANG, J. et al. Estimation of phase fraction in dual phase steel using microscopic characterizations and dilatometric analysis. **Materials Characterization**, n.84, p.205-215, 2013.

KECHAGIAS, J.; PETROPOULOS, G.; VAXEVANIDIS, N. Application of Taguchi design for quality characterization of abrasive water jet machining TRIP sheet steels. **Int J Adv Manuf Technol**, n. 62, p. 635-643. 2012.

KEHL, G. L.; METLAY, M. The mechanism of metallographic etching I. The reaction potentials of a two-phase brass in various etching reagents. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 101, n. 3, p. 124-127, Mar. 1953.

KEY to Metals. **Multi phase twinning-induced plasticity (TWIP) steel**. Disponível em: <<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PT&NM=207>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

KILPATRICK, J. R.; BENSCOTER, A. O.; MARDER, A. R. Tint etching improves resolution and contrast of microstructures. **Metal Progress**, p. 79-82, Dec. 1971.

KIM, H.S. et al. State-of-the-science of high manganese TWIP steels for automotive applications. In: HALDAR, A.; SUWAS, S.; BHATTACHARJEE, D. (Ed.). **Microstructure and texture in steels and other materials**. 1st ed. London: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2009. cap.10, p. 165-183.

KIM, H. S.; SUH, D.; KIM, N. J. Fe-Al-Mn-C lightweight structural alloys: a review on the microstructures and mechanical properties. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 14, p. 1-11, 2013.

KIM, S. J. et al. Development of a dual phase steel using orthogonal design method. **Materials and Design**, v. 30, p. 1251-1257, 2009.

KONG, J. P. et al. Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steel. **Materials and Design**, n.54, p.598-609, 2014.

KUBILAY, C.; ZEYDIN, H. K.; AYDIN, H. The microstructural characterization of dual phase steel with the method of chemical etching. **Prakt. Metallogr**, München, v. 45, p. 610-619, 2008.

KURZYDTHOWSKI, K. J.; RALPH, B. **The Quantitative description of the Microstructure of Materials**. 1ed. Florida, CRC Press LLC, 1995. 418p.

KUZIAK, R.; KAWALLA, R.; WAENGLER, S. Advanced high strength steels for automotive industry. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, n.2, v. 8, p. 103-117, 2008.

LEDOLTER, J.; BURRILL, C. W. **Statistical quality control**. 1.ed. New York, John Wiley & Sons, 1999. 526p.

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.

LEUNIS, E. et al. Quantitative phase analysis of multi-phase steels - PHAST - **Final report**. Luxembourg: European Commission – technical steel research, 2006. 125p.

LI, H. Y. et al. Microstructure and mechanical properties of an ultrahigh-strength 40SiMnNiCr steel during the one-step quenching and partitioning process. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.41A, p. 1284-1300, May 2010.

LIU, H. et al. An ultrahigh strength steel with ultrafine-grained microstructure produced through intercritical deformation and partitioning process. **Materials & Design**. v.83, p. 760-767, 2015.

LOMBARDO, S. **Estudo do envelhecimento após deformação em um aço Complex Phase**. 2011. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

MAFFEI, B.; SALVATORE, W.; VALENTINI, R. Dual-phase steel rebars for high-ductile r.c. structures, Part I: microstructural and mechanical characterization of steel rebars. **Engineering Structures**. v.29, p. 3325-3332, 2007.

MALLAIAH, G.; KUMAR, A.; REDDY, P. R.; REDDY, M. Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel weldments - Taguchi approach. **Materials and Design**, n.36, p.443-450, 2012.

MARRA, K. M. Aços dual phase da Usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores. In: WORKSHOP SOBRE INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE AÇOS DE ELEVADO VALOR AGREGADO - FOCO INDÚSTRIA AUTOMOTIVA, 2, 2008, Santos. **Anais...**São Paulo: ABM Brasil, 2008. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/cim/downloads.asp>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

MAŠEK, B.; STAŇKOVÁ, H.; NOVÝ, Z.; MEYER, L.W.; KRACÍK, W. The influence of thermomechanical treatment of TRIP steel on its final microstructure. **Journal of Materials Engineering and Performance**. v.18, n.4, p.385-389, June 2009.

MASON, P. W.; PREVÉY, P. S. Iterative Taguchi analysis: optimizing the austenite content and hardness in 52100 steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 10, n. 1, p. 14-21, Feb. 2001.

MATLOCK, D. K.; SPEER, J. G. Third generation of AHSS: microstructure design concepts. In: HALDAR, A.; SUWAS, S.; BHATTACHARJEE, D. (Ed.). **Microstructure and texture in steels and other materials**. 1st ed. London: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2009. cap.11, p. 185-205.

MATLOCK, D. K. et al. Recent development in advanced high strength steels for automotive applications: an overview. **JESTECH**, v.15, n.1, p.1-12, 2012.

MAZANCOVÁ, E. Properties of high manganese Fe-Mn-Al-C alloys. In: INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE - Trends in the development of machinery and associated technology, 12, 2008, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: TMT, 2008. p.221-224

MERWIN, M. J. Microstructure and properties of cold rolled and annealed low-carbon manganese TRIP steels. **Iron & Steel Technology**, v. 5, n.10, p.66-84, Oct. 2008.

MESPLONT, C. **Phase transformation and microstructure - mechanical properties relations in Complex Phase high strength steels** . 2002. 234f. Thesis (Doctorate in de Toegepaste Wetenschappen - Materiaalkunde) – Ingénieur Ecole Universitaire Des Ingénieurs de Lille - DEA Science des Matériaux, Université de Lille, Lille, 2002.

MILLER, R. L. Ultrafine-grained microstructures and mechanical properties of alloy steels. **Metallurgical Transactions**, v. 3, p.905-912, Apr.1972.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade** (tradução de: Ana Maria Lima de Farias; Vera Regina Lima de Faria e Flores). 4.ed. Rio de Janeiro, LTC Editora, 2004. 513p. Introduction to statistical quality control.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8.ed. New York, John Wiley & Sons, 2012. 730p.

MUKHERJEE, M.; SINGH, S. B.; MOHANTY, O. N. Microstructural characterization of TRIP-aided steels. **Materials Science and Engineering A**, n.486, p.32–37, 2008.

MUKHERJEE, K.; HAZRA, S.S.; MILITZER, M. Grain refinement in dual-phase steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.40A, p. 2145-2159, Sep. 2009.

MÜLLER, J. W. Possible advantages of a robust evaluation of comparisons. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v.105, n.4, p. 551-555, Aug. 2000.

OKITSU, Y.; TAKATA, N.; TSUJI, N. Mechanical properties of ultrafine grained ferritic steel sheets fabricated by rolling and annealing of duplex microstructure. **Journal of Materials Science**, n.43, p.7391-7396, 2008.

OKITSU, Y.; TAKATA, N.; TSUJI, N. A new route to fabricate ultrafine-grained structures in carbon steels without severe plastic deformations. **Scripta Materialia**, n.60, p.76-79, 2009.

PASTORE, E. et al. Experimental investigation on low-carbon quenched and partitioned steel. **la metallurgia italiana**, n.9, p. 25-35, 2011.

PERELOMA, E. V.; TIMOKHINA, I. B.; HODGSON, P. D. Transformation behaviour in thermomechanically processed C-Mn-Si TRIP steels with and without Nb. **Materials Science and Engineering A**, n.273-275, p.448-452, 1999.

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

PINKHAM, M. How high can high-strength steel go? **Metal Center News**, *Oak Brook*, May 2013. Disponível em: <<http://www.metalcenternews.com/Editorial/CurrentIssue/May2013/tabid/6109/articleType/ArticleView/articleId/11009/Primer-on-High-Strength-Steel.aspx>>. Acesso em: 22 out. 2013.

POLAT, A.; ÖZTÜRK, F.; TOROS, S. The effects of strain rate and temperature on the mechanical properties of TRIP800 steel. In: INTERNATIONAL IRON & STEEL SYMPOSIUM, 2012, Karabük. **Proceedings...** Karabük: Karabük University, 2012. Disponível em: <<http://iiss12.karabuk.edu.tr/papers/iiss12.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2013.

RADWAŃSKI, K.; WROŻYNA, A.; KUZIAK, R. Role of the advanced microstructures characterization in modeling of mechanical properties of AHSS steels. **Materials Science and Engineering A**, n.639, p.567-574, 2015.

RANA, R.; LIU, C.; RAY, R. K. Low-density low-carbon Fe-Al ferritic steels. **Scripta Materialia**, n.68, p.354-359, 2013.

RAO, S. An overview of Taguchi method: evolution, concept and interdisciplinary applications. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v.4, n.10, p.621-626, 2013.

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

RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, J. A. et al. Thermo-mechanical behaviour of TRIP 1000 steel sheets subjected to low velocity perforation by conical projectiles at

different temperatures. **International Journal of Solids and Structures**, v. 47, p.1268–1284, 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.

ROY, R. K. **Design of experiments using the Taguchi approach**. 1.ed. New York, John Wiley & Sons, 2001. 538p.

RUSS, J. C. **Image Processing Handbook**. 6ed. Florida, CRC Press LLC, 2011. 838p.

RYDE, L. et al. Cold-rolled complex-phase (CP) steel grades with optimised bendability, stretch-flangeability and anisotropy (CP-Steels) - **Final report**. Luxembourg: European Commission - Research Fund for Coal and Steel, 2012. 116p.

SAMEK, L.; KRIZAN, D. Steel - material of choice for automotive lightweight applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS, 22, 2012, Brno. **Proceedings...** Brno: **Thomson Reuters**, 2012. Disponível em: <[http://is.muni.cz/repo/981550/papers\\_en.htm](http://is.muni.cz/repo/981550/papers_en.htm)>. Acesso em: 20 set. 2013.

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

SANTOFIMIA, M. J. et al. Characterization of the microstructure obtained by the quenching and partitioning process in a low-carbon Steel. **Materials Characterization**, n.59, p.1758-1764, 2008.

SARKAR, S. **Microstructural evolution model for hot strip rolling of a Nb-Mo Complex Phase steel**. 2008. 161f. Thesis (Doctor of Philosophy – Materials Engineering), University of British Columbia, 2008.

SCHULTZ, R. A.; ABRAHAM, A. K. Metallic materials trends for north american light vehicles. In: GREAT DESIGNS IN STEEL, 8, 2009, Livonia. **Proceedings...** AISI, 2009 Livonia: Disponível em: <<http://www.autosteel.org>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

SCOTT, C.; PERRARD, F.; BARGES, P. Microalloying with vanadium for improved cold rolled TRIP steels. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON APPLICATION TECHNOLOGIES OF VANADIUM IN FLAT - ROLLED STEELS, 2005, Suzhou. **Proceedings...** Suzhou: **Vanitec**, 2005. Disponível em: <<http://vanitec.org/vanitec-siminar-2005/>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

SHAW, J. R.; ZUIDEMA, B. K. New High strength steels help automakers reach future goals for safety, affordability, fuel efficiency and environmental responsibility. In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXPOSITION, 2001, Detroit. . **SAE Paper 2001-01-3041**. Detroit: SAE International, 2001.

SHERIF, M. Y. et al. Stability of retained austenite in TRIP-assisted steels. **Materials Science and Technology**. v.20, p-319-322, Mar. 2004.

SHI, J. et al. Ultrafine grained duplex structure developed by ART-annealing in cold rolled medium-Mn steels. **Journal of Iron and Steel Research, International**. v.21, n.2, p. 208-214. 2014.

SINHA, A. K.; WU, C.; LIU, G. Steel Nomenclature. In: TOTTEN, G. E. (Ed.) **Steel heat treatment: metallurgy and technology**. 2nd ed. New York: CRC Press, 2007. cap. 1, p.1-89.

SODJIT, S.; UTHAISANGSUK, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. **Materials and Design**, n.41, p.370-379, 2012.

SONG, R. et al. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. **Materials Science and Engineering A**, n.441, p.1-17, 2006.

SPEER, J. G.; MATLOCK, D. K. Recent developments in low-carbon sheet steels. **Journal of Metals - JOM**, New York, p.19-24, Jul. 2002.

SPEER, J. G. et al. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. **Acta Materialia**, n.51, p.2611-2622, 2003.

SPEER, J. G. et al. Analysis of microstructure evolution in quenching and partitioning automotive sheet steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.42A, p. 3591-3601, Dec. 2011.

STAUFNER, W. Advanced high-strength steels in Mercedes-Benz passenger cars. In: GREAT DESIGNS IN STEEL, 2, 2003, Livonia. **Proceedings...** AISI, 2003. Livonia: Disponível em: <<http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202003/10%20-%20AHSS%20in%20Mercedes-Benz%20Passenger%20Cars.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2014.

SUH, D. et al. Influence of Al on the microstructural evolution and mechanical behavior of low carbon, manganese transformation-induced plasticity steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 41, p.397-408, 2010.

SZABÓ, P. J.; KARDOS, I. Correlation between grain orientation and the shade of color etching. **Materials Characterization**, n.61, p.814-817, 2010.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's quality engineering handbook**. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 1662p.

TAMARELLI, C. M. AHSS 101: the evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications. Steel Market Development Institute. Michigan: AISI, 2011. 45p. Disponível em: <[www.autosteel.org](http://www.autosteel.org)>. Acesso em: 13 ago. 2013.

THYSSENKRUPP CATALOG – **Complex Phase Steels CPW e CPK**, ThyssenKrupp Steel Europe, 2009.



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.

TSIPOURIDIS, P. **Mechanical properties of Dual Phase steels**. 2006. 115f. Thesis (Doktor-Ingenieurs - Materialprüfamt), Technischen Universität München, München, 2006.

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

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

VIANA, D. J. **Aplicação do método de Taguchi para redução de porosidade de peças fundidas sob pressão**. 2012. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade de Taubaté, 2012.

VUROBI JÚNIOR, S. **Caracterização microestrutural de um aço SAE 4118H modificado submetido a diferentes tratamentos isotérmicos**. 2007. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007.

WANG, C. et al. Development of ultrafine lamellar ferrite and austenite duplex structure in 0,2C5Mn steel during ART-annealing. **ISIJ International**, v.51, n.4, p. 651-656, 2011.

WANG, Z. C. et al. Bake-hardening behavior of cold-rolled CMnSi and CMnSiCu TRIP-aided steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 151, p. 141-145, 2004.

WANG, C. Y. et al. Characterization of microstructure obtained by quenching and partitioning process in low alloy martensitic steel. **Materials Science and Engineering A**, n.527, p. 3442–3449, 2010.

WOJNAR, L. **Image Analysis - Applications in Materials Engineering**. 1.ed. Florida, CRC Press LLC, 2000. 245p.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World crude steel output by -2,8% in 2015**. 2016. 2p. Disponível em: < <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2016/--World-crude-steel-output-decreases-by--2.8--in-2015.html>>. Acesso em 29 fev. 2016.

WORLD AUTO STEEL. **Advanced High Strength Steel - Application Guidelines**. Version 5.0. 2014. 276p. Disponível em: < <http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Acesso em 02 fev. 2015.

YANG, W. H.; TARNG, Y. S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 84, p. 122-129, 1997.

YUE, S.; et al. Microstructural developments in advanced high strength steels. In: INNOVATIONS IN STEEL SHEET AND BAR PRODUCTS AND PROCESSING, 2005, Detroit. **SAE Paper 2005-01-1329**. Detroit: SAE International, 2005.

ZHUANG, L; DI, W. Influence of hot rolling conditions on the mechanical properties of hot rolled TRIP steel. **Journal of Wuhan University of Technology-Master**, v.23, n.1, p.74-79, feb. 2008.

ZUIDEMA, B.K. et al. New High Strength Steels Applied to the Body Structure of ULSAB-AVC. In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXPOSITION, 2001, Detroit. **SAE Paper 2001-01-3042**. Detroit: SAE International, 2001.