

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CICLO TÉRMICO NOS PROCESSOS DE  
ARQUEAMENTO E ALINHAMENTO DE CHASSIS RODOVIÁRIOS

Daniel Angelo Zattera Milesi

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CICLO TÉRMICO NOS PROCESSOS DE  
ARQUEAMENTO E ALINHAMENTO DE CHASSIS RODOVIÁRIOS

DANIEL ANGELO ZATTERA MILESI  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2015

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Métodos de Fabricação, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banda Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Dr. Rafael Menezes Nunes, UFRGS

Prof. Dr. Nestor Cezar Heck, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito, LDTM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente o Professor Alexandre da Silva Rocha, pela orientação e apoio dados ao longo do mestrado.

Ao colega e amigo Victor Hugo Velazquez Acosta pelas horas de discussão sobre metalurgia dos materiais.

A empresa USIMINAS pelo imenso auxílio nos ensaios mecânicos realizados e por ter me recebido em seu Centro de Pesquisa.

A Randon Implementos pela oportunidade de continuar estudando.

A UFRGS por ser uma instituição pública de ensino de qualidade superior.

Ao colega Gabriel Andreazza pela ajuda na parte metalográfica.

Aos amigos Alfredo Tome, Cássio Silva Lopes, Saul Camelo, Gustavo de Godoy Jose e Elton João Zanol pela companhia nas idas e vindas de Porto Alegre.

A minha família, pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

## RESUMO

Em determinadas rotas de manufatura de componentes automotivos, principalmente de produtos do segmento rodoviário pesado, são muito comuns processos de desempenho a quente, assim como outros procedimentos como arqueamento e alinhamento de longarinas. O presente trabalho tem por objetivo traçar os principais impactos destes processos sobre os materiais ASTM A570 GR36-C e o aço de alta resistência e baixa liga norma DIN EN 10149 S700MC em uma rota de fabricação de produtos automotivos com interferência de um procedimento a quente. Esses materiais, quando submetidos a determinados ciclos térmicos para alinhamento a quente, através do aquecimento de algumas regiões pontuais e do posterior resfriamento ao ar calmo têm suas propriedades mecânicas alteradas. Para investigar estas modificações, foram reproduzidas as condições do processo atual para mapeamento de dados de temperatura para os subsequentes ensaios de laboratório. Comparando as amostras submetidas ao ciclo térmico, com as produzidas com a mesma matéria prima sem aquecimento, pode-se verificar o impacto causado pelo processo de alinhamento a quente utilizado sobre as propriedades mecânicas do material. Os resultados mostram que o aço ASTM A570 GR36-C não tem suas propriedades alteradas a ponto de inviabilizar o uso do material. Para o aço DIN EN 10149 S700MC as alterações são expressivas em todos os ciclos térmicos realizados. Com isso, ocorrem modificações na microestrutura pelo tratamento térmico ocasionando a diminuição de algumas propriedades mecânicas importantes, como tensão de escoamento, microdureza e limite de resistência à fadiga. Essas últimas variáveis foram correlacionadas e mostraram o mesmo comportamento.

Palavras-chave: arqueamento de vigas; aços ARBL; ciclo térmico; limite de fadiga.

## **ABSTRACT**

In certain manufacturing routes of automotive components, especially of heavy road segment products are very common straightening processes hot, as well as other procedures such as bending and alignment of rails. This paper aims to draw the main impacts of these processes on ASTM A570 GR36-C materials and high strength low alloy steel DIN EN 10149 S700MC on a route manufacturing of automotive products with interference from a hot procedure. These materials, when subjected to certain thermal cycles to hot alignment by heating of certain individual regions and the subsequent cooling the still air have changed their mechanical properties. In order to investigate this, they were reproduced the conditions of the current process for temperature mapping data for subsequent laboratory tests. Comparing the samples subjected to thermal cycling with produced with the same raw material unheated, one can ascertain the impact caused by hot alignment process used on the mechanical properties of the material. The results show that the steel ASTM A570 GR36-C does not have its properties changed as to make the use of the material. To DIN EN 10149 S700MC Steel changes are significant in all thermal cycles performed. Thus, changes occur in the microstructure by heat treatment causing a reduction of some important mechanical properties such as yield strength, hardness and fatigue strength limit. The latter variables were correlated and showed the same behavior.

**Keywords:** curvature of beams; HSLA steels; thermal cycle; limit fatigue.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GERAL DA PESQUISA</b> .....	<b>1</b>
1.1	Fator Motivador.....	1
1.2	Contextualização: O Problema da Malha Rodoviária Brasileira versus Integridade Estrutural.....	1
1.3	Objetivo Principal.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1	Os Ciclos Térmicos nos Processos de Fabricação de Implementos Rodoviários	4
2.1.1	O Alinhamento a Quente de Vigas.....	8
2.1.2	O Arqueamento a Quente de Vigas.....	9
2.2	Aço ASTM A570 GR36-C.....	15
2.3	Aço DIN EN 10149 S700MC.....	17
<b>3</b>	<b>ASPECTOS GERAIS SOBRE PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS FERROSOS E VIDA EM FADIGA</b> .....	<b>23</b>
3.1	Propriedades Térmicas.....	23
3.1.1	Tensões Térmicas.....	23
3.2	Vida em Fadiga.....	27
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>30</b>
4.1	O Processo de Alinhamento a Quente de Vigas.....	32
4.2	O Processo de Arqueamento a Quente de Vigas.....	33
4.3	Ciclos Térmicos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas.....	36
4.3.1	Levantamento das Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas Conforme Norma.....	38
4.3.2	Levantamento das Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas Sem Obedecer a Norma.....	39
4.4	Etapas do Procedimento Experimental.....	41
4.4.1	Preparação das Amostras.....	41
4.4.2	Identificação dos Corpos de Prova.....	44
4.4.3	Processos de Arqueamento e Alinhamento a Quente nos Corpos de Prova.....	46



4.4.4 Ensaio de Tração .....	49
4.4.5 Caracterização Microestrutural dos Materiais .....	49
4.4.6 Microdureza Vickers (HV) .....	49
4.4.7 Curva S-N .....	51
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Resultados dos Ensaios de Tração.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Caracterização Microestrutural por Microscopia Ótica (MO) .....</b>	<b>57</b>
5.2.1 Micrografias do Material ASTM A570 GR36-C .....	57
5.2.2 Micrografias do Material DIN EN 10149 S700MC .....	60
<b>5.4 Resultados da Microdureza Vickers (HV) nos Corpos de Prova .....</b>	<b>62</b>
5.4.1 Microdureza Vickers do Material ASTM A570 GR36-C .....	62
5.4.2 Microdureza Vickers do Material DIN 10149 EN S700MC .....	65
<b>5.5 Resultados Obtidos com Ensaios de Fadiga: Curvas S-N .....</b>	<b>67</b>
5.5.1 Curvas S-N para o material ASTM A570 GR36-C .....	68
5.5.2 Curvas S-N para o material DIN EN 10149 S700MC.....	72
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
<b>7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE A – Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas na Condição de Temperatura Conforme Normas .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE B – Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas na Condição Fora de Norma .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE C – Imagens Termográficas do Processo de Arqueamento de Vigas.</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE D – Resumo dos Principais Resultados Obtidos nos Procedimentos Experimentais Para o Material ASTM A570 GR36-C.....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE E – Resumo dos Principais Resultados Obtidos nos Procedimentos Experimentais Para o Material DIN EN 10149 S700MC. ....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE F – Análise da Variância nos Ensaios de Microdureza dos Materiais ASTM A570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC.....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das mobilidades de transportes no Brasil em 2013. ....	2
Figura 2 - Semirreboque Basculante (SR BA). ....	4
Figura 3 - Semirreboque Carrega-Tudo (SR CT). ....	5
Figura 4 - Geometria padrão de uma viga I de SR CT e suas diferentes seções transversais. ...	6
Figura 5 - Etapa de soldagem GMAW robotizada de uma viga de um veículo rodoviário. ....	7
Figura 6 - Soldagem por arco-submerso de uma viga de veículo rodoviário. ....	7
Figura 7 - Arqueamento a frio de uma viga I. ....	10
Figura 8 - Semirreboque Carrega-Tudo com viga arqueada de projeto. ....	10
Figura 9 - (a) Gráfico da Tensão <i>versus</i> Deformação demonstrando a deformação plástica após carregamento (b) histerese mecânica. ....	11
Figura 10 - Exemplo de trincas de reaquecimento em aços CrMoV: (a) macroestrutura (35x) e (b) microestrutura (1000x).....	12
Figura 11 - Combinação Veículo Trator (CM) acoplado em um Dolly (DL) com um Semireboque (SR CT). ....	13
Figura 12 - Viga arqueada de um implemento rodoviário com a indicação de como será aplicada a carga .....	13
Figura 13 - Deslocamento em todo o comprimento de uma viga de um implemento rodoviário com carga.....	13
Figura 14 - Análise por MEF da parte central da viga com carregamento e que não recebeu arqueamento.....	13
Figura 15 - SR CT com perda no arqueamento da viga. ....	14
Figura 16 - Mecanismos de endurecimento em aços de baixo carbono. ....	18
Figura 17 - Endurecimento por precipitação pelo modelo de Orowan-Ashby.....	19
Figura 18 - Solubilidade de carbonetos e nitretos na austenita de aços microligados.....	20
Figura 19 - Microestrutura do Aço DIN EN 10149 S700MC, com ampliação de 500x (a) e MEV com 3500x (b).....	20
Figura 20 - Placa retangular para o cálculo das tensões térmicas transientes considerando o estado plano de tensões.....	26
Figura 21 - Tensões térmicas em uma laje infinita durante (a) resfriamento e (b) aquecimento. ....	26

Figura 22 - Curvas S-N típicas para metais sob tensão de flexão reversível.....	28
Figura 23 - Correlação entre a dureza e o limite de fadiga para alguns aços. ....	29
Figura 24 - Fluxograma do método utilizado para pesquisa. ....	30
Figura 25 - Alinhamento a quente entre caixa de carga e chassi de um SR BA. ....	33
Figura 26 - Região de aplicação da chama de oxiacetileno para o correto desempenho. ....	33
Figura 27 - Condições de aplicação da carga em função do arqueamento.....	34
Figura 28 - Processo de arqueamento a quente. ....	35
Figura 29 - Curva térmica característica para arqueamento de vigas.....	37
Figura 30 - Aspecto visual da região aquecida.....	37
Figura 31 - Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' conforme norma. ....	38
Figura 32 - Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' na condição fora de norma. ....	39
Figura 33 - Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento realizados em corpos de prova na condição fora de norma.....	40
Figura 34 - Sentido correto de corte dos corpos de prova no <i>blank</i> . ....	42
Figura 35 - Desenho do corpo de prova para ensaios de tração. ....	43
Figura 36 - Desenho do corpo de prova para levantamento das curvas S-N.....	43
Figura 37 - Desenho do corpo de prova para ensaio de microdureza.....	44
Figura 38 - Forno tipo câmara com controle automático de temperatura. ....	46
Figura 39 - Controle de resfriamento pela câmara termográfica. ....	47
Figura 40 - Aspecto visual de algumas amostras. ....	47
Figura 41 - Aquecimento heterogêneo em corpos de prova. ....	48
Figura 42 - Monitoramento da temperatura de aquecimento através da câmara termográfica. ....	48
Figura 43 - Amostras embutidas para medição de microdureza Vickers. ....	50
Figura 44 - Medição da microdureza Vickers de corpos de prova.....	50
Figura 45 - Máquina para levantamento das curvas S-N.....	51
Figura 46 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas de três diferentes amostras do material ASTM A570 GR36-C obtidas no ensaio de tração. ....	54
Figura 47 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas de três diferentes amostras do material DIN EN 10149 S700MC obtidas no ensaio de tração. ....	55

Figura 48 - Tensão de ruptura em função da temperatura de aquecimento para três tempos e para o material DIN EN 10149 S700MC laminado. ....	56
Figura 49 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C em estado virgem (AOr).....	57
Figura 50 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C (amostra A600Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).....	58
Figura 51 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C (amostra A600Ar) e resfriado ao ar calmo.....	58
Figura 52 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C (amostra A850Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).....	59
Figura 53 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C (amostra A850Ar) e resfriado ao ar calmo (500x).....	59
Figura 54 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC em estado virgem (amostra BOr). ....	60
Figura 55 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600°C e resfriado ao ar calmo (amostra B600Ar).....	61
Figura 56 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C (amostra B910Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).....	61
Figura 57 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C (amostra B910Ar) e resfriado ao ar calmo (500x).....	62
Figura 58 - Microdureza HV em três diferentes regiões do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C e resfriado ao ar calmo. ....	63
Figura 59 - Microdureza HV em três diferentes regiões do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C e resfriado ao ar calmo. ....	64
Figura 60 - Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600° e resfriado ao ar calmo.....	65
Figura 61 - Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C e resfriado ao ar calmo. ....	66
Figura 62 - Gráfico de comparação entre tensão de flexão e máxima tensão principal de uma viga. ....	68
Figura 63 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C em estado de recebimento (confiabilidade de 95%).....	70

Figura 64 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C teórica (sem correção).....	70
Figura 65 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C teórica com correção dos fatores modificadores (confiabilidade de 95%).....	71
Figura 66 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C com aquecimento térmico fora de norma, conforme item 4.3.2. (confiabilidade de 95%).....	71
Figura 67 - (a) Correlações entre microdureza HV e tensão de escoamento $\sigma_e$ , (b) e tensão de escoamento e limite de resistência a fadiga $S_f$ para o material ASTM A570 GR36-C. ...	72
Figura 68 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC em estado de recebimento (confiabilidade de 95%).....	73
Figura 69 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC teórica (sem correção). ....	74
Figura 70 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC teórica com correção dos fatores modificadores (confiabilidade de 95%).....	74
Figura 71 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC com ciclo térmico fora de norma, conforme o item 4.3.2. (confiabilidade de 95%). ....	75
Figura 72 - Diferentes curvas S-N do material S700MC. ....	76
Figura 73 - (a) Correlações entre microdureza HV e tensão de escoamento $\sigma_e$ , (b) e tensão de escoamento e limite de resistência a fadiga $S_f$ para o material DIN EN 10149 S700MC.	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços.....	17
Tabela 2 - Coeficientes de expansão térmica (coeficientes lineares médios para o intervalo de temperatura de 0-100°C). .....	23
Tabela 3 - Composição química do Aço ASTM A570 GR36-C .....	31
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Aço ASTM A570 GR36-C .....	31
Tabela 5 - Temperaturas de recristalização e austenitização do Aço ASTM A570 GR36-C. .	31
Tabela 6 - Composição química do Aço DIN EN 10149 S700MC.....	31
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do Aço DIN EN 10149 S700MC.....	32
Tabela 8 - Temperaturas de recristalização e austenitização do Aço DIN EN 10149 S700MC. ....	32
Tabela 9 - Materiais ensaiados e suas respectivas espessuras. ....	42
Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova em função do tipo de ensaio e sua respectiva norma.....	42
Tabela 11 - Descrição de cada aço identificado. ....	44
Tabela 12 - Identificação das condições de temperatura e resfriamento usados nos corpos de prova. ....	45
Tabela 13 - Tabela geral dos CP utilizados. ....	45
Tabela 14 - Resultado para os ensaios de tração para o material ASTM A570 GR36-C.....	53
Tabela 15 - Resultado para os ensaios de tração para o material DIN EN 10149 S700MC. ...	53
Tabela 16 - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga considerados para o material ASTM A570 GR36-C. ....	69
Tabela 17 - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga considerados para o material DIN EN 10149 S700MC. ....	73

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNT	Conselho Nacional de Transporte
SEST	Serviço Social do Transporte
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
AHSS	Advanced High Strength Steel
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZAC-GG	Zona Afetada pelo Calor – Grãos Grossos
GMAW	Gas Metal Arc Welding
IT	Instrução de Trabalho
CP	Corpo de Prova
MO	Microscopia Ótica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
DRX	Difração de Raios X
ISO	International Organization for Standardization
HV	Dureza Vickers
SR BA	Semirreboque Basculante
SR CT	Semirreboque Carrega-Tudo
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
ASME	American Society of Mechanical Engineers
MEF	Método dos Elementos Finitos
CM	Cavalo Mecânico
DL	Dolly
TM	Laminação Termomecânica
DQ	Têmpera Direta
ARBL	Aços de Alta Resistência Mecânica e Baixa Liga
HSLA	High Strength Low Alloy

DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
RIA	Rampa Inicial de Aquecimento
TA	Tempo de Aquecimento Constante
RAC	Resfriamento ao Ar Calmo
ZN	Zona Não Afetada Pelo Calor
AISD	Aços Inoxidáveis Superduplex
EPS	Especificação do Processo de Soldagem
END	Ensaio Não Destrutivo
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
UTHSCSA	Department of Dental Diagnostic Science at The University of Texas Health Science Center
Z_INT	Zona Intermediária (entre a ZN e a ZAC)



## LISTA DE SÍMBOLOS

(Unidades no sistema internacional)

$CT$	Capacidade técnica, t
$M_f$	Momento fletor, N.m
$\sigma$	Tensão normal (do gráfico da tensão <i>versus</i> deformação), MPa
$\sigma_f$	Tensão de flexão, MPa
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	Máxima tensão aplicada na fibra mais afastada da linha neutra nos ensaios de fadiga, MPa
$\sigma_{méd}$	Componente da tensão média no ensaio de fadiga, MPa
$\sigma_I$	Máxima tensão principal, MPa
$\sigma_e$	Tensão, resistência ou limite de escoamento do material, MPa
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível, MPa
$\sigma_{rup}$	Tensão de ruptura, MPa
$\sigma_c$	Tensão de compressão, MPa
$\sigma_x$	Tensão térmica na direção $x$ , tensão residual uniforme na direção $x$ , MPa
$\sigma_y$	Tensão térmica na direção $y$ , tensão de compressão, MPa
$\sigma_R$	Tensão residual, MPa
$CS$	Coefficiente de segurança ou fator de segurança, adimensional
$\varepsilon$	Deformação verdadeira (do gráfico da tensão <i>versus</i> deformação), m
$\varepsilon_x$	Deformação no eixo $x$ , m
$\varepsilon_y$	Deformação no eixo $y$ , m
$\varepsilon_z$	Deformação no eixo $z$ , m
$\varepsilon$	Emissividade, adimensional
$d$	Distância, m
$R$	Raio, m ou pol
$R_a$	Rugosidade, $\mu\text{m}$
$r_{min}$	Conformabilidade, m
$HB$	Dureza Brinell, MPa
$HV$	Dureza Vickers, HV5
$F_y$	Ponto mínimo de escoamento especificado dos materiais da viga, ksi
$\Psi$	Relação entre a área total da seção transversal da viga e a área das abas, adimensional

$b$	Largura da aba maior, pol; largura mínima medida na área útil da secção central do corpo de prova, mm
$D$	Distância entre as superfícies inferior e superior das abas, pol
$t$	Espessura da alma da viga, pol, tempo, s
$F_{rup}$	Carga de ruptura, N
$F_{adm}$	Carga admissível, N
$C_{eq}$	Carbono equivalente, adimensional
$CL$	Carga líquida, t
$V$	Tensão, V
$V_{alim}$	Velocidade de alimentação da máquina de solda, m/min
$A_{cm}$	Temperatura de transformação $\gamma \rightarrow Fe_3C$ nos diagramas TTT, °C
$T_{nr}$	Temperatura de não recristalização, °C
$T_a$	Temperatura conforme norma para arqueamento, °C
$C_{eq\_Dearden}$	Carbono equivalente conforme proposto originalmente por Dearden & O'Neill, adimensional
$C_{eq\_HSLA}$	Carbono equivalente conforme proposto por Graville, adimensional
$S$	Amplitude de tensão aplicada geração da curva de fadiga, MPa
$N$	Número de ciclos de tensão, ciclos
$A'$	Região (área) de aquecimento na viga, m <sup>2</sup>
$m$	Massa, kg
$A$	Área de uma secção transversal, m <sup>2</sup>
$a$	Alongamento, %
$\Delta T$	Variação de temperatura, °C
$\Delta x$	Variação entre dois pontos no plano $x$ , m
$\Delta_{DL}$	Cambagem, cm
$\Delta_M$	Valor máximo de $\Delta_{DL}$ dentro do comprimento $L$ , cm
$L$	Abrange comprimento para vão simples, pol
$L_i$	Comprimento inicial do corpo, m
$\delta_y$	Profundidade da camada deformada plasticamente, m
$\delta_T$	Diferença linear na dimensão de um corpo devido a variação térmica, m
$\delta_P$	Diferença linear na dimensão de um corpo devido a solicitações mecânicas, m

$P$	Carregamento externo, N, profundidade da camada compressiva, m
$Q$	Carga aplicada, kgf
$E$	Módulo de elasticidade, GPa
$\nu$	Razão de Poisson, adimensional
$\theta$	Ângulo de diedro da pirâmide de diâmetro do penetrador Vickers, °
$c$	Metade da espessura de uma placa plana retangular, m
$D$	Médias das diagonais medidas entre as arestas da pirâmide de diamante do penetrador, mm
$k_f$	Fator de efeitos diversos, adimensional
$S'_f$	Limite de resistência a fadiga de espécime de teste do tipo viga rotativa, MPa
$S_f$	Limite de resistência a fadiga no local crítico de uma peça de máquina na geometria e na condição de uso, MPa
$S_{ut}$	Limite à tração mínima, MPa
$K_x$	Fator de solda, adimensional
$k_a$	Fator de superfície, adimensional
$k_b$	Fator de tamanho, adimensional
$k_c$	Fator de carregamento, adimensional
$k_d$	Fator de temperatura, adimensional
$k_e$	Fator de confiabilidade, adimensional
$TG$	Tamanho de grão ASTM, adimensional

# **1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA PESQUISA**

## **1.1 Fator Motivador**

O principal fator motivador desta pesquisa foi a busca por um melhor entendimento sobre os materiais metálicos ferrosos utilizados na fabricação de veículos rodoviários para o transporte de carga, no que diz respeito ao seu comportamento em relação a diferentes temperaturas provenientes de processos de fabricação, muitos destes, realizados de maneira empírica. Porém, a abrangência destas informações, uma vez que elas já existem até certo ponto, vai além de aspectos sobre sua fabricação ou propriedades mecânicas básicas, como o limite de escoamento. Tentou-se atingir pontos mais específicos do projeto estrutural do produto, como os efeitos de diferentes ciclos térmicos oriundos dos processos de alinhamento e arqueamento de vigas sobre a microestrutura, propriedades mecânicas e vida em fadiga dos materiais envolvidos. Esses tópicos são muito peculiares ao processo de fabricação pesquisado e tão importantes quanto a etapa do cálculo estrutural, uma vez a condição essencial para projeto é que o material não sofra modificações significativas durante a manufatura do produto. Se isso acontecer, é preciso mensurar estas alterações na microestrutura e nas propriedades e considerá-las no cálculo. É fato que muitas falhas mecânicas ocorridas no segmento de transporte rodoviário tiveram como causa provável, problemas envolvendo o material utilizado. A omissão destas causas e falta de estudo a respeito preocupa e dificulta a resolução dos problemas envolvendo ciclo térmico e também geram um alto custo de pós-vendas para as empresas do setor. Este trabalho fornece uma abordagem acerca deste assunto de maneira que o memorial de cálculo do produto tenha um capítulo a mais referente aos efeitos do ciclo térmico.

## **1.2 Contextualização: O Problema da Malha Rodoviária Brasileira versus Integridade Estrutural**

A malha rodoviária é responsável por 65% da movimentação de cargas dentro do Brasil, de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2013, em sua 17ª Edição e também pelo Panorama ILOS “Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil – A percepção dos contratantes” (Figura 1). Num total de 96.714 km avaliados, 63,8 % das rodovias apresentaram alguma

deficiência no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Esses números estão piorando. Os pontos críticos aumentaram de 221 para 250. São considerados pontos críticos situações que trazem graves riscos à segurança dos usuários, como erosões na pista, buracos grandes, quedas de barreira ou pontes caídas (CNT e Sest Senat, 2013). Transitam nestas rodovias todos os tipos de veículos, onde serão abordados com ênfase os chamados veículos de transporte de cargas indivisíveis, que são caracterizados por possuírem uma legislação própria em função da complexidade de utilizações a que são submetidos, que incluem uma abrangência de capacidades técnicas de carga (CT) de 10 a 750 t.

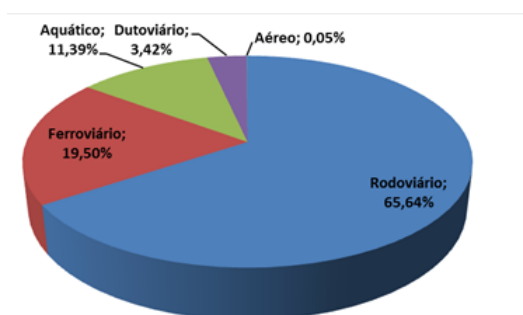


Figura 1 - Participação das mobilidades de transportes no Brasil em 2013.  
Fonte: ILOS.

Apesar desta categoria de transporte ser regida pela Resolução 11/DNIT (2004), que predispõe as “Normas para transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso e/ou dimensões e para o trânsito de veículos especiais em rodovias federais”, a falta de fiscalização e manutenção em vias federais e estaduais eleva a atenção nos itens de segurança em projetos de implementos rodoviários. A solicitação mecânica nestes casos é mais crítica que em outros tipos de veículos pelo tipo de carregamento, que geralmente não é distribuída e sim concentrada sobre a plataforma de carga útil do implemento. Somando isso as péssimas condições de tráfego em rodovias brasileiras, criam-se condições e/ou situações de risco para a carga e a estrutura como um todo, mas comprometendo, principalmente, o projeto estrutural – ou chassi – dos veículos rodoviários para transporte de carga.

A matéria prima e os métodos de fabricação envolvidos no segmento de transportes pesados devem oferecer confiabilidade e atender as normas brasileiras vigentes. As transformações pelas quais o material será submetido não podem afetar a integridade estrutural dos componentes mecânicos principais dos implementos rodoviários. É fundamental conhecer as propriedades dos aços em suas diferentes condições de pós-processamento e avaliar quais os riscos possíveis, dentro de um sistema de critérios de validação. Sempre que possível, os processos de manufatura devem ser adaptados para

atender os limites estabelecidos pelo material. Esta pesquisa visa levantar os dados necessários para as tomadas de decisão em relação aos melhores parâmetros a ser usado nos processos a quente na fabricação de chassis para implementos rodoviários da linha pesada.

### **1.3 Objetivo Principal**

Baseado nos argumentos anteriores está relacionado abaixo o objetivo principal desta pesquisa:

- Analisar os efeitos do ciclo térmico nos processos de arqueamento e alinhamento de vigas de chassis rodoviários através de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova (CP) confeccionados com os materiais ASTM A 570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC.

É importante salientar que as normas de matérias primas citadas não são intercambiáveis e que são escolhidas pelo cliente final de acordo com o modelo de produto pretendido, ficando aqui a ressalva de que este trabalho não pretende verificar qual o melhor material para determinada aplicação e sim, avaliar os efeitos do ciclo térmico sobre dois aços diferentes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Os Ciclos Térmicos nos Processos de Fabricação de Implementos Rodoviários

Os implementos rodoviários que foram abordados neste trabalho foram escolhidos pela aplicação severa a qual são submetidos e pelo processo de fabricação que incluem uma etapa de alinhamento a quente entre caixa de carga e chassi, no caso dos semirreboques do tipo Basculantes (SR BA), e de arqueamento a quente de vigas, no caso dos semirreboques do tipo Carrega-Tudo (SR CT). O semirreboque Basculante (Figura 2) pode ser utilizado para transporte de cargas variadas, como areia, brita, minério, calcário, açúcar, fertilizantes, cal e outros produtos a granel com média e alta abrasividade. Além disso, também é utilizada no transporte de lixo, cavaco de madeira, sucata e outros materiais de baixo peso específico. Obedecem a ‘Lei da Balança’ conforme Resolução 210 e 211/06 do CONTRAN. O semirreboque Carrega-Tudo (Figura 3) é utilizado para o transporte de cargas indivisíveis, como por exemplo, máquinas agrícolas, máquinas industriais, transformadores e peças para indústria petrolífera, entre outras. Transita obedecendo a Resolução 11/DNIT (2004).



Figura 2 - Semirreboque Basculante (SR BA).  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2012).



Figura 3 - Semirreboque Carrega-Tudo (SR CT).  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2012).

A estrutura principal destes semirreboques – denominada vigas de chassis rodoviários (Figura 4) – são os componentes maiores de um veículo, e onde o primeiro contato do carregamento será efetuado, para redistribuição sobre outros componentes, como travessas, longarinas e perfis laterais. Essas vigas podem ser do tipo ‘I’, ‘U’, ‘H’ ou com geometria retangular. São estruturas com secção transversal variável em toda sua extensão, e de onde se necessita retirar valores de momento fletor ( $M_f$ ) e tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) para dimensionamento, conforme procedimentos de cálculo do produto (MILESI, 2010). Verifica-se desta forma se o coeficiente de segurança (CS, ou Fator de Segurança) atende o estipulado por norma, através da relação entre a carga de ruptura  $F_{rup}$  e a carga admissível  $F_{adm}$ , onde  $F_{rup}$  é obtida em testes experimentais do material (HIBBELER, 2004). No caso específico de semirreboques, uma extrapolação matemática é muito usual para o cálculo do CS, onde a Equação 2.1 pode ser usada, igualando-se a tensão de ruptura  $\sigma_{rup}$  com o valor da tensão de escoamento  $\sigma_e$  do material, e a tensão admissível  $\sigma_{adm}$  será igualada com a tensão de flexão  $\sigma_f$  calculada (MILESI, 2010).

$$CS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} = \frac{\sigma_e}{\sigma_f} \quad (2.1)$$

Onde:

$\sigma_{rup}$  = Tensão de ruptura [MPa];

$\sigma_{adm}$  = Tensão admissível [MPa];

$\sigma_e$  = Tensão de escoamento [MPa];

$\sigma_f$  = Tensão de flexão [MPa].

Outro fator importante para ser comentado diz respeito às tensões residuais. É sabido que o estado das tensões residuais em componentes de engenharia é parcialmente responsável pelo comportamento das distorções de componentes e são correlacionados com o relaxamento



(alívio) e geração do estado de tensões residuais durante a fabricação (ROCHA, 2014). Entretanto, valores de tensões residuais ( $\sigma_R$ ), assim como a estimativa da vida em fadiga deste tipo de estrutura, são complexos de medir e de mensurar, em função do dimensional envolvido e/ou do alto custo das análises, pois apresentam diferentes comprimentos, larguras e espessuras, dependendo do modelo e da capacidade de carga (CT).

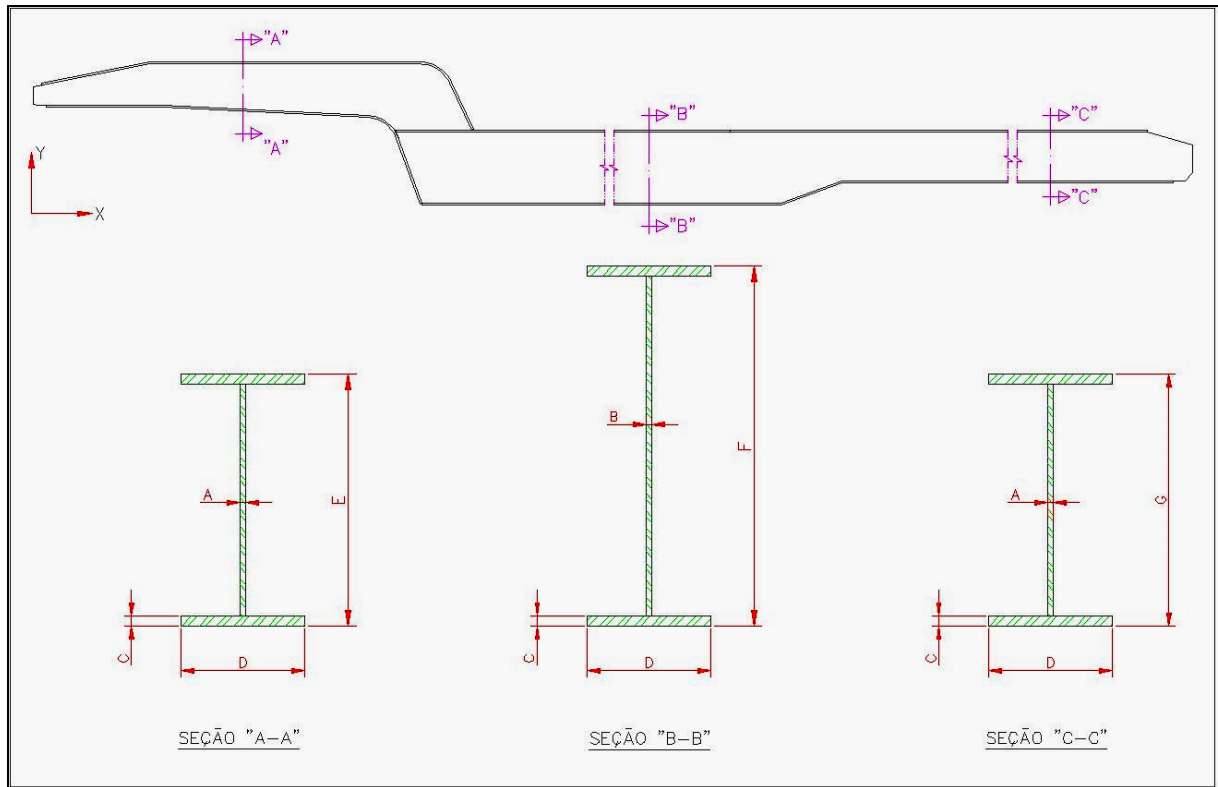


Figura 4 - Geometria padrão de uma viga I de SR CT e suas diferentes seções transversais.

Fonte: Autor (2014).

A viga sofre os efeitos de diversos ciclos térmicos, ou o aquecimento seguido de resfriamento, derivado de diversos processos de fabricação. Exemplo disso são o corte térmico a Plasma ou LASER das peças, o processo de soldagem das cintas com a alma da viga (Figura 5) por GMAW (no caso dos SR BA) e por arco submerso (nos SR CT, Figura 6), alinhamento a quente entre caixa de carga e chassi, e arqueamento a quente das vigas.

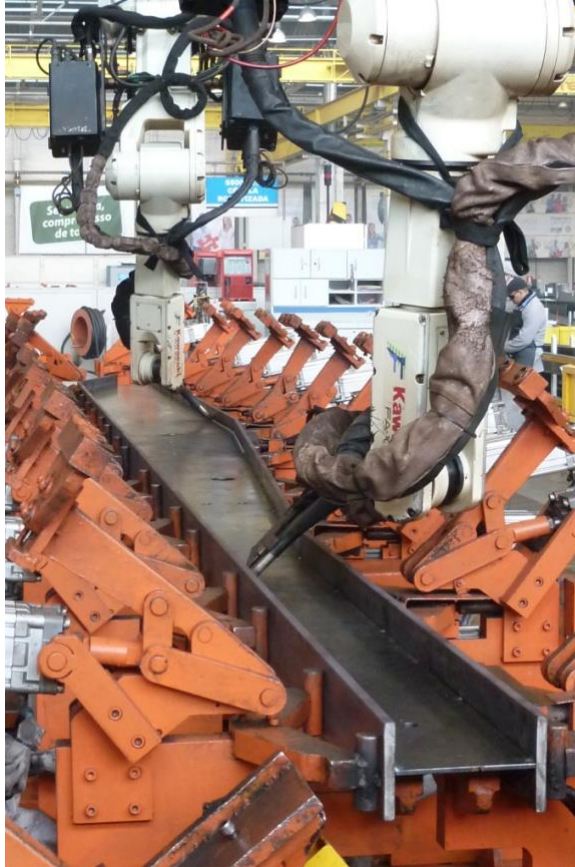


Figura 5 - Etapa de soldagem GMAW robotizada de uma viga de um veículo rodoviário.  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2014).



Figura 6 - Soldagem por arco-submerso de uma viga de veículo rodoviário.  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2014).

A primeira etapa do processo de fabricação dos produtos em questão (semirreboque), após o desbobinamento da matéria prima, é fruto de “trabalho a quente”. Quando ocorre o

corte das peças tem-se o efeito do ciclo térmico proveniente do corte a laser ou plasma. Esses métodos de corte térmico induzem tensões residuais e distorções nas peças e proporcionam uma grande extensão da Zona Afetada Termicamente (ZAC), conforme El Rayes, Walz e Sepold (2004) e Messler (2004). Com isso, têm-se impactos quando utilizado o processo de soldagem, pois haverá intervenção no cordão de solda através dos parâmetros de soldagem, sendo que as variáveis tais como a tensão ( $V$ ), a tensão de alimentação ( $V_{\text{alim}}$ ), a distância bico de contato-peça (DBCP), a inclinação da tocha, a velocidade de soldagem, assim como o tipo de gás utilizado na proteção da poça de fusão, interferem nas características do cordão de solda (RODRIGUES (A), 2005). Os efeitos térmicos dos processos de corte térmico e soldagem não serão abordados nesta pesquisa, pois são efeitos localizados em regiões de junção de peças que compõem a viga e não em seu eixo neutro, onde é aplicado o aquecimento. Logicamente, isso se trata de uma simplificação nas condições de contorno aplicadas. Os processos envolvendo ciclo térmico posteriores ao corte e a soldagem, são o alinhamento e o arqueamento de vigas.

### 2.1.1 O Alinhamento a Quente de Vigas

O processo de alinhamento a quente é, na realidade, uma técnica de desempenho à chama. A origem desta etapa de montagem do produto está no fato de que muitas empresas estão sujeitas a erros operacionais ou até mesmo métodos de manufatura inconvenientes, ocasionando o não assentamento ou encaixe dentro das tolerâncias admissíveis de projeto. Esse processo está descrito em diversas normas, como por exemplo: Norma ANSI/AISC 360-05 (*Specification for Structural Steel Buildings*) e Norma ABNT NBR 8800:2008 (Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios). Essas normas também são usadas para o processo de arqueamento a quente.

Conforme a Norma americana ANSI/AISC 360-05 a temperatura nas áreas aquecidas, como medidas por métodos aprovados, não deve exceder 1,100°F (593°C) para aços A514/A514M e A852/A852M ou 1,200°F (649°C) para outros aços. Essas temperaturas limites são valores máximos de aquecimento destes aços e que ficam abaixo da linha de recristalização ou transformação destes materiais.

A Norma ABNT NBR 8800, que é similar em alguns pontos com a norma americana AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), informa no

item 12.3.4, que as ligações permanentemente soldadas ou parafusadas só devem ser completadas depois que a parte da estrutura, que vai se tornar rígida após a execução de tais ligações, for devidamente alinhada e nivelada. Essa norma, que trata de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, é muito usada na indústria civil, embora seja consultada para estruturas de aço em geral.

Conforme Gimenes (2003) o processo de desempenho à chama baseia-se no uso de um maçarico. É importante saber onde posicionar a tocha e aplicar calor até a peça ficar com temperatura de trabalho próxima a solicitada em norma ( $T_a = 593$  °C, para aços que serão analisados). Os combustíveis utilizados na tocha de oxiacetileno são o acetileno ( $C_2H_2$ ) ou o gás natural ( $CH_4$  e  $H_2$ ) em reação com o oxigênio ( $O_2$ ). O fluxo de oxigênio requerido depende da espessura da chapa aquecida, que neste caso é de 16 mm. Logo, o fluxo de  $O_2$  correspondente a esse processo é de 2375 l/h em cada tocha. Outro fator importante é saber operar a tocha, de maneira que se consiga aquecer a peça rapidamente sem danificá-la.

Ainda conforme Gimenes (2003) a aplicação da chama deve ser realizada a uma distância próxima a 5 mm da superfície da peça, pulsando-a com movimentos leves. O avanço só deve acontecer quando o ponto na superfície se torne vermelho. O comprimento da área que deve ser mantida na cor avermelhada é aproximadamente de 50 mm a 75 mm. O aquecimento deve ser contínuo ao longo de todo o comprimento da linha pré-determinada e deve-se evitar que o movimento seja interrompido até o final do trabalho. O tipo de chama utilizada para este caso é a 'neutra', de comprimento médio e adequado aos aços utilizados.

### 2.1.2 O Arqueamento a Quente de Vigas

Também chamado de 'conformação a quente', é amplamente usado na indústria civil, principalmente na fabricação de peças arqueadas em aço carbono para pontes. Outras aplicações incluem o arqueamento de vigas de implementos rodoviários, vagões de trens, e linhas de aquecimento em chapas para uso naval, entre outros.

Valores precisos para as deflexões das vigas são procurados em muitos casos práticos. Elementos de máquinas devem ser suficientemente rígidos para que se evitem desalinhamento e para manter a precisão dimensional sob a ação de cargas (POPOV, 1978). É comum em países como os Estados Unidos da América e Alemanha não realizar o processo de arqueamento de vigas através de métodos que envolvam aquecimento. Exemplos de outros

processos alternativos podem ser verificados nas Figura 7 e Figura 8, onde, respectivamente, é mostrado o arqueamento a frio (muito usado na indústria da construção civil, no caso de pontes) através de maquinário específico e outro caso onde o arqueamento foi simplesmente considerado no design do produto. Neste último, as peças que compõem a viga, como as cintas superior e inferior já vêm arqueadas (calandradas) e a alma da viga é cortada, por processo térmico, em arco.



Figura 7 - Arqueamento a frio de uma viga I.  
Fonte: <http://www.cmrp.com/beam-bending>.



Figura 8 - Semirreboque Carrega-Tudo com viga arqueada de projeto.  
Fonte: <http://www.kalynsiebert.com/files/8J5O-MechanicalRemovableGooseneck-FeatureSheet.pdf>.

Na Figura 9a, demonstra o gráfico de tensão ( $\sigma$ ) *versus* deformação ( $\epsilon$ ) para materiais ferrosos, onde é possível observar que determinadas estruturas, quando submetidas a carregamentos acima da tensão de escoamento, podem permanecer com uma deformação após o descarregamento. O arqueamento (em inglês: *horizontal curvature*) deve ser aplicado para

evitar esse problema devido a aplicação em questão – implementos rodoviários – sobrecargas e reações adversas na combinação de diferentes reações impostas pelo pavimento. A Figura 9b mostra uma área entre curvas tracejadas denominada histerese mecânica, que é a energia perdida durante o ciclo de carregamento e descarregamento. A histerese deve ser levada em conta quando selecionado um material para servir como amortecedor de vibração em equipamentos estruturais ou mecânicos (HIBBELER, 2004).

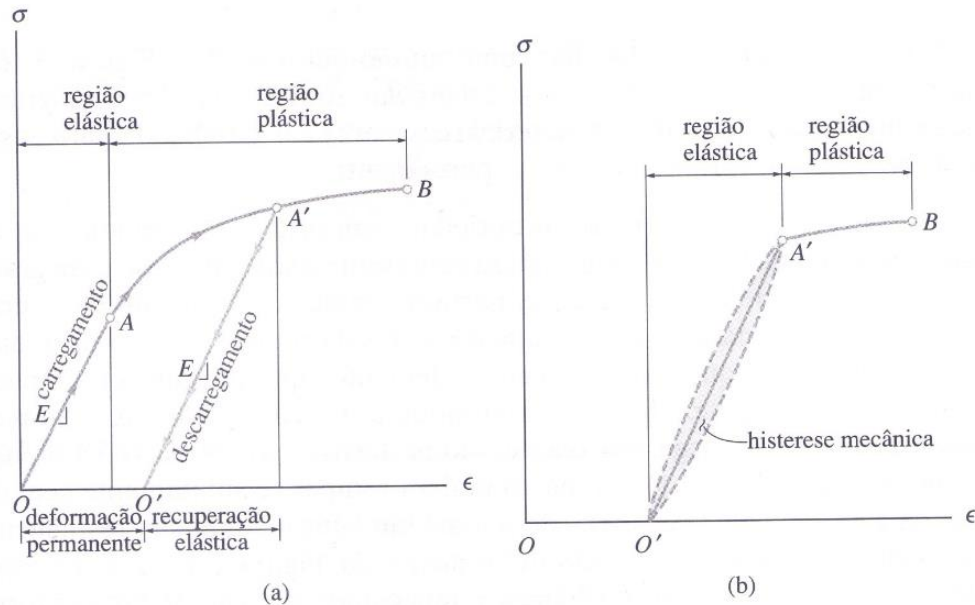


Figura 9 - (a) Gráfico da Tensão *versus* Deformação demonstrando a deformação plástica após carregamento (b) histerese mecânica.

Fonte: Hibbeler (2004).

No caso das propriedades mecânicas de um material a histerese pode ser determinada pela perda de energia durante o ciclo de deformação e recuperação do material. Uma mola que tem sua constante elástica  $k$  alterada durante o seu ciclo de vida é um exemplo de histerese mecânica. Os efeitos da histerese serão amolecimento ou encruamento do material. Submeter qualquer estrutura metálica a deformação cíclica, quando no regime plástico, é suficiente para gerar os efeitos de histerese (DA ROSA, 2002). Uma questão a ser analisada é como mensurar os efeitos da histerese mecânica em vigas de implementos rodoviários quando submetidas a sobrecarga, pois isso poderia ser traduzido como a perda do arqueamento da estrutura de acordo com o número de ciclos de carregamento.

Um item imperceptível, mas muito importante em arqueamento de vigas trata do possível aparecimento das chamadas micro trincas intragranulares de reaquescimento na região da ZAC (Figura 10), que neste caso indicaria o risco de fragilização do material (a região passa a ser chamada ZAC-GG) devido a formação de martensita não revenida e elevado aumento do

contorno de grão (S. KOU apud BUSCHINELLI, 2011). É possível verificar este problema apenas com MO e/ou MEV.

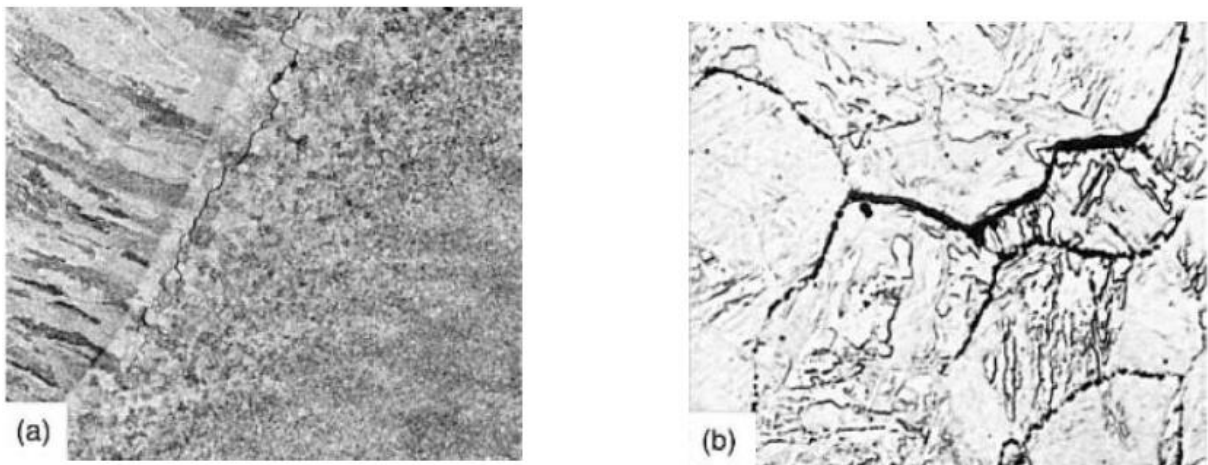


Figura 10 - Exemplo de trincas de reaquecimento em aços CrMoV: (a) macroestrutura (35x) e (b) microestrutura (1000x).

Fonte: S. Kou apud Buschinelli, 2011.

A curvatura de uma viga é perceptível com inspeção visual e seu valor possui tolerâncias muito grossas, na ordem de  $\pm 5$  mm. Mesmo assim, essa distância de  $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , entre a linha neutra e a linha do arqueamento (Figura 27a), foi comprovada experimentalmente (RANDON S.A., 2014). Através da comparação com um método numérico computacional aproximado (Método dos Elementos Finitos – MEF), os valores encontrados (de  $45 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ) foram satisfatórios para essa aplicação. A comprovação se da experimentalmente após a aplicação da carga nominal na viga e a distância entre linha neutra e linha de arqueamento for igual ou maior que zero.

A Figura 11 mostra uma composição Veículo Trator (CM) + Dolly (DL) + SR CT onde uma determinada carga será aplicada. Neste caso, o carregamento efetuado foi de  $60 t$ , sobre toda a extensão da plataforma de carga útil. Na Figura 12 o SR CT está sem carregamento algum. O desenho evidencia o arqueamento dado na viga. É possível notar também as condições de contorno utilizadas, como a representação do pino-rei e elementos da suspensão.

Na Figura 13 o semirreboque está carregado. Agora é possível notar a deformação da viga em função da carga. No detalhe da Figura 13, é possível verificar o deslocamento em toda a extensão da estrutura, também por MEF. É esse o motivo principal do processo de arqueamento, pois caso contrário o desenho da linha elástica da viga após carregamento seria em forma de arco apontando para o solo (Figura 14), e não uma linha reta como demonstrado.

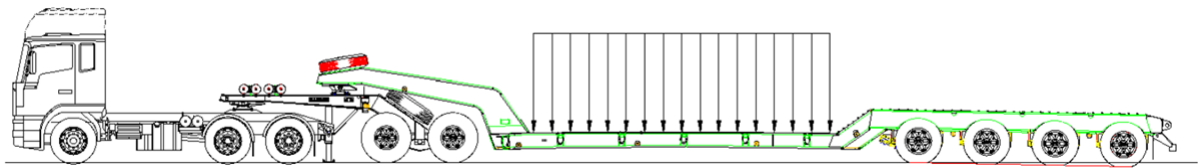


Figura 11 - Combinação Veículo Trator (CM) acoplado em um Dolly (DL) com um Semireboque (SR CT).  
Fonte: Randon Implementos. Software: AutoCAD® 2004, Autodesk Inc.

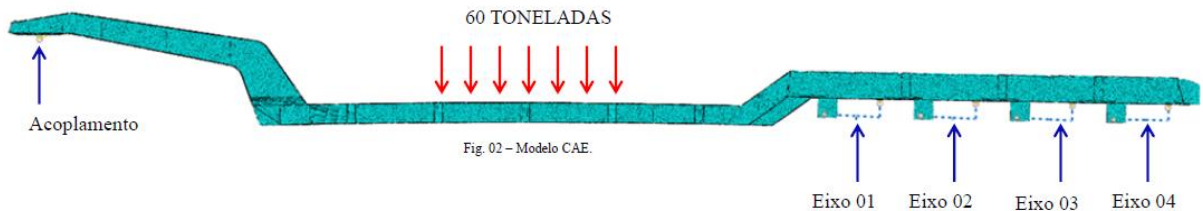


Figura 12 - Viga arqueada de um implemento rodoviário com a indicação de como será aplicada a carga  
Fonte: Randon Implementos. Software: Abaqus/CAE r6.9, ABAQUS, Inc.

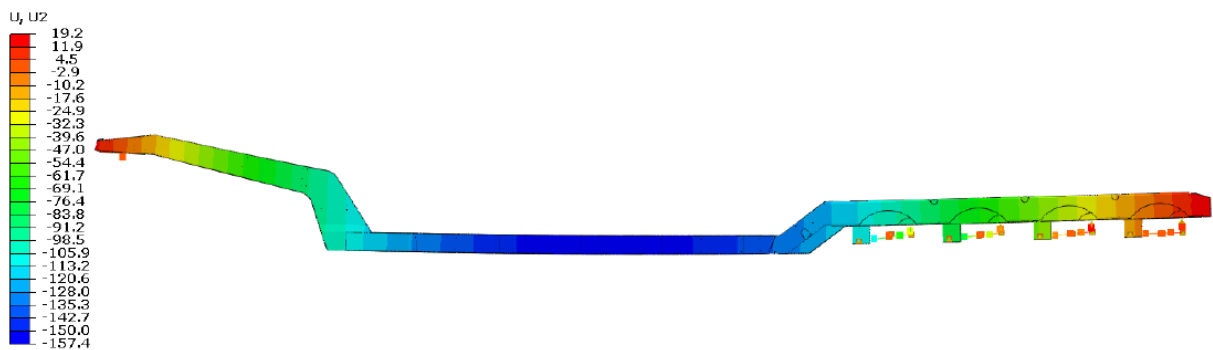


Figura 13 - Deslocamento em todo o comprimento de uma viga de um implemento rodoviário com carga.  
Fonte: Randon Implementos. Software: Abaqus/CAE r6.9, ABAQUS, Inc.

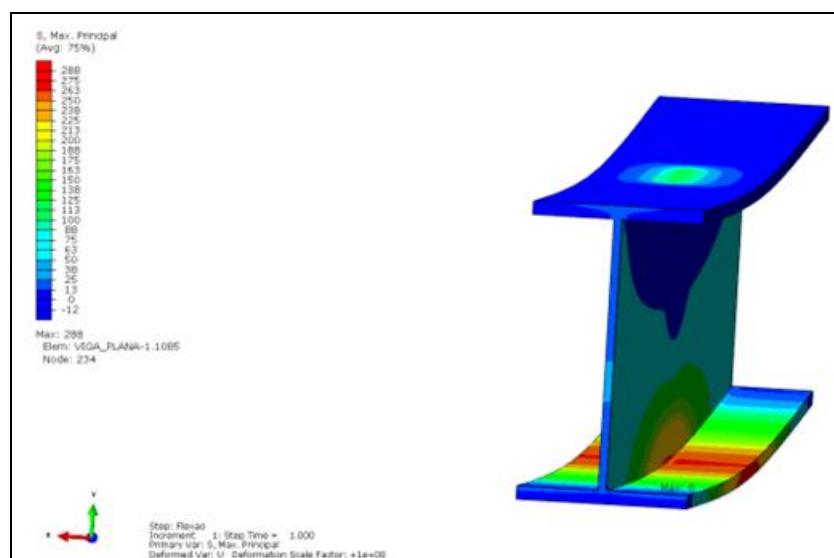


Figura 14 - Análise por MEF da parte central da viga com carregamento e que não recebeu arqueamento.  
Fonte: Randon Implementos. Software: Pro|MECHANICA® Wildfire 5.0 PTC.

Além das normas já citadas, é possível tomar como referência para valores de arqueamento as instruções como descritas na provisão do *Kansas Department of*



*Transportation* intitulado ‘*Structural Steel Construction Heat-Curved Rolled Beams and Welded Plate Girders*’. É evidenciado neste documento aspectos de limitação acerca do material e mínimo raio de curvatura. Este último dado pelas Equações 2.2 e 2.3, onde foi mantido o Sistema Americano de Unidades:

$$R = \frac{14 \cdot b \cdot D}{F_y \cdot \Psi \cdot t} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{7500 \cdot b}{F_y \cdot \Psi} \quad (2.3)$$

Onde:

$R$  = Raio [pol];

$F_y$  = Ponto mínimo de escoamento especificado dos materiais da viga [ksi];

$\Psi$  = Relação entre a área total da seção transversal da viga e a área das abas [adimensional];

$b$  = Largura da aba maior [pol];

$D$  = Distância entre as superfícies inferior e superior das abas [pol];

$t$  = Espessura da alma da viga [pol].



Figura 15 - SR CT com perda no arqueamento da viga.

Neste caso os mecanismos causadores da perda no arqueamento do semirreboque são sobrecarga e a incorreta distribuição de carga. As vigas estão calçadas para que a plataforma útil de carga não interfira com o solo.

Fonte: Autor (foto de 2010).

E principalmente, este documento aborda requisitos de fabricação, como tipo de aquecimento, temperatura, posição da tocha, sequencia de operação, *camber* e medição. No item 4 do documento americano, é descrita a questão da perda de arqueamento durante o regime de trabalho (ver exemplo deste fenômeno na Figura 15) em função da ‘dissipação das tensões residuais’. As Equações 2.4 e 2.5 são fornecidas abaixo para incremento do valor de *camber*. Essa medida não é obrigatória, mas pode ser exigida pelo Engenheiro para evitar que

o valor do arqueamento seja perdido em sua totalidade, embora o comportamento da estrutura com *camber* seja totalmente dependente de um conjunto de fatores externos, incluindo o empirismo de alguns processos de fabricação envolvendo calor. Nas Equações 2.4 e 2.5 foram mantidas as unidades conforme padrão Americano.

$$\Delta = \left( \frac{\Delta_{DL}}{\Delta_M} \right) (\Delta_M + \Delta_R) \quad (2.4)$$

$$\Delta_R = \left( \frac{0,02 \cdot L^2 \cdot F_y}{E \cdot Y_n} \right) \left( \frac{1000 - R}{850} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

$\Delta_R$  = Correção para o raio (0 para raios maiores do que 1000 [pés]);

$\Delta$  = Quantidade de *camber* [pol];

$\Delta_{DL}$  = Cambagem, em qualquer ponto ao longo do comprimento  $L$  calculado por meio de processos usuais para compensar a deformação devida a cargas mortas ou de quaisquer outras cargas especificadas [centímetros];

$\Delta_M$  = Valor máximo de  $\Delta_{DL}$  dentro do comprimento  $L$  [centímetro];

$E$  = Módulo de elasticidade [ksi];

$F_y$  = Ponto mínimo de escoamento especificado dos materiais da viga [ksi];

$Y_n$  = Distância a partir do eixo neutro da fibra exterior extrema (distância máxima para secções não simétricas) [pol];

$L$  = Abrange comprimento para vãos simples, ou a distância entre um simples apoio final e o ponto da contraflecha da carga morta, ou a distância entre pontos da contraflecha de carga morta para vãos contínuos [pol];

$R$  = Raio de curvatura [pés].

O documento acima citado ainda conduz algumas informações relevantes sobre materiais com tensão de escoamento acima de 350 MPa. O mesmo afirma que vigas fabricadas com materiais deste tipo não se curvam (não arqueiam) através de processos térmicos.

## 2.2 Aço ASTM A570 GR36-C

Esta é uma matéria prima que é fornecida para empresas fabricantes de implementos rodoviários em chapas de aço carbono laminadas a quente, com qualidade estrutural (ANSI/ASTM A 570 – 79). Esse material ferroso é amplamente utilizado em componentes

estruturais que precisam ter desempenho mecânico aliado a boas características de soldabilidade, como é o caso de componentes de implementos rodoviários. Importante ressaltar que esse aço é acalmado ao alumínio (*Al*) pelo fornecedor com o intuito de evitar reações entre o oxigênio (*O*) e o carbono (*C*) durante a solidificação. O número de inclusões não metálicas também é verificado através de cartas padrão do tipo JK.

O semimetal Silício (*Si*) é adicionado na composição química do Aço ASTM A570 GR36-C no Brasil (entre 0,15 e 0,30 %) com o objetivo de aumentar a dureza do material e seu consequente aumento de resistência mecânica sem afetar a ductilidade. Auxilia na desoxidação, pois neutraliza a ação de *CO* ou *CO*<sub>2</sub>, e na grafitização. Também haverá um aumento da resistência a oxidação em temperaturas elevadas (como por exemplo, no momento de soldagem), além da melhora da temperabilidade e da resistência à tração (CANTO, 1996). A Tabela 1 mostra a influência de diferentes elementos de liga nas propriedades dos aços:

As principais propriedades de chapas de aço ASTM A570 GR36-C são a tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) igual ou maior que de 250 MPa, dureza Brinell (*HB*) entre 116 e 163, conformabilidade ( $r_{min}$ ) igual ou maior que 1½ vezes a espessura da chapa e carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) com valor igual a 0,42 (no limite entre média e boa soldabilidade) conforme calculado abaixo, pela formulação original de Dearden & O'Neill apud Gorni, 2006 (Equação 2.6). Particularmente neste tipo de material, essas propriedades são alcançadas através de elementos de liga, ao invés de laminação termomecânica ou têmpera direta (*direct quenching*) (USIMINAS, 2012) como é o caso dos aços microligados.

$$C_{eq\_Dearden} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr+V}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Ni}{15} + \frac{P}{2} \quad (2.6)$$

O  $C_{eq}$  é importante, pois fornece um valor numérico da contribuição da composição química para a suscetibilidade de formação de trincas induzidas por hidrogênio em um aço. Também é possível prever a resistência, temperabilidade e dureza da ZAC de um aço, pois medindo o carbono equivalente, sabe-se a temperabilidade do aço e consequentemente, quanto maior a dureza, maior a probabilidade de formação de trincas. Esse método foi criado em 1940 por Dearden e O'Neill (apud GORNI, SILVEIRA, REIS, 2006).

Tabela 1 - Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços.

Propriedades	Elementos Químicos													
	Si	Mn <sup>1</sup>	Mn <sup>2</sup>	Cr	Ni <sup>3</sup>	Ni <sup>4</sup>	Al	W	V	Co	Mo	Cu	S	P
<b>Químicas</b>														
Resistência a corrosão	-	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	-	-	↑	↓	-
<b>Tecnológicas</b>														
Nitretabilidade	↓	~	-	↑	-	-	↑	↑	↑	-	↑	-	-	-
Oxidação superficial	↓	~	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	~	-	-
Usinabilidade	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	↓	-	~	↓	~	↑	↑
Forjabilidade	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Resistência ao desgaste	↓	↓	-	↑	↓	-	-	↑	↑	↑	↑	-	-	-
Formação de carboneto	↓	~	-	↑	-	-	-	↑	↑	-	↑	-	-	-
Soldabilidade	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓	↓
Temperabilidade	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	-	-
<b>Mecânicas</b>														
Resis. mec. a quente	↑	~	-	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	-
Elasticidade	↑	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	-	-	-	-	-
Resistência ao impacto	↓	~	-	↓	~	↑	↓	~	↑	↓	↑	~	↓	↓
Estricção	~	~	~	↓	~	↑	↓	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Alongamento	↓	~	↑	↓	~	↑	-	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Limite de escoamento	↑	↑	↓	↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
Lim. Ruptura a tração	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
Dureza	↑	↑	↓	↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
↑ aumenta	↓ diminui	~ constante			- não conhecido			↑ ou ↓ efeito pronunciado						

Fonte: Gonçalves e Martins, 2001.

### 2.3 Aço DIN EN 10149 S700MC

Em determinadas aplicações exige-se uma relação resistência/peso satisfatória. É justamente o caso da indústria de transportes onde os equipamentos utilizados, em caminhões, ônibus, aviões e equipamentos rodoviários, devem caracterizar-se por tara relativamente baixa e alta resistência, por estarem sujeitos a esforços severos (CHIAVERINI, 1996), perfis de pista nada favoráveis e principalmente, transformar a redução de massa em carga líquida (CL). Esse é o principal motivo da aplicação de aços de alta resistência (ou extra leve) na indústria de implementos rodoviários.

Aços com baixos teores de liga e com altos limites de resistência são chamados de aços de alta resistência mecânica e baixa liga (ARBL), ou *high strength low alloy* (HSLA) e estão divididos em seis categorias principais: aços resistentes à corrosão atmosférica, aços ferríticos-perlíticos microligados, aços perlíticos no estado laminado, aços de ferrita acicular,

aços *dual-phase* ou bifásico e aços com resistência a trincas induzidas por hidrogênio (ASM HANDBOOK, 1993). São três os métodos principais para alcançar determinadas especificações de propriedades mecânicas, principalmente o limite de escoamento (Figura 16): elementos de liga, laminação termomecânica (TM) e têmpera direta (DQ). Através de micro adições de elementos de liga como os metais de transição nióbio (*Nb*), titânio (*Ti*) e vanádio (*V*), que permitem a manutenção de baixos conteúdos de carbono (*C*) e manganês (*Mn*) associado com tratamentos termomecânicos que garantem uma microestrutura com grãos finos (DEARDO, 1998) e precipitação controlada de carbonitretos (GALLEGO, 2005) são possíveis obter melhores propriedades estruturais do material. Isso é válido para os métodos TM e DQ. O método de têmpera direta (*direct quenching*) não será abordado neste texto.

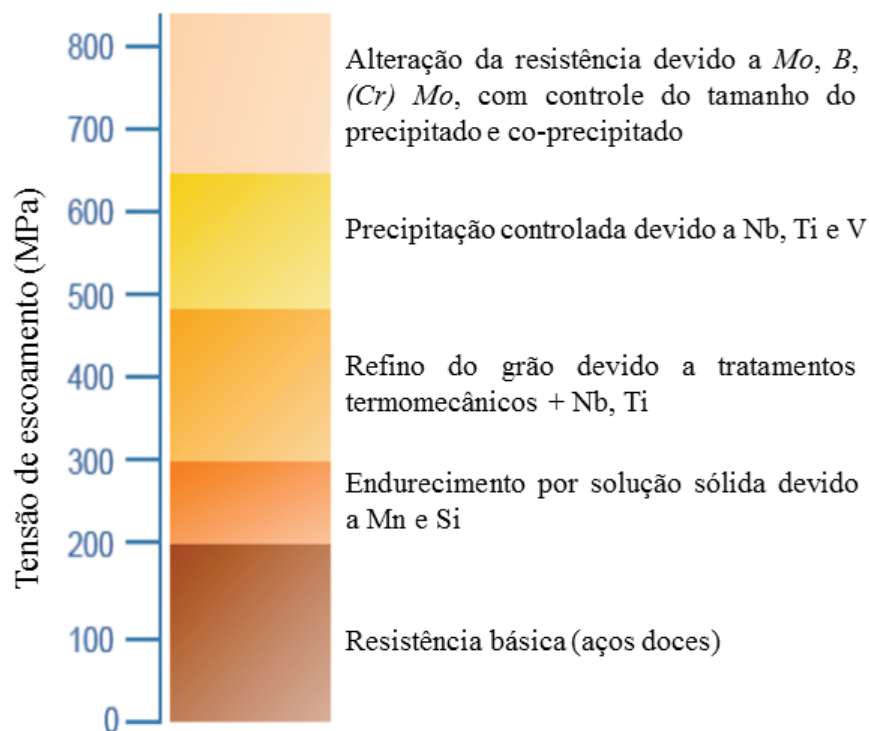


Figura 16 - Mecanismos de endurecimento em aços de baixo carbono.  
Fonte: Mohrbacher apud Duarte, 2013.

A laminação termomecânica (TM) foi desenvolvida em 1970 no Japão. É um processo que, além de aplicar teorias de ciências e termodinâmica dos materiais, envolve a detecção de parâmetros de processo complexos. Os benefícios da TM são o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) de até 700 MPa, baixa quantidade de elementos de liga e melhor resistência ao impacto.

De acordo com Gallego (2005), precipitados de carbeto de vanádio nucleiam na presença significativa de titânio, e de nitrogênio, se houver, durante a transformação da

austenita para a ferrita preferencialmente nos contornos de grão. A laminação de acabamento promove a intensa precipitação de carbeto de vanádio e nióbio no contorno de grão austenítico. Isto sugere a não recristalização nesta etapa do processo termomecânico que contribui para o refino do grão ferrítico. Gallego (2005) também encontrou resultados semelhantes nos microligados ao vanádio, nióbio e titânio em temperaturas mais elevadas, durante o processo termomecânico. Relata ainda o diâmetro médio de precipitados de vanádio entre 5,5 e 8,0 nm com geometria esférica, porém em maior quantidade. O vanádio é o maior responsável pelo endurecimento da liga, nucleando-se na austenita e precipitando nos contornos do grão ferrítico (Figura 17). O vanádio possui a maior solubilidade em relação ao *Nb* e *Ti* (Figura 18). Os precipitados de carbeto de titânio e de *Ti-Nb* precipitam-se no interior do grão. Além do endurecimento causado pelos precipitados de *C-V*, *C-Nb*, *Ti-Nb*, e *C-Ti*, muito duros, a grande quantidade de discordâncias gerada pelos mesmos possibilita o aumento mais significativo da resistência e escoamento e no endurecimento do aço microligado durante seu processamento.

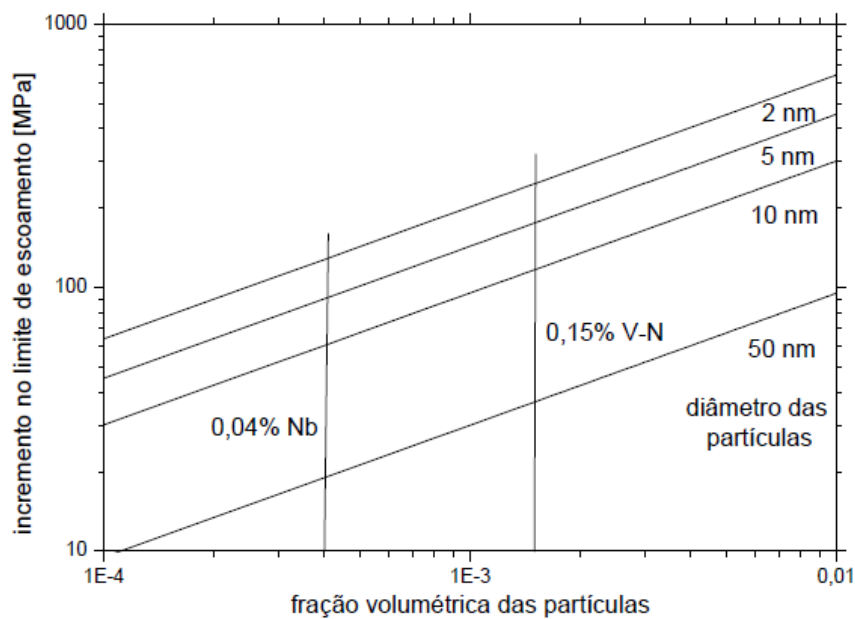


Figura 17 - Endurecimento por precipitação pelo modelo de Orowan-Ashby.  
Fonte: Gladman apud Gallego (2005).

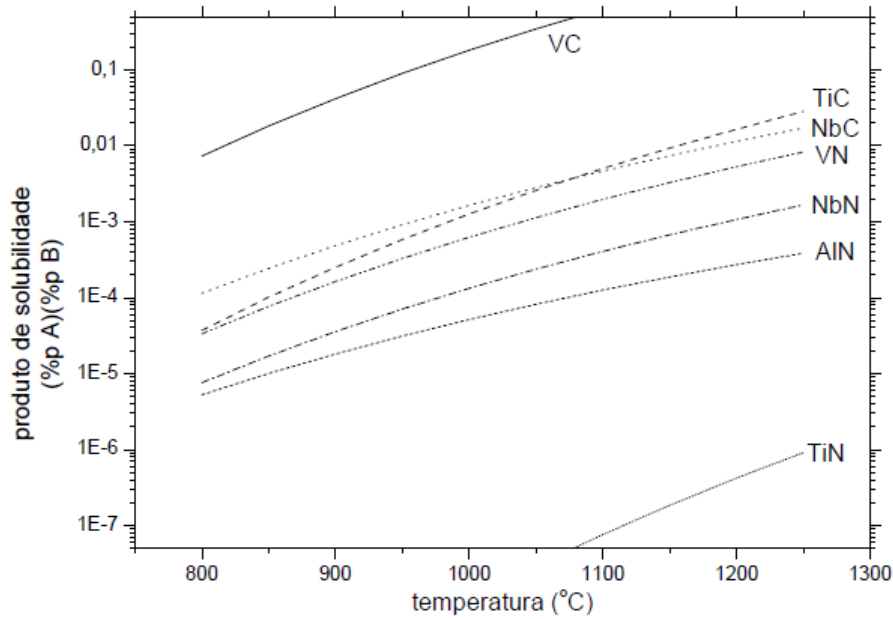


Figura 18 - Solubilidade de carbonetos e nitretos na austenita de aços microligados.  
Fonte: Narita apud Gallego (2005).

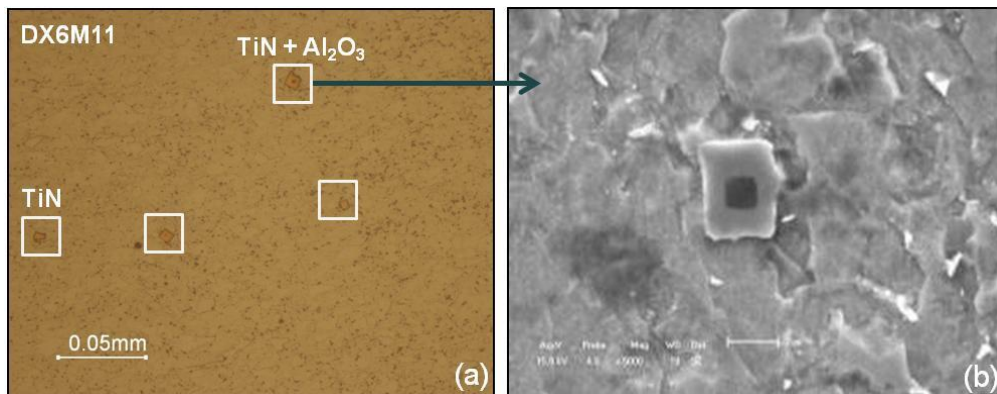


Figura 19 - Microestrutura do Aço DIN EN 10149 S700MC, com ampliação de 500x (a) e MEV com 3500x (b).  
Fonte: Besutti, 2009.

Os aços de alta resistência são produzidos por meio de processos metalúrgicos que asseguram a pureza dos aços e, a seguir são acabados em um processo termomecânico de laminação que assegura as propriedades de um aço de alta resistência, onde é fundamental o resfriamento contínuo e homogêneo da tira laminada a quente (SSAB TUNNPLAT, 2004).

O aço comercial DOMEX 700 MC, fornecido pela SSAB Swedish Steel, atende a norma DIN EN 10149 S700MC. Trata-se de um aço ferrítico-perlítico microligado avançado de alta resistência mecânica. Atende a especificação de  $\sigma_e$  igual a 700 MPa. É o material usado, assim como o ASTM A570 GR36-C, nas vigas de SR BA. Tem como elementos de liga formadores de carbonetos e carbonitretos, em baixíssima porcentagem (em geral inferior a 0,10 %), o nióbio, titânio e vanádio, que possibilita a manutenção de baixos teores de carbono e

manganês em sua composição química. Isso vai aumentar a resistência por precipitação, refino de grão, e possível transformação por temperatura controlada (ASM HANDBOOK, 1993). Este aço apresenta alta relação limite elástico/tensão de ruptura. São caracterizados por:

- Excelente plasticidade em relação à sua alta resistência;
- Boa soldabilidade, graças ao seu baixo conteúdo de elementos liga;
- Boa resistência ao impacto em baixas temperaturas;
- Adequação ao corte a laser.

Aços convencionais submetidos a conformação a quente se recristalizam de forma rápida e completa após cada passe de deformação. No caso dos aços microligados ARBL isso também ocorre, mas até certo ponto: abaixo de uma determinada temperatura, denominada ‘Temperatura de Não-Recristalização ( $T_{nr}$ )’, parte dos elementos microligantes, particularmente o nióbio, se precipita na austenita. Esses precipitados ancoram os contornos de recristalização que varrem a microestrutura após cada passe de deformação, virtualmente paralisando a restauração do material. Dessa forma, como a austenita não mais se recristaliza entre os passes de deformação, ela encrua progressivamente à medida que é laminada, formando grãos achatados. A transformação da austenita encruada, que ocorre durante o resfriamento da chapa após a laminação a quente, gera uma microestrutura com tamanho de grão extremamente refinado (GORNI, SILVEIRA, REIS, 2006).

A diminuição da temperatura final de laminação promove uma microestrutura final mais refinada, que se traduz em maior resistência mecânica e tenacidade. A laminação controlada dos aços microligados ocasiona a nucleação da ferrita também nas bandas de deformação intragranulares decorrentes do encruamento da austenita, refinando ainda mais a microestrutura final (KOZASU apud GORNI, SILVEIRA, REIS, 2006).

Existem muitos estudos acerca do comportamento dos aços ARBL em função de determinadas solicitações mecânicas. Uma importante característica é em fadiga de juntas soldadas. No caso de aços ARBL pode-se verificar que tanto a tensão de escoamento, tensão de ruptura e vida em fadiga possuem um comportamento diretamente proporcional a energia de soldagem (RODRIGUES (B), 2012). Isso é importante, pois no aquecimento para alinhamento e arqueamento de chassis rodoviários, a energia envolvida também é alta e trará consequências ao material.



As principais propriedades de chapas de aço DIN EN 10149 S700MC são a tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) igual ou maior que de 700 MPa, dureza Vickers ( $HV$ ) igual ou maior que 212, conformabilidade ( $r_{min}$ ) igual ou maior que 1,2 vezes a espessura da chapa (para  $\alpha \leq 90^\circ$ ) e carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) com valor preferencialmente menor que 0,40 (boa soldabilidade) conforme calculado abaixo, pela formulação (Equação 2.7) de Graville (YURIOKA apud GORNI, SILVEIRA, REIS, 2006):

$$C_{eq\_HSLA} = C + \frac{Mn}{16} - \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{5} + \frac{V}{9} \quad (2.7)$$

Para o aço DIN EN 10149 S700MC o valor calculado de  $C_{eq}$  foi de 0,29. Isso significa boa soldabilidade para este material.

### 3 ASPECTOS GERAIS SOBRE PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS FERROSOS E VIDA EM FADIGA

#### 3.1 Propriedades Térmicas

Neste capítulo será realizada uma breve revisão dos principais aspectos envolvendo as propriedades térmicas dos materiais ferrosos e também vida em fadiga. É fundamental o entendimento destes conceitos para a posterior análise dos efeitos do ciclo térmico no processo de alinhamento e arqueamento a quente.

##### 3.1.1 Tensões Térmicas

Para estimar os efeitos da temperatura em determinados componentes mecânicos, é fundamental conhecer as relações de deformação ( $\varepsilon$ ) e tensão ( $\sigma$ ) com a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) imposta no sistema. No caso de um corpo não restringido tendo sua temperatura aumentada de maneira uniforme, a tendência de expansão volumétrica impõe deformações conforme Equação 3.1 (SHIGLEY, 2004; CALLISTER, 2008). A Tabela 2 mostra os coeficientes de expansão térmica ( $\alpha$ ) para diferentes materiais.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot (\Delta T) \quad (3.1)$$

Onde:

$\varepsilon_x$  = Deformação no eixo x [m];

$\varepsilon_y$  = Deformação no eixo y [m];

$\varepsilon_z$  = Deformação no eixo z [m];

O Coeficiente de expansão térmica  $\alpha$  pode ser expresso como na Equação 3.2:

$$\alpha = \frac{\delta_T}{L \cdot \Delta T} = \frac{\varepsilon_T}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Onde:

$L_i$  = Comprimento inicial do sólido [m];

$\delta_T$  = Diferença linear na dimensão de um corpo devido a variação térmica [m].

Tabela 2 - Coeficientes de expansão térmica (coeficientes lineares médios para o intervalo de temperatura de 0-100°C).

Material	Escala Celsius ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	Escala Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}^{-1}$ )
Alumínio	$23,9 \times 10^{-6}$	$13,3 \times 10^{-6}$
Latão, fundido	$18,7 \times 10^{-6}$	$10,4 \times 10^{-6}$
Aço Carbono	$10,8 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-6}$
Ferro fundido	$10,6 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
Magnésio	$25,2 \times 10^{-6}$	$14,0 \times 10^{-6}$
Aço níquel	$13,1 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$
Aço inoxidável	$17,3 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-6}$
Tungstênio	$4,3 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-6}$

Fonte: adaptada de Shigley, 2004.

Se a mudança na temperatura varia em todo o comprimento do sólido, ou seja,  $\Delta T = \Delta T(x)$ , ou se  $\alpha$  varia ao longo do comprimento, a Equação 3.3 pode ser aplicada a cada segmento de comprimento  $dx$ . Assim, a mudança no comprimento do elemento é expressa como abaixo (HIBBELER, 2004):

$$\delta_T = \int_0^L \alpha \cdot \Delta T \cdot dx \quad (3.3)$$

Sendo que a soma das variações dimensional mecânica e térmica devem ser iguais a zero, pois:

$$\delta_P = \frac{P \cdot L_i}{A \cdot E} \quad (3.4)$$

Onde:

$\delta_P$  = Diferença linear na dimensão de um corpo devido a solicitações mecânicas [m];

$P$  = Carregamento externo [N];

$A$  = Área da secção transversal do sólido [ $\text{m}^2$ ];

$E$  = Módulo de elasticidade [GPa].

Logo:

$$\delta_T + \delta_P = 0 \quad (3.5)$$

Supondo um sólido experimentando um simples aumento de volume, com as componentes de deformação por cisalhamento todas nulas. Se uma barra reta é restringida nas extremidades, para evitar expansão ao longo do comprimento, sendo então submetida a um aumento uniforme de temperatura, uma tensão compressiva se desenvolverá, devido à presença da restrição axial. Essa tensão é dada pela Equação 3.6 (SHIGLEY, 2004):

$$\sigma_c = -\varepsilon \cdot E = -\alpha \cdot (\Delta T) \cdot E \quad (3.6)$$

Onde:

$\sigma_c$  = Tensão de compressão [MPa];

$E$  = Módulo de elasticidade do material [MPa].

Para uma placa uniforme, restringida em suas bordas e submetida a um aumento uniforme de temperatura, a tensão de compressão desenvolvida é fornecida pela Equação 3.7 (SHIGLEY, 2004):

$$\sigma_c = \frac{-\alpha \cdot (\Delta T) \cdot E}{1-\nu} \quad (3.7)$$

Onde:

$\nu$  = Razão de Poisson [adimensional].

As Equações 3.6 e 3.7 expressam, como exemplo, as tensões atuantes durante um processo de soldagem. Elas são chamadas de Equações de Tensões Térmicas. Elas demonstram as tensões atuantes devido a uma mudança de temperatura em um membro engastado ou restringido.

No caso de tensões térmicas transientes em uma aplicação bidimensional considerando o estado plano de tensões conforme Timoshenko et al., pode-se reescrever a Equação 3.7 conforme Equação 3.8:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{-\alpha \cdot T \cdot E}{1-\nu} \quad (3.8)$$

Onde:

$\sigma_x$  = Tensão térmica na direção  $x$  [MPa];

$\sigma_y$  = Tensão térmica na direção  $y$  [MPa].

Supondo uma placa plana retangular de espessura  $2c$  no qual o plano médio coincide com o plano  $x$  e  $y$ , conforme Figura 20, a temperatura é considerada independente de  $x$  e  $y$ , sendo função apenas de  $z$  (TIMOSHENKO et al., 1980).

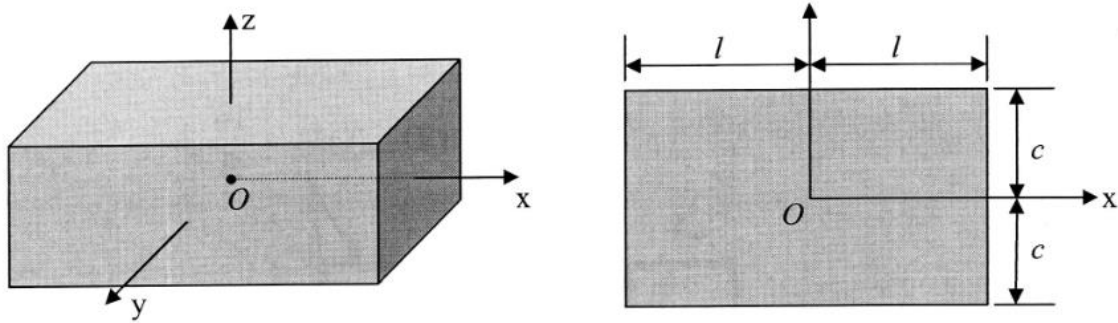


Figura 20 - Placa retangular para o cálculo das tensões térmicas transientes considerando o estado plano de tensões.

Fonte: Timoshenko et al., 1980.

Reescrevendo a equação 3.8 considerando a espessura  $2c$  da placa retangular conforme Equação 3.9:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{-\alpha \cdot T \cdot E}{1-\nu} + \frac{1}{2 \cdot c \cdot (1-\nu)} \int_{-c}^c \alpha \cdot T \cdot E \cdot dz \quad (3.9)$$

Onde:

$c$  = semi-espessura da placa [m];

Uma tensão térmica pode também surgir devido a um gradiente de temperatura em um sólido, conforme Figura 21. É demonstrado nesta figura as distribuições de tensão dentro de uma placa de dimensões infinitas, no decorrer dos processos de aquecimento e resfriamento. No caso de aquecimento, as superfícies externas ficam quentes e tendem a se expandir, mas são impedidas pela parte central mais fina, causando compressão na superfície e tração no centro (SHIGLEY, 2004).

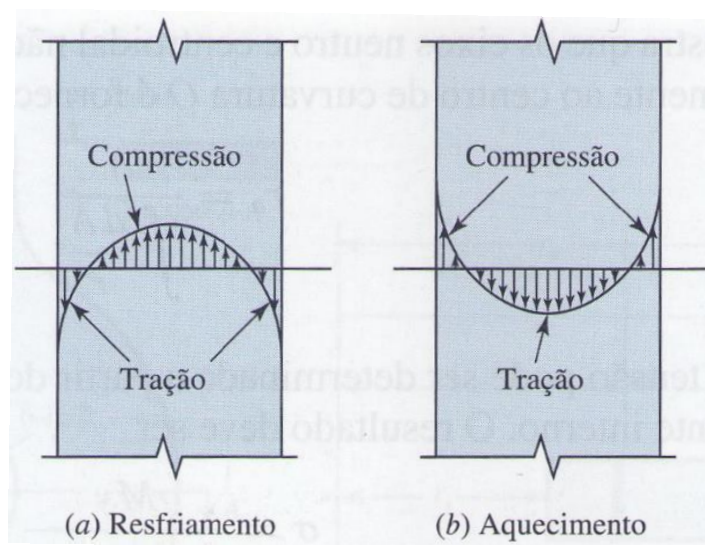


Figura 21 - Tensões térmicas em uma laje infinita durante (a) resfriamento e (b) aquecimento.

Fonte: Shigley, 2004.

### 3.2 Vida em Fadiga

Um fator importante a ser citado nesta etapa do trabalho é a influência da vida em fadiga de um determinado componente. De todos os efeitos estudados no processo de fabricação contendo técnicas de desempenho a quente, a diminuição do limite de resistência à fadiga  $S_f$  é um dos aspectos mais agravantes na integridade estrutural de uma viga (RAJAD apud TEIXEIRA, 2004).

Aspectos envolvendo tensões residuais, tratamentos superficiais, ambiente agressivo etc., influenciam na vida do componente mecânico e também quando do uso de corpos de prova (CP) em ensaios mecânicos. Isso deve ser levado em consideração no projeto do produto (DA ROSA, 2002).

Em sua maioria, as situações práticas com solicitação cíclica no ponto crítico dos componentes mecânicos, apresentam um valor de tensão média não nula, pela presença, por exemplo, de tensões residuais. Por este motivo, é fundamental estudar o que ocorre com o material quando as solicitações cíclicas possuem uma média diferente de zero (DA ROSA, 2002).

Tensões residuais podem afetar uma estrutura de maneira benéfica ou deletéria. Se a tensão residual na superfície de uma peça for de compressão, o limite de resistência a fadiga será aumentado. As falhas por fadiga em geral são por tensões de tração. Operações adicionais como jateamento de esferas e martelamento, e processos de fabricação como laminação a frio constroem tensões compressivas na superfície do componente, melhorando o limite de resistência (SHIGLEY, MISCHKE, BUDYNAS, 2005).

Existem muitos fatores que influenciam na vida em fadiga dos metais. Alguns peculiares a determinadas aplicações e outros que podem ser considerados gerais. Como principais fatores pode-se citar (CHIAVERINI, 1996):

- Efeito da composição e das condições de fabricação;
- Efeito da frequência da tensão cíclica;
- Efeito da temperatura;
- Efeito do dimensional dos componentes;
- Efeito da forma;
- Efeito das condições superficiais;
- Efeito do tratamento superficial;

- Efeitos do meio ambiente (corrosão);
- Efeito do atrito.

A Figura 22 demonstra a curva S-N para materiais sob diversas condições de fabricação. O limite de fadiga depende da composição, da estrutura granular, das condições de conformação mecânica, do tratamento térmico etc. dos metais (CHIAVERINI, 1996).

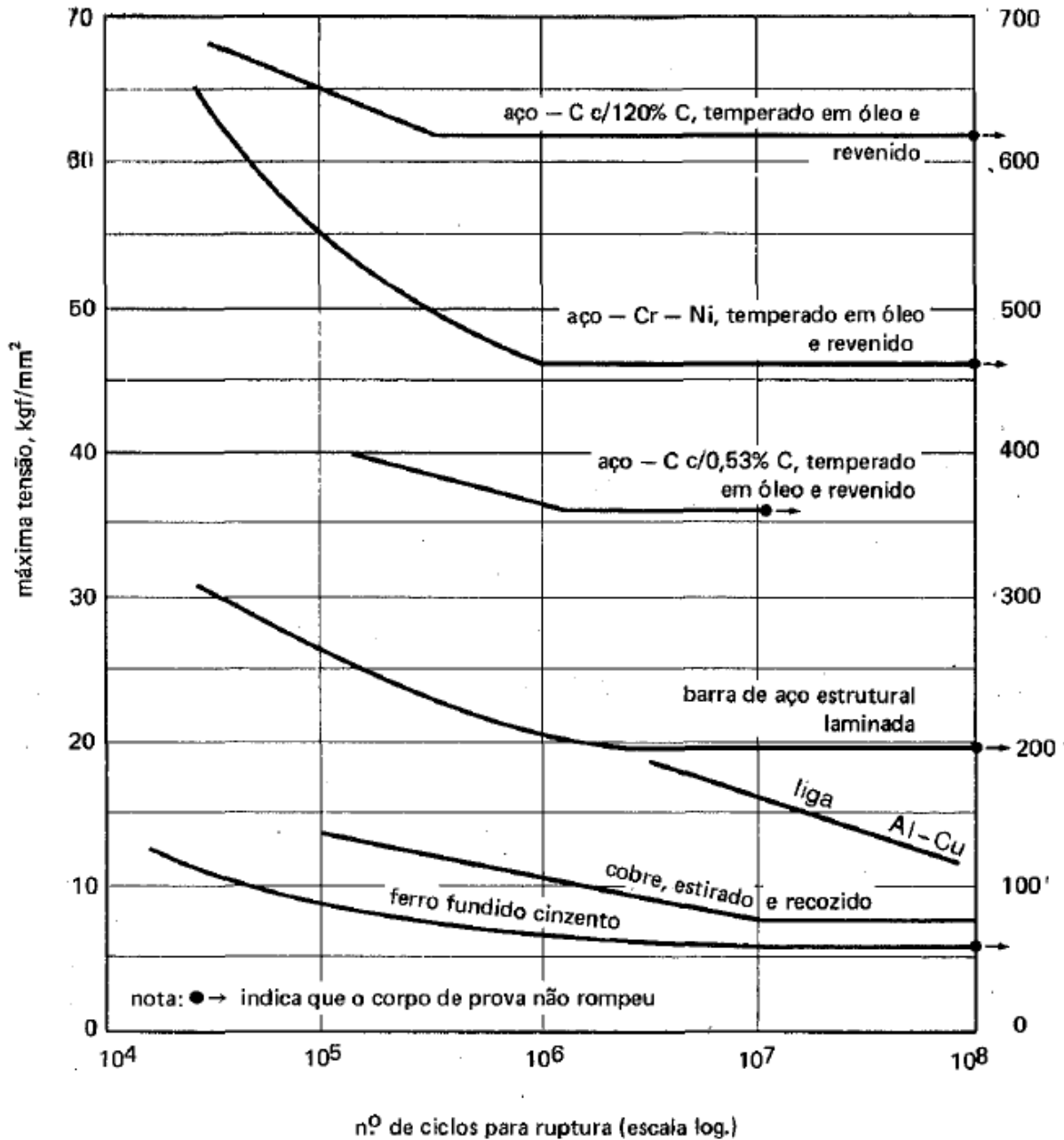


Figura 22 - Curvas S-N típicas para metais sob tensão de flexão reversível.  
Fonte: Chiaverini, 1996.

A Figura 22 mostra algumas das principais curvas S-N para metais sob tensão de flexão reversível (CHIAVERINI, 1996). Nota-se nestas curvas que a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) alcançada para  $1 \times 10^6$  ciclos (vida infinita) é maior com tratamento térmico adequado.

Muitos trabalhos exploraram a correlação entre resultados da resistência a fadiga e da dureza em materiais metálicos (MISCHKE, 2005). A Figura 23 exemplifica isso (SILVA, 2010). Devem-se considerar limites de valores de dureza para que a relação seja mantida. Estudos de Murakami et al mostraram que a quantidade e tamanho das inclusões não metálicas também devem ser levados em conta.

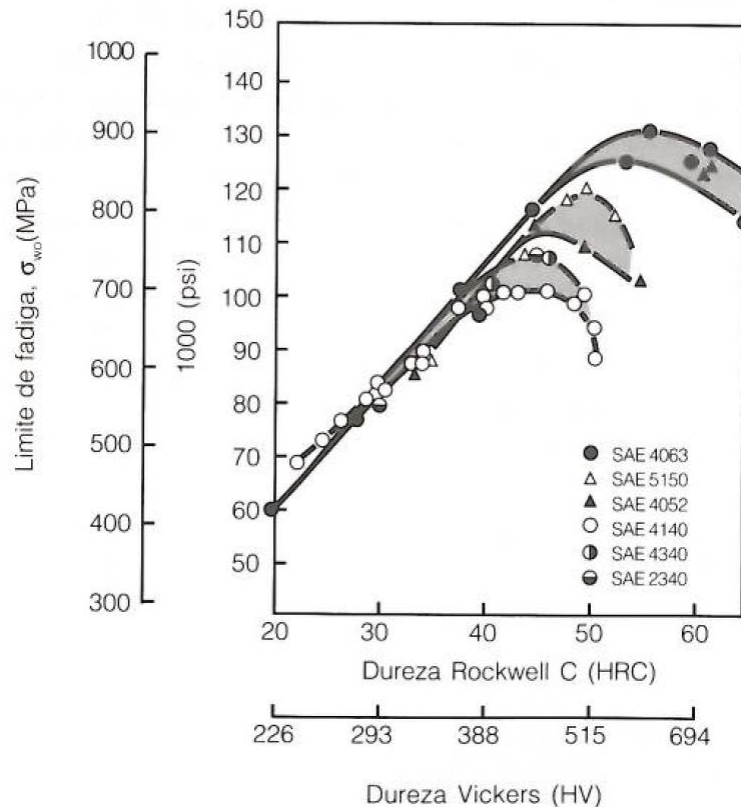


Figura 23 - Correlação entre a dureza e o limite de fadiga para alguns aços.  
Fonte: Silva, 2010.



## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado através de ensaios sobre corpos de prova simulando o processo de fabricação do componente, ou seja, aplicação de curvas térmicas características do processo. Foram realizados ensaios mecânicos de caracterização da microestrutura, propriedades mecânicas e ensaios de levantamento da curva de Wöhler (curva S-N) dos materiais ASTM A 570 GR36-C e DIN EN 10149 MC. A metodologia adotada obedeceu ao fluxograma da Figura 24. As siglas ENQ (Engenharia da Qualidade), EPE (Engenharia de Produtos Especiais), EPR (Engenharia de Processos) correspondem aos setores responsáveis por cada ação prescrita.

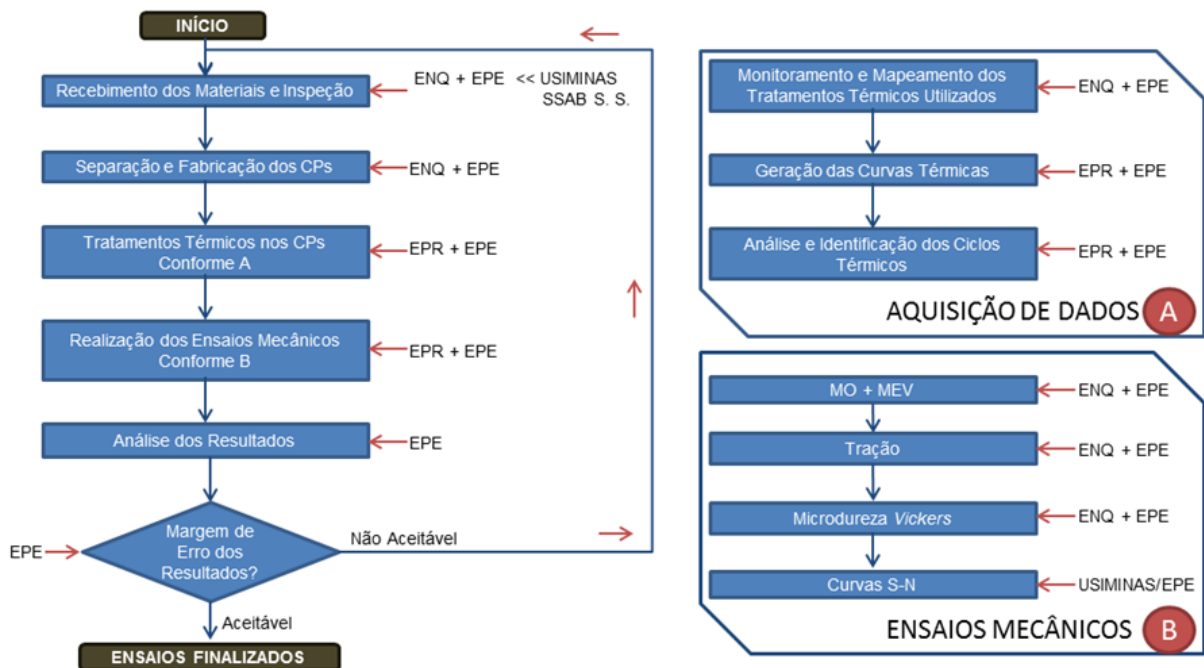


Figura 24 - Fluxograma do método utilizado para pesquisa.

Fonte: Autor.

A composição química e as propriedades do aço ASTM A570 GR36-C estão descritas conforme a Tabela 3 e Tabela 4. A Tabela 5 mostra, respectivamente, as temperaturas da região de transformação e da região de austenitização do material.

O aço DIN EN 10149 S700 MC tem sua composição química e suas propriedades mecânicas descritas na Tabela 6 e Tabela 7 (SSAB TUNNPLAT, 2004). A Tabela 8 mostra os valores de temperatura do mesmo material na região de recristalização e na região de austenitização.

Tabela 3 - Composição química do Aço ASTM A570 GR36-C

Aço	C (%) máx.	Si* (%) máx.	Mn (%) máx.	P (%) máx.	S (%) máx.	Cu (%) mín.
Chapa Aço ASTM A570 GR36-C	0,24	0,4	0,9	0,035	0,04	0,2

\* No Brasil é adicionado Si na composição química do Aço ASTM A570 GR36-C. Nos EUA esse elemento químico não aparece.

Fonte: adaptada de USIMINAS, 2012.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Aço ASTM A570 GR36-C

Aço	Resistência ao escoamento (MPa) mín.	Resistência à tração mínima (MPa) mín.	Alongamento mínimo (%) Esp.>3mm
Chapa Aço ASTM A570 GR36-C	250	360	22

Fonte: adaptada de USIMINAS, 2012.

Tabela 5 - Temperaturas de recristalização e austenitização do Aço ASTM A570 GR36-C.

Aço	Temperatura na região de recristalização (°C)	Temperatura na região de austenitização (°C)
Chapa Aço ASTM A570 GR36-C	600	850

Fonte: adaptada de USIMINAS, 2012.

Tabela 6 - Composição química do Aço DIN EN 10149 S700MC.

Aço	C (%) máx.	Si* (%) máx.	Mn (%) máx.	P (%) máx.	S (%) máx.	Al (%) mín.	Nb (%) máx.	V (%) máx.	Ti (%) máx.
Chapa Aço DIN EN 10149 S700MC	0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	0,015	0,09	0,2	0,15

Fonte: adaptada de SSAB TUNNPLAT, 2004.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do Aço DIN EN 10149 S700MC.

Aço	Resistência ao escoamento (MPa) mín.	Resistência à tração mínima (MPa) mín. – máx.	Alongamento mínimo (%) Esp.<3mm	Alongamento mínimo (%) Esp.≥3mm
Chapa Aço DIN EN 10149 S700MC	700 *	750 - 950	10	12

\* Para espessuras > 8 mm a tensão de escoamento (ou resistência ao escoamento)  $\sigma_e$  poderá diminuir 20 MPa.  
Fonte: adaptada de SSAB TUNNPLAT, 2004.

Tabela 8 - Temperaturas de recristalização e austenitização do Aço DIN EN 10149 S700MC.

Aço	Temperatura na região de recristalização (°C)	Temperatura na região de austenitização (°C)
Chapa Aço DIN EN 10149 S700MC	600	910

Fonte: adaptada de SSAB TUNNPLAT, 2004.

Como o procedimento experimental foi uma simulação do que acontece no ‘chão de fábrica’ de uma empresa implementadora de semirreboques, é necessário um maior aprofundamento sobre como funciona – na prática – os processos de alinhamento e arqueamento a quente. Os ciclos térmicos envolvidos também serão abordados nos itens subsequentes, com o mesmo objetivo.

#### 4.1 O Processo de Alinhamento a Quente de Vigas

O processo de alinhamento a quente de vigas é mostrado na Figura 25 e Figura 26. O aquecimento rápido expande-se entre as duas cintas, superior e inferior da viga, e deve ser realizada nos dois lados do chassi. O resfriamento em volta desta área previne que a porção aquecida contraia novamente. Consequentemente, no resfriamento, a superfície expandida é forçada a resfriar ou a contrair dentro de seus limites (GIMENES, 2003). O processo de alinhamento a quente tem se mostrado bastante eficaz para uma melhor concordância de montagem entre caixa de carga e chassis de SR BA desde que obedecidos os parâmetros de processo pré-estabelecidos, evitando possíveis empirismos (ANDREAZZA, 2012).



Figura 25 - Alinhamento a quente entre caixa de carga e chassi de um SR BA.  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2012).



Figura 26 - Região de aplicação da chama de oxiacetileno para o correto desempenho.  
Fonte: Randon Implementos S.A. (2012).

#### **4.2 O Processo de Arqueamento a Quente de Vigas**

Nesta etapa de montagem, principalmente no caso de semirreboques do tipo Carrega Tudo (SR CT), é necessário que a estrutura metálica do chassi receba, através de aquecimento em determinadas regiões das vigas (direita e esquerda), um tratamento térmico para

arqueamento de acordo com as normas de referência, induzindo um ângulo obtuso na distância central entre os apoios. O processo de controle do aquecimento é exatamente igual ao descrito no item 4.1, com a facilidade de ter os pontos (quatro no total por produto) já definidos para a aplicação de calor. Esses pontos foram determinados experimentalmente. A deformação plástica induzida na viga tem por objetivo fazer com que a deflexão, ou flecha, imposta pela carga  $P$  no centro da plataforma útil (centro do carregamento) seja compensada, evitando assim que o eixo central da viga tenha um deslocamento vertical negativo no eixo  $y$  (Figura 27.a, b, e c) em relação a sua posição inicial (linha reta entre 'a-b'). Se tal deslocamento for negativo, ou seja, linha de arqueamento contrária a da Figura 27.a e b, a estrutura sofrerá tensões trativas demasiadamente superiores às calculadas, podendo comprometer o projeto estrutural como um todo (ANSI/AISC 360-05, 2010). Isso acontece quando uma carga  $P'$  é aplicada com valores maiores do que a carga  $P$  nominal para o qual a viga foi inicialmente calculada.

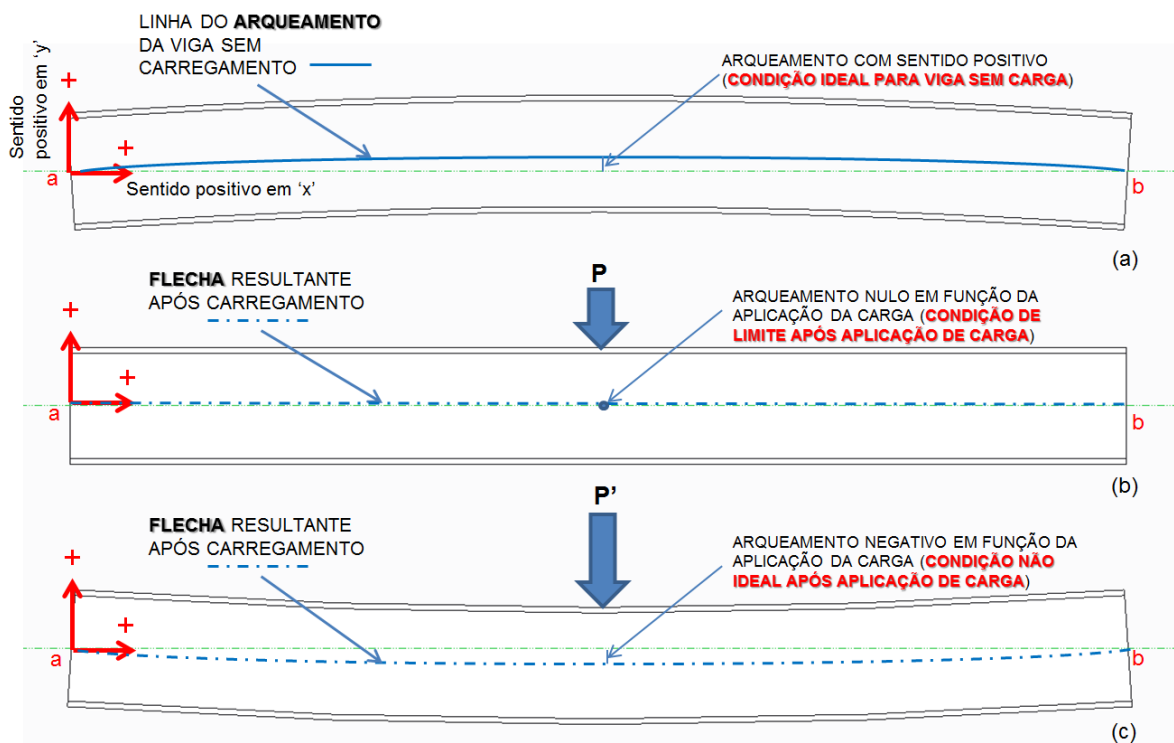


Figura 27 - Condições de aplicação da carga em função do arqueamento.

Fonte: Autor.

O valor do arqueamento que deve ser aplicado é igual à distância entre o centro da linha neutra da viga sem carregamento e o centro da linha elástica da viga após o carregamento. Essa distância vertical negativa será transformada em um valor positivo, arqueando-se a viga no sentido contrário (Figura 27.a, b e c).

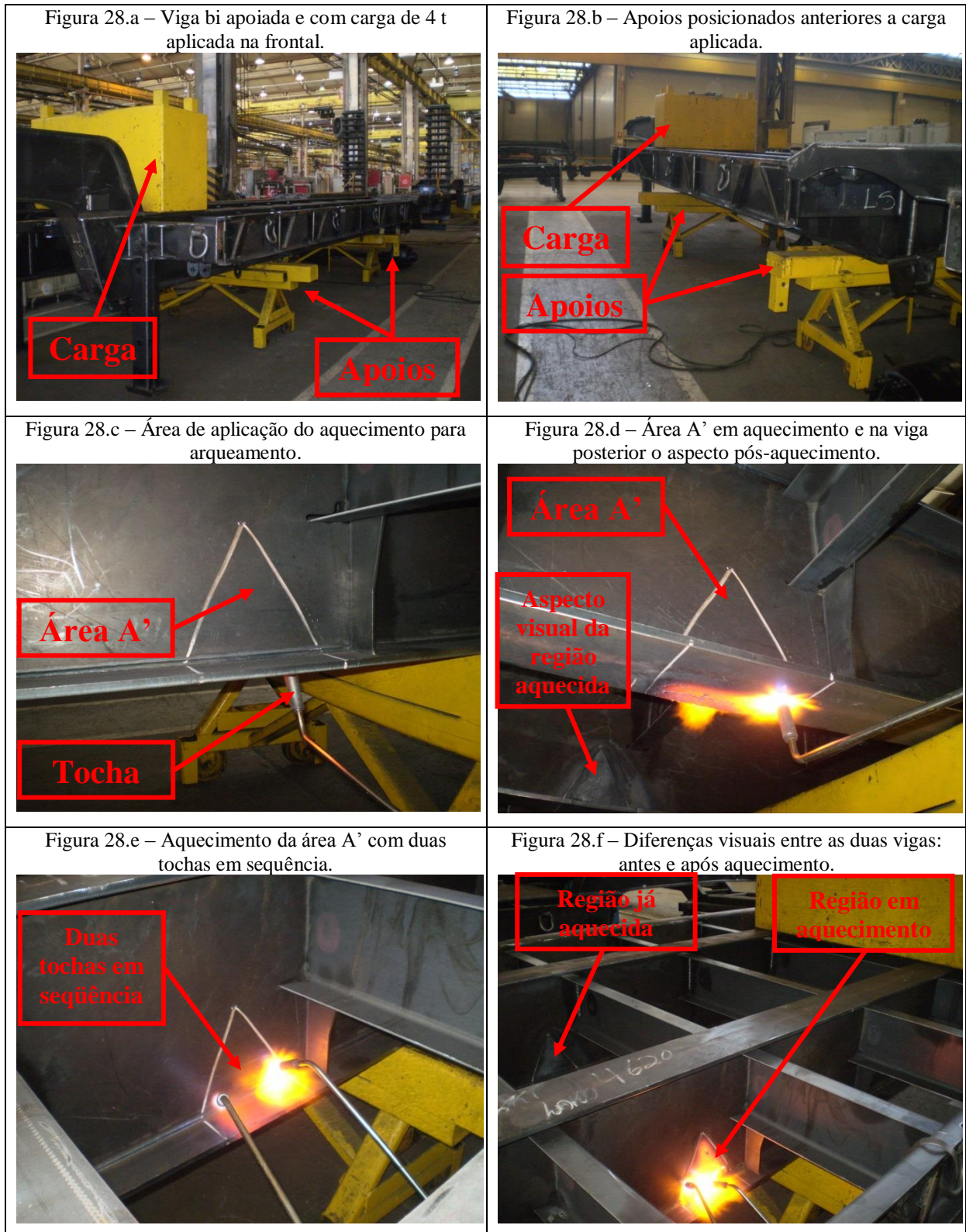


Figura 28 - Processo de arqueamento a quente.

Fonte: Randon Implementos S.A. (2014).

A Figura 28 detalha em imagens o processo de arqueamento a quente. São demonstradas todas as etapas do aquecimento, que é realizado com duas tochas de oxiacetileno concentradas

dentro da área A', denominada região de aquecimento. São quatro as regiões demarcadas para a realização do processo de arqueamento, sendo duas em cada viga. Essas regiões ficam entre os apoios (cavaletes que sustentam o chassi). A sequência de aplicação do tratamento térmico é dada em sentido horário a partir de qualquer uma das quatro regiões. O tempo de aplicação do calor é determinante para que ocorra a deformação nas vigas ocasionando o arqueamento solicitado no projeto.

### 4.3 Ciclos Térmicos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas

A curva térmica do ciclo térmico realizado neste processo é bastante característica, sendo formada por três regiões bem demarcadas. São elas: rampa inicial de aquecimento (RIA), tempo para aquecimento constante (TA) e resfriamento ao ar calmo (RAC). Os Gráficos de 1 a 5 (APÊNDICE A) demonstram as curvas térmicas características para arqueamento de um SR CT padrão de lista, ou seja, um modelo de produto muito comum (representando 90% dos projetos disponíveis). Assim é possível tomar como referência para este trabalho estas curvas térmicas e seus respectivos valores de temperatura ( $T$  [°C]) versus tempo ( $t$  [s]). A Figura 29 mostra essa curva característica, que foi construída de maneira experimental (RANDON S.A., 2014). Logicamente que não é possível manter a temperatura constante durante o tempo TA. Como o processo é manual, realizado por dois operadores, o controle da temperatura é visual, através da cor do aço aquecido. Esse processo é de fácil manipulação, mas pode ser empírico, ou seja, se baseia na experiência do operador.

Através da simples inspeção visual da região (A'), após o aquecimento, é possível ao operador e ao inspetor de qualidade identificar possíveis danos ao material caso os parâmetros não tenham sido obedecidos (Figura 30). A Figura 30 demarca as diferentes regiões aquecidas e suas respectivas siglas. São elas:

ZN = Zona não afetada termicamente ou zona neutra;

Z\_INT = Zona intermediária;

A' ou ZAC = região de aquecimento homogêneo com temperatura 'constante'.

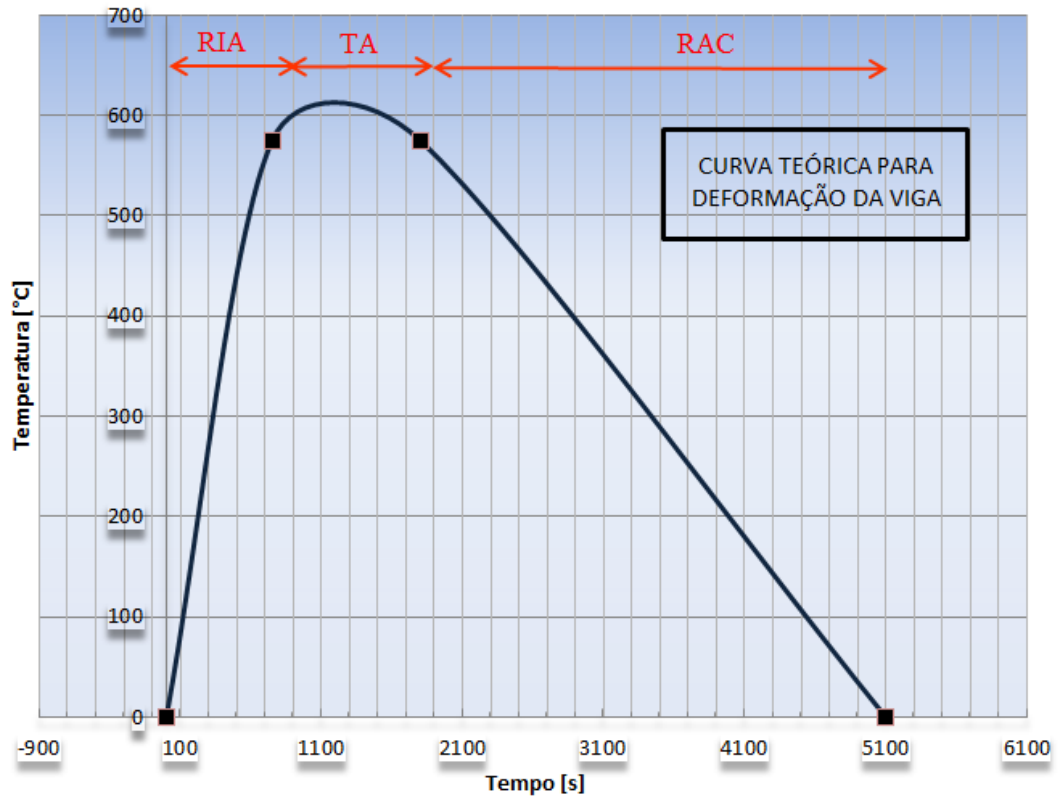


Figura 29 - Curva térmica característica para arqueamento de vigas.  
 Fonte: Randon Implementos S.A. (2014).

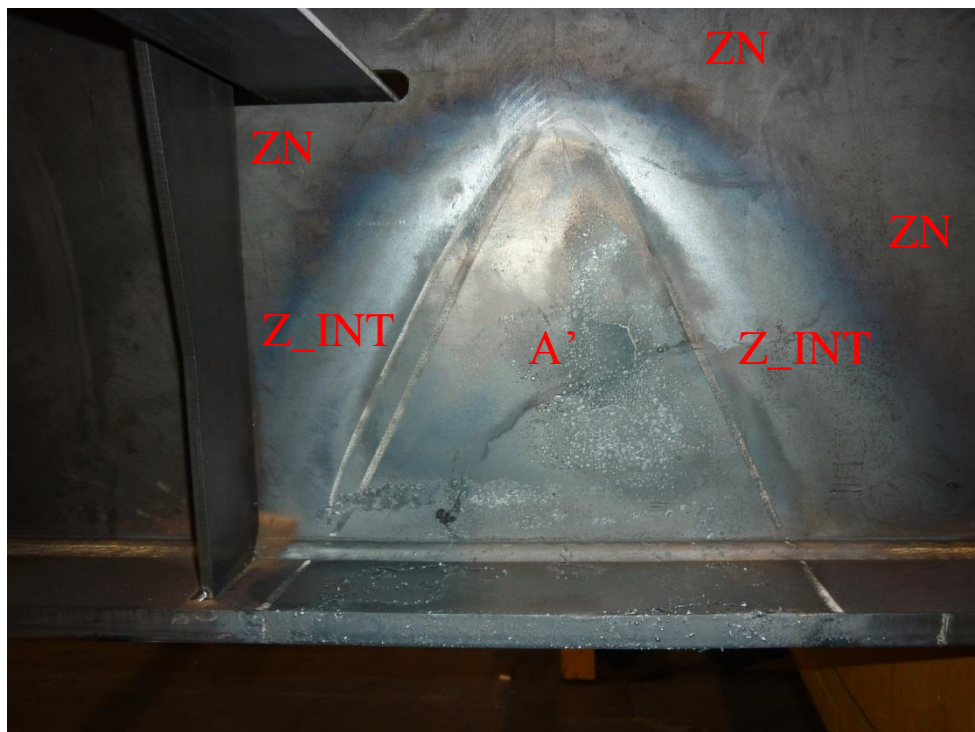


Figura 30 - Aspecto visual da região aquecida.  
 Fonte: Autor.



#### 4.3.1 Levantamento das Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas Conforme Norma

Todos os gráficos referentes ao ciclo térmico dos processos de arqueamento e alinhamento de vigas foram construídos com o auxílio da câmera termográfica FLIR T 360. Ela foi calibrada internamente, através de um equipamento de radiação de infravermelhos com características de corpo negro. A precisão da máquina é de  $\pm 2$  °C. A câmara está registrada internamente com o número de patrimônio Np° 700040646.

Os gráficos obedeceram aos parâmetros de processo estabelecidos para esta aplicação, ou seja, temperatura máxima de trabalho em aproximadamente  $T_a = 600$  °C, e tempo de aquecimento constante  $TA = 1200$  s. Esses parâmetros são usados independentemente do material da viga (aço comum ou aços ARBL).

A taxa de resfriamento  $dT/dt$  para este ciclo térmico na região A' (da Figura 30) é de aproximadamente 0,136 °C/s. Haverá uma variação deste valor dependendo do material utilizado e da espessura, sendo que os valores aqui serão igualados para ambos os casos. Outros pontos da região de aquecimento foram medidos durante o processo de arqueamento das vigas e suas respectivas curvas térmicas podem ser consultadas no APÊNDICE A. Quando aplicado nos corpos de prova, as taxas de aquecimento e resfriamento, assim como a temperatura máxima, obedecem aos valores da curva abaixo (erro de 5 % para mais ou para menos).

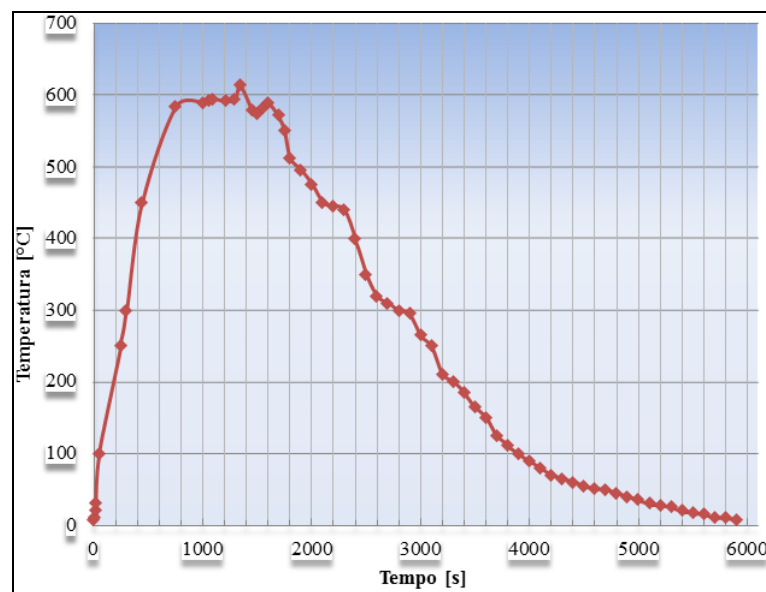


Figura 31 - Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' conforme norma.

#### 4.3.2 Levantamento das Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas Sem Obedecer a Norma

Da mesma forma que no item 4.3.1, todos os gráficos referentes ao ciclo térmico 2 dos processos de arqueamento e alinhamento de vigas foram construídos com o auxílio da câmera termográfica FLIR T 360. As condições de calibragem da máquina também foram as mesmas. Os gráficos não obedeceram aos parâmetros de processo estabelecidos, ou seja, a temperatura utilizada foi de  $T_a \gg 600 \text{ }^\circ\text{C}$ , porém, com tempo de aquecimento constante  $T_A = 1200 \text{ s}$ . Verificou-se nesta amostragem que a  $T_a$  (no ponto A da região de aquecimento) se igualou a temperatura de austenitização do material, ou seja, na Figura 32 a temperatura  $T_a$  atinge valores na ordem de 900 a 950  $^\circ\text{C}$  para aços de ARBL e em torno de 850  $^\circ\text{C}$  para aços comuns. Deve-se fazer esta distinção quando estas curvas térmicas forem enunciadas como referência para os parâmetros usados.

A taxa de resfriamento  $dT/dt$  para este ciclo térmico na região A' é de aproximadamente 0,193  $^\circ\text{C/s}$  para aços comuns e 0,215  $^\circ\text{C/s}$  para aços ARBL. Haverá uma variação deste valor dependendo da espessura do material e geometria da viga que está sendo aquecida. Outros pontos da região de aquecimento foram medidos e suas respectivas curvas térmicas podem ser consultadas no APÊNDICE B. Algumas imagens termográficas do processo podem ser consultadas no APÊNDICE C.

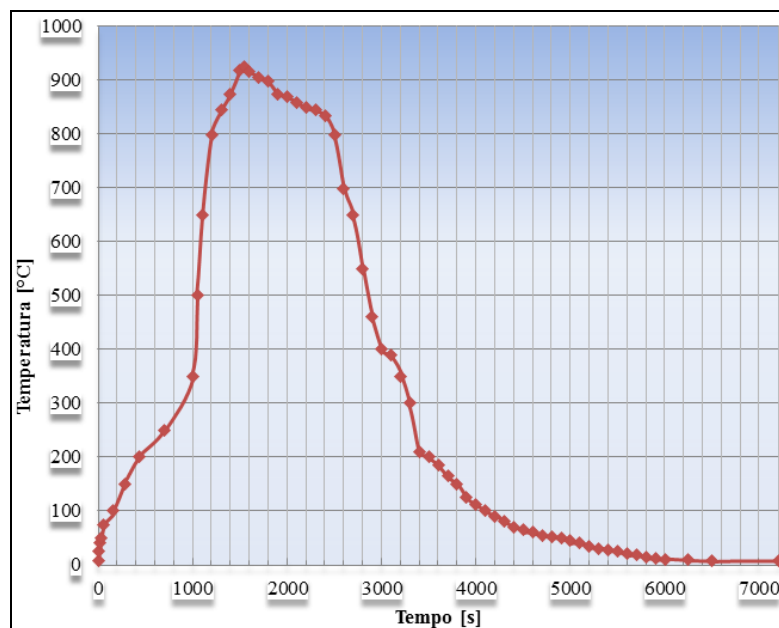


Figura 32 - Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' na condição fora de norma.

Notam-se algumas diferenças, principalmente, nas taxas de resfriamento quando este ciclo térmico, dito fora de norma é aplicado sobre os corpos de prova (Figura 33). Na rampa de aquecimento realizada de maneira manual e também em forno, a taxa de aquecimento é de aproximadamente  $0,67\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ . Porém, para este caso, onde a temperatura ultrapassou a de norma, a taxa de resfriamento abrangeu uma faixa de  $0,137\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  para aços comuns e  $0,148\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  para aços ARBL. Novamente, o fator de forma é a principal influência nas diferenças das taxas de resfriamento. Importante salientar que as curvas térmicas possuem tolerâncias em seus valores de  $dT/dt$  em função dos processos utilizados (erro humano, variação de vazão dos gases, calibragem dos fornos, etc.). A tolerância utilizada nas curvas térmicas de aquecimento e resfriamento foi de 5 % para mais ou para menos.

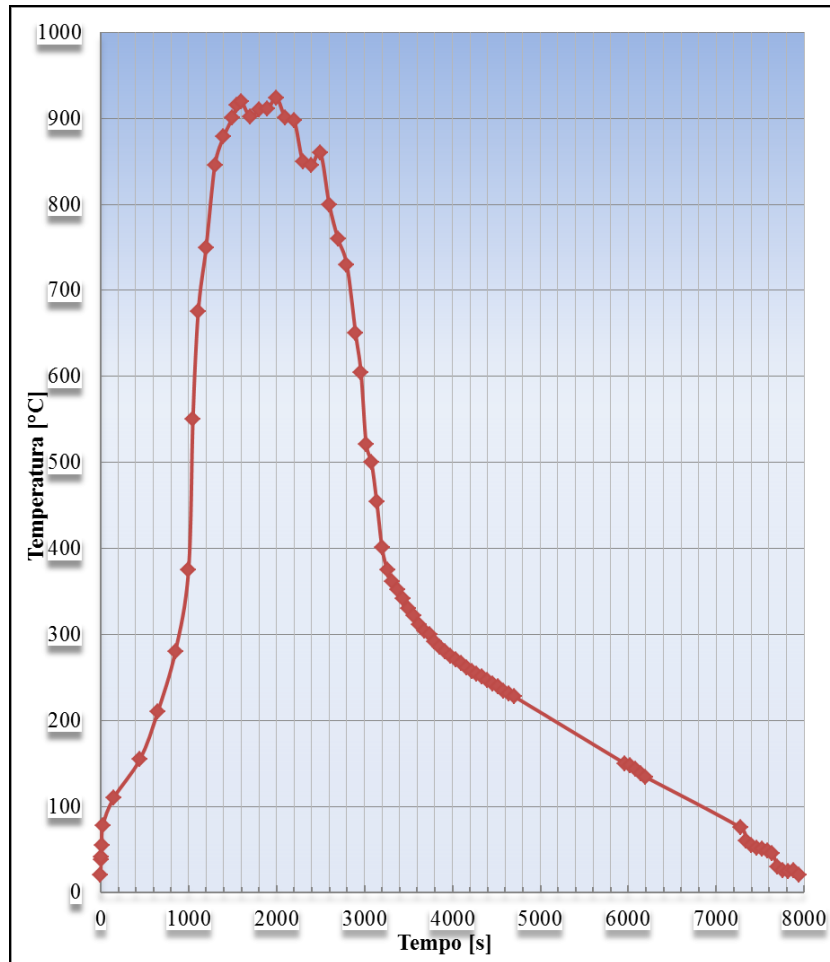


Figura 33 - Curva térmica dos processos de aquecimento e alinhamento realizados em corpos de prova na condição fora de norma.

#### 4.4 Etapas do Procedimento Experimental

Esta etapa foi dividida em quatro partes:

- a) Caracterização microestrutural através de análises metalográficas obtidas com microscópio óptico (MO) para levantamento do tamanho de grão ASTM E112 (método de contagem de grãos);
- b) Levantamento dos perfis de microdureza Vickers (HV);
- c) Levantamento das curvas de Wöhler (curvas S-N) e
- d) Ensaio de tração.

Estes ensaios foram realizados obedecendo as seguintes condições aplicadas sobre os materiais ASTM A570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC:

- (aa) Corpos de prova (CP) em estado original;
- (bb) Corpos de prova aquecidos até a temperatura de trabalho (coincide com a temperatura de recristalização) e resfriados ao ar calmo;
- (cc) Corpos de prova aquecidos a uma temperatura (simulando um processo sem controle) próxima a temperatura de austenitização e resfriados ao ar calmo.

##### 4.4.1 Preparação das Amostras

Os corpos de prova (CP) foram confeccionados com duas espessuras diferentes conforme Tabela 9. O corte foi realizado por processo de eletro-erosão a fio, com velocidade de avanço controlada para não afetar o acabamento na parte lateral da peça. Também se obedeceu ao sentido transversal a laminação da chapa (Figura 34). Para isso, foram fornecidas duas chapas de área igual a dois metros quadrado de cada material cortados por processo a *laser* diretamente das bobinas. Teve-se o cuidado de não usar a parte inicial da bobina e nem a parte final.

A quantidade de corpos de prova cortados foi de 40 peças para cada material. Sendo que na Tabela 10 pode-se verificar a quantidade de cada CP em função do tipo de ensaio a ser realizado e também sua respectiva norma.

Tabela 9 - Materiais ensaiados e suas respectivas espessuras.

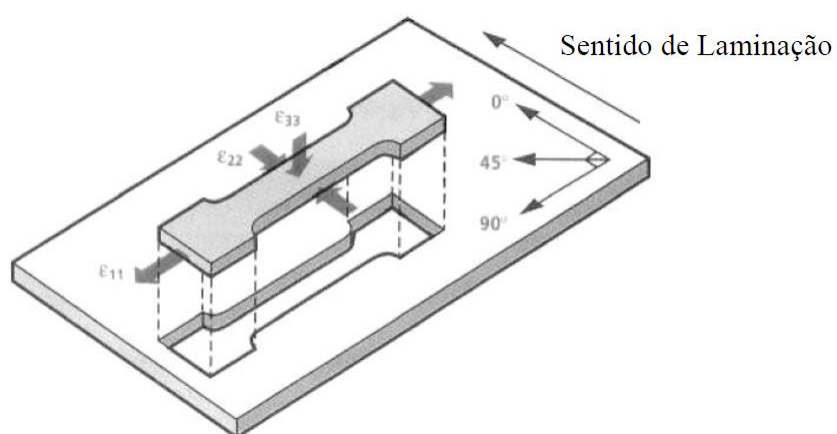
Aço	Espessura (mm)	Área do <i>blank</i> fornecido para corte dos corpos de prova (m <sup>2</sup> )
Chapa Aço ASTM A570 GR36-C	6,35	2,0
Chapa Aço DIN EN 10149 S700MC	4,75	2,0

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova em função do tipo de ensaio e sua respectiva norma.

Ensaio	Quantidade de CP (peças)	Norma
Microscopia Óptica (MO)	6	NBR 13284 NBR 15454 NBR 8108 NBRNM 136 NBRNM 88 NBR 11568
Ensaio de Tração	18	NBR ISO 6892:2002
Curva S-N	60	ASTM E 466-82
Perfis de microdureza	18	DIN 50133: 1985-02

Fonte: Autor.

Figura 34 - Sentido correto de corte dos corpos de prova no *blank*.

Fonte: Handbook SSAB, 1998. Adaptado pelo autor.

A Figura 35, Figura 36 e Figura 37 mostram os desenhos dos corpos de prova utilizados, todos em modelo *sheet type*. Base de medida utilizada para alongamento de 50 mm. Os desenhos foram executados de acordo com as normas de cada ensaio, obedecendo a critérios de acabamento: todos os corpos de prova receberam lixamento (com lixa de SiC de #600) em seu contorno após o corte. A rugosidade  $R_a$  na superfície das amostras polidas no modo automático foi de  $0,03 \mu\text{m}$ . Os corpos de prova não receberam jateamento.

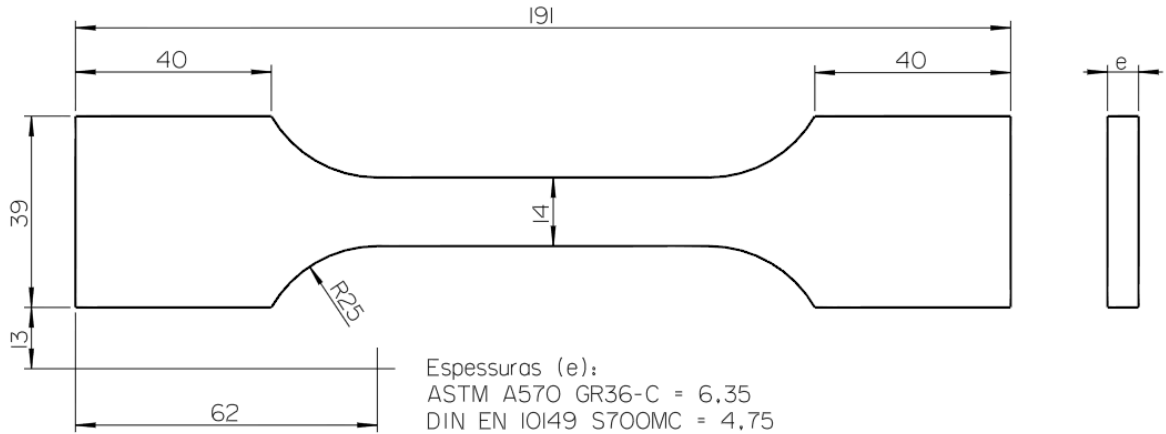


Figura 35 - Desenho do corpo de prova para ensaios de tração.  
 Fonte: Desenho do autor conforme norma NBR ISO 6892:2002.

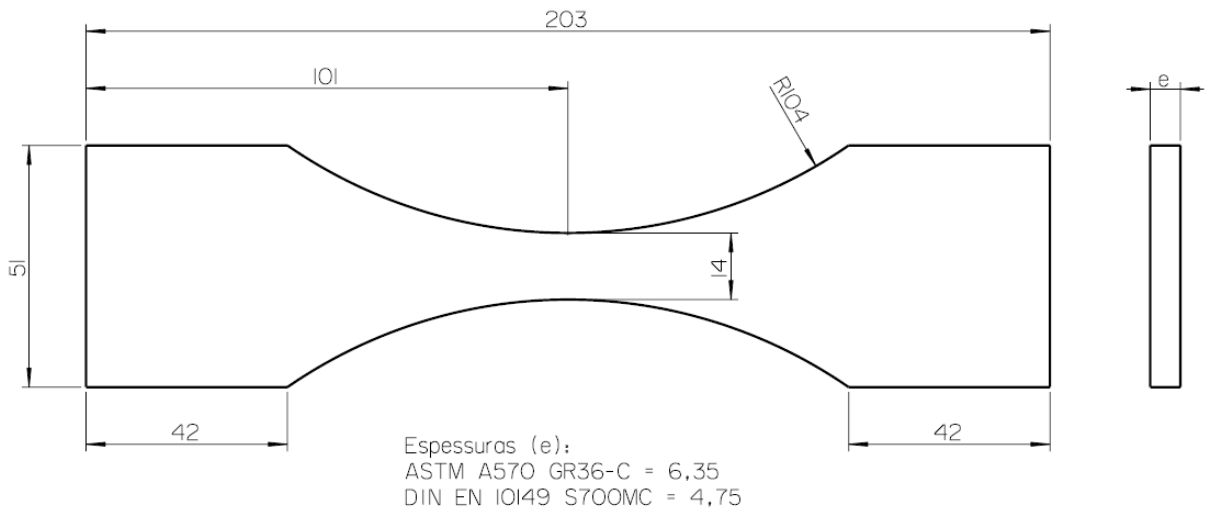


Figura 36 - Desenho do corpo de prova para levantamento das curvas S-N.  
 Fonte: Desenho do autor conforme norma ASTM E 466-82.

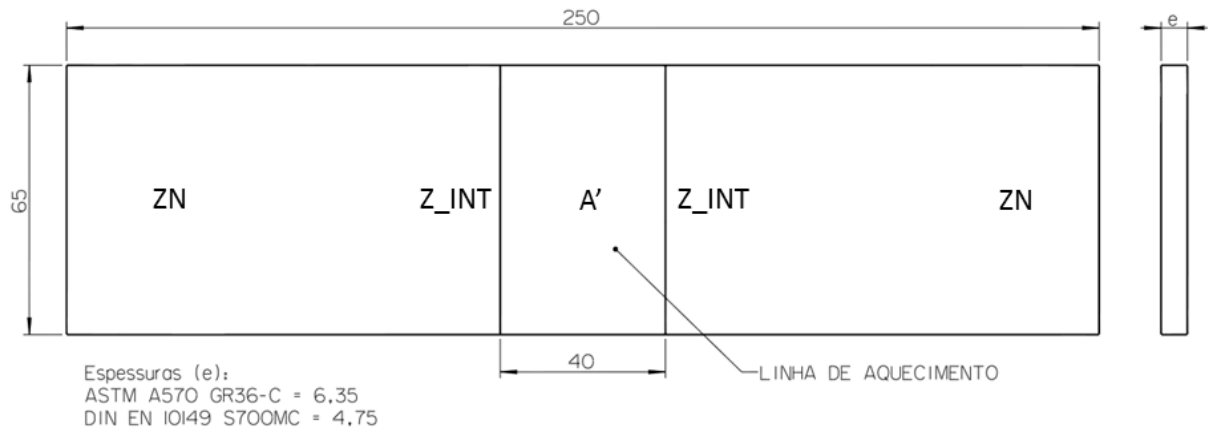


Figura 37 - Desenho do corpo de prova para ensaio de microdureza.  
 Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Identificação dos Corpos de Prova

A identificação dos corpos de prova para as análises, em relação ao tipo de material, foi feita obedecendo aos códigos da Tabela 11, onde a letra 'A' representa o material ASTM A570 GR36-C e a letra 'B' caracteriza o material DIN EN 10149 S700MC.

Para identificar qual o processo utilizado de aquecimento e resfriamento, foi utilizada como código caracterizador a temperatura do tratamento térmico (Tabela 12). As temperaturas de '600', '850' e '910' graus centígrados caracterizaram as condições de aquecimento, enquanto que a etapa de resfriamento (ao ar calmo) ou sem resfriamento (estado original) foram identificados, respectivamente, pelos pseudônimos 'Ar' e 'Or'.

Tabela 11 - Descrição de cada aço identificado.

Aço	Descrição
ASTM A570 GR36-C	A
DIN EN 10149 S700MC	B

Fonte: Autor.

A Tabela 13 demonstra como ficou a identificação completa dos corpos e a quantidade de peças destinadas a cada ensaio. Na última coluna, uma breve descrição de cada CP.

Tabela 12 - Identificação das condições de temperatura e resfriamento usados nos corpos de prova.

Processo	Descrição
Corpos de prova aquecidos a 600 °C	600
Corpos de prova aquecidos a 850 °C	850
Corpos de prova aquecidos a 910 °C	910
Corpos de prova resfriados ao ar calmo	Ar
Corpos de prova em estado original	Or

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Tabela geral dos CP utilizados.

Identificação do CP	Tração	MO	Curva S-N	Microdureza Vickers	Descrição do CP
AOr	3	1	10	3	Amostra em ASTM A570 GR36-C no estado original.
A600Ar	3	1	10	3	Amostra em ASTM A570 GR36-C aquecido a 600 °C e resfriado ao ar calmo.
A850Ar	3	1	10	3	Amostra em ASTM A570 GR36-C aquecido a 850 °C e resfriado ao ar calmo.
BOr	3	1	10	3	Amostra em DIN EN 10149 S700MC no estado original.
B600Ar	3	1	10	3	Amostra em DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600 °C e resfriado ao ar calmo.
B910Ar	3	1	10	3	Amostra em DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910 °C e resfriado ao ar calmo.
Total de ensaios	18	6	60	18	-

Fonte: Autor.



#### 4.4.3 Processos de Arqueamento e Alinhamento a Quente nos Corpos de Prova

O primeiro passo foi aplicar as curvas térmicas descritas nos itens 4.3.1 e 4.3.2 (detalhadas nos APÊNDICES A e B) sobre os corpos de prova, de modo a avaliar a influência dos processos de arqueamento e alinhamento a quente realizado nas vigas dos semirreboques. Para esta etapa foi usado um forno do tipo câmara (Figura 38) com aquecimento por resistências elétricas, controle automático de temperatura através de um sistema microcontrolado (*range* de 0 a 1100 °C) e monitoramento com câmara termográfica.

Notaram-se, através do monitoramento da temperatura com câmara termográfica, que o processo, mesmo manual, corresponde às curvas térmicas solicitadas. Os erros devido ao processo existem e foram comentados em 4.3.2.



Figura 38 - Forno tipo câmara com controle automático de temperatura.  
Foto: Gabriel Andreazza, 2012.

O aquecimento utilizado na prática e o aquecimento realizado no forno sobre os corpos de prova tiveram os parâmetros de temperatura e tempo aproximados. O método de resfriamento foi o mesmo, ao ar calmo, mas a taxa de resfriamento  $dT/dt$ , bastante importante para uma aproximação dos resultados, variou em função das diferenças de geometrias envolvidas. A diferença destes métodos está na homogeneidade do aquecimento em forno contra o aquecimento localizado do processo fabril.

O controle da temperatura de aquecimento dos corpos de prova foi realizado pelo controlador de temperatura microcontrolado do forno, enquanto que o controle de resfriamento (monitoramento) foi feito com a câmara termográfica (Figura 39).

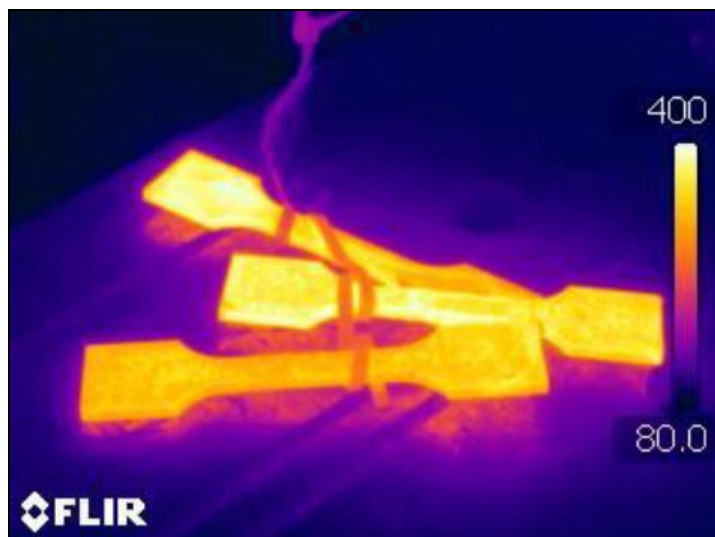


Figura 39 - Controle de resfriamento pela câmara termográfica.  
Foto: Gabriel Andreazza, 2012.

A Figura 40 demonstra, como exemplo, o aspecto dos corpos de prova após o aquecimento e como foi realizada sua respectiva identificação. Apesar da formação de carepas na superfície dos corpos de prova aquecidos não houve descarbonetação. Após a preparação térmica das amostras, os mesmos foram enviados imediatamente para o teste de tração e caracterização nos microscópios.



Figura 40 - Aspecto visual de algumas amostras.  
Foto: Gabriel Andreazza, 2012.

Para os corpos de prova onde o aquecimento não foi homogêneo, a aplicação de calor foi constante na parte central (linha de aquecimento) por cinco minutos de acordo com as temperaturas da Tabela 13. A Figura 41 mostra o procedimento executado com o maçarico de oxiacetileno enquanto a Figura 42 demonstra o monitoramento da temperatura através da câmera termográfica. Neste exemplo, foi usada uma temperatura acima do valor estabelecido por norma (igual ou inferior a 600 °C). Esses corpos de prova foram utilizados para ensaios de microdureza.

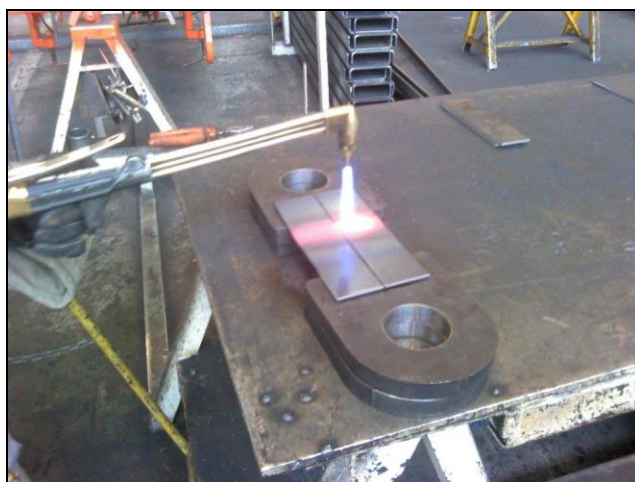


Figura 41 - Aquecimento heterogêneo em corpos de prova.  
Fonte: Autor.



Figura 42 - Monitoramento da temperatura de aquecimento através da câmera termográfica.  
Fonte: Autor.

Após a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram usinados para retirada de amostras (de 20 mm por 20 mm) da região de Aquecimento (A' ou ZAC), da região da Zona Intermediária (Z\_INT) e da região da Zona Neutra (ZN). As peças foram embutidas em baquelite (Figura 43) no formato cilíndrico ( $\varnothing 35$  mm por 15 mm de altura).

#### 4.4.4 Ensaio de Tração

Com o ensaio de tração em corpos de prova conforme dimensional da Figura 35, foram obtidas as curvas de tensão versus deformação nos regimes elástico-plástico até a ruptura, do material sob carga de tração uniaxial (com deformação em uma taxa constante). Com estas curvas foi possível obter propriedades mecânicas importantes, tais como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura e alongamento. Foram ensaiados dezoito corpos de prova em uma máquina universal para ensaios de materiais, marca Wolpert, modelo 30 TUZ 757 com capacidade de até 30 toneladas. A temperatura ambiente para realização dos ensaios foi de 22°C e a taxa de carregamento foi de 9 mm/min.

#### 4.4.5 Caracterização Microestrutural dos Materiais

Como características principais a serem avaliadas nas propriedades dos materiais estudados podem-se citar a composição química, tamanho, forma e distribuição dos grãos, fases e estrutura (cristalino, amorfo, etc.). O microscópio utilizado foi o modelo Olympus BX41M-LED. O tamanho de grão ASTM foi estimado com o auxílio do software IMAGE TOOL, versão 3.0, do *Department of Dental Diagnostic Science at The University of Texas Health Science Center (UTHSCSA, 2009)*. A técnica de análise de imagem procedeu conforme norma ASTM E1382.

#### 4.4.6 Microdureza Vickers (HV)

Os perfis de microdureza foram medidos na escala Vickers seguindo as recomendações da norma DIN 50133:1985-02. Para o cálculo do valor de dureza *HV* foi usado a Equação 4.1, como abaixo:

$$HV = \frac{2 \cdot Q \cdot \text{sen}(136^\circ/2)}{D^2} = \frac{2 \cdot Q \cdot \text{sen}(\theta/2)}{D^2} = \frac{1,8544 \cdot Q}{D^2} = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Onde:

*Q* = Carga aplicada [kgf];

*D* = Médias das diagonais medidas entre as arestas da pirâmide de diamante do penetrador *Vickers* [mm];

$\vartheta = \hat{\text{Ângulo de diedro da pirâmide de diamante do penetrador Vickers [°]}$ .

Os corpos de prova foram preparados (embutidos) em baquelite para melhor fixação no microdurômetro, conforme Figura 43. Foi realizado o polimento final das amostras com alumina de granulometria 0,3  $\mu\text{m}$ . A unidade usada foi a HV5 com penetração de 0,5 kgf durante 10 s.

O equipamento utilizado para traçar os perfis de microdureza foi o microdurômetro modelo Brinell and Vickers Hardness Tester HBV-30A, conforme Figura 44. As medições foram realizadas no Laboratório de Metrologia e Qualidade da empresa Suspensys Sistemas Automotivos.

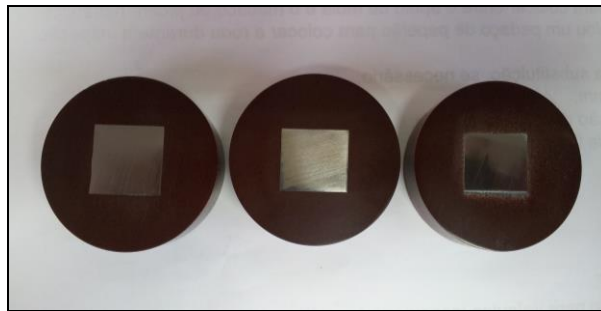


Figura 43 - Amostras embutidas para medição de microdureza Vickers.  
Fonte: Autor, 2015.

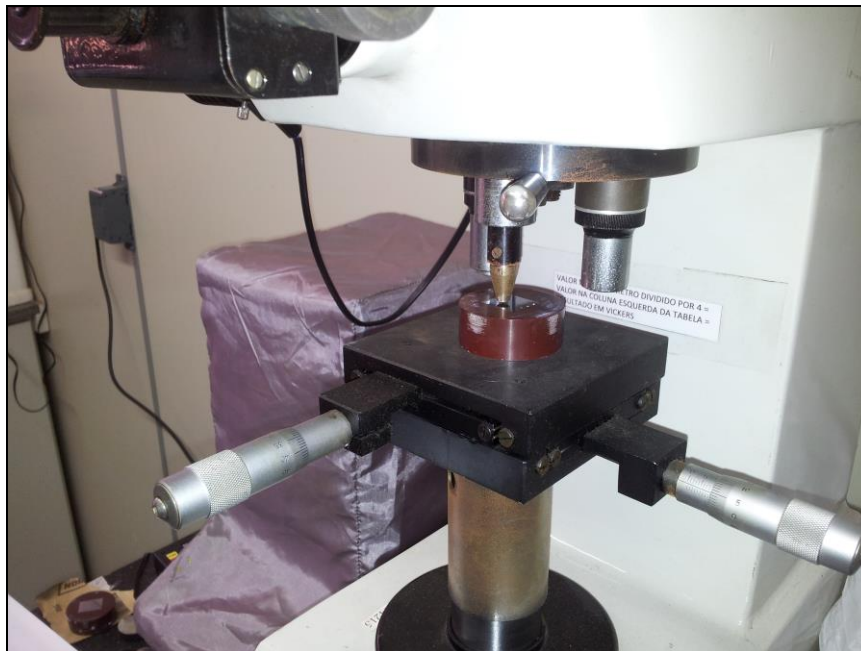


Figura 44 - Medição da microdureza Vickers de corpos de prova.  
Fonte: Autor, 2015.

Para a análise estatística dos dados obtidos entre as diferentes condições de aquecimento, optou-se pela aplicação da função ANOVA (*Analysis of Variance*) entre os grupos. Para isso,

foram testadas duas hipóteses onde as médias das amostras são iguais ou diferentes. Para a análise dos dados dos grupos entre si optou-se pela aplicação da função de TUKEY. Os resultados são discutidos no Capítulo 5 e no APÊNDICE F são colocados todos os resultados em tabelas geradas pelo software PAST.

#### 4.4.7 Curva S-N

Seguindo a hipótese de que os processos de arqueamento e alinhamento de vigas alteram substancialmente a microestrutura dos materiais (RAJAD apud TEIXEIRA, 2004) e de maneira mais determinante em alguns tipos de aços, foram realizados os ensaios de fadiga, por flexão alternada, para a confecção das curvas S-N dos materiais. Com a suposição da consequente alteração no limite de fadiga do material, foi feita a verificação das diferenças de valores do limite de resistência a fadiga com o material na condição como recebida ( $S'_e$ ) e com o material alterado ( $S_e$ ) somente das vigas dos semirreboques.

Os ensaios foram realizados a partir de corpos de prova retirados no sentido transversal à direção de laminação da chapa conforme Figura 34. Foi usada uma máquina de fadiga marca Schenck que trabalha por flexão alternada, com carregamento senoidal (Figura 45). A tensão média ( $\sigma_{med}$ ) foi igual a zero e a razão de carregamento ( $R$ ) igual a  $-1$ .



Figura 45 - Máquina para levantamento das curvas S-N.  
Fonte: USIMINAS, 2014.

Conforme a teoria da elasticidade (TIMOSHENKO, 1980), a tensão máxima aplicada nos corpos de prova, é dada pela equação abaixo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6000 \cdot M_f}{b \cdot t^2} \quad (4.2)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = Máxima tensão aplicada na fibra mais afastada da linha neutra [MPa];

$M_f$  = Momento fletor [N.m];

As amplitudes de tensão que foram aplicadas nos corpos de prova para traçar a curva S-N correspondem a cinco diferentes porcentagens do limite  tração mínima  $S_{ut}$  do material. Esses valores representam 40, 50, 60, 70 e 80 por cento de  $S_{ut}$ . O número de CPs (Figura 36) para cada tensão aplicada foi de no mínimo três, sendo que foram preparados cinco peças para cada teste. Corpos de prova que apresentaram ruptura precoce e tiveram desvio muito grande em relação a média foram desconsiderados. Como o objetivo era determinar o número de ciclos para vida infinita do CP, os valores iniciais de tensão, que corresponderiam a vida em fadiga de baixo ciclo ( $1 \leq N \leq 10^3$ ), foram eliminados. Dessa forma também se reduziu o tempo necessário para a realização dos ensaios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados dos Ensaios de Tração

Os resultados para os ensaios de tração estão dispostos na Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 14 - Resultado para os ensaios de tração para o material ASTM A570 GR36-C.

Processo	Amostra	Tensão de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Tensão máxima (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
Estado original	AOr	293	400	21
Aquecido a 600 °C e resfriado ao ar	A600Ar	263	382	23
Aquecido a 850 °C e resfriado ao ar	A850Ar	262	361	26

Fonte: Autor, 2015.

Para o aço ASTM A570 GR36-C a redução da tensão de escoamento do material não foi inferior a tensão descrita por norma. É comum todo aço laminado (a quente ou a frio) fornecido, principalmente em bobina, ter sua tensão de escoamento e limite de ruptura acima da norma. Logo, para este caso, o aquecimento, mesmo acima do especificado pelo processo, o que implica em aquecimentos acima da temperatura de recristalização, não afeta significativamente o material.

Tabela 15 - Resultado para os ensaios de tração para o material DIN EN 10149 S700MC.

Processo	Amostra	Tensão de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Tensão máxima (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
Estado original	BOr	726	756	31
Aquecido a 600 °C e resfriado ao ar	B600Ar	512	597	33
Aquecido a 910 °C e resfriado ao ar	B910Ar	425	554	37

Fonte: Autor, 2015.



Para o aço de norma DIN EN 10149 S700MC os efeitos representam quedas de -26,85% em relação ao valor da tensão de escoamento original, para um aquecimento de 600°C. Quando o aquecimento se aproxima da temperatura de 910°C a queda na tensão de escoamento do material pode chegar a -39,28 %. Esses valores representam tensões com limite muito abaixo do especificado por norma, que para este material é nominalmente igual a 700 MPa. Como o cálculo estrutural, nos produtos que são inclusos nesta rota de produção e que são submetidos a estes processos a quente, se baseia no critério de falha da máxima tensão em determinado ponto crítico, o material não está aprovado para esta aplicação. Ou então, o cálculo dimensional do produto deve prever a diminuição nos valores das propriedades mecânicas, o que implica em, por exemplo, maior momento de inércia na viga, entre outros fatores.

Os gráficos da Figura 46 e Figura 47 mostram o comparativo das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração. A linha tracejada em vermelho mostra o valor real, ou de norma, para os respectivos materiais. Esses valores serão posteriormente correlacionados com outras propriedades, como por exemplo, dureza e limite de fadiga.

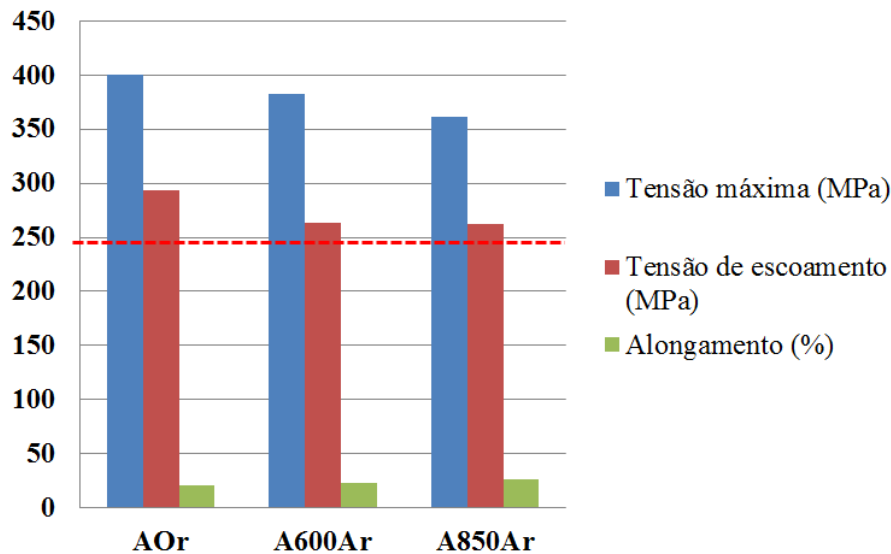


Figura 46 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas de três diferentes amostras do material ASTM A570 GR36-C obtidas no ensaio de tração.

Fonte: Autor, 2015.

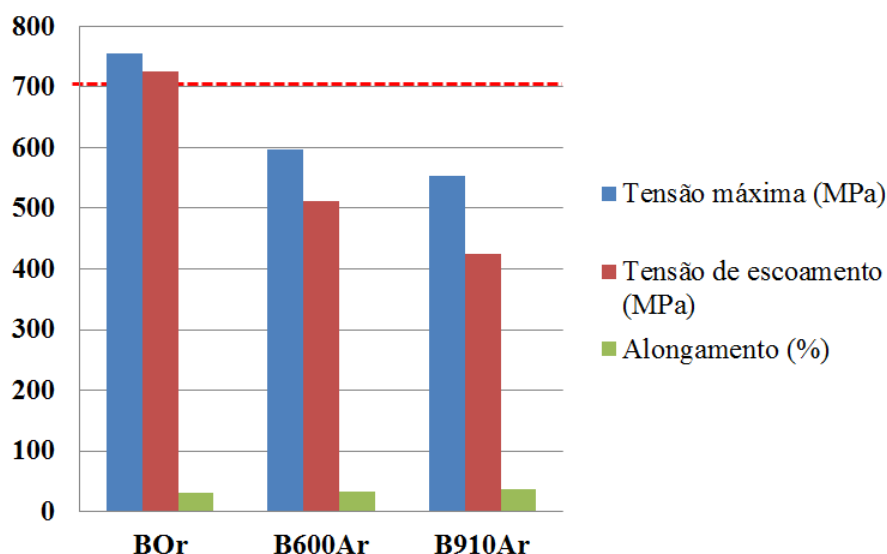


Figura 47 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas de três diferentes amostras do material DIN EN 10149 S700MC obtidas no ensaio de tração.

Fonte: Autor, 2015.

Nota-se também um aumento gradativo no valor do alongamento 'a' (em %) dos materiais, tanto do aço comum como do aço de ARBL. Esse valor obedece a uma taxa de crescimento muito semelhante entre as duas matérias primas. Verificou-se que para o aço ASTM A570 GR36-C o alongamento em estado original era de 21 % e chegou, após os tratamentos térmicos, ao máximo de 26 %. No aço microligado, em estado virgem, o valor do alongamento era igual a 31% e no pior caso de aquecimento chegou ao máximo de 37%.

Discussão geral dos resultados dos ensaios de tração para o material ASTM A570 GR36-C:

- Após aplicação do ciclo térmico com temperatura  $T_a = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  (conforme item 4.3.1 e APÊNDICE A) a tensão de escoamento  $\sigma_e$  teve seu valor alterado de maneira significativa em relação ao valor da  $\sigma_e$  do aço em estado de recebimento: decréscimo de aproximadamente 10 %. Porém, não descaracterizou o material, uma vez que os valores de  $\sigma_e$  continuaram acima do valor estabelecido em norma;
- Após aplicação do ciclo térmico com temperatura de aproximadamente  $T_a = 850 \text{ }^\circ\text{C}$  (conforme item 4.3.2 e APÊNDICE B) a tensão de escoamento  $\sigma_e$  teve seu valor alterado de maneira significativa em relação ao valor de norma: decréscimo de aproximadamente 10,6 %;
- A  $\sigma_e$  para esta matéria prima, em seu estado de fornecimento, é sempre superior ao solicitado pela norma: média das amostras em torno de 11 % acima do valor mínimo de 250 MPa;

Discussão geral dos resultados para o material DIN EM 10149 S700MC:

- Notou-se no material microligado que o comportamento em relação a um aço comum as proporções de variação são bem diferentes, e isso já era esperado, em função dos elementos de transição (Nb, Ti e V). Com a aplicação do ciclo térmico com temperatura próxima a  $T_a = 600$  °C (conforme item 4.3.1 e APÊNDICE A) a tensão de escoamento  $\sigma_e$  teve seu valor alterado de maneira significativa em relação ao valor nominal: decréscimo de 21 %;
- No processo térmico com temperatura de pico de aproximadamente  $T_a = 910$  °C (conforme item 4.3.2 e APÊNDICE B) a tensão de escoamento  $\sigma_e$  teve seu valor alterado de maneira significativa em relação ao valor de norma: decréscimo de aproximadamente 26,71 %;
- Os resultados experimentais desta etapa foram diferentes quando comparados com o comportamento da tensão de ruptura em função da temperatura e tempo de aquecimentos fornecidos pelo fabricante do aço microligado (Figura 48). Essa diferença se deve principalmente as mudanças de fases e crescimento de grão austenítico em função da temperatura acima do especificado (próxima da temperatura de austenitização).

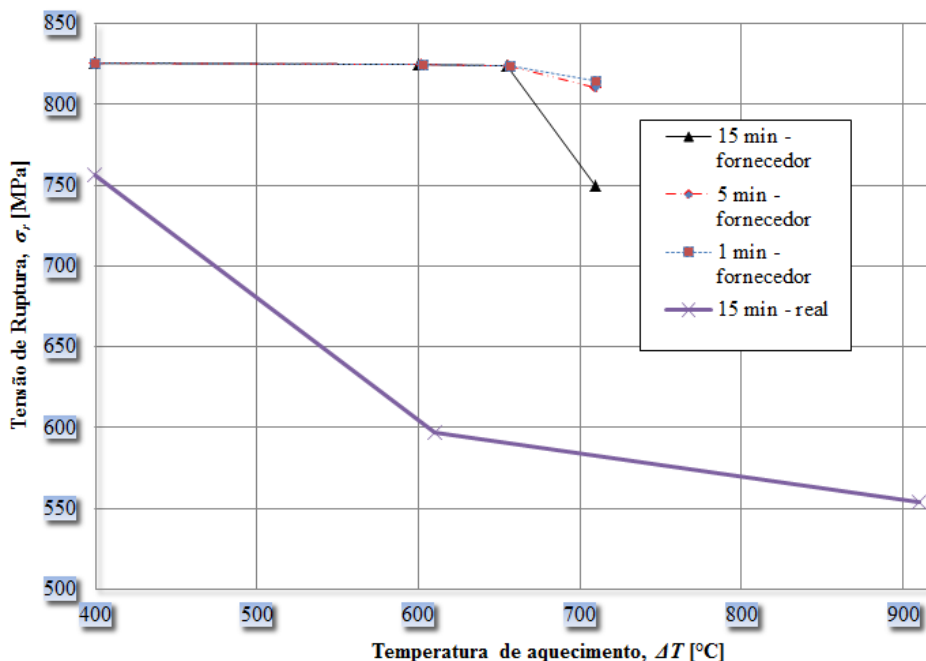


Figura 48 - Tensão de ruptura em função da temperatura de aquecimento para três tempos e para o material DIN EN 10149 S700MC laminado.

Fonte: Adaptado de SSAB Tunnplat, 2012 / Randon S.A., 2015.

## 5.2 Caracterização Microestrutural por Microscopia Ótica (MO)

### 5.2.1 Micrografias do Material ASTM A570 GR36-C

O aço ASTM A570 GR36-C estudado nesta pesquisa foi fornecido pela Siderúrgica Usiminas que contribuiu com alguns ensaios mecânicos realizados em seu centro de tecnologia.

A micrografia da Figura 49 revela a microestrutura da amostra AOr, ou seja, do material ASTM A570 GR36-C em seu estado de fornecimento após laminação na aciaria. Não é observado alinhamento de fase na direção de laminação, nem encruamento. Apresenta microestrutura com grãos pequenos (tamanho de grão TG ASTM 8) e pouca homogeneidade. Observam-se fases de ferrita em maior quantidade e perlita em menor porcentagem. A presença do cobre é de forma dissolvida na matriz ferrítica (0,2% Cu).

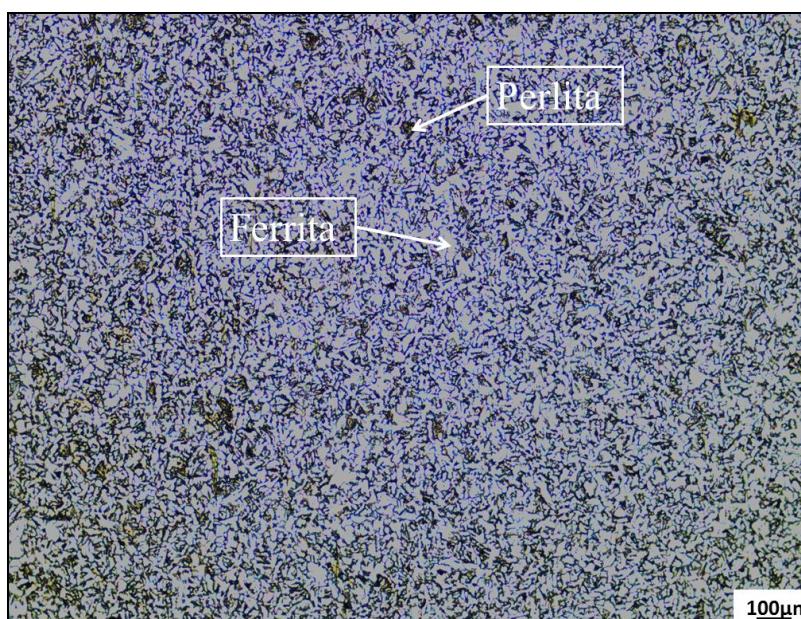


Figura 49 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C em estado virgem (AOr). Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 100x, ataque de NITAL 2%.

Fonte: Autor.

Para a amostra A600Ar (Figura 50), que foi aquecida até 600°C e resfriada ao ar calmo, a microestrutura revelada é de ferrita e perlita fina, muito semelhante a seu estado original. O tamanho do grão revelado nestes corpos de prova foi igual ao padrão ASTM 7. O aquecimento até a temperatura de trabalho, próximo dos 600°C e por um tempo conforme ciclo térmico utilizado no processo, não altera substancialmente a microestrutura deste material.

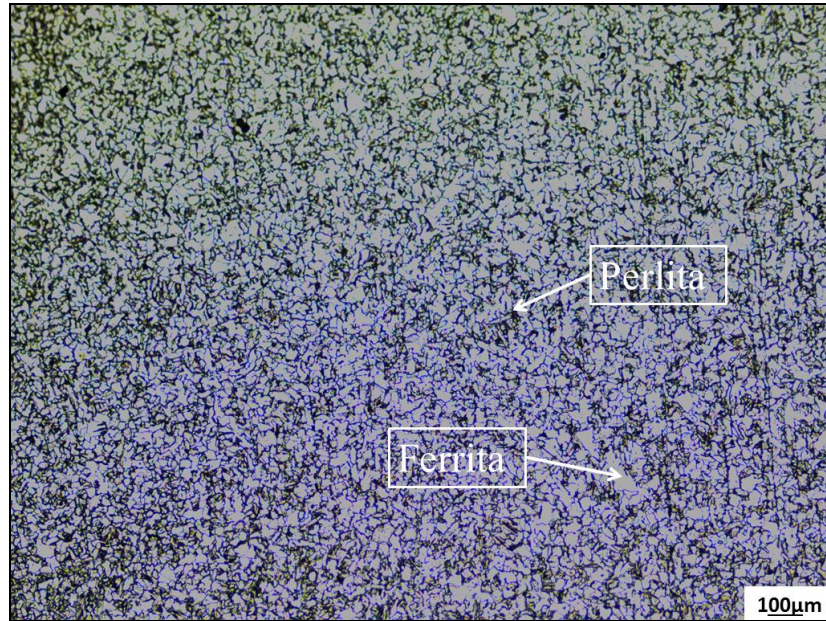


Figura 50 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C (amostra A600Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).

Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 100x, ataque de NITAL 2%.

Fonte: Autor.

A Figura 51 revela as fases presentes, onde é possível observar ferrita  $\alpha$  (Figura 51.2) e pequena quantidade de ferrita idiomórfica (Figura 51.1). É revelada também a presença de cobre dissolvido no contorno de grão da ferrita.

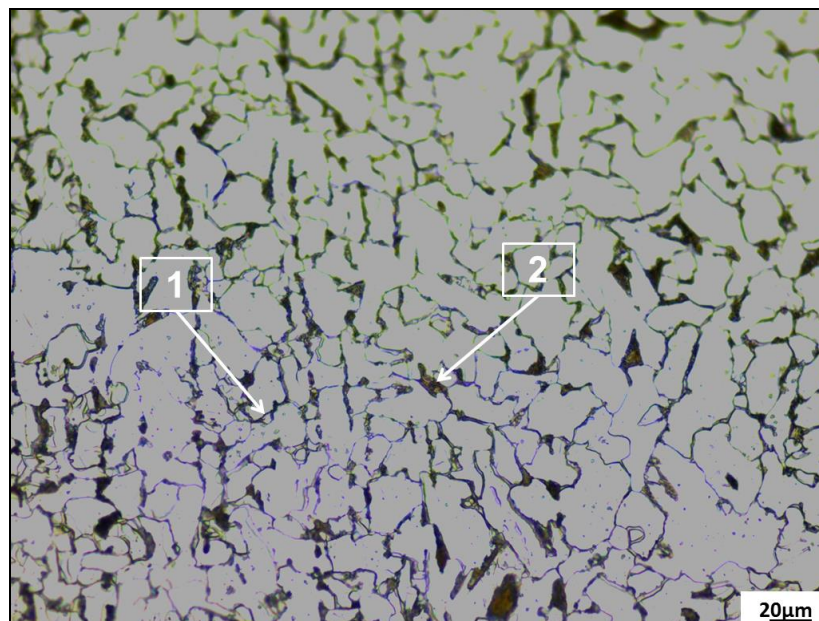


Figura 51 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C (amostra A600Ar) e resfriado ao ar calmo.

Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 500x, ataque de NITAL 2%.

Fonte: Autor.

A amostra A850Ar (Figura 52) foi aquecida a 850°C e resfriada ao ar calmo para simular o processo de arqueamento quando realizado sem controle da temperatura. Neste caso, foi revelado na micrografia um maior tamanho de grão em relação às amostras em estado original (AOr) e aquecido a 600°C (A600Ar). Nota-se diferentes morfologias da fase ferrítica, como alotriomórfica (Figura 52.2), idiomórfica, placas intergranulares de Widmanstätten (Figura 52.1). Perlita fina também pode ser observada (Figura 52.3).

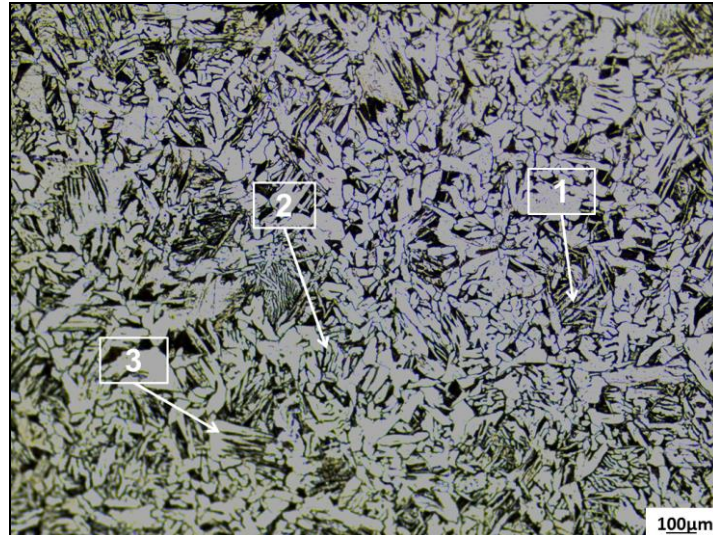


Figura 52 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C (amostra A850Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).  
Região central do corpo de prova, microscópio óptico, aumento de 100x, ataque de NITAL 2%.  
Fonte: Autor.

A Figura 53 revela as fases descritas anteriormente, porém com um aumento de 500x, onde fica evidenciado alguns precipitados de ferro, cementita e cobre dissolvido nos grãos de perlita.

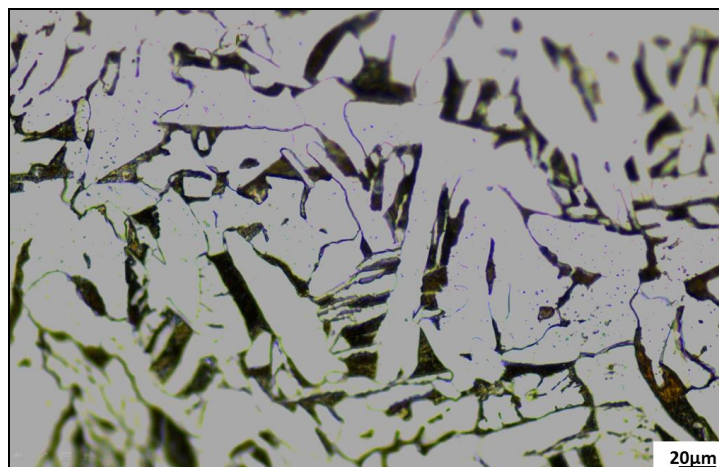


Figura 53 - Micrografia revelando a microestrutura do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C (amostra A850Ar) e resfriado ao ar calmo (500x).  
Região central do corpo de prova, microscópio óptico, aumento de 500x, ataque de NITAL 2%. Fonte: Autor.

### 5.2.2 Micrografias do Material DIN EN 10149 S700MC

A micrografia da Figura 54 apresenta a amostra BOr em seu estado virgem, ou de fornecimento. Trata-se das amostras do material ARBL S700MC em seu estado original. Para aumentar sua resistência mecânica, além do processo diferenciado no momento da laminação (resfriamento controlado pós-laminação), possui também os elementos de liga *V*, *Nb* e *Ti* em sua composição. É evidenciada na figura abaixo a presença de ferrita  $\alpha$  (Figura 54.1) e ferrita idiomórfica (Figura 54.2) na microestrutura original do material. Observam-se ainda grãos encruados não recristalizados na direção da laminação (Figura 54.3), com tamanho de grão ASTM 12. Nos contornos de grão ferríticos formados é comum a visualização de precipitados de *V*, *Nb* e *Ti*. Trata-se de um dos mecanismos para aumentar sua resistência: endurecimento por precipitação de carbonetos de vanádio, nióbio e titânio (GORNI, 2008; SILVA, 2010).

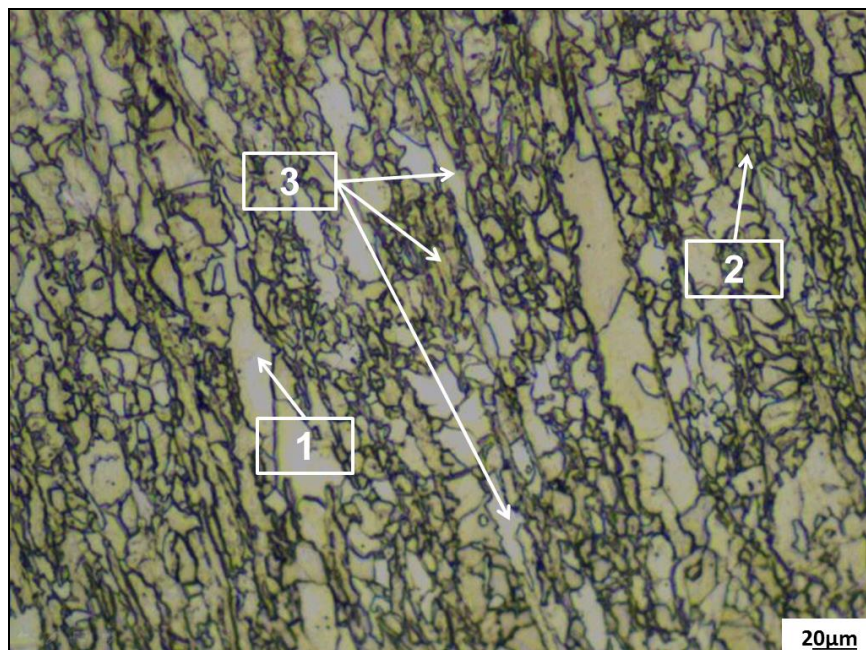


Figura 54 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC em estado virgem (amostra BOr).

Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 500x, ataque de NITAL 2%.  
Fonte: Autor.

A amostra B600Ar foi aquecida a 600°C e resfriado ao ar calmo. Figura 55 mostra a micrografia deste corpo de prova. Observa-se ferrita alinhada de menor tamanho de grão em função da divisão do grão que ocorre na primeira etapa de recozimento para recristalização, que foi parcial. Observa-se ainda perlita alinhada na direção de laminação e manchas que possivelmente são óxido de alumínio (Figura 55.1). Para este material o TG foi aumentando

conforme o tratamento térmico utilizado, conforme já apresentado em outras pesquisas (SOUZA, 1999).

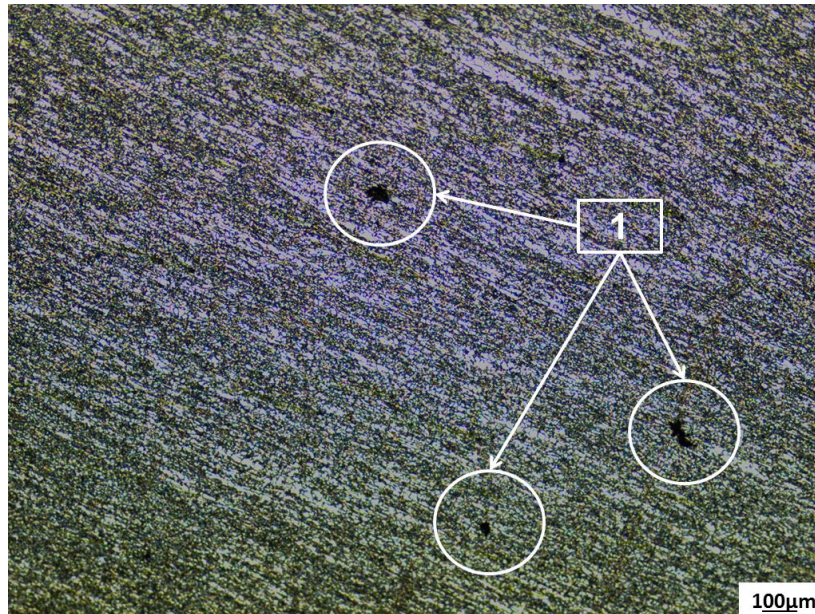


Figura 55 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600°C e resfriado ao ar calmo (amostra B600Ar).

Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 100x, ataque de NITAL 2%.

Fonte: Autor.

A amostra B910Ar foi submetida a um aquecimento conforme ciclo térmico do processo de arqueamento com temperatura próxima aos 910°C e resfriada ao ar calmo. Na Figura 56.1 são evidenciadas as placas intergranulares de Widmanstätten.

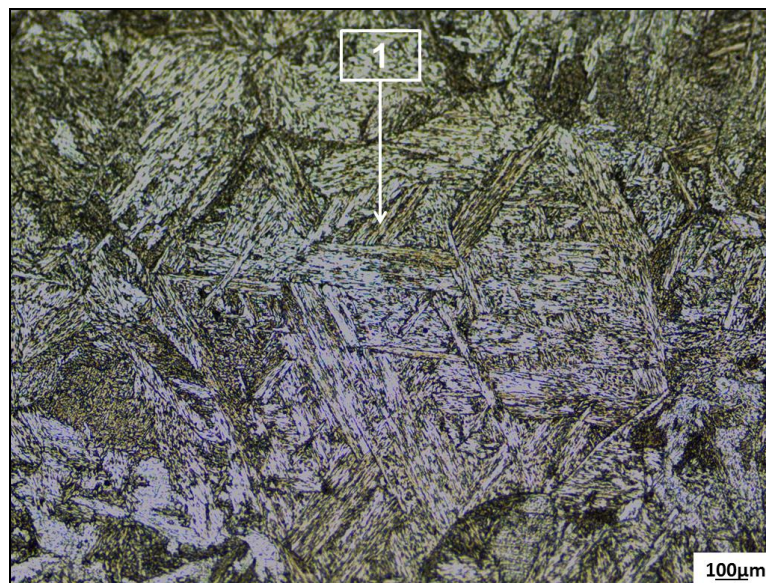


Figura 56 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C (amostra B910Ar) e resfriado ao ar calmo (100x).

Região central do corpo de prova, microscópio ótico, aumento de 100x, ataque de NITAL 2%. Fonte: Autor.



Observa-se na Figura 56 ferrita alotriomórfica (Figura 56.5) e idiomórfica (Figura 56.3). São evidenciados ainda os precipitados, que apesar da difícil identificação, podem ser de *Nb* (Figura 56.2) como dos outros elementos de liga, como *V* e *Ti* (Figura 56.1), conforme trabalhos já realizados com esse material (COSTA, 2011; JÚNIOR, 2013). A Figura 56.4 mostra um nitreto com possível óxido de alumínio nucleado no centro. Eles assumem uma aparência geométrica irregular e aparecem tanto no interior como no contorno de grão.

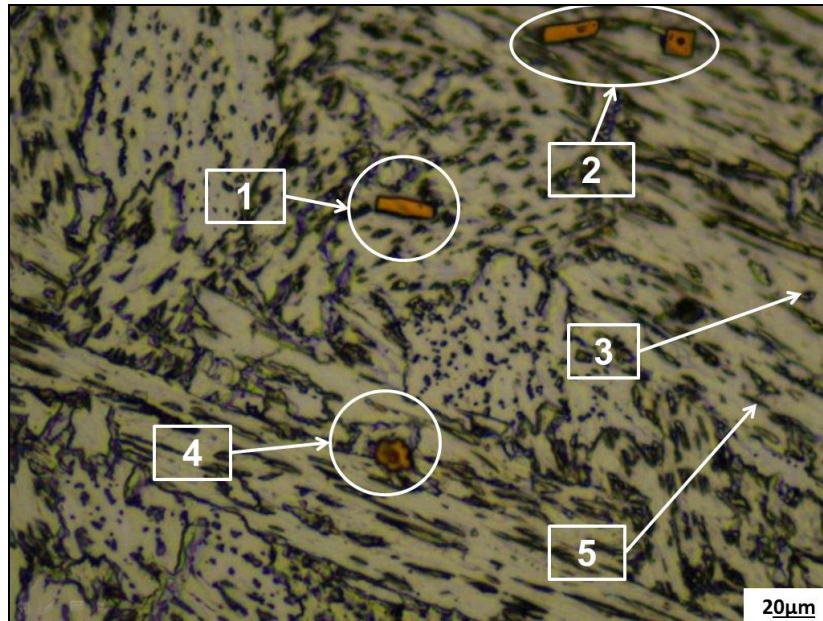


Figura 57 - Micrografia revelando a microestrutura do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C (amostra B910Ar) e resfriado ao ar calmo (500x).

Região central do corpo de prova, microscópio óptico, aumento de 500x, ataque de NITAL 2%.

Fonte: Autor.

## 5.4 Resultados da Microdureza Vickers (HV) nos Corpos de Prova

### 5.4.1 Microdureza Vickers do Material ASTM A570 GR36-C

Os resultados de microdureza Vickers (HV) do material ASTM A570 GR36-C são apresentados nos gráficos abaixo. Estão divididos em função do tipo de ciclo térmico ao qual foram submetidos, conforme Tabela 13. Foram realizadas cinco medidas em cada região do corpo de prova, sendo que o mesmo se divide em área central (A'), de interface (Z\_INT) e material sem efeitos do calor (ZN).

A dureza do material ASTM A570 GR36-C não é citada em norma. No estado de recebimento e para a espessura usada um valor de referência (média segundo relatórios de

inspeção do material) é de 147 HV (RANDON S.A., 2015). É possível verificar que os valores de dureza Vickers (em HV5) do aço plano ASTM A570 GR36-C variam bastante de uma amostra para outra, pois foram retirados de diferentes regiões de uma chapa desbobinada. Em função desta disparidade de valores, neste trabalho todos os gráficos estão acompanhados de uma linha de referência indicando o valor médio de microdureza em estado de fabricação para cada amostragem.

No caso do material ASTM A570 GR36-C sendo aquecido a uma temperatura de 600°C e pelo tempo determinado pelo ciclo térmico 1 (item 4.3.1 ou APÊNDICE A), a variação dos valores de microdureza teve tendências de acordo com a região do corpo de prova. Na ZN, os valores variaram de 7,14 %, em relação a média (linha vermelha). Na Z\_INT a queda no valor da microdureza chega a representar -24,45 % em comparação com o valor médio. A região A' (região de aquecimento uniforme) apresentou uma queda no valor de microdureza de -18,67 % (Figura 58).

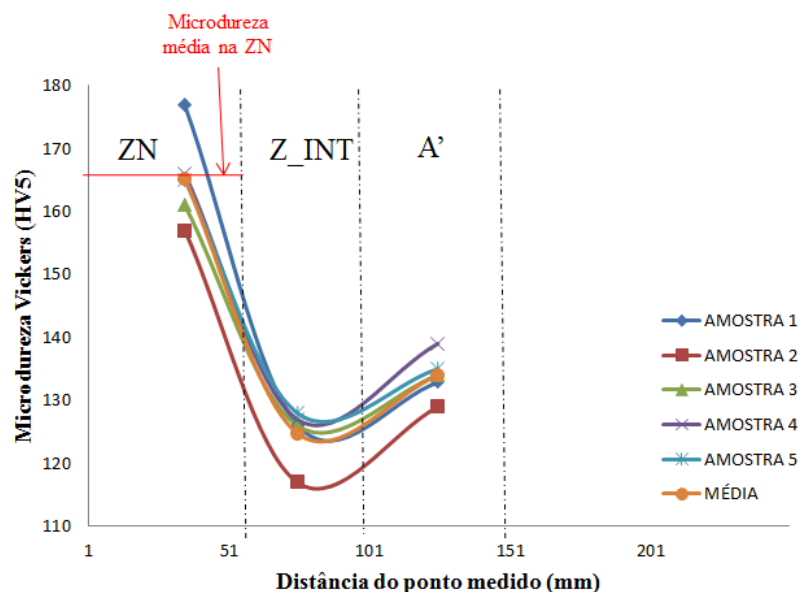


Figura 58 - Microdureza HV em três diferentes regiões do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 600°C e resfriado ao ar calmo.

Cinco pontos em cada região do corpo de prova (conforme item 4.3.1).

Fonte: Autor.

Com a aplicação do ciclo térmico 2 (item 4.3.2), os valores seguiram a tendência do gráfico da Figura 58. A variação na Z\_INT teve como média uma redução do valor da microdureza de -17,85 % enquanto que na região A' a queda média da microdureza ficou em -16,78 %, muito próximo da região de interface (Figura 59). Aqui já é notável a tendência de redução da variável dureza em função da temperatura de aquecimento, uma vez que isso causa

o aumento do tamanho de grão do material e uma não homogeneidade de fases na região de interface.

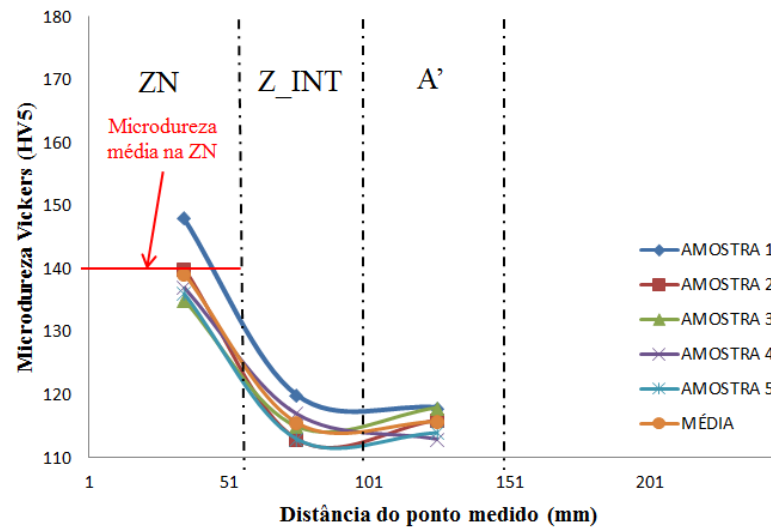


Figura 59 - Microdureza HV em três diferentes regiões do material ASTM A570 GR36-C aquecido a 850°C e resfriado ao ar calmo.

Cinco pontos em cada região do corpo de prova (conforme item 4.3.2).

Fonte: Autor.

Aplicando a metodologia de análise de variância (ANOVA) sobre a microdureza medida nas três regiões medidas e para o ciclo térmico 1, é possível comprovar a hipótese de diferenciação entre médias ( $H_1$ ). Para verificar quais as médias estão se diferenciando, aplicou-se o teste de TUKEY. As médias da microdureza para o ciclo térmico 1 apontam dispersão em relação as médias das outras duas regiões. Logo, fica evidente o efeito provocado pelo aquecimento do processo térmico sobre o material. Para o ciclo térmico 2 notou-se que para as regiões de interface (Z\_INT) e de aquecimento (A') as médias não apresentaram diferença significativa. Em relação a zona neutra (ZN) as duas amostras foram rejeitadas em relação a hipótese de igualdade entre a média dos níveis. Foi considerado um nível de significância no teste de TUKEY de 5%. As análises de TUKEY também verificaram os valores do resíduo. Para maiores detalhes deste teste, verificar o APÊNDICE F.

Discussão geral dos resultados de microdureza Vickers para o material ASTM A570 GR36-C (valores da curva média em relação ao valor de base):

- Para a microdureza (escala HV5) conforme aquecimento de norma (item 4.3.1) houve um decaimento de 17,85 % na Z\_INT e 16,78 % na região A';
- Para o caso de uma condição fora de norma (item 4.3.2), a microdureza Vickers decaiu em 24,45 % na Z\_INT e 18,67 % na região A'.

#### 5.4.2 Microdureza Vickers do Material DIN 10149 EN S700MC

Para o caso do material DIN EN 10149 S700MC a dureza (informada pelo fornecedor para uma chapa de espessura de 4,75mm) é de 212 HV. Verificou-se que nos corpos de prova deste material a microdureza ficou bem abaixo do especificado pelo fornecedor. Para comparação entre as diversas regiões e os diferentes ciclos térmicos o valor de base será sempre a microdureza média das amostras (média do valor de microdureza medido nos corpos de prova em estado original).

Os perfis de microdureza deste material tenderam para níveis inferiores como nos casos anteriores, porém, em uma maior porcentagem, mesmo com aquecimento dentro dos parâmetros definidos de processo (600°C, conforme ciclo térmico descrito em 4.3.1). Isso indica uma queda acentuada nas propriedades mecânicas do material na região de aquecimento (principalmente a  $\sigma_e$ ), como comprovado com os ensaios de tração (item 5.1). Na Figura 60 é possível verificar que na região da Z\_INT a queda na microdureza foi de -5,29 % em relação a microdureza média na região da ZN.

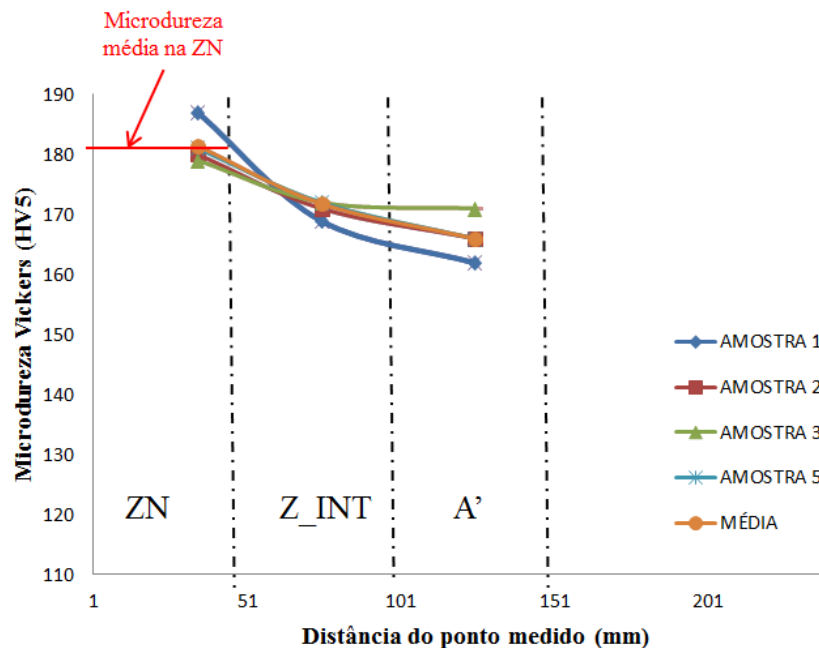


Figura 60 - Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600° e resfriado ao ar calmo. Cinco pontos em cada região do corpo de prova (conforme item 4.3.1).

Fonte: Autor.

Quando aplicado o processo conforme APÊNDICE B sobre o material de ARBL, a diminuição no valor da microdureza na região da Z\_INT chega a 31,46 % (Figura 61). Essa queda representa um ponto de atenção em relação ao uso de processos a quente sobre

materiais de alta resistência mecânica. O crescimento de grão é o maior responsável pela queda nos valores de microdureza, assim como as precipitações de fases envolvidas, principalmente na região de transição. Se considerar esse efeito no processo de arqueamento e alinhamento propriamente dito (na viga) existe uma probabilidade de diminuição nas propriedades mecânicas nessas áreas. Diversas relações podem ser feitas entre a dureza do material e seu respectivo limite de ruptura, assim como correlacionar a dureza com o limite de fadiga (SILVA, 2010).

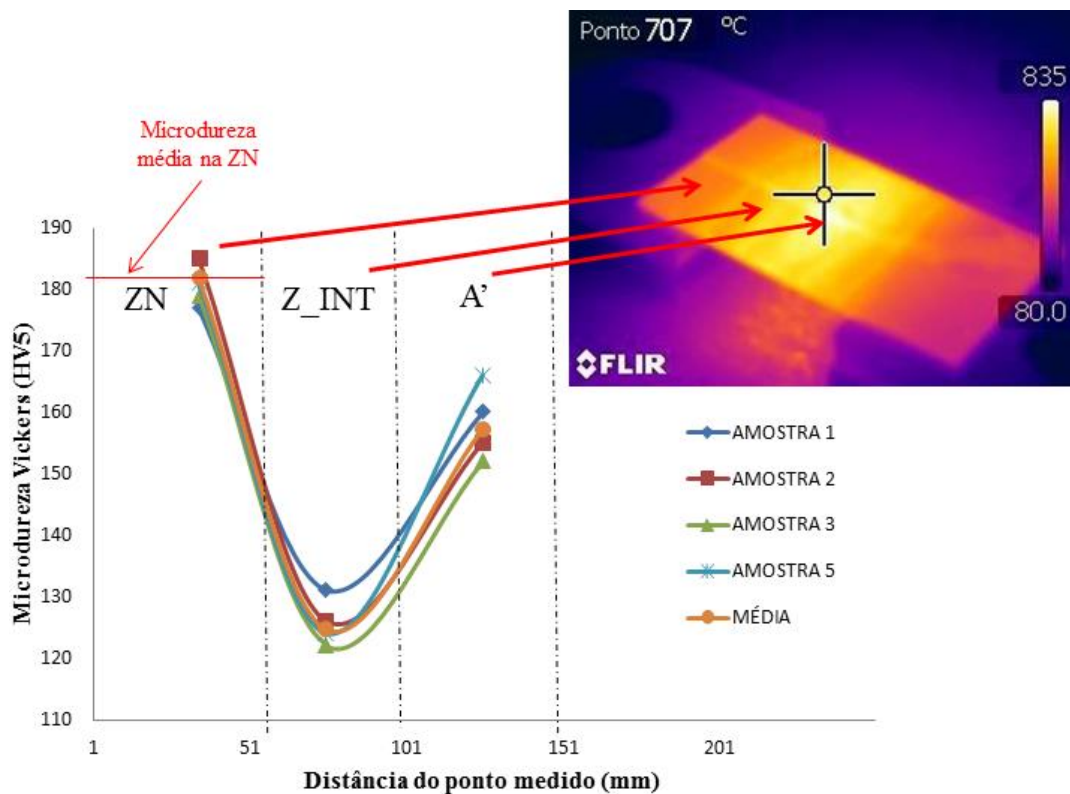


Figura 61 - Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C e resfriado ao ar calmo. Cinco pontos em cada região do corpo de prova (conforme item 4.3.2).

Fonte: Autor.

É interessante notar como a região da Z\_INT é a mais afetada quando submetida a temperaturas acima da temperatura de recristalização. Como o aquecimento é pontual e não homogêneo em todo o componente, a região ZN apresenta uma resistência a expansão térmica do material. Ou ainda: poderia ser interpretado como uma fronteira infinita, pois o volume aquecido para arqueamento ou alinhamento é muito menor do que o volume restante da estrutura. Essa resistência a deformação do material e a dissipação térmica acabam por alterar a microestrutura do material, afetando suas propriedades mecânicas, como a microdureza e o limite de escoamento. Novamente na Z\_INT não há uma homogeneidade de fases.

No teste de TUKEY para as amostras de microdureza do material ARBL houve rejeição entre todos os níveis de medição. Ou seja, as médias dos níveis se diferenciaram entre si em todas as regiões do CP. Novamente o material teve efeitos em função do processo de aquecimento. Resultados detalhados podem ser vistos no APÊNDICE F.

Discussão geral dos resultados de microdureza Vickers para o material DIN EN 10149 S700MC:

- Para o caso da microdureza Vickers no aço ARBL (com ciclo térmico 1) houve uma queda de 5,29 % na Z\_INT e 8,84 % na região A’;
- Os valores da microdureza Vickers (para o ciclo térmico 2) caíram em 31,46 % na Z\_INT e 13,53 % na região A’. A queda da dureza na região da Z\_INT foi muito maior que na região da linha de aquecimento A’. Isso se deve principalmente a expansão térmica da região A’, que causa uma força muito grande apontando para a região de transição. A região neutra ZN funciona como uma fronteira (barreira) a essa expansão, causando um grande número de precipitados na Z\_INT;

## 5.5 Resultados Obtidos com Ensaio de Fadiga: Curvas S-N

A Figura 62 mostra a distribuição de tensões ao longo do comprimento (posição  $d$ ) de uma viga de um SR CT em condição de aplicação estática, onde é importante verificar os maiores valores de tensão e sua localização, pois é próximo a essa região que é dado o arqueamento. O gráfico foi construído com dados de cálculo analítico (linha azul), através da tensão de flexão  $\sigma_f$ , e pelo Método dos Elementos Finitos (linha vermelha), pela máxima tensão principal  $\sigma_I$  (pelo componente  $x$ ). Os dois métodos apresentaram a mesma tendência de distribuição de tensões (MILESI, 2010). Esses valores de tensão também foram medidos experimentalmente em campo em condições dinâmicas do produto e posteriormente o modelo numérico foi calibrado. Ou seja, são conhecidos todos os valores de tensão nos pontos críticos do produto. Com isso, é possível calcular a vida em fadiga da região que foi aquecida na viga através do ‘Método da Vida sob Tensão. Esta pesquisa não contempla este cálculo, mas uma vez conhecidas as curvas S-N dos materiais, todos os dados necessários estarão elencados.

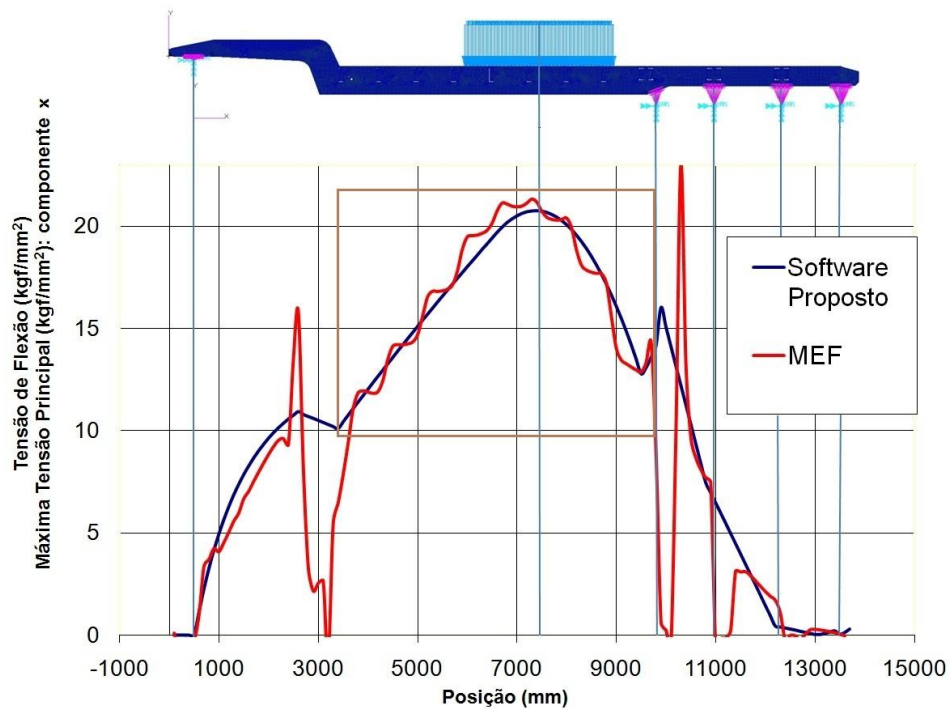


Figura 62 - Gráfico de comparação entre tensão de flexão e máxima tensão principal de uma viga.  
Fonte: Milesi, 2010.

As análises levam em consideração o ‘método da vida sob tensão’ (MISCHKE, 1987). O número de ciclos considerado aqui para vida infinita do componente é de  $1 \times 10^6$  ciclos para fadiga de alto ciclo.

### 5.5.1 Curvas S-N para o material ASTM A570 GR36-C

Considerando a curva S-N totalmente teórica do material ASTM A570 GR36-C, sem a influência dos fatores modificadores, o valor de  $S_f$  pode ser estimado através da relação  $0,504 \cdot S_{ut}$ , que neste caso é igual a  $S_f = 226,8$  MPa. Ao considerar os fatores modificadores do limite de resistência (metodologia descrita por SHIGLEY, 2008), conforme Tabela 16, o ângulo da curva S-N do material (em um gráfico com escala logarítmica em ambos os eixos) decresce gradativamente de acordo com os valores usados. A confiabilidade calculada para este trabalho foi de 95 %. Existem outros métodos que levam em conta mais fatores modificadores do que aqueles usados aqui (FILHO, 2011). Porém, a diferença entre os métodos diverge em pouco no resultado final. Além destes fatores, para o cálculo de durabilidade do componente, também poderia ser considerado o fator de solda, conhecido como  $K_x$ , que é estabelecido de acordo com o tipo de junta soldada, o processo de soldagem empregado e sua qualidade de execução. Trata-se de um coeficiente que deve ser estabelecido

conforme norma (exemplos: NBR 8800; Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue) e se caracteriza por ser dependente da qualidade da solda executada. Como neste trabalho as juntas soldadas não implicam na região mais afetada, esse fator será desconsiderado.

Tabela 16 - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga considerados para o material ASTM A570 GR36-C.

Fator Modificador	Descrição	Considerações	Valor [adim]
$k_a$	Fator de superfície	Material com acabamento superficial como laminado a quente	0,5288
$k_b$	Fator de tamanho	Considerando uma forma estrutural comum não rotativa (viga-I)	0,9341
$k_c$	Fator de carregamento	Flexão	1,0
$k_d$	Fator de temperatura	Temperatura de 25°C	1,01
$k_e$	Fator de confiabilidade	95%	0,8684
$k_f$	Fator de efeitos diversos	Não considerado	1,0

Multiplicação total dos fatores de modificação  $K_T = 0,407$

Fonte: SHIGLEY, 2008.

Para uma curva S-N teórica considerando os fatores modificadores de resistência, o valor da multiplicação dos fatores é igual a  $K_T = 0,407$ . Esse valor multiplicado pelo  $S'_f$  determina o limite de fadiga  $S_f$  para  $1 \times 10^6$  ciclos. A curva em estado original, as curvas teóricas e reais do material podem ser visualizadas na Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66. Para melhor visualização da flexão da curva, todos os gráficos estão traçados em escala logarítmica em ambos os eixos. É possível notar variação do ângulo da curva (entre todas as curvas traçadas) em função das interferências dos fatores modificadores.



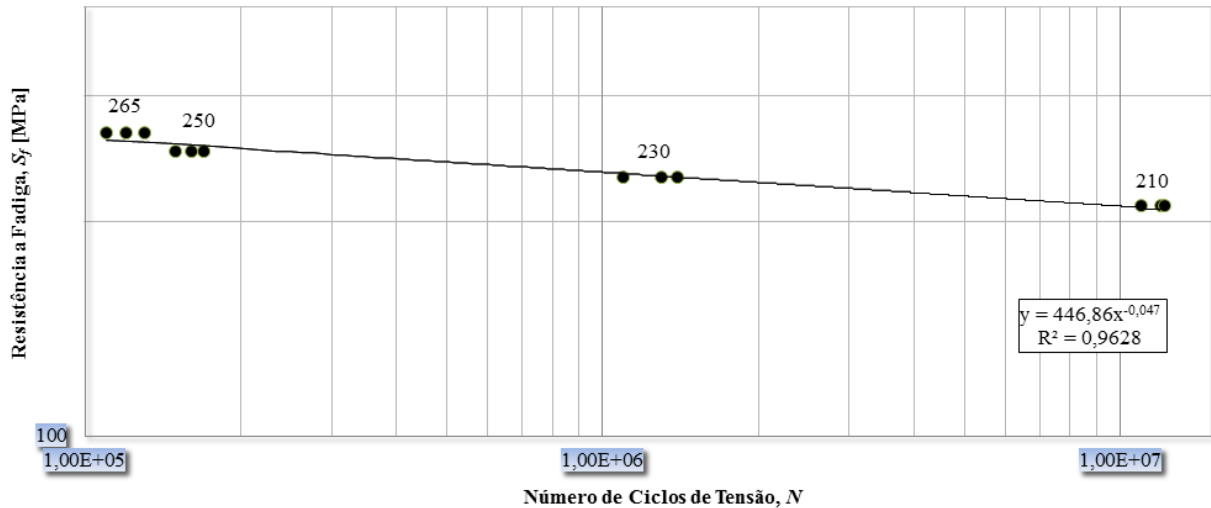


Figura 63 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C em estado de recebimento (confiabilidade de 95%).  
Escala log-log.  
Fonte: USIMINAS, 2015.

A Figura 63 mostra a curva S-N real do material ASTM A570 GR36-C conforme recebido do fornecedor. O limite de resistência a fadiga  $S_f$  para  $1 \times 10^6$  ciclos é igual a 230 MPa. Esse valor fica muito próximo do limite de resistência a fadiga da Figura 64, no qual os pontos foram calculados de acordo com a relação de Mischke, que leva em conta a resistência à tração mínima  $S_{ut}$  do material. A diferença percentual entre o valor real e teórico para a condição de recebimento foi de aproximadamente 8 %. A curva S-N da Figura 64 não considera nenhum fator de correção.

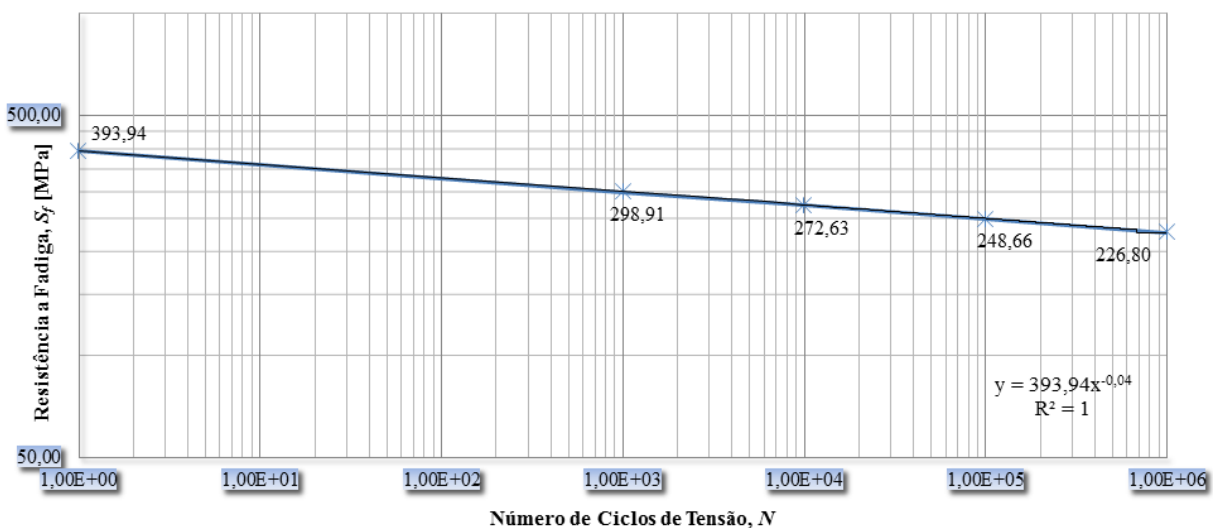


Figura 64 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C teórica (sem correção).  
Escala log-log.  
Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 65 considera os fatores de correção ( $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$ ,  $k_d$ ,  $k_e$  e  $k_f$ ) para convergir o limite de resistência a fadiga  $S_f$  a um resultado mais próximo da realidade da rota de processo analisada. Nota-se que os resultados da curva S-N corrigida e a curva real do material após ciclo térmico 1, conforme 4.3.1, apresentam valores aproximados (Figura 66).

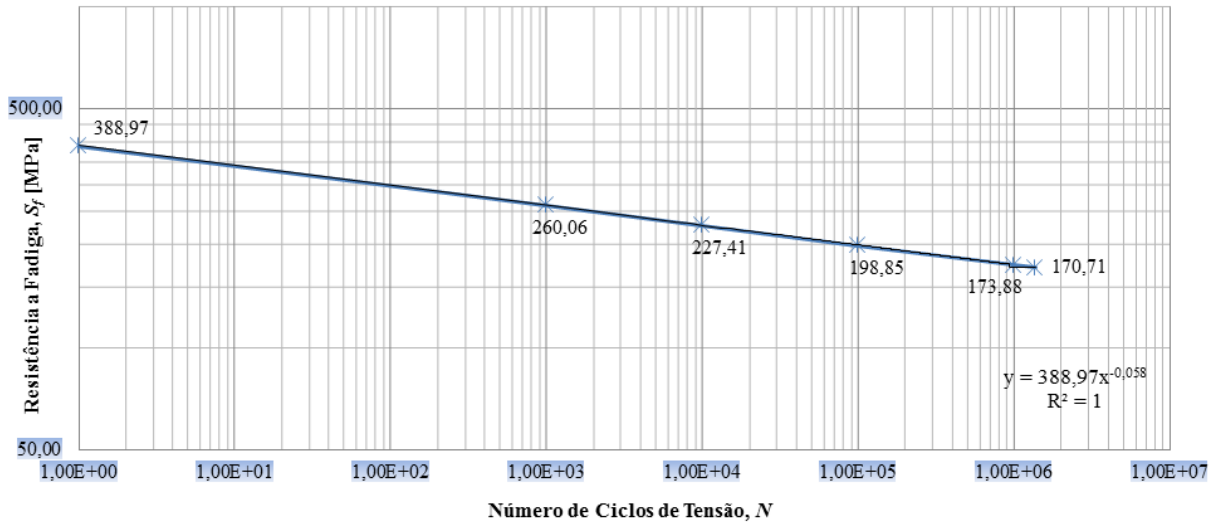


Figura 65 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C teórica com correção dos fatores modificadores (confiabilidade de 95%).

Escala log-log.

Fonte: Autor.

Em termos de uma análise prática contra falhas por fadiga, é interessante a aproximação das curvas da Figura 65 e Figura 66, pois isso significa que para o material ASTM A570 GR36-C podem-se utilizar os fatores de correção para estimar o ângulo da linha de tendência aproximando os resultados teórico e prático. O coeficiente de determinação  $R^2$  da reta correspondente à linha de tendência (potência) para a curva S-N da Figura 66 é de 0,8826, o que corresponde a 88,26 % de melhor ajuste da amostra.

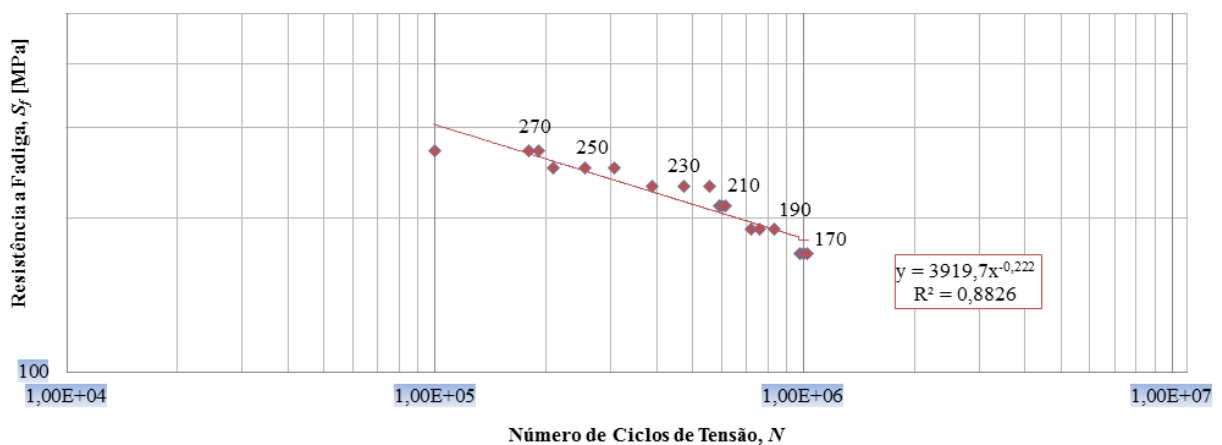


Figura 66 - Curva S-N do material ASTM A570 GR36-C com aquecimento térmico fora de norma, conforme item 4.3.2. (confiabilidade de 95%).

Escala log-log. Fonte: USIMINAS, 2015.

Baseado no valor de  $S_f$  apresentado na Figura 66 pode-se dizer que:

- A curva de Wöhler para este material na pior condição de tratamento térmico (item 4.3.2) teve o valor do limite de resistência a fadiga  $S_f$  reduzido em 26 % quando comparado ao mesmo material em estado original.

Correlações podem ser feitas entre o percentual de queda na dureza e da tensão de escoamento  $\sigma_e$  ou então o percentual de queda na microdureza e a queda no limite de resistência a fadiga  $S_e$ . A Figura 67.a e b demonstram essas correlações em dois gráficos. Percebe-se que para o caso da relação entre o limite de resistência a fadiga  $S_f$  e a microdureza Vickers do material, o coeficiente de determinação  $R^2$  apresenta valores próximos a 0,9. Isso significa que uma assertividade de 90% na relação entre as variáveis. Na prática, a medição da microdureza *in loco* na linha de produção pode ser usado para estimar os valores de  $S_f$  sem a necessidade de traçar as curvas S-N.

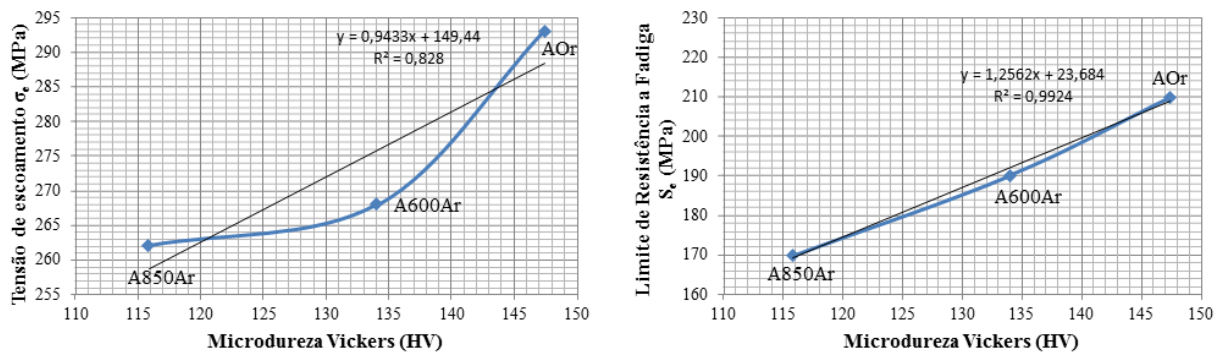


Figura 67 - (a) Correlações entre microdureza HV e tensão de escoamento  $\sigma_e$ , (b) e tensão de escoamento e limite de resistência a fadiga  $S_f$  para o material ASTM A570 GR36-C.

Fonte: Autor.

Um resumo dos principais resultados encontrados nos ensaios mecânicos realizados para o material ASTM A570 GR36-C pode ser visualizado num gráfico do tipo ‘radar’ conforme APÊNDICE D.

### 5.5.2 Curvas S-N para o material DIN EN 10149 S700MC

O procedimento usado para o material S700MC foi análogo ao ASTM A570. Primeiramente foram traçadas teoricamente as curva de Wöhler e depois adicionado ao cálculo os fatores modificadores do limite de resistência a fadiga. O único ‘ $k$ ’ que se diferenciou do aço comum foi o fator de tamanho  $k_b$ <sup>1</sup>, em função da espessura dos corpos de prova, que neste caso é de 4,75 mm. A Tabela 17 mostra os fatores e seus respectivos valores,

<sup>1</sup> Em algumas referências bibliográficas os fatores modificadores são denotados com a letra C.

baseados em tabelas experimentais reproduzidas pela *Metals Engineering Design ASME Handbook*. A multiplicação total ( $K_T$ ) dos fatores modificadores ficou igual a 0,4332.

Tabela 17 - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga considerados para o material DIN EN 10149 S700MC.

Fator Modificador	Descrição	Considerações	Valor [adim]
$k_a$	Fator de superfície	Material com acabamento superficial como laminado a quente	0,5228
$k_b$	Fator de tamanho	Considerando uma forma estrutural comum não rotativa (viga-I)	0,9448
$k_c$	Fator de carregamento	Flexão	1,0
$k_d$	Fator de temperatura	Temperatura de 25°C	1,01
$k_e$	Fator de confiabilidade	95%	0,8684
$k_f$	Fator de efeitos diversos	Não considerado	1,0

Multiplicação total dos fatores de modificação  $K_T = 0,4332$

Fonte: SHIGLEY, 2008.

Na Figura 68 o valor de  $S_f$  foi de 310 MPa (para  $1 \times 10^6$  ciclos) na a curva S-N real do material S700MC conforme estado de recebimento da siderúrgica. Nota-se que nos carregamentos de 430 e 390 MPa os valores de ciclagem até ruptura foram iguais. O  $R^2$  da linha de tendência foi de 82,86 % de ajuste a amostra.

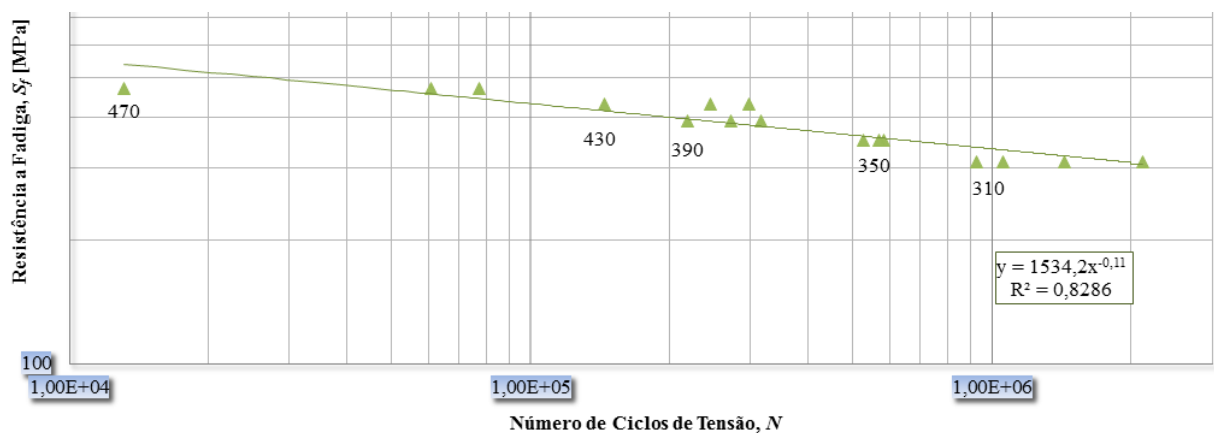


Figura 68 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC em estado de recebimento (confiabilidade de 95%). Escala log-log. Fonte: USIMINAS, 2015.

A curva teórica do material (Figura 69) apresenta um  $S_f$  igual a 378 MPa, sem nenhum fator de correção. Ao multiplicar os valores desta curva S-N pelo fator  $K_T$  da Tabela 17 o valor do limite de resistência a fadiga é reduzido para 265 MPa, conforme Figura 70. Essa queda no  $S_f$  representa em termos quantitativos uma redução de 30 %.

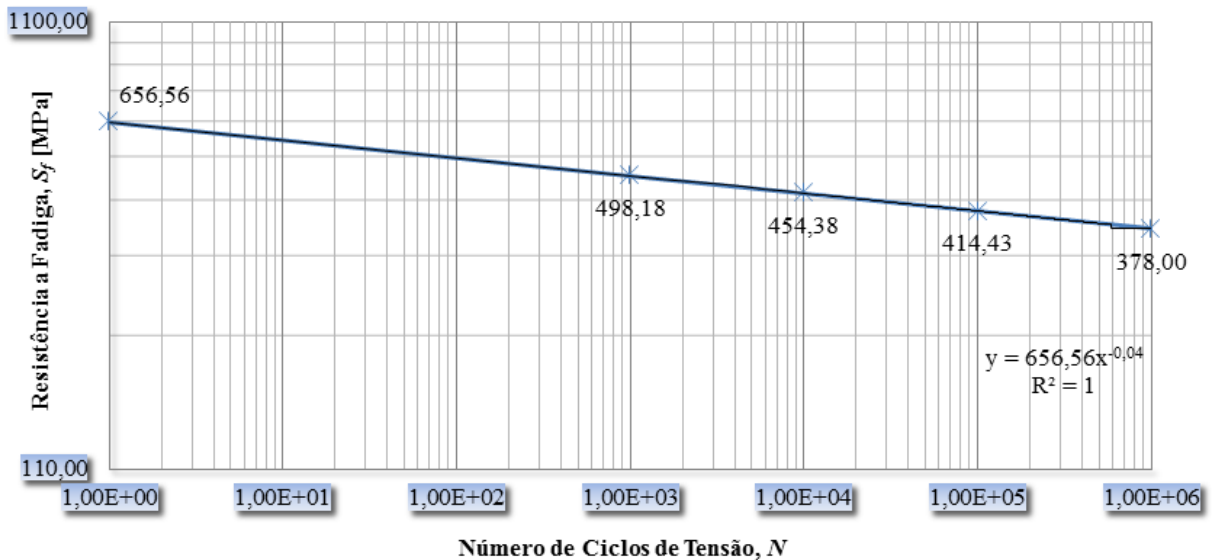


Figura 69 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC teórica (sem correção).

Escala log-log.

Fonte: Autor.

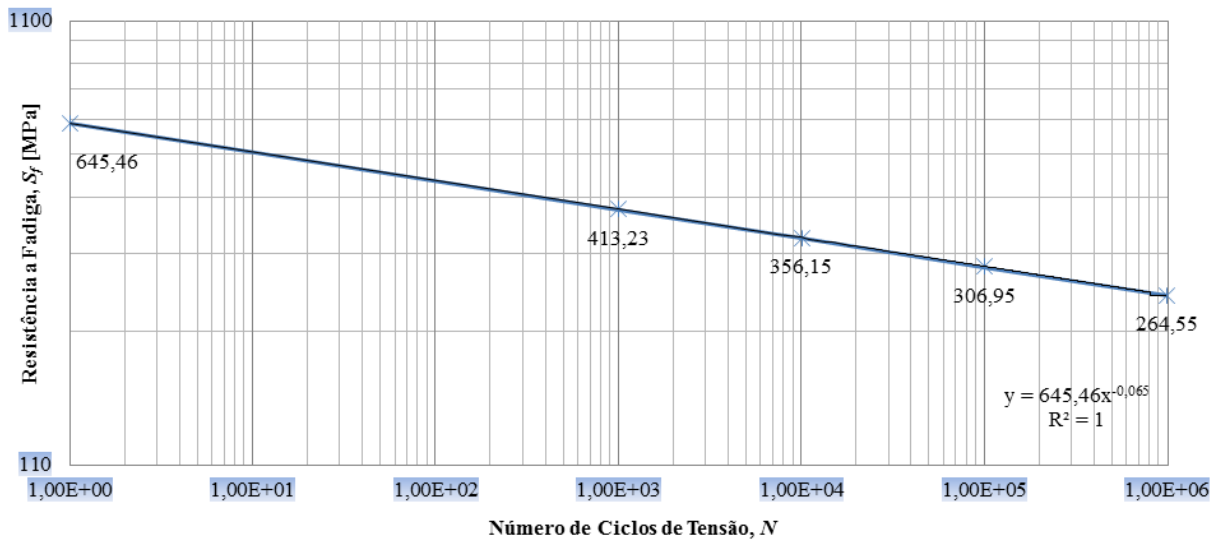


Figura 70 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC teórica com correção dos fatores modificadores (confiabilidade de 95%).

Escala log-log.

Fonte: Autor.

A curva real do material S700MC com mudança de fases na microestrutura devido ao aquecimento acima da temperatura de trabalho pode ser visualizada na Figura 71. Novamente para vida infinita ( $1 \times 10^6$  ciclos) o valor do  $S_f$  se aproxima do teórico corrigido. Essa

aproximação dos valores em ambos os métodos e para os dois materiais assegura uma solução para estimar a vida em fadiga pontual nesse tipo de componente. Importante ressaltar que o valor do fator  $k_e$  (fator de confiabilidade) foi de 95 %, o qual atribui valores mais baixos para o  $S_f$ , porém, com maior assertividade.

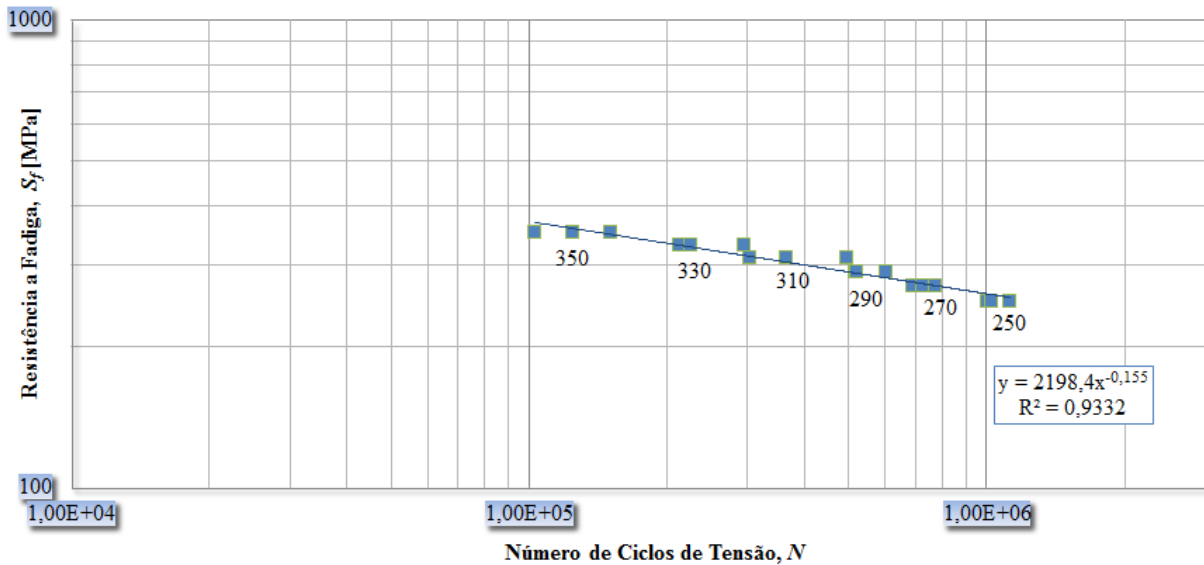


Figura 71 - Curva S-N do material DIN EN 10149 S700MC com ciclo térmico fora de norma, conforme o item 4.3.2. (confiabilidade de 95%).

Escala log-log.

Fonte: USIMINAS, 2015.

Ao submeter os corpos de prova dos aços estudados as mesmas condições da rota de processo atualmente utilizada para desempenho a quente das vigas dos produtos, nota-se que o valor limite de resistência a fadiga ( $S_e$ ) tende a valores muito inferiores aos esperados para a aplicação. As curvas de Wöhler (curvas S-N) mostram que na região de aquecimento, devido às alterações nas propriedades mecânicas, principalmente aumento do tamanho de grão e consequente alterações na dureza (RODRIGUES (B), 2012), o limite de resistência a fadiga dos materiais fica comprometido em relação aos valores esperados de projeto (valores base da literatura para o material em estado virgem).

Uma pequena discussão dos resultados de limite de fadiga para o material microligado:

- No estudo das curvas de Wöhler na condição do tratamento térmico 1 (item 4.3.2) o valor do limite de resistência a fadiga  $S_f$  teve uma redução em 19,35 % quando comparado ao mesmo material em estado de recebimento;
- As curvas S-N fornecidas por um fabricante do material demonstram o comportamento para diferentes situações do material S700MC (Figura 72), inclusive com corpos de prova soldados (solda longitudinal e transversal). Os limites de

resistência a fadiga fornecidos para  $1 \times 10^6$  ciclos são inferiores quando comparados com os limites encontrados nesta pesquisa, definindo o ponto crítico de projeto, que é na região de soldagem, e não de aquecimento da viga. Deve-se atentar ao ângulo das curvas que definem valores diferentes quando considerado um número menor de ciclos.

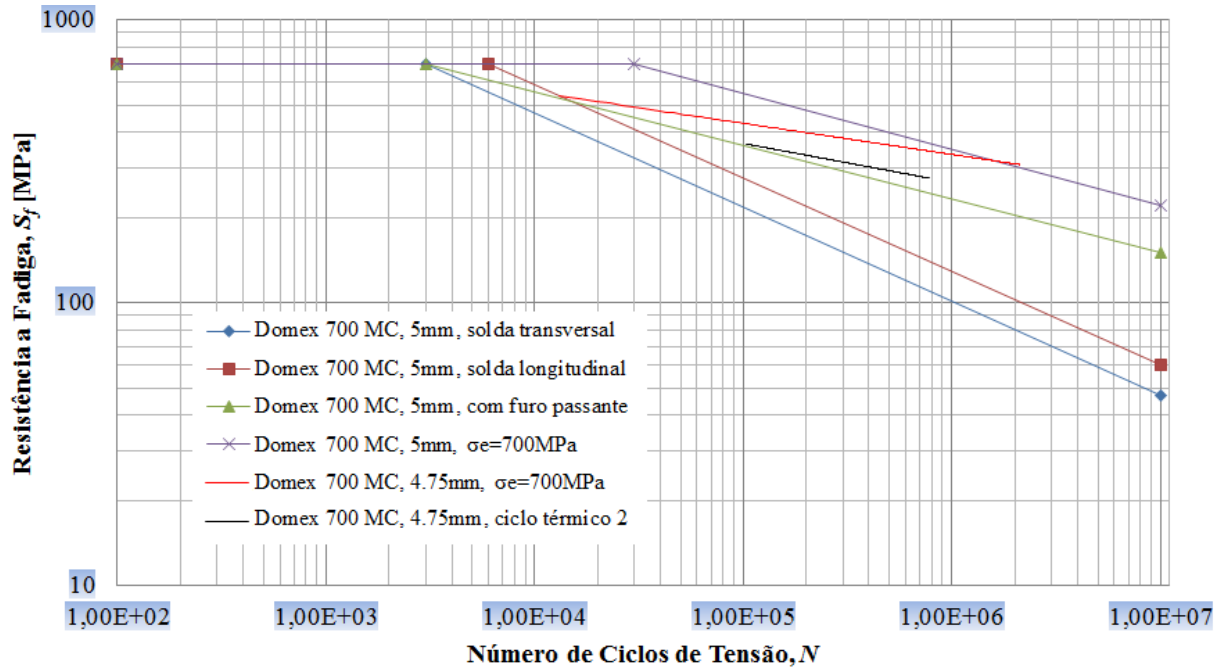


Figura 72 - Diferentes curvas S-N do material S700MC.  
Fonte: Adaptado de SSAB Tunplatt, 2012 / Randon S.A., 2015.

As correlações para o material microligado S700MC tem o valor de  $R^2$  sempre superiores a 0,94 (Figura 73.a e b). Novamente é possível realizar a inspeção relativa ao limite de resistência a fadiga  $S_f$  do material utilizado através da medição da microdureza Vickers.

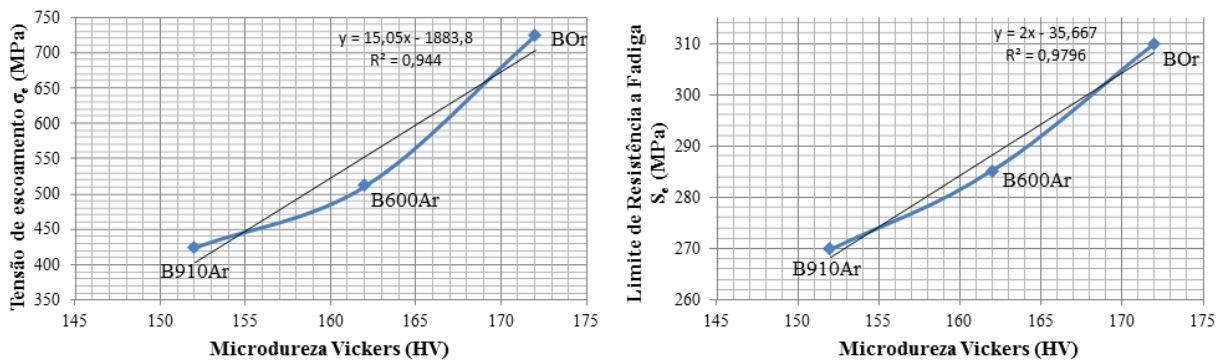


Figura 73 - (a) Correlações entre microdureza HV e tensão de escoamento  $\sigma_e$ , (b) e tensão de escoamento e limite de resistência a fadiga  $S_f$  para o material DIN EN 10149 S700MC.

Fonte: Autor.

Ressalta-se aqui a importância em termos de redução de custos na inspeção de matérias primas em aço carbono, pois a comprovação dos parâmetros de processos se torna mais rápida.

O gráfico do tipo 'radar' do APÊNDICE E compara, entre os diferentes ciclos térmicos, todos os resultados obtidos nos ensaios mecânicos para o material DIN EN 10149 S700MC.



## 6 CONCLUSÕES

Para o material ASTM A570 GR36-C os efeitos térmicos não foram deletérios a ponto de inviabilizar a sua aplicação na fabricação de produtos rodoviários pesados. Ou seja, dentro dos critérios de falha estabelecidos para o cálculo estrutural dos componentes (teoria da máxima energia de distorção de von Mises), o material atende as solicitações, pois o valor da  $\sigma_e$  usada nos cálculos da estrutura é o estabelecido por norma ( $\sigma_e = 250$  MPa). Deve-se atentar ao critério de falha por fadiga (método da vida sob tensão) devido aos valores do limite de resistência a fadiga do aço após o tratamento térmico com aquecimento acima da temperatura estabelecida por norma para arqueamento e alinhamento.

O material DIN EN 10149 S700MC é um aço fabricado pelo processo de laminação termomecânica e que tem em sua composição química elementos de transição como o V, Nb e Ti. Tais elementos, quando submetidos a temperaturas acima da zona crítica (como no processo realizado de maneira empírica) precipitam-se na matriz ferrítica, causando diversos tipos de fases deletérias ao material. O V é o maior responsável pelo endurecimento da liga, porém, dissolve-se na ferrita, facilitando o escorregamento entre grãos. Essa condição é justamente a simulação do processo da rota de produção pesquisada quando realizada sem controle dos parâmetros definidos (valores de temperatura *versus* tempo devem seguir o APÊNDICE A ou item 4.3.1 para danos menores). O processo para estes componentes deve desviar a rota de fabricação em questão e ter seu alinhamento realizado com processos a frio. Outra solução para o problema de aquecimento local neste aço seria o uso de dispositivos e/ou gabaritos para montagem com tolerâncias finas, evitando possíveis empenamentos e alinhamentos posteriores.

Para o caso de arqueamento de vigas fabricadas com o material DIN EN 10149 S700MC, é totalmente inviável o uso de processos a quente, uma vez que esse elemento é suscetível a falhas por fadiga. A região crítica de carregamento é sobreposta a região de aquecimento, amplificando as condições de falha por fadiga pelo método da vida sob tensão. Deve-se diferenciar arqueamento de vigas do tipo I com aplicação de linhas de aquecimento em chapas de aço, como na indústria naval, devido ao tipo de solicitação mecânica do componente.

O arqueamento direto no projeto (*design*) do produto é uma das possíveis soluções para evitar os processos a quente. Casos experimentais já foram realizados e os resultados em

relação a durabilidade do produto são bastante satisfatórios, ou seja, o componente não apresentou falha e o ciclo de vida do produto já atingiu o estimado em projeto.

O método de resfriamento após a realização do tratamento térmico local deve ser alterado para um processo com resfriamento acelerado, como por exemplo, com água. O método atual, denominado de RAC (resfriamento ao ar calmo) não produz precipitados de interesse, como a fase martensítica e, por consequência, diminui as propriedades mecânicas do material.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A possibilidade de dar continuidade e aprofundamento nos tópicos que foram explorados nesta pesquisa é bastante abrangente, e pode ser dividida em função de sua complexidade. Segue as sugestões de maior interesse:

- Medição e análise do perfil de tensões residuais na secção transversal das vigas I na região de aquecimento. Realizar medições pelo método do furo cego ou por difração de raios-X (DRX). A avaliação das tensões compressivas *versus* trativas poderia ser dividida em duas partes: para vigas que sofreram o processo de arqueamento e para vigas que sofreram o processo de alinhamento e/ou desempenho a quente;
- Considerar os efeitos analisados nesta pesquisa em cálculos de ‘otimização’ estrutural de vigas e também na escolha de novos processos de montagem através de um modelo numérico termo-estrutural (termo-elasto-plástico) – que considere possíveis efeitos do ciclo térmico – ou numérico estrutural (Teoria da Elasticidade);
- Avaliar metalurgicamente os materiais contidos nesta pesquisa com diferentes reagentes químicos para ataque metalográfico, revelando constituintes que não ficaram claros nas imagens apresentadas, principalmente para o aço ARBL. Sugestão de ataques: Pictral (4%), Beraha I e II, Metabissulfito de Potássio, Metabissulfito de Sódio e LePera;
- Aplicar o método de metalografia de campo (réplica metalográfica) em vigas fabricadas (modelo real) para comparação com resultados obtidos em laboratório. Avaliar modelos de vigas em escala para comparação com o modelo real. Avaliar também o uso de vigas laminadas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS, **User Documentation**, Abaqus Inc., Dassault Systèmes, 2014 Version 6.9.

ABNT NBR 6892:2002. **Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente**. 1ª Ed. Válida a partir de 29.12.2002. Rio de Janeiro – RJ. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002. 34p.

ABNT NBR 8800:2008. **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. 2ª Ed. Válida a partir de 25.09.2008. São Paulo – SP. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. 237p.

ABNT NBR 13284:1995. **Preparação de Corpos-de-Prova Para Análise Metalográfica – Procedimentos**. Válida a partir de 30.04.1995. Rio de Janeiro – RJ. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.

American National Standard – ANSI/ASTM A 570 – 79. **Standard Specification for Hot-Rolled Carbon Steel Sheet and Trip, Structural Quality**. 24 CFR 200, Subpart S. EUA. 1979. Pages 530-532.

Andreazza, Gabriel. **Efeito do Aquecimento e do Resfriamento nas Propriedades dos Aços ASTM A 570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC no Processo de Alinhamento a Quente**. Caxias do Sul – RS. UCS, 2012.

ANSI/AISC 360-05. **Specification for Structural Steel Buildings**. Fifth Printing: April 2010. Chicago, Illinois. American Institute of Steel Construction, 2005. 439p.

ASM Handbook. **Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys**. American Society for Metals, 2. ed. Material Park: p1009-1102, 1993.

ASTM E466-07. **Standard Practice for Conduction Force Controlled Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials**. 2007.

Besutti, Kelen. **Avaliação Comparativa de Propriedade Entre o Aço Sac 350 e os Aços de Alta Resistência Docol e Domex 700 W na Aplicação de Vagão Ferroviário**. Caxias do Sul – RS. UCS, 2009.

Buschinelli, Augusto J. A. Apostila de Aula, **Metalurgia Física da Soldagem**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2011.

Callister Jr., W. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**. 7ª Ed., Editora Guanabara, 2008.

Canto, E. **Minerais, Minérios e Metais**. São Paulo: Ed. Moderna, 1996.

Chiaverini, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7<sup>a</sup> Ed., São Paulo – SP: ABM, 2002.

Chiaverini, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1<sup>a</sup> Ed. São Paulo – SP: ABM, 2003.

Costa, Vagner Machado. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Juntas Dissimilares de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga**. Porto Alegre – RS. UFRGS, 2011.

Creo® **User Guide**, 2013 Version Wildfire 2.

Da Rosa, Edison. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e fadiga**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2002.

Deardo, A. J. **Microalloyed Strip Steels for the 21st Century**. Material Science Forum, vol. 284-286, 1998.

DIN 50133, **Testing of Metallic Materials** – Vickers Hardness Test, Hv 0.2 to Hv 100, 1998.

DIN EN 10149-1, **Hot-Rolled Products Made of High Yield Strength Steels for Cold Forming** – Delivery Conditions for Thermomechanically Rolled Steel (Foreign Standard), 2005.

Duarte, B. D. M. Dissertação de Mestrado, **Estudo de Um Aço Microligado Utilizado na Estampagem de Componentes-Automóvel**. Universidade de Porto – Portugal, 2013.

Filho, Avelino Alves. **Projeto Prático Contra a Fadiga: Parte 1**. NCE – Núcleo de Cálculos Especiais Ltda. São Paulo - SP, 2011. 132p.

Filho, Avelino Alves. **Projeto Prático Contra a Fadiga: Parte 2**. NCE – Núcleo de Cálculos Especiais Ltda. São Paulo - SP, 2011. 32p.

Gallego, J., Morales, E. V., Kestenback, Hans-Jürgen. **Estudo Quantitativo dos Mecanismos de Endurecimento em Aços Comerciais Microligados com Vanádio**. Revista Matéria, v. 10, n. 3, p381 – 391. 2005.

Gimenes, Luiz. **Introdução as Técnicas de Desempeno à Chama**. Revista NT Soldagem e Qualidade, 2003.

Gonçalves, F. J. F., Martins, M. **Introdução à Tecnologia dos Materiais**. Apostila didática (2001), 103p.

Gorni, A. A., Silveira, J. H. D., Reis, J. S. de S. **Aços Microligados na Fabricação de Tubos Soldados com Grande Diâmetro**. Publicado na revista Tubo & Companhia, 5:26, Set-Out 2009, p52-63.

Hammer, O., Harper, D. A. T., P. D. Ryan. **PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis**. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9p, 2001.

Hibbeler, R. C. **Resistência dos Materiais**. Revisão Técnica: Wilson Carlos da Silva Junior. 5ª Ed., São Paulo – SP: Ed. Pearson Prentice Hall, 2004. 674p.

Image Tool Version 3.0. **Department of Dental Diagnostic Science at The University of Texas Health Science Center (UTHSCSA)**, San Antonio, Texas. Disponível em: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>. Acesso em: 20 Nov. 2014.

Júnior, Ailton Ribeiro de Avelar. Dissertação de Mestrado, **Influência das Condições de Laminação a Quente nas Propriedades Mecânicas de um Aço ARBL da Classe 700 MPa de Limite de Escoamento**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2013.

Kansas Department of Transportation. **Structural Steel Construction Heat-Curved Rolled Beams and Welded Plate Girders**. Section 702. Special Provision to the Standard Specifications, State of Kansas, EUA. Edition of 1990. 04p.

Messler Jr, Robert W. **Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy**. John Wiley & Sons, Inc. 685p, May, 1999.

Milesi, Daniel A. Z. **Software Para o Cálculo do Ponto Crítico de Carregamento Para Vigas de Semirreboques Para Transporte de Cargas Indivisíveis**. Caxias do Sul – RS. UCS, 2010.

Mischke, Charles R. **Prediction of Stochastic Endurance Strength**. *Trans. of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, vol. 109, n.º 1, Jan 1987, p113-122.

Panorama Instituto ILOS. **Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil – A Percepção das Empresas Contratantes de Transporte**. 2ª Ed., São Paulo – SP, 2012.

Popov, Egor Paul. **Introdução a Mecânica dos Sólidos**. Tradução: Mauro O. C. Amorelli. Revisão Técnica: Arno Blass. 8ª Reimpressão. São Paulo – SP. Editora Blucher, 1978. 534p.

Rayes, M. El., C. Walz, G. Sepold. **The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry**. Supplement to *The Welding Journal* (Sponsored by the AWS – American Welding Society and WRC – Welding Research Council). May, 2004.

Resolução N.º 11/DNIT (publicada no D.O.U. em 25 de outubro de 2004 e retificada em 04/01/2005 e 16/06/2005). **Normas para Transporte de Cargas Indivisíveis e excedentes em Peso e/ou Dimensões e Para o Trânsito de Veículos Especiais em Rodovias Federais**. SP, 2004.

Resolução N.º 210/CONTRAN (13 de novembro de 2006). **Limites de Peso e Dimensões Para Veículos que Transitem por Vias Terrestres**. SP, 2006.

Rocha, Alexandre da S. **Engenharia de Superfícies: Difusão – Notas de Aula.** LDTM – UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 19 mar – 26 mai 2014. Porto Alegre – RS, 2014. 19p.

Rodrigues (A), Lucilene de Oliveira. Dissertação de Mestrado, **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem Com Arame Tubular.** Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2005.

Rodrigues (B), Saulo Machado. Dissertação de Mestrado, **Estudo do Comportamento em Fadiga de Juntas Soldadas de Aços Bifásicos de Alta Resistência Mecânica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2012.

Shigley, Joseph E., Mischke, Charles R., Budynas, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica.** Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 7ª Ed., Porto Alegre –RS : Bookman, 2005. 960p.

Silva, André Luiz V. da Costa e., Mei, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais.** Ed. Edgard Blücher Ltda, 3ª Ed., São Paulo – SP, 2010. 648p.

Site consultado: <http://brazillogistica.blogspot.com.br/2011/08/perfil-rodoviario-no-br-e-historico.html>. Acesso em 18.06.2014.

Site consultado: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx>. Acesso em 12.06.2014.

Site consultado: <http://www.cmrp.com/beam-bending>. Acesso em 14.06.2014.

Site consultado: <http://www.kalynsieber.com/files/8J50-MechanicalRemovableGooseneck-FeatureSheet.pdf>. Acesso em 14.06.2014

Souza, Regina Célia de., Balancin, Oscar. Os Efeitos da Precipitação de Nitretos de Vanádio no Crescimento de Grãos Austeníticos Durante o Reaquecimento de Um Aço Médio Carbono Microligado ao Vanádio. Cad. Pesq., v. 10, n. 1, p. 38-44, jan./jun. 1999.

SSAB Tunplatt. **Sheet Steel Joining Handbook.** Sweden. SSAB Tunplatt, 2004.

Teixeira, Ricardo Santos. Dissertação de Mestrado, **Metodologia de Análise de Fadiga em Componentes Estruturais de Aço Baseada na Mecânica da Fratura.** Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte – MG, 2004.

Timoshenko, S. P., Goodier, J. N. **Teoria da Elasticidade.** Ed. Guanabara Dois, 3ª Ed., 1980. 545p.

Usiminas. **Catálogo Geral de Produtos.** Impresso em fevereiro de 2013. Site consultado: <http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-catalogo-chapasgrossas-v16-baixa.pdf>. Acesso em 16.07.2014.

## APÊNDICE A – Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas na Condição de Temperatura Conforme Normas

As curvas abaixo representam o ciclo térmico utilizado nos processos de arqueamento e alinhamento de vigas em uma condição de aquecimento conforme as normas ANSI/AISC 360-05 e ABNT NBR 8800. Esse tratamento térmico é utilizado para os dois materiais analisados, ASTM A570 GR-36 e DIN EN 10149 S700MC, para arquear ou alinhar as vigas. Os pontos de medição são mostrados na Figura A.1. Não foram adicionadas linhas de tendência nas curvas térmicas dos APÊNDICES A e B.

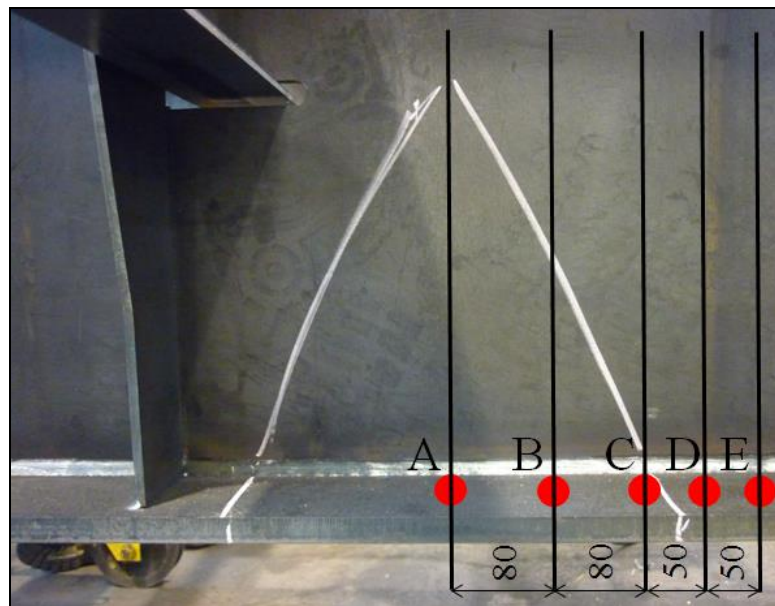


Figura A.1 – Região de aquecimento e os pontos de medição de temperatura.



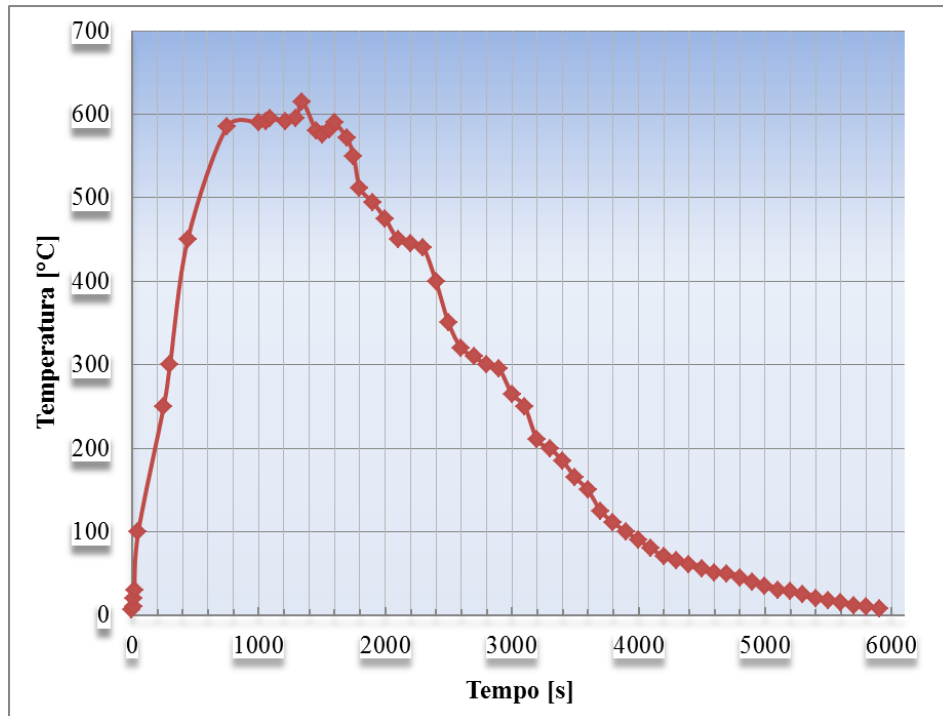


Figura A.2 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' realizado conforme normas.

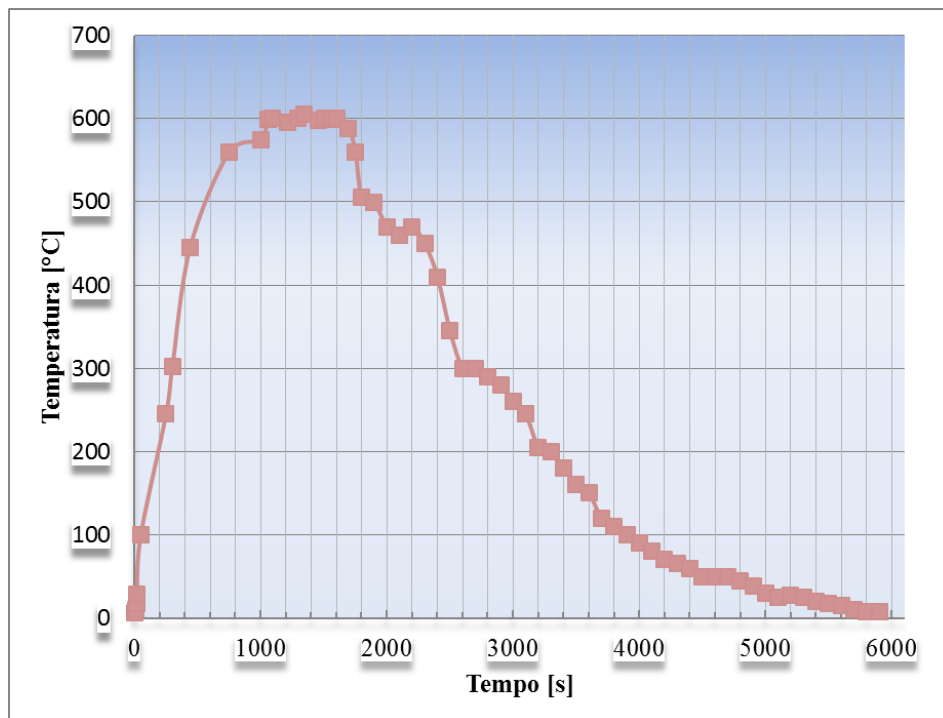


Figura A.3 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto B da Região A' realizado conforme normas.

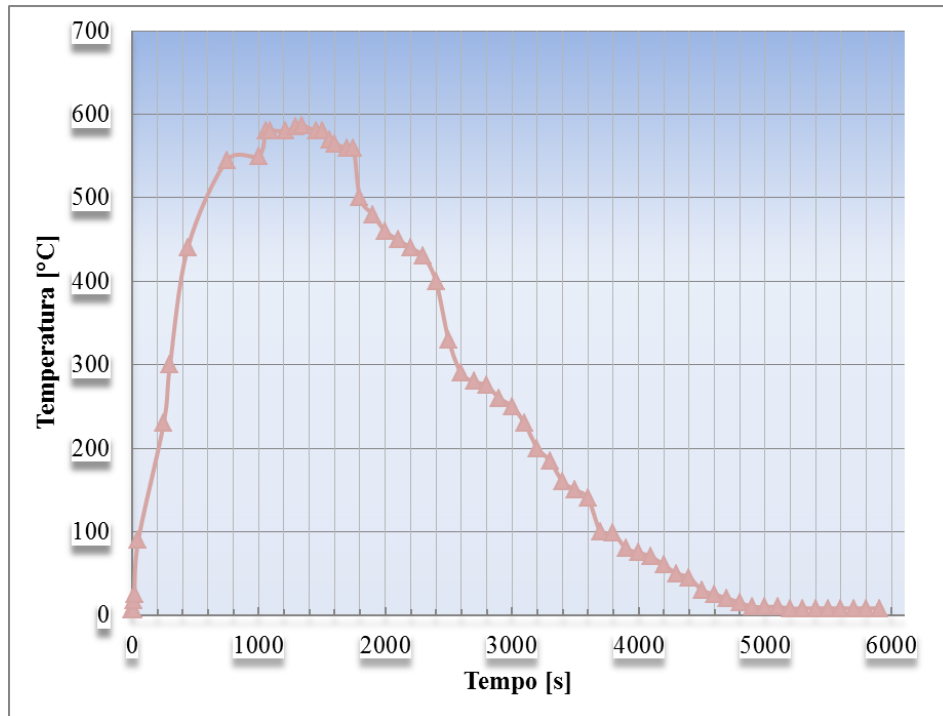


Figura A.4 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto C da Região A' realizado conforme normas.

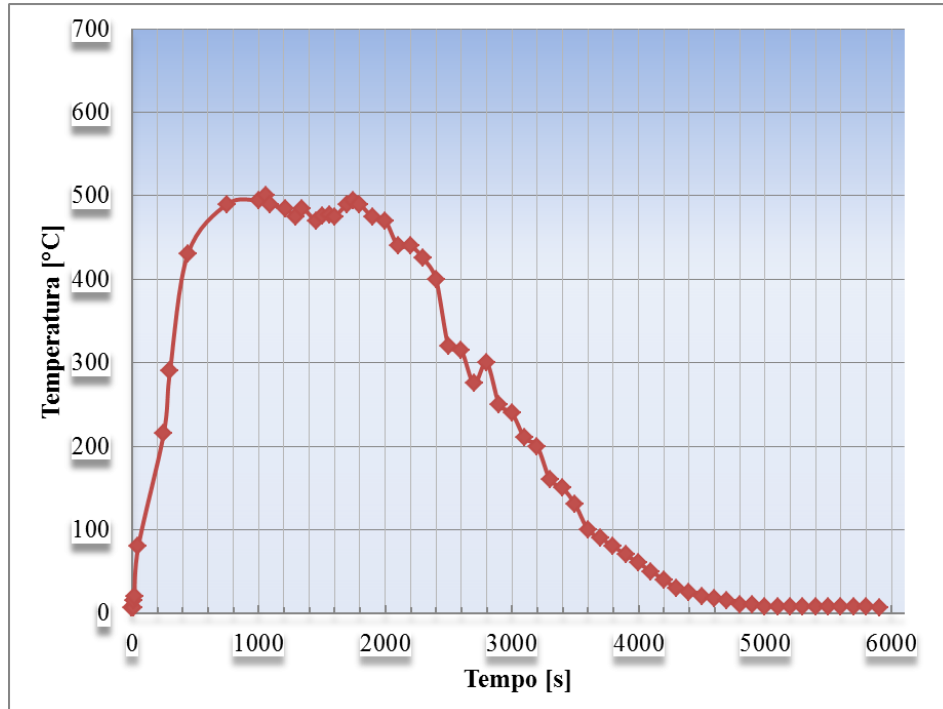


Figura A.5 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto D da Região A' realizado conforme normas.

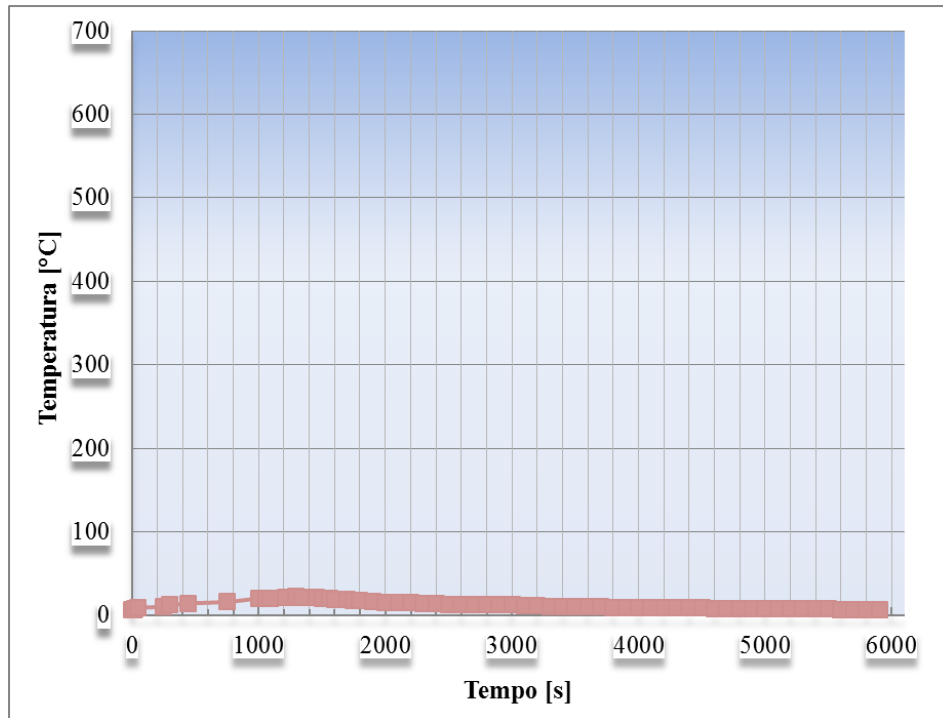


Figura A.6 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto E da Região A' realizado conforme normas.

## APÊNDICE B – Curvas Térmicas dos Processos de Arqueamento e Alinhamento de Vigas na Condição Fora de Norma

As curvas abaixo representam o ciclo térmico utilizado nos processos de arqueamento e alinhamento de vigas quando realizado com os parâmetros diferentes da norma (simulação de um processo com temperatura acima de 600 °C). Esse tratamento térmico será considerado diferente no ponto A para os dois materiais analisados, ou seja: considerar  $T_a = 850$  °C para o aço ASTM A570 GR-36 e  $T_a = 910$  °C para o aço DIN EN 10149 S700MC. Em outros pontos de aquecimento, considerar as mesmas temperaturas. Não foram acrescentadas linhas de tendência nestas curvas térmicas.

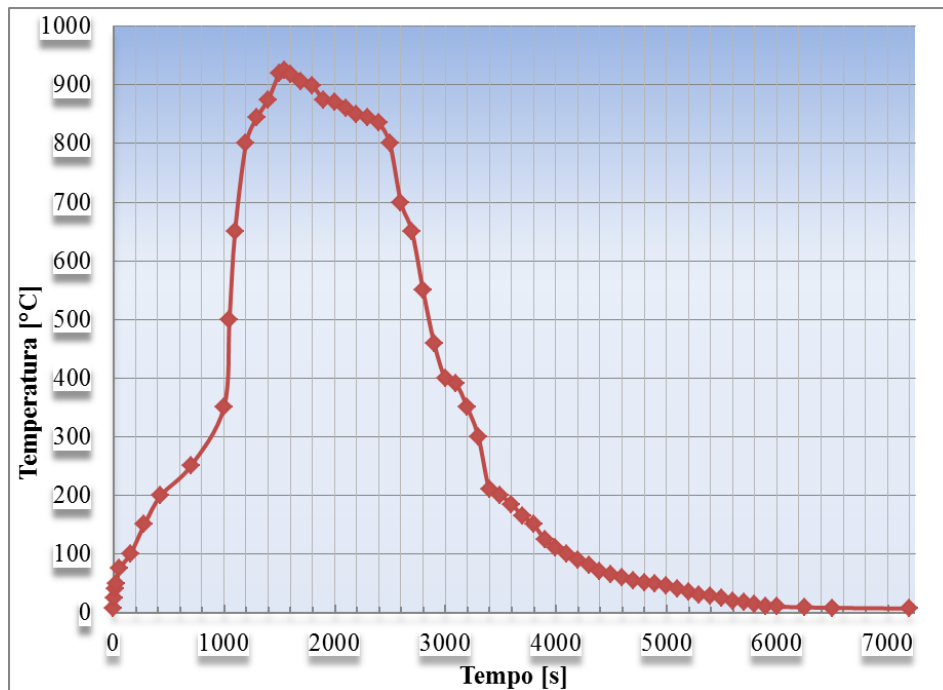


Figura B.1 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto A da Região A' na condição fora de norma.

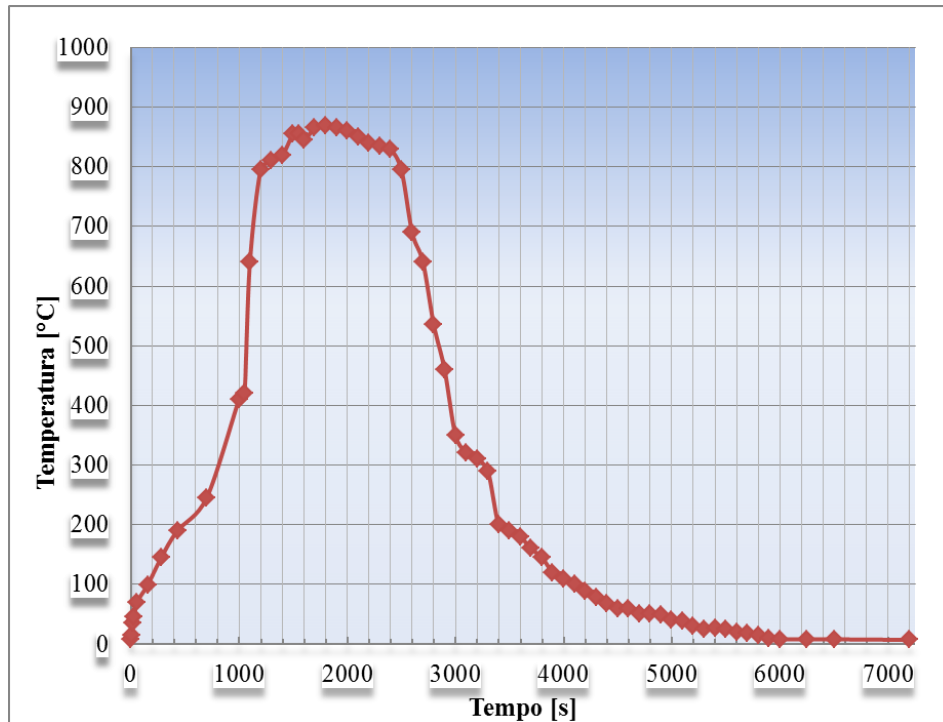


Figura B.2 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto B da Região A' na condição fora de norma.

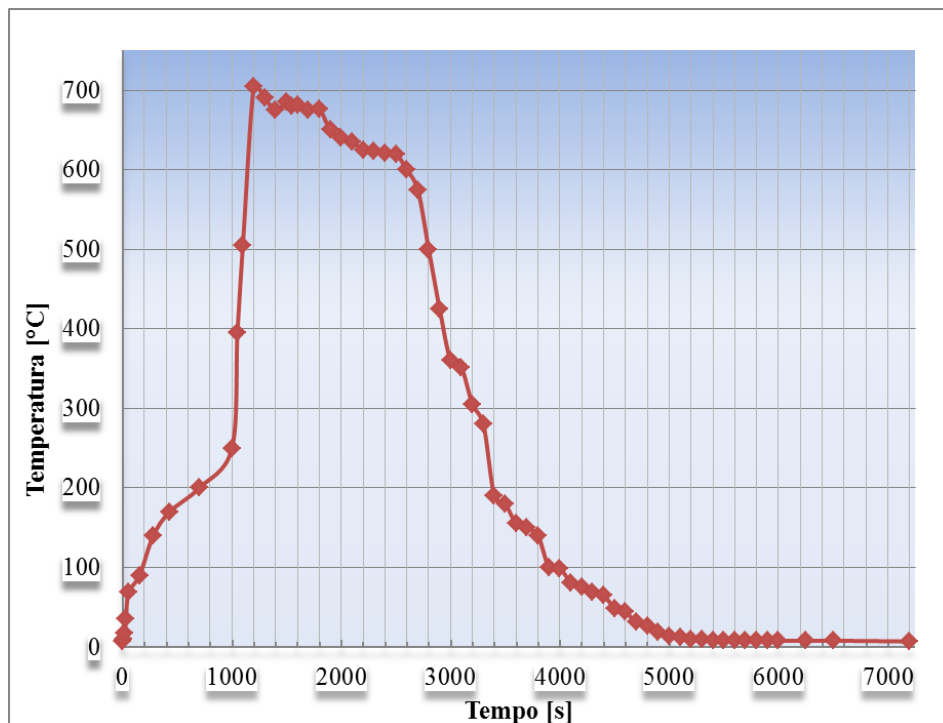


Figura B.3 – Curva térmica do processos de arqueamento e alinhamento no Ponto C da Região A' na condição fora de norma.

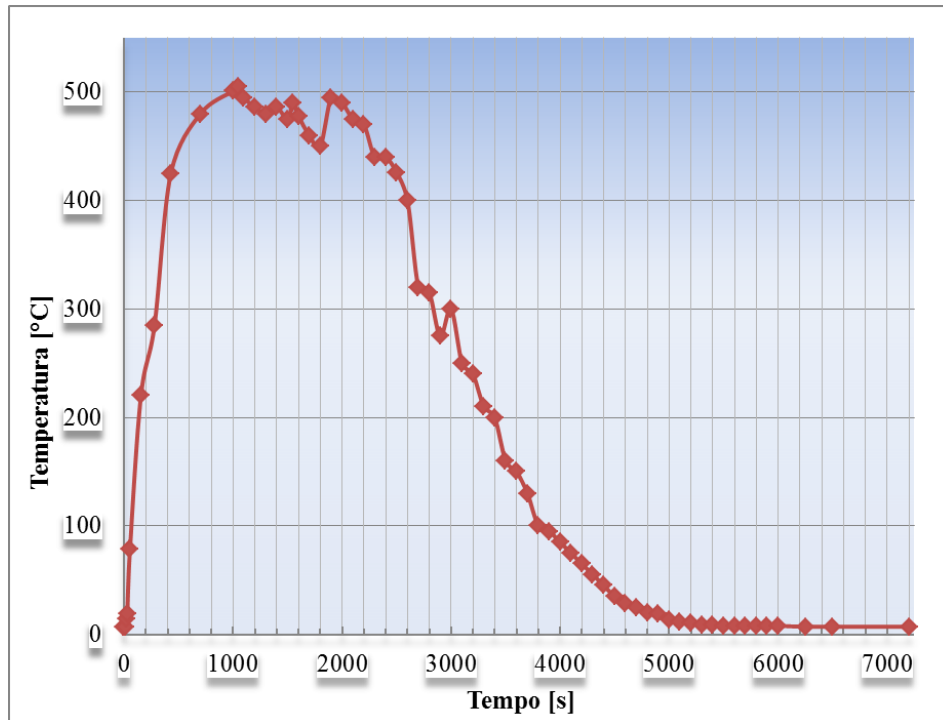


Figura B.4 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto D da Região A' na condição fora de norma.

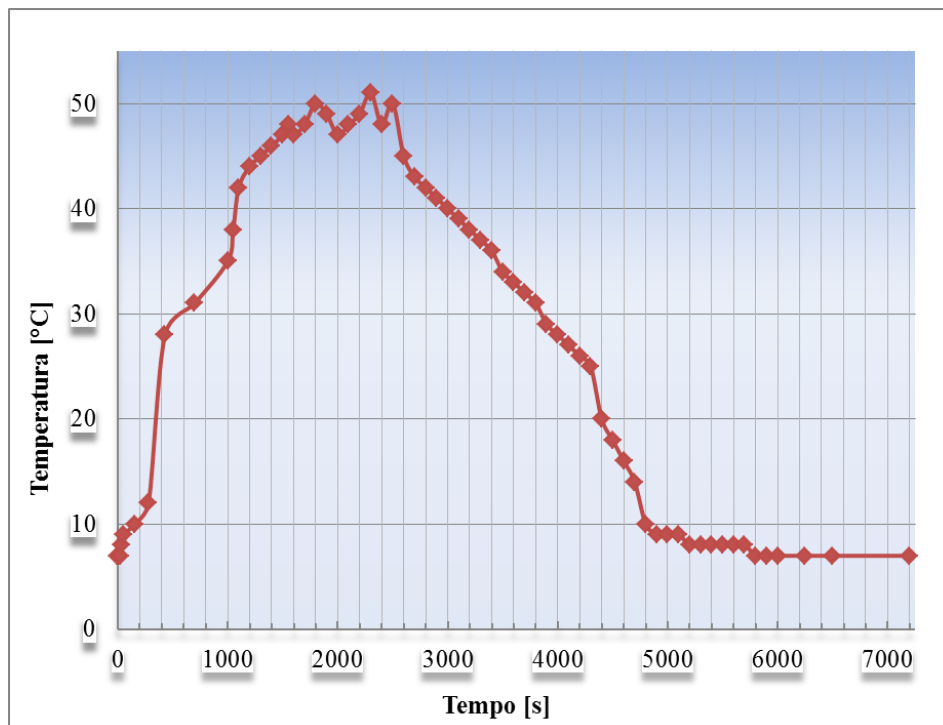


Figura B.5 – Curva térmica dos processos de arqueamento e alinhamento no Ponto E da Região A' na condição fora de norma.

## APÊNDICE C – Imagens Termográficas do Processo de Arqueamento de Vigas

Neste apêndice serão mostradas as principais imagens da etapa de monitoramento, através de termografia, do processo de arqueamento de vigas. Os parâmetros usados na máquina termográfica FLIR T 360 estão presentes nas fotos, onde se destaca o valor da emissividade  $\varepsilon = 0,98$ , recomendado para aço carbono. A precisão da máquina é de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . A câmara está registrada internamente com o número de patrimônio Np° 700040646.

Todas as imagens, após o monitoramento junto a linha de fabricação, foram posteriormente tratadas e estudadas no software próprio da câmara FLIR denominado QuickReport (Copyright © 1999-2014, FLIR Systems, Inc). As possibilidades do software permitem retirar qualquer temperatura dentro da área da imagem, sendo que a matriz de temperaturas é construída em um grid com espaçamento de  $3\text{ mm}$ .

A Figura C.1 mostra o código de cores utilizado em termografia para identificação da temperatura, no caso dos operadores que executam o processo.

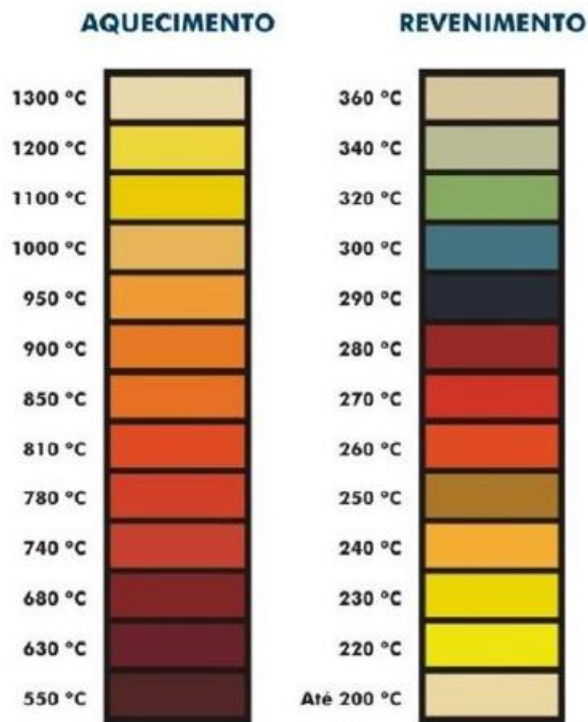


Figura C.1 – Tabela de cores para tratamento térmico.

Fonte: <http://www.tecnohard.ind.br>



Figura C.2 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=900s$ .

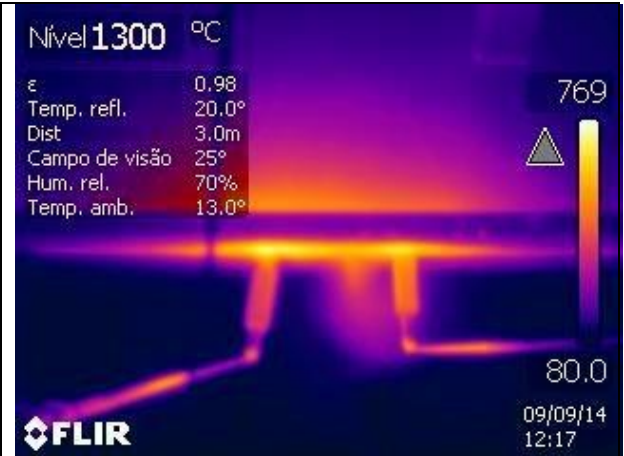


Figura C.3 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=900s$ .

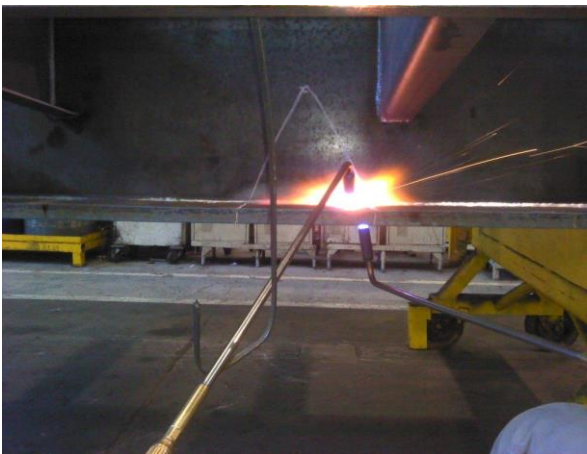


Figura C.4 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=960s$ .



Figura C.5 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=960s$ .

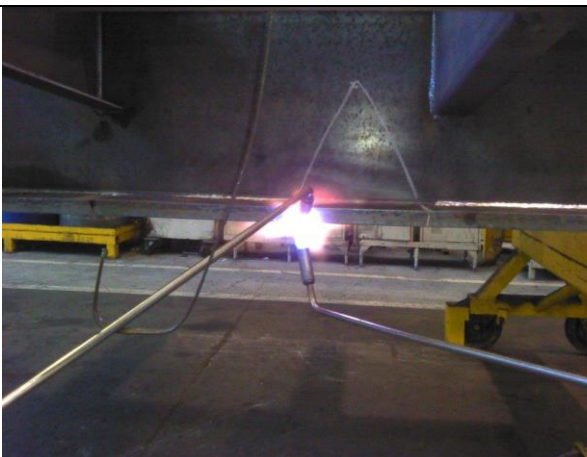


Figura C.6 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1020s$ .



Figura C.7 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1020s$ .



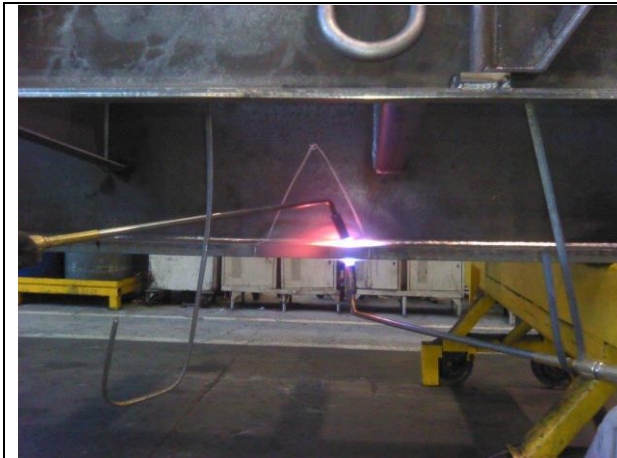


Figura C.8 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1080s$ .

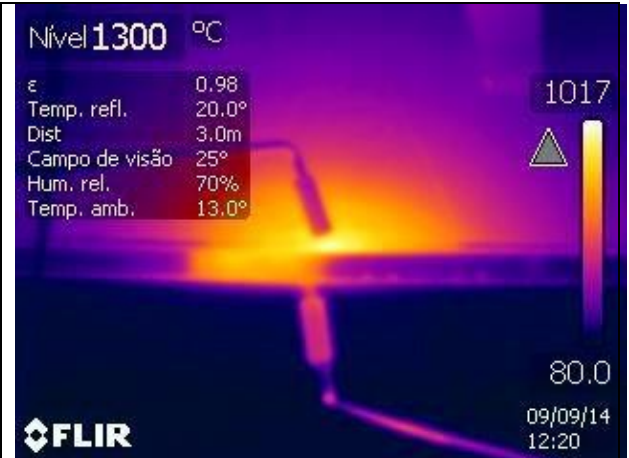


Figura C.9 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1080s$ .



Figura C.10 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1140s$ .

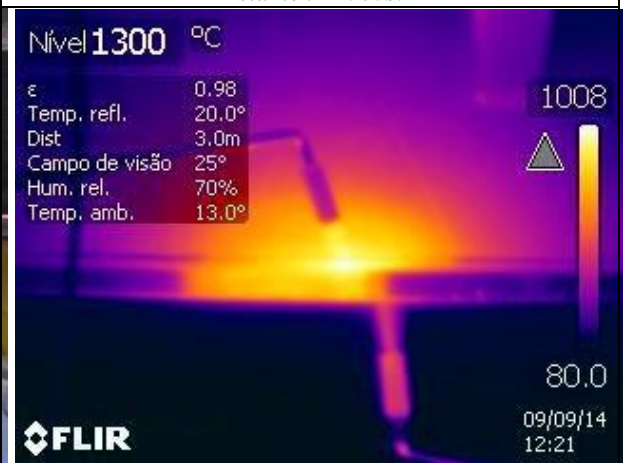


Figura C.11 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1140s$ .

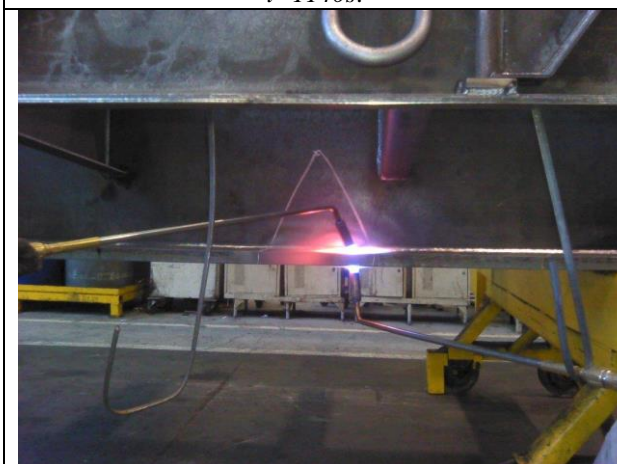


Figura C.12 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1200s$ .

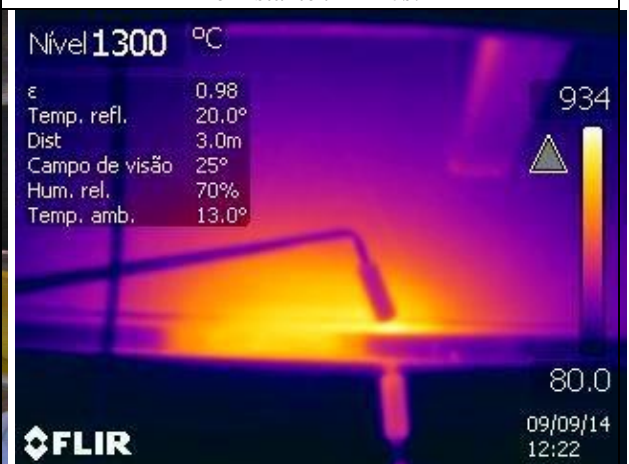


Figura C.13 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1200s$ .

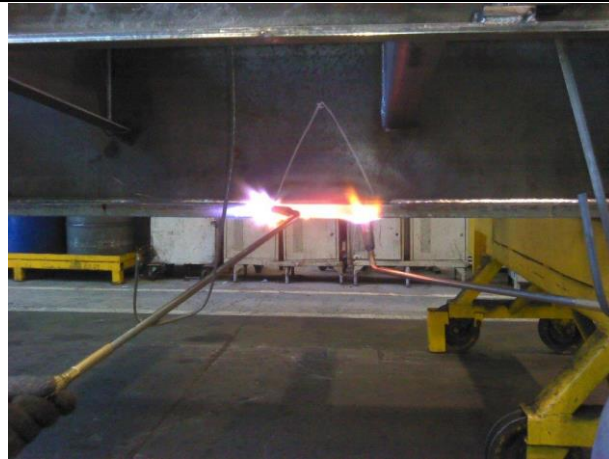


Figura C.14 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1220s$ .



Figura C.15 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1220s$ .

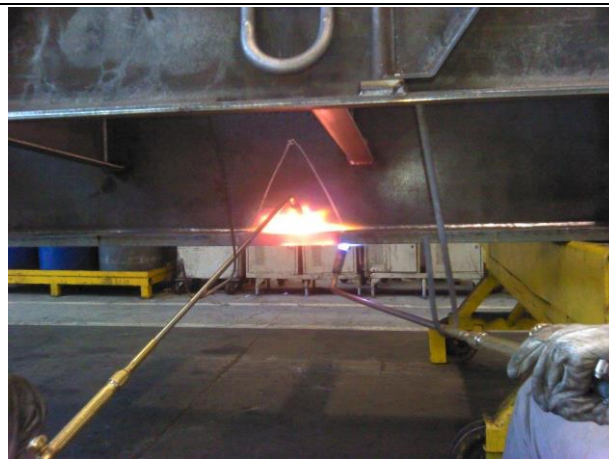


Figura C.16 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1260s$ .

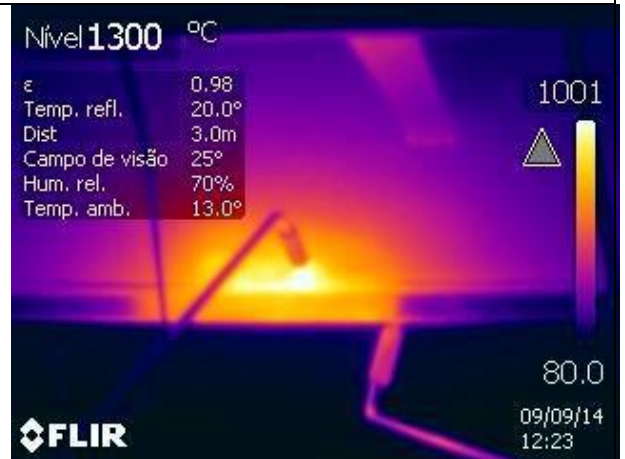


Figura C.17 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1260s$ .

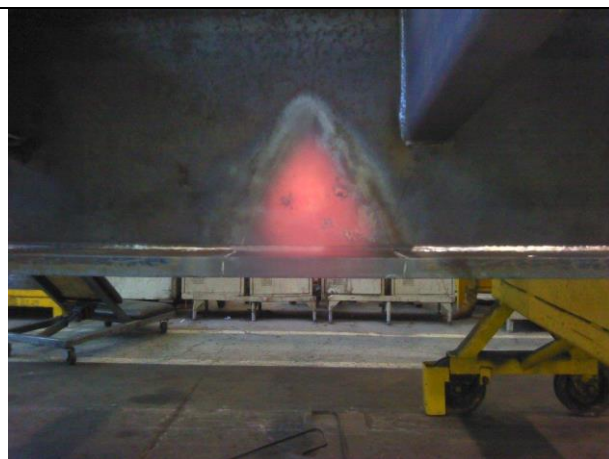


Figura C.18 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1440s$ .



Figura C.19 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1440s$ .

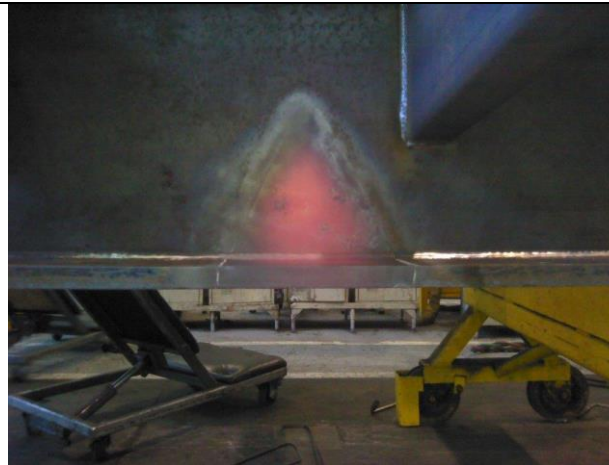


Figura C.20 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1480s$ .



Figura C.21 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1480s$ .



Figura C.22 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1500s$ .



Figura C.23 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1500s$ .



Figura C.24 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1560s$ .



Figura C.25 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1560s$ .



Figura C.26 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1740s$ .



Figura C.27 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1740s$ .



Figura C.28 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=1920s$ .



Figura C.29 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=1920s$ .



Figura C.30 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=2160s$ .



Figura C.31 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=2160s$ .



Figura C.32 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=3360s$ .



Figura C.33 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=3360s$ .



Figura C.34 – Foto do ciclo térmico no instante  $t=3600s$ .



Figura C.35 – Imagem termográfica do ciclo térmico no instante  $t=3600s$ .



Parâmetros da imagem e do objecto

Modelo de câmara	FLIR T360
Data da imagem	09/09/2014 12:19:25
Nome da imagem	IR_17521.jpg
Emissividade	0,98
Temperatura reflectida	20,0 °C
Distância do objecto	3,0 m



Comentário de texto

Figura C.36 – Imagem tratada no software *QuickReport* com o registo da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1045s$ .



Parâmetros da imagem e do objecto

Modelo de câmara	FLIR T360
Data da imagem	09/09/2014 12:21:54
Nome da imagem	IR_17528.jpg
Emissividade	0,98
Temperatura reflectida	20,0 °C
Distância do objecto	3,0 m



Comentário de texto

Figura C.37 – Imagem tratada no software *QuickReport* com o registo da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1219s$ .



Figura C.38 – Imagem tratada no software *QuickReport* com o registo da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1309s$ .



Figura C.39 – Imagem tratada no software *QuickReport* com o registo da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1372s$ .



#### Parâmetros da imagem e do objecto

Modelo de câmara	FLIR T360
Data da imagem	09/09/2014 12:23:31
Nome da imagem	IR_17534.jpg
Emissividade	0,98
Temperatura reflectida	20,0 °C
Distância do objecto	3,0 m



#### Comentário de texto

Figura C.40 – Imagem tratada no software *QuickReport* com o registo da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1400s$ .



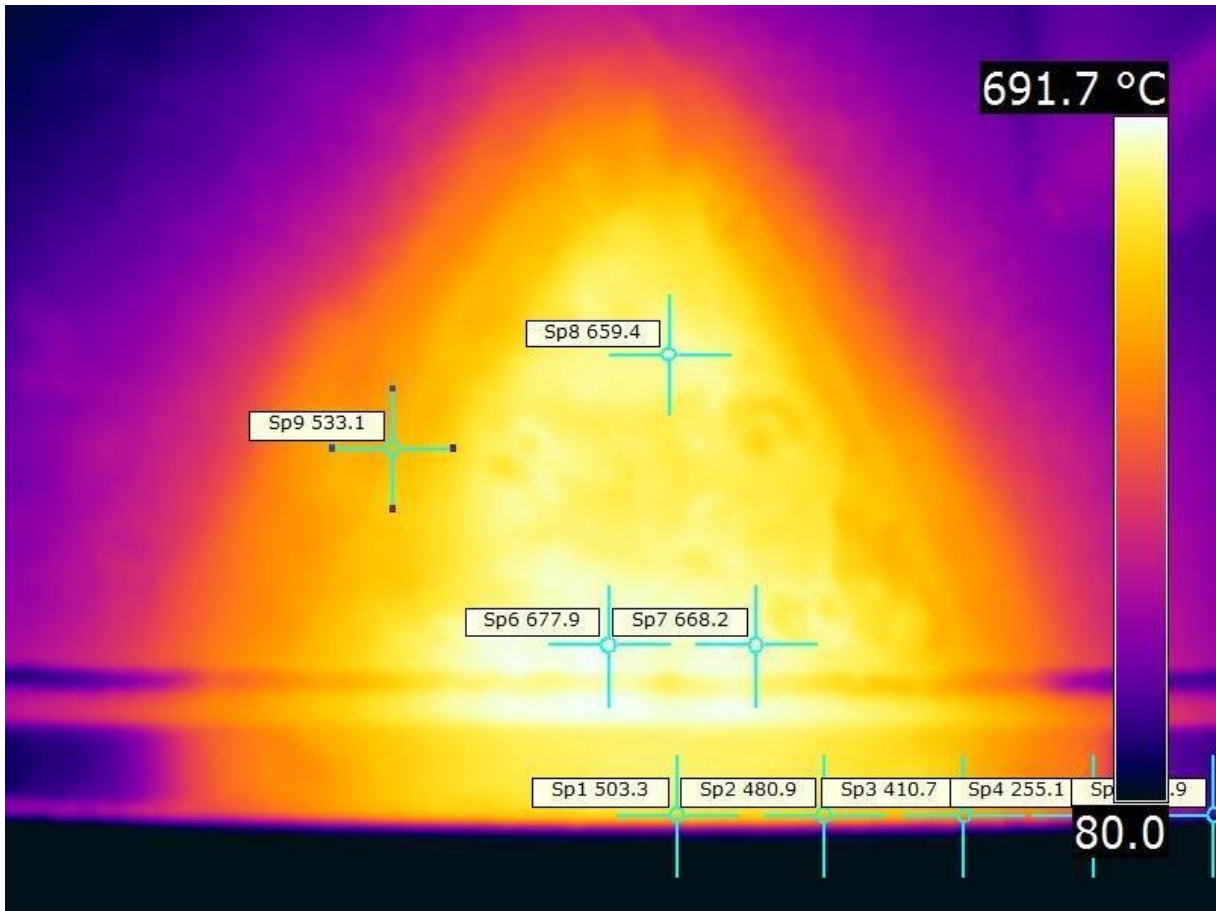


Figura C.41 – Imagem termográfica tratada no software *QuickReport* com o registro da temperatura em vários pontos para o instante  $t=1450s$ .

	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE
186	648,15	648,29	652,05	653,82	653,42	654,89	657,12	658,32	661,85	663,34	666,17	665,11	665,51	665,13	665,29	665,25	665,93	668,08	668,36	668,74
187	655,91	659,06	659,74	660,34	662,08	663,48	664,89	667,58	670,67	670,55	671,84	671,75	671,73	671,56	671,42	671,58	671,65	673,51	674,48	673,56
188	667,56	667,53	670,15	670,13	670,78	670,78	673,47	674,34	678,26	677,46	680,2	679,24	679,26	677,51	678,14	678,16	678,61	679,15	680,65	680,6
189	675,58	675,79	675,79	677,34	678,56	679,26	680,41	680,86	683,55	683,97	683,97	685,03	684,25	683,79	682,45	683,65	682,29	684,02	685,12	684,7
190	678,16	679,12	679,19	681,96	682,29	682,62	682,33	683,6	685,19	685,19	687,32	686,92	686,29	686,15	686,22	686,17	686,5	685,75	686,31	685,63
191	681,02	683,04	681,28	681,28	682,24	683,65	683,95	683,88	684,89	685,03	687,55	687,79	687,6	687,27	688,11	686,59	687,79	685,63	687,67	687,72
192	679,34	681,26	681,33	681,28	682,62	682,66	684,96	684,35	685,87	685,89	687,6	687,51	688,14	688,18	688,7	686,08	685,96	687,46	686,15	687,27
193	678,77	679,64	679,15	679,17	681,56	681,23	683,9	681,54	684,28	684,86	684,75	685,24	687,29	684,77	687,34	686,03	687,18	684,77	685,56	685,73
194	675,74	676,17	676,92	675,72	676,26	678,09	679,43	678,75	679,24	679,52	680,6	681,3	682,22	682,24	683,69	683,25	682,17	682,05	682,12	680,3
195	668,12	668,41	668,48	668,22	670,13	670,57	671,54	672,71	672,67	672,67	672,67	672,62	674,19	675,58	674,73	674,55	675,49	674,36	674,38	674,38
196	657	657,92	657,4	657,95	659,39	659,51	659,98	660	660,97	660,12	662,51	662,39	663,38	664,16	663,24	664,47	664,49	663,71	663,52	665,06
197	643,96	644,87	644,92	647,96	646,63	647,32	648,15	648,13	647,7	648,2	649,74	649,74	651,4	650,43	652	652,16	651,71	651,78	653,14	653,18
198	633,46	635,08	636,04	636,02	636,04	637,28	637,28	636,23	637,47	637,71	637,04	638	639,77	640,53	639,46	640,55	640,7	642,72	642,01	642,37
199	627,78	628,19	630,27	630,61	631,95	631,69	632,09	632,02	631,47	632,07	632,96	632,16	634,75	635,04	635,11	635,11	635,92	639,98	637,69	636,52
200	627,01	626,89	627,2	628,23	627,44	628,64	629,98	629,98	630,01	628,69	627,56	630,34	630,37	631,66	631,73	633,1	634,3	636,28	636,07	636,42
201	625,4	624,58	625,52	626,19	627,32	627,47	629,91	629,12	629,46	628,79	630,22	629,12	630,01	629,86	631,76	631,9	633,24	634,75	636,23	634,7
202	623,67	623,33	624,51	624,87	625,93	627,66	628,47	628,23	628,79	629,26	629,34	629,19	629,94	629,43	631,76	633,12	634,2	634,65	635,35	635,2
203	622,08	622,06	623,64	623,93	624,39	625,38	628,02	627,75	627,92	627,97	628,79	629,22	630,58	629,96	632,19	632,69	633,34	636,14	636,26	635,04
204	622,75	623,67	623,62	622,63	623,48	624,44	626,02	626,05	627,42	629,53	629,6	629,53	630,34	630,63	631,3	633,48	633,55	633,51	635,85	635,37
205	621,7	623,43	622,08	622,75	622,59	624,34	623,67	624,56	626,19	626,96	629,14	629,77	630,73	630,13	631,04	632,28	633,53	634,94	635,37	634,39
206	622,59	623,57	623,33	621,89	621,91	622,56	623,6	623,6	625,47	627,15	629,79	627,9	628,45	630,18	630,46	631,57	633,55	633,82	635,35	634,37
207	623,12	623,48	622,49	622,56	622,25	622,61	622,63	623,5	624,73	624,92	626,67	625,26	626,67	626,67	628,59	630,42	632,12	633,91	634,92	634,39
208	622,13	622,18	622,63	621,72	622,59	621,05	622,49	623,09	624,92	625,45	624,27	624,97	625,33	625,28	627,95	629,82	630,97	632,93	634,7	633,43
209	620,85	621,98	621,67	621,02	619,09	620,95	621,17	621,38	622,8	623,33	623,12	621,77	623,4	625,38	626,74	628,64	629,72	632,45	632,05	632,48
210	620,85	621,07	621,07	620,61	620,71	621,21	621,26	621,77	621,29	621,5	621,6	621,31	623,33	624,17	626,58	627,56	629,24	630,73	631,28	631,42

Figura C.42 – Matriz de temperaturas da Figura C.40 gerada pelo software *QuickReport*.

## APÊNDICE D – Resumo dos Principais Resultados Obtidos nos Procedimentos Experimentais Para o Material ASTM A570 GR36-C.

Tabela D.1 – Resultados dos ensaios mecânicos para o material ASTM A570 GR36-C.

	ASTM A570 GR36-C (em estado original)	ASTM A570 GR36-C (ciclo térmico conforme APÊNDICE A)	ASTM A570 GR36-C (ciclo térmico conforme APÊNDICE B)
Tensão de escoamento - $\sigma_e$ (MPa)	293	263	262
Resistência à tração mínima - $S_{ut}$ (MPa)	400	382	361
Alongamento - $a$ (%)	21	23	26
Microdureza Vickers na região A' - HV (HV-5)	146	145	139
Microdureza Vickers na região da Z_INT - HV (HV-5)	146	124	115,8
Microdureza Vickers na Região ZN - HV (HV-5)	146	134	115,6
Tamanho de Grão - TG (ASTM)	8	7	6
Limite de resistência a Fadiga – $S_f$ (MPa)	210	170,71	170

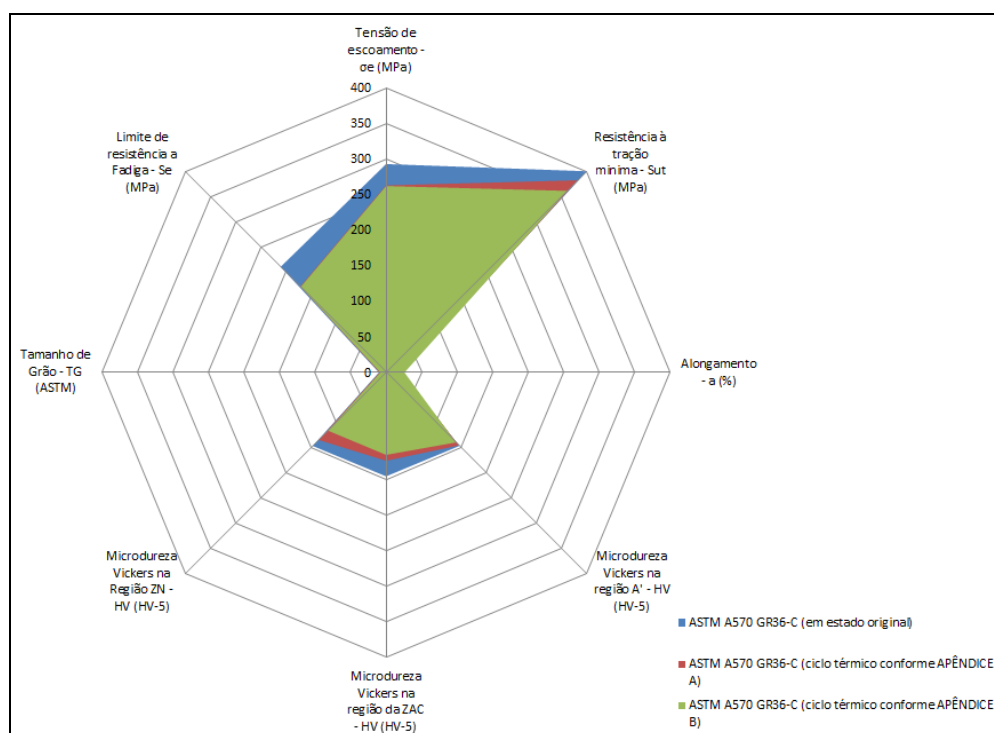


Figura D.1 – Diagrama tipo 'radar' com os resultados dos procedimentos experimentais do material ASTM A570 GR36-C.

## APÊNDICE E – Resumo dos Principais Resultados Obtidos nos Procedimentos Experimentais Para o Material DIN EN 10149 S700MC.

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios mecânicos para o material DIN EN 10149 S700MC.

	DIN EN 10149 S700MC (em estado original)	DIN EN 10149 S700MC (ciclo térmico conforme APÊNDICE A)	DIN EN 10149 S700MC (ciclo térmico conforme APÊNDICE B)
Tensão de escoamento - $\sigma_e$ (MPa)	726	512	425
Resistência à tração mínima - $S_{ut}$ (MPa)	756	597	554
Alongamento - $a$ (%)	31	33	37
Microdureza Vickers na região A' - HV (HV-5)	166	181,4	181,8
Microdureza Vickers na região da Z_INT - HV (HV-5)	166	171,8	124,6
Microdureza Vickers na Região ZN - HV (HV-5)	166	166	157,2
Tamanho de Grão - TG (ASTM)	12	11	9
Limite de resistência a Fadiga - $S_f$ (MPa)	310	264,55	270

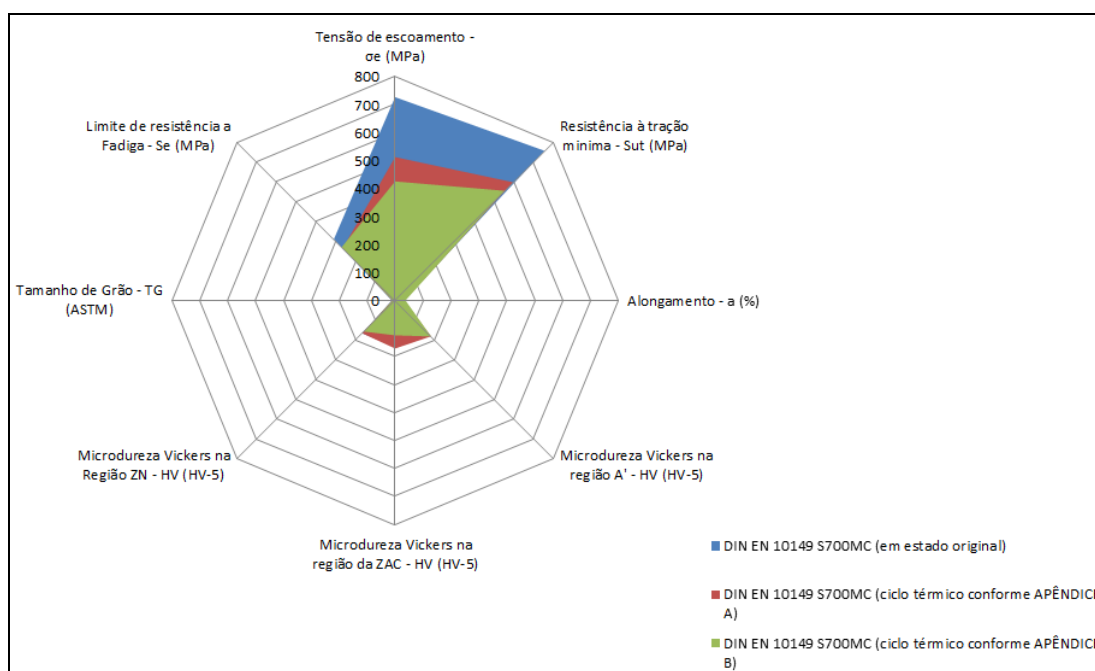


Figura E.1 – Diagrama tipo 'radar' com os resultados dos procedimentos experimentais do material DIN EN 10149 S700MC.

## APÊNDICE F – Análise da Variância nos Ensaios de Microdureza dos Materiais ASTM A570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC.

Neste apêndice são exibidos os resultados da análise estatística dos ensaios de microdureza Vickers. O método utilizado foi o da análise da variância (ANOVA) de fator único. As populações consideradas foram formadas pelo conjunto de resultados de microdureza para cada região do corpo de prova. No total, foram três regiões onde a microdureza foi medida: zona neutra, zona intermediária e a zona de aquecimento. As hipóteses testadas foram:

- Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias populacionais são iguais (microdureza não teve variação em função dos ciclos térmicos aplicados);
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): as médias populacionais são diferentes ou pelo menos uma das médias é diferente das demais (em alguma região do CP houve variação na microdureza).

Uma vez rejeitada a hipótese  $H_0$ , deve-se testar as médias populacionais entre si dentro do grupo. Para isso foi utilizada a função de TUKEY. A estratégia de TUKEY consiste em determinar a menor diferença significativa utilizando a amplitude de distribuição studentizada. O intervalo de confiança deste teste é de 95 %. Abaixo o resumo dos dados discutidos no Capítulo 5. As tabelas e figuras foram geradas no software PAST (HAMMER et al, 2001).

Tabela F.1 – Análise estatística dos resultados de microdureza para o material ASTM A570 GR36-C após aplicação do ciclo térmico realizado conforme normas entre as diferentes regiões de aquecimento.

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	4483,73	2	2241,87	75,65	1,574E-07
Within groups:	355,6	12	29,6333		
Total:	4839,33	14			
omega^2:	0,9087				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,4979  
Based on medians: p(same) = 0,4935

Welch F test in the case of unequal variances: F=49,53, df=7,531, p=4,639E-05

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B	C
A		0,0001903	0,0001909
B	16,59		0,04974
C	12,82	3,779	

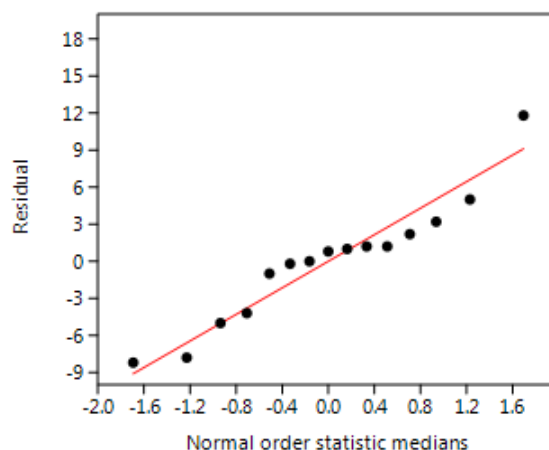


Figura F.1 – Gráfico do resíduo no Teste de Tukey para a medição de microdureza entre as diferentes regiões de aquecimento do material ASTM A570 GR36-C após aplicação do ciclo térmico conforme norma.

Tabela F.2 – Análise estatística dos resultados de microdureza para o material ASTM A570 GR36-C após aplicação do ciclo térmico fora de norma entre as diferentes regiões de aquecimento.

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	1840,93	2	920,467	66,22	3,288E-07
Within groups:	166,8	12	13,9		
Total:	2007,73	14			
omega^2:	0,8969				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,3012  
Based on medians: p(same) = 0,6547

Welch F test in the case of unequal variances: F=40,82, df=7,42, p=9,905E-05

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B	C
A		0,0001904	0,0001904
B	14,15		0,9961
C	14,03	0,12	

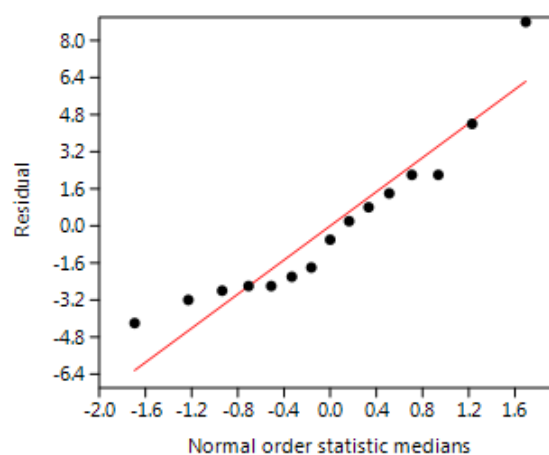


Figura F.2 – Gráfico do resíduo no Teste de Tukey para a medição de microdureza entre as diferentes regiões de aquecimento do material ASTM A570 GR36-C após aplicação do ciclo térmico fora de norma.

Tabela F.3 – Análise estatística dos resultados de microdureza para o material DIN EN 10149 S700MC após aplicação do ciclo térmico realizado conforme normas entre as diferentes regiões de aquecimento.

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	604,933	2	302,467	35,58	9,023E-06
Within groups:	102	12	8,5		
<b>Total:</b>	<b>706,933</b>	<b>14</b>			
<b>omega^2:</b>	<b>0,8218</b>				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,8078  
Based on medians: p(same) = 0,9192

Welch F test in the case of unequal variances: F=27,13, df=7,682, p=0,0003296

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B	C
A		0,0007461	0,0001927
B	7,363		0,02147
C	11,81	4,448	

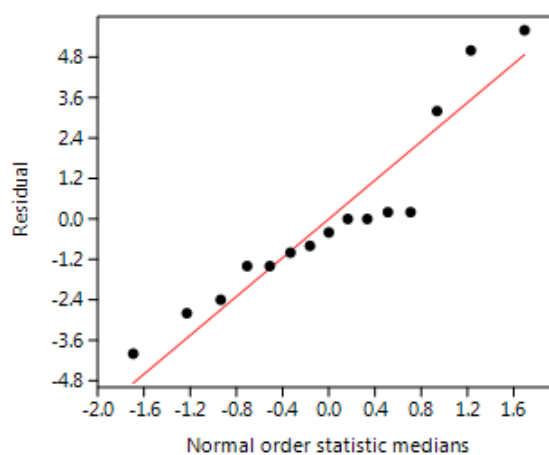


Figura F.3 – Gráfico do resíduo no Teste de Tukey para a medição de microdureza entre as diferentes regiões de aquecimento do material DIN EN 10149 S700MC após aplicação do ciclo térmico conforme norma.

Tabela F.4 – Análise estatística dos resultados de microdureza para o material DIN EN 10149 S700MC após aplicação do ciclo térmico fora de norma entre as diferentes regiões de aquecimento.

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	8232,93	2	4116,47	179,8	1,136E-09
Within groups:	274,8	12	22,9		
<b>Total:</b>	<b>8507,73</b>	<b>14</b>			
<b>omega^2:</b>	<b>0,9597</b>				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,5415  
Based on medians: p(same) = 0,8156

Welch F test in the case of unequal variances: F=216,1, df=7,856, p=1,357E-07

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B	C
A		0,0001903	0,0001938
B	26,73		0,0001903
C	11,49	15,23	

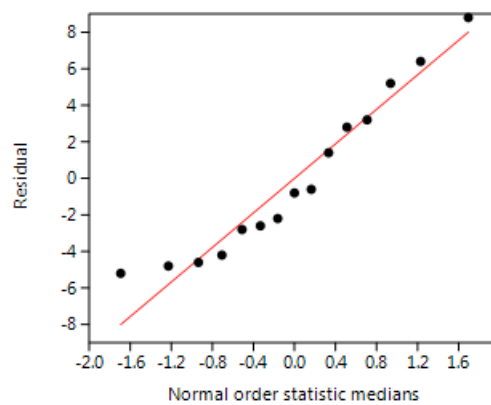


Figura F.4 – Gráfico do resíduo no Teste de Tukey para a medição de microdureza entre as diferentes regiões de aquecimento do material DIN EN 10149 S700MC após aplicação do ciclo térmico fora de norma.