



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL**  
**CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**



**ARIOVALDO FERNANDES DE ALMEIDA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS CONSTITUÍDAS DE PERFIS  
FORMADOS A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS SUBMETIDAS À  
FLEXÃO SIMPLES**

Goiânia

2009

**ARIOVALDO FERNANDES DE ALMEIDA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS CONSTITUÍDAS DE PERFIS  
FORMADOS A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS SUBMETIDAS À  
FLEXÃO SIMPLES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Estruturas e Materiais

**Orientador:** Prof. Dr. Orlando Ferreira Gomes

Goiânia

2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**GPT/BC/UFG**

Almeida, Ariovaldo Fernandes.

A447a Análise experimental de vigas constituídas de perfis formados a frio com emendas soldadas submetidas à flexão simples [manuscrito] / Ariovaldo Fernandes de Almeida. - 2009.

xv, 147 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Ferreira Gomes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndices.

1. Perfis de aço 2. Emendas soldadas 3. Flexão simples I.  
Título.

CDU: 624.014.2

**ARIOVALDO FERNANDES DE ALMEIDA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS CONSTITUÍDAS DE PERFIS  
FORMADOS A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS SUBMETIDAS À  
FLEXÃO SIMPLES**

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do grau de Mestre, aprovada em 23 de setembro de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Orlando Ferreira Gomes, D.Sc. – UFG  
Orientador

---

Prof. Gilson Natal Gimarães Ph.D. – UFG  
Examinador interno

---

Prof. Janes Cleiton Alves de Oliveira, D.Sc – UnB  
Examinador externo

*À minha avó Selestina.  
À minha esposa Cintia.  
À minha filha Giovanna.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Engenheiro por Excelência e Eterno Criador, por ter me dado o dom da vida.

À minha Avó, pela educação e criação, nos momentos mais difíceis da minha vida, sempre esteve presente.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Goiás, em especial ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil, por ter aprovado o meu ingresso no curso e pelas condições oferecidas para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Laboratório de Estruturas da Universidade Católica de Goiás pelos ensaios de caracterização dos aços e da solda.

Ao professor Dario Dafico, da Universidade Católica de Goiás, que foi quem me ensinou a dar os primeiros passos na área da pesquisa.

Aos professores Manoel Álvares e Antônio Paulo, que confiaram em mim, assinando as cartas de recomendação para o meu ingresso no mestrado, obrigado pela confiança.

Ao meu orientador, professor Orlando Ferreira Gomes, pela orientação e apoio na realização deste trabalho na área de estruturas metálicas.

Ao professor Gilson Natal Guimarães, pela importante contribuição para que este trabalho fosse concluído, suas orientações foram fundamentais e indispensáveis, sem elas este trabalho não seria o mesmo.

A todos os professores do CMEC, em especial ao professor André Geyer, sua competência profissional e seus conselhos muito contribuíram com a vida.

Ao professor Ronaldo Barros Gomes, pelas importantes lições de vida que me ensinou, seus ensinamentos eu levarei por toda a vida, jamais esquecerei o “você tem que vencer as barreiras”.

Ao Tancredo, secretário do Mestrado, pela atenção e gentileza.

À empresa Metal Enge Estruturas Metálicas pela contribuição, especialmente ao Wagner que em todos os momentos esteve pronto a ajudar.

A todos os colegas do Mestrado turma de 2007, especialmente aos colegas da turma de Estruturas, David, Fabio e Poliana, pela ajuda nos ensaios.

Ao colega Avelar, pela boa vontade em auxiliar nos ensaios nos momentos finais, sua contribuição foi muito importante.

Ao Professor Janes Cleiton, que sempre teve a palavra certa na hora certa.

À minha esposa e filha, por terem compreendido minha ausência em alguns momentos essenciais, sem elas eu não teria conseguido realizar este sonho.

*“O único homem que está isento de erros  
é aquele que não se arrisca acertar”*

Albert Einstein

## RESUMO

Os perfis metálicos formados a frio tem sido bastante usados quando se pensa em fabricar uma estrutura metálica com peso próprio reduzido. O seu uso até a algum tempo atrás na construção civil estava limitado apenas a estruturas secundárias, mas, com o crescimento considerável de pesquisas envolvendo este tipo de material associadas ao desenvolvimento de normas técnicas, fez com que o seu uso apresentasse uma boa solução para determinados tipos de estruturas leves. O presente trabalho apresenta considerações sobre perfis formados a frio, aços patináveis, processos de soldagem e o resultado de ensaios experimentais de vigas bi-apoiadas constituídas de perfis formados a frio compostas pela junção de dois perfis U enrijecidos, fabricadas com dois tipos de aço patináveis produzidos no Brasil, comparando-se os resultados. Em algumas destas vigas foram feitas emendas soldadas com eletrodo revestido e foi feita a comparação com vigas de referência, sem emenda soldada, possibilitando o estudo da influência do processo de soldagem na resistência à flexão e na ductilidade das vigas.

**Palavras chaves:** perfis de aço formados a frio; emendas soldadas; flexão simples.

## **ABSTRACT**

The cold-formed steel sheets have been sufficiently used when it is thought of manufacturing a metallic structure with reduced weight. Its use until some time ago in construction was limited to the secondary structures, but, with considerable growth in research involving this type of material together with development of technical standards, made its use a good solution for certain types of light structures. The present work presents considerations on cold-formed steel sheets, the patened steel, processes of welding and the result of experimental tests with beams with composed section of two profiles U constituted with cold-formed steel sheets, manufactured with two types of patened steel produced in Brazil. In some of these beams, welded sections with coated electrode had been used and were made the comparison with the reference beam, where it was possible to study the influence of the process of welding in the ultimate resistance and the ductility of the beam.

**Keywords:** cold-formed steel sheets; welded splices; simple buckling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Lâminas ou tiras de aço (OLIVEIRA, 2001) .....	39
Figura 2.2 – Guilhotina (OLIVEIRA, 2001) .....	40
Figura 2.3 – Tesoura rotativa (OLIVEIRA, 2001) .....	40
Figura 2.4 – Perfiladeira (OLIVEIRA, 2001) .....	41
Figura 2.5 – Dobradeira (OLIVEIRA, 2001) .....	41
Figura 2.6 – Exemplos de seções de perfis formados a frio(DAVIES, 2000).....	42
Figura 2.7 – Centro administrativo Deere & Company (JOHN DEERE, 2009).....	45
Figura 2.8 – Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW). Adaptada de Owens & Cheal, (1989). .....	49
Figura 2.9 – Representação do processo de soldagem a arco submerso. Adaptada de Owens & Cheal, (1989). .....	51
Figura 2.10 – Representação do processo de soldagem com gás de proteção. Adaptada de Owens & Cheal, (1989). .....	54
Figura 2.11 – Representação do processo de soldagem eletro-escória. Adaptada de Cooper, (1985).....	56
Figura 2.12 – Juntas soldadas. Adaptada de Gaylord et al. (1992). .....	60
Figura 2.13 – Exemplos de solda de filete. Adaptada de Cooper (1985). .....	61
Figura 2.14 – Formas para o filete da solda. Adaptada de Siderbrás (1988) .....	62
Figura 2.15 – Exemplos de solda em chanfro. Adaptada de Cooper (1985).....	63
Figura 2.16 – Exemplos de soldas em tampão. Adaptada de Salmon e Jonhson (1986) .....	64
Figura 2.17 – Seções transversais usuais em elementos fletidos.....	66
Figura 3.1 – Corpo-de-prova sem emenda para ensaio de caracterização do aço .....	76
Figura 3.2 – Corpo-de-prova antes do ensaio.....	76
Figura 3.3 – Esquema do corpo-de-prova com emenda soldada para ensaio de caracterização da solda .....	78
Figura 3.4 – Corpo de prova para caracterização da solda, antes da realização do ensaio .....	78
Figura 3.5 – Ensaio à tração do corpo de prova .....	78
Figura 3.6 – Esquema de aplicação as forças .....	80
Figura 3.7 – Vista longitudinal do esquema de ensaio montado .....	81
Figura 3.8 – Vista transversal do esquema de ensaio montado .....	81
Figura 3.9 – Seção transversal das vigas ensaiadas.....	82

Figura 3.10 – Foto do detalhe de montagem dos enrijecedores .....	82
Figura 3.11 – Esquemas dos aparelhos de apoio .....	83
Figura 3.12 – Foto de um apoio do primeiro gênero .....	83
Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados dos extensômetros e da célula de carga.....	84
Figura 3.14 – Esquema geral de ensaio montado .....	85
Figura 3.15 – Posição dos deflectômetros .....	86
Figura 3.16 – Extensômetros na mesa superior das vigas sem emenda .....	86
Figura 3.17 – Extensômetros na mesa superior das vigas com uma emenda .....	87
Figura 3.18 – Extensômetros na mesa superior das vigas com duas emendas.....	87
Figura 3.19 – Extensômetros na mesa superior das vigas com três emendas .....	88
Figura 4.1 – Modo de ruptura do corpo de prova no ensaio à tração .....	90
Figura 4.2 – Propriedades geométricas da seção transversal de perfis U enrijecido (NBR 6355, 2003). .....	92
Figura 4.3 – Ruptura por plastificação da mesa comprimida.....	95
Figura 4.4 – Gráfico força x deslocamento para viga V1A, no meio do vão .....	97
Figura 4.5 – Gráfico força x deslocamento para viga V1A, a 950mm dos apoios.....	98
Figura 4.6 – Gráfico força x deslocamento para viga V2A, no meio do vão .....	98
Figura 4.7 – Gráfico força x deslocamento para viga V2A, a 950mm dos apoios.....	99
Figura 4.8 – Gráfico força x deslocamento para viga V3A, no meio do vão .....	99
Figura 4.9 – Gráfico força x deslocamento para viga V3A, a 950mm dos apoios.....	100
Figura 4.10 – Gráfico força x deslocamento para viga V4A, no meio do vão .....	100
Figura 4.11 – Gráfico força x deslocamento para viga V4A, a 950mm dos apoios.....	101
Figura 4.12 – Gráfico força x deslocamento para viga V1B, no meio do vão .....	101
Figura 4.13 – Gráfico força x deslocamento para viga V1B, a 950mm dos apoios.....	102
Figura 4.14 – Gráfico força x deslocamento para viga V2B, no meio do vão .....	102
Figura 4.15 – Gráfico força x deslocamento para viga V2B, a 950mm dos apoios.....	103
Figura 4.16 – Gráfico força x deslocamento para viga V3B, no meio do vão .....	103
Figura 4.17 – Gráfico força x deslocamento para viga V3B, a 950mm dos apoios.....	104
Figura 4.18 – Gráfico força x deslocamento para viga V4B, no meio do vão .....	104
Figura 4.19 – Gráfico força x deslocamento para viga V4B, a 950mm dos apoios.....	105
Figura 4.20 – Gráfico carga x deformação – viga V1A .....	107
Figura 4.21 – Gráfico carga x deformação – viga V2A .....	108
Figura 4.22 – Gráfico carga x deformação – viga V3A .....	108
Figura 4.23 – Gráfico carga x deformação – viga V4A .....	109

Figura 4.24 – Gráfico carga x deformação – viga V1B .....	109
Figura 4.25 – Gráfico carga x deformação – viga V2B .....	110
Figura 4.26 – Gráfico carga x deformação – viga V3B .....	110
Figura 4.27 – Gráfico carga x deformação – viga V4B .....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química do aço USI-SAC 300 (USIMINAS, 2009) .....	46
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas dos aços USI-SAC 300 e CSN COR 420 (USIMINAS, 2009; CSN, 2009) .....	47
Tabela 3.1 – Nomenclatura dos corpos de prova para ensaio à tração do aço .....	76
Tabela 3.2 – Vigas ensaiadas.....	79
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios à tração .....	90
Tabela 4.2 – Corpos de prova com emenda soldada .....	90
Tabela 4.3 – Dimensões das seções transversais dos perfis U enrijecido da série A .....	91
Tabela 4.4 – Dimensões das seções transversais dos perfis U enrijecido da série B .....	92
Tabela 4.5 – Propriedades geométricas nominais .....	93
Tabela 4.6 – Propriedades geométricas das seções transversais das vigas ensaiadas série A..	93
Tabela 4.7 – Propriedades geométricas das seções transversais das vigas ensaiadas série B ..	94
Tabela 4.8 – Comparação entre o momento de inércia nominal e experimental.....	94
Tabela 4.9 – Resultados e modos de ruptura das vigas ensaiadas .....	94
Tabela 4.10 – Comparação da força última de ruptura das vigas da série A.....	95
Tabela 4.11 – Comparação da força última de ruptura das vigas da série B.....	95
Tabela 4.12 – Comparação das forças últimas e dos momentos de inércia das vigas da série B em relação às vigas da série A .....	96
Tabela 4.13 – Valores de ruptura e escoamento experimentais e teóricos .....	96
Tabela 4.14 – Comparativo entre os valores de ruptura e escoamento experimentais e teóricos .....	96
Tabela 4.15 – Deslocamentos máximos no meio do vão .....	105
Tabela 4.16 – Deslocamentos no meio do vão no início da tensão de escoamento .....	106
Tabela 4.17 – Forças máximas nos limites de deslocamentos L/500 e L/250 para as vigas da série A .....	106
Tabela 4.18 – Forças máximas nos limites de deslocamentos L/500 e L/250 para as vigas da série B .....	106
Tabela 4.19 – Comparação entre as vigas da série B em relação às vigas da série A.....	106

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas maiúsculas

A	área bruta da seção transversal da barra
$A_d$	área bruta da mesa comprimida e do respectivo enrijecedor de borda
$A_{ef}$	área efetiva da seção transversal da barra, ou do enrijecedor intermediário ou de borda
$A_{eq}$	área da seção transversal da barra comprimida equivalente
$A_n$	área líquida da seção transversal da barra
$A_s$	área reduzida do enrijecedor de borda
$A_{st}$	área da seção do enrijecedor de borda excluindo qualquer parte de elementos adjacentes
B	distância entre almas
$C_b$	coeficiente de equivalência de momentos na flexão
$C_t$	coeficiente de redução da área líquida
$C_y$	fator de deformação a compressão
$C_w$	constante de empenamento da seção
$C_1$ e $C_2$	coeficientes empregados no cálculo da força resistente de cálculo FRd em almas sem enrijecedores transversais
$C_\theta$	coeficiente empregado no cálculo da força resistente de cálculo FRd em almas sem enrijecedores transversais
D	largura nominal do enrijecedor de borda
E	módulo de elasticidade do aço (205 000 MPa)
$F_{Rd}$	força resistente de cálculo, em geral
$F_{Sd}$	força solicitante de cálculo, em geral
$F_{xx}$	limite de resistência do eletrodo
G	módulo de elasticidade transversal do aço ( $0,385E = 78\,925$ MPa)
I	corrente de soldagem
$I_a$	momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de borda

$I_s$	momento de inércia da seção bruta do enrijecedor, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido
$I_{s,min}$	momento de inércia mínimo do enrijecedor em relação ao plano médio da alma
$I_x; I_y$	momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y, respectivamente
$I_t$	momento de inércia à torção uniforme
$K_x L_x$	comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo x
$K_y L_y$	comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo y
$K_t L_t$	comprimento efetivo de flambagem da barra por torção
$L$	distância entre pontos travados lateralmente da barra - comprimento da barra - comprimento do cordão de solda - vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço - comprimento sem contenção transversal do elemento sujeito à distorção
$L_b$	comprimento do trecho sem contenção lateral
$L_x$	comprimento de flambagem da barra em relação ao eixo x
$L_y$	comprimento de flambagem da barra em relação ao eixo y
$L_t$	comprimento de flambagem da barra por torção
$M_A$	momento fletor solicitante, em módulo, no 1º . quarto do segmento analisado para FLT
$M_B$	momento fletor solicitante, em módulo, no centro do segmento analisado para FLT
$M_C$	momento fletor solicitante, em módulo, no 3º . quarto do segmento analisado para FLT
$M_d$	momento resistente de cálculo da peça fletida
$M_e$	momento fletor de flambagem lateral com torção
$M_{máx}$	momento fletor solicitante máximo, em módulo, no segmento analisado para FLT
$M_{Rd}$	momento fletor resistente de cálculo
$M_{x,Rd}; M_{y,Rd}$	momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos principais x e y, respectivamente
$M_{Sd}$	momento fletor solicitante de cálculo

$M_{x,Sd}; M_{y,Sd}$	momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos principais x e y, respectivamente
$M_{xt,Rd}; M_{yt,Rd}$	momentos fletores resistentes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta
$M_{0,Rd}$	momento fletor resistente de cálculo, obtido com base no início de escoamento da seção efetiva
$M_n$	momento resistente nominal a flexão
$M_y$	momento resistente nominal a tensão de escoamento
$M_{pl}$	momento de plastificação
$N_{et}$	força normal de flambagem elástica por torção
$N_{ex}, N_{ey}$	forças normais de flambagem elástica por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente
$N_{s,Rd}$	força normal de compressão resistente de cálculo do enrijecedor de alma
P	força solicitante aplicada
$Q_t$	quantidade de energia fornecida ao arco de solda
$T_c$	temperatura crítica
$T_p$	temperatura de pico
V	tensão do arco de solda
$V_{Rd}$	força cortante resistente de cálculo
$V_{Sd}$	força cortante solicitante de cálculo
W	módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida
$W_{c,ef}$	módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, referente à flambagem lateral com torção
$W_{ef}$	módulo de resistência elástico da seção efetiva referente ao início de escoamento da seção efetiva
$W_{xt}; W_{yt}$	módulos de resistência elásticos da seção bruta em relação aos eixos x e y, respectivamente, referentes à fibra tracionada

### **Letras romanas minúsculas**

a	distância entre enrijecedores transversais de alma
b	largura do elemento, é a dimensão plana do elemento sem incluir dobras

$b_c$	largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões norm
$b_{ef}$	largura efetiva
$b_1; b_2$	larguras efetivas de elementos enrijecidos submetidos a tensão não uniforme
$b_f$	largura nominal da mesa ou do conjunto mesa - enrijecedores de borda
$b_t$	largura do trecho tracionado de elementos sob gradiente de tensões normai
$b_w$	largura nominal da alma
$c$	comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicad
$d$	largura do enrijecedor de borda
$d_a$	distância entre as fibras tracionadas e comprimidas
$d_c$	distância entre o eixo neutro e a fibra extrema comprimida da seção
$d_{ef}$	largura efetiva do enrijecedor de borda
$d_s$	largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda
$d_t$	distância entre o eixo neutro e a fibra extrema tracionada da seção
$e_a$	fator de redução para computar a perda de calor na soldagem
$f_1, f_2, f_3$	tensões no elemento enrijecido
$f_{cr}$	tensão crítica de flambagem
$f_{máx}$	tensão máxima nas bordas
$f_u$	resistência à ruptura do aço na tração
$f_w$	resistência à ruptura da solda
$f_y$	resistência ao escoamento do aço
$g$	distância entre os parafusos ou soldas na direção perpendicular ao eixo da barra
$h$	largura da alma (altura da parte plana da alma)
$k$	coeficiente de flambagem local da chapa
$k_a$	parâmetro empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local $k$ de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda
$k_v$	coeficiente de flambagem local por cisalhamento
$m$	parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras $f_{yc}$
$q$	valor de cálculo da força uniformemente distribuída de referência empregada no dimensionamento das ligações de barras compostas submetidas à flexão
$r$	raio de giração da seção bruta

$r_e$	raio externo de dobramento
$r_i$	raio interno de dobramento
$r_o$	raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
$r_x$	raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x
$r_y$	raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal y
s	espaçamento dos parafusos ou soldas, na direção do eixo da barra, em barras com seção I compostas por dois perfis U, submetidas à flexão
$s_{máx}$	espaçamento máximo entre as ligações para a formação de uma seção composta
t	espessura da chapa ou do elemento
$t_1, t_2$	espessuras do metal base
$t_{ef}$	dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de penetração ou de filete
$t_p$	tempo de permanência acima da temperatura crítica
$t_s$	espessura do enrijecedor transversal
w	largura do elemento enrijecido
$w_1; w_2$	pernas do filete de solda em superfícies planas
$x_0, y_0$	coordenadas do centro de torção, na direção dos eixos principais x e y, respectivamente
$y_c$	distância entre o eixo neutro da seção bruta e o centróide da barra comprimida equivalente
$y_t$	distância entre o eixo neutro e a extremidade da fibra tracionada

### **Letras gregas**

$\beta$	parâmetro empregado no cálculo do fator de redução associado à flambagem $\rho$
$\gamma$	coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral
$\lambda$	índice de esbeltez
$\lambda_{p0}$	valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento
$\lambda_0$	índice de esbeltez reduzido da barra
$\nu$	coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3
$\theta$	ângulo entre o plano da mesa e o plano do enrijecedor de borda sim
$\rho$	fator de redução associado à flambagem da barra
$\rho_{FLT}$	fator de redução associado à flambagem lateral com torção da barra

$\sigma$	tensão normal, em geral
$\sigma_{\text{dist}}$	tensão convencional de flambagem elástica por distorção
$\Psi$	relação $f_1/f_2$ empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local $k$
$\Delta_t$	variação de tempo na soldagem
$\Phi_b$	relação $f_1/f_2$ empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local $k$
$\varepsilon_y$	deformação específica de correspondente ao limite de escoamento
$\varepsilon_{cu}$	deformação específica de compressão última

## SUMÁRIO

	<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
	<b>RESUMO</b> .....	<b>7</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
	<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>12</b>
	<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.2	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1	BREVE HISTÓRICO SOBRE O USO DO AÇO .....	24
2.1.1	<b>Introdução</b> .....	<b>24</b>
2.1.2	<b>A Revolução industrial</b> .....	<b>26</b>
2.1.3	<b>O aço no Brasil</b> .....	<b>28</b>
2.2	O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	31
2.3	PERFIS FORMADOS A FRIO.....	36
2.3.1	<b>Generalidades</b> .....	<b>36</b>
2.3.2	<b>Evolução dos perfis formados a frio</b> .....	<b>38</b>
2.3.3	<b>Processos de fabricação</b> .....	<b>39</b>
2.3.4	<b>Características do aço</b> .....	<b>42</b>
2.3.5	<b>Instabilidade</b> .....	<b>43</b>
2.4	AÇOS PATINÁVEIS.....	44
2.4.2	<b>Desempenho dos aços patináveis</b> .....	<b>45</b>
2.4.3	<b>Aços patináveis no Brasil</b> .....	<b>46</b>
2.5	PROCESSOS BÁSICOS DE SOLDAGEM.....	47

2.5.2	<b>Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)</b> .....	48
2.5.3	<b>Soldagem a arco submerso (SAW)</b> .....	51
2.5.4	<b>Soldagem com gás de proteção (GMAW)</b> .....	53
2.5.5	<b>Soldagem arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)</b> .....	55
2.5.6	<b>Soldagem eletro-escória (ESW) e soldagem eletro-gás (EGW)</b> .....	55
2.5.7	<b>Fluxos de soldagem e classificação de eletrodos</b> .....	57
2.6	<b>POSIÇÕES DE SOLDAGEM E TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS</b> .....	59
2.7	<b>TIPOS DE SOLDAS</b> .....	61
2.7.1	<b>Soldas de filete</b> .....	61
2.7.2	<b>Soldas em chanfro</b> .....	62
2.7.3	<b>Soldas de tampão em furos e rasgos</b> .....	63
2.8	<b>PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS PARA EMENDAS SOLDADAS</b> .....	64
2.9	<b>BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES</b> .....	66
2.9.1	<b>Resistência dos perfis solicitados à flexão</b> .....	66
2.9.1.1	<i>Momento fletor</i> .....	66
2.9.1.2	<i>Força cortante</i> .....	70
2.9.1.3	<i>Momento com força cortante combinados</i> .....	71
2.9.1.4	<i>Barras compostas submetidas à flexão</i> .....	71
2.10	<b>MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES</b> .....	72
2.10.1	<b>Estados limites últimos</b> .....	72
2.10.2	<b>Estados limites de utilização</b> .....	73
3	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	75
3.1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	75
3.2	<b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO</b> .....	75
3.2.1	<b>Caracterização do aço</b> .....	75
3.2.2	<b>Caracterização da solda</b> .....	77
3.2.2.1	<i>Processo de soldagem dos corpos de prova</i> .....	77
3.3	<b>ENSAIO DAS VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES</b> .....	79
3.3.1	<b>Introdução</b> .....	79
3.3.2	<b>Ensaio experimentais</b> .....	79
3.3.2.1	<i>Esquema de ensaio</i> .....	79
3.3.3	<b>Instrumentação e sistema de aquisição de dados</b> .....	84
3.3.3.1	<i>Atuador hidráulico e célula de carga</i> .....	84
3.3.3.2	<i>Leitura dos deslocamentos verticais</i> .....	85
3.3.4	<b>Leitura das deformações específicas</b> .....	86
3.4	<b>METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DAS VIGAS</b> .....	88

<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>89</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	89
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	89
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização dos aços.....</b>	<b>89</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caracterização da solda.....</b>	<b>90</b>
4.3	ENSAIO DAS VIGAS À FLEXÃO SIMPLES .....	90
<b>4.3.1</b>	<b>Propriedades geométricas.....</b>	<b>91</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Forças e modos de ruptura .....</b>	<b>94</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Deslocamentos verticais .....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Deformações específicas.....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>112</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	112
5.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	112
<b>5.2.1</b>	<b>Caracterização dos aços.....</b>	<b>112</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Caracterização da solda.....</b>	<b>112</b>
5.3	ENSAIOS DAS VIGAS METÁLICAS .....	113
<b>5.3.1</b>	<b>Carga e modos de ruptura.....</b>	<b>113</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Deslocamentos verticais .....</b>	<b>116</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Deformações específicas.....</b>	<b>117</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>119</b>
6.1	SUGESTÕES .....	122
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A – TABELAS E GRÁFICOS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE B – CÁLCULOS DOS VALORES DA TABELA 4.14. ....</b>	<b>146</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Quando se pensa em estruturas metálicas de grande porte como torres de transmissão de energia, pontes metálicas, edifícios de múltiplos andares em aço, hangares e outras construções em que se utiliza a estrutura metálica, todas estas obras não poderiam ter um bom desempenho não fossem a qualidade do projeto, dos materiais envolvidos, dos processos de fabricação e montagem, inspeção e manutenção.

Todo esse elevado grau de tecnologia foi desenvolvido e aplicado para um fim comum, que é assegurar e proteger a vida daqueles que dependem de alguma forma, do bom funcionamento dessas construções.

No mundo moderno, a globalização nestes segmentos industriais fez aumentar o número de projetos e produtos de forma multinacional. Usinas de geração de energia elétrica, plantas petroquímicas, aviões, etc., podem ser projetados em um país e construídos em outro, com equipamentos e matéria prima fornecidos pelo mundo todo. Esta revolução global tem como consequência a corrida por custos menores e pressão da concorrência.

Sendo assim, surgiu-se a necessidade de garantir que os materiais, componentes e processos utilizados tenham a qualidade requerida, garantindo a isenção de defeitos que possam comprometer o desempenho das peças e melhorar os novos métodos e processos de utilização de novos materiais, através de um maior controle de qualidade dos materiais envolvidos no processo.

As estruturas metálicas, principalmente as de perfis formados a frio também dependem desse controle de qualidade em suas emendas soldadas. Por isso a importância de se estudar este tema, pois tal estudo tem o intuito fornecer uma contribuição fundamental para os projetistas, fabricantes e montadores de estruturas metálicas que precisam fazer com que seu produto possa competir com este mercado cada vez mais globalizado e exigente, de forma segura e econômica.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas metálicas constituídas de perfis formados a frio com emendas soldadas, variando o número destas emendas, em seções caixão de perfis enrijecidos onde se utiliza as emendas em determinadas regiões destas seções para que o perfil possa ter certa continuidade e ter condições de ser utilizado como elemento estrutural solicitado por esforços principalmente na flexão simples.

No Brasil há várias marcas de aço patinável, com propriedades físicas, químicas e mecânicas padronizadas por normas. No entanto, foi observado que as propriedades químicas de dois tipos de aço patinável produzidos no Brasil tinham entre si uma pequena variação destas propriedades, respeitando os limites da norma. Foi observado também que em alguns fornecedores não eram feitas distinções entre um aço da marca “A” e um aço da marca “B”, apenas era vendido como aço patinável.

Com isso, este trabalho tem como objetivo também, analisar vigas metálicas constituídas de perfis formados a frio, com e sem emendas soldadas, submetidas à flexão simples, para dois dos principais tipos de aço patinável produzidos no Brasil, o aço USI-SAC 300, de fabricação da Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais – USIMINAS, e o aço CSN COR 420 de fabricação da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, fazendo-se comparação entre estes dois tipos de aço, utilizados na fabricação das vigas ensaiadas.

## 1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

A pesquisa está dividida em seis capítulos. O *Capítulo 1*, Introdução, destaca a importância deste trabalho, sua justificativa, além dos objetivos da pesquisa e estrutura.

O *Capítulo 2* apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre a construção em aço sendo subdividido em itens que contém histórico, utilização, processos de soldagem e a teoria de flexão de barras.

No *Capítulo 3* é detalhado todo o procedimento experimental, as variáveis estudadas e os materiais e métodos empregados.

A apresentação dos resultados dos ensaios está presente no *Capítulo 4* e no *Capítulo 5* faz-se a análise dos mesmos.

O Capítulo 6 registra as considerações finais e algumas sugestões para futuras pesquisas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE O USO DO AÇO**

#### **2.1.1 Introdução**

Desde muitos milhares de anos atrás, os vestígios do homem na Terra são marcados por armas, por instrumentos ou pelo resultado da ação do fogo.

Enquanto desapareciam os animais ferozes, os homens começaram a estabelecer-se fora das grutas e das cavernas, a praticar a agricultura e a domesticar animais. O período correspondente, chamado Período Neolítico ou Nova Idade da Pedra, é aquele em que se constituíram as bases técnicas das nossas civilizações, segundo os historiadores.

Segundo Ducassé (1962), as transições de um grande período histórico para o período seguinte foram sempre graduais, e assim foi a transição da Idade da Pedra para a Idade dos Metais. O cobre era utilizado no Oriente Médio já no quinto milênio antes de Cristo, e talvez também no Egito. O bronze apareceu no Oriente no quarto milênio, e pouco mais tarde no Egeu, mas não surgiu no mediterrâneo ocidental antes do terceiro milênio a.C.

No início a raridade dos metais era tão grande que só eram forjadas armas. A utensilagem corrente continuava a ser de pedra ou de madeira. Por isso, o cobre, o bronze e o ferro não vieram suplantar brutalmente a pedra. Instrumentos de pedra e instrumentos de metal coexistiram até o início dos tempos históricos e, em certos casos, até os nossos dias.

O desenvolvimento da civilização desde o Período Neolítico prossegue através de uma série de culturas, caracterizadas cada uma delas por um conjunto mais ou menos definido de técnicas fundamentais.

O início das civilizações antigas está estreitamente ligado ao progresso dos trabalhos agrícolas. Surgiram as primeiras cidades, alimentadas pelo trabalho das aldeias. Estas cidades dirigiram o comércio, a indústria, a vida social, fixando as tribos. A ceifa fez-se primeiro com foices de madeira ou de barro providas de dentes de sílex, muito cortantes, e depois com foices metálicas.

O uso do cobre, depois do bronze, em seguida do ferro, foi-se definindo pouco a pouco na evolução destas culturas, sem introduzir uma brusca modificação.

Baseada nesta herança, a Antigüidade construiu brilhantes civilizações. Estas ensinaram ao homem a arte de julgar as suas próprias obras, mas não transformaram as suas bases técnicas. Só a Grécia, por meio das suas invenções, conduziu a humanidade por uma nova via, a via da ciência e das suas aplicações, prodigioso desenvolvimento das inspirações primitivas do homem técnico.

O Egito, como a Mesopotâmia, a Índia e a China, foi um foco de civilização, isto é, um centro de cultura humana superior. Semelhantes centros favoreceram sempre o progresso das técnicas antigas e freqüentemente iniciaram mesmo técnicas novas. Exemplos disso foram os progressos da metalurgia, e especialmente da metalurgia do ferro (DUCASSÉ, 1962).

Entre 800 e 400 a. C., o centro Olmeca mais importante situava-se em La Venta, em Tabasco, a sudoeste da atual Tonalá. Nessa época, a cerâmica era mais elaborada, e se organizaram alguns locais de comércio para a importação de jade, minério de ferro, cinábrio (principal minério do mercúrio), a serpentina mineral e outras mercadorias, mas não se conhecem bem os detalhes quanto aos usos desses materiais. Há um fato interessante revelado pela escavação arqueológica: a presença de um tipo de colar feito de pequenos espelhos côncavos de ferro, tendo cada um pequeno furo no centro (RONAN, 1987).

Os Andes Centrais foram o berço de outro grupo de civilizações. Mesmo sem contato direto com a América Central, o desenvolvimento era semelhante. A principal diferença tecnológica era que os povos andinos descobriram como trabalhar ouro, prata e cobre, que usavam em utensílios e jóias.

Segundo Ronan (1987), mesmo nos estágios mais antigos da civilização Inca a maior da América do Sul pré-colombiana, revelaram-se certas características notáveis, o motivo de uma cabeça de felino usada amplamente na decoração e uma grande gama de trabalhos em metal, que inclui a soldagem de ouro fino martelado, ornamentos e pontas de lança de cobre, trabalhos com prata e a preparação de fusões. A fundição com cera também era conhecida. Dois séculos mais tarde os Incas poderiam ser descritos como uma civilização dotada de considerável tecnologia. Praticavam a irrigação e o controle da água em escala maior que seus predecessores, inventaram um método de construção com alvenaria sem cimento, usaram a alavanca e promoveram o emprego de outras ferramentas de metal, e possuíam uma balança de braços.

### 2.1.2 A Revolução industrial

Dentre as descobertas científicas, que gradativamente iam melhorando o processo de produção industrial, merece destaque a utilização do carvão de pedra para redução do minério de ferro, que resultou na localização dos complexos siderúrgicos. A Grã-Bretanha foi, realmente, a maior beneficiária dessa conquista científica, em razão de possuir, em territórios economicamente próximos, jazidas de minério de ferro e de carvão de pedra.

Junte-se a isto toda uma estrutura comercial voltada para o exterior e já se pode vislumbrar o perfil de um país que, praticamente sozinho, foi capaz de deter o privilégio de domínio do mercado internacional de ferro, a ponto de ter sido considerada a “oficina mecânica do mundo”. Na Grã-Bretanha, na realidade, somente a indústria têxtil suplantou a indústria do ferro, na promissora aurora da Revolução Industrial (RONAN, 1987).

Segundo Silva (1986), apesar de não ser o único país a produzir ferro, foi o primeiro a produzi-lo em escala considerável e se beneficiou do monopólio das relações comerciais com o mundo subdesenvolvido, monopólio esse que estabeleceu entre fins do século XVIII e início do século XIX.

A expansão da Revolução Industrial modificou totalmente a metalurgia e o mundo: o uso de máquinas a vapor para injeção de ar no alto-forno, laminares, tornos mecânicos e o aumento de produção transformaram o ferro e o aço no mais importante material de construção. Em 1779, construiu-se a primeira ponte de ferro, em Coalbrookdale, Inglaterra; em 1787, o primeiro barco de chapas de ferro e muitas outras inovações (SILVA, 1986).

Nenhum dos novos usos do ferro, no entanto, contribuiu de maneira mais decisiva para o desenvolvimento da indústria siderúrgica, do que as ferrovias.

Segundo Silva (1986), Somente na década de 1830, graças às encomendas das ferrovias à indústria siderúrgica, a indústria britânica retomou o ritmo de crescimento da última década do século XVIII. Exatamente em 1830, entra em operação a ferrovia Liverpool-Manchester.

O auge da atividade de construção ferroviária se deu em 1847, quando a construção de 10.000 km de ferrovias estava em andamento. Por volta da década de 1850, este período havia passado, e a estrutura básica da rede ferroviária britânica havia sido estabelecida.

Quando a rede ferroviária britânica tinha sido completada, a indústria siderúrgica ampliada foi capaz de suprir matéria-prima para a construção de ferrovias em outros países. Já em 1850 as exportações atingiram 39% do produto bruto da indústria - durante a primeira metade do século eram em média de apenas 25%.

Os investimentos britânicos em ferrovias, fora da Inglaterra, foram o carro-chefe das exportações durante toda a segunda metade do século XIX, representando às vésperas da 1ª Grande Guerra, em 1913, 41% dos investimentos ultramarinos (SILVA, 1986).

Tendo pois, praticamente, concluída sua rede ferroviária, a Grã-Bretanha passou a construir cada vez menos, enquanto crescia a construção de ferrovias na Europa, e nos demais continentes, com destaque para os Estados Unidos que, na década de 1870, construiu 51.000 milhas de estradas de ferro, o que representava tanto quanto havia sido construído, na mesma época, no resto do mundo. Na realidade, a Grã-Bretanha já não estava mais sozinha na exploração do mercado mundial.

Os mercados aproximavam-se da saturação, pois, com suas economias incipientes e dependentes, não tinham capacidade de absorver a produção crescente da indústria britânica. Enquanto isso, os Estados Unidos continuavam com sua produção crescente, já que visavam quase que exclusivamente o mercado interno, de dimensões continentais.

A situação econômica da Grã-Bretanha se deteriorava a tal ponto que os Estados Unidos e a Alemanha, no início da década de 1890, já ultrapassavam a indústria britânica na sua mercadoria essencial, o aço.

Assim, o desenvolvimento da indústria siderúrgica criava sua própria crise e, dessa vez tão séria, a ponto de ser chamada de a “Grande Depressão”. O último quarto do século XIX foi, portanto, caracterizado pela agressão institucionalizada, agora sob a forma do imperialismo, fórmula encontrada para garantir os mercados e prolongar o domínio econômico (SILVA, 1986).

Segundo Silva (1986), na década de 1880 a produção dos altos-fornos dos Estados Unidos tornou-se a maior do mundo, e antes de 1900 a produção de aço norte-americana ultrapassou a da sua rival mais próxima, a Alemanha. Desde aquela data as indústrias siderúrgicas do continente norte-americano ampliaram-se num ritmo extraordinário. Em 1957, os Estados Unidos e o Canadá produziram, conjuntamente, 36,6% do ferro gusa e 36,5% do aço bruto do mundo. O rival mais próximo, a União Soviética, produziu consideravelmente menos da metade desse total.

### 2.1.3 O aço no Brasil

A atividade metalúrgica no início da colonização é exercida pelos artífices ferreiros, caldeireiros, funileiros, latoeiros, sempre presentes nos grupos de portugueses que desembarcavam nas recém-fundadas capitânicas. Por um lado, o artífice rapidamente ampliava suas atividades tornando-se fazendeiro ou comerciante e, por outro, as normas de aprendizado eram abandonadas, especialmente a proibição de acesso de índios e escravos ao ofício.

A matéria-prima sempre foi importada e rara. Assim, os engenhos de açúcar tinham na madeira seu principal material de construção, e metais só entravam nas operações absolutamente imprescindíveis, como os tachos de cobre para o cozimento do melaço, machados, enxadas e foices de ferro (VARGAS, 1994).

Quanto ao ferro é certo que dele se fundiu enquanto houve fábrica em Santo Amaro, nas proximidades de São Paulo, as forjas da região de Biraçoia, anteriores a essa fábrica, segundo alguns textos, e onde o ferro de início passava por prata, só surgiram, de fato, mais tarde, entre 1607 e depois de 1620. Era um ferro brando, mais brando que o de Biscaia, talvez menos temperado, segundo um papel que consta do Livro Primeiro do Governo do Brasil. Cabe ao menos certa importância histórica ao engenho de Santo Amaro, por ser, cronologicamente, o mais antigo de que há notícia no hemisfério ocidental, embora ao de Jamestown, na Virgínia, se dê comumente essa primazia (HOLANDA, 1977).

Segundo Holanda (1977), o minério de ferro foi identificado e explorado desde o século XVI, como atestam as atas da Câmara de São Paulo. Sobre essas primeiras explorações, o Barão Eschwege dá notícia, sem precisar, entretanto, o processo utilizado para a obtenção do ferro.

O ferro forjado produzido no Brasil, cuja destinação maior seria para utensílios, ferragens e armas de fogo, além de não ultrapassar volume extremamente reduzido, devido à dispersão da população, ainda era de qualidade muito baixa, com alto teor de carbono e de escória, produzindo um ferro quebradiço e pouco maleável, de difícil estiramento.

Essa situação seria alterada somente com a vinda da Família Real, quando duas ambiciosas empresas foram elaboradas, ambas com pesados investimentos estatais: o intendente Câmara, em 1808, construiu altos-fornos em Serro Frio, Minas Gerais, e Varnhagen, na mesma época, procurou instalar uma grande siderúrgica em Ipanema,

Sorocaba, próxima às antigas instalações quinhentistas de Afonso Sardinha (VARGAS, 1994).

A utilização de produtos de ferro e aço se limitava, na primeira metade do século XIX, a ferramentas de cultivo da terra e posteriormente, à instalação de engenhos centrais de açúcar. Esta uma inovação trazida pelos europeus para agilizar uma produção que ainda justificava investimentos, em função dos preços compensadores no mercado internacional e até mesmo para baixar o custo de produção, pela sua racionalização. Assim, os ingleses tentaram inclusive instalar no Brasil indústrias de ferro, experiências frustradas também em função da concorrência com produtos similares importados da Inglaterra e da França. Dentre elas, se destaca a Fundação d'Aurora, a Aurora Foundry ou Starr & Cia. , fundada em 1829 pelo inglês Christopher Starr, e que funcionou no Recife até 1873 (SILVA, 1986).

No século XIX, os ingleses dominaram os serviços públicos no Brasil. Quase sempre instalavam esses serviços às próprias expensas. Adquiriam a concessão da exploração por um tempo determinado, suficiente para ressarcir as despesas com o investimento, os custos de manutenção, os honorários e os lucros. É possível, portanto, que eles procurassem maximizar o investimento inicial, visando uma concessão mais longa de exploração dos serviços. É provável também que alguns itens desse investimento inicial não tivessem de ser necessariamente importados, mesmo considerando que muitos produtos industriais para construção civil aqui chegavam com melhor qualidade e melhor preço do que os similares brasileiros.

Um serviço, instalado no Brasil e monopolizado por firmas inglesas, foram as ferrovias, monopólio esse somente rompido no fim do século XIX, pelo concurso dos belgas, mesmo assim para pequenos ramais.

A partir da metade do século, foram construídas várias estradas de ferro no país, para servir essencialmente aos propósitos da exportação de produtos agrícolas. As linhas construídas não eram locadas com os objetivos de facilitar os transportes de pessoas e mercadorias, servir a rede urbana existente e promover o seu desenvolvimento. Visavam, primordialmente, o escoamento da produção local para os portos de exportação. De qualquer forma, desempenharam importante papel no desenvolvimento local. Foi o caso das estradas de ferro que transportaram café, açúcar e algodão para os portos de Santos, Rio de Janeiro, Recife, etc.

Dentre os edifícios pré-fabricados em ferro, importados pelo Brasil, nenhum tipo foi tão útil e tão disseminado quanto os mercados públicos.

O Mercado de São José, no Recife, sem dúvida, é o mais antigo mercado de ferro existente no Brasil e, provavelmente, o pioneiro. A sua montagem final foi concluída em 1875 e está situado no bairro de São José. O mercado jamais deixou de funcionar, desde o dia de sua inauguração.

O Mercado de Peixe, em Belém, por muito tempo conhecido como o Mercado de Ferro, foi inaugurado em 1º de dezembro de 1901. Não se conseguiu precisar a origem da estrutura metálica do edifício, embora se possa asseverar, dado às circunstâncias regionais, que tenha sido importada.

O Mercado Municipal do Rio de Janeiro foi o maior de todos os edifícios de ferro montados no Brasil, de origem européia. Na década de 1950, o mercado municipal foi destruído para a construção de um viaduto, parte de uma das novas avenidas construídas para desafogar o tráfego de veículos automotores.

Passados trinta e três anos do estrondoso sucesso do Palácio de Cristal de Londres, o Brasil também inaugurou o seu. Certamente, a denominação que o edifício recebeu aqui se deve à similaridade do material empregado nos dois pavilhões e aos efeitos plásticos conseguidos, mantidas as devidas proporções.

O edifício existe hoje, no mesmo lugar onde foi primitivamente montado: numa praça situada na confluência dos rios Piabanha e Quitandinha, na cidade de Petrópolis. Atualmente, abriga exposições temporárias de arte, cumprindo objetivos propostos há um século. É todo em ferro e vidro (SILVA, 1986)

O Brasil conta com a maior população de qualquer país latino americano bem como com o maior consumo de produtos de aço. Possui, além disso, as mais altas jazidas de minério de alto teor do continente, e também generosa parcela dos escassos recursos carboníferos da América Latina. Antes da Segunda Grande Guerra, existiam várias pequenas empresas siderúrgicas, com uma produção conjunta inferior a 100.000 toneladas de aço. Achava-se localizada perto das jazidas de minério de Itabira, sendo que algumas das usinas utilizavam carvão vegetal como combustível.

Em 1940, constituiu-se a CSN com o objetivo de construir-se uma grande usina moderna integrada. O país importava praticamente todo o aço de que necessitava, tanto que as instalações industriais da própria CSN foram construídas com estruturas fornecidas por empresas estrangeiras

A entrada em operação, nos anos sessenta, da COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista, e da USIMINAS - Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais - favoreceu uma notável expansão da oferta de produtos laminados planos no mercado.

Na década seguinte a indústria siderúrgica se consolidou como indústria de base, diminuindo consideravelmente as importações de produtos siderúrgicos.

Com a ampliação e a modernização das nossas usinas, processou-se um efeito multiplicador que permitiu alcançar elevados índices de produtividade e de qualidade. Passamos da tradicional condição de importadores para a de exportadores de aço (DIAS, 1993).

## 2.2 O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Há um momento na História em que o ferro passa a ser empregado com tão diversificados fins, dentre eles a construção de edifícios, que é inevitável o registro desse material como um fator essencial para as transformações de toda ordem por que passou a sociedade. Este momento é o século XIX.

Já no final do século XVIII, por ocasião do que se convencionou chamar de Primeira Revolução Industrial, o ferro, entre outros produtos industriais, surgiu como um material em condições de competir com os materiais de construção conhecidos e sacralizados até então, no que se refere a preço e outras qualidades.

A urbanização, acentuada nos países em fase de industrialização, mas também evidente em portos que, apesar de situados em regiões subdesenvolvidas, desempenhavam importante papel para a comercialização dos produtos industrializados, foi um fator decisivo para o surgimento de necessidades, que teriam de ser atendidas por novos edifícios e novos serviços. Em determinado momento, se chegou a pensar que o ferro viria substituir quase todos os materiais até então existentes. Em Londres, chegou a ser experimentado um tipo de pavimentação com esse material.

Segundo Silva (1986), também existia, por parte dos produtores, uma incontida ansiedade por provar a viabilidade do novo material, justificada pelos desejados lucros nos negócios de produção das encomendas.

Com o aparecimento das ferrovias surgiu a necessidade de se construírem numerosas pontes e estações ferroviárias, tendo sido estas as duas primeiras grandes

aplicações do ferro nas construções. As pontes metálicas eram feitas inicialmente com ferro fundido, depois com aço forjado e posteriormente passaram a ser construídas com aço laminado.

Na realidade, não se deve atribuir somente às potencialidades plásticas do ferro fundido, nem às possibilidades estruturais do aço, o teor revolucionário do novo material. O que o ferro tinha de mais novo era a sua escala de produção, que era industrial, e que se contrapunha a todo um processo de execução das construções até então (SILVA, 1986).

Algumas obras notáveis, de estrutura metálica, ainda em uso: a já referida ponte Coalbrookdale (Inglaterra), em ferro fundido, vão de 31 m, construída em 1779; Britannia Bridge (Inglaterra), viga caixão, com dois vãos centrais de 140 m, construída em 1850; Brooklin Bridge (New York), a primeira das grandes pontes pênséis, 486 m de vão livre, construída em 1883; ponte ferroviária Firth of Forth (Escócia), viga Gerber com 521 m de vão livre, construída em 1890; Torre Eiffel (Paris), 312 m de altura, construída em 1889; Empire State Building (New York), 380 m de altura, construído em 1933; Golden Gate Bridge (San Francisco), ponte pênsil com 1280 m de vão livre, construída em 1937; Verrazano - Narrows Bridge (New York), ponte pênsil com 1298 m de vão livre, construída em 1964 e World Trade Center (New York), 410 m de altura, 110 andares, construído em 1972.

O que se convencionou chamar de Escola de Chicago costuma aparecer como um episódio isolado na história da arquitetura, e até mesmo surpreendente. Esquece-se de que os Estados Unidos da América do Norte produziram ferro com relativa abundância a partir de meados do século XIX, já conheciam e utilizavam os modelos de estruturas em ferro fundido criados para resolver os problemas de riscos de incêndio em fábricas de tecido inglesas (SILVA, 1986).

A importância da Escola de Chicago é tripla. Encara-se, com mente aberta, a tarefa de construir edifícios comerciais, e encontra-se a melhor solução em termos funcionais. Surgiu uma técnica de construção não-tradicional para preencher as necessidades do trabalho, e ela foi imediatamente aceita (PEVSNER, 1986).

Segundo, Pevsner (1986), o triunfo da arquitetura em ferro chegou também na França, na exposição de 1889, centrado na conquista de novos materiais por novos arquitetos. A Torre Eiffel, por sua altura e localização, tornava-se imediatamente um dos principais componentes da cena arquitetônica de Paris.

Desde o século XVIII, quando se iniciou a utilização de estruturas metálicas na construção civil até os dias atuais, o aço tem possibilitado aos arquitetos, engenheiros e

construtores, soluções arrojadas, eficientes e de alta qualidade. Das primeiras obras, como a Ponte Ironbridge na Inglaterra, em 1779 os ultra-modernos edifícios que se multiplicaram pelas grandes cidades, a arquitetura em aço sempre esteve associada à idéia de modernidade, inovação e vanguarda, traduzida em obras de grande expressão arquitetônica e que invariavelmente traziam o aço aparente (COSIPA, 2003).

No entanto, as vantagens na utilização de sistemas construtivos em aço vão muito além da linguagem estética de expressão marcante; redução do tempo de construção, aumento da produtividade e racionalização no uso de materiais e mão-de-obra, passaram a ser fatores chave para o sucesso de qualquer empreendimento. Essas características que transformaram a construção civil no maior mercado para os produtores de aço no exterior, começam agora a serem percebidas por aqui.

A competitividade da construção metálica tem possibilitado a utilização do aço em obras como: edifícios de escritórios e apartamentos, residências, habitações populares, pontes, passarelas, viadutos, galpões, supermercados, shopping centers, lojas, postos de gasolina, aeroportos e terminais rodoferroviários, ginásios esportivos, torres de transmissão, etc.

Segundo a COSIPA (2009), o sistema construtivo em aço apresenta algumas vantagens significativas, dentre as quais, as principais vantagens são citadas abaixo:

- a) liberdade no projeto de arquitetura porque a tecnologia do aço confere aos arquitetos total liberdade criadora, permitindo a elaboração de projetos com expressão arquitetônica marcante;
- b) maior área útil, pois as seções dos pilares e vigas de aço são substancialmente mais esbeltas do que as equivalentes em concreto, resultando em melhor aproveitamento do espaço interno e aumento da área útil, fator muito importante principalmente em garagens;
- c) flexibilidade, porque a estrutura metálica mostra-se especialmente indicada nos casos onde há necessidade de adaptações, ampliações, reformas e mudança de ocupação de edifícios. Além disso, torna mais fácil a passagem de utilidades como água, ar condicionado, eletricidade, esgoto, telefonia, informática, etc.;
- d) compatibilidade com outros materiais, devido o sistema construtivo em aço ser perfeitamente compatível com qualquer tipo de material de fechamento, tanto vertical como horizontal, admitindo desde os mais convencionais como tijolos e blocos, lajes

moldadas in loco, até componentes pré-fabricados como lajes e painéis de concreto, painéis "dry-wall", etc.;

e) menor prazo de execução, pois a fabricação da estrutura pode ser realizada em paralelo com a execução das fundações, dando a possibilidade de se trabalhar em diversas frentes de serviços simultaneamente. A estrutura de aço contribui também com a diminuição de formas e escoramentos, e, além disso, o fato da montagem da estrutura não ser afetada pela ocorrência de chuvas, pode levar a uma redução de até 40% no tempo de execução, quando comparado com os processos convencionais;

f) racionalização de materiais e mão-de-obra. Numa obra, através de processos convencionais, o desperdício de materiais pode chegar a 25% em peso. A estrutura metálica possibilita a utilização de sistemas industrializados, fazendo com que o desperdício seja reduzido;

g) alívio de carga nas fundações por serem mais leves, as estruturas metálicas podem reduzir em até 30% o custo das fundações;

h) garantia de qualidade, pois a fabricação de uma estrutura metálica ocorre dentro de uma indústria e conta com mão-de-obra altamente qualificada, o que dá ao cliente a garantia de uma obra com qualidade superior devido ao rígido controle existente durante todo o processo industrial;

i) antecipação do ganho função da maior velocidade de execução da obra, havendo um ganho adicional pela ocupação antecipada do imóvel e pela rapidez no retorno do capital investido;

j) organização do canteiro de obras. Como a estrutura metálica é totalmente pré-fabricada, há uma melhor organização do canteiro devido, entre outros, à ausência de grandes depósitos de areia, brita, cimento, madeiras e ferragens, reduzindo também o inevitável desperdício desses materiais. O ambiente limpo com menor geração de entulho, oferece ainda melhores condições de segurança ao trabalhador contribuindo para a redução dos acidentes na obra.

k) precisão construtiva. Enquanto nas estruturas de concreto a precisão é medida em centímetros, numa estrutura metálica a unidade empregada é o milímetro. Isso garante uma estrutura perfeitamente aprumada e nivelada, facilitando atividades como o assentamento de esquadrias, instalação de elevadores, bem como redução no custo dos materiais de revestimento;

l) reciclabilidade, pois o aço é 100% reciclável e as estruturas podem ser desmontadas e reaproveitadas;

m) preservação do meio ambiente. A estrutura metálica é menos agressiva ao meio ambiente pois, além de reduzir o consumo de madeira na obra, diminui a emissão de material particulado e poluição sonora geradas pelas serras e outros equipamentos destinados a trabalhar a madeira.

No entanto, como em todos os tipos de sistemas estruturais, o sistema construtivo em aço também requer alguns cuidados quando à sua utilização, dentre as quais, alguns destes cuidados estão relacionados abaixo:

a) especificação correta de proteção anticorrosiva, pois mesmo em um aço de alta resistência à corrosão, é necessário que se faça uma proteção contra os agentes agressivos;

b) o cálculo em alguns casos deve-se considerar efeitos de segunda ordem, instabilidade, fadiga, temperatura, plasticidade;

c) o projeto deve ter detalhamento rigoroso das peças, pois em estruturas de aço as medidas geralmente são em milímetros;

d) a fabricação e montagem requer pessoal mais qualificado e bem treinado;

e) o canteiro de obras deve ser organizado de maneira a facilitar a montagem;

f) deve haver a preocupação da interface do aço com outros materiais.

Dentre as várias utilizações do aço em estruturas, foi possível aqui abordar as utilizações mais comuns que são:

a) edifícios industriais, comerciais, residenciais e públicos;

b) pontes, passarelas, viadutos e pistas elevadas;

c) silos;

d) reservatórios de água;

e) torres de transmissão;

f) subestações;

g) comportas;

h) chaminés;

i) calhas;

j) plataformas;

- k) coberturas planas e espaciais;
- l) hangares;
- m) mezaninos;
- n) formas para concretagem;
- o) tubulações e suporte para tubulações;
- p) estruturas transportadoras;
- q) grades, portões, grelhas, escadas, elevadores e guinchos.

## 2.3 PERFIS FORMADOS A FRIO

### 2.3.1 Generalidades

Segundo a própria definição presente na norma NBR 14762(2001), perfil estrutural de aço formado a frio é aquele obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de lâminas recortadas de chapas ou tiras, ou por perfilagem, em mesas de roletes, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, sendo ambas as operações realizadas com aço em temperatura ambiente.

Os perfis de aço formado a frio ou perfis de chapa dobrada, dada a grande variedade de formas de seções transversais que podem ser obtidas e da boa relação massa/resistência, alcançaram lugar de destaque entre as estruturas metálicas, porém esta vantagem traz algumas dificuldades para os projetistas de estruturas metálicas constituídas desse tipo de perfil. Esses perfis são mais suscetíveis à instabilidade que os perfis laminados e soldados, estando sujeitos ao modo de falha por instabilidade sob carregamentos menores àqueles que correspondem a plastificação parcial ou total da sua seção (CARDOSO, 2003).

Na construção metálica em aço de edificações comuns são utilizados para a composição estrutural dos elementos os perfis do tipo laminado, soldado e formado a frio. Estes perfis são normalmente divididos em duas classes em razão da natureza de normalização referente a dimensionamento.

Os perfis laminados do tipo americano e os perfis constituídos por chapas planas e soldadas constituem uma classe e são dimensionados conforme rege a NBR 8800(2008). Os perfis formados a frio representam outra classe e são dimensionados pela NBR 14762(2001).

Os perfis laminados do tipo americano eram utilizados extensivamente na construção metálica brasileira, mas, atualmente nota-se um movimento de substituição por alternativas mais econômicas através de perfis soldados e formados a frio. Ambos fornecem inúmeras vantagens à construção civil e são hoje opções competitivas no mercado frente a outros tipos de materiais. Entretanto, cada classe pode responder de maneira mais eficiente e econômica de acordo com as necessidades de projeto.

A classe dos perfis formados a frio em relação aos laminados/soldados possui certas vantagens em algumas condições. Para obras de grande porte, onde existe a predominância de carregamentos de maior intensidade, as melhores soluções para a constituição da estrutura principal são os perfis laminados/soldados. Porém, em elementos secundários, tais como terças e longarinas os perfis formados a frio fornecem melhores alternativas. Já em obras de pequeno porte, numa situação em que são cargas menores dificilmente os perfis formados a frio perdem espaço de aplicação (SILVA, 2007).

Esses perfis possuem, geralmente, espessuras reduzidas, normalmente menores que 6,35mm. Uma vantagem deste tipo de perfil está relacionada à diversidade geométrica.

Assim como os perfis laminados, os perfis formados a frio podem sofrer os fenômenos de flambagens globais ou locais, porém, a elevada relação largura/espessura dos elementos planos acentua a ocorrência da instabilidade local como também a outro tipo de flambagem, denominada distorcional (DAVID, 2003).

Os fenômenos de instabilidade global são caracterizados pela ocorrência de deformação do eixo do perfil, enquanto que as seções transversais sofrem somente deslocamento de corpo rígido no seu próprio plano. Como exemplo cita-se a instabilidade lateral de vigas por flexo-torção (DAVID, 2003).

O fenômeno de instabilidade local é caracterizado por uma flambagem de chapa envolvendo, principalmente, deformações das paredes do perfil, enquanto a posição das arestas dos cantos dobrados da seção permanece reta (DAVID, 2003).

O modo distorcional é um modo torcional de um trecho da seção, sendo que tal modo se desenvolve segundo meias ondas ao longo do comprimento do perfil. Pode constituir-se no modo crítico de flambagem em perfis de seção aberta e paredes delgadas (DAVID, 2003).

Os perfis com mesas largas e com enrijecedores de borda como, por exemplo, perfis U e Z enrijecidos, cartola e *rack* são os mais sensíveis à distorção (DAVID, 2003).

### 2.3.2 Evolução dos perfis formados a frio

O uso dos elementos de chapa dobrada na construção de edifícios começou por volta de 1850 nos Estados Unidos e Inglaterra (YU, 1985).

As pesquisas sobre este material iniciaram-se em 1939, na Universidade de Cornell sob a orientação do professor George Winter. Em 1940, com a publicação do livro “Thin-Walled Elastic Beams”, de autoria de Vlasov, os estudos sobre o comportamento de seções delgadas tiveram um grande avanço. Em seu livro, Vlasov expôs sua teoria sobre o efeito do empenamento elástico de vigas com paredes finas, sendo seu método de análise baseado nas propriedades setoriais da seção transversal de vigas, para as quais a relação largura-espessura das paredes é superior a dez. Vlasov foi um dos primeiros a compreender que o princípio de Bernoulli, aplicável aos elementos de paredes espessas, não pode mais ser evocado quando se trata de seções com paredes finas (SILVA, 1995).

No ano de 1940, iniciou-se o emprego de elementos estruturais em chapa dobrada em maior escala na construção civil e no uso militar, principalmente com a segunda guerra mundial, que contribuiu significativamente para o aumento do consumo de elementos de aço.

Mas, foi a partir do ano de 1946 que o uso e o desenvolvimento de perfis com paredes finas, constituídas em aço, foi incentivado nos Estados Unidos, onde surgiu a primeira norma para projetos e construções de estruturas constituídas de perfis de chapa dobrada, publicada pelo *American Iron and Steel Institute* – AISI. A especificação foi baseada em sua maioria, nos resultados obtidos da pesquisa realizada na Universidade de Cornell, sob a orientação de George Winter.

Em 1967, foi criada no Brasil a NB-143, “Cálculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves”, baseada nas especificações de AISI de 1962. Com a evolução de tecnologias para a utilização de perfis formados a frio, esta norma ficou então desatualizada, fazendo com que projetistas e fabricantes de estruturas de leves utilizassem normas estrangeiras para o desenvolvimento de estruturas de perfis formados a frio.

Devido à necessidade de uma norma brasileira que contemplasse a necessidade dos projetistas e fabricantes de estruturas leves, foi criada em 2001 a NBR 14762 – “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento”.

Esta Norma, elaborada com base em informações técnicas e requisitos atualizados apresentados pelas mais conceituadas e difundidas normas estrangeiras sobre o tema,

incorpora também aspectos particulares da realidade brasileira e apresenta compatibilidade de termos, notação e coeficientes de ponderação das ações e das resistências com as demais Normas Brasileiras sobre projeto estrutural, que estão em processo de revisão ou foram recentemente revisadas (NBR 14762, 2001).

### 2.3.3 Processos de fabricação

Segundo Silva (2007), a obtenção dos perfis formados a frio é dividida basicamente em dois tipos de processos de fabricação:

- Perfilação;
- Dobramento.

Os processos de fabricação dos perfis conceitualmente não diferem um do outro. O conceito está na preparação da chapa seguida da conformação mecânica, com as características pré-definidas. Na preparação busca-se obter lâminas de aço nas larguras correspondentes aos desenvolvimentos das características dos perfis desejados como mostra a figura 2.1.



Figura 2.1 – Lâminas ou tiras de aço (OLIVEIRA, 2001)

A obtenção da lâmina é realizada através de corte por guilhotinas ou por tesouras rotativas, a partir de chapas de aço virgem laminados a quente ou a frio.

As figuras 2.2 e 2.3. mostram estes dois processos de obtenção da lâmina.



**Figura 2.2 – Guilhotina (OLIVEIRA, 2001)**



**Figura 2.3 – Tesoura rotativa (OLIVEIRA, 2001)**

No processo por dobramento utilizam-se lâminas de aço e no processo por perfilação bobinas ou lâminas de aço, conforme o comprimento do perfil especificado.

As figuras 2.4 e 2.5, mostram, um tipo de perfiladeira e um tipo de dobradeira utilizadas para a obtenção de perfis pelo processo de perfilagem e dobragem respectivamente.



**Figura 2.4 – Perfiladeira (OLIVEIRA, 2001)**



**Figura 2.5 – Dobradeira (OLIVEIRA, 2001)**

Hoje em dia existem empresas no mercado com capacidade de produção de perfis com excelente qualidade e com sistemas totalmente automatizados. Assim, obtendo produtos com elevada produtividade. O avanço tecnológico possibilitou maior flexibilidade nas formas da seção transversal com maior capacidade de enrijecimento das mesmas como mostra a figura 2.6. O uso de ligas de aço com alto grau de qualidade e resistência mecânica e o incremento no desenvolvimento de sistemas construtivos. Em razão disso, a pesquisa científica foi impulsionada na busca de soluções e metodologias de cálculo para o domínio do conhecimento e do comportamento estrutural desses perfis.



Figura 2.6 – Exemplos de seções de perfis formados a frio(DAVIES, 2000)

#### 2.3.4 Características do aço

Para se compreender o comportamento das estruturas de aço é essencial que o calculista esteja familiarizado com as propriedades do aço. Os diagramas tensão-deformação representam uma informação valiosa e necessária para se entender como será o comportamento do aço em uma determinada situação.

O conhecimento das características de elasticidade e fadiga de um metal é bom para avaliar sua aplicação para a construção de um membro estrutural e para determinado uso particular.

Elasticidade é a capacidade que têm os metais de voltar à sua forma original após sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento.

A fadiga de um metal ocorre quando ele é submetido a solicitações repetidas de tensões acima de sua capacidade limite, através de sucessivos ciclos de carga e descarga.

Ductilidade é a capacidade que tem o metal de se deixar deformar sem sofrer fraturas na fase inelástica, além do seu limite elástico.

Submetido a uma carga de tração, em estado de tensão simples, ocorre, no aço, um exato limite de escoamento sob uma tensão somente levemente superior ao limite elástico.

Os valores mínimos das especificações do limite de escoamento, índice de ductilidade e química, acham-se estabelecidos pelas normas correspondentes.

As propriedades mecânicas do aço estrutural, que descrevem sua resistência, ductilidade, e assim por diante, são dadas em termos do comportamento de um teste de tração simples. O limite de escoamento do aço varia de acordo com a temperatura, rapidez do ensaio e as características do corpo de prova como dimensão, forma e o acabamento da superfície. Após o escoamento inicial, o corpo-de-prova alonga-se na fase plástica sem mudança apreciável na tensão aplicada. Por outro lado, escoamentos ocorrem em muitas regiões localizadas, as quais encruam o material, devidamente tensionado, de modo a forçar escoamentos em um novo local (BELLEI, 2004).

### 2.3.5 Instabilidade

Os perfis de chapa dobrada estão sujeitos ao modo de falha por instabilidade sob carregamentos frequentemente menores que aqueles que correspondem à plastificação total ou parcial da sua seção transversal.

A instabilidade do perfil pode ser classificada como sendo do tipo local ou global, podendo ocorrer simultaneamente. A ocorrência de um ou de outro tipo de instabilidade está condicionada às características geométricas dos perfis e às condições de vínculos e de carregamentos.

A determinação do carregamento crítico para o elemento pode ser feita através da aplicação da teoria clássica da flambagem de chapas.

Ressalta-se que a ocorrência da flambagem local não ocasiona, em geral, o fim da capacidade resistente do perfil. Excedida a carga crítica da chapa ocorre uma redistribuição das tensões atuantes, produzindo efeito estabilizante na chapa. Este comportamento pós-crítico, analisado à luz da teoria das chapas com grandes deslocamentos, pode ser levado em consideração através do conceito da largura efetiva, largura fictícia sujeita a uma distribuição uniforme de tensão (JAVARONI, 1999).

Um outro modo de instabilidade local que pode caracterizar a falha do perfil é aquele onde ocorre a distorção da seção transversal em seu próprio plano, envolvendo deslocamentos laterais e rotações das partes componentes do perfil. Este tipo de instabilidade, instabilidade por distorção, pode ocorrer em perfis cujas partes comprimidas da seção transversal não possuem contenção lateral. Este fenômeno pode ocorrer em situações tais como:

- a) terças de coberturas conectadas às telhas de aço, quando submetidas aos efeitos de sucção devido ao vento;
- b) perfis tipo U e tipo Z submetidos à flexão;
- c) perfis tipo U e tipo Z utilizados como vigas contínuas de piso onde as mesas inferiores não apresentam contenção lateral nas regiões de momento fletor negativo.

Também para a flambagem lateral de viga, a reserva de resistência pós-crítica é pequena e corresponde a deslocamento exagerados para o uso corrente da estrutura.

Deve-se observar que a ocorrência dos modos de instabilidade local e global podem interagir, ocorrendo simultaneamente em uma mesma barra.

Essa interação é tratada através do método da largura efetiva, modificando-se a seção transversal da barra.

## 2.4 AÇOS PATINÁVEIS

Todos os aços contêm pequenas quantidades de elementos de liga, tais como carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre, seja porque estes integravam as matérias-primas com que foram fabricados, seja porque lhes foram deliberadamente adicionados, para lhes conferirem determinadas propriedades. De modo geral, as adições são pequenas, de no máximo 0,5 a 0,7% da massa total do metal, proporção em que tais elementos não têm qualquer efeito apreciável sobre a resistência deste à corrosão atmosférica. As pequenas variações de composição que inevitavelmente ocorrem durante o processo de fabricação do metal tampouco afetam significativamente suas características. (PANNONI E WOLYNEC, 1989).

Entretanto, existem exceções. Sabe-se há mais de 80 anos, por exemplo, que a adição de pequenas quantidades de cobre, fósforo e outros elementos têm um efeito benéfico sobre os aços, reduzindo a velocidade em que são corroídos, quando expostos ao ar.

Mas o grande estímulo ao emprego de aços enriquecidos com esses elementos chamados aços de baixa liga foi dado pela companhia norte-americana United States Steel Corporation que, no início da década de 1930, desenvolveu um aço cujo nome comercial era Cor-Ten (PANNONI, 2004).

O aço Cor-Ten foi desenvolvido originalmente para a indústria ferroviária, e sua grande virtude aparente era permitir a construção de vagões mais leves. A propriedade de resistir à corrosão foi alcançada por casualidade, embora desde o fim do século XIX já se conhecessem as influências benéficas do cobre e do fósforo (PANNONI, 2004).

Em 1958, o arquiteto norte americano Eero Saarinen utilizou-o na construção do edifício administrativo da Deere & Company, em Moline, no estado de Illinois figura 2.7. O aço foi deixado aparente nessa obra, tendo o arquiteto considerado que a ferrugem que sobre ele se formava constituía por si mesma um revestimento não só aceitável, como atraente. A partir daí, os aços patináveis foram utilizados com sucesso em inúmeras obras de arquitetura (PANNONI, 2004).



Figura 2.7 – Centro administrativo Deere & Company (JOHN DEERE, 2009)

#### 2.4.2 Desempenho dos aços patináveis

O que distingue os aços patináveis dos aços comuns, no que diz respeito à resistência à corrosão, é o fato de que, sob certas condições ambientais de exposição, ele pode desenvolver em sua superfície uma película de óxidos aderentes e protetores, chamada de pátina, que atua reduzindo a velocidade do ataque dos agentes corrosivos presentes no meio ambiente.

A formação da pátina é função de três tipos de fatores. O primeiro a destacar está ligado à composição química do próprio aço. Os principais elementos de liga que contribuem para aumentar-lhe a resistência frente à corrosão atmosférica, favorecendo a formação da pátina, são o cobre e o fósforo. O cromo, o níquel e o silício também exercem efeitos secundários (PANNONI E MARCONDES, 1991). Cabe observar, no entanto, que o fósforo deve ser mantido em baixos teores (menores que 0,1%), sob pena de prejudicar certas propriedades mecânicas do aço e sua soldabilidade.

Em segundo lugar vêm os fatores ambientais, entre os quais sobressaem a presença de dióxido de enxofre e de cloreto de sódio na atmosfera, a temperatura, a força (direção, velocidade e frequência) dos ventos, os ciclos de umedecimento e secagem, etc. Assim, enquanto a presença de dióxido de enxofre, até certos limites, favorece o desenvolvimento da pátina, o cloreto de sódio em suspensão nas atmosferas marítimas prejudica suas propriedades protetoras. Não se recomenda a utilização de aços patináveis não protegidos em ambientes industriais onde a concentração de dióxido de enxofre atmosférico

seja superior a  $250\text{mg/m}^2$  e em atmosferas marinhas onde a taxa de deposição de cloretos exceda  $300\text{mg/m}^2/\text{dia}$  (CORUS, 2004).

Os ventos, que carregam agentes agressivos até o local em que se encontra o metal, tem importante efeito sobre os ciclos de umedecimento e secagem, considerados essenciais no desenvolvimento de películas protetoras. O efeito da temperatura, embora provável, ainda não foi claramente caracterizado.

Finalmente, há fatores ligados à geometria da peça, que explicam por que diferentes estruturas do mesmo aço dispostas lado a lado podem ser atacadas de maneira distinta.

Esse fenômeno é atribuído à influência de seções abertas/fechadas, drenagem correta das águas de chuva e outros fatores que atuam diretamente sobre os ciclos de umedecimento e secagem. Assim, por exemplo, sob condições de contínuo molhamento, determinadas por secagem insatisfatória, a formação da pátina fica gravemente prejudicada. Em muitas destas situações, a velocidade de corrosão do aço patinável é semelhante àquela encontrada para os aços carbono comuns.

### 2.4.3 Aços patináveis no Brasil

No Brasil há vários fabricantes de aço patinável, permitindo com isso uma maior possibilidade de escolha por parte de projetistas e de empresas fabricantes de estruturas metálicas, com qual marca deste aço irá projetar e/ou fabricar sua estrutura metálica. As propriedades químicas destes aços têm uma pequena variação entre si de acordo com o fabricante, nas quantidades máximas e mínimas da sua composição conforme manuais destes fabricantes, como é apresentado nas tabelas 2.1 e 2.2, que mostram a composição química dos aços USI-SAC 300 e CSN COR 420.

**Tabela 2.1 – Composição química do aço USI-SAC 300 (USIMINAS, 2009)**

Aço	Espessura (mm)	Composição química (%)											
		C máx.	Mn máx.	Si	P	S máx.	Cu	Ni	S	Ti	Nb	Al	Cr
USI-SAC-300	2,00 - 12,70	0,18	1,30	0,5 - 1,5	0,01-0,06	0,030	0,05 - 0,40	≤ 40	*	≤ 0,15	≤ 0,05	*	*
COR 420	2,00 - 5,00	0,17	1,00	0,015 - 0,070	<0,025	0,025	0,35	*	<0,025	≤ 0,15	≤ 0,05	0,015 -	0,55 - 0,80

\* Valores não especificados

Os valores mínimos das propriedades mecânicas destes dois tipos de aço são mostrados nas tabelas 2.3 e 2.4.

**Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas dos aços USI-SAC 300 e CSN COR 420 (USIMINAS, 2009; CSN, 2009)**

Aço	Propriedades mecânicas					Dobramento a 180°
	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa) mín.	Alongamento			
			Espessura	Base de medida (mm)	Valor min. (%)	
USI-SAC 300	≥ 300	≥ 420	2,0 - 5,0	50	19	1,5 e
			5,0 - 12,7	200		
CSN COR 420	300	420	1,8 ≤ e ≤	20	20	1,5 e

## 2.5 PROCESSOS BÁSICOS DE SOLDAGEM

A soldagem é a técnica de unir duas ou mais partes construtivas de um todo, assegurando entre elas a continuidade do material e em consequência suas características mecânicas e químicas. A utilização da soldagem existe a cerca de 3.000 anos a.C., quando em Ur, hoje a Rússia, se usava a técnica hoje conhecida como soldabrasagem para unir peças de ouro, obtendo-se trabalhos de ótima qualidade (BELLEI, 2004).

Segundo Bellei(2004), soldagem moderna existe desde a década de 20, quando começou a ser mais utilizada na engenharia estrutural, compreendendo edifícios e pontes. Como marco, pode-se citar:

- a) A construção em Toronto, no Canadá, em 1927, de uma ponte com comprimento de 150m inteiramente soldada;
- b) A construção nos EUA, em 1927, do primeiro edifício de grande porte, também todo soldado (Edifício Sharon);
- c) Em Turtle Creeck, Pensilvânia, EUA, é construída, também em 1927, a primeira ponte ferroviária inteiramente soldada;
- d) Em 1930 são feitas nos EUA as primeiras normas de especificações de eletrodos revestidos;
- e) Em 1935 foram desenvolvidos os processos de soldagem a arco submerso e o processo TIG.

Existem hoje inúmeros processos de soldagem, aprimorados e desenvolvidos após a segunda guerra mundial. Entre os mais utilizados em estruturas metálicas, pode-se citar:

- f) Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW);
- g) Soldagem a arco submerso (SAW);
- h) Processos MIG, MAG, TIG ou soldagem em atmosfera gasosa (GMAW);
- i) Processo de arame tubular (FCAW);
- j) Processo de soldagem eletroescória.

Para se ter uma união soldada eficaz tem alguns itens a se observar, como por exemplo: a forma correta do entalhe, a homogeneidade do metal depositado e compatibilidade entre o metal da solda e o metal base (PINHEIRO, 2003).

Para cada tipo de aço existe um tipo de eletrodo compatível. Para os aços estudados nesse trabalho, conforme especificações técnicas do fabricante do aço, do fabricante do eletrodo e da ASME SFA-5.5, é utilizado o eletrodo AWS E 7018-W1, comercialmente conhecido como OK 73.03 (ESAB, 2008), para o processo de soldagem com arco elétrico revestido.

### **2.5.2 Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)**

Segundo Wainer et al. (1995), este processo teve início no começo do século, com a utilização de arames nus para cercas, ligados à rede elétrica. Arames enferrujados ou cobertos de cal, proporcionavam uma melhor estabilidade do arco, deste modo no início da primeira década o revestimento ácido foi adotado.

Revestindo o arame com asbestos (pó de silicato), a poça de solda ficava protegida, enquanto o uso de algodão aumentava a penetração do arco, dando início ao revestimento celulósico. Em meados da década de 30 desenvolveram-se os revestimentos rútilicos. No início da década de 40 desenvolveram-se os revestimentos básicos, e em meados da década de 50 adicionou-se o pó de ferro. No Brasil esse processo é muito utilizado, sendo empregado em grande variedade de aplicações, principalmente em soldagens de campo.

Em uma soldagem executada com um eletrodo nu, segundo Quites & Dutra (1979), após a fusão no ar, o eletrodo perde por oxidação grande quantidade de seu carbono, manganês e silício, enquanto que o nitrogênio existente no ar forma nitretos. Esses nitretos juntamente com os óxidos formados, ficam confinados na solda reduzindo sua resistência e ductilidade. Para evitar isso, é necessário formar em torno do arco uma atmosfera gasosa, que neste caso, é obtida pela queima do revestimento incorporado no eletrodo.

Segundo Gaylord et al. (1992), a maioria dos procedimentos de soldagem manual é executada com processos a arco elétrico com eletrodos revestidos. Neste processo, o eletrodo é colocado em uma garra para estabelecer contato elétrico e é posicionado pelo soldador. O revestimento obtido pelo uso de eletrodos totalmente revestidos é feito com um material de tal composição, que grandes quantidades de gases são produzidos no aquecimento do arco, protegendo o metal de solda contra a ação do nitrogênio e do oxigênio da atmosfera, já que nenhum gás protetor é utilizado, figura 2.8.



**Figura 2.8 – Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW). Adaptada de Owens & Cheal, (1989).**

O revestimento é fundido em uma razão mais lenta que o metal do núcleo, o que direciona e concentra o fluxo do arco. O revestimento também forma uma escória que flutua sobre o metal fundido protegendo-o da contaminação atmosférica enquanto resfria, além de controlar a taxa de resfriamento, contribuindo no acabamento do cordão. Essa escória é facilmente removida após ocorrer o resfriamento.

De acordo com Wainer et al. (1995), a corrente de soldagem controla todas as características operatórias do processo, o aspecto do cordão, as propriedades da junta soldada, além de controlar a magnitude e a distribuição da energia térmica presente no arco. A intensidade da corrente é um parâmetro determinante, levando em consideração a taxa de deposição, e é também o mais importante efeito controlador da penetração da solda, da largura e do reforço do cordão, formado pelo metal de solda excedente, além da diluição do metal base na soldagem. A corrente de soldagem possui também um efeito inversamente proporcional sobre a velocidade de resfriamento.

A segunda mais importante variável operacional é a velocidade de avanço. A altura e a largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço.

Considerando altas correntes a energia de soldagem pode ser mantida reduzida, com o uso de altas velocidades de avanço.

Um dos principais fatores limitantes da faixa útil de corrente de soldagem é o diâmetro do eletrodo. Ele controla a densidade de corrente por unidade de área de seção transversal da alma do eletrodo. A escolha de um maior diâmetro de eletrodo maximiza a taxa de deposição, e esse maior diâmetro é função de fatores como a posição de soldagem, formato do chanfro e tipo de revestimento.

O ângulo do eletrodo em relação à peça é também uma variável importante, pois ajusta o fluxo térmico, controla o banho na poça de fusão e influencia no formato do cordão.

Este é certamente o processo mais versátil, podendo ser usado em todas as posições de soldagem. Além disso, o eletrodo pode ser conduzido a locais de difícil acesso, onde outros processos não atingem e a montagem do processo é extremamente simples. É provavelmente, o processo mais comum em fabricação de estruturas.

Segundo Owens & Cheal (1989), a qualidade da soldagem é relacionada com a habilidade do operador. Um bom soldador tem que possuir amplo conhecimento do processo e um alto nível de habilidade de manipulação. Devido à necessidade de bons soldadores e velocidades de deposição relativamente baixas, este pode ser um processo caro. Ele foi tradicionalmente respeitado como o processo que foi capaz de produzir as mais altas qualidades de soldas, mas esta reputação é agora ameaçada pelos recentes avanços de outros processos mais eficientes.

O equipamento de soldagem para este processo consiste de uma fonte de energia, cabos de ligação, um porta eletrodo, um conector terra, além do próprio eletrodo. Deve-se salientar que o suprimento de energia elétrica pode ser tanto com corrente contínua quanto alternada.

Segundo Owens & Cheal (1989), diâmetros típicos de eletrodos para trabalhos estruturais variam entre 2,5 e 6 mm. Voltagem de circuitos abertos são usualmente 50-90 V, dependendo do eletrodo; tão logo quando o arco é formado, a voltagem cai para valores entre 20 e 35 V. Correntes típicas alcançam de 50 a 400 A, depositando com velocidades entre 20 e 100 g/min. Aplicável a espessuras acima de 2 mm.

Um tipo equivalente à soldagem SMAW é a soldagem automática com eletrodo revestido contínuo. Ambos os eletrodos têm seção transversal similar, mas ao invés de contato manual, o eletrodo nesse processo é montado em um tambor e incorporado dentro um contínuo sistema de alimentação em uma soldagem automática.

### 2.5.3 Soldagem a arco submerso (SAW)

Segundo Wainer et al. (1992), esse processo teve início em 1935, sendo utilizado em fabricação de tubos e navios. No período de 1939-1945 (II Guerra Mundial) seu uso foi intensificado. No Brasil esse tipo de soldagem é amplamente usado na fabricação de tubos, navios, perfis, plataformas marítimas, trocadores de calor e equipamentos pesados.

Segundo Gaylord et al. (1992), neste processo o arame eletrodo é alimentado mecanicamente a partir de uma bobina para a pistola ou cabeçote de soldagem, e pela velocidade mantém-se um comprimento constante de arco. Além disso, o arco é inteiramente submerso em um fluxo granular, onde altas correntes podem ser usadas sem perigo do ar suspender gotículas de líquido ou haver respingos. Esse fluxo granular é um material fusível que é alimentado na área de trabalho por gravidade em uma quantidade suficiente para submergir o arco completamente. Alguns dos materiais granulares fundem-se para formar um revestimento sobre a solda figura. 2.9, que além de protegê-la da atmosfera, ajuda no controle do grau de velocidade de resfriamento da mesma.

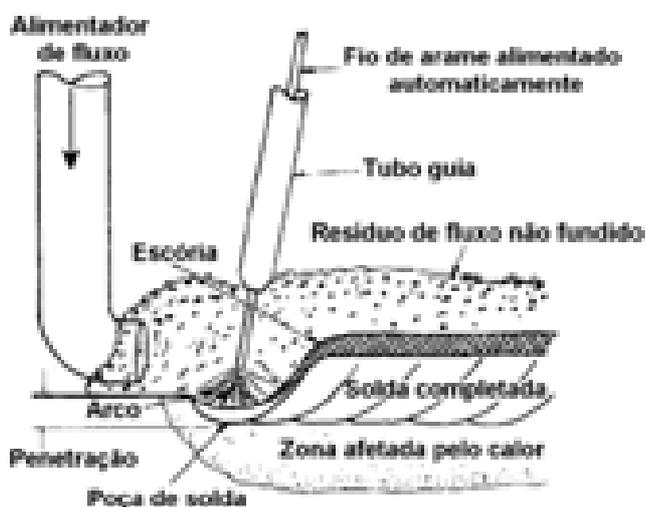


Figura 2.9 – Representação do processo de soldagem a arco submerso. Adaptada de Owens & Cheal, (1989).

Segundo Wainer et al. (1992), a corrente elétrica determina a taxa de deposição, a profundidade de penetração da poça de solda, além de controlar a quantidade de metal base fundido. Uma elevação da corrente aumenta a penetração e a taxa de deposição. Uma corrente

muito alta produz um cordão muito alto e estreito, e mordeduras. Uma corrente muito baixa produz um arco instável.

O tipo de corrente também influencia no processo de soldagem. A CCPR (+) (corrente contínua de polaridade reversa) é recomendada quando uma rápida seqüência de deposição de passes ou penetração total são recomendadas. Essa corrente diminui a porosidade e melhora o formato do cordão de solda. A CCPD (-) (corrente contínua de polaridade direta) fornece uma taxa de deposição 30% maior que a obtida por CCPR (+), produzindo uma menor penetração.

A velocidade de soldagem controla o tamanho do cordão e a penetração. Velocidades excessivamente altas aumentam a tendência da ocorrência de mordeduras, e estimulam o apagamento do arco, proporcionando o surgimento de trincas e porosidades. Velocidades excessivamente baixas produzem cordões em forma de chapéu, sujeitos à trincas, e cordões rugosos, além de respingos e inclusões de escória, devido à grande poça de solda formada.

Tem-se também que o aumento da distância tubo de contato/peça, que é a distância entre o ponto de contato elétrico no bico do cabeçote e a ponta do eletrodo, aumenta a taxa de deposição.

Um outro fator de influência é a tensão do arco, que influencia a forma da seção transversal do cordão e a aparência da solda. Deste modo, um aumento da tensão produz um cordão mais amplo e largo, aumenta o consumo de fluxo, aumenta a resistência à porosidade e aumenta o teor de liga proveniente do fluxo. Contudo, tensões excessivamente altas produzem cordão em forma de chapéu, sujeito à trincas, além de tornar difícil a remoção da escória.

Utilizando um eletrodo de diâmetro maior, a largura do cordão aumenta e diminui a densidade da corrente, a penetração e a taxa de deposição.

Segundo Owens & Cheal (1989), a velocidade de deposição para esse processo é consideravelmente maior, comparada com a soldagem a arco com eletrodo revestido ou soldagem com CO<sub>2</sub> (MAG). Pode-se ainda aumentar esse grau de deposição pelo uso de dois ou três arames eletrodos na mesma poça de solda.

A aparência da solda é boa, particularmente devido a natureza automática do processo e ao natural aplainamento e confinamento da escória fundida. Requisitos mínimos de proteção não são necessários, pois nenhum arco de soldagem é visível, gerando pouca fumaça. O uso de altas correntes também produz uma melhor penetração em comparação com a ocorrida nos outros processos.

As duas principais desvantagens deste processo são: primeiro, devido ao fluxo granular, pode-se somente ser utilizado em posições planas e horizontais e segundo, em altas velocidades de deposição, metais de solda de baixa resistência podem ser produzidos devido a uma associada baixa velocidade de resfriamento, conduzindo para uma microestrutura altamente refinada. Todavia, o pré aquecimento da chapa pode aliviar esta segunda desvantagem.

As altas correntes usadas causam considerável fusão do metal base, deste modo menos metal de enchimento é requerido e a abertura da junta pode ser menor que a necessária para outros processos de soldagem.

Esse processo de soldagem aplica-se a uma ampla faixa de espessuras, sendo mais utilizado em soldagem de chapas espessas de aço, como por exemplo: vasos de pressão, tanques, tubos de grandes diâmetros e vigas.

Nesse processo a alimentação do eletrodo nu e o comprimento do arco são controlados pelo alimentador de arame e pela fonte de energia, no caso de processo semi-automático. No caso de processo automático um mecanismo de avanço movimenta tanto o alimentador do fluxo quanto o arame, e normalmente um sistema de recuperação de fluxo recircula o fluxo granular não utilizado.

#### **2.5.4 Soldagem com gás de proteção (GMAW)**

Segundo Wainer et al. (1992), este processo teve início no começo dos anos 30. Ele foi viabilizado somente depois da II Guerra Mundial, para soldagem de magnésio e suas ligas e mais tarde para os outros metais, utilizando gás inerte. Posteriormente introduziu-se o  $\text{CO}_2$ . Esse tipo de soldagem é também chamada de soldagem com gás ativo (MAG), adequado para soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga ou soldagem com gás inerte (MIG), adequado para soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio, magnésio, cobre e suas ligas, sendo que este termo é propriamente aplicado somente para soldagem onde o gás de proteção é argônio ou hélio.

Neste processo, o eletrodo nu, o arco e a poça de solda são protegidos da atmosfera somente pelo gás de proteção, como mostra a representação na figura 2.10.

Geralmente não há fluxo, não ocorrendo a formação de escórias, que é comum nos outros processos. Uma mangueira flexível fornece a tocha de soldagem, o arame eletrodo, o gás de proteção e a corrente elétrica, todos eles automaticamente controlados.

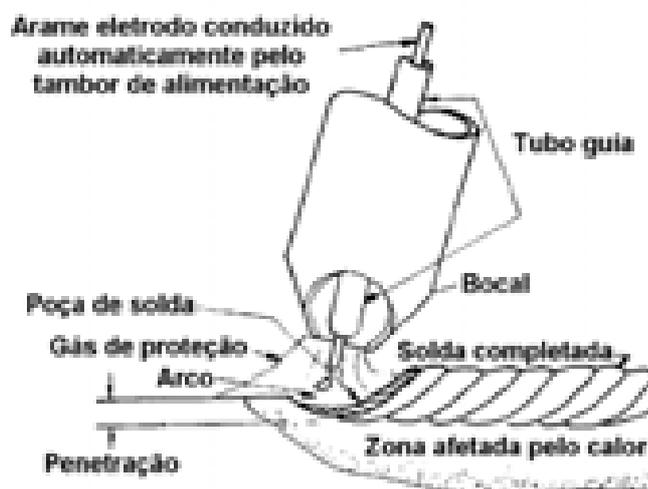


Figura 2.10 – Representação do processo de soldagem com gás de proteção. Adaptada de Owens & Cheal, (1989).

O gás protetor é usualmente dióxido de carbono, algumas vezes com uma certa adição de argônio, para aços carbono/manganês e aços carbono. O argônio como um gás de proteção favorece a soldagem de todos os metais, todavia, devido ao seu custo, outros gases de proteção e suas misturas são aceitáveis e recomendados para a soldagem de aços.

As características deste processo dependem do método de transferência do eletrodo à poça da solda. Essa transferência pode acontecer por queda livre quando o material atravessa o arco na forma de gotículas, ou pode acontecer transferência por curto-circuito, onde o arco é extinto em intervalos regulares e o arame participa do metal de solda quando entra em contato com a poça de solda fundida.

No método de transferência por queda livre há a subdivisão em transferência globular, transferência por borrfio e transferência pulsada.

A transferência globular (MIG/MAG), que é pouco utilizada, é caracterizada pela formação de uma gota grande, bem maior que o diâmetro do arame, que se desprende por gravidade; ocorre em corrente baixa e pode ser conseguida quando arames de aço são utilizados juntamente com uma proteção de dióxido de carbono. As vezes essa transferência é irregular e instável, com uma grande quantidade de respingos. Ela pode gerar falta de penetração, falta de fusão e excessivo reforço do cordão de solda.

### **2.5.5 Soldagem arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)**

A soldagem FCAW é um processo similar ao GMAW (MIG/MAG), porém utilizando uma escória protetora. Nesse processo, a proteção do arco é feita pela queima do fluxo em pó contido no arame tubular.

Outra maneira de se proteger o fluxo é envolver o arco por um fluxo adicional de gás protetor aplicado externamente, que flui do mesmo bocal que emerge o eletrodo. Em ambas as aplicações o material do núcleo do eletrodo, que contém ingredientes geradores de gases e vapores de proteção do arco elétrico da ação do ar, produzem uma relativamente fina escória de revestimento para proteger a solidificação do metal de solda. Essa escória também ajuda a desoxidar o material de base e o metal de solda, além de introduzir elementos necessários de liga para corrigir a composição química da mesma. Segundo Gaylord et al. (1992), o FCAW é usualmente um processo semi-automático onde o canhão, que controla a velocidade de alimentação, é mantido e manipulado por um soldador. Esse processo também pode ser usado em máquinas de soldagem, em que o operador monitora o arco durante a progressão mecanizada.

### **2.5.6 Soldagem eletro-escória (ESW) e soldagem eletro-gás (EGW)**

Segundo Wainer et al. (1992), por volta do ano de 1900 já eram conhecidos os fundamentos do processo eletro-escória, mas somente a partir de 1950 este processo de soldagem foi desenvolvido no Instituto de Soldagem Elétrica E. O. Paton em Kiev, na antiga URSS. Em 1960, no Instituto Bratislava, na Checoslováquia, os engenheiros belgas absorveram as técnicas do processo, divulgando-as ao mundo ocidental.

Esses processos automáticos são somente usados para soldagem de extremidade em chapas espessas, na posição vertical ou aproximadamente vertical conforme mostrado na figura 2.11, as chapas são simplesmente posicionadas com uma abertura da raiz que varia de 40 mm para espessuras entre 170 a 200 mm e 25 mm para espessuras entre 50 a 75 mm. Nenhuma preparação especial das juntas para executar a soldagem é requerida, com isso as chapas devem ser cortadas sem chanfros.

Segundo Owens & Cheal (1989), na soldagem eletro-escória o calor é produzido pela passagem de uma corrente elétrica ao longo do fluxo fundido, gerado pela fusão do

eletrodo e das extremidades do metal base, desta forma uma grande poça de solda é criada, contida nos dois lados pelas chapas presentes na soldagem e nos outros lados pelas sapatas de retenção, as quais são resfriadas com água. A escória fundida condutiva, que acompanha a soldagem, protege a solda e funde o metal de enchimento e o metal de base. Desde que a escória sólida não é condutiva, um arco elétrico entre o eletrodo e a base da junta é requerido para iniciar o processo, através da fusão da escória e o aquecimento das chapas, desta forma o fluxo é conduzido em seu estado fundido. Quando uma camada espessa de escória se forma, toda a ação do arco cessa, e a corrente de soldagem passa do eletrodo através da escória, por condução elétrica. O calor é gerado pela resistência da escória fundida à passagem da corrente de soldagem e é suficiente para fundir o eletrodo e as faces da chapa. Com isso, a principal função da escória é transformar energia elétrica em energia térmica, deste modo, a condutibilidade elétrica e sua variação de acordo com a temperatura tornam-se as principais características da escória. O eletrodo fundido e o metal base fundido formam a solda abaixo do banho de escória fundida. Um ou mais eletrodos podem ser alimentados automaticamente pelo topo da ligação dentro da poça de solda.

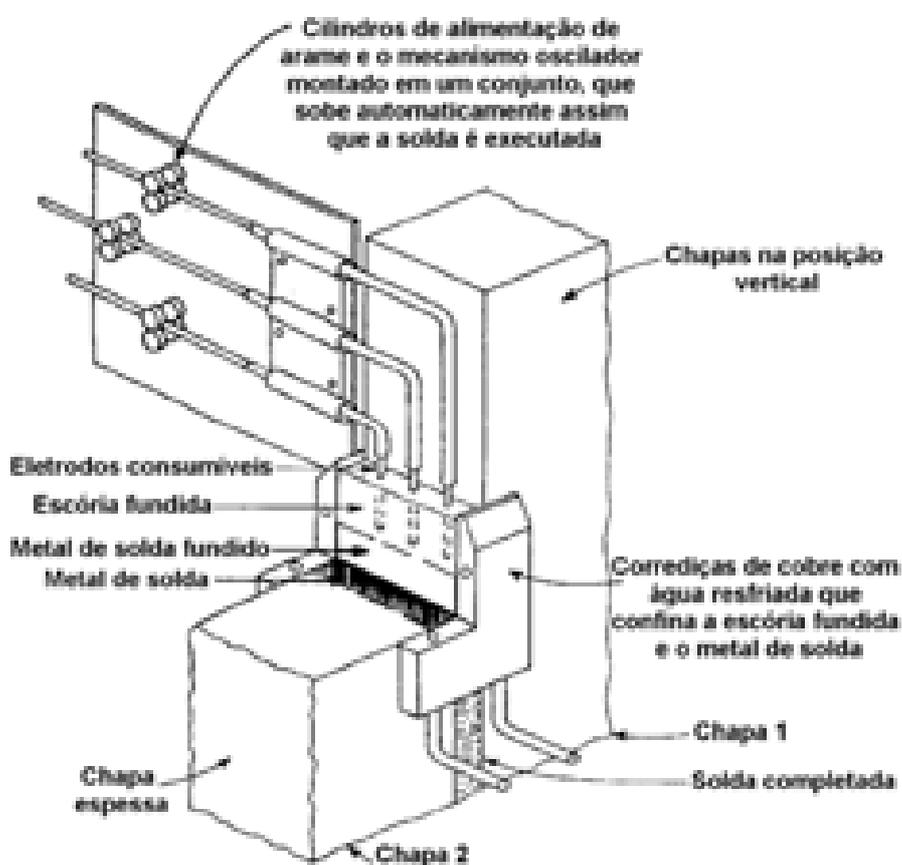


Figura 2.11 – Representação do processo de soldagem eletro-escória. Adaptada de Cooper, (1985).

As vantagens desse processo são: a alta taxa de deposição; a homogeneidade da solda ao longo da espessura; a soldagem espessa em um único passe; o processo é totalmente mecanizado e estável, que independe do tipo de corrente; a soldagem é bastante econômica, pois consome cerca de 15 a 20% menos de energia elétrica que no processo SAW e cerca de 5 a 10% a menos de fluxo; geralmente não requer pré-aquecimento ou pós-aquecimento devido a lentidão do processo; apresenta mínima distorção e o arco não é visível.

### **2.5.7 Fluxos de soldagem e classificação de eletrodos**

O fluxo, que é um composto granular de origem mineral, protege a poça de fusão da atmosfera, através da cobertura que a escória fundida exerce sobre o metal. Além disso, o fluxo purifica a poça de solda, modifica a composição química do metal de solda e influencia no acabamento e nas propriedades mecânicas da solda (CUNHA, 1985).

Segundo Owens & Cheal (1989), os fluxos para serem usados nos diversos tipos de soldagem, variam seus componentes e funções consideravelmente de processo para processo, mas é possível categorizar seus constituintes nos seguintes tipos:

- a) formas de gases que se decompõem para suprir gases de proteção quando ocorre aquecimento. Os carbonatos produzem CO<sub>2</sub>, fluoretos desenvolvem fluoreto de proteção e materiais orgânicos produzem hidrocarbonetos e CO<sub>2</sub>;
- b) formas das escórias que produzem a crosta de escória para proteção do metal de solda após solidificação. Estes incluem carbonetos de cálcio e manganês, titânio, silício, manganês e óxidos de ferro, silicatos e argilas;
- c) arcos iniciadores e estabilizadores. Estes são tanto metálicos, tal como níquel pulverizado ou ferro, ou elementos produzindo íons de potássio e sódio, tal como feldspato e argila;
- d) agentes de fluxo. Estes reduzem impurezas na solda, e eles são geralmente carbonatos e óxidos;
- e) desoxidantes. Reduzem agentes, de modo que ferrosilício, ferromanganês e ferro triturado são adicionados para reduzir o oxigênio da poça de solda;
- f) minerais controlando propriedades físicas do fluxo. Estes influenciam o perfil das gotas e o desprendimento da escória, e inclui muitos dos óxidos e fluoretos requeridos para outras funções;

g) adições metálicas. Ferro triturado e ligas ferrosas podem ser adicionadas para melhorar o grau de velocidade de deposição;

h) aglutinantes tais como mica, silicato de sódio e aglutinantes orgânicos são adicionados para melhorar a resistência do fluxo.

Os eletrodos para soldagem SMAW são classificados com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, com a posição de soldagem, com o tipo de revestimento e com o tipo da corrente requerida. Eletrodos para SMAW são cobertos pela AWS A5.1 e AWS A5.5. Cada eletrodo é identificado por um número de código E XXX X X - X, onde E representa “eletrodo” e X representa um número.

Os primeiros dois (ou três) números indicam a mínima resistência à tração do metal de solda, em ksi. O próximo número denota a posição em que cada eletrodo pode ser usado. O número 1 significa todas as posições, o número 2 plana e horizontal, o número 3 soldagem plana somente e o número 4 posição plana, horizontal, sobre cabeça e vertical descendente. O penúltimo número, que varia de 0 a 8, denota o tipo de revestimento, o tipo de corrente (contínua ou alternada) e a polaridade (direta ou reversa). Polaridade direta significa que o eletrodo é negativo. A referência após o traço é utilizada somente pela especificação AWS A-5.5, indicando a composição química do material.

Os revestimentos dos eletrodos podem ser reunidos em três grupos: os revestimentos a base mineral, que protegem o metal de solda dos efeitos nocivos do oxigênio e nitrogênio do ar; os revestimentos a base de matéria orgânica, que protegem por meio de uma cortina gasosa; e os revestimentos a base de carbonato de cálcio, que protegem pelos dois meios.

Dentro de cada um desses grupos, têm-se ainda tipos particulares indicados a seguir:

a) revestimento oxidante, composto principalmente de óxido de ferro e manganês; produz uma escória espessa, compacta e facilmente destacável; produz cordões de bom aspecto; é usado para soldas “sem responsabilidade”; obtém-se pequena penetração.

b) revestimento ácido, composto a base de óxido de ferro, óxido de manganês e sílica; produz uma escória abundante de fácil remoção; indicado somente na posição plana; obtém-se média penetração. Apresentam bons fluxos estabilizadores e produzem uma

solda de excelente qualidade de contorno. Todavia, a solda muitas vezes terá alto conteúdo de oxigênio, hidrogênio e silício com conseqüente baixa resistência e dureza.

c) revestimento rutilico; possui uma grande quantidade de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ); produz uma escória espessa, compacta, facilmente descartável e cordões de bom aspecto; soldável em todas as posições; obtém-se penetração média ou pequena; por sua versatilidade é chamado de eletrodo universal.

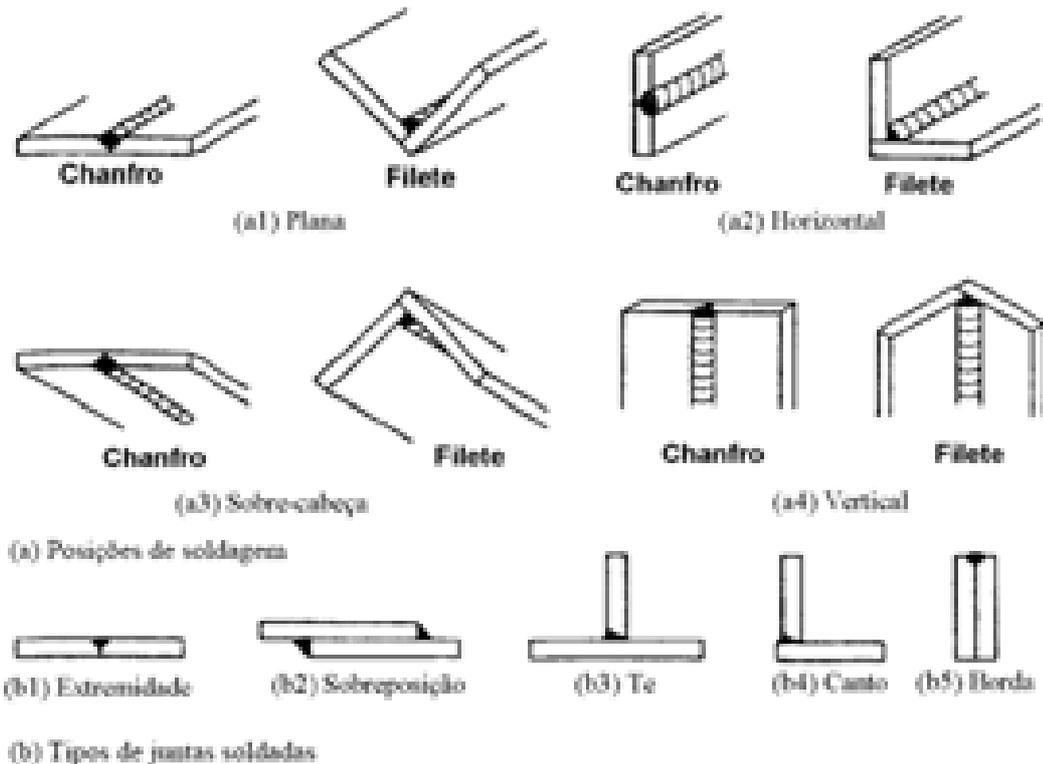
d) revestimento titânico; derivado do tipo rutilico, porém com um mais alto teor de óxido de titânio e com escória mais fluida; obtém-se média penetração.

e) revestimento básico; possui grande quantidade de carbonato de cálcio e possui um baixo teor de hidrogênio; produz pouca escória e com aspecto vítreo; o material depositado possui boas características mecânicas; é aplicado em soldagens de grande responsabilidade e de grandes espessuras; obtém-se média penetração.

f) revestimento celulósico; contém grandes quantidades de substâncias orgânicas combustíveis; produz grandes quantidades de gases protetores e pouca escória; a soldagem com esse revestimento é difícil em virtude dos gases formados não serem de fácil ionização; produz muito salpico, resultando uma solda de mau aspecto; obtém-se grande penetração, porém com aumento do nível de hidrogênio e da probabilidade de ocorrer trincas (QUITES E DUTRA, 1979).

## 2.6 POSIÇÕES DE SOLDAGEM E TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS

As juntas podem ser executadas de diversas posições de soldagem. o tipo de ligação depende de fatores tais como tamanho e forma dos perfis envolvidos na ligação, o tipo de solicitação, a área ligada disponível para soldagem e os relativos custos dos vários tipos de soldas. Os tipos básicos de juntas soldadas são os mostrados na figura 2.12.



**Figura 2.12 – Juntas soldadas. Adaptada de Gaylord et al. (1992).**

A junta de extremidade, ou de topo, é usada principalmente para unir as extremidades de chapas niveladas de mesma espessura ou com espessuras relativamente próximas. A principal vantagem deste tipo de junta é eliminar a excentricidade desenvolvida nas juntas de uma só sobreposição. Quando utilizadas em conjunto com soldas em chanfro de penetração total, as ligações de extremidade minimizam o tamanho de uma conexão e são usualmente mais agradáveis esteticamente. Sua principal desvantagem consiste no fato que as extremidades para serem conectadas, devem usualmente ser especialmente preparadas e muito cuidadosamente alinhadas antes da soldagem. Pequenos ajustes são possíveis e as partes devem ser cuidadosamente detalhadas e fabricadas. Devido à estes cuidados, a maioria das ligações de extremidade são executadas em fabrica onde os processos de soldagem podem ser mais cuidadosamente controlados.

A junta de sobreposição é o tipo mais comum. Ela tem duas principais vantagens: facilidade de ajuste, pois as partes presentes na ligação não requerem a precisão na fabricação exigida nos outros tipos de juntas, podendo ser levemente deslocadas para acomodar pequenos erros de fabricação ou para fazer ajustes de comprimento; a outra vantagem é a facilidade de união, pois as extremidades das partes não necessitam de preparações especiais e são usualmente cortadas com maçarico. As juntas de sobreposição utilizam soldas de filete e

são por essa razão, apropriadas para soldagem tanto em oficina quanto em campo. As partes são na maioria dos casos simplesmente posicionadas sem o uso de gabaritos especiais, sendo que ocasionalmente esse posicionamento pode ser feito por um pequeno número de parafusos de montagem, que podem ser tanto deixados no local ou removidos após a soldagem estar completada.

## 2.7 TIPOS DE SOLDAS

Os quatro tipos usuais de soldas são: filete, chanfro, tampão em furo e tampão em rasgo ou ranhura. Segundo Salmon & Johnson (1996), os quatro tipos representam as seguintes porcentagens de utilização nas construções soldadas: soldas de filete 80%, soldas em chanfro 15%, e os remanescentes 5% correspondem a tampão em furo, em rasgo e outras soldas especiais.

### 2.7.1 Soldas de filete

As soldas de filete apresentam seção transversal aproximadamente triangular, e ligam superfícies não coplanares como nas figuras 2.13 e 2.14. Devido à facilidade de execução e versatilidade, são as mais utilizadas. Os filetes são convexos, mas soldas que possuem filetes em forma côncava, são de melhor qualidade, consomem menos eletrodos, possuem uma melhor penetração e apresentam um melhor fluxo de tensões, porém sua execução é mais trabalhosa (VALENCIANNI, 1997).

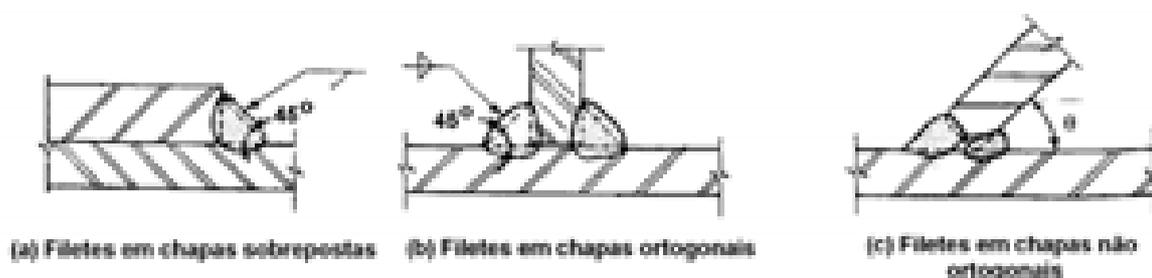


Figura 2.13 – Exemplos de solda de filete. Adaptada de Cooper (1985).

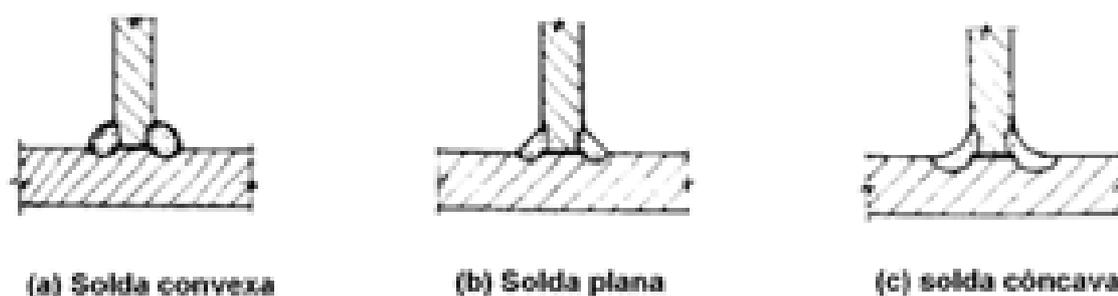


Figura 2.14 – Formas para o filete da solda. Adaptada de Siderbrás (1988)

As soldas de filete geralmente requerem menor precisão na fabricação, devido à sobreposição das partes, e conseqüentemente são mais vantajosas para soldagem em campo. Além disso, as extremidades das partes raramente necessitam preparações e especiais, tal como chanfros, desde que as condições da extremidade resultantes do corte por chama ou corte por cisalhamento sejam adequadas.

### 2.7.2 Soldas em chanfro

O principal uso de soldas em chanfro é para conectar perfis estruturais que são alinhados no mesmo plano. Na solda em chanfro é feita uma abertura ou chanfro, entre duas partes presentes na ligação. As ligações soldadas em chanfro podem ser de penetração parcial ou total, como é apresentado na figura 2.15. Em alguns casos a penetração é intencionalmente parcial, de tal maneira que a solda fique menos profunda que a espessura da parte ligada, enquanto em outros casos ela é parcial devido ao procedimento de soldagem não produzir efetiva penetração, caso contrário será uma solda de penetração total.

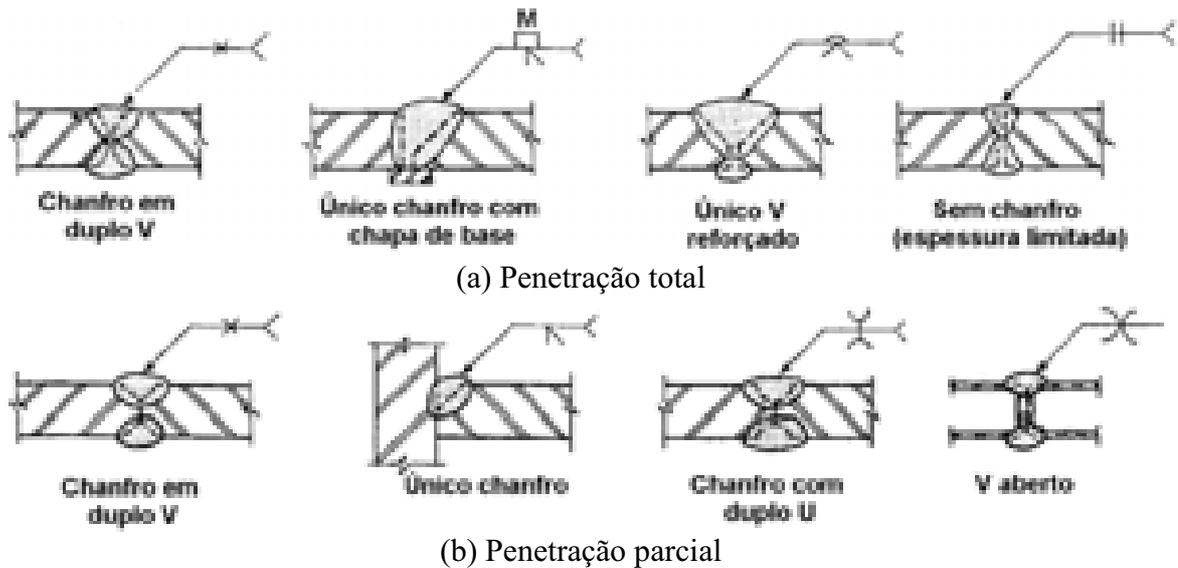


Figura 2.15 – Exemplos de solda em chanfro. Adaptada de Cooper (1985)

A escolha entre chanfros simples ou duplos é usualmente uma questão do custo de preparação versus o consumo de metal de solda. De uma maneira geral, a finalidade da preparação das extremidades a serem soldadas é obter uma junta adequada para a soldagem, levando em consideração os seguintes aspectos: o processo de soldagem; a localização da soldagem; a espessura do material e o tipo da junta; as tensões e as deformações resultantes; a economia na preparação das faces soldadas e na quantidade de material de preenchimento depositado; a natureza do material de base e a penetração que é necessária nas faces soldadas.

### 2.7.3 Soldas de tampão em furos e rasgos

Uma solda de tampão é feita pela deposição de metal de solda em um furo circular, ou em um rasgo, em uma ou duas partes sobrepostas. Este furo, ou rasgo deve ser preenchido completamente (figura 2.16). Essas soldas podem ser usadas exclusivamente em uma conexão, ou elas podem ser usadas em combinação com soldas de filete. A principal finalidade destas soldas é transmitir cisalhamento em uma ligação de sobreposição, quando o tamanho da conexão limita o comprimento disponível para o filete. Essas soldas são também indicadas para impedir o empenamento das partes sobrepostas.

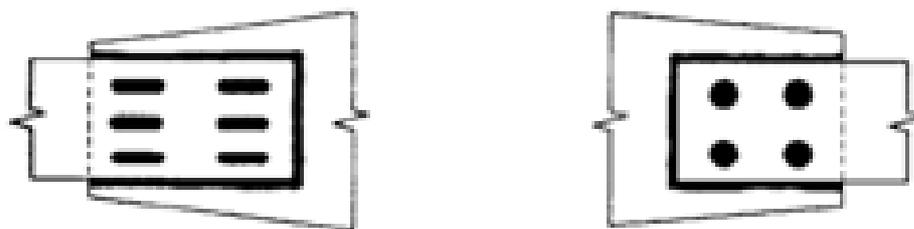


Figura 2.16 – Exemplos de soldas em tampão. Adaptada de Salmon e Johnson (1986)

## 2.8 PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS PARA EMENDAS SOLDADAS

Segundo a NBR 8800 (2008), o comprimento mínimo efetivo de um filete de solda, não pode ser inferior a 4 vezes sua dimensão nominal ou, então, essa dimensão nominal da solda deve ser considerada para não exceder  $1/4$  de seu comprimento efetivo. Adicionalmente, o comprimento efetivo de uma solda de filete não pode ser inferior a 40 mm.

O AISC/LRFD 93 especifica que o máximo comprimento efetivo de um filete de solda, solicitado por forças paralelas à solda, tal como juntas sobrepostas, não deverá exceder 70 vezes o comprimento da perna do filete, ou seja, sua dimensão nominal. Com isso, uma distribuição uniforme de tensões pode ser assumida ao longo desse comprimento efetivo.

Segundo a NBR 8800(2008), soldas de filete intermitentes podem ser usadas, quando a resistência de cálculo exigida for inferior à uma solda contínua da menor dimensão nominal permitida ou para ligar elementos de barras compostas. O comprimento efetivo para esse tipo de solda, não pode ser inferior a 4 vezes a dimensão nominal da solda, nem menor que 40 mm. O uso dessas soldas requerem cuidados especiais no que se refere a flambagens locais e corrosão.

O EUROCODE 3 especifica que o espaçamento entre soldas de filete intermitentes, não pode ser maior que o menor valor entre: 200 mm; 12 vezes a espessura da parte mais fina quando as partes conectadas estão em compressão; 16 vezes a espessura da parte mais fina quando as partes conectadas estão em tração; e  $1/4$  da distância entre enrijecedores, quando essas soldas são utilizadas para conectar enrijecedores à uma chapa ou outra parte sujeita a compressão ou cisalhamento.

Na fabricação de um perfil, no qual as chapas são conectadas por meio de soldas de filete intermitentes, um filete contínuo de solda deve ser colocado em cada extremidade da chapa, em um comprimento igual a pelo menos  $3/4$  da largura da chapa de menor espessura.

Em ligações por sobreposição, a NBR 8800(2008) especifica que o cobrimento mínimo deve ser igual a 5 vezes a espessura da parte ligada menos espessa e não inferior a 25 mm. Esta especificação é para garantir que a rotação resultante na ligação, quando tracionada, não seja excessiva.

Segundo a NBR 8800(2008), pode-se usar soldas de filete, com ângulo entre as faces de fusão entre 60 e 120°. Contudo, para outros ângulos a solda é considerada inadequada para a transmissão de esforços, conseqüentemente, ela não pode ser considerada como uma solda estrutural. O EUROCODE 3, permite o uso de soldas de filete com ângulos menores que 60°, todavia em tais casos a solda deve ser considerada como uma solda em chanfro de penetração parcial.

Segundo a NBR 8800(2008), para soldas de tampão em furos, o diâmetro dos furos não pode ser inferior à espessura da parte que os contém acrescida de 8 mm, nem maior que 2,25 vezes a espessura da solda. Já a distância de centro a centro desses furos deve ser igual ou superior a 4 vezes o diâmetro do furo.

Para o caso de soldas de tampão em rasgo, o comprimento do rasgo não pode ser maior que 10 vezes a espessura da solda. Já a largura dos rasgos não pode ser inferior à espessura da parte que os contém acrescida de 8 mm, nem maior que 2,25 vezes a espessura da solda. O espaçamento entre as linhas de centro dos rasgos, medido na direção transversal ao rasgo, deve ser igual ou superior a 4 vezes a largura desse rasgo. Já a distância de centro a centro dos rasgos, localizados na mesma linha longitudinal ao comprimento dos mesmos, deve ser igual ou superior a 2 vezes o comprimento dos rasgos. As extremidades desses rasgos devem possuir forma semicircular, ou apresentar cantos arredondados de raio não inferior à espessura da parte que os contém, exceto para extremidades que se estendem até a borda do elemento.

A NBR 8800(2008), também especifica que soldas de filete em furos ou rasgos podem ser usadas, para transmitir forças paralelas à superfície de contato, prevenir separação ou flambagem das partes ou para ligar componentes de barras de seção compostas. Lembrando que essas soldas não podem ser consideradas como soldas de tampão.

O EUROCODE 3 especifica que o diâmetro do furo circular ou a largura do rasgo para esse tipo de solda não deve ser menor que 4 vezes a espessura da parte que o contém.

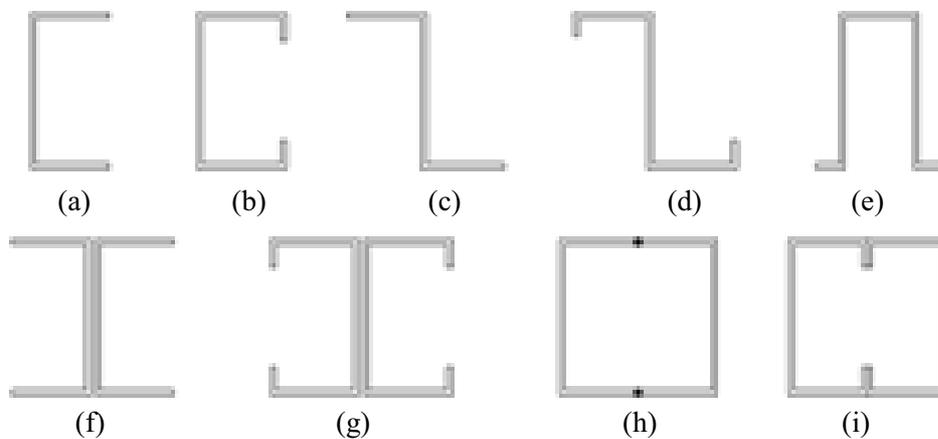
O EUROCODE 3 considera que a resistência de cálculo para esse tipo de solda deve ser avaliada da mesma maneira que uma solda de filete.

## 2.9 BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

### 2.9.1 Resistência dos perfis solicitados à flexão

Os perfis estão sujeitos a dois tipos de flexão: a flexão simples e a flexão normal composta, porém será abordada aqui somente a flexão simples por ser esta objeto deste trabalho.

A figura 2.17 mostra as seções mais utilizadas em elementos fletidos, onde a seção (i) representa a seção utilizada neste trabalho.



**Figura 2.17 – Seções transversais usuais em elementos fletidos.**

Na figura 2.17, a nomenclatura dos perfis é a seguinte: (a) U simples. (b) U enrijecido. (c) Z simples. (d) Z enrijecido. (e) cartola. (f) duplo U opostos. (g) duplo U enrijecido opostos. (h) duplo U frontais. (i) duplo U enrijecidos frontais.

Os itens 2.9.1.1 a 2.9.1.4 que seguem foram extraídos da NBR 14762/2001, e são as prescrições para o dimensionamento de barras à flexão simples.

#### 2.9.1.1 Momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo deve ser tomado como o menor valor calculado entre o limite de escoamento da seção efetiva, a flambagem lateral com torção e a flambagem por distorção transversal.

- a) Limite de escoamento da seção efetiva

---

Onde:

é o módulo de resistência elástico da seção efetiva, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, com calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

#### b) Flambagem lateral com torção

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

---

Onde:

é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando ;

é o fator de redução associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

- para

- para

- para 0

Tendo

é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;

é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, que pode ser calculado pelas expressões seguintes, deduzidas para carregamento aplicado na posição do centro de torção. A favor da segurança, também podem ser empregadas nos casos de carregamento aplicado em posição estabilizante, isto é, que tende a restaurar a posição original da barra como, por exemplo, carregamento gravitacional aplicado na parte inferior da

barra. Em casos de carregamento aplicado em posição desestabilizante, consultar bibliografia especializada.

- barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x):

- barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, consultar bibliografia especializada.

- barras com seção Z ponto-simétrica, com carregamento no plano da alma:

- barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x:

conforme 7.7.2.1 da NBR 14762/2001, considerando

. Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  inferiores a  $\alpha_{lim}$  e  $\beta_{lim}$ , respectivamente, podem ser adotados, desde que justificados com base em bibliografia especializada. Para os balanços com a extremidade livre sem contenção lateral,  $\alpha$  e  $\beta$  podem resultar maiores que  $\alpha_{lim}$  e  $\beta_{lim}$ , respectivamente, em função das condições de vínculo, por exemplo, em barras contínuas conectadas apenas pela mesa tracionada, portanto com deslocamentos laterais, rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento parcialmente impedidos no apoio. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.

$\gamma$  é o coeficiente de equivalência de momento na flexão, que a favor da segurança pode ser tomado igual a 1,0 ou calculado pela equação 2.6.

---

Para balanços com a extremidade livre sem contenção lateral e para barras submetidas à flexão composta,  $\gamma$  deve ser tomado igual a 1,0.

Onde:

é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado;

é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º. quarto do trecho analisado;

é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado;

é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º. quarto do trecho analisado.

### c) Flambagem por distorção da seção transversal

Para as barras com seção transversal aberta, sujeitas à flambagem por distorção, o momento fletor resistente de cálculo deve ser calculado pela seguinte expressão:

Onde:

é o momento fletor de flambagem por distorção, dado por:

- para

- para

conforme definido no item 7.8.1.2 da norma;

é o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado por:

é a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, calculada pela teoria da estabilidade elástica ou conforme a NBR 14762/2001.

Para as barras com a mesa tracionada conectada a um painel e a mesa comprimida livre (terças com telhas de aço parafusadas e sujeitas à ação de vento de sucção, por exemplo), o momento fletor resistente de cálculo, considerando o efeito da referida contenção lateral, pode ser calculado conforme anexo F da NBR 14762/2001.

### 2.9.1.2 Força cortante

A força cortante resistente de cálculo deve ser calculada por:

- para

---

- para

---

- para

---

Onde:

é a espessura da alma;

é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais:

- para alma com enrijecedores transversais satisfazendo as exigências do item 7.5

da norma:

---



---

Onde:

é a distância entre enrijecedores transversais de alma.

Para seções com duas ou mais almas, cada alma deve ser analisada como um elemento separado resistindo à sua parcela de força cortante.

### 2.9.1.3 *Momento com força cortante combinados*

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo na mesma seção devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

Para barras com enrijecedores transversais de alma, além de serem atendidas as exigências da norma, quando e , deve ser satisfeita a seguinte expressão de interação:

Onde:

é o momento fletor solicitante de cálculo;

é o momento fletor resistente de cálculo;

é a força cortante solicitante de cálculo;

é a força cortante resistente de cálculo.

### 2.9.1.4 *Barras compostas submetidas à flexão*

O espaçamento  $s$ , na direção do eixo da barra, entre os parafusos ou soldas de ligação de dois perfis U, para formar um perfil I, não deve ser maior que o seguinte valor:

Onde:

é o comprimento da barra;

é a distância entre os parafusos ou soldas na direção perpendicular ao eixo da barra. Se a ligação for executada junto às mesas dos perfis,  $g$  é igual à altura da barra;

é a força resistente de cálculo do parafuso ou solda, correspondente ao tipo de esforço solicitante previsto no respectivo meio de ligação, conforme seção 8;

é a distância do centro de torção de um perfil U ao plano médio da sua alma;

é o valor de cálculo da força uniformemente distribuída de referência, igual a três vezes o valor de cálculo da força uniformemente distribuída na barra; ou igual ao valor de cálculo da força concentrada dividido pelo comprimento de atuação desta força. Se o comprimento de atuação da força concentrada for inferior ao espaçamento dos parafusos ou soldas na direção do eixo da barra ( $s$ ), a força resistente de cálculo do parafuso ou solda, junto à força concentrada, deve ser, no mínimo, ;

é o valor de cálculo da força concentrada que atua na barra.

Se for adotado espaçamento uniforme da conexão em toda a barra, o espaçamento máximo ( ) deve ser determinado com base no maior valor da força concentrada atuante na barra. Caso contrário, o espaçamento da conexão deve ser determinado considerando-se a variação do carregamento ao longo da barra. Nas seções onde atuam elevadas forças concentradas, recomenda-se que a ligação seja feita por meio de chapas conectadas às mesas dos perfis.

## 2.10 MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES

Segundo Ataíde e Corrêa (2006), neste método, o nível de segurança de uma estrutura é determinado pela capacidade que ela possui de suportar as várias ações que vierem a solicitá-la durante sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite último ou estado limite de utilização.

### 2.10.1 Estados limites últimos

Estes estados limites estão relacionados ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura, levando esta à ruptura ou ao colapso. Com a finalidade de evitar a perda de vidas

humanas, os estados limites últimos deverão ter uma probabilidade de mínima ou nenhuma probabilidade de ocorrência.

Os estados limites últimos podem originar principalmente nas seguintes causas:

- a) perda de estabilidade de uma parte ou do conjunto da estrutura, assimilada a um corpo rígido;
- b) transformação da estrutura original em uma parcial ou totalmente hipostática; Instabilidade por deformação;
- c) deformações elásticas ou plásticas, deformação lenta e fissuração que provoquem uma mudança de geometria que exija uma substituição da estrutura;
- d) ruptura das seções críticas da estrutura;
- e) propagação de um colapso, seja colapso progressivo ou falta de integridade estrutural;
- f) grandes deformações, transformação de mecanismo e instabilidade global.

### **2.10.2 Estados limites de utilização**

Os estados limites de utilização correspondem a limites estabelecidos que, se obedecidos, garantem que o comportamento da estrutura será adequado para sua utilização normal e sua durabilidade. Uma maior probabilidade de ocorrência é permitida para os estados limites de utilização, em comparação com os últimos, pelo fato de não representarem situações de risco de morte. Podem ter origem nos seguintes fenômenos:

- a) deformações excessivas para uma utilização normal da estrutura;
- b) danos locais excessivos por fissuração, corrosão, etc., e que afetam a aparência, utilização ou a durabilidade da estrutura;
- c) deslocamentos excessivos sem perda de equilíbrio;
- d) vibrações excessivas.

O Anexo A da NBR 14762(2001) apresenta vários limites de deslocamentos máximos recomendados para os estados limites de utilização de alguns tipos de viga. Os tipos de vigas estudadas neste trabalho têm sido bastante utilizadas como vigas de coberturas em geral, principalmente em galpões industriais e coberturas residenciais, bem como vigas de piso, geralmente em mezaninos.

A NBR 14762(2001), limita o deslocamento máximo para estes dois tipos de vigas, referente à combinação de todas as ações, em  $L/250$  para as vigas de cobertura em geral, e  $L/300$  para as vigas de piso, onde  $L$  é o vão teórico entre apoios.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta a metodologia dos ensaios realizados de caracterização do aço e ensaios das vigas à flexão simples.

Os perfis utilizados na composição das vigas deste trabalho foram obtidos mediante o dobramento por perfilagem das chapas de aço, em peças de 3m de comprimento.

Os ensaios das vigas submetidas à flexão simples foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG). Os ensaios de caracterização do aço foram realizados do Laboratório de Estruturas da Universidade Católica de Goiás (UCG).

#### **3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

##### **3.2.1 Caracterização do aço**

Os aços empregados na fabricação dos perfis estudados neste trabalho são: USI-SAC 300 de fabricação da USIMINAS e CSN COR 420 de fabricação da CSN. Esses aços são da família dos aços patináveis ou aclimatáveis, com uso diversificado, o qual compreende desde a fabricação de máquinas e equipamentos a estruturas, pelo fato de serem, dentro de determinados parâmetros, resistentes à corrosão atmosférica. Para a determinação de suas propriedades mecânicas, foram realizados ensaios à tração em 06(seis) corpos de prova, sendo 03(três) fabricados com aço USI-SAC 300 e 03(três) fabricados com aço CSN COR 420. Neste ensaio foram obtidos os valores da tensão limite de escoamento ( ), da tensão limite de ruptura ( ) e alongamento de todos os corpos de prova ( $\Delta l$ ).

Os ensaios à tração foram realizados em máquina universal de ensaio (DL 100000; EMIC), com capacidade máxima de 1000kN, no Laboratório de Estruturas da Universidade Católica de Goiás.

Os procedimentos utilizados nesse ensaio estão prescritos na norma NBR 6152(2002), e os resultados são apresentados no capítulo 4. O alongamento foi medido sobre a base de medida de 80mm.

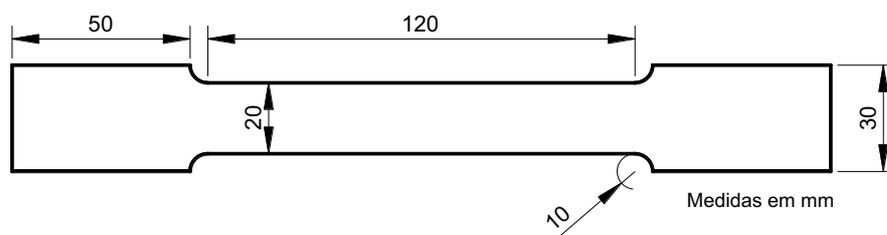
Os corpos de prova foram retirados de duas chapas diferentes para cada tipo de aço, sendo estas chapas com espessura nominal de 3,04mm.

A nomenclatura adotada para estes corpos de prova estão indicados na tabela 3.1

**Tabela 3.1 – Nomenclatura dos corpos de prova para ensaio à tração do aço**

Corpo-de-prova	Tipo de aço	Emenda soldada
1	USI-SAC 300	não
2	USI-SAC 300	não
3	USI-SAC 300	não
4	USI-SAC 300	sim
5	USI-SAC 300	sim
6	USI-SAC 300	sim
7	CSN COR 420	não
8	CSN COR 420	não
9	CSN COR 420	não
10	CSN COR 420	sim
11	CSN COR 420	sim
12	CSN COR 420	sim

A figura 3.1 mostra a representação dos corpos de prova sem emenda, para o ensaio de caracterização do aço.



**Figura 3.1 – Corpo-de-prova sem emenda para ensaio de caracterização do aço**

A figura 3.2 mostra uma foto de um corpo-de-prova antes do ensaio.



**Figura 3.2 – Corpo-de-prova antes do ensaio**

### 3.2.2 Caracterização da solda

A fim de fazer a caracterização do metal de solda utilizado na fabricação da vigas metálicas, foi feito também ensaio à tração de corpos de prova com uma emenda soldada, de acordo com as especificações da *American Society Mechanical Engineer – ASME*.

#### 3.2.2.1 Processo de soldagem dos corpos de prova

O processo de soldagem utilizado nesse trabalho é o especificado como processo de soldagem por arco elétrico eletrodo revestido *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*.

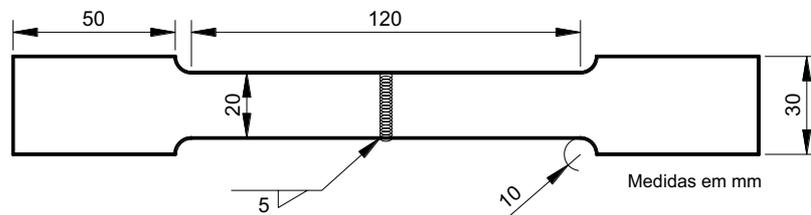
**Material de adição** – O material de adição utilizado na soldagem do aço é o eletrodo revestido das classes AWS E7018-G e AWS E7018-W1. Na nomenclatura das classes de eletrodo AWS, a letra “E” indica “eletrodo”, “70” indica a resistência à tração em ksi, que chega a 480 MPa. O número “18” indica que a corrente elétrica da soldagem pode ser contínua positiva, negativa ou ainda alternada, tipo de arco médio globular, penetração média, revestimento básico de silicato de potássio e pó de ferro e baixo teor de hidrogênio. “G” e “W1” significam, respectivamente, liga geral e resistente a corrosão. Este material foi utilizado por ter a mesma composição química dos aços patináveis. Este eletrodo é empregado na construção de pontes, viadutos, edifícios, equipamentos agrícolas e para mineração, navios, vagões, plataformas marinhas e outras construções em contato com água salgada. Apresenta excelente resistência ao impacto em baixas temperaturas aliada a boas propriedades de resistência mecânica, comercialmente conhecido como OK 73.03 (ESAB, 2008).

Os eletrodos revestidos pertencentes às classes AWS E7018-G e E7018-W1, podem ser manuseados em todas as posições, exceto para soldas de cima para baixo.

Os corpos de prova para este ensaio foram em número de 06(seis), sendo três fabricados com aço USI-SAC 300 e 03 (três) fabricados com aço CSN COR 420 como no ensaio de caracterização do aço. Todos os 06 (seis) corpos de prova foram fabricados com uma emenda em seu eixo transversal. Esta emenda foi soldada com uma solda em filete, com o mesmo tipo de eletrodo utilizado na fabricação das vigas metálicas.

Para todos os corpos de prova com emenda soldada foram obtidos os valores da tensão limite de escoamento ( ), da tensão limite de ruptura ( ) e alongamento ( $\Delta l$ ).

A figura 3.3 mostra a representação do corpo de prova com emenda soldada para o ensaio de caracterização da solda e a figura 3.4 mostra a foto do corpo de prova antes do ensaio.



**Figura 3.3 – Esquema do corpo-de-prova com emenda soldada para ensaio de caracterização da solda**



**Figura 3.4 – Corpo de prova para caracterização da solda, antes da realização do ensaio**

A figura 3.5 mostra um corpo de prova no momento que estava sendo ensaiado.



**Figura 3.5 – Ensaio à tração do corpo de prova**

### 3.3 ENSAIO DAS VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

#### 3.3.1 Introdução

Os ensaios das vigas submetidas à flexão simples foram realizados no Laboratório de Estruturas Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG).

A nomenclatura das vigas ensaiadas foi definida como V1A a V4A para as vigas constituídas com perfis produzidos com aço USI-SAC 300 da USIMINAS e V1B a V4B para as vigas constituídas com perfis produzidos com aço CSN COR 420 produzido pela CSN.

#### 3.3.2 Ensaios experimentais

Foi realizado um total de oito ensaios de vigas à flexão simples, sendo quatro vigas fabricadas com perfis produzidos com aço USI-SAC 300 e quatro vigas fabricadas com perfis produzidos com aço CSN COR 420, onde para cada tipo de aço foi fabricada uma viga sem emenda soldada que serviu de referência, uma viga com uma emenda soldada no meio do vão, uma viga duas emendas soldadas, sendo estas emendas sob os pontos de aplicação das forças concentradas e uma viga com duas emendas sob os pontos de aplicação das forças e uma emenda no meio do vão. A tabela 3.2 apresenta os tipos de vigas ensaiadas.

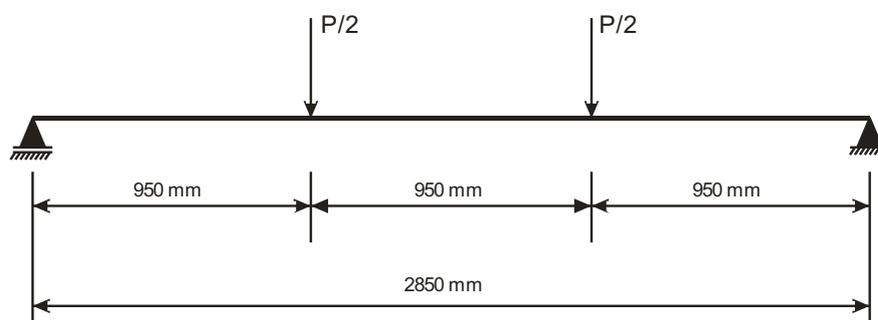
**Tabela 3.2 – Vigas ensaiadas**

<b>Viga</b>	<b>Número de emendas</b>
V1A	nenhuma
V2A	uma
V3A	duas
V4A	três
V1B	nenhuma
V2B	uma
V3B	duas
V4B	três

##### 3.3.2.1 Esquema de ensaio

As vigas são bi-apoiadas, o comprimento total de cada viga ensaiada foi de três metros e a distância entre os dois apoios foi de 2850 mm. As vigas foram sujeitas à aplicação de duas forças concentradas de mesmo valor equidistantes dos apoios, posicionadas a 950mm

de cada apoio. O sistema de ensaio montado para ensaio das vigas está esquematizado na figura 3.6.

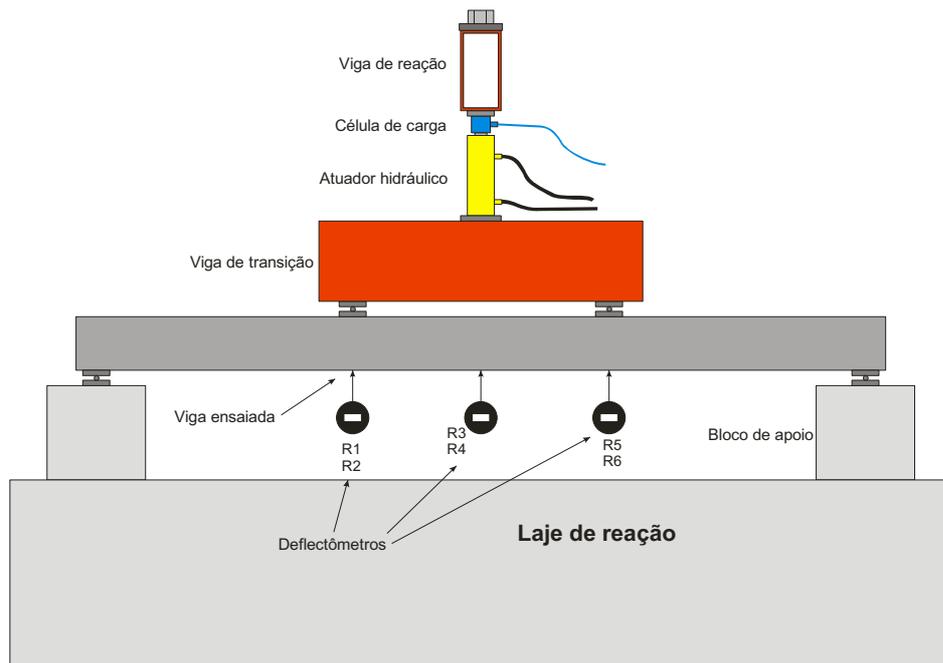


**Figura 3.6 – Esquema de aplicação as forças**

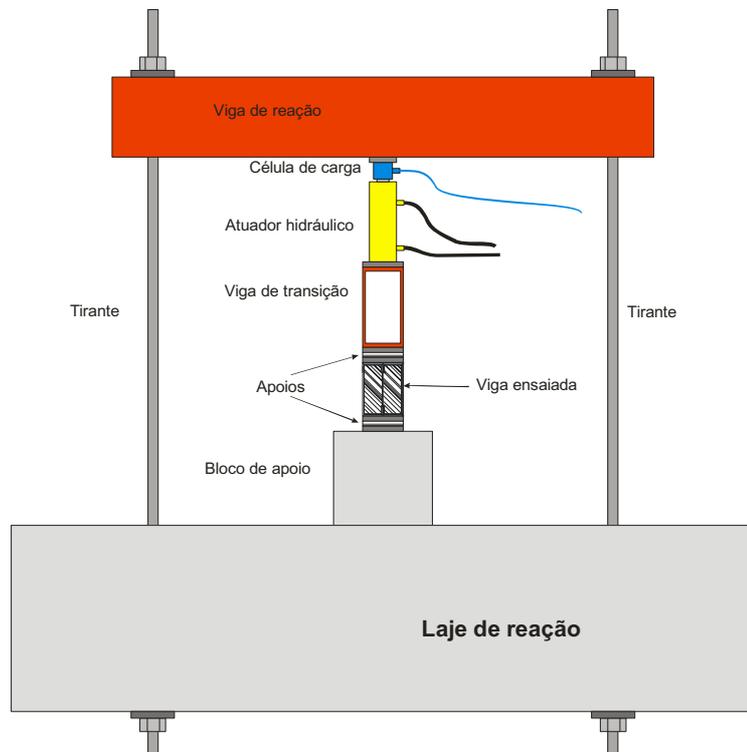
Para se obter uma divisão no valor da força  $P$  aplicada em duas forças iguais a  $P/2$ , foi utilizada uma viga de transição apoiada sobre a viga ensaiada, como mostra o esquema na figura 3.7. A figura 3.8 mostra uma vista transversal do mesmo esquema.

As vigas ensaiadas são compostas de dois perfis tipo U enrijecido formando uma seção dupla com alma de 200mm, mesa de 150mm e enrijecimento de 25mm, conforme figura 3.9 e possuem chapa de espessura nominal de 3,04mm.

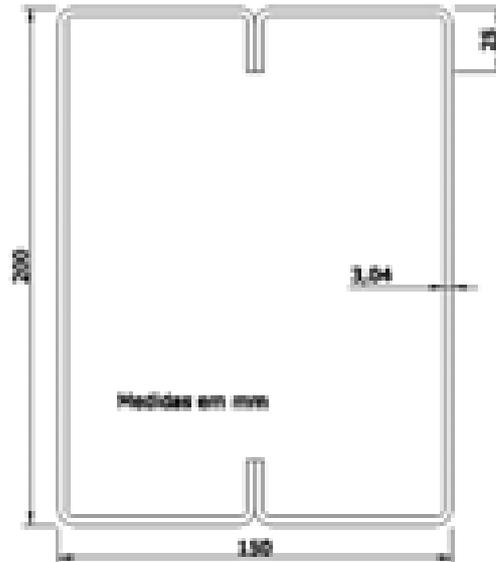
A união dos perfis foi realizada por meio de filetes de solda nas mesas superiores e inferiores dos mesmos, o comprimento dos filetes de solda foi de 20mm, espaçados a cada 200mm no eixo longitudinal da viga. Nas soldas realizadas nas vigas, tanto a intermitente para a união entre os perfis, como as soldas realizadas nas emendas, foram empregados eletrodos OK 73.03(ESAB, 2008) com diâmetro de 3,25mm.



**Figura 3.7 – Vista longitudinal do esquema de ensaio montado**

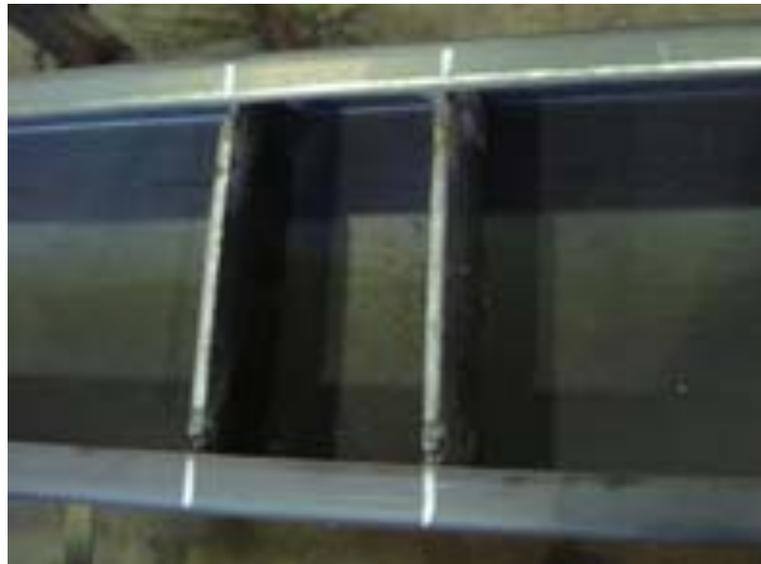


**Figura 3.8 – Vista transversal do esquema de ensaio montado**



**Figura 3.9 – Seção transversal das vigas ensaiadas**

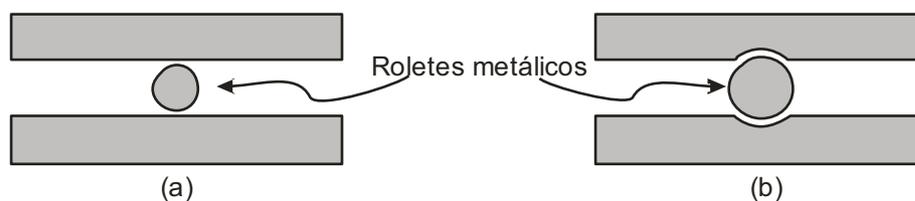
Segundo Alves (2001), para se evitar que a ruptura ocorra por esmagamento das mesas nas regiões de apoio, é necessário que se faça um enrijecimento destas mesas. Com isso, foram soldados enrijecedores transversais com chapa de 6,3mm de espessura, localizados nas regiões de aplicação das forças e nos apoios, conforme mostra a figura 3.10.



**Figura 3.10 – Foto do detalhe de montagem dos enrijecedores**

A viga foi posicionada sobre aparelhos de apoio formados por chapas metálicas e cilindros de aço, obtendo a hipótese de viga simplesmente apoiada como mostram as figuras 3.11 e 3.12. O apoio tipo (a) simula um apoio do 1º gênero, o qual permite deslocamento

horizontal e rotação em torno do eixo longitudinal do cilindro de apoio. Enquanto o apoio tipo (b) simula um apoio do 2º gênero, restringindo os deslocamentos e permitindo a rotação em torno do eixo longitudinal do cilindro de apoio. Estes aparelhos de apoio foram posicionados sobre blocos rígidos de concreto.



**Figura 3.11 – Esquemas dos aparelhos de apoio**

Entre a chapa inferior do aparelho de apoio e o bloco de concreto, colocou-se gesso de alta resistência à compressão. O mesmo foi realizado entre a chapa superior do aparelho de apoio e a viga metálica, garantindo dessa forma uma distribuição de carga uniforme na viga e nos apoios.



**Figura 3.12 – Foto de um apoio do primeiro gênero**

Os deslocamentos verticais foram determinados através de deflectômetros posicionados ao longo da viga em posições pré-determinadas e as deformações obtidas mediante extensômetros elétricos de resistência para aço devidamente posicionados na mesa inferior e na mesa superior da viga (figura 3.7).

O carregamento foi aplicado com a ajuda de atuador hidráulico e sua intensidade foi verificada por uma célula de carga posicionada entre o atuador hidráulico e a viga de

reação. O registro dos dados se deu por meio de sistema de aquisição de dados, mostrado na figura 3.13.



**Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados dos extensômetros e da célula de carga**

O desenvolvimento dos ensaios foi feito, basicamente, utilizando a metodologia de ensaios experimentais e os dados coletados foram analisados com a ajuda de microcomputador e software disponível.

### **3.3.3 Instrumentação e sistema de aquisição de dados**

A leitura dos dados referentes ao valor das cargas aplicadas e das deformações medidas pelos extensômetros de resistência elétrica foi obtida por meio de um sistema de aquisição de dados. Todos os dados referentes a deformações foram recebidos por uma ponte de Wheatstone e anotados em planilhas.

#### *3.3.3.1 Atuador hidráulico e célula de carga*

As forças foram aplicadas através de atuador hidráulico da marca *Yellow Power* com capacidade de 500kN,acionado manualmente, por meio de uma bomba hidráulica, sendo que a intensidade da carga aplicada foi medida por meio de célula de carga devidamente

calibrada, posicionada entre o atuador hidráulico e a viga de reação. A figura 3.14 mostra o esquema geral de ensaio montado.

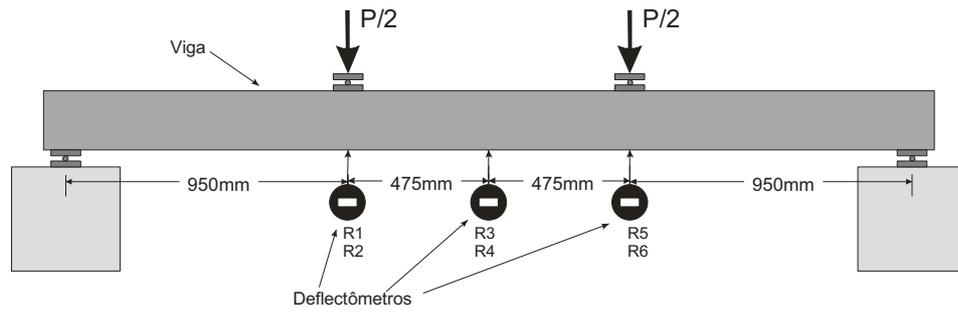


**Figura 3.14 – Esquema geral de ensaio montado**

### *3.3.3.2 Leitura dos deslocamentos verticais*

Os deslocamentos verticais ao longo do vão foram medidos mediante defletores digitais da marca Mytutoyo com sensibilidade de 0,01 mm, posicionados a 950 mm dos apoios, na parte inferior da viga nos pontos de aplicação da força e no meio do vão da viga conforme mostra a figura 3.15.

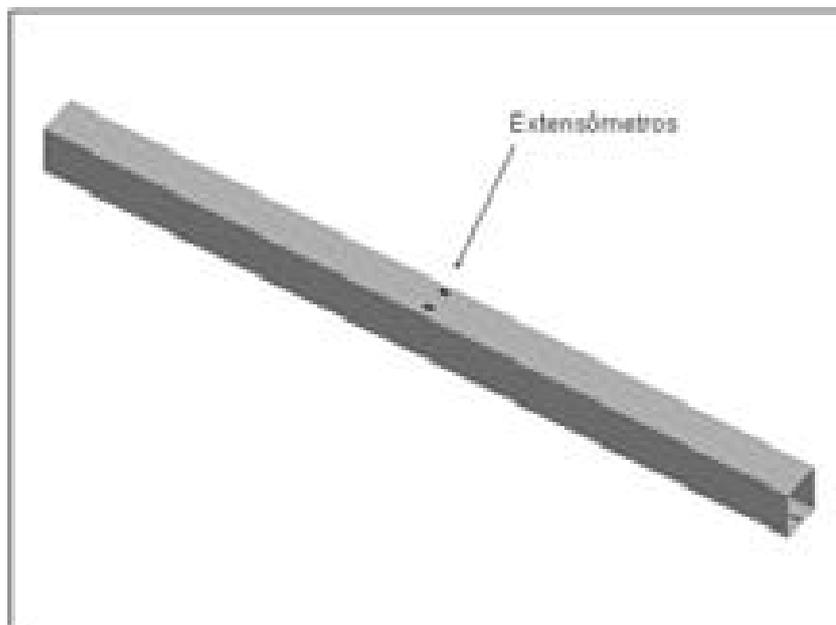
A nomenclatura dos defletores foi definida conforme como sendo R1/R2 e R5/R6 para os posicionados a 950 mm dos apoios e R3/R4 para os posicionados no meio do vão.



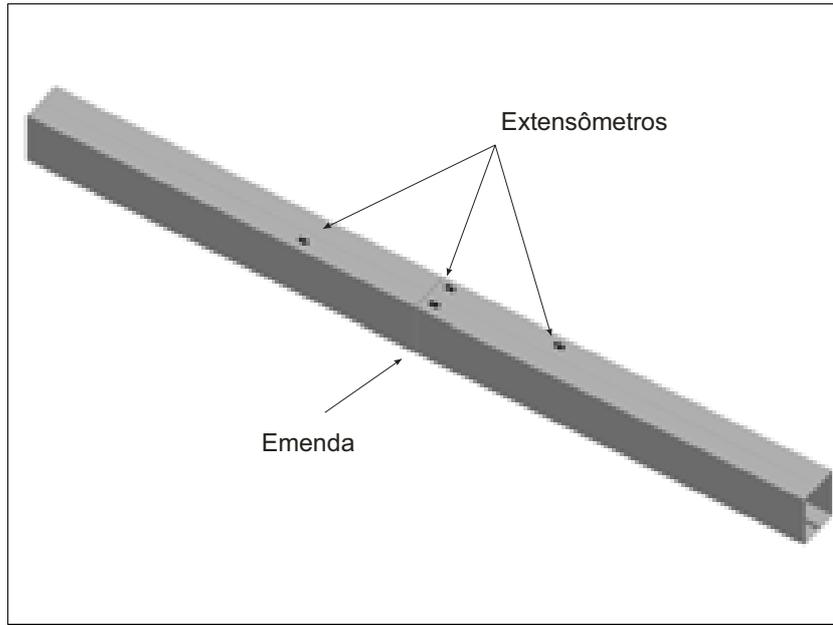
**Figura 3.15 – Posição dos deflectômetros**

### 3.3.4 Leituras das deformações específicas

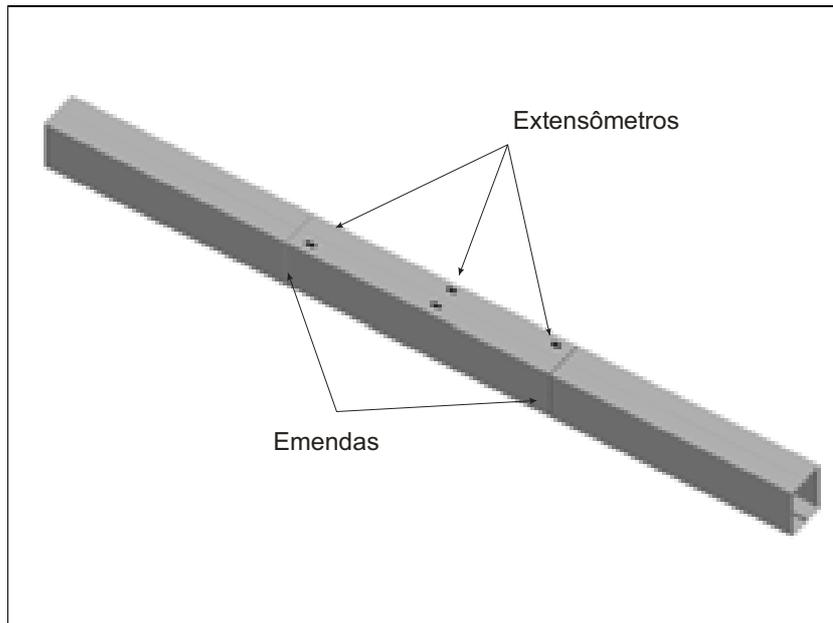
As deformações ocorridas foram medidas através de extensômetros elétricos unidirecionais, marca Excel, modelo PA-06-250BA-120-L, posicionados nas mesas inferiores conforme mostram as figuras 3.16 a 3.19 e nas mesas superiores em posições verticalmente equivalentes.



**Figura 3.16 – Extensômetros na mesa superior das vigas sem emenda**



**Figura 3.17 – Extensômetros na mesa superior das vigas com uma emenda**



**Figura 3.18 – Extensômetros na mesa superior das vigas com duas emendas**

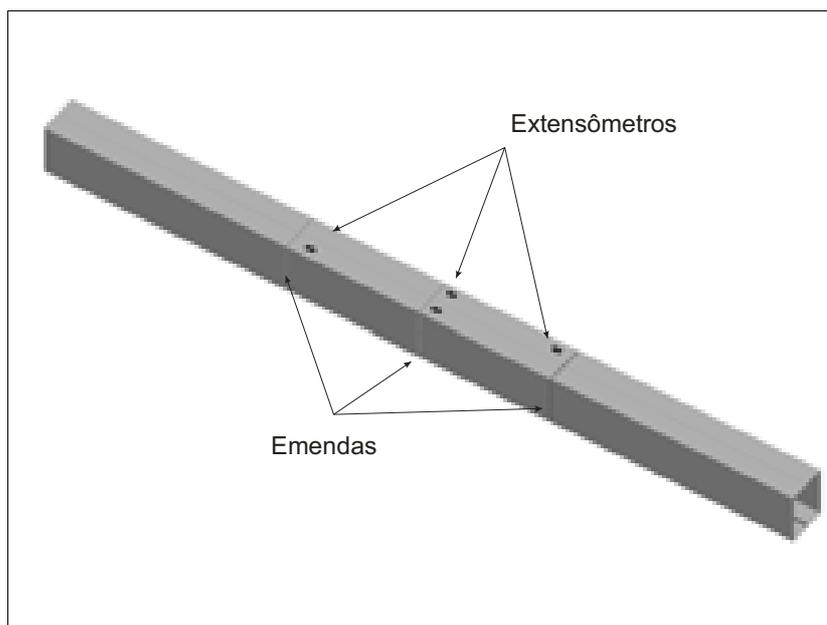


Figura 3.19 – Extensômetros na mesa superior das vigas com três emendas

### 3.4 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DAS VIGAS

Antes do ensaio propriamente dito foi realizado a escorva, ou seja, aplicou-se uma força de valor igual a 10% da força última prevista e verificava-se o funcionamento de todo o esquema do ensaio e do sistema de aquisição de dados. Esse procedimento visa também a perfeita acomodação da viga a ser estudada.

Para todas as vigas ensaiadas a forma de aplicação de força foi igual, onde foi-se fazendo a leitura dos dados a cada 5 kN. A cada acréscimo foi feita a leitura das deformações específicas e dos deslocamentos verticais ocorridos.

Para cada viga, existem fotos documentando o ensaio e ilustrando os deslocamentos e a forma de ruptura.

## **4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se aos valores nominais apresentados nas especificações técnicas dos fabricantes dos dois tipos aço do eletrodo, além de resultados experimentais dos ensaios de caracterização do aço e ensaios de viga à flexão simples.

Alguns resultados estão apresentados por meio de tabelas e gráficos, sendo que os mesmos foram analisados posteriormente.

### **4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

#### **4.2.1 Caracterização dos aços**

O aço USI-SAC 300 possui as propriedades mecânicas mostradas na tabela 2.3, segundo o seu fabricante e a tabela 2.4 mostra as propriedades mecânicas do aço CSN COR 420, conforme seu fabricante.

Os resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização dos dois tipos de aço estão apresentados na tabela 4.1. Nesses ensaios foram obtidas a tensão limite de escoamento ( ) tensão limite de ruptura à tração ( ) e o alongamento ( $\Delta l$ ).

Os valores experimentais dos limites de escoamento e ruptura são resultados da média aritmética entre os resultados apresentados na tabela 4.1. Os valores referentes à deformação específica correspondente ao limite de escoamento ( ) foram obtidos considerando o módulo de elasticidade do aço igual a  $E = 205000$  MPa, valor este normalizado para o aço segundo a NBR14762/2001. A figura 4.1 mostra um corpo de prova após o ensaio, mostrando o seu modo de ruptura.

**Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios à tração**

Corpo-de-prova	Aço	Tensão de escoamento (MPa)		Deformação de início de escoamento ( $\epsilon_y$ )	Tensão de ruptura (MPa)		Deformação final ( $\epsilon_u$ )
			Média			Média	
1A	USI-SAC 300	345,39	365,13	0,013	460,53	493,97	0,223
2A	USI-SAC 300	363,49			478,62		
3A	USI-SAC 300	386,51			542,76		
1B	CSN COR 420	368,42	362,39	0,015	468,75	473,14	0,142
2B	CSN COR 420	332,24			457,24		
3B	CSN COR 420	386,51			493,42		

**Figura 4.1 – Modo de ruptura do corpo de prova no ensaio à tração**

#### 4.2.2 Caracterização da solda

Os resultados obtidos pelo ensaio à tração dos corpos de prova com emenda soldada estão apresentados na Tabela 4.2. Nesses ensaios foram obtidas a tensão limite de escoamento ( ), a tensão limite de ruptura à tração ( ) e alongamento ( $\Delta l$ ).

**Tabela 4.2 – Corpos de prova com emenda soldada**

Corpo-de-prova	Aço	Tensão de escoamento (MPa)		Tensão de ruptura (MPa)		Alongamento (%)
			Média		Média	
4A	USI-SAC 300	365,78	381,05	500,20	502,01	24,9%
5A	USI-SAC 300	383,45		505,39		
6A	USI-SAC 300	393,92		500,44		
4B	CSN COR 420	377,49	384,83	490,84	492,00	17,6%
5B	CSN COR 420	389,41		482,52		
6B	CSN COR 420	387,58		502,65		

#### 4.3 ENSAIO DAS VIGAS À FLEXÃO SIMPLES

Os resultados dos ensaios das vigas com seção duplo U enrijecidos opostos apresentados nesse item se referem aos ensaios experimentais realizados com seção 2UE200x75x25#3.04mm conforme figura 3.9.



Tabela 4.4 – Dimensões das seções transversais dos perfis U enrijecido da série B

Dimensão	Valor (mm)					
	Viga V1B	Viga V2B	Viga V3B	Viga V4B	Valor Médio	Valor nominal
$b_w$	198,60	198,50	198,65	198,60	198,59	200,00
$a_m$	195,56	195,46	195,61	195,56	195,55	196,96
$a$	186,44	186,34	186,49	186,44	186,43	187,84
$b_f$	74,20	73,90	73,80	73,55	73,86	75,00
$b_m$	71,16	70,86	70,76	70,51	70,82	71,96
$b$	62,04	61,74	61,64	61,39	61,70	62,84
$c$	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92
$c_m$	23,48	23,48	23,48	23,48	23,48	23,48
$D$	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
$t = r_i$	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04
$r_m$	4,56	4,56	4,56	4,56	4,56	4,56
$u_1$	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16

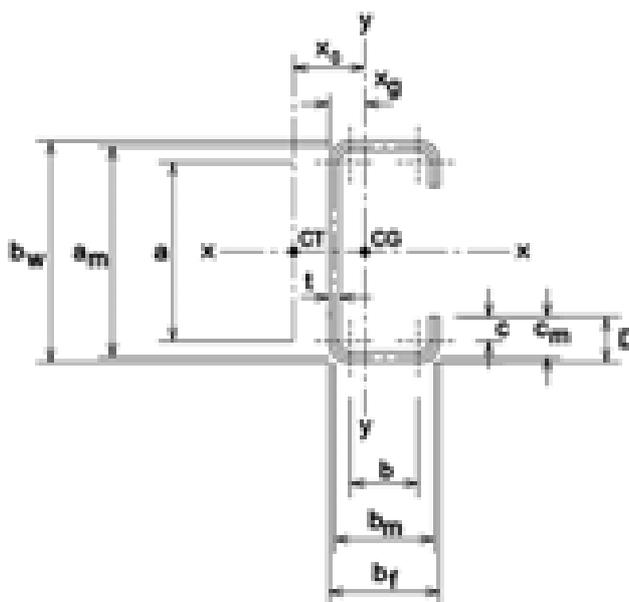


Figura 4.2 – Propriedades geométricas da seção transversal de perfis U enrijecido (NBR 6355, 2003).

A área da seção transversal de duplo U enrijecido tipo caixão foi calculada pela equação 4.1.

O momento de inércia em relação ao eixo  $x$ , , foi calculado com a equação 4.2.

O raio de giração em torno do eixo  $x$ , foi calculado por 4.3.

—  
—

O módulo de resistência elástico, , da seção bruta, no caso de seções simétricas em relação ao eixo  $x$ , pode ser dado pela equação 4.4.

—

A tabela 4.6 mostra as propriedades geométricas nominais das vigas ensaiadas e as tabelas 4.7 e 4.8 apresentam as propriedades geométricas reais para as vigas das séries A e B.

**Tabela 4.5 – Propriedades geométricas nominais**

Propriedade	Valor
Área da seção transversal (cm <sup>2</sup> )	22,47
Inércia à flexão em $x-x$ (cm <sup>4</sup> )	1.408
Módulo de resistência elástico da seção bruta $x-x$ (cm <sup>3</sup> )	140,77
Raio de giração em $x-x$ (cm)	7,91
Massa linear (kg/m)	17,64

**Tabela 4.6 – Propriedades geométricas das seções transversais das vigas ensaiadas série A**

Propriedade	Valor				
	Viga V1A	Viga V2A	Viga V3A	Viga V4A	Média
Área da seção transversal (cm <sup>2</sup> )	22,84	22,84	22,84	22,85	22,84
Inércia à flexão em $x-x$ (cm <sup>4</sup> )	1.454	1.454	1.455	1.455	1.454
Módulo de resistência elástico da seção bruta $x-x$ (cm <sup>3</sup> )	144,37	144,41	144,46	144,44	144,42
Raio de giração em $x-x$ (cm)	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98
Massa linear (kg/m)	17,93	17,93	17,93	17,93	17,93

Na tabela 4.9 é feita a comparação entre os momentos de inércia experimentais e os momentos de inércia nominais para todas as vigas ensaiadas.

**Tabela 4.7 – Propriedades geométricas das seções transversais das vigas ensaiadas série B**

Propriedades	Valor				
	Viga V1B	Viga V2B	Viga V3B	Viga V4B	Média
Área da seção transversal (cm <sup>2</sup> )	22,29	22,25	22,24	22,21	22,25
Inércia à flexão em x-x (cm <sup>4</sup> )	1.375	1.370	1.372	1.368	1.371
Módulo de resistência elástico da seção bruta x-x (cm <sup>3</sup> )	138,51	138,06	138,09	137,75	138,10
Raio de giração em x-x (cm)	7,86	7,85	7,85	7,85	7,85
Massa linear (kg/m)	17,50	17,46	17,46	17,44	17,46

**Tabela 4.8 – Comparação entre o momento de inércia nominal e experimental**

Viga	$I_{x(exp)} / I_{x(nom)}$	
		Média
V1A	1,03	1,03
V2A	1,03	
V3A	1,03	
V4A	1,03	
V1B	0,98	0,97
V2B	0,97	
V3B	0,97	
V4B	0,97	

### 4.3.2 Forças e modos de ruptura

Força última ( ) é aquela carga na qual se verifica a ruína total ou parcial da viga. Nessa fase ocorre o estado limite de resistência do aço, uma vez que a viga não resiste mais aos esforços a ela transmitidos pelo sistema de aplicação de forças.

**Tabela 4.9 – Resultados e modos de ruptura das vigas ensaiadas**

Viga	Número de emendas	$P_u$ (kN)	Modo de ruptura
V1A	nenhuma	134	PLM*
V2A	uma	123	PLM*
V3A	duas	127	PLM*
V4A	três	121	PLM*
V1B	nenhuma	126	PLM*
V2B	uma	128	PLM*
V3B	duas	116	PLM*
V4B	três	114	PLM*

\*Plastificação da mesa comprimida

Na Tabela 4.10 estão os resultados referentes à força última de ruptura ( ) e os modos de ruptura de cada viga ensaiada, onde PLM é plastificação da mesa comprimida.

As tabelas 4.11 e 4.12 apresentam uma comparação da força última de ruptura das vigas ensaiadas com emendas soldadas, em relação à viga de referência sem emenda soldada, para as séries A e B.

**Tabela 4.10 – Comparação da força última de ruptura das vigas da série A**

Viga	$P_u$ (kN)		$P_u / P_{u(Vref)}$
		Média	
V1A	134	126	1,00
V2A	123		0,92
V3A	127		0,95
V4A	121		0,90

**Tabela 4.11 – Comparação da força última de ruptura das vigas da série B**

Viga	$P_u$ (kN)		$P_u / P_{u(Vref)}$
		Média	
V1B	126	121	1,00
V2B	128		1,01
V3B	116		0,92
V4B	114		0,90



**Figura 4.3 – Ruptura por plastificação da mesa comprimida**

Foi observado que todas as oito vigas sofreram o mesmo modo de ruptura, por plastificação da mesa comprimida, como mostra a figura 4.3. Na tabela 4.12 é feito um comparativo entre as forças últimas de ruptura das vigas da série B em relação às vigas da série A, bem como um comparativo entre os momentos de inércia. A tabela 4.13 apresenta os

valores das forças observadas de início de escoamento e das forças de ruptura das vigas,  $P_{y \text{ proj}}$  e  $P_{u \text{ proj}}$ , respectivamente, bem como os respectivos valores calculados considerando-se as características observadas do material e da seção transversal das vigas e valores calculados considerando-se os valores teóricos, ou nominais das vigas ensaiadas. Os cálculos dos valores da tabela 4.13 estão apresentados no apêndice A. A tabela 4.14 faz comparações entre os valores apresentados na tabela 4.13.

**Tabela 4.12 – Comparação das forças últimas e dos momentos de inércia das vigas da série B em relação às vigas da série A**

	V1B / V1A	V2B / V2A	V3B / V3A	V4B / V4A
$P_u$	0,94	1,04	0,91	0,94
$I_x$	0,95	0,94	0,94	0,94

**Tabela 4.13 – Valores de ruptura e escoamento experimentais e teóricos**

Viga	$P_y \text{ exp}$ (kN)	$P_y \text{ teo/exp}$ (kN)	$P_y \text{ proj}$ (kN)	$P_u \text{ exp}$ (kN)	$P_u \text{ teo/exp}$ (kN)	$P_u \text{ proj}$ (kN)
V1A	92,00	82,47	55,18	134,00	111,58	88,29
V2A	91,00	82,52	55,18	123,00	111,63	88,29
V3A	87,00	82,57	55,18	127,00	111,71	88,29
V4A	90,00	82,55	55,18	121,00	111,68	88,29
Média A	90,00	82,53	55,18	126,25	111,65	88,29
V1B	85,00	78,94	55,18	126,00	103,07	88,29
V2B	84,00	78,78	55,18	128,00	102,85	88,29
V3B	80,00	78,89	55,18	116,00	103,00	88,29
V4B	81,00	78,72	55,18	114,00	102,78	88,29
Média B	82,50	78,83	55,18	121,00	102,92	88,29

**Tabela 4.14 – Comparativo entre os valores de ruptura e escoamento experimentais e teóricos**

Viga	$\frac{P_y \text{ exp}}{P_y \text{ teo/exp}}$	$\frac{P_y \text{ exp}}{P_y \text{ proj}}$	$\frac{P_u \text{ exp}}{P_u \text{ teo/exp}}$	$\frac{P_u \text{ exp}}{P_u \text{ proj}}$	$\frac{P_u \text{ proj}}{P_y \text{ proj}}$	$\frac{P_u \text{ exp}}{P_y \text{ proj}}$
V1A	1,12	1,67	1,20	1,52	1,60	2,43
V2A	1,10	1,65	1,10	1,39	1,60	2,23
V3A	1,05	1,58	1,14	1,44	1,60	2,30
V4A	1,09	1,63	1,08	1,37	1,60	2,19
Média A	1,09	1,63	1,13	1,43	1,60	2,29
V1B	1,08	1,54	1,22	1,43	1,60	2,28
V2B	1,07	1,52	1,24	1,45	1,60	2,32
V3B	1,01	1,45	1,13	1,31	1,60	2,10
V4B	1,03	1,47	1,11	1,29	1,60	2,07
Média B	1,05	1,50	1,18	1,37	1,60	2,19

### 4.3.3 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais, conforme descrito no capítulo 3 foram medidos por deflectômetros posicionados na mesa inferior da viga no meio do vão (R3/R4) e a 950mm dos apoios (R1/R2 e R5/R6), sob os pontos de aplicação das forças.

Os gráficos das figuras 4.4 a 4.19 mostram, para cada viga estudada, os deslocamentos verticais ocorridos a 950mm dos apoios e no meio do vão e a força aplicada ( $P$ ) para cada deslocamento medido.

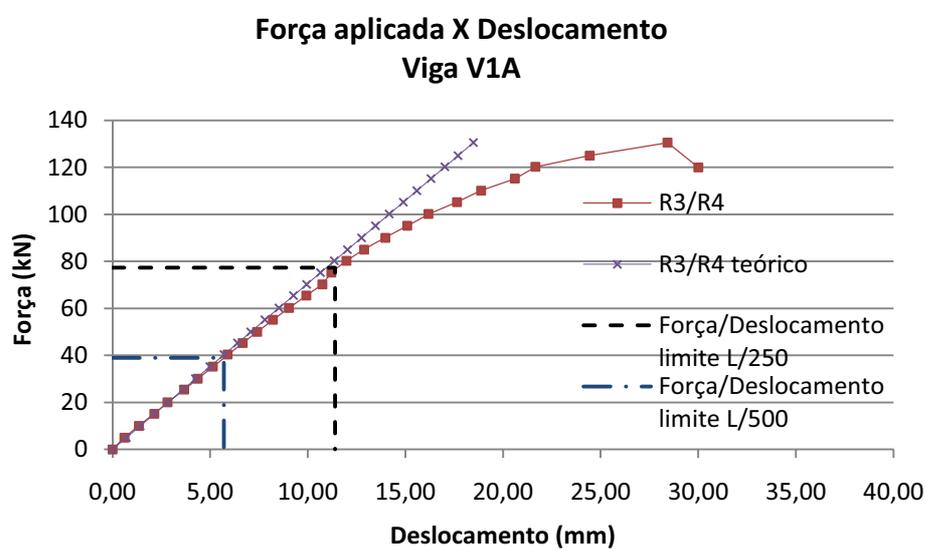


Figura 4.4 – Gráfico força x deslocamento para viga V1A, no meio do vão

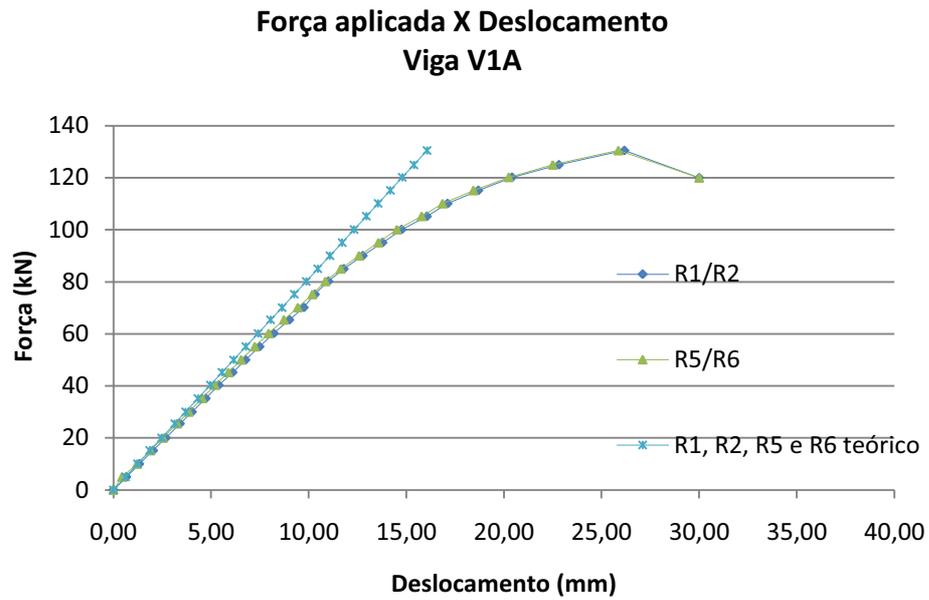


Figura 4.5 – Gráfico força x deslocamento para viga V1A, a 950mm dos apoios

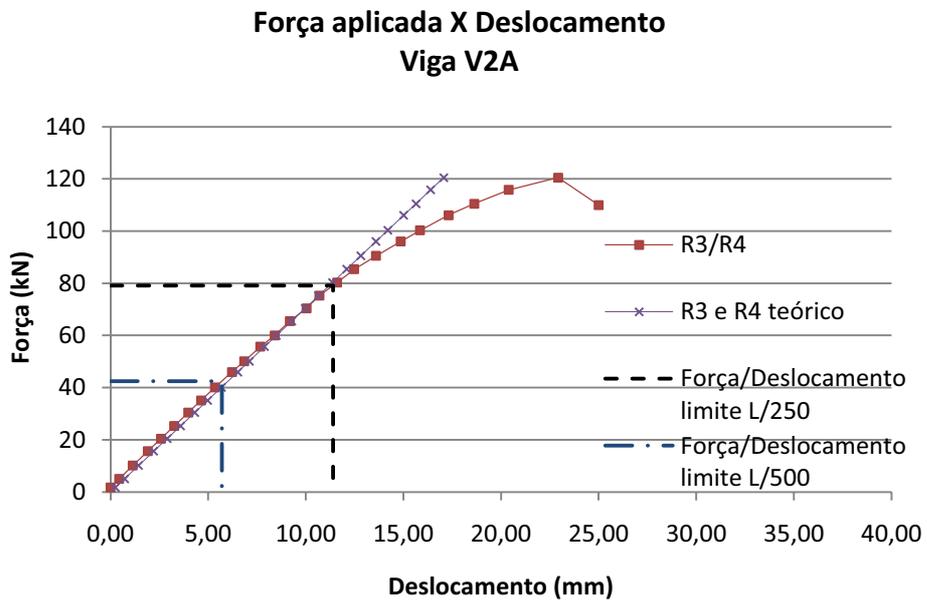


Figura 4.6 – Gráfico força x deslocamento para viga V2A, no meio do vão

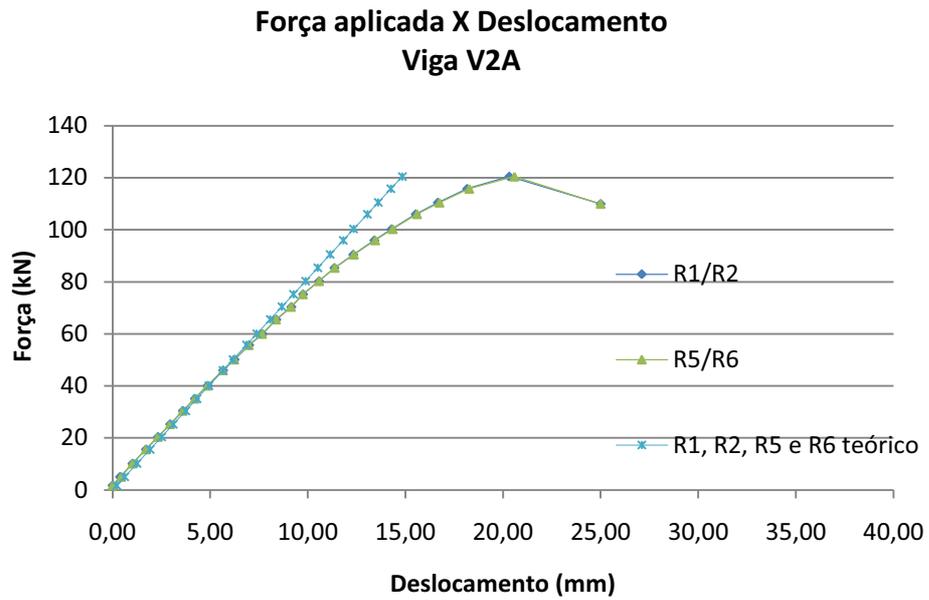


Figura 4.7 – Gráfico força x deslocamento para viga V2A, a 950mm dos apoios

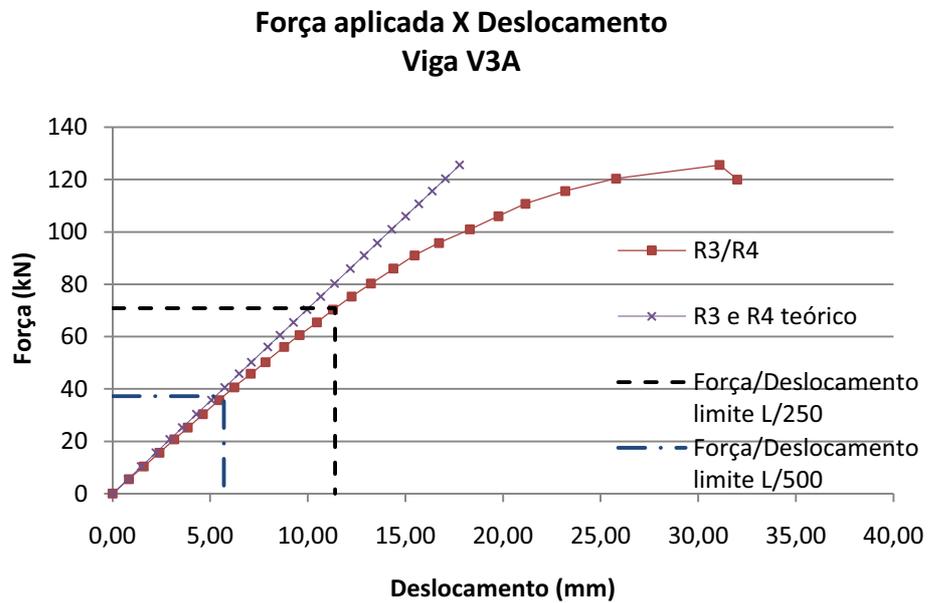


Figura 4.8 – Gráfico força x deslocamento para viga V3A, no meio do vão

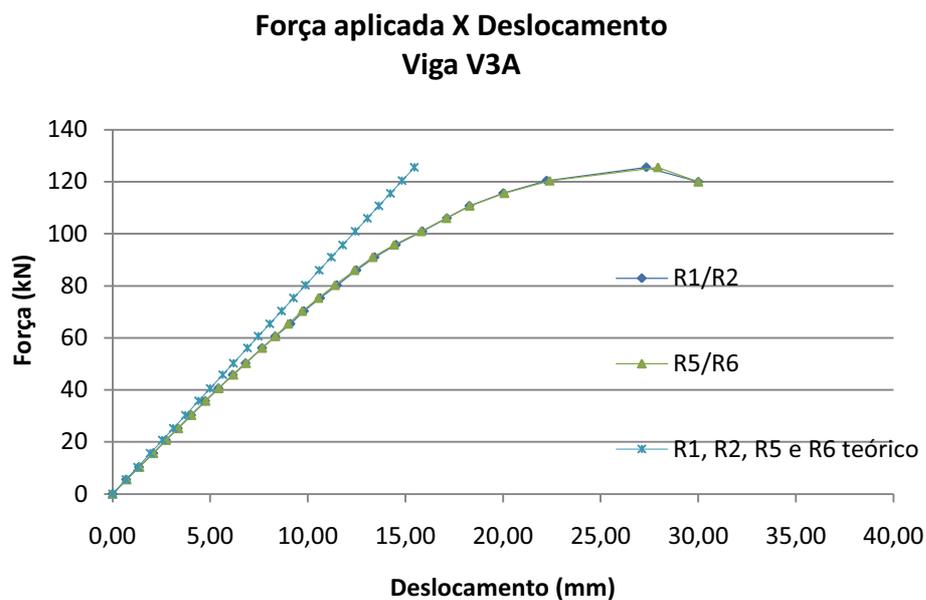


Figura 4.9 – Gráfico força x deslocamento para viga V3A, a 950mm dos apoios

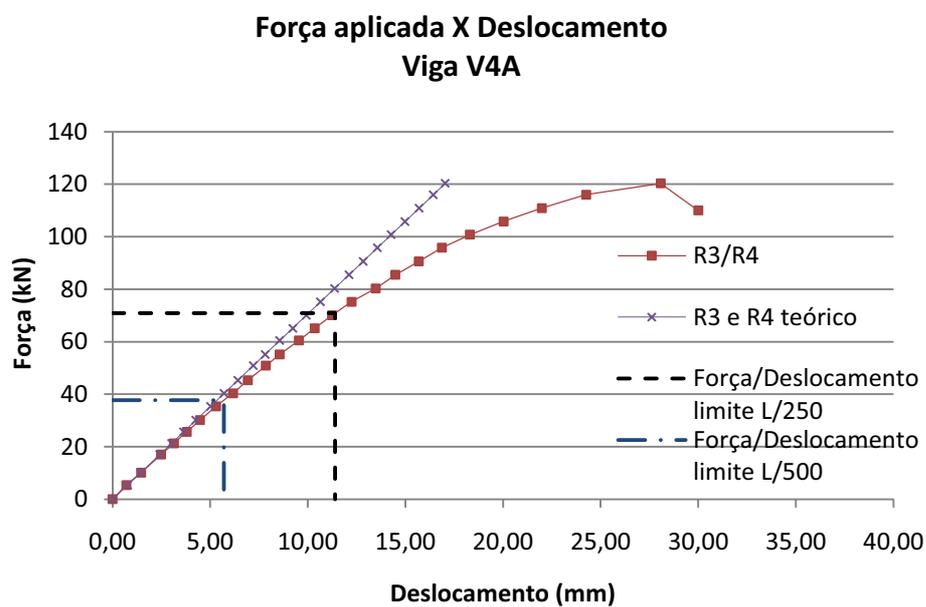


Figura 4.10 – Gráfico força x deslocamento para viga V4A, no meio do vão

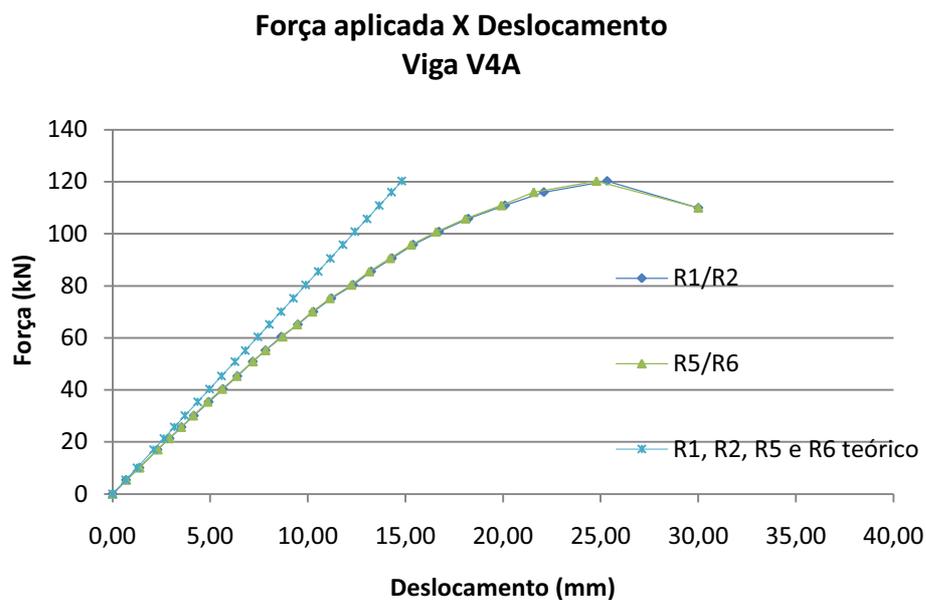


Figura 4.11 – Gráfico força x deslocamento para viga V4A, a 950mm dos apoios

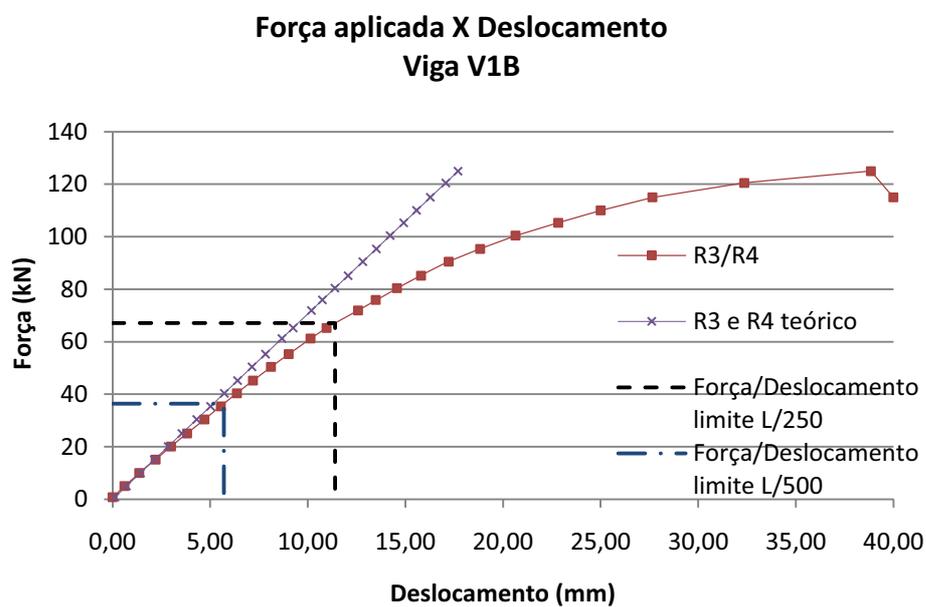


Figura 4.12 – Gráfico força x deslocamento para viga V1B, no meio do vão

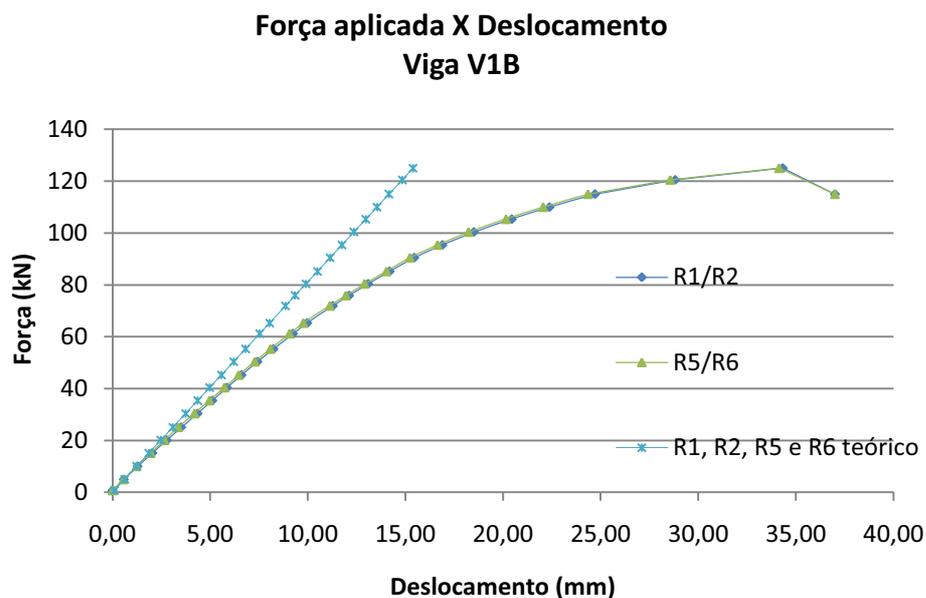


Figura 4.13 – Gráfico força x deslocamento para viga V1B, a 950mm dos apoios

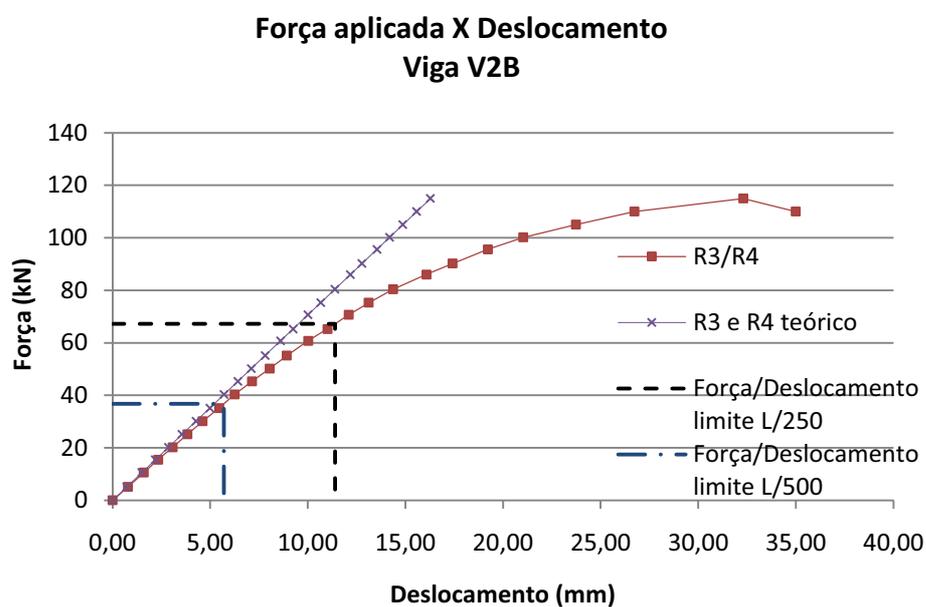


Figura 4.14 – Gráfico força x deslocamento para viga V2B, no meio do vão

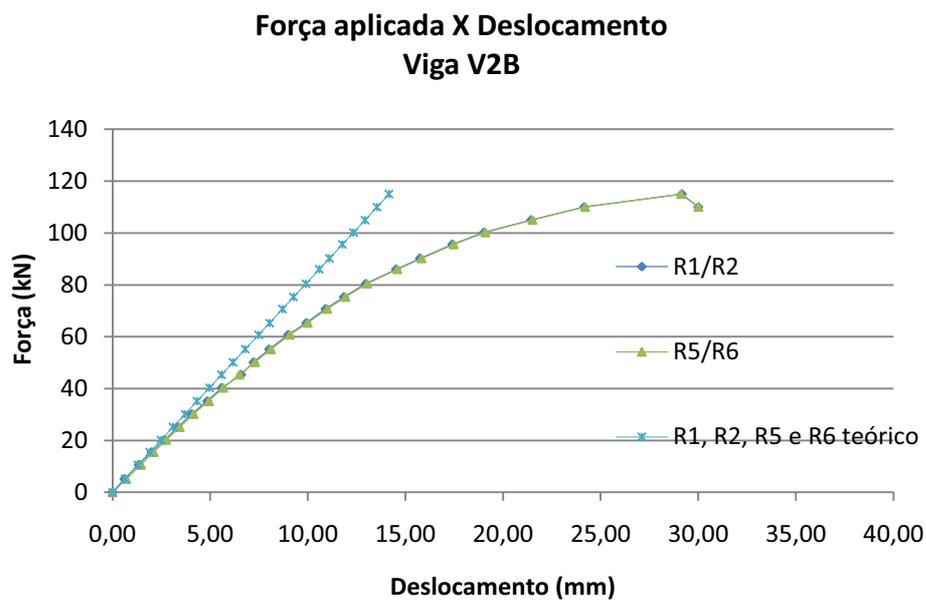


Figura 4.15 – Gráfico força x deslocamento para viga V2B, a 950mm dos apoios

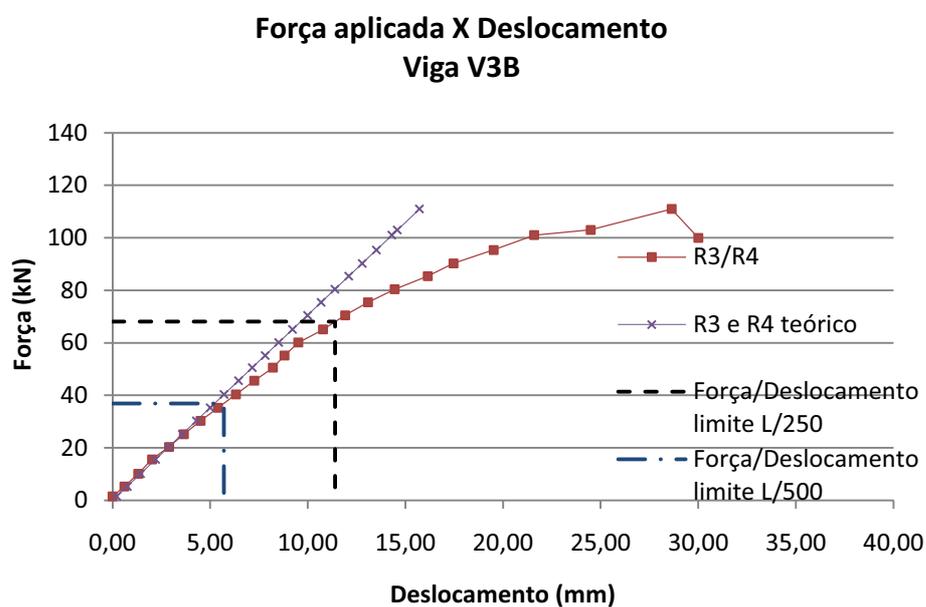


Figura 4.16 – Gráfico força x deslocamento para viga V3B, no meio do vão

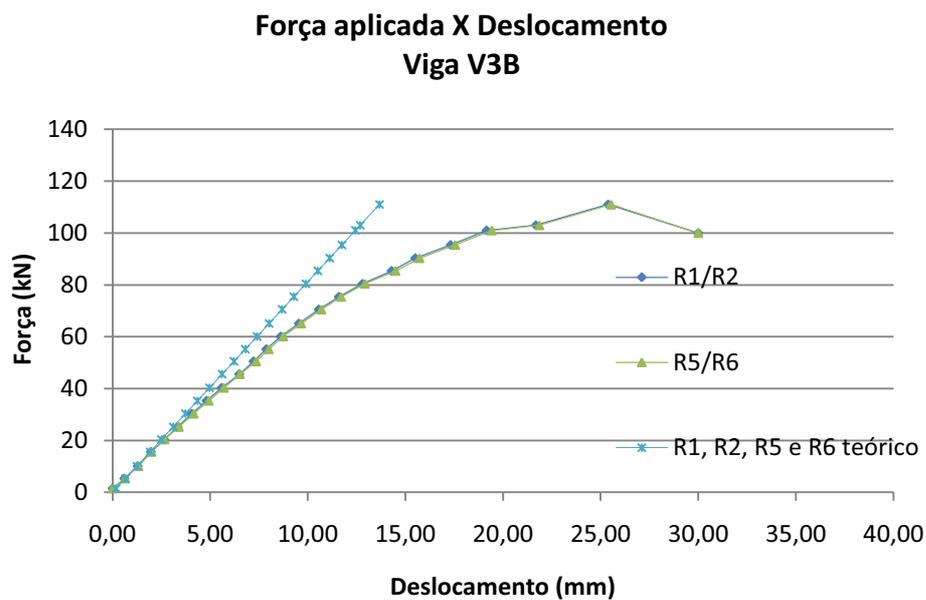


Figura 4.17 – Gráfico força x deslocamento para viga V3B, a 950mm dos apoios

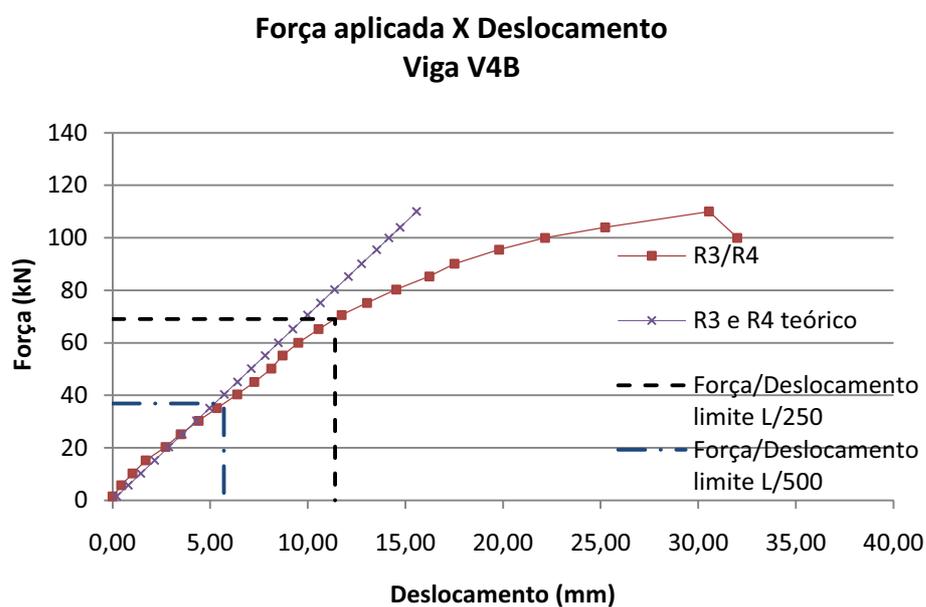


Figura 4.18 – Gráfico força x deslocamento para viga V4B, no meio do vão

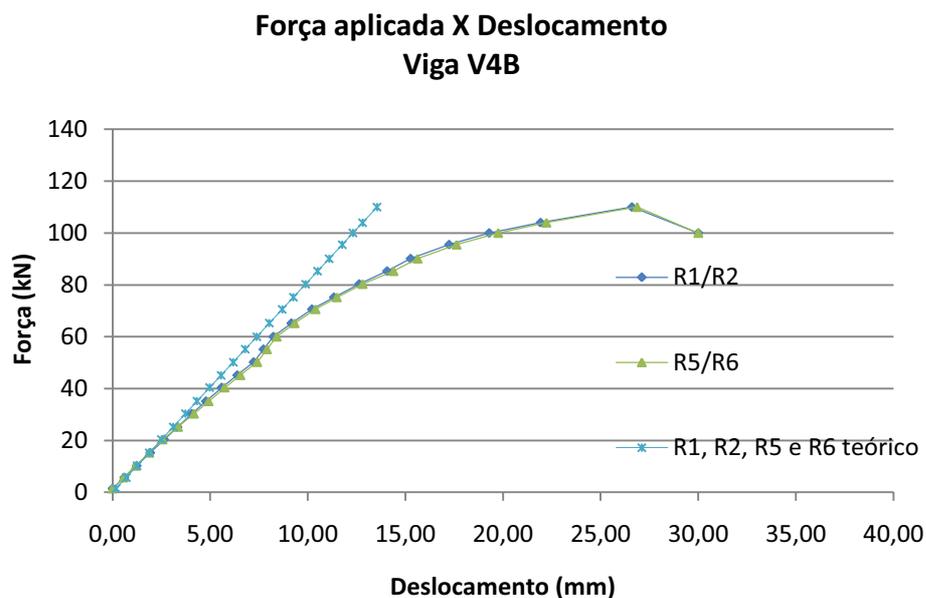


Figura 4.19 – Gráfico força x deslocamento para viga V4B, a 950mm dos apoios

A tabela 4.15 apresenta os resultados dos deslocamentos máximos no meio do vão, para cada viga ensaiada, obtidos pela leitura dos gráficos carga x deslocamento das vigas. Nesta tabela, o deslocamento máximo das vigas, refere-se ao valor da média aritmética do deslocamento vertical medido pelos deflectômetros R2/R3 que foram posicionados no meio do vão da viga.

Tabela 4.15 – Deslocamentos máximos no meio do vão

Viga	Deslocamentos máximos no meio do vão (mm)
V1A	28,43
V2A	22,92
V3A	31,10
V4A	28,08
V1B	38,85
V2B	32,31
V3B	28,64
V4B	30,55

A tabela 4.16 mostra o deslocamento obtido no meio do vão, por cada viga no momento de início da tensão de escoamento ( $f_y$ ).

Tabela 4.16 – Deslocamentos no meio do vão no início da tensão de escoamento

Viga	Deslocamento em $f_y$ (mm)
V1A	13,7
V2A	11,9
V3A	14,8
V4A	14,1
V1B	13,6
V2B	13,0
V3B	12,1
V4B	11,8

As forças máximas alcançadas pelas vigas ensaiadas nos limites de deslocamento de L/500 e L/250 estão apresentados nas tabelas 4.17 e 4.18, onde também é feita a comparação com a viga de referência.

Tabela 4.17 – Forças máximas nos limites de deslocamentos L/500 e L/250 para as vigas da série A

Viga	Forças(kN) para cada limite de deslocamento			
	L/500 (5,7mm)		L/250 (11,4mm)	
		$P_{lim}/P_{lim(ref)}$		$P_{lim}/P_{lim(ref)}$
V1A	38,98	1,00	76,46	1,00
V2A	42,49	1,09	79,14	1,04
V3A	37,25	0,96	70,85	0,93
V4A	37,70	0,97	70,90	0,93

Tabela 4.18 – Forças máximas nos limites de deslocamentos L/500 e L/250 para as vigas da série B

Viga	Forças(kN) para cada limite de deslocamento			
	L/500 (5,7mm)		L/250 (11,4mm)	
		$P_{lim}/P_{lim(ref)}$		$P_{lim}/P_{lim(ref)}$
V1B	36,37	1,00	67,10	1,00
V2B	36,71	1,01	67,25	1,00
V3B	36,92	1,02	68,06	1,01
V4B	36,89	1,01	69,09	1,03

A tabela 4.19 mostra a comparação entre as vigas da série B em relação às vigas da série A para os limites de deslocamento de L/500 e L/250.

Tabela 4.19 – Comparação entre as vigas da série B em relação às vigas da série A

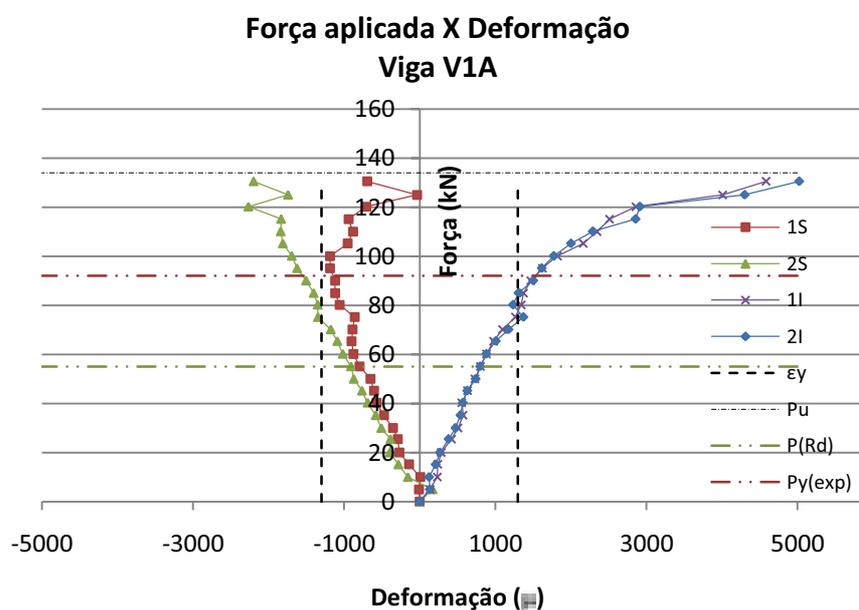
	V1B / V1A	V2B / V2A	V3B / V3A	V4B / V4A
L/500	0,93	0,86	0,99	0,98
L/250	0,88	0,85	0,96	0,97

#### 4.3.4 Deformações específicas

As leituras dos extensômetros elétricos são apresentadas nesse item sob a forma de gráficos, os quais relacionam a carga aplicada ( $P$ ) com as deformações nas mesas superiores e inferiores.

A nomenclatura adotada refere-se ao extensômetro e sua respectiva posição. A nomenclatura 1S, 2S, 3S e 4S referem-se aos extensômetros posicionados na mesa superior da viga, 1I, 2I, 3I e 4I referem-se aos extensômetros posicionados na mesa inferior da viga.

As figuras 4.20 a 4.27 apresentam os gráficos carga aplicada versus deformações para as vigas ensaiadas. Nestes gráficos estão expressos ainda a deformação de início de escoamento ( $\epsilon_y$ ), a carga última de ruptura para cada viga ensaiada ( $P_u$ ), a carga referente ao início do escoamento da seção, calculada com base nas características nominais do aço e da seção transversal ( $P_{(Rd)}$ ) e a carga referente ao início do escoamento da seção, considerando-se as propriedades mecânicas e geométricas da seção determinadas experimentalmente ( $P_{y(exp)}$ ).



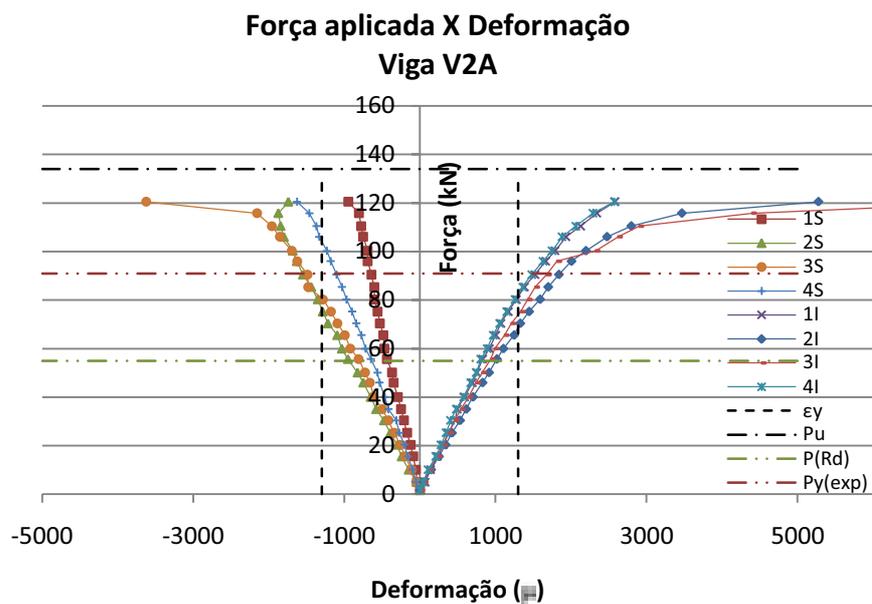


Figura 4.21 – Gráfico carga x deformação – viga V2A

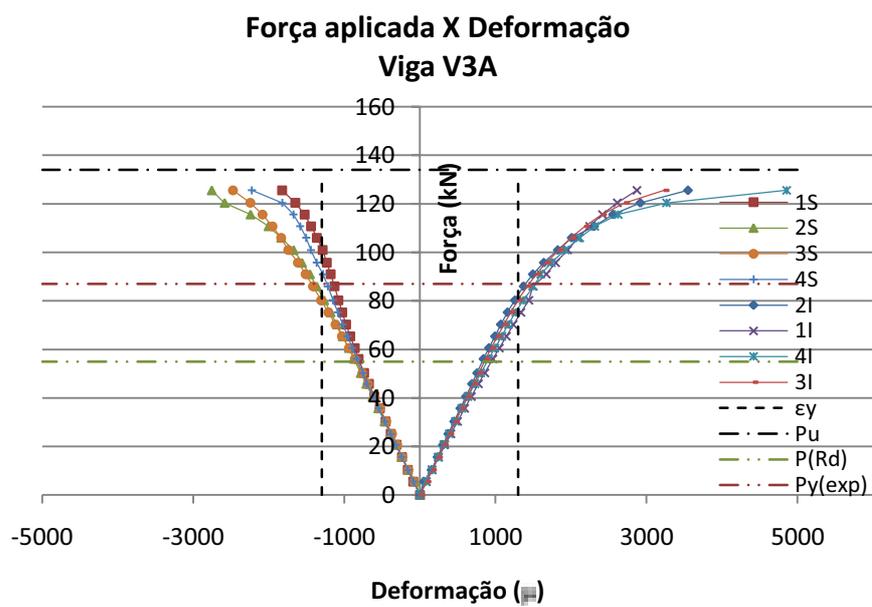


Figura 4.22 – Gráfico carga x deformação – viga V3A

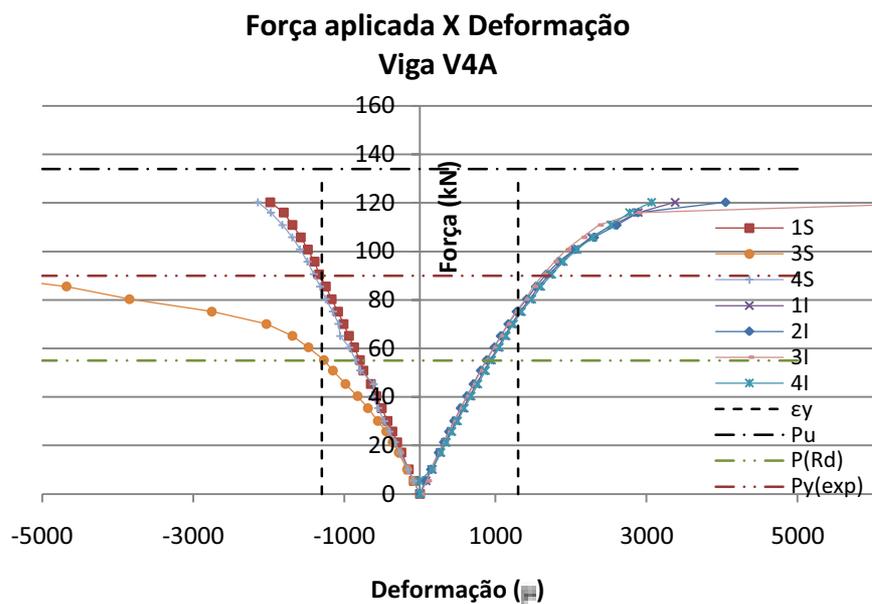


Figura 4.23 – Gráfico carga x deformação – viga V4A

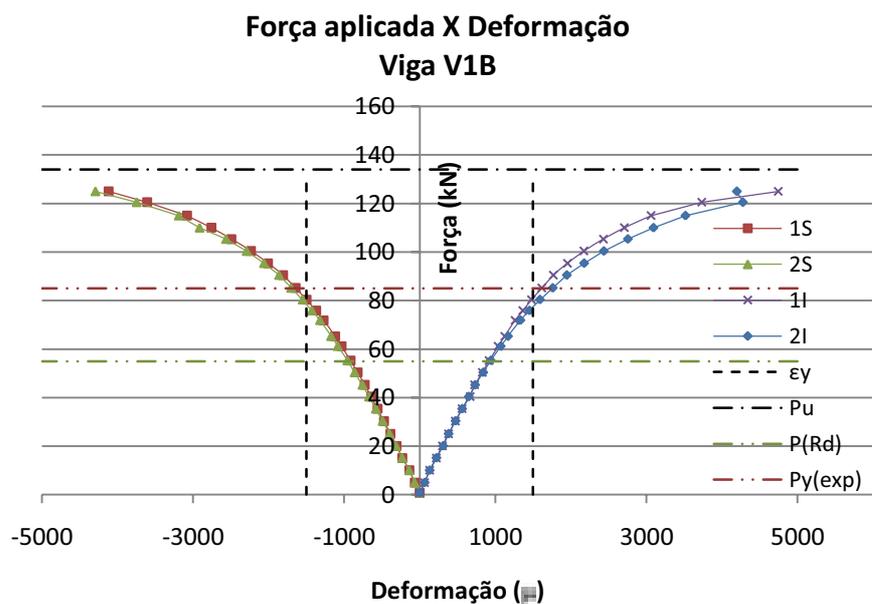


Figura 4.24 – Gráfico carga x deformação – viga V1B

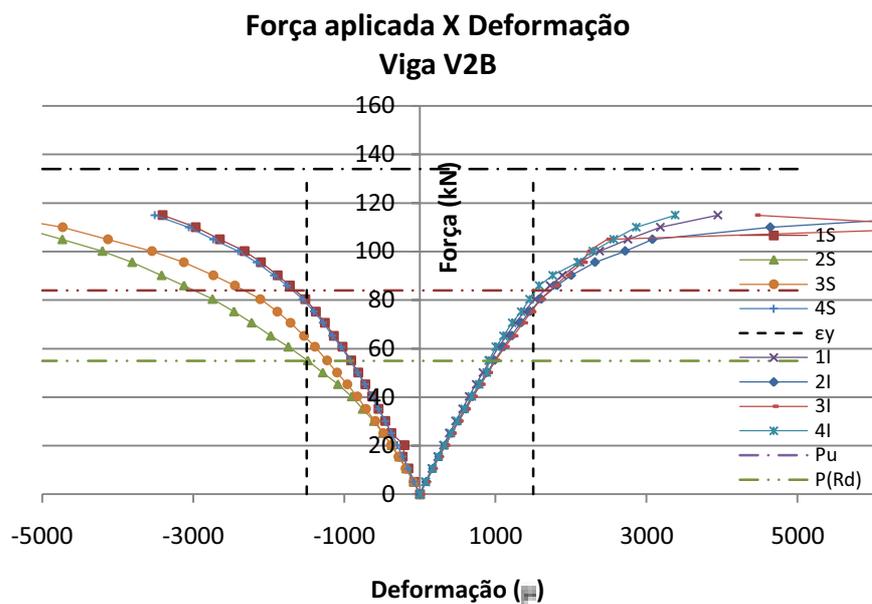


Figura 4.25 – Gráfico carga x deformação – viga V2B

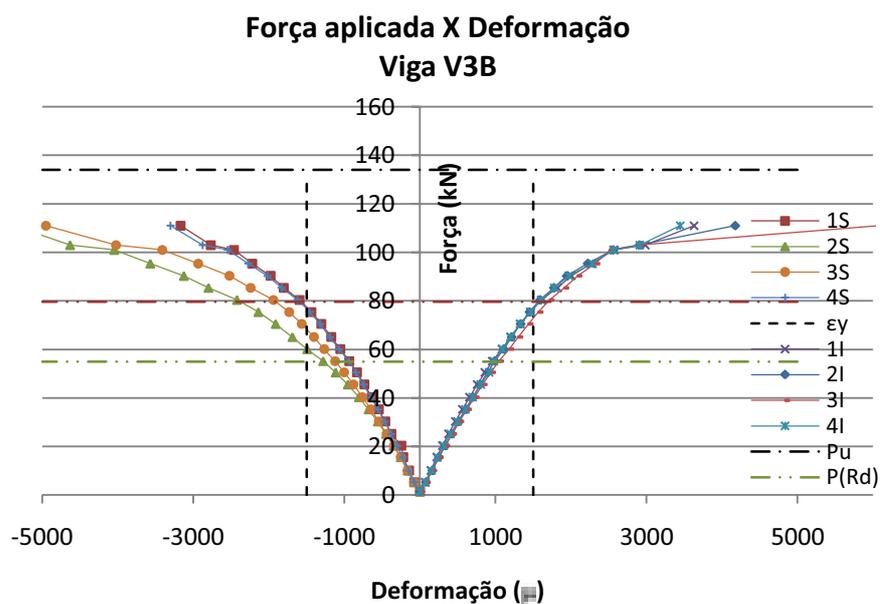
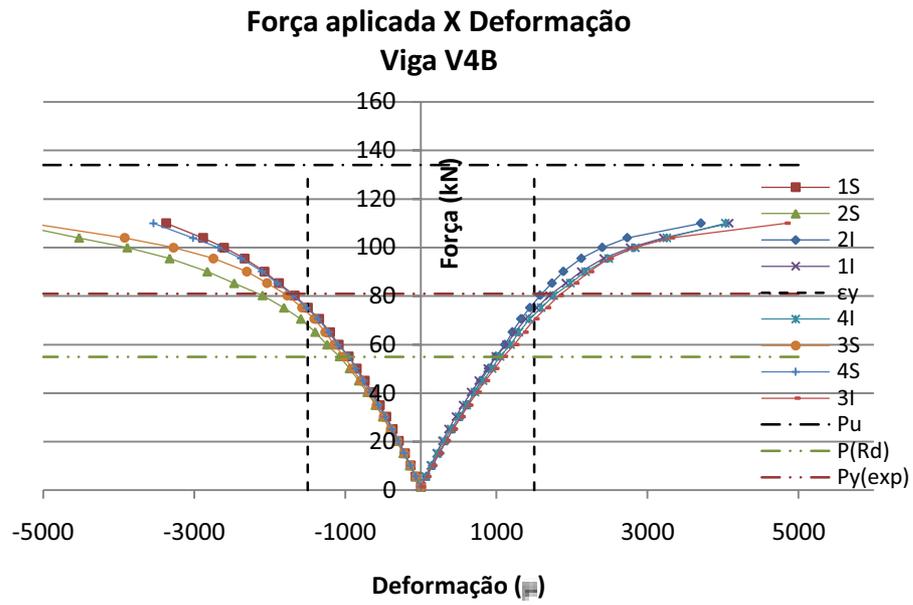


Figura 4.26 – Gráfico carga x deformação – viga V3B



**Figura 4.27 – Gráfico carga x deformação – viga V4B**

## **5 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Os resultados dos ensaios realizados nesse trabalho são agora analisados. Para facilitar a compreensão, a análise será feita por item na seguinte ordem: análise dos resultados do ensaio de caracterização do aço, análise dos resultados de caracterização da solda e análise dos resultados das vigas metálicas submetidas à flexão simples.

### **5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

#### **5.2.1 Caracterização dos aços**

Os valores nominais referentes às propriedades mecânicas dos aços USI-SAC 300 e CSN COR 420 utilizados na fabricação dos perfis estudados neste trabalho são mostrados nas tabelas 2.3 e 2.4.

Em todos os corpos de prova ensaiados, os valores encontrados para a tensão limite de escoamento, tensão limite de ruptura e alongamento foram superiores ao valor mínimo constante nas especificações dos fabricantes, conforme foi apresentado na tabela 4.1.

#### **5.2.2 Caracterização da solda**

A tabela 4.2 contém os valores da tensão limite de escoamento ( ) e da tensão limite de ruptura ( ) e alongamento ( $\Delta l$ ) para os corpos de prova soldados, os quais superam os valores mínimos especificados pelo fabricante. Todos os corpos de prova romperam-se no material base com ruptura dúctil.

A solda foi aprovada no ensaio de tração, pois os resultados obtidos estão dentro dos limites prescritos pela “*American Society Mechanical Engineer*” - ASME (QW-153), a

qual especifica que o corpo de prova deve apresentar resistência a tração maior que a resistência mínima especificada para o aço do material de base e no caso do corpo de prova romper no material base fora da região de solda ou da linha de fusão, a resistência encontrada não deve estar abaixo de 5% da resistência mínima especificada para o aço do material de base.

Nesse ensaio é possível observar que os valores encontrados para as tensões limite de escoamento ( ) e limite de ruptura ( ) dos corpos de prova soldados superam aqueles resultantes do ensaio de tração dos corpos de prova sem solda. Considerando os valores médios totais encontrados nos ensaios dos corpos de prova sem e com solda para as suas tensões verifica-se que, nos corpos de prova soldados as tensões limite de escoamento ( ) e limite de ruptura ( ) tiveram um aumento de aproximadamente 4,3% e 1,6%, respectivamente, em relação aos corpos de prova sem solda para o aço USI-SAC 300 e para o aço CSN COR 420 estes percentuais foram aproximadamente 6,2% e 4,0%. Em relação ao alongamento, foi observado que para os corpos de prova soldados os valores foram menores que para os corpos de prova sem solda, mostrando com isso que houve uma diminuição da ductilidade do aço em função da solda.

### 5.3 ENSAIOS DAS VIGAS METÁLICAS

#### 5.3.1 Carga e modos de ruptura

Conforme os resultados apresentados na tabela 4.7, para a força última ( ) no instante do colapso de cada viga, os valores da força sofreu pouca variação entre as vigas com emendas soldadas e sem emenda soldada para os dois tipos de aço. A variação da força última de ruptura ( ) entre vigas com as mesmas características, comparando os tipos de aço também sofreram pouca variação.

Fazendo a comparação da força última atingida pela viga fabricada com o aço USI-SAC 300 sem emenda, com a força última atingido pelas vigas com uma, duas e três emendas soldadas, verifica-se que as vigas com uma, duas e três emendas soldadas tiveram uma força última de ruptura aproximadamente 8,0%, 5,0% e 10,0% menor que a viga de referência .

Para as vigas fabricadas com o aço CSN COR 420 foi observado que apenas a viga com uma emenda teve força última de ruptura superior à viga referência, porém esta variação foi consideravelmente pequena, 1,0%. As vigas com duas e três emendas soldadas tiveram uma força última de ruptura 8,9% e 10,0% respectivamente, menor que a viga de referência.

Fazendo-se a comparação da força última de ruptura entre as vigas com as mesmas características, porém levando-se em consideração o tipo de aço que foram fabricadas, foi observado também que a variação não foi expressiva. Para a viga referência, sem emenda soldada, nota-se que a que foi fabricada com o aço CSN COR 420 teve uma força última de ruptura aproximadamente 6,0% menor que a viga fabricada com o aço USI-SAC 300. Nas vigas com duas e três emendas, fabricadas com o aço CSN COR 420 essa diferença foi aproximadamente 9,0% e 6,0% respectivamente, menor que nas mesmas vigas fabricadas com o aço USI-SAC 300. Apenas a viga com uma emenda, fabricada com o aço CSN COR 420 teve força última de ruptura maior que a mesma viga fabricada com aço USI-SAC 300, aproximadamente 4,0%.

Pode-se concluir que a soldagem não influenciou tanto na capacidade de resistência das vigas, independente da quantidade de emendas, pois a diferença máxima das vigas com emendas soldadas dos dois tipos de aço não superou a marca de 10% para mais ou para menos em comparação com as vigas de referência.

Neste ensaio foi verificado também que, em média, as vigas fabricadas com o aço CSN COR 420 tiveram força última de ruptura menor que a média da força última de ruptura das vigas fabricadas com o aço USI-SAC 300. Como os resultados dos ensaios de caracterização para os dois tipos de aço foram superiores aos valores nominais contidos nas especificações dos seus fabricantes, teoricamente as forças últimas de ruptura deveriam ter valores aproximadamente iguais. Porém como a média das forças últimas de ruptura das vigas fabricadas com o aço CSN COR 420 ficou um pouco abaixo, mostra que estes valores foram influenciados pelas propriedades geométricas da seção transversal, como dimensões da alma, da mesa e espessura da chapa, o que leva a pequenas variações no momento de inércia da seção.

Os perfis utilizados para a fabricação das vigas metálicas foram adquiridos de dois fornecedores diferentes, sendo um para o aço USI-SAC 300 e outro para o aço CSN COR 420, provavelmente dobrados por dois diferentes tipos de perfiladeiras, levando à uma diferença entre os valores de propriedades geométricas da seção transversal entre

fornecedores, o que fez com que as forças últimas de ruptura das vigas da série B tivessem um resultado inferior aos resultados das vigas da série A.

As tabelas 4.3 e 4.4 mostram as dimensões reais medidas nas vigas ensaiadas e foi observado que todas as vigas da série A tiveram dimensões superiores às dimensões nominais, enquanto que as vigas da série B apresentaram valores de dimensões reais menores que as dimensões nominais. No entanto, mesmo com valores reais menores ou maiores que os valores nominais, foi observado que estas dimensões estão dentro do limite estabelecido pela NBR 6355(2003).

Foi observado nas tabelas 4.4 e 4.5 que os momentos de inércia final das vigas da série A foi superior aos momentos de inércia das vigas da série B em média aproximadamente 5,0% para as vigas de referência e 6,0% para as vigas com uma duas e três emendas soldadas, como é apresentado na tabela 4.10.

Na tabela comparativa 4.14, foi observado que, para as vigas da série A, quando se utilizam, tanto para cálculo da tensão de escoamento quanto para a tensão de ruptura, os resultados experimentais comparados com os valores de projeto, os resultados experimentais foram em média e respectivamente 63,0% e 43,0% superiores aos resultados de projeto. Nas vigas da série B, os resultados experimentais foram superiores aos valores de projeto, em média 50,0% para a tensão de escoamento e 37,0% para a tensão de ruptura.

Foi observado também que, quando se faz a comparação entre os resultados da tensão de ruptura com a tensão de escoamento, utilizando-se os valores adotados em projeto, os resultados da tensão de ruptura foram superiores aos da tensão de escoamento em 60,0%, tanto para as vigas da série A quanto para as vigas da série B. Comparando-se os resultados experimentais da tensão de ruptura com a tensão de escoamento de projeto, a diferença de resultados foi ainda maior, em média a tensão de ruptura foi 129,0% superior para as vigas da série A e 119,0% para as vigas da série B.

A partir dos ensaios experimentais realizados, foi observado nas tabelas 4.3 e 4.4 que as propriedades geométricas das seções transversais ficaram acima dos valores recomendados pela NBR 6355(2003), para as vigas da série B e no caso das vigas da série A estes valores ficaram abaixo.

Como nos escritórios de cálculo, são utilizados apenas os valores nominais, surgiu-se uma preocupação em relação à resistência das vigas da série A, devido as suas propriedades geométricas terem ficado abaixo dos valores nominais, mesmo que dentro dos limites toleráveis.

No entanto, como todos os resultados obtidos com o cálculo a partir dos valores nominais foram superiores aos resultados experimentais, pode-se concluir que mesmo a viga tendo esta diferença nas propriedades geométricas, sua resistência final ainda maior que os resultados de projeto.

### 5.3.2 Deslocamentos verticais

Os resultados dos deslocamentos máximos verticais ocorridos na seção transversal das vigas, medidos pela média dos deflectômetros R2/R3 que foram posicionados no meio do vão da viga, mostraram que os valores obtidos nos ensaios foram próximos aos valores teóricos, principalmente no início da aplicação da força. O mesmo foi observado para a média dos deslocamentos medidos pelos deflectômetros R1/R2 e R5/R6 posicionados a 950mm dos apoios, que os valores experimentais foram aproximadamente iguais aos valores teóricos.

O Anexo A da NBR 14762(2001) apresenta vários limites de deslocamentos máximos recomendados para os estados limites de utilização de alguns tipos de viga. Os tipos de vigas estudadas neste trabalho têm sido bastante utilizadas como vigas de coberturas em geral, principalmente em galpões industriais e coberturas residenciais, bem como vigas de piso, geralmente em mezaninos.

A norma limita o deslocamento máximo para estes dois tipos de vigas, referente à combinação de todas as ações, em  $L/250$  para as vigas de cobertura em geral, e  $L/300$  para as vigas de piso, onde  $L$  é o vão teórico entre apoios.

Fazendo-se uma análise dos deslocamentos obtidos da leitura dos deflectômetros que foram posicionados no meio do vão da viga, para os limites de deslocamentos verticais,  $L/500$  e  $L/250$ , foi observado que para o limite de  $L/500$ , fazendo-se a comparação das vigas com uma, duas e três emendas soldadas em relação à viga sem emenda, a força atingida teve uma variação abaixo de 10% para mais ou para menos, tanto para as vigas da série A como para as vigas da série B.

A viga V2A alcançou uma força 9,0% maior que a viga V1A, enquanto que para as vigas V3A e V4A as forças alcançadas respectivamente foram 4,0% e 3,0% menor que a viga referência.

Para as vigas da série B, foi observado que a viga V2B alcançou uma força de aproximadamente 1,0% maior, ou seja, um valor praticamente igual ao da viga de referência.

Os resultados das outras duas vigas também tiveram variação pequena, 2,0% maior, para a viga V3B e 1,0% maior, para a viga V4B, em relação à viga V1B.

No limite de deslocamento de  $L/250$ , analisando as vigas da série A, observou-se que a viga V2A foi a que apresentou melhor resultado, 4,0% maior em relação à viga V1A. As vigas V3A e V4A tiveram uma diminuição percentual de força em relação à viga de referência, 7,0% para as duas vigas. As vigas da série B, para o limite de deslocamento de  $L/250$ , todas as vigas com emendas soldadas tiveram resultados superiores ao resultado da viga de referência, embora que com percentuais pequenos, 1,0% para a viga V3B e 3,0% para a viga V4B, com exceção da viga 2B que o resultado foi igual ao da viga V1B.

Comparando-se as vigas da série B em relação às vigas da série A foi observado que no limite de  $L/500$ , as vigas da série B tiveram resultados entre 2,0% e 14,0% menores que nas vigas da série A. No limite de  $L/250$  este resultado foi menor para as vigas da série B, variando entre 3,0% e 12,0%.

Foi observado que para as vigas da série A, a viga com uma emenda soldada teve um ganho de resistência em relação à viga sem emenda, mostrando que a solda contribuiu para este ganho de resistência. Porém, as vigas com duas e três emendas soldadas, tiveram uma diminuição de resistência. Como esta diminuição foi pequena, em média 3,5% menor, concluiu-se que para este tipo de viga estudada, fabricada com o aço USI-SAC 300, a quantidade de emendas, seja uma, duas ou três, não influencia negativamente em seu resultado, para os limites de deslocamentos recomendados pela norma e apresentados aqui.

Concluiu-se também que para este tipo de aço, a viga com apenas uma emenda soldada melhorou sua eficiência em relação à viga sem emenda.

Em todas as vigas da série B, com uma, duas e três emendas soldadas, o resultado alcançado foi superior ao resultado da viga referência em média 1,5%, o que leva a concluir que neste tipo de aço, o CSN COR 420, a soldagem provocou um enrijecimento das vigas, fazendo com que as flechas fossem reduzidas, melhorando com isso a sua rigidez em relação ao deslocamento vertical.

### **5.3.3 Deformações específicas**

Os gráficos carga versus deformação mostram que o comportamento das vigas foi como se esperava. Não ocorreu torção ou giro de seção transversal em nenhum dos ensaios.

Conforme pode ser observado pela leitura dos extensômetros, apresentada nos gráficos, as deformações específicas das vigas se série A foram menores que as deformações das vigas da série B, tanto para as vigas sem emendas, como para as vigas com emendas soldadas. Considerando o valor do módulo de elasticidade ( $E$ ) dos dois tipos de aço estudados, como sendo 205000MPa, este resultado mostra que o seu valor foi afetado provavelmente pelo momento de inércia. Como as vigas da série B apresentaram um menor momento de inércia, conseqüentemente suas deformações foram maiores, mostrando que esta diferença entre as propriedades geométricas da seção transversal das vigas, sofreu alteração de acordo com o fornecedor.

Foi observado que a leitura das deformações da viga V1A apresentou resultados muito diferentes dos resultados da viga V1B. Este resultado pode ser explicado por um possível defeito na colagem dos extensômetros elétricos.

Na viga V2A, foi observado que os extensômetros posicionados na mesa tracionada, tanto meio do vão como próximos aos pontos de aplicação das forças, apresentaram uma deformação maior que os posicionados na mesa comprimida. Estes mesmos resultados foram observados também para as demais vigas da com exceção do extensômetro 3S da viga V4A, que apresentou uma deformação maior que a deformação da mesa tracionada da viga.

As deformações específicas da viga V1B foram aproximadamente iguais, comparando-se a mesa tracionada com mesa comprimida. Na viga V2B, o comportamento apresentado pelos extensômetros colocados na mesa tracionada foram praticamente iguais entre si, para os extensômetros 1I, 2I, 3I e 4I, porém os extensômetros posicionados na mesa comprimida tiveram uma pequena variação, mostrando que as deformações no meio do vão foram maiores que as deformações próximas aos pontos de aplicação das forças.

As vigas V3B e V4B também apresentaram comportamentos parecidos com os da viga V2B, com as deformações maiores no meio do vão da viga.

Depois de feitas as análises das deformações específicas foi possível observar que as vigas se comportaram como esperado, não havendo nenhuma variação anormal. Nas vigas que apresentaram maiores deformações na mesa comprimida pode-se admitir que na região de compressão, as deformações são afetadas pelo processo de plastificação da mesa próximo ao local de ruptura destas vigas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho estuda o comportamento de vigas com seção composta, constituídas de perfis formados a frio com emendas soldadas. Foram realizados ensaios para vigas com seções de 200x150x25x3,04mm. Essa seção foi escolhida por ser uma seção intermediária entre as seções estudadas por Cardoso (2003), onde foram estudadas seções de 150x120x20x2.00mm e 250x170x25x3,04mm. As vigas estudadas foram em número de oito onde quatro foram fabricadas com aço USI-SAC 300 e quatro fabricadas com aço CSN COR 420, e foi variada a quantidade de emendas soldadas para cada tipo de aço.

Todas as vigas estudadas romperam por plastificação da mesa superior comprimida e cada viga apresentou diferentes valores para força última de ruptura e flecha máxima, porém os valores não apresentaram diferença superior a 10%.

Para cada viga ensaiada foram determinados valores teóricos referentes aos deslocamentos verticais, através de expressões presentes na literatura técnica.

Os valores obtidos nos ensaios possibilitaram algumas conclusões, as quais são apresentadas a seguir:

1 - Todas as vigas estudadas romperam com valores de força última ( $P_u$ ), superiores à tensão correspondente ao limite de escoamento ( $f_y$ ) e deformações específicas últimas ( $\epsilon_u$ ) acima das deformações específicas de escoamento ( $\epsilon_y$ ), com exceção da viga V2A em que em sua mesa superior, as deformações específicas últimas próximas aos pontos de aplicação das forças foram menores que as deformações específicas de escoamento.

2 - Todas as vigas com emendas soldadas, fabricadas com aço CSN COR 420 tiveram resistência menor que a viga sem emenda soldada, fabricada com o mesmo tipo de aço. A diminuição de resistência apresentada, não foi tão significativa, mostrando com isso, que a quantidade (uma, duas e três) de emendas soldadas não influenciou expressivamente na resistência da viga, de forma que comprometesse a sua utilização com estas quantidades de emendas.

3 - A viga com uma emenda soldada, fabricada com aço USI SAC 300, apresentou resistência maior que a viga sem emenda soldada, o que se deu a entender que o

processo de soldagem, neste tipo de aço teve uma pequena contribuição para o ganho de resistência, embora que um ganho pequeno, aproximadamente 1,0%. As outras duas vigas, com duas e três emendas soldadas apresentaram resistências menores que a viga sem emenda, 8,0% e 10,0% respectivamente. Mesmo com a diminuição de resistência apresentada, pode-se dizer também que o fator soldagem influenciou muito pouco na resistência final das vigas, o que não compromete o seu uso, com duas ou três emendas soldadas.

4 - As vigas fabricadas com o aço CSN COR 420, em média, apresentaram valores de força última de ruptura menores que os valores das vigas fabricadas com o aço USI-SAC 300. Como nos ensaios de caracterização dos aços os valores de resistência finais dos dois tipos de aço foram em média aproximadamente iguais, esta diminuição de resistência das vigas fabricadas com o aço CSN COR 420 se deu em função de o momento de inércia dos perfis adquiridos serem menores que o momento de inércia dos perfis fabricados com o aço USI-SAC 300, visto que os perfis foram adquiridos de fornecedores diferentes para cada tipo de aço. No entanto, todas as vigas apresentaram momentos de inércia dentro dos limites estabelecidos pela norma, o que não compromete o dimensionamento deste tipo de viga, por parte dos calculistas.

5 - Quanto aos deslocamentos verticais, no limite de deslocamento recomendado pela norma para este tipo de viga ( $L/250$ ) e no limite adotado para este trabalho ( $L/500$ ), em todas as vigas com emendas soldadas, fabricadas com o aço CSN COR 420, houve um ganho de resistência em relação à viga sem emenda, fabricada com mesmo tipo aço, isto porque o processo de soldagem faz com que haja um rearranjo das moléculas do metal base, provocando um enrijecimento deste metal, o que faz com que a viga atinja uma resistência um pouco maior, com deslocamentos menores.

6 - As vigas com duas e três emendas soldadas, fabricadas com o aço USI-SAC 300, apresentaram resistência menor que a resistência da viga sem emenda, para os mesmos limites de deslocamentos. Apenas a viga com uma emenda soldada apresentou resultado superior ao resultado da viga sem emenda. Com isso, pode-se concluir que para as vigas fabricadas com o aço já citado neste parágrafo, o processo de soldagem fez com que aumentasse a ductilidade das vigas com duas e três emendas, e diminuísse da viga com apenas uma emenda. Há em geral uma grande preocupação dos projetistas e fabricantes de estruturas metálicas em relação a emendas soldadas neste tipo de viga, principalmente em se tratando se perfis leves, mas, este trabalho mostrou que não há motivo para preocupações, pois em nenhuma das vigas com emendas soldadas ensaiadas, os resultados apresentados foram

significativamente expressivos, independente se tinham uma, duas ou três emendas, pelo contrário, em alguns casos as vigas com emendas soldadas apresentaram melhores resultados que as vigas sem emenda, pois apresentaram maiores forças com menores deslocamentos.

7 - Em relação à dúvida de se fabricar uma viga com aço USI-SAC 300 ou CSN COR 420, ficou concluído que as vigas fabricadas com os dois tipos de aço apresentaram resultados compatíveis com os resultados apresentados pelos manuais técnicos dos fabricantes dos aços, atendendo às especificações de normas brasileiras e internacionais, dando uma tranquilidade ainda maior para os calculistas, projetistas e fabricantes de estruturas metálicas.

8 - Mesmo as vigas tendo uma pequena diferença nas propriedades geométricas em relação aos valores nominais, estas propriedades ficaram dentro do limite de tolerância, e seus resultados de resistência final na tensão de escoamento e na tensão de ruptura, tanto para as vigas da série A quanto para as vigas da série B foram superiores aos valores nominais, descartando qualquer possibilidade de uma peça dimensionada com os valores nominais em escritórios de cálculo, ficarem subdimensionadas.

## 6.1 SUGESTÕES

Esta pesquisa foi realizada na área de estruturas metálicas na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. É terceiro estudo específico com vigas com seção composta por dois perfis U enrijecido formados a frio e o primeiro que enfoca o comportamento de vigas com emendas soldadas fabricadas com dois tipos de aço diferentes, sendo assim, segue-se algumas sugestões para futuros trabalhos a serem realizados na mesma linha de pesquisa:

- a) Estudar o comportamento de vigas com emendas soldadas submetidas à flexão simples, possuindo emendas soldadas na região compreendida entre os pontos de aplicação das forças e o apoio. Verificando o comportamento desta viga em relação ao esforço cortante.
- b) Realizar ensaios experimentais em vigas com emendas soldadas, com seções maiores e/ou menores que as seções já estudadas nos trabalhos anteriores.
- c) Estudar o comportamento de vigas constituídas de perfis formados a frio, verificando a capacidade de rotação plástica das seções, sob flexão simples.
- d) Analisar o comportamento de vigas constituídas de perfis formados a frio sob o efeito de torção.
- e) Fazer modelagem numérica para vigas constituídas de perfis formados a frio com e sem emendas soldadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. M. **Análise de elementos fletidos em estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio**. 2001. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Engineering for steel construction: a source book connections**. Chicago, 1984.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Allowable stress design (ASD)**. Chicago, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A 370 - 97a**. [S.l.], 1997.

AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEER - ASME (QW-153). [S.l.],.

ANDREUCCI, R. **Técnicas de ensaios não destrutivos**. São Paulo: ABENDE, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Perfis estruturais, de aço, formados a frio: Padronização. NBR 14762**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Materiais Metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente. NBR 6152**. Rio de Janeiro, 2002. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento. NBR14762**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Perfis estruturais, de aço, formados a frio - padronização. NBR 6355**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. NBR 8800**. Rio de Janeiro, 2008.

ATAIDE, C. A. V.; CORRÊA, M. S. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. [S.l.]: [s.n.], v. 8, 2006.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 5. ed. São Paulo: PINI, 2004.

CAMP, L. S. D. **A História Secreta e Curiosa das Grandes Invenções**. Rio de Janeiro: Lidador, 1961.

CARDOSO, R. S. **Estudo do comportamento de vigas metálicas com seção “caixa”, constituídas de perfis formados a frio, com emendas soldadas, submetidas à flexão simples**. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

COSIPA, C. S. P.-. Catálogo técnico, São Paulo, 2003.

CSN, C. S. N.-. Catálogo técnico, Rio de Janeiro, 2008.

DAVID, D. L. **Vigas mistas com laje treliçada e perfis formados a frio: análise do comportamento estrutural**. 2003. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

DAVIES, J. M. Recent research advances in cold-formed steel structures. **Journal of constructional steel research**, Manchester, n. 55, p. 267-288, 2000.

DIAS, L. A. D. M. **Edificações de aço no Brasil**. São Paulo: Zigurate Editora, 1993.

DUCASSÉ, P. **História da técnicas**. Lisboa: Publicações Europa-América, 1962.

FERNANDES, F.; MARIANO, R.; GNECCO, C. **Tratamento de superfície e pintura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, v. VII, 2003.

FERNANDES, F.; MARIANO, R.; GNECCO, C. **Tratamento de superfície e pintura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, v. VII, 2003.

GAYLORD, H. E.; GAYLORD, C. N.; STALLMEYER, J. E. **Design of steel structures**. 3ª Edição. ed. New York: McGraw-Hill, 1992.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Edição rev. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HOLANDA, S. B. D. **Historia Geral da Civilização Brasileira**. Rio de Janeiro: Difel, v. I, 1977.

INDUSTRIAL, C. C. **Weathering steel**. Londres: [s.n.], v. I, 2004.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço conformados a frio submetidos à flexão: Análise teórico-experimental**. 1999. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MALITE, M.; SALES, J. J. **Estruturas de aço constituídas de perfis de chapa dobrada: dimensionamento de barras.** São Carlos: EESC/USP, 1993.

OLIVEIRA, M. A. **Notas de aula de estruturas metálicas.** Goiânia: UCG, 2001.

OWENS, G. W.; CHEAL, B. D. **Structural steelwork connections.** London: Butterworth, 1989.

PANONNI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio.** 2ª Edição. ed. Belo Horizonte: Edição BELO HORIZONTE, v. II, 2004.

PANONNI, F. D. **Condições para formação da pátina protetora em aços patináveis.** São Paulo: Gerdau Açominas, 2005.

PANONNI, F. D.; MARCONDES, L. Efeito da Composição Química da Liga sobre o comportamento frente a corrosão atmosférica de aços determinada pela análise estatística de dados publicados. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 91 - ABRACO,** São Paulo, 1991.

PANONNI, F. D.; WOLYNEC, S. **A Ferrugem que Protege.** Rio de Janeiro: Ciência Hoje, v. 10, 1989.

PEVSNER, N. **Origens da arquitetura moderna e do design.** 2ª Edição. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1996.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. 336 p.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico.** Florianópolis: EDEME, 1979.

RONAN, C. A. **História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, v. II, 1987.

SALES, J. J. D. et al. **Elementos de estruturas de aço: Dimensionamento.** São Carlos: EESC/USP, 2001.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. **Steel Structures: Design and Behavior: emphasizing load and resistance factor design.** 4. ed. New York: Harper & Row, 1996.

SIDERBRÁS. **Ligações em estruturas metálicas:** publicações técnicas para o desenvolvimento da construção metálica. Brasília: [s.n.], 1988.

SIDERBRÁS. **Elementos estruturais e ligações.** [S.l.]: Açominas, v. III, 1992.

SILVA, G. G. D. **Arquitetura do ferro no Brasil.** São Paulo: Nobel, 1986.

SILVA, R. C. G. **Fundamentos teóricos e aspéctos gerais para projetos de estruturas em aço com perfis conformados a frio**. 1995. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1995.

SILVA, T. D. A. **Estudo do comportamento de vigas metálicas em perfil soldado tipo “I”, com emendas soldadas, submetidas à flexão simples**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

USIMINAS, U. S. D. M. G.-. **Catálogo Técnico**, Belo Horizonte, 2008.

VALENCIANI, V. C. **Ligações em Estruturas de Aço**. 1997. 309 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

VARGAS, M. **História da técnica e da tecnologia no Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1994.

VÉRGES, G. R. **Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas**. 2005. 194 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

VLASOV, V. Z. **Thin-walled elastic beams**. Jerusalém: Israel Program for Scientific Translations (translated from Russian), 1961.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processo e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 494 p.

YU, W. W. **Cold-formed steel design**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

## APÊNDICE A – TABELAS E GRÁFICOS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Viga VA1		Data do ensaio: 11/07/08			
		Deformações			
Força(tf)	Força (kN)	1S	2S	1I	2I
0	0	0	0	0	0
1	5	-9	168	136	134
1	10	8	-157	232	124
2	15	-139	-283	238	211
2	20	-269	-395	287	268
3	26	-289	-388	419	383
3	30	-354	-509	508	474
4	35	-474	-582	576	539
4	40	-571	-689	558	570
5	45	-605	-764	636	629
5	50	-650	-872	730	740
6	55	-794	-910	805	800
6	60	-878	-1017	885	882
7	65	-902	-1090	976	1007
7	70	-888	-1176	1096	1176
8	75	-861	-1346	1265	1372
8	80	-1058	-1349	1343	1236
9	85	-1120	-1403	1375	1308
9	90	-1119	-1503	1472	1503
10	95	-1187	-1622	1624	1615
10	100	-1187	-1692	1824	1774
11	105	-953	-1811	2164	2002
11	110	-883	-1838	2349	2290
12	115	-942	-1833	2515	2857
12	120	-708	-2265	2864	2913
13	125	-35	-1741	4012	4300
13	131	-694	-2197	4585	5021
13	134	RUPTURA			

<b>Viga VA2</b>		Data do ensaio:15/07/08							
		Deformações							
Força(tf)	Força (kN)	1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	-36	-42	-51	-49	67	46	50	44
1	10	-53	-150	-110	-95	142	148	119	110
2	16	-88	-242	-194	-163	232	252	234	212
2	20	-124	-302	-263	-204	309	339	305	278
3	25	-171	-394	-339	-271	372	424	386	347
3	30	-213	-476	-416	-311	467	532	460	406
4	35	-249	-580	-498	-417	493	613	543	482
4	40	-294	-652	-610	-465	591	703	645	578
5	46	-349	-751	-663	-534	696	829	742	673
5	50	-368	-826	-727	-563	754	915	825	746
6	56	-436	-954	-811	-649	832	1019	938	806
6	60	-471	-1035	-920	-720	918	1105	988	889
7	66	-484	-1096	-992	-775	1004	1247	1120	970
7	70	-529	-1219	-1091	-841	1073	1329	1211	1055
8	75	-559	-1288	-1178	-897	1171	1446	1336	1150
8	80	-602	-1354	-1283	-971	1278	1591	1428	1262
9	85	-604	-1438	-1478	-1033	1384	1699	1526	1363
9	91	-641	-1549	-1487	-1105	1523	1840	1681	1481
10	96	-690	-1632	-1625	-1180	1666	2007	1816	1633
10	100	-692	-1684	-1695	-1232	1788	2198	2326	1749
11	106	-751	-1801	-1856	-1334	1935	2478	2623	1883
11	111	-778	-1844	-1961	-1369	2127	2799	2905	2063
12	116	-807	-1875	-2158	-1464	2341	3469	4397	2291
12	121	-948	-1742	-3624	-1628	2582	5278	7879	2574
12	123	RUPTURA							

<b>Viga VA3</b>		Data do ensaio: 17/07/08							
Força(tf)	Força (kN)	Deformações							
		1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	-88	-57	-81	-88	86	52	88	84
1	10	-160	-160	-151	-159	163	153	160	159
2	16	-237	-243	-231	-239	250	232	240	238
2	21	-310	-319	-303	-318	330	304	314	314
3	25	-387	-390	-370	-386	412	375	388	388
3	30	-453	-469	-446	-464	498	453	466	468
4	36	-532	-553	-528	-545	592	534	551	555
4	41	-603	-628	-604	-613	680	609	628	637
5	46	-677	-711	-688	-701	776	688	711	727
5	50	-738	-784	-763	-754	861	757	781	806
6	56	-812	-872	-861	-834	965	841	872	911
6	61	-863	-944	-940	-895	1053	913	946	994
7	65	-921	-1025	-1032	-960	1147	993	1030	1085
7	70	-979	-1100	-1116	-1023	1237	1070	1112	1170
8	75	-1029	-1184	-1212	-1087	1338	1160	1204	1267
8	80	-1078	-1269	-1309	-1151	1442	1257	1303	1368
9	86	-1130	-1366	-1415	-1219	1496	1373	1421	1504
9	91	-1181	-1457	-1513	-1284	1672	1495	1539	1602
10	96	-1234	-1563	-1615	-1365	1797	1640	1673	1739
10	101	-1288	-1673	-1743	-1441	1956	1826	1843	1923
11	106	-1363	-1838	-1838	-1507	2096	2010	2004	2117
11	111	-1440	-2006	-1952	-1585	2246	2308	2186	2317
12	116	-1527	-2244	-2084	-1674	2416	2558	2410	2625
12	120	-1648	-2588	-2244	-1823	2613	2919	2715	3266
13	126	-1825	-2758	-2476	-2226	2874	3551	3238	4856
13	127	RUPTURA							

Viga VA4		Data do ensaio: 17/07/08							
		Deformações							
Força(tf)	Força (kN)	1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	-82	2553	-84	-83	82	74	95	-8
1	10	-148	-5930	-167	-156	155	145	149	166
2	17	-244	3	-281	-263	264	247	251	277
2	21	-301	4099	-361	-333	337	317	322	352
3	26	-364	-2755	-447	-402	408	384	386	424
3	30	-428	-119	-557	-472	480	452	454	498
4	35	-505		-688	-553	569	538	540	588
4	40	-575		-826	-628	658	623	625	678
5	45	-649		-986	-610	747	709	712	769
5	51	-748		-1154	-790	848	805	808	869
6	55	-793		-1271	-853	929	882	882	950
6	60	-873		-1477	-935	1034	984	984	1053
7	65	-939		-1688	-1055	1122	1069	1069	1140
7	70	-1009		-2031	-1078	1217	1170	1166	1238
8	75	-1084		-2754	-1153	1324	1280	1272	1345
8	80	-1170		-3843	-1245	1459	1415	1403	1482
9	86	-1245		-4678	-1321	1574	1535	1501	1602
9	91	-1333		-6010	-1405	1719	1674	1636	1747
10	96	-1395		-7152	-1490	1870	1837	1781	1898
10	101	-1484		-8421	-1590	2053	2051	1943	2083
11	106	-1576		-9336	-1692	2267	2307	2153	2289
11	111	-1687		-10001	-1821	2547	2607	2370	2527
12	116	-1805		-10392	-1973	2891	2887	2883	2777
12	120	-1980		-10825	-2146	3379	4049	7268	3067
12	121	RUPTURA							

Viga V1B		Data do ensaio: 30/10/2008			
		Deformações			
Força (tf)	Força (kN)	1S	2S	1I	2I
0	1	0	0	0	0
1	5	-65	-67	65	66
1	10	-136	-139	130	132
2	15	-228	-232	220	222
2	20	-306	-314	301	311
3	25	-389	-399	381	383
3	30	-473	-490	473	475
4	35	-558	-580	559	562
4	40	-644	-670	666	650
5	45	-726	-757	729	734
5	50	-821	-861	829	842
6	55	-915	-957	920	941
6	61	-1035	-1084	1040	1073
7	65	-1121	-1173	1127	1170
7	72	-1272	-1320	1263	1334
8	76	-1370	-1427	1365	1454
8	80	-1496	-1549	1478	1592
9	85	-1643	-1701	1616	1762
9	91	-1809	-1861	1769	1949
10	95	-2008	-2061	1957	2178
10	100	-2233	-2290	2172	2439
11	105	-2491	-2562	2432	2757
11	110	-2757	-2913	2711	3096
12	115	-3081	-3188	3064	3520
12	121	-3606	-3746	3733	4280
13	125	-4116	-4292	4745	4200
13	126	RUPTURA			

<b>Viga V2B</b>		Data do ensaio: 25/05/2009							
		Deformações							
Força(tf)	Força (kN)	1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	-75	-84	-85	-80	74	83	82	79
1	11	-154	-182	-189	-157	158	173	170	167
2	16	-227	-276	-283	-229	236	255	254	246
2	20	-203	-376	-381	-300	310	335	336	326
3	25	-379	-489	-485	-376	390	422	424	411
3	30	-458	-610	-591	-460	473	511	513	497
4	35	-546	-757	-714	-548	565	607	611	592
4	40	-631	-903	-829	-634	650	698	704	684
5	45	-724	-1086	-961	-729	744	796	806	786
5	50	-816	-1287	-1099	-827	835	892	903	886
6	55	-910	-1486	-1229	-924	926	986	1000	912
6	61	-1026	-1743	-1388	-1043	1040	1105	1126	1005
7	65	-1137	-1976	-1536	-1159	1150	1216	1240	1108
7	71	-1260	-2229	-1715	-1283	1270	1340	1367	1220
8	75	-1377	-2463	-1888	-1405	1383	1458	1476	1343
8	80	-1520	-2747	-2112	-1553	1523	1605	1602	1452
9	86	-1721	-3125	-2448	-1759	1724	1813	1790	1579
9	90	-1883	-3420	-2734	-1929	1886	2002	1945	1757
10	96	-2104	-3811	-3125	-2161	2120	2317	2158	2089
10	100	-2320	-4205	-3549	-2406	2378	2716	2230	2289
11	105	-2648	-4735	-4130	-2735	2756	3077	2478	2565
11	110	-2967	-5302	-4731	-3060	3182	4638	7346	2863
12	115	-3406	-6102	-5646	-3512	3944	7180	4447	3381
12	118	RUPTURA							

<b>Viga V3B</b>		Data do ensaio: 07/07/2009							
		Deformações							
Força (tf)	Força (kN)	1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	-74	-77	-76	-75	69	79	78	73
1	10	-144	-165	-163	-148	145	165	159	151
2	16	-219	-255	-252	-226	222	251	246	231
2	20	-247	-348	-345	-301	298	335	333	315
3	25	-376	-449	-442	-379	379	424	425	405
3	30	-457	-557	-542	-466	468	518	522	500
4	35	-545	-680	-649	-555	562	614	620	600
4	40	-637	-807	-759	-649	657	700	724	700
5	46	-733	-954	-878	-745	757	795	829	805
5	51	-832	-1116	-1002	-846	861	894	940	914
6	55	-933	-1282	-1123	-936	959	988	1046	979
6	60	-1056	-1493	-1267	-1071	1086	1109	1182	1096
7	65	-1171	-1688	-1402	-1190	1200	1214	1302	1204
7	71	-1303	-1910	-1563	-1321	1329	1332	1437	1330
8	75	-1437	-2139	-1731	-1459	1458	1451	1569	1469
8	80	-1596	-2422	-1940	-1621	1613	1591	1716	1605
9	85	-1801	-2799	-2242	-1831	1822	1774	1914	1780
9	90	-1977	-3125	-2520	-2016	2004	1944	2088	1970
10	95	-2220	-3569	-2935	-2271	2271	2220	2324	2287
10	101	-2462	-4046	-3412	-2544	2575	2558	2523	2563
10	103	-2767	-4631	-4026	-2875	2982	2905	2891	2912
11	111	-3170	-5380	-4953	-3300	3632	4173	6088	3447
12	116	RUPTURA							

<b>Viga V4B</b>		Data do ensaio: 07/07/2009							
		Deformações							
Força (tf)	Força (kN)	1S	2S	3S	4S	1I	2I	3I	4I
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	-72	-71	-67	-70	63	74	74	67
1	10	-135	-149	-137	-139	131	157	148	135
2	15	-212	-234	-221	-223	209	246	238	216
2	20	-292	-321	-310	-301	286	335	330	304
3	25	-373	-410	-399	-383	368	425	426	400
3	30	-457	-505	-493	-471	463	525	530	503
4	35	-544	-602	-585	-562	558	620	630	607
4	40	-643	-710	-689	-664	664	703	743	717
5	45	-742	-822	-795	-762	769	794	852	824
5	50	-848	-945	-906	-866	887	897	977	942
6	55	-956	-1077	-1017	-948	992	991	1092	1046
6	60	-1086	-1243	-1146	-1100	1131	1112	1239	1186
7	65	-1205	-1401	-1268	-1221	1249	1212	1364	1300
7	71	-1346	-1590	-1411	-1359	1387	1325	1507	1441
8	75	-1497	-1814	-1574	-1513	1534	1443	1662	1594
8	80	-1672	-2098	-1767	-1690	1702	1577	1831	1758
9	85	-1881	-2473	-2036	-1902	1920	1735	2037	1981
9	90	-2071	-2829	-2306	-2104	2123	1886	2231	2182
10	96	-2335	-3328	-2746	-2382	2421	2124	2489	2486
10	100	-2605	-3888	-3274	-2682	2772	2401	2815	2838
10	104	-2885	-4527	-3921	-3015	3208	2732	3303	3258
11	110	-3372	-5457	-5175	-3541	4082	3708	4830	4032
11,38	113,80	RUPTURA							

<b>Viga VA1</b>		Data do ensaio: 11/07/08										
		Deflexões (mm)										
Força(t f)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3/R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	5,0	0,65	0,67	0,57	0,63	0,49	0,39	0,66	0,60	0,44	0,71	0,62
1,0	10,0	1,32	1,33	1,33	1,38	1,13	1,29	1,33	1,36	1,21	1,42	1,23
1,5	15,2	2,03	2,04	2,10	2,17	1,79	2,00	2,04	2,14	1,90	2,15	1,87
2,0	20,0	2,68	2,69	2,83	2,80	2,43	2,64	2,69	2,82	2,54	2,83	2,46
2,6	25,5	3,40	3,42	3,64	3,71	3,14	3,39	3,41	3,68	3,27	3,61	3,14
3,0	30,0	4,01	4,04	4,33	4,40	3,73	3,98	4,03	4,37	3,86	4,25	3,69
3,5	35,2	4,72	4,74	5,10	5,18	4,41	4,68	4,73	5,14	4,55	4,98	4,33
4,0	40,3	5,38	5,41	5,86	5,93	5,06	5,33	5,40	5,90	5,20	5,71	4,96
4,5	45,2	6,09	6,12	6,63	6,71	5,75	6,02	6,11	6,67	5,89	6,40	5,57
5,0	50,0	6,74	6,79	7,37	7,45	6,39	6,68	6,77	7,41	6,54	7,08	6,16
5,5	55,1	7,46	7,51	8,18	8,26	7,09	7,39	7,49	8,22	7,24	7,80	6,79
6,0	60,2	8,18	8,24	8,99	9,07	7,79	8,11	8,21	9,03	7,95	8,52	7,41
6,5	65,4	8,98	9,04	9,88	9,97	8,56	8,90	9,01	9,93	8,73	9,26	8,05
7,0	70,2	9,72	9,78	10,70	10,79	9,27	9,62	9,75	10,75	9,45	9,93	8,64
7,5	75,2	10,47	10,17	10,79	11,62	10,01	10,37	10,32	11,21	10,19	10,65	9,26
8,0	80,2	11,15	10,87	11,56	12,40	10,67	11,04	11,01	11,98	10,86	11,36	9,88
8,5	85,0	11,94	11,66	12,46	13,30	11,44	11,84	11,80	12,88	11,64	12,04	10,47
9,0	90,1	12,92	12,63	13,55	14,38	12,39	12,77	12,78	13,97	12,58	12,75	11,09
9,5	95,1	13,94	13,63	14,67	15,50	13,37	13,77	13,79	15,09	13,57	13,47	11,71
10,0	100,1	14,93	14,59	15,77	16,59	14,31	14,72	14,76	16,18	14,52	14,18	12,33
10,5	105,2	16,23	15,88	17,23	18,06	15,58	15,99	16,06	17,65	15,79	14,90	12,95
11,0	110,1	17,27	16,96	18,46	19,29	16,65	17,06	17,12	18,88	16,86	15,59	13,56
11,5	115,2	18,82	18,56	20,12	21,11	18,23	18,64	18,69	20,62	18,44	16,31	14,18
12,0	120,2	20,46	20,37	20,12	23,21	20,04	20,45	20,42	21,67	20,25	17,02	14,80
12,5	125,0	22,86	22,77	22,91	25,99	22,17	22,83	22,82	24,45	22,50	17,70	15,39
13,1	130,5	26,22	26,12	26,91	29,95	25,52	26,20	26,17	28,43	25,86	18,48	16,07
13,40	134,00	RUPTURA										

<b>Viga VA2</b>		Data do ensaio: 15/07/08										
		Deflexões										
Força(t f)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,2	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,25	0,22
0,5	5,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,39	0,44	0,44	0,72	0,62
1,0	10,2	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0	1,0	1,02	1,13	1,02	1,44	1,25
1,6	15,6	1,7	1,7	1,9	1,9	1,7	1,7	1,71	1,91	1,71	2,21	1,92
2,0	20,4	2,3	2,3	2,6	2,6	2,3	2,3	2,33	2,58	2,32	2,89	2,51
2,5	25,3	2,9	3,0	3,2	3,3	2,9	3,0	2,95	3,26	2,95	3,58	3,12
3,0	30,5	3,6	3,6	4,0	4,0	3,6	3,6	3,61	3,98	3,60	4,31	3,75
3,5	35,1	4,2	4,2	4,6	4,7	4,2	4,2	4,22	4,64	4,21	4,97	4,32
4,0	40,1	4,9	4,9	5,3	5,4	4,8	4,9	4,87	5,35	4,86	5,68	4,94
4,6	46,0	5,6	5,7	6,2	6,3	5,6	5,7	5,67	6,22	5,65	6,51	5,66
5,0	50,2	6,2	6,3	6,8	6,9	6,2	6,3	6,25	6,85	6,24	7,10	6,18
5,6	55,7	7,0	7,0	7,6	7,7	7,0	7,0	7,00	7,67	6,98	7,89	6,86
6,0	60,0	7,6	7,7	8,3	8,5	7,6	7,7	7,68	8,41	7,66	8,50	7,39
6,6	65,6	8,4	8,4	9,1	9,3	8,4	8,4	8,39	9,19	8,38	9,28	8,07
7,0	70,4	9,1	9,2	10,0	10,1	9,1	9,2	9,16	10,04	9,14	9,97	8,67
7,5	75,3	9,7	9,8	10,6	10,8	9,7	9,8	9,76	10,70	9,75	10,66	9,27
8,0	80,3	10,5	10,7	11,6	11,7	10,5	10,6	10,58	11,61	10,58	11,37	9,89
8,5	85,4	11,3	11,5	12,4	12,6	11,3	11,4	11,37	12,48	11,38	12,09	10,52
9,1	90,5	12,2	12,4	13,5	13,7	12,3	12,4	12,33	13,60	12,36	12,82	11,14
9,6	96,0	13,3	13,5	14,7	15,0	13,4	13,5	13,41	14,86	13,45	13,59	11,82
10,0	100,3	14,2	14,4	15,7	16,1	14,3	14,4	14,30	15,86	14,35	14,20	12,35
10,6	106,1	15,4	15,7	17,1	17,6	15,5	15,7	15,53	17,31	15,60	15,02	13,06
11,1	110,5	16,5	16,8	18,3	18,9	16,7	16,8	16,66	18,63	16,75	15,65	13,61
11,6	115,8	18,0	18,3	20,0	20,8	18,2	18,3	18,16	20,40	18,27	16,40	14,26
12,1	120,5	20,1	20,6	22,7	23,2	20,5	20,6	20,32	22,92	20,59	17,06	14,84
12,30	123,00	RUPTURA										

<b>Viga VA3</b>		Data do ensaio: 17/07/08										
		Deflexões										
Força(t f)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,6	5,6	0,7	0,7	0,9	0,8	0,7	0,7	0,70	0,84	0,73	0,79	0,68
1,0	10,4	1,3	1,4	1,6	1,6	1,4	1,4	1,36	1,59	1,38	1,47	1,27
1,6	15,7	2,0	2,1	2,4	2,4	2,1	2,1	2,09	2,41	2,09	2,22	1,93
2,1	20,7	2,7	2,8	3,2	3,1	2,8	2,7	2,73	3,16	2,75	2,93	2,55
2,5	25,2	3,3	3,4	3,9	3,8	3,4	3,3	3,34	3,86	3,37	3,57	3,10
3,0	30,3	4,0	4,1	4,7	4,6	4,1	4,0	4,03	4,63	4,04	4,29	3,73
3,6	35,8	4,7	4,8	5,5	5,4	4,8	4,7	4,74	5,46	4,77	5,06	4,40
4,1	40,6	5,4	5,5	6,3	6,2	5,5	5,4	5,42	6,24	5,44	5,75	5,00
4,6	45,8	6,1	6,2	7,1	7,0	6,3	6,1	6,16	7,08	6,19	6,49	5,64
5,0	50,3	6,8	6,9	7,9	7,8	6,9	6,7	6,81	7,83	6,84	7,12	6,19
5,6	56,1	7,6	7,7	8,9	8,7	7,8	7,6	7,66	8,80	7,67	7,94	6,91
6,1	60,6	8,3	8,4	9,6	9,5	8,5	8,2	8,33	9,57	8,34	8,58	7,46
6,5	65,4	9,1	9,2	10,6	10,4	9,0	9,0	9,11	10,47	9,00	9,26	8,05
7,0	70,3	9,7	9,9	11,4	11,2	9,7	9,7	9,80	11,30	9,71	9,96	8,66
7,5	75,3	10,5	10,7	12,3	12,2	10,6	10,5	10,63	12,25	10,54	10,66	9,27
8,0	80,3	11,4	11,6	13,3	13,1	11,4	11,4	11,50	13,24	11,39	11,36	9,88
8,6	86,0	12,4	12,6	14,5	14,3	12,5	12,3	12,49	14,39	12,39	12,18	10,59
9,1	91,0	13,3	13,5	15,6	15,4	13,4	13,3	13,42	15,47	13,33	12,89	11,21
9,6	95,8	14,4	14,6	16,8	16,6	14,5	14,3	14,51	16,72	14,42	13,56	11,79
10,1	101,0	15,8	16,0	18,4	18,2	15,9	15,7	15,87	18,30	15,81	14,30	12,43
10,6	106,0	17,0	17,2	19,9	19,6	17,2	17,0	17,12	19,76	17,10	15,01	13,05
11,1	110,8	18,2	18,4	21,3	21,0	18,4	18,2	18,28	21,15	18,29	15,68	13,64
11,6	115,6	19,9	20,1	23,3	23,1	20,2	19,9	20,01	23,19	20,07	16,37	14,24
12,0	120,4	22,2	22,3	25,9	25,6	22,6	22,2	22,23	25,79	22,39	17,05	14,83
12,6	125,6	27,3	27,4	30,4	31,8	28,5	27,4	27,34	31,10	27,93	17,78	15,46
12,70	127,00	RUPTURA										

<b>Viga VA4</b>		Data do ensaio: 17/07/08										
		Deflexões										
Força(t f)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	5,4	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7	0,69	0,71	0,70	0,76	0,66
1,0	10,1	1,4	1,3	1,6	1,4	1,4	1,3	1,38	1,46	1,39	1,43	1,24
1,7	17,1	2,4	2,2	2,6	2,4	2,4	2,3	2,30	2,49	2,32	2,41	2,10
2,1	21,4	3,0	2,8	3,3	3,0	3,0	2,9	2,92	3,15	2,91	3,02	2,63
2,6	25,7	3,6	3,4	3,9	3,7	3,6	3,5	3,53	3,80	3,52	3,64	3,16
3,0	30,1	4,3	4,1	4,6	4,4	4,2	4,1	4,17	4,48	4,13	4,26	3,71
3,5	35,4	5,0	4,8	5,4	5,2	5,0	4,8	4,92	5,30	4,87	5,01	4,36
4,0	40,4	5,8	5,5	6,3	6,0	5,7	5,5	5,65	6,17	5,62	5,71	4,97
4,5	45,3	6,5	6,3	7,0	6,8	6,5	6,3	6,39	6,93	6,36	6,41	5,58
5,1	50,9	7,3	7,1	8,0	7,7	7,3	7,1	7,18	7,85	7,19	7,21	6,27
5,5	55,2	7,9	7,8	8,7	8,5	7,9	7,7	7,83	8,57	7,84	7,82	6,80
6,0	60,5	8,6	8,7	9,7	9,4	8,8	8,6	8,64	9,55	8,71	8,56	7,44
6,5	65,2	9,5	9,5	10,5	10,2	9,6	9,4	9,49	10,36	9,45	9,23	8,02
7,0	70,1	10,3	10,3	11,4	11,1	10,3	10,1	10,29	11,24	10,23	9,92	8,63
7,5	75,2	11,2	11,2	12,4	12,1	11,2	11,0	11,21	12,24	11,13	10,65	9,26
8,0	80,4	12,3	12,4	13,6	13,3	12,3	12,1	12,32	13,48	12,24	11,38	9,89
8,6	85,5	13,2	13,3	14,6	14,3	13,3	13,1	13,25	14,49	13,15	12,11	10,53
9,1	90,6	14,3	14,3	15,8	15,5	14,3	14,1	14,31	15,69	14,22	12,83	11,16
9,6	95,8	15,4	15,4	17,0	16,7	15,4	15,2	15,40	16,87	15,30	13,57	11,80
10,1	100,8	16,7	16,8	18,4	18,2	16,7	16,5	16,72	18,31	16,58	14,27	12,41
10,6	105,8	18,2	18,3	20,2	19,9	18,2	18,0	18,22	20,03	18,08	14,98	13,03
11,1	110,9	20,1	20,1	22,0	21,9	20,0	19,8	20,10	21,99	19,91	15,70	13,66
11,6	116,0	22,2	22,0	24,5	24,1	21,4	21,7	22,09	24,26	21,57	16,43	14,28
12,0	120,3	25,4	25,3	28,3	27,9	24,6	25,0	25,33	28,08	24,79	17,04	14,81
12,10	121,00	RUPTURA										

<b>Viga V1B</b>		Data do ensaio: 30/10/2008											
		Deflexões											
Força (tf)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico	
0,1	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,11	0,09	
0,5	5,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,58	0,62	0,56	0,71	0,62	
1,0	10,1	1,3	1,3	1,4	1,4	1,2	1,2	1,28	1,37	1,23	1,42	1,24	
1,5	15,2	2,0	2,1	2,1	2,3	1,9	2,0	2,04	2,20	1,96	2,15	1,87	
2,0	20,1	2,8	2,8	2,9	3,1	2,6	2,7	2,78	3,00	2,66	2,85	2,48	
2,5	25,1	3,5	3,5	3,7	3,9	3,4	3,4	3,52	3,81	3,37	3,55	3,09	
3,0	30,4	4,3	4,4	4,6	4,8	4,2	4,2	4,36	4,70	4,20	4,30	3,74	
3,5	35,4	5,1	5,1	5,4	5,6	4,9	5,0	5,11	5,54	4,96	5,01	4,36	
4,0	40,4	5,8	5,9	6,3	6,5	5,6	5,8	5,86	6,37	5,73	5,72	4,97	
4,5	45,3	6,6	6,6	7,1	7,3	6,4	6,5	6,61	7,20	6,46	6,41	5,57	
5,0	50,4	7,4	7,5	8,0	8,2	7,2	7,4	7,43	8,12	7,29	7,14	6,21	
5,5	55,3	8,2	8,3	8,9	9,1	8,0	8,2	8,24	9,03	8,08	7,83	6,81	
6,1	61,2	9,2	9,3	10,0	10,3	9,0	9,1	9,24	10,14	9,06	8,67	7,54	
6,5	65,3	10,0	10,0	10,8	11,1	9,7	9,8	9,97	10,96	9,77	9,25	8,04	
7,2	71,9	11,4	11,2	12,4	12,8	11,2	11,1	11,29	12,57	11,13	10,18	8,85	
7,6	75,9	12,2	12,0	13,3	13,7	12,0	11,9	12,12	13,49	11,95	10,75	9,35	
8,0	80,4	13,2	13,0	14,4	14,8	13,0	12,9	13,10	14,57	12,91	11,39	9,90	
8,5	85,2	14,3	14,1	15,6	16,0	14,1	14,0	14,20	15,80	14,03	12,07	10,49	
9,1	90,5	15,6	15,3	17,0	17,5	15,3	15,2	15,46	17,21	15,23	12,82	11,14	
9,5	95,4	17,0	16,8	18,6	19,1	16,7	16,6	16,90	18,83	16,65	13,51	11,75	
10,0	100,4	18,6	18,4	20,4	20,9	18,3	18,2	18,51	20,64	18,23	14,22	12,36	
10,5	105,4	20,6	20,3	22,5	23,2	20,2	20,1	20,45	22,84	20,16	14,92	12,97	
11,0	110,0	22,5	22,3	24,6	25,4	22,1	22,0	22,38	25,00	22,06	15,58	13,55	
11,5	115,0	24,8	24,6	27,2	28,1	24,4	24,3	24,71	27,66	24,36	16,29	14,16	
12,1	120,5	28,9	28,7	31,9	32,8	28,6	28,5	28,82	32,36	28,57	17,06	14,84	
12,5	125,0	34,4	34,3	38,2	39,5	34,2	34,1	34,33	38,85	34,14	17,70	15,39	
12,58	125,80	RUPTURA											

<b>Viga V2B</b>		Data do ensaio: 25/05/2009										
		Deflexões										
Força(t f)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	5,2	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,61	0,78	0,71	0,73	0,63
1,1	10,6	1,3	1,4	1,6	1,6	1,5	1,5	1,34	1,60	1,47	1,50	1,31
1,6	15,5	1,9	2,1	2,4	2,3	2,1	2,1	2,00	2,34	2,11	2,19	1,91
2,0	20,2	2,6	2,7	3,1	3,0	2,8	2,8	2,65	3,07	2,75	2,86	2,49
2,5	25,2	3,3	3,4	3,9	3,8	3,4	3,5	3,35	3,83	3,45	3,56	3,10
3,0	30,2	4,0	4,1	4,7	4,6	4,1	4,2	4,06	4,61	4,15	4,27	3,71
3,5	35,2	4,8	4,9	5,5	5,4	4,9	5,0	4,85	5,46	4,94	4,98	4,33
4,0	40,3	5,5	5,7	6,3	6,2	5,6	5,7	5,59	6,25	5,67	5,71	4,96
4,5	45,4	6,7	6,5	7,2	7,1	6,5	6,5	6,59	7,15	6,50	6,42	5,58
5,0	50,2	7,1	7,3	8,1	8,0	7,3	7,3	7,22	8,05	7,30	7,10	6,18
5,5	55,2	7,9	8,1	8,9	8,9	8,1	8,1	8,02	8,93	8,11	7,81	6,79
6,1	60,8	8,9	9,1	10,1	10,0	9,1	9,1	9,00	10,02	9,08	8,60	7,48
6,5	65,3	9,8	10,0	11,0	11,0	10,0	10,0	9,92	11,01	10,00	9,25	8,04
7,1	70,7	10,8	11,0	12,1	12,1	11,0	11,0	10,91	12,09	11,00	10,01	8,71
7,5	75,3	11,7	12,0	13,1	13,1	11,9	11,9	11,85	13,13	11,92	10,66	9,27
8,0	80,4	12,9	13,1	14,4	14,4	13,0	13,1	12,97	14,36	13,04	11,39	9,90
8,6	86,0	14,4	14,6	16,1	16,1	14,6	14,6	14,52	16,08	14,59	12,18	10,59
9,0	90,2	15,6	15,8	17,4	17,4	15,8	15,8	15,74	17,42	15,82	12,77	11,11
9,6	95,6	17,3	17,5	19,2	19,3	17,5	17,5	17,40	19,23	17,47	13,54	11,77
10,0	100,2	18,9	19,1	21,0	21,1	19,1	19,1	19,02	21,04	19,09	14,19	12,34
10,5	105,0	21,3	21,6	23,6	23,8	21,5	21,5	21,44	23,73	21,51	14,87	12,93
11,0	110,0	24,1	24,3	26,6	26,9	24,2	24,2	24,16	26,73	24,20	15,58	13,55
11,5	115,0	29,1	29,2	32,1	32,5	29,1	29,1	29,16	32,31	29,11	16,29	14,16
11,75	117,50	RUPTURA										

<b>Viga V3B</b>		Data do ensaio: 07/07/2009										
		Deflexões										
Força (tf)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,1	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,21	0,18
0,5	5,3	0,6	0,6	0,8	0,4	0,6	0,6	0,60	0,61	0,63	0,75	0,65
1,0	10,1	1,2	1,3	1,5	1,1	1,3	1,3	1,29	1,31	1,32	1,43	1,24
1,6	15,6	1,9	2,0	2,3	1,8	2,0	2,0	1,97	2,02	2,00	2,21	1,92
2,0	20,4	2,6	2,7	3,2	2,6	2,7	2,7	2,65	2,89	2,66	2,88	2,51
2,5	25,2	3,3	3,4	3,9	3,4	3,3	3,5	3,34	3,66	3,40	3,57	3,10
3,0	30,3	4,0	4,1	4,8	4,2	4,1	4,2	4,06	4,51	4,16	4,29	3,73
3,5	35,3	4,7	4,9	5,7	5,2	4,8	5,0	4,82	5,41	4,93	5,00	4,35
4,0	40,3	5,5	5,7	6,5	6,1	5,6	5,8	5,59	6,32	5,70	5,71	4,96
4,6	45,6	6,5	6,5	7,4	7,1	6,4	6,7	6,49	7,26	6,52	6,45	5,61
5,1	50,5	7,1	7,3	8,4	8,1	7,2	7,5	7,22	8,22	7,36	7,15	6,22
5,5	55,2	7,8	8,0	9,1	8,5	7,9	8,2	7,87	8,81	8,01	7,82	6,80
6,0	60,1	8,5	8,7	9,9	9,1	8,6	8,9	8,62	9,52	8,74	8,51	7,40
6,5	65,1	9,4	9,6	10,9	10,6	9,5	9,8	9,54	10,78	9,66	9,22	8,02
7,1	70,5	10,5	10,7	12,1	11,8	10,6	10,8	10,56	11,91	10,70	9,98	8,68
7,5	75,4	11,5	11,7	13,2	12,9	11,6	11,8	11,59	13,08	11,71	10,68	9,28
8,0	80,4	12,7	12,9	14,6	14,3	12,8	13,1	12,80	14,45	12,93	11,39	9,90
8,5	85,4	14,2	14,4	16,3	16,0	14,4	14,6	14,29	16,15	14,49	12,09	10,52
9,0	90,3	15,4	15,6	17,6	17,3	15,6	15,9	15,50	17,47	15,72	12,79	11,12
9,5	95,4	17,2	17,4	19,6	19,4	17,4	17,7	17,32	19,51	17,55	13,51	11,75
10,1	101,0	19,1	19,3	21,6	21,6	19,3	19,6	19,15	21,60	19,42	14,30	12,44
10,3	103,0	21,6	21,8	24,5	24,5	21,7	22,0	21,68	24,49	21,86	14,59	12,68
11,1	111,0	25,3	25,5	28,5	28,8	25,4	25,7	25,38	28,64	25,53	15,72	13,67
11,60	116,00	RUPTURA										

<b>Viga V4B</b>		Data do ensaio: 07/07/2009										
		Deflexões										
Força (tf)	Força (kN)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1/R2	R3/R4	R5/R6	R3 e R4 teórico	R1, R2, R5 e R6 teórico
0,1	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,21	0,18
0,6	5,7	0,6	0,6	0,8	0,1	0,6	0,6	0,60	0,44	0,56	0,81	0,70
1,0	10,2	1,2	1,3	1,4	0,6	1,2	1,2	1,24	1,03	1,18	1,44	1,26
1,5	15,3	1,9	2,0	2,2	1,2	1,9	1,9	1,93	1,70	1,88	2,16	1,88
2,0	20,4	2,6	2,7	3,2	2,2	2,6	2,6	2,64	2,72	2,57	2,88	2,51
2,5	25,2	3,2	3,4	4,0	3,0	3,3	3,4	3,33	3,49	3,36	3,57	3,10
3,0	30,3	4,0	4,2	4,9	3,9	4,0	4,3	4,06	4,41	4,17	4,29	3,73
3,5	35,1	4,7	4,9	5,8	4,9	4,7	5,1	4,78	5,35	4,92	4,97	4,32
4,0	40,4	5,5	5,7	6,8	6,0	5,5	5,9	5,59	6,39	5,74	5,72	4,97
4,5	45,2	6,3	6,5	7,6	6,9	6,3	6,8	6,39	7,27	6,55	6,39	5,56
5,0	50,2	7,1	7,3	8,5	7,8	7,2	7,7	7,23	8,13	7,41	7,11	6,18
5,5	55,2	7,6	7,8	9,3	8,1	7,7	8,2	7,73	8,70	7,91	7,81	6,79
6,0	60,0	8,1	8,4	9,8	9,2	8,1	8,7	8,24	9,51	8,41	8,50	7,39
6,5	65,2	9,0	9,3	10,8	10,3	9,1	9,6	9,16	10,55	9,33	9,23	8,03
7,1	70,6	10,1	10,3	12,0	11,5	10,1	10,7	10,21	11,73	10,40	10,00	8,69
7,5	75,2	11,2	11,5	13,4	12,7	11,2	11,7	11,34	13,04	11,49	10,65	9,26
8,0	80,3	12,5	12,8	14,8	14,3	12,5	13,1	12,63	14,53	12,81	11,37	9,89
8,5	85,3	13,9	14,2	16,5	16,0	14,1	14,7	14,06	16,23	14,39	12,08	10,50
9,0	90,1	15,2	15,4	17,9	17,2	15,3	15,9	15,27	17,51	15,63	12,76	11,10
9,6	95,5	17,2	17,3	20,1	19,5	17,3	17,9	17,24	19,80	17,62	13,52	11,76
10,0	100,0	19,2	19,4	22,3	22,0	19,4	20,1	19,29	22,16	19,75	14,16	12,31
10,4	104,0	21,8	22,0	25,3	25,2	22,0	22,5	21,92	25,24	22,22	14,73	12,81
11,0	110,0	26,5	26,7	30,3	30,8	26,6	27,2	26,60	30,55	26,87	15,58	13,55
11,38	113,80	RUPTURA										

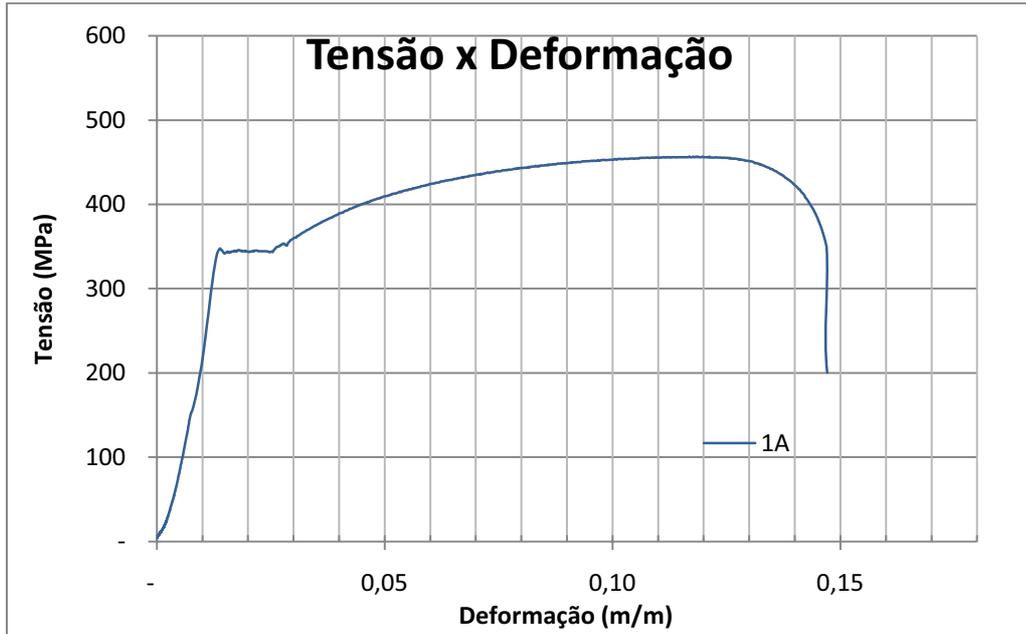


Gráfico Tensão x Deformação Corpo-de-prova 1A

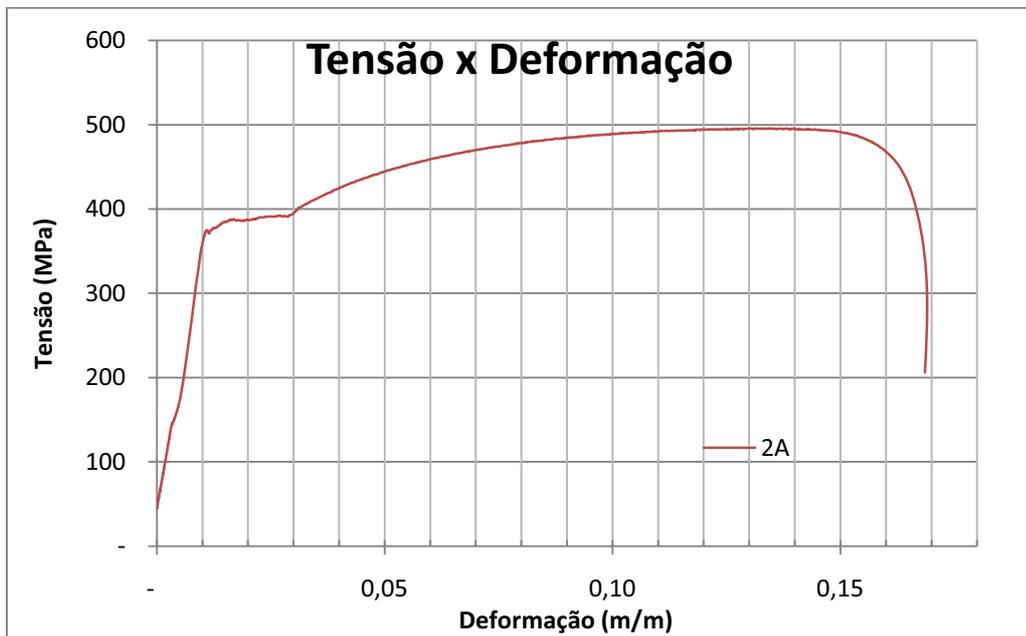


Gráfico Tensão x Deformação Corpo-de-prova 2A

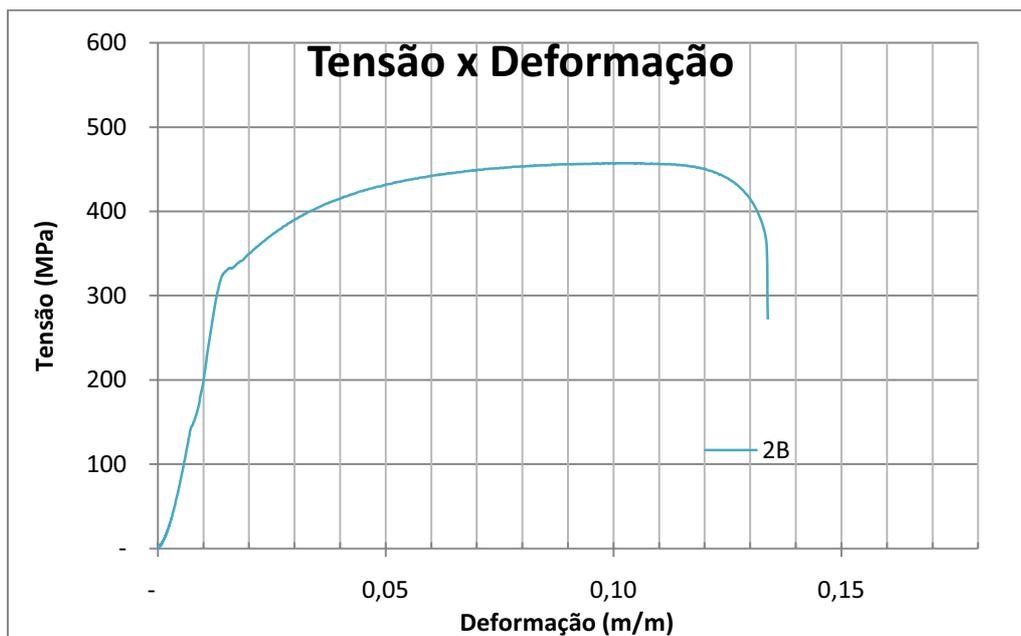


Gráfico Tensão x Deformação Corpo-de-prova 1B

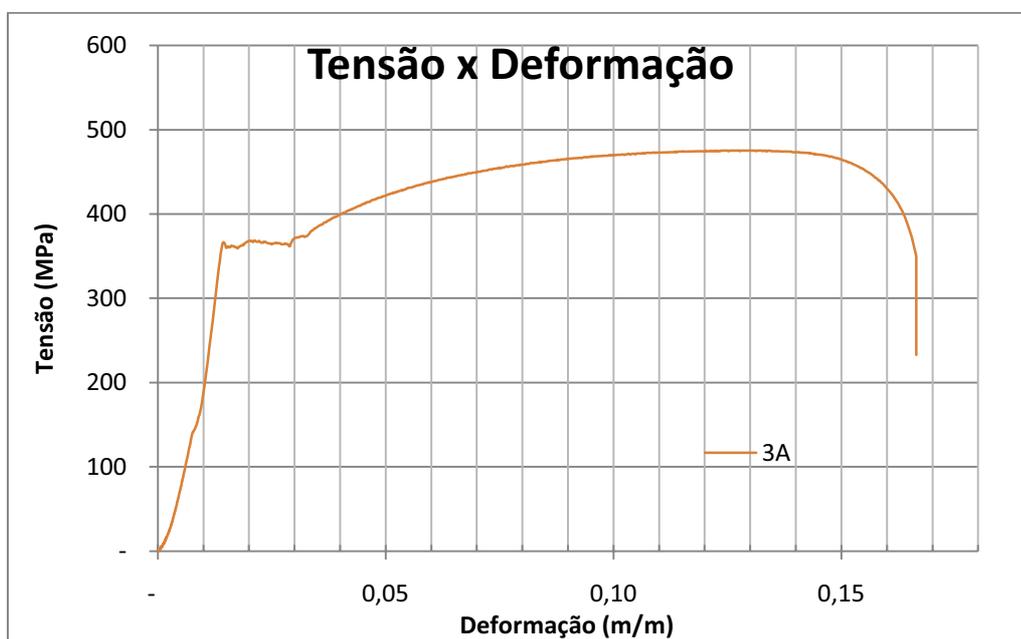


Gráfico Tensão x Deformação Corpo-de-prova 3A

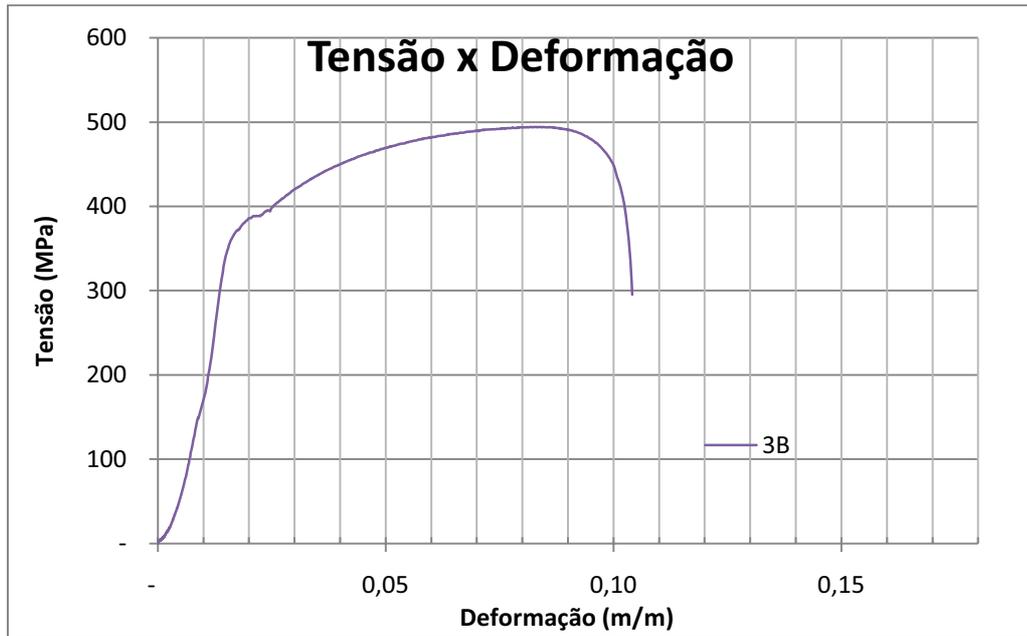


Gráfico Tensão x Deformação Corpo-de-prova 3B

**APÊNDICE B – CÁLCULOS DOS VALORES DA TABELA 4.14.****Cálculo de  $P_{y\ teo/exp}$ :**

Calculada considerando-se o momento fletor resistente, conforme item 7.8.1.1 da NBR 14762:2001:

---

Onde:

: módulo de resistência elástico da seção efetiva real conforme tabelas 4.3 e 4.4, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2 da NBR 14762:2001;

: tensão de escoamento observada na caracterização do material;

: coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,1.

**Cálculo de  $P_{y\ proj}$ :**

Calculada considerando-se o momento fletor resistente, conforme item 7.8.1.1 da NBR 14762:2001:

---

Onde:

: módulo de resistência elástico da seção efetiva nominal, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2 da NBR 14762:2001;

: tensão de escoamento nominal do material;

: coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,1.

**Cálculo de  $P_{u\ teo/exp}$ :**

Calculada considerando-se o momento fletor resistente, conforme item 7.8.1.1 da NBR 14762:2001:

---

Onde:

: módulo de resistência elástico da seção efetiva real conforme tabelas 4.3 e 4.4, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme item 7.2 da NBR 14762:2001;

: tensão de ruptura observada na caracterização do material;

: coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,1.

**Cálculo de  $P_{u\ proj}$ :**

Calculada considerando-se o momento fletor resistente, conforme item 7.8.1.1 da NBR 14762:2001:

---

Onde:

: módulo de resistência elástico da seção efetiva nominal, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2 da NBR 14762:2001;

: tensão de ruptura nominal do material;

: coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,1.