



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS – CAMPUS PALMAS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADO A FRIO,
COM FALHA NA EMENDA SOLDADA, SUBMETIDAS À FLEXÃO
SIMPLES.**

RODRIGO ARAUJO FORTES
E-mail: rodrigoaraujofortes@hotmail.com

**PALMAS – TO
2012**

RODRIGO ARAUJO FORTES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADO A FRIO,
COM FALHA NA EMENDA SOLDADA, SUBMETIDAS À FLEXÃO
SIMPLES.**

Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à banca examinadora da Área de Construção Civil como requisito para obtenção do diploma de Tecnólogo em Construção de Edifícios, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - Campus Palmas.

Orientador: Prof. Me. Thiago Dias Araújo Silva

PALMAS – TO
2012

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADO A
FRIO, COM FALHA NA EMENDA SOLDADA, SUBMETIDAS
À FLEXÃO SIMPLES.**

RODRIGO ARAUJO FORTES

TCC defendido em 20 de março de 2012, pela Banca Examinadora constituída
pelos professores:

Prof.º Me. Thiago Dias de Araújo e Silva, (IFTO)
(Orientador)

Prof.º Me. Danilo Gomes Martins, (IFTO)
(Examinador Interno)

Prof^a. Me. Adriana S.A. Monteiro, (IFTO)
(Examinador Interno)

A toda minha família.

AGRADECIMENTOS:

A Deus, pela sua infinita bondade.

A minha família que me apóia em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador: professor Thiago Dias de Araújo e Silva, pela orientação, paciência, incentivo e apoio na realização desse estudo.

A Universidade Federal de Goiás, por disponibilizado o uso dos laboratórios para a realização dos ensaios e especialmente a aluna Dilene Aires Aguiar do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFG, pela sua disposição em me ajudar e auxilia nos ensaios realizados.

A empresa Ibérica Engenharia LTDA, pela fabricação e transporte das vigas utilizadas no estudo, proporcionando assim a realização da pesquisa.

A Raimundo Barbosa e família, que me acolheram e me ajudaram no período que estive em Goiânia

A todos os meus amigos e professores do IFTO e do Centro Universitário Luterano de Palmas, que me ajudaram no período que estive ausente.

LISTA DE FIGURAS

Nº da figura	Descrição	Pág.
2.1.	<i>Efeito do Trabalho a Frio (SILVA e SILVA, 2008, p.14).</i>	19
3.1.	<i>Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), processo manual. Adaptada da ESAB.</i>	23
3.2.	<i>Juntas soldadas. Adaptada de GAYLORD et al.</i>	25
3.3.	<i>Exemplos de defeitos de mordedura. (a) Mordedura larga e curvada; (b) mordedura estreita. Adaptada de OWENS & CHEAL.</i>	26
3.4.	<i>Exemplos de inclusão de escória. Adaptada de OWENS & CHEAL.</i>	27
3.5.	<i>Exemplo de falta de penetração. Adaptada de OWENS & CHEAL.</i>	28
3.6.	<i>Exemplo de falta de fusão. Adaptada de OWENS & CHEAL.</i>	28
4.1.	<i>Dimensões das vigas.</i>	31
4.2.	<i>Enrijecedor no apoio.</i>	31
4.3.	<i>Espaçamento entre os enrijecedores.</i>	31
4.4.	<i>Enrijecedor no ponto de aplicação de carga.</i>	32
4.5.	<i>Junta de soldagem considerada perfeita.</i>	33
4.6.	<i>Junta de soldagem sem controle de qualidade.</i>	34
4.7.	<i>Corte feito com maçarico.</i>	35
4.8.	<i>Esquema da aplicação de carga.</i>	37
4.9.	<i>Esquema viga submetida à flexão simples.</i>	37
4.10.	<i>Esquema experimental.</i>	38
4.11.	<i>Pontos de aplicação de carga superior.</i>	38
4.12.	<i>Pressa hidráulica.</i>	39
4.13.	<i>Posicionamento dos deflectômetros.</i>	40
4.14.	<i>Extensômetro.</i>	40
4.15.	<i>Reagentes de preparação da superfície.</i>	41
4.16.	<i>Proteção mecânica dos extensômetros.</i>	41
5.1.	<i>Seção dos perfis ensaiados.</i>	42
5.2.	<i>Viga 01 com solda bem executada.</i>	44
5.3.	<i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 01.</i>	45
5.4.	<i>Viga 02 com solda executada com amperagem alta.</i>	45

5.5. <i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 02.</i>	46
5.6. <i>Viga 03 com solda executada com amperagem baixa.</i>	46
5.7. <i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 03.</i>	47
5.8. <i>Viga 04 com solda com inclusão de escória.</i>	47
5.9. <i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 04.</i>	48
5.10. <i>Viga 05 com solda executada com eletrodo úmido.</i>	48
5.11. <i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 05.</i>	49
5.12. <i>Foto de todas as vigas, ilustrando o modo de falha.</i>	49
6.1. <i>Flambagem lateral por torção.</i>	52
6.2. <i>Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – todas as vigas.</i>	53

LISTA DE TABELAS

Nº da tabela	Descrição	Pág.
3.1.	<i>Características e aplicações de processos de soldagem. Adaptada de WAINER et AL.</i>	20
3.2.	<i>Condições de emprego dos processos de soldagem. Adaptada de WAINER et al.</i>	22
3.3.	<i>Descontinuidades encontradas nos processos de soldagem. Adaptada de CUNHA.</i>	26
4.1.	<i>Dimensionamento do cabo. Adaptada da ESAB.</i>	33
4.2.	<i>Características das vigas ensaiados</i>	36
5.1.	<i>Propriedades geométricas do perfil. Adaptado da GERDAU.</i>	43
5.2.	<i>Resultados obtidos por software e nos ensaios a flexão.</i>	43
5.3.	<i>Resultados dos deslocamentos verticais obtidos nos ensaios a flexão.</i>	50
6.1.	<i>Comparação dos valores médios das deformações máximas, nas cargas finais das vigas ensaiadas.</i>	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

M - momento fletor solicitante.

P - força solicitante aplicada

Letras romanas minúsculas

f_u - resistência à ruptura do aço na tração

f_w - resistência à ruptura da solda

f_y - resistência ao escoamento do aço

r - raio interno de dobramento

t - espessura da chapa ou do elemento

Letras gregas minúsculas

λ_p - índice de esbeltez do perfil

σ - tensão normal, em geral

ε_y - deformação específica de correspondente ao limite de escoamento

ε_{cu} - deformação específica de compressão última

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental feito em perfis metálicos formado a frio, tipo “U” enrijecido, formando barras bi-apoiados de 2000 mm de comprimento, analisando o comportamento de tais perfis perante os diversos tipos de falhas de soldagem em suas emendas. Os perfis foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo é composto por um perfil com emenda considerada perfeita que serviu de parâmetro para a análise do comportamento dos demais perfis, o segundo grupo é composto por quatro perfis com emendas soldadas com eletrodo revestido, cada emenda possuindo um tipo de falha diferente. O carregamento aplicado trabalha a flexão simples.

Os ensaios realizados a fim de se estudar o comportamento dos perfis formados a frio sob algumas condições específicas de falhas de soldagem em suas emendas: perfil com emenda soldada sem falha no processo de soldagem e quatro perfis com emendas soldadas com variações no tipo falha no processo de soldagem. Os resultados obtidos sob as várias condições estudadas foram comparados entre si.

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

ABSTRACT

This paper presents an experimental study done on cold formed metal profiles, type "U" hardened, forming bi-backed bars of 2000 mm in length, analyzing the behavior of these profiles against the different types of welding flaws in its amendments. The profiles were divided into two groups. The first group consists of a profile with amendment deemed perfect that served as a parameter to compare the behavior of other profiles, the second group is composed of four profiles with welded seams with coated electrodes, each amendment having a different type of failure. The applied load works the simple bending.

Tests conducted in order to study the behavior of cold formed steel under some specific conditions of welding flaws in its amendments: profile with welded seam without failure in the soldering process and four profiles with welded seams with variations in the type process failure welding. The results under the various conditions were compared.

Keywords: structural steel, cold formed steel, simple bending, welded seams.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Aspectos gerais sobre o uso dos perfis formados a frio.....	14
1.2. Aspectos gerais sobre o uso da solda nas estruturas	15
1.3. Objetivo e escopo do trabalho	16
2. PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO	17
2.1. Normatização	17
2.2. Processos de Fabricação	17
2.3. Aço para Perfis Formado a Frio.....	18
2.4. Influência do Trabalho a Frio	18
3. METALURGIA DA SOLDAGEM.....	20
3.1. Processos básicos de soldagem.....	20
3.1.1. Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW - Shield Metal Arc Welding)	22
3.2. Fluxos de soldagem e classificação de eletrodos.....	23
3.3. Posições de soldagem e tipos de juntas soldadas.....	24
3.4. Defeitos na solda.....	26
3.4.1. Mordedura	26
3.4.2. Inclusões de escória.....	27
3.4.3. Penetração incompleta.....	27
3.4.4. Fusão incompleta.....	28
3.4.5. Porosidade	28
3.4.6. Trincas.....	29
4. METODOLOGIA.....	30
4.1. Introdução	30
4.2. Preparação dos Perfis.....	30
4.2.1. Dimensões e Enrijecedores	30
4.2.2. Preparação da Viga 01.....	32
4.2.3. Preparação da Viga 02.....	33
4.2.4. Preparação da Viga 03.....	34
4.2.5. Preparação da Viga 04.....	35
4.2.6. Preparação da Viga 05.....	36

4.3.	Ensaios experimentais.....	36
4.3.1.	Esquema experimental	37
4.3.2.	Instrumentação e sistema de aquisição de dados	39
4.3.3.	Leitura das deformações específicas	40
4.3.4.	Metodologia de execução dos ensaios das vigas.....	41
5.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	42
5.1.	Introdução	42
5.2.	Ensaios dos perfis submetidos à flexão simples	42
5.2.1.	Modos e cargas de ruptura	43
5.2.2.	Deslocamentos verticais	44
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
6.1.	Introdução	51
6.2.	Ensaios dos perfis submetidos à flexão simples	51
6.2.1.	Ensaios experimentais	51
6.2.2.	Modos e cargas de ruptura	51
6.2.3.	Deslocamentos verticais	52
6.2.4.	Deformações específicas	53
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
7.1.	Conclusão.....	54
7.2.	Sugestões	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	Apêndice A – Tabelas e Gráficos dos Resultados Experimentais.....	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos gerais sobre o uso dos perfis formados a frio

A utilização de estruturas metálicas vem ganhando espaço na construção civil, devido a ser um sistema construtivo de alta qualidade técnica, resistência mecânica elevada, com agilidade e rapidez na fabricação e na montagem das estruturas, com boa margem de segurança tendo canteiros de obras racionalizados. Ainda conta com a economia de materiais, pois existe a diminuição do peso próprio da estrutura, em comparação com outros materiais.

Em obras de estruturas metálicas de médio e grande porte, geralmente a estrutura principal é constituída de perfis laminados e soldados, enquanto que os perfis formados a frio são empregados em elementos secundários tais como contraventamentos, tapamentos laterais, terças e longarinas.

Segundo SILVA, 2007, p.23. Dentro do uso de perfis de aço destinados à fabricação de estruturas encontramos três grupos: os perfis laminados os perfis soldados e os perfis de chapa dobrada ou perfis formados a frio (perfis leves).

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 *apud* ALMEIDA, 2009, p. 36).

Atualmente nota-se um movimento de substituição dos perfis laminados por alternativas mais econômicas através da utilização de perfis soldados e formados a frio. Ambos fornecem inúmeras vantagens à construção civil e são opções competitivas no mercado frente a outros tipos de materiais. Entretanto, a escolha do tipo de perfil mais eficiente e econômico fica de acordo com as necessidades do projeto. (ALMEIDA, 2009, p.37).

Os perfis formados a frio podem ser eficientemente utilizados em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte. Pois são compostos por chapas finas, possuindo leveza facilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, facilitando e diminuindo o custo de sua montagem. Por serem constituídos de chapas finas de aço tendo maleabilidade para a fabricação de grande variedade de seções transversais, desde a mais simples cantoneira, eficiente para trabalhar à tração, até perfis formados a frio duplos, em seções unicelulares, também conhecidos como seção-caixão, que devido à boa rigidez à torção, menor área exposta e menor área de estagnação de líquidos ou detritos oferecem soluções econômicas (SILVA e SILVA, 2008, p.10).

Assim como os perfis laminados, os perfis formados a frio estão sujeitos a 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. Os perfis com mesas largas e com enrijecedores de borda como, por exemplo, perfis U e Z enrijecidos e cartola são mais sensíveis à distorção. (DAVID *apud* ALMEIDA, 2009, p. 37).

1.2. Aspectos gerais sobre o uso da solda nas estruturas

O processo de soldagem pode ser empregado na fabricação e reparação das estruturas, a operação de soldagem é obtida pela fusão das partes adjacentes junto com o material de adição, hoje a soldagem é utilizada em larga escala na fabricação de estruturas metálicas e nas ligações feitas em obra, requerendo qualidade estrutural.

Segundo SILVA, 2007, p.25. A soldagem tem desempenhado um papel muito importante em nossa economia. Como o desenvolvimento de novos equipamentos e eletrodos e as pesquisas realizadas nas áreas de projeto, arquitetura e cálculo, proporcionado cada vez mais o uso intenso das estruturas metálicas dentro da construção civil. Além de permitir a execução de peças estruturais utilizando partes de perfis disponíveis, evitando desperdícios, pois utiliza peças de pequenas dimensões, as quais só possuem utilidade se forem emendadas a outras a fim de formarem uma peça com dimensão maior. Este princípio também é utilizado na produção de peças projetadas cujas dimensões ultrapassem àquelas fornecidas no mercado.

A NBR 14762 (2001) especifica os procedimentos de dimensionamento de ligações soldadas para peças em que a espessura da parte mais fina não ultrapasse 4,75mm. Para os casos que não se enquadra nestas especificações, a norma estabelece que sejam adotados os parâmetros da NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2008) e, se houver alguma situação específica que esta norma não preveja, a NBR 14762 (2001) estabelece que sejam atendidas as exigências das normas AWS D1.1:2000 – Structural Welding Code: Steel (American Welding Society, 2000) ou a AWS D1.3:1998 – Structural Welding Code: Steel (American Welding Society, 1998), (VIEIRA 2010, p. 52).

1.3. Objetivo e escopo do trabalho

Com o aumento da utilização dos perfis formados a frio torna-se indispensável o estudo das falhas em suas emendas e sua influência no comportamento do perfil. Este trabalho tem como objetivo apresentar a análise do comportamento de perfis tipo “C” enrijecidos com os principais tipos de falhas de soldagem com eletrodos revestido em suas emendas, submetidos à flexão simples. O estudo foi realizado em cinco situações distintas:

- A primeira situação refere-se ao ensaio de um perfil com uma emenda soldada considerada perfeita.
- A segunda situação refere-se ao ensaio de um perfil com uma emenda soldada feita com amperagem alta.
- A terceira situação refere-se ao ensaio de um perfil com uma emenda soldada feita com amperagem baixa.
- A quarta situação refere-se ao ensaio de um perfil cortado a maçarico com uma emenda soldada feita sem a realização da limpeza das impurezas deixada pelo processo de corte.
- A quinta situação refere-se ao ensaio de um perfil com uma emenda soldada feita com eletrodo úmido.

Todas as emendas foram confeccionadas no meio do vão da peça, na região de maior momento. Esses perfis foram submetidos à ação de forças concentradas, verificando seus modos de falha, seus deslocamentos e a carga última de ensaio.

2. PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

2.1. Normatização

No Brasil, a utilização dos perfis formados a frio foi ocorreu durante a década de 60 do século passado. A partir de então, surgiram à necessidade de especificações para o projeto destes perfis, então, em 1967 foi editada a NB143 – Calculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves. Em 1980, foi publicada a NBR 6355 – Perfis Estruturais em Aço Formado a Frio (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1980) com a função de padronizar a fabricação dos perfis formados a frio. Com a obsolescência de ambas as normas, devido à falta de revisão, a maioria dos projetos de estruturas metálicas a abandonaram e passaram a seguir as prescrições do AISI (American Iron and Steel Institute), que possuía edições atualizadas, amplas e com revisões periódicas de seu conteúdo. A utilização de normas estrangeiras gerava problemas de incompatibilidade com outras nacionais que eram necessárias aos projetos. As incompatibilidades iam desde as diferenças entre coeficientes de segurança a serem adotados, até ao tipo de critério a ser adotado para esta segurança. Para que os problemas fossem solucionados, em 2001 foi publicada a NBR 14762. Esta norma veio para consolidar as pesquisas realizadas ao longo dos anos, dentro de uma realidade nacional. (VIEIRA, 2010, p. 21).

2.2. Processos de Fabricação

Segundo SILVA e SILVA, 2008, p.14, são dois os processos de fabricação dos perfis formados a frio: contínuo e descontínuo.

O processo contínuo é adequado à fabricação em série, pois é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os roletes de uma linha de perfilação. Os roletes vão conferindo gradativamente à chapa, a forma definitiva do perfil. Quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento indicado no projeto.

O processo descontinuo é adequado a pequenas quantidades de perfis, pois é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. O comprimento do perfil está limitado à largura da presa.

2.3. Aço para Perfis Formado a Frio

A NBR 14762:2001 “Dimensionamento de estrutura de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento” recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y maior ou igual a 1,08, e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para a base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referencia os ensaios de tração conforme ASTM A370.

A utilização de aços sem qualificação estrutural para perfis é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Não devendo ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa e 300 MPa para a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura (f_u), respectivamente (SILVA e SILVA, 2008, p.14).

2.4. Influência do Trabalho a Frio

Após a fabricação as propriedades mecânicas dos perfis não são iguais ao do material base. O dobramento da chapa provoca o fenômeno conhecido como envelhecimento que é o carregamento até a zona plástica, provocado pela prensa, descarregamento, e posterior carregamento. Após a conformação a frio, o aço tem sua resistência ao escoamento (f_y) aumentada, o que também eleva a resistência à ruptura do aço na tração (f_u) e reduz a sua ductilidade.

Essas alterações dependem do tipo de aço, tipo de tensão (tração ou compressão), direção da tensão com relação à direção do trabalho a frio, relação entre f_u/f_y ,

relação entre o raio de dobramento e a espessura r/t e da quantidade de trabalho a frio executada.

Os cantos do perfil são mais afetados pelo dobramento do que as regiões planas, assim, as propriedades mecânicas dessa região são consideravelmente diferentes das propriedades das regiões planas assim como apresentado pela figura (2.1).

A principal causa das alterações mecânicas provocadas pelo trabalho a frio são devido ao encruamento e ao efeito Bauschinger, (resistência longitudinal à compressão do aço é menor que a resistência longitudinal à tração no caso direto e produz a situação contrária na direção transversal ao estiramento no caso inverso) (VIEIRA, 2010, p. 31).

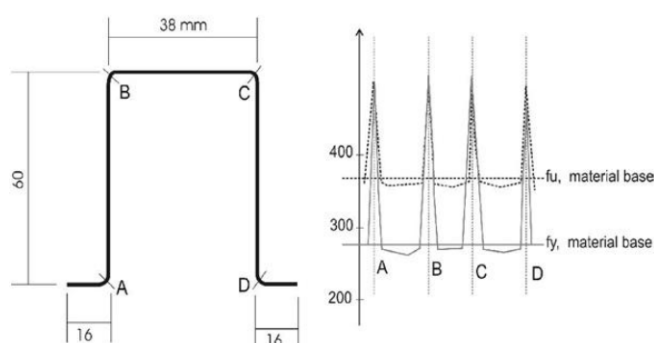


Figura 2.1 – Efeito do Trabalho a Frio (SILVA e SILVA, 2008, p.14).

(medida em mm)

Segundo VIEIRA, 2010, p. 32. A NBR 14762 permite a utilização do aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio desde que, todos os elementos constituintes do perfil apresentem o índice de esbeltez $\lambda_p \leq 0,673$, onde λ_p deve ser calculado com a tensão (σ) igual ao limite de escoamento (f_y).

3. METALURGIA DA SOLDAGEM

3.1. Processos básicos de soldagem

Segundo BELLEI, 2000, p.21. A soldagem é a técnica de unir duas ou mais partes constitutivas de um todo, assegurando entre elas a continuidade do material e em consequência suas características mecânicas e químicas. De acordo com WAINER *apud* VIEIRA, 2010, p. 49, cada processo de soldagem possui suas vantagens e limitações, e um adequado balanço determinara suas aplicações típicas. Há processos de soldagem que possuem um uso específico para um determinado metal. A tabela 3.1 mostra as vantagens e desvantagens dos processos e algumas aplicações enquanto a tabela 3.2 apresenta quais os processos comerciais de soldagem mais adequados a cada situação.

Neste trabalho utilizamos a solda com eletrodo revestido nas emendas soldadas.

Tabela 3.1. Características e aplicações de processos de soldagem. Adaptada de WAINER et al.

Processo	Vantagens	Desvantagens	Emprego
Eletrodo Revestido (SMAW)	Grande versatilidade no projeto de junta e na posição de soldagem. Baixo Custo. União com excelentes propriedades. Não exige grandes ajustes da estrutura.	Mão-de-obra habilidosa. Frequente mudança de eletrodos. Na soldagem com várias camadas é necessário remover a escória em cada passe.	Processo mais usado na fabricação, na manutenção e na emenda de perfis.
Arco submerso (SAW)	Processo automático. Alta taxa de deposição.	Somente na posição plana ou horizontal. Restrito aos aços. Cuidado no posicionamento da junta.	Solda de topo ou em ângulo com mais de 1 m de comprimento e 5 a 50 mm de espessura.

TIG	Grande versatilidade manual ou automática, tipo de junta, posição de soldagem. Soldas com elevada qualidade. Adequado para metais ferrosos e não ferrosos.	Elevado custo de consumíveis. Mão de obra habilidosa. Soldagem com várias camadas em solda de topo com espessura acima de 5 mm. Inadequado para utilização em locais abertos.	Passe da raiz em aços ligados. Usado em união de não ferrosos e inoxidáveis.
MIG gás inerte	Solda com alta qualidade para a maioria das ligas. Alta taxa de deposição. Processo semi ou totalmente automatizado.	Custo elevado do gás inerte. Mão de obra habilidosa. Cuidado com o posicionamento da junta. Inadequado para utilização em locais abertos.	Usado em aços inoxidáveis e ligas não ferrosas.
MIG pulsado	Processo semi- automático. Todas as posições de soldagem. Aplicado a maioria das ligas e espessuras. Qualidade de solda muito boa.	Equipamento complexo. Custo moderado do processo. Inadequado para utilização em locais abertos.	Usado principalmente em soldagem de aço-carbono, inox e não ferrosos.
Eletro-escória	Soldagem automática com alta velocidade. Alta taxa de deposição. Usado em aço-carbono e de baixa liga c/ espessura acima de 50 mm.	Posição vertical de soldagem. Solda e a zona afetada pelo calor com estruturas grosseiras, exigindo tratamento térmico após soldagem. Cuidado na montagem da estrutura.	Solda de chapas grossas de aço.

Tabela 3.2. Condições de emprego dos processos de soldagem. Adaptada de WAINER et al.

Materiais	Espessuras	Eletrodo revestido	Arco Submerso	MIG ou MAG	FCAW	TIG	Eletro escória
Aço-carbono	Até 3 mm	X	X	X		X	
	3 a 6 mm	X	X	X	X	X	
	6 a 19 mm	X	X	X	X		
	Acima de 19 mm	X	X	X	X		X
Aço de baixa liga	Até 3 mm	X	X	X		X	
	3 a 6 mm	X	X	X	X	X	
	6 a 19 mm	X	X	X	X		
	Acima de 19 mm	X	X	X	X		X

3.1.1. Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW - Shield Metal Arc Welding)

Segundo BELLEI, 2000 p.21 o processo de soldagem com eletrodo revestido tem como característica o uso de máquina de solda, podendo ser retificador, transformador ou gerador, que produz a corrente necessária à obtenção do arco elétrico entre o eletrodo revestido com as partes a serem soldadas. Este processo é manual porque depende essencialmente da habilidade do soldador durante todo o período da fusão.

Segundo GAYLORD et al. *apud* SILVA, 2007, p. 62, a maioria dos procedimentos de soldagem manual é executada com processos a arco elétrico com eletrodos revestidos. Neste processo, mostrado na figura 3.1, 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. 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.

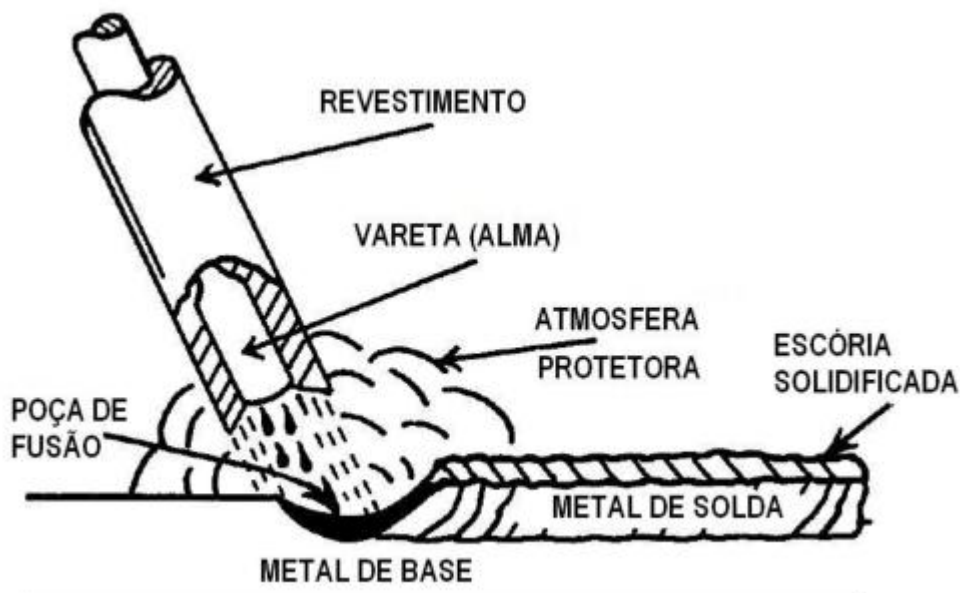


Figura 3.1. Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), processo manual. Adaptada da ESAB.

A soldagem a arco com eletrodo revestido, De acordo com SILVA, 2007, p. 64, 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.

3.2. Fluxos de soldagem e classificação de eletrodos

Segundo SILVA, 2007, p. 72, 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.

A AWS classifica os fluxos em quatro tipos, baseada no método de fabricação, que são: fluxos fundidos, fluxos aglutinados, fluxos aglomerados e fluxos misturados.

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, sobrecabeça 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). A referência após o traço é utilizada somente pela especificação AWS A-5.5, indicando a composição química do material. Tem-se os seguintes sufixos com as seguintes composições químicas aproximadas: A1 (0,5% Mo); B1 (0,5% Cr, 0,5% Mo); B2 (1,25% Cr, 0,5% Mo); B2L (1,25% Cr, 0,5% Mo (baixo carbono)); B4L (2% Cr; 0,5% Mo (baixo carbono)); C1 (2,5% Ni); C2 (3,5% Ni); C3 (1% Ni); B3 (2,25% Cr, 1% Mo); B3L (2,25% Cr, 1% Mo (baixo carbono)); D1 (1,5% Mn, 1,5% Mo); D2 (2% Mn, 1,5% Mo); G (aço de alta resistência com 5 diferentes composições de Mn, Ni, Cr, Mo e V); M (aço de alta resistência com 4 diferentes composições de Mn, Ni, Cr, Mo e V).

Quanto maior a resistência à tração de um aço soldado, mais baixa deve ser a umidade do revestimento do eletrodo para evitar a fissura da solda. Para isso, tem-se os eletrodos de baixo hidrogênio (E7015, E7016, E7018 e E7028) que contêm carbonato de sódio como revestimento, e possuem uma limitada umidade (hidrogênio) em teor de peso. Os revestimentos das séries E70 podem conter uma máxima umidade de 0,04%, mas as séries E120 são limitadas em somente 0,015%.

3.3. Posições de soldagem e tipos de juntas soldadas

As juntas podem ser executadas de diversas posições de soldagem como mostra a figura 3.2.a, dependendo do tamanho e forma dos perfis envolvidos na ligação. Os tipos básicos de juntas soldadas são: extremidade, sobreposição, te, canto e borda, como mostrados na figura 3.2.b.

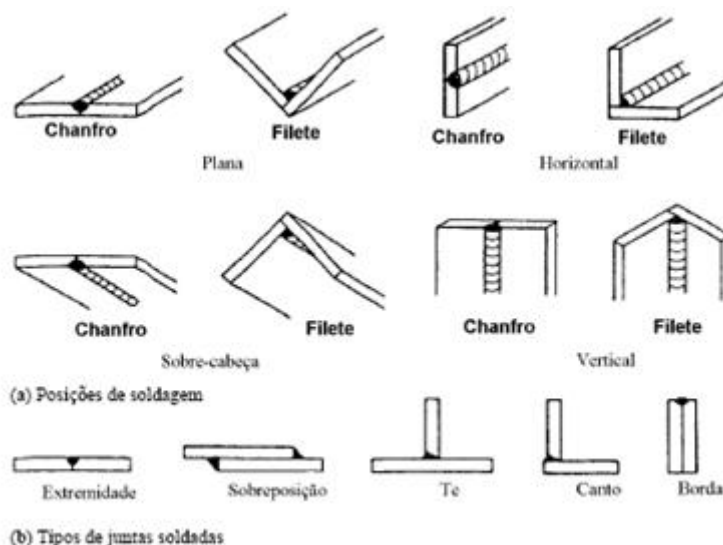


Figura 3.2. Juntas soldadas. Adaptada de GAYLORD et al.

Segundo SALMON & JOHNSON *apud* SILVA, 2007, p. 81, A junta de extremidade é usada principalmente para unir as extremidades de chapas niveladas de mesma espessura ou com espessuras relativamente próximas. Este tipo de junta é eliminada 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.

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.

A junta tê é utilizada para fabricar perfis tais como o perfil “T” e o perfil “I”, e para fixação de enrijecedores em geral.

As juntas de canto são usadas principalmente para constituir seções caixão, sendo também empregadas na fixação de enrijecedores de extremidade.

As juntas de borda são geralmente não estruturais, sendo frequentemente utilizadas para manter duas ou mais chapas em uma determinada posição ou para manter alinhamento inicial.

3.4. Defeitos na solda

As principais discontinuidades comumente encontradas nos vários processos de soldagem são mostradas na tabela 3.3, e analisadas logo depois.

Tabela 3.3. Descontinuidades encontradas nos processos de soldagem. Adaptada de CUNHA.

Processo de soldagem	Porosidade	Inclusão de escoria	Penetração incompleta	Fusão incompleta	Mordedura	Fissuras
SMAW	X	X	X	X	X	X
SAW	X	X	X	X	X	X
TIG	X	Inclusão de W		X		X
GMAW	X	X	X	X	X	X

3.4.1. Mordedura

Segundo CASTRO, 1999, p 95, Mordedura é a falha no enchimento do cordão de solda em que o metal base é deslocado por fusão e o sulco resultante desse deslocamento não é preenchido pelo metal de adição (figura 3.3). Aparece na forma de depressão ao lado do cordão de solda, sob a forma de entalhe no metal base, acompanhado a margem da solda. Pode também se localizar na raiz da solda. Como consequência temos a redução da seção resistente (com enfraquecimento da junta soldada), pontos preferenciais para início da ruptura (principalmente se a peça estiver submetida à fadiga) e facilidade de inclusão de escória.

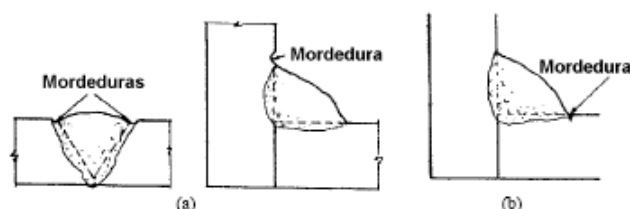


Figura 3.3 Exemplos de defeitos de mordedura. (a) Mordedura larga e curvada; (b) mordedura estreita. Adaptada de OWENS & CHEAL.

Esses defeitos são facilmente detectados visualmente e podem ser corrigidos pela deposição adicional de material de solda.

3.4.2. Inclusões de escória

Segundo SILVA, 2007, p. 90, Essas escórias são partículas não metálicas, de densidade mais baixa que o metal de solda fundido, usualmente derivadas do fluxo, que são apanhadas pela poça de solda, (figura 3.4). Suas inclusões podem aparecer em soldas de múltiplos passes, e nesta situação, são usualmente ocasionadas pelo limpamento inadequado entre os passes e também por um rápido resfriamento da solda que pode capturar a escória antes que ela possa subir para a superfície. Isso tudo é somado muitas vezes com formas desfavoráveis do filete ou uma sequência incorreta do mesmo. Podendo assumir considerável comprimento e, por essa razão, influenciar a resistência da seção transversal. Alternativamente elas podem ocorrer na raiz da solda, usualmente como um resultado da abertura da raiz ser demasiadamente estreita.



Figura 3.4. Exemplos de inclusão de escória. Adaptada de OWENS & CHEAL.

3.4.3. Penetração incompleta

Segundo SALMON & JOHNSON *apud* SILVA, 2007, p. 91, penetração incompleta significa a solda estender-se em uma distância mais rasa, através da profundidade do chanfro, onde penetração completa foi especificada. Isto pode ocorrer na raiz ou raramente entre passes, em uma solda executada com múltiplos passes (figura 3.5). Esse defeito pode ser causado por corrente de soldagem insuficiente, dando uma

insatisfatória concentração de energia dentro da poça de solda e também pode ser causado quando um excessivo grau de velocidade de soldagem é utilizado.

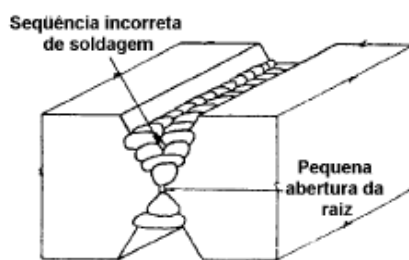


Figura 3.5. Exemplo de falta de penetração. Adaptada de OWENS & CHEAL.

3.4.4. Fusão incompleta

Segundo SILVA, 2007, p. 92, é a fusão incompleta do metal base e/ou do metal de solda. Este defeito, exemplificado na figura 3.6, é uma forma menos extrema de falta de penetração. Isto pode ser causado por formas mais brandas da mesma falha que conduz a falta de penetração, como o uso de corrente insuficiente e rápido grau de velocidade de soldagem e pode, em adição, ser um resultado da contaminação ocasionada por ferrugem, escória, óxidos, ou outros materiais estranhos presentes na superfície da ligação.

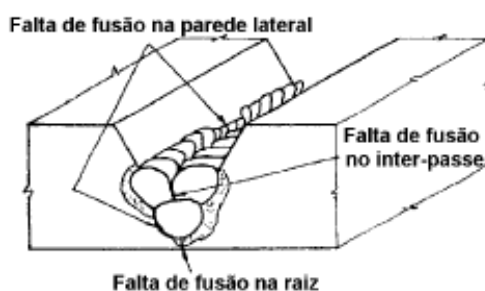


Figura 3.6 Exemplo de falta de fusão. Adaptada de OWENS & CHEAL.

3.4.5. Porosidade

Segundo SILVA, 2007, p. 92, Porosidade é a formação de pequenos vazios no metal de solda e é causada pela captura de gás na poça de solda fundida, durante o processo de resfriamento. As cavidades são geralmente esféricas mas podem ser alongadas. elas

surtem porque a solubilidade do gás na poça de solda diminui quando a temperatura recua. O gás pode surgir por alguma contaminação da chapa ou do eletrodo, por um turbulento fluxo de gás quando o processo com proteção gasosa é utilizado, ou também quando se utiliza um longo arco com fluxos básicos, além do uso excessivo de altas correntes.

3.4.6. Trincas

Segundo CASTRO, 1999, p.113, trincas são descontinuidades produzidas pela ruptura local do material. Podem ocorrer durante o processo de soldagem, durante o processo de tratamento térmico posterior ou, se a junta se encontrar submetida a um esforço variável, vibração excessiva ou em contato com um ambiente corrosivo durante o período inicial de trabalho.

É o mais grave dos defeitos de solda. Podem ocorrer no cordão de solda ou no metal base. É um problema relacionado à soldabilidade dos aços, sendo que neste caso o soldador pouco contribui para a sua formação. Cabe ao projetista detalhar juntas de soldagem adequadas, com solda e metal base compatíveis, e ao inspetor de solda conferir para que as recomendações de projeto estejam sendo executadas corretamente. Como se trata de um problema que pode acontecer tanto internamente como externamente, é necessário a realização de ensaios para verificar a sua ocorrência.

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

Neste capítulo será abordado o método utilizado na confecção das vigas e a metodologia dos ensaios realizados na análise do comportamento de vigas constituídas de perfil formado a frio tipo “C” enrijecido 150 x 60 x 20 # 2,00 mm, com emendas soldadas, submetidos à flexão simples. A nomenclatura das vigas foi definida com V1 a V5, fabricados com aço CSN-COR 420 com 300 MPa de resistência ao escoamento (f_y) e 420 MPa de a resistência à ruptura (f_u), produzidas pela empresa Ibérica Engenharia LTDA de Goiânia-GO.

O processo de soldagem utilizado nas emendas é o especificado como processo de soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), foram utilizando eletrodo E 6013 # 2,50 mm.

Os ensaios dos perfis submetidos à flexão simples foram realizados no Laboratório de Materiais da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

4.2. Preparação dos Perfis

4.2.1. Dimensões e Enrijecedores

A seguir será apresentado os parâmetros utilizados na confecção de todas as vigas ensaiadas. A figura 4.1 mostra as dimensões em que foram confeccionadas todas as vigas ensaiadas.

As vigas tiveram seus apoios enrijecidos através da união de um pedaço de 100mm do mesmo perfil utilizado na confecção da mesma (figura 4.2), a união deste pedaço de perfil com a viga foi realizada através de filetes de solda.

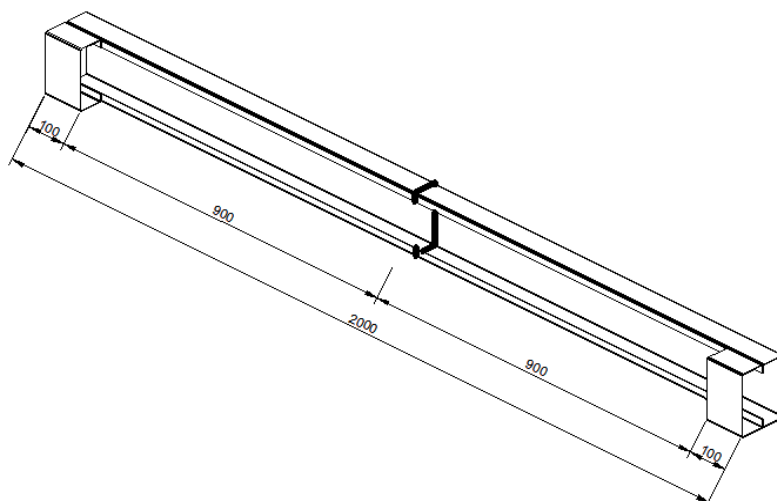


Figura 4.1 – Dimensões das vigas.

(medida em mm)

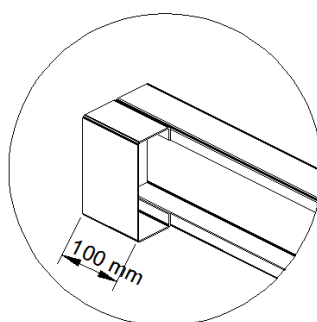


Figura 4.2 – Enrijecedor no apoio.

Os pontos de aplicação de carga foram enrijecidos através da união de chapas de 2,00 mm de espessura na viga, com espaçamento de acordo com a figura 4.3, unidas no perfil através de filetes de solda (figura 4.4).

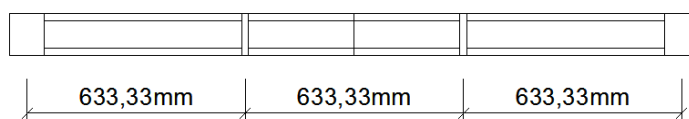


Figura 4.3 – Espaçamento entre os enrijecedores.



Figura 4.4 – Enrijecedor no ponto de aplicação de carga.

Todos os enrijecedores foram soldados utilizando eletrodo E6013 #2,25 mm, guardado em estufa, com maquina de solda operando em 70A.

4.2.2. Preparação da Viga 01

A viga 01 foi confeccionada de tal modo a apresentar uma emenda soldada de ótima qualidade, sendo considerada na pesquisa como emenda soldada perfeita, servindo de parâmetro para comparação com as demais vigas ensaiadas, os seguintes parâmetros foram utilizados na confecção da viga 01:

- a) Cortou-se o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm nas dimensões requeridas com lixadeira, fazendo todo acabamento na chapa, tirando todas as rebarbas;
- b) A junta de soldagem foi realizada com uma folga de 2,00 mm (figura 4.5);
- c) Foi realizado o pré-aquecimento do perfil antes da soldagem;
- d) Utilizou-se o eletrodo E6013 #2,25 mm, seco;
- e) Realizou-se a soldagem com maquina de solda operando na Amperagem de 70A, em um período de tempo de aproximadamente 3 minutos;
- f) Dimensionou-se o cabo da maquina de solda de acordo com tabela 4.1.

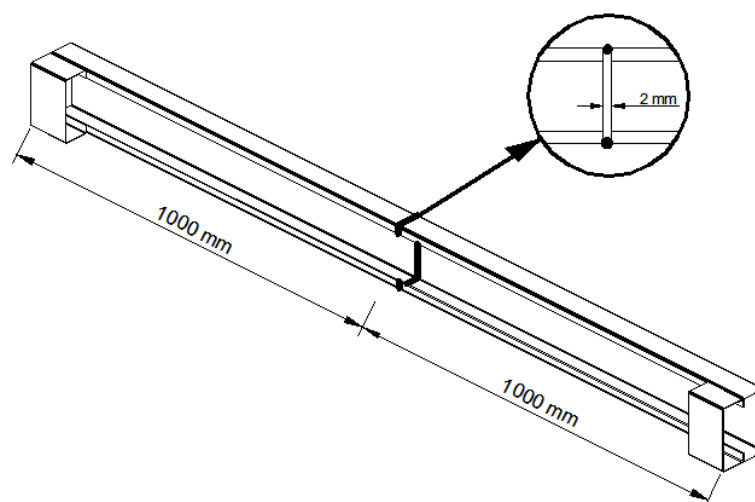


Figura 4.5 – Junta de soldagem considerada perfeita.

Tabela 4.1 – Dimensionamento do cabo. Adaptada da ESAB.

DIAMETRO DO CABO EM (mm ²)			
A	COMPRIMENTO TOTAL (m)		
	0-10	10-30	30-50
100	4	5	6
200	6	6	6.5
300	8	8	9
400	9	9	10

4.2.3. Preparação da Viga 02

A emenda soldada da viga 02 foi confeccionada com maquina de solda operando em amperagem alta (120A), os seguintes paramentos foram utilizados na confecção da viga02:

- a) Cortou-se o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm nas dimensões requeridas com lixadeira, fazendo todo acabamento na chapa, tirando todas as rebarbas;
- b) Não se utilizou espaçamento na emenda (figura 4.6);
- c) Foi realizado o pré-aquecimento do perfil antes da soldagem;
- d) Utilizou-se o eletrodo E6013 #2,25 mm, seco;
- e) Realizou-se a soldagem com maquina de solda operando na Amperagem de 70A, em um período de tempo de aproximadamente 3 minutos;
- f) Dimensionou-se o cabo da maquina de solda de acordo com tabela 4.1.

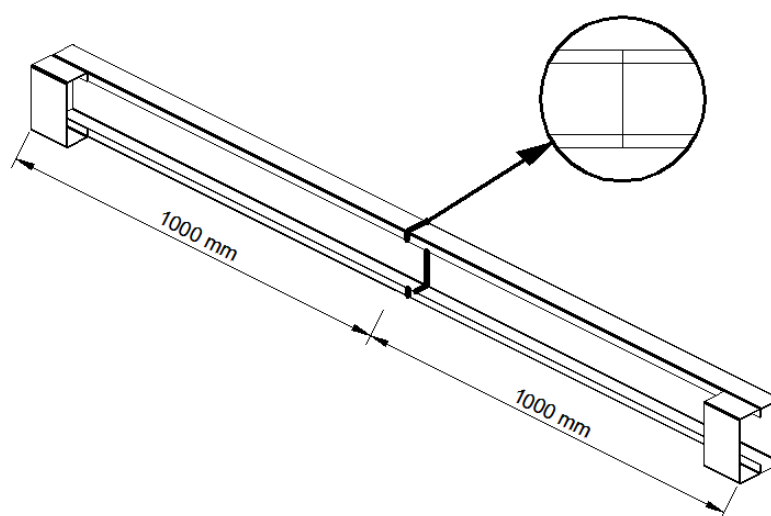


Figura 4.6 – Junta de soldagem sem controle de qualidade.

4.2.4. Preparação da Viga 03

A emenda soldada da viga 03 foi confeccionada com maquina de solda operando na amperagem baixa (50A), os seguintes paramentos foram utilizados na confecção da viga03:

- a) Cortou-se o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm nas dimensões requeridas com lixadeira, fazendo todo acabamento na chapa, tirando todas as rebarbas;
- b) Não se utilizou espaçamento na emenda;
- c) Foi realizado o pré-aquecimento do perfil antes da soldagem;
- d) Utilizou-se o eletrodo E6013 #2,25 mm, seco;

- e) Realizou-se a soldagem com maquina de solda operando na Amperagem de 70A, em um período de tempo de aproximadamente 3 minutos;
- f) Dimensionou-se o cabo da maquina de solda de acordo com tabela 4.1.

4.2.5. Preparação da Viga 04

A emenda soldada da viga 04 foi confeccionada com impurezas provenientes do processo de corte, pois foi realizada sem a devida limpeza da extremidade da emenda soldada, os seguintes paramentos foram utilizados na confecção da viga 04:

- a) Cortou-se o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm nas dimensões requeridas com o auxilio de um maçarico, deixando resíduos que em seguida foram incorporados ao cordão de solda da emenda, (figura 4.7);
- b) Não se utilizou espaçamento na emenda;
- c) Foi realizado o pré-aquecimento do perfil antes da soldagem;
- d) Utilizou-se o eletrodo E6013 #2,25 mm, seco;
- e) Realizou-se a soldagem com maquina de solda operando na Amperagem de 70A, em um período de tempo de aproximadamente 3 minutos;
- f) Dimensionou-se o cabo da maquina de solda de acordo com tabela 4.1.



Figura 4.7 – Corte feito com maçarico.

4.2.6. Preparação da Viga 05

A emenda soldada da viga 05 foi confeccionada com eletrodo armazenado em local exposto a umidade, os seguintes parâmetros foram utilizados na confecção da viga 05:

- Cortou-se o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm nas dimensões requeridas com lixadeira, fazendo todo acabamento na chapa, tirando todas as rebarbas;
- Não se utilizou espaçamento na emenda;
- Foi realizado o pré-aquecimento do perfil antes da soldagem;
- Utilizou-se o eletrodo E6013 #2,25 mm, úmido;
- Realizou-se a soldagem com máquina de solda operando na Amperagem de 70A, em um período de tempo de aproximadamente 3 minutos;
- Dimensionou-se o cabo da máquina de solda de acordo com tabela 4.1.

4.3. Ensaios experimentais

Foi realizado um total de cinco ensaios de vigas submetidas à flexão simples, onde foi ensaiada uma viga com emenda soldada considerada perfeita, servindo de parâmetro para análise do comportamento das demais vigas. A tabela 4.2 apresenta os tipos de vigas ensaiadas.

Tabela 4.2 – Características das vigas ensaiadas.

Perfil	Características	Variável	Defeitos na solda
V1	Emenda confeccionada no meio do vão da viga, na região de maior momento.	Solda bem executada	Sem defeito
V2		Amperagem alta	Porosidade, incrustação de escória, penetração excessiva e trincas.
V3		Amperagem baixa	Mordedura, penetração incompleta e fusão incompleta.
V4		Escoria de corte	Inclusão de escória.
V5		Eletrodo úmido	Mordedura, penetração incompleta, fusão incompleta e porosidade.

4.3.1. Esquema experimental

As vigas são bi-apoiadas, com comprimento total de 2000 mm, com distancia entre os apoios de 633,33 mm instalados no pórtico de reação. Foram aplicadas duas forças concentradas de mesmo valor em cada extremidade das vigas, posicionadas a 1900 mm uma da outra. A figura 4.8, mostra o sistema utilizado nos ensaios.

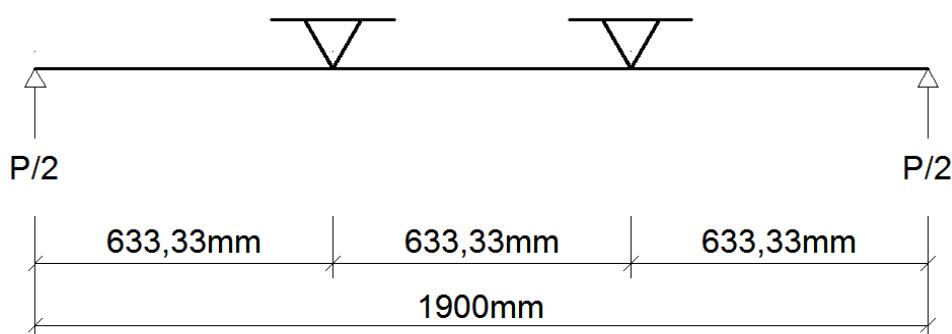


Figura 4.8 – Esquema da aplicação de carga.

A força aplicada em cada ponto de aplicação de carga tem valor igual à metade da força aplicada pela prensa hidráulica, o valor $P/2$ é obtido através de uma viga de transição apoiada sobre o perfil ensaiado, esquema mostrado na figura 4.9.

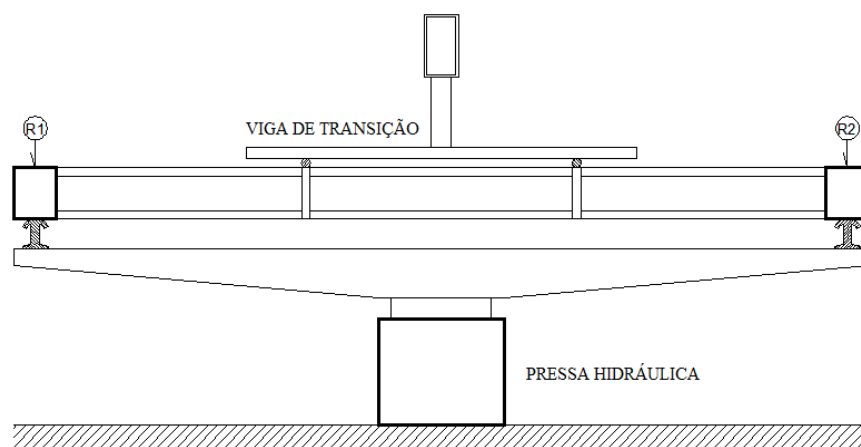


Figura 4.9 – Esquema viga submetida à flexão simples.



Figura 4.10 – Esquema experimental.

As vigas ensaiadas são confeccionadas com o perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm. As soldas utilizadas nas emendas foram executadas com eletrodos E6013 de diâmetro de 2,25 mm.

As vigas foram simplesmente apoiadas sobre trilhos posicionados nas extremidades da viga de reação do pórtico, os pontos de aplicação de carga superior foram instalados após o correto posicionamento das vigas sobre os apoios, numa distancia eqüidistante dos outros pontos de atuação de cargas (figura 4.11).



Figura 4.11 – Pontos de aplicação de carga superior.

Os deslocamentos verticais foram determinados através de deflectômetros posicionados sobre os trilhos de apoio (figura 4.9). O carregamento foi aplicado através de uma prensa hidráulica.

4.3.2. Instrumentação e sistema de aquisição de dados

A leitura dos dados referentes ao valor das forças aplicadas foi obtida por meio de um relógio medidor, analógico, marca DINATEST. Já as leituras dos deslocamentos verticais foram realizadas mediante o relógio digital do aparelho (deflectômetro) e anotadas em planilhas.

4.3.2.1 Prensa hidráulica

As forças foram aplicadas através de uma prensa hidráulica marca DINATEST (Capacidade máxima 300 kN) acionado manualmente (figura 4.12).



Figura 4.12 – Prensa hidráulica.

4.3.2.2 Leitura dos deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais nas extremidades das vigas foram medidos através de deflectômetros digitais marca MYTUTOYO (sensibilidade de 0,01mm), posicionados sobre os trilhos de apoio nos pontos de aplicação de carga, conforme mostra a figura 4.13.



Figura 4.13 – Posicionamento dos deflectômetros.

A nomenclatura dos deflectômetros será definida conforme mostra a figura 4.9, nomeados como R2 e R2.

4.3.3. Leitura das deformações específicas

As deformações ocorridas foram medidas através de extensômetros elétricos unidirecionais, marca Excel, modelo PA-06-250BA-120-L (figura 4.14), posicionados próximos a emenda soldada, instalados nas mesas superiores e inferiores das vigas.



Figura 4.14 – Extensômetro.

Os extensômetros foram instalados sobre uma superfície limpa e preparada da seguinte forma:

- a) Lixada com lixa d'água nº100 e limpa com algodão;
- b) Limpa com álcool isopropílico (figura 4.15 a);

- c) Limpa com condicionador (liquido volátil ácido), melhorando as condições de adesão do extensômetro (figura 4.15 b);
- d) Limpa com neutralizador (liquido básico), agindo em conjunto com o condicionador e neutralizando a acidez do mesmo (figura 4.15 c).



Figura 4.15 – Reagentes de preparação da superfície.

Os extensômetros foram fixados com adesivo epoxy, e para sua acomodação e distribuição uniforme da pressão aplicada sobre o extensômetro foi fixado sobre o mesmo fita isolante (figura 4.15).



Figura 4.16 – Proteção mecânica dos extensômetros.

4.3.4. Metodologia de execução dos ensaios das vigas

Para todos os perfis ensaiados a forma de aplicação de força foi igual, onde se realizou a leitura dos dados a cada 2 kN. A cada acréscimo de carga foi feita a leitura dos deslocamentos verticais ocorridos.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. Introdução

Os resultados apresentados nesse capítulo referem-se aos valores teóricos obtidos por meio de cálculos e valores observados nos resultados dos ensaios realizados nas vigas metálicas submetidas à flexão simples.

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

5.2. Ensaio dos perfis submetidos à flexão simples

Os resultados dos ensaios das vigas constituídas de perfil tipo C enrijecido apresentados nesse item se referem aos ensaios experimentais realizados com seção das vigas $h=150\text{mm}$, $B=60\text{mm}$, $d=20\text{mm}$, $e=2\text{mm}$, $e_y = 15,8\text{mm}$, $r = 2\text{mm}$, conforme figura 5.1.

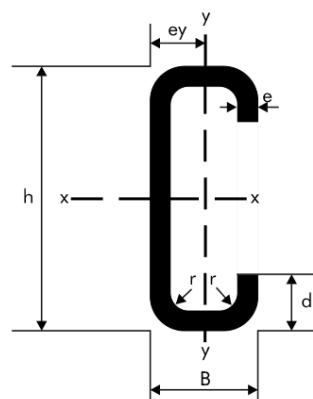


Figura 5.1 – Seção dos perfis ensaiados.

As vigas ensaiadas são formadas a frio, cujos valores de suas propriedades geométricas são tabelados (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Propriedades geométricas do perfil. Adaptado da GERDAU.

Dimensões				S	P	Jx	Wx	ix	ey	Jy	Wy	iy
h (mm)	B (mm)	D (mm)	e = r (mm)	cm ²	(Kg/m)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)
150	60	20	2,00	5,61	4,40	195,38	26,05	5,90	1,92	28,36	6,95	2,25

Nos ensaios realizados foram determinados os valores correspondentes à força última obtida, o modo de falha ocorrido, os deslocamentos, deformações ocorridas e o comportamento geral da viga ensaiada, neste item esses fenômenos estão apresentados na seguinte ordem: modos e cargas de ruptura e deslocamentos verticais.

5.2.1. Modos e cargas de ruptura

A força última (P_{último}) é aquela força 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 cargas.

Na tabela 5.2 encontram-se os valores teóricos calculados com a utilização do software mCalc Perfis e os resultados observados através dos ensaios referentes à força última (P_{último}) e ao momento último (M_{último}) e o modo de falha observado para cada viga.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos por software e nos ensaios a flexão.

Viga	Teórico		Ensaiado		
	M para o estado limite FLT (kN.m)	M para o início do escoamento (kN.m)	M _{último} (kN.m)	P _{último} (kN)	Modo de falha
1	6,5	7,4	5,4	17	FLT* e FLM**
2	6,5	7,4	5,0	16	FLT* e FLM**
3	6,5	7,4	5,0	16	FLT* e FLM**
4	6,5	7,4	5,0	16	FLT* e FLM**
5	6,5	7,4	5,4	17	FLT* e FLM**

*Flambagem lateral por torção.

**Flambagem local da mesa superior

5.2.2. Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais foram medidos através de defletores posicionados nas faces de aplicação de carga. A nomenclatura dos defletores foi definida como R1 e R2 posicionados nos apoios.

Os gráficos a seguir mostram para cada viga estudada os deslocamentos verticais ocorridos, respectivamente; a carga aplicada para cada deslocamento medido; bem como a reta representativa da linha elástica para a situação de carregamento adotado.

- Viga 01 (Solda bem executada)



Figura 5.2 – Viga 01 com solda bem executada.

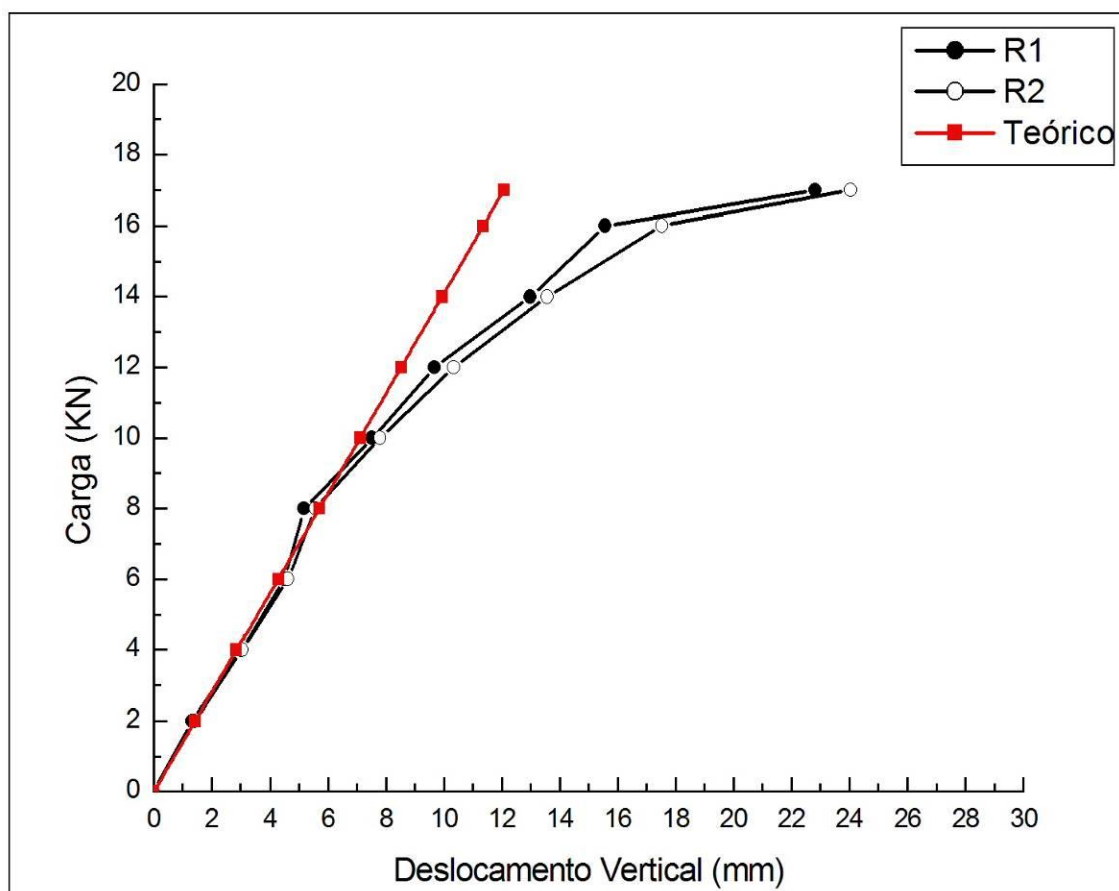


Figura 5.3 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 01.

- Viga 02 (Amperagem alta)



Figura 5.4 – Viga 02 com solda executada com amperagem alta.

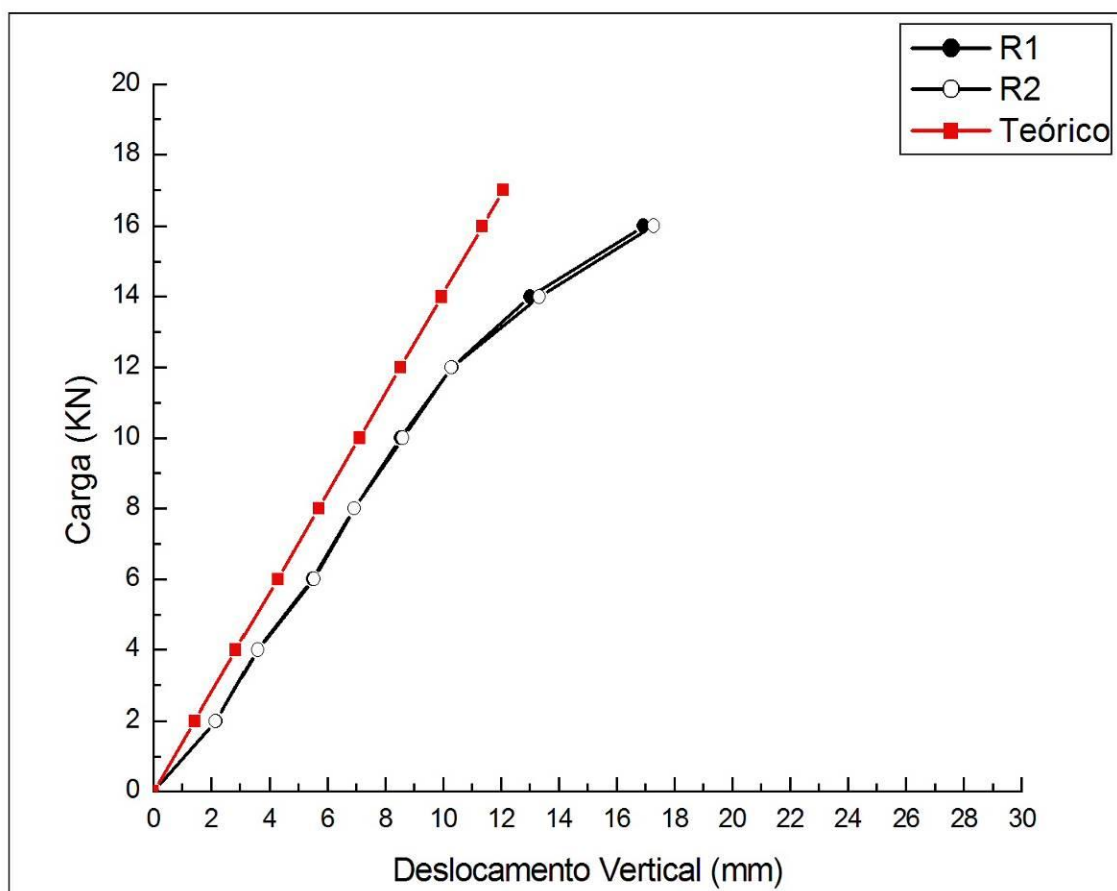


Figura 5.5 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 02.

- Viga 03 (Amperagem baixa)



Figura 5.6 – Viga 03 com solda executada com amperagem baixa.

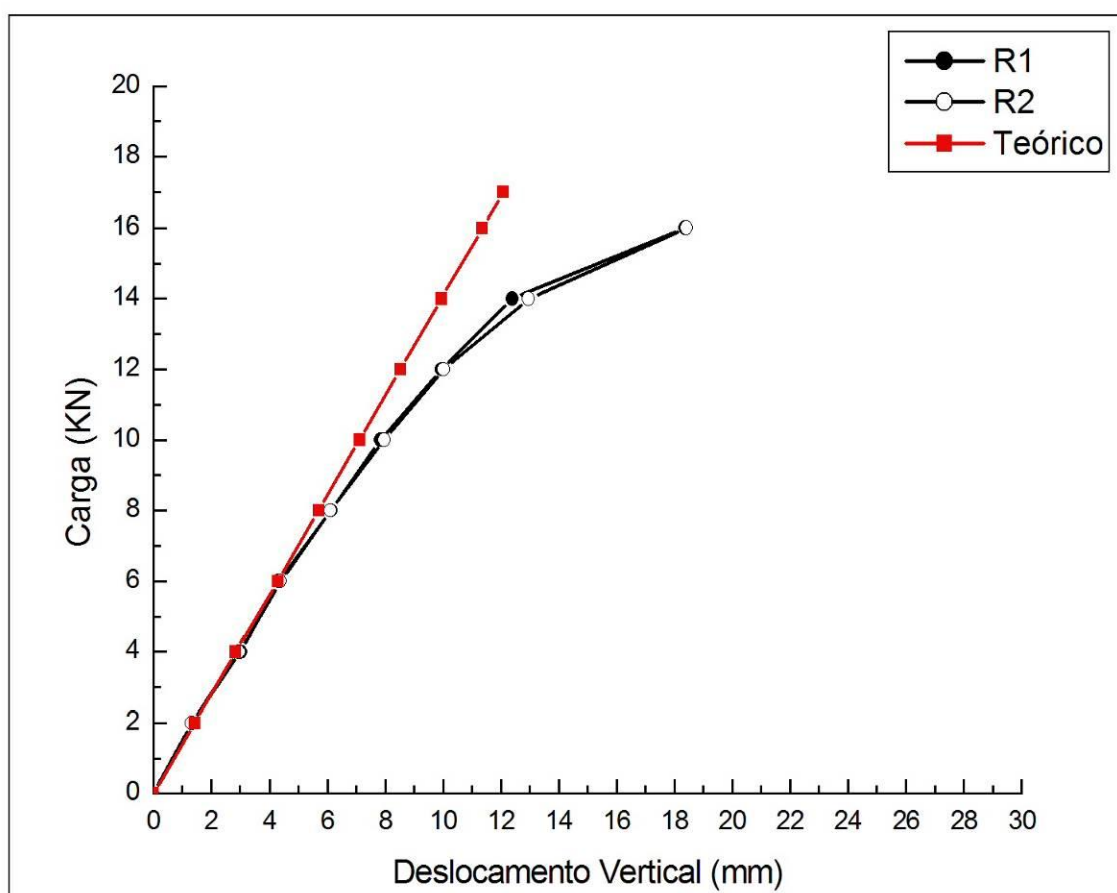


Figura 5.7 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 03.

- Viga 04 (Escória de corte)



Figura 5.8 – Viga 04 com solda com inclusão de escória.

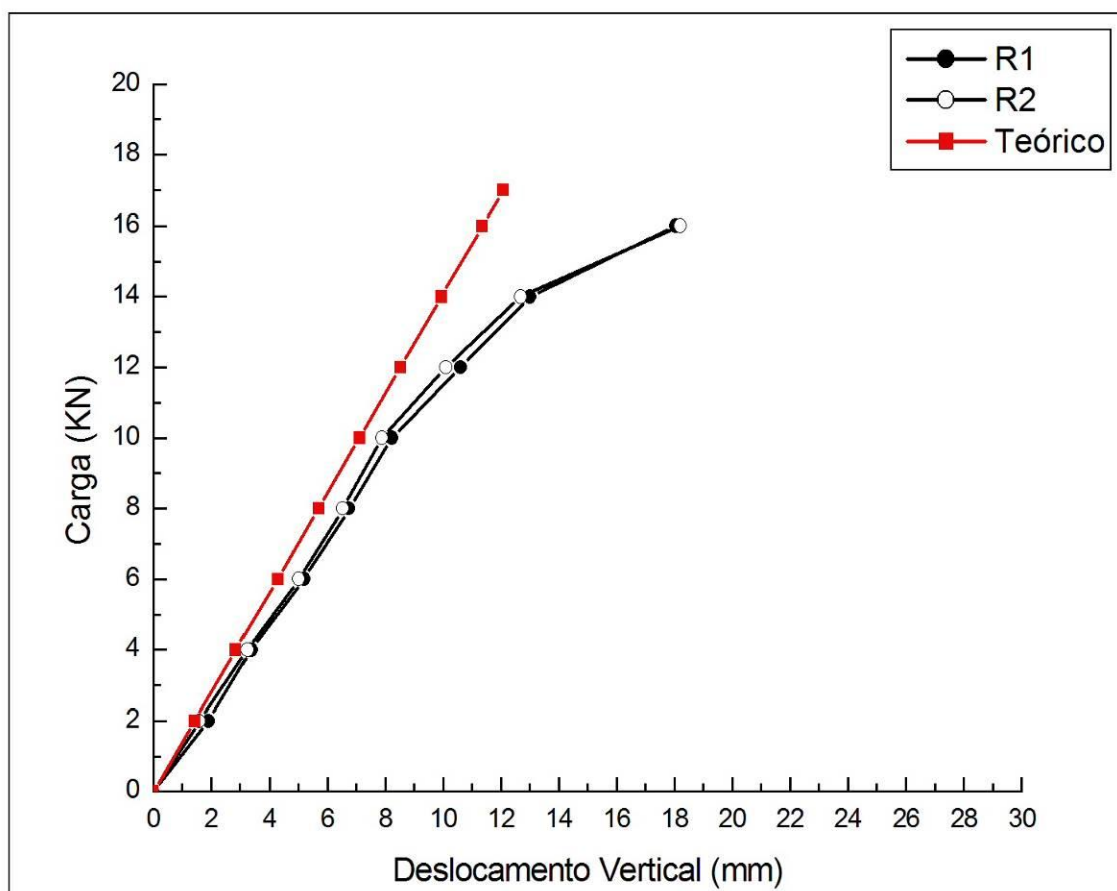


Figura 5.9 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 04.

- Viga 05 (Eletrodo úmido)



Figura 5.10 – Viga 05 com solda executada com eletrodo úmido.

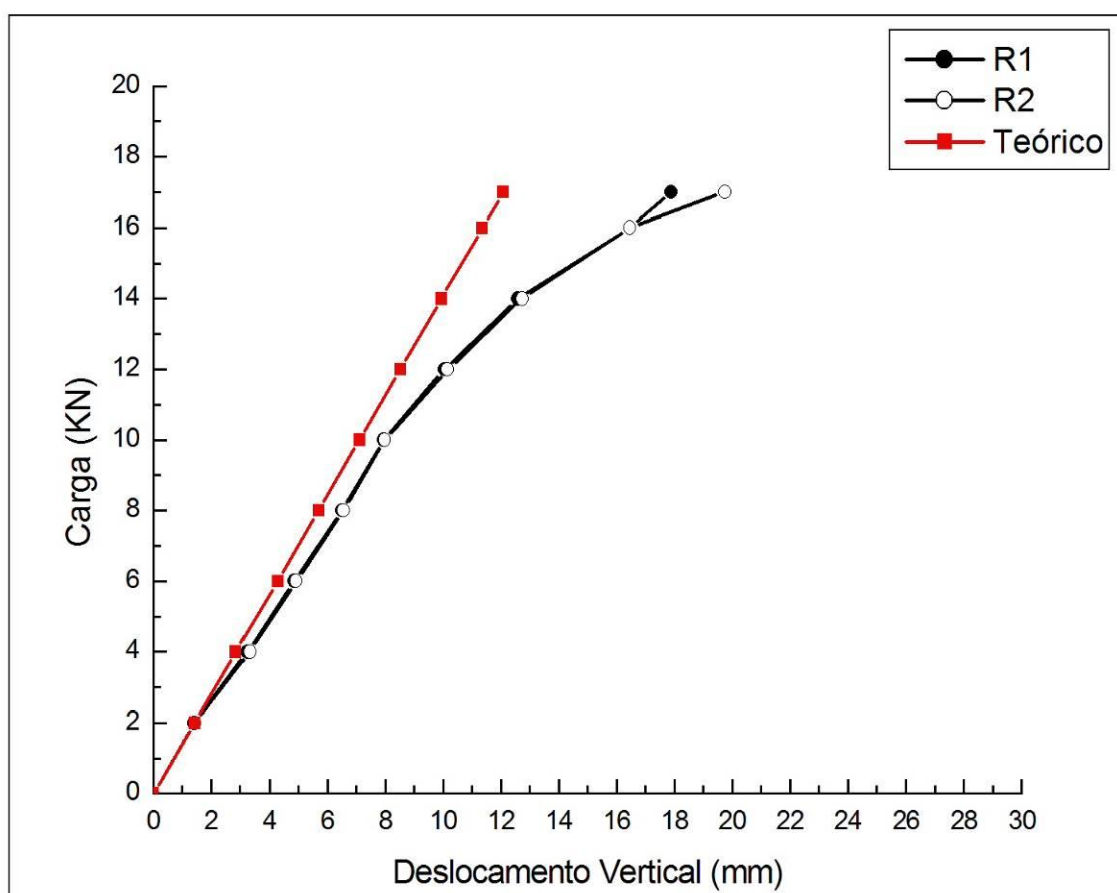


Figura 5.11 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 05.

Nesse presente trabalho não são considerados os valores de deslocamentos admissíveis estabelecidos pela NBR 14762/2001, pois se trata de uma situação simulada em laboratório sem a utilização de coeficientes de segurança. Ver figura 5.11.



Figura 5.12 – Foto de todas as vigas, ilustrando o modo de falha.

A Tabela 5.3 mostra os resultados das medições dos deslocamentos verticais máximo para cada viga ensaiada, obtida pela leitura dos gráficos (carga aplicada x

deslocamento) das vigas. Nessa tabela a flecha máxima das vigas refere-se a media dos valores dos deslocamentos para a carga última aplicada (P_{último}) correspondente a cada viga.

Tabela 5.3 – Resultados dos deslocamentos verticais obtidos nos ensaios a flexão

Viga	Dimensões	P_{último} (KN)	f(máx) (mm)
1	Viga com 2 m de comprimento e secção de perfil tipo C enrijecido 150x60x20 # 2,00 mm	17	23,44
2		16	17,11
3		16	18,39
4		16	18,13
5		17	18,83

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Introdução

Os resultados dos ensaios realizados nesse trabalho são apresentados no capítulo anterior e agora são analisados.

6.2. Ensaios dos perfis submetidos à flexão simples

Os resultados dos ensaios das vigas metálicas constituídas com perfis formados a frio submetidas à flexão simples apresentados no capítulo anterior referem-se aos ensaios do programa de ensaios experimentais.

6.2.1. Ensaios experimentais

6.2.2. Modos e cargas de ruptura

Todas as vigas romperam por flambagem lateral por torção (figura 6.1), de acordo com a tabela 5.2. Conforme os resultados apresentados na mesma tabela, todas as vigas ensaiadas no instante do colapso apresentaram valores muito aproximados entre elas, não só para força última ($P_{último}$), como também para momento último ($M_{último}$).

Portanto podemos concluir que a emenda soldada com patologias específica, não ocasionou mudança significativa na resistência das vigas, constituídas por perfis formados a frio de seção aberta.



Figura 6.1 – Flambagem lateral por torção.

6.2.3. Deslocamentos verticais

Os resultados dos deslocamentos verticais ocorridos nas vigas foram medidos por deflectômetros posicionados nos pontos de aplicação de carga, através do gráfico carga aplicada x deslocamento vertical - todas as vigas (figura 6.2), podemos verificar que todas as vigas tiveram deslocamentos verticais bem aproximados (tabela 6.1), indicando que não houve influencia significativa dos diversos tipos de patologias nas emendas soldadas.

Tabela 6.1 – Comparação dos valores médios das deformações máximas, nas cargas finais das vigas ensaiadas.

Viga	P (KN)	f (mm)	P (KN)	f (mm)	P (KN)	f (mm)	P (KN)	f (mm)
1	12	10,01	14	13,28	16	16,55	17	23,44
2	12	10,30	14	13,17	16	17,11	-	-
3	12	9,99	14	12,68	16	18,39	-	-
4	12	10,35	14	12,85	16	18,13	-	-
5	12	10,10	14	12,66	16	16,46	17	18,83

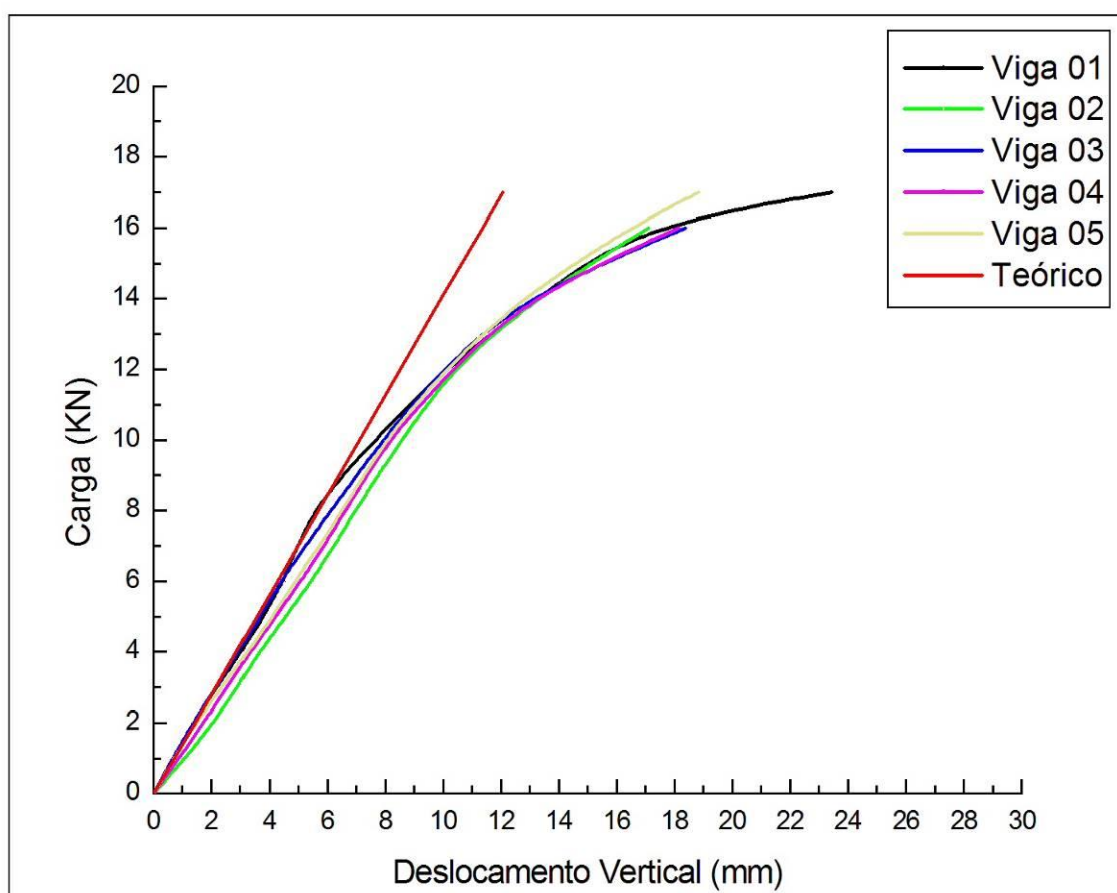


Figura 6.2 – Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – todas as vigas.

6.2.4. Deformações específicas

Para todas as vigas ensaiadas o nível de deformação específica ficou abaixo da deformação de escoamento (ϵ_y), o aço que constitui as vigas não sofreram dos efeitos do escoamento.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Conclusão

O presente trabalho estuda o comportamento de vigas, constituídas por perfis formado a frio com emendas soldadas com eletrodo revestido sujeitas a diferentes tipos de patologias, Foram realizados ensaios com vigas constituídas de perfil tipo C enrijecido 150x60x20#2mm. A quantidade de vigas estudadas foram cinco, uma viga com emenda soldada bem executada e outras quatro com emenda apresentando patologias distintas.

Todas as vigas estudadas romperam-se por flambagem lateral por torção e por flambagem local da mesa superior, todas as vigas apresentaram valores aproximados de força última de ruptura e flecha máxima.

Para as vigas ensaiadas foram determinados valores teóricos referentes aos deslocamentos verticais, carga e momento último de ruptura, através da utilização de softwares específicos.

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_{último}), inferiores à tensão correspondentes ao limite de escoamento (f_y).

2 - Para vigas com condição de contorno bi apoiada, com seção tipo C enrijecido 150x60x20 #2mm de seção aberta não é possível analisar a influencias de falhas de soldagem em suas emendas, utilizando o esquema experimental abordado neste trabalho, pois as vigas não atingiram suas cargas ultimas de ruptura, devido a ocorrência de flambagem lateral por torção e flambagem local da mesa superior, logo o modo de ruptura da viga não é pela sua força última de ruptura, mas sim por flambagem.

3 - Para vigas com condição de contorno bi apoiada, constituídas de perfis formados a frio com seção aberta, as patologias nas emendas soldadas tem importância menos significante na resistência e estabilidade da viga, comparado com outros modos de falha, pois a mesma entra em colapso antes que se atingir a força última de ruptura devido à flambagem.

4 – As patologias soldadas não desempenharam papel fundamental no modo de falha das vigas ensaiadas, devido às mesmas serem constituídas de perfil formado a frio, que são perfis mais suscetíveis a falha por instabilidade sob carregamentos menores àqueles que correspondem a plastificação parcial ou total de sua seção, tal fator é gerado pela elevada relação largura/espessura dos elementos planos que constituem o perfil, mesmo com a utilização de enrijecedores não foi possível conter os efeitos desse fenômeno.

7.2. Sugestões

Essa pesquisa foi realizada na área de estruturas metálicas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. É o primeiro estudo realizado no IFTO que enfoca a influência de falhas em emendas soldadas em perfis formado a frio, sendo assim, segue-se algumas sugestões para futuros trabalhos a serem realizados na mesma linha de pesquisa:

- a) Realizar os mesmos ensaios alterando somente as condições de contorno da viga, impedindo que ocorra flambagem lateral por torção e aumentando o enrijecimento nos pontos de aplicação de carga, evitando a ocorrência de flambagem local da mesa superior, forçando que a ruptura da viga ocorra na ligação soldada.
- b) Realizar o mesmo estudo com a sugestão anterior, com perfis de seção maiores e/ou menores, analisando a influência desta variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Ariovaldo Fernandes de. **Análise experimental de vigas constituídas de perfis formados a frio com emendas soldadas submetidas à flexão simples**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009).
- BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios Industriais em Aço**. 3. Ed. 489 f. PINI, São Paulo, 2000.
- **Catálogo de Produtos**. 71 f. Comercial GERDAU.
- CASTRO, Eduardo Mariano Cavalcante de. **Patologia dos edifícios em estrutura metálica**. 1999. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999).
- FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. **Eletrodos Revestidos OK**. 2005. 64 f. ESAB Welding and Cutting Products, 2005.
- JAVARONI, Carlos Eduardo. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: Análise Teórico-Experimental** 1999. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- SILVA, Edson Lubas; SILVA, Valdir Pignatta e. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355**. 2008. 119 f. IBS/CBCA, Rio de Janeiro, 2008.
- SILVA, Thiago Dias de Araújo e. **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.
- VIEIRA, G. S. **Análise experimental de vigas de seção “I” compostas de perfis formados a frio com emendas soldadas submetidas à flexão simples**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

Apêndice A – Tabelas e Gráficos dos Resultados Experimentais

VIGA 01	Data do ensaio: 05 de março de 2012			
	Deflexões			
Força (kN)	R01 (mm)	R02 (mm)	Deformação média (mm)	Teórico
				R01 e R02 (mm)
2	1,32	1,42	1,37	1,43
4	3,02	3,04	3,03	2,85
6	4,48	4,61	4,55	4,27
8	5,17	5,56	5,37	5,69
10	7,52	7,79	7,66	7,10
12	9,67	10,34	10,01	8,52
14	12,99	13,56	13,28	9,94
16	15,57	17,53	16,55	11,36
17	22,82	24,06	23,44	12,07
Ruptura				

VIGA 02	Data do ensaio: 05 de março de 2012			
	Deflexões			
Força (kN)	R01 (mm)	R02 (mm)	Deformação média (mm)	Teórico
				R01 e R02 (mm)
2	2,17	2,16	2,17	1,43
4	3,58	3,60	3,59	2,85
6	5,49	5,53	5,51	4,27
8	6,92	6,93	6,93	5,69
10	8,52	8,60	8,56	7,10
12	10,31	10,28	10,30	8,52
14	13,01	13,32	13,17	9,94
16	16,93	17,29	17,11	11,36
Ruptura				

VIGA 03	Data do ensaio: 05 de março de 2012			
	Deflexões			
Força (kN)	R01 (mm)	R02 (mm)	Deformação média (mm)	Teórico
				R01 e R02 (mm)
2	1,34	1,32	1,33	1,43
4	3,00	2,96	2,98	2,85
6	4,32	4,37	4,35	4,27
8	6,12	6,11	6,12	5,69
10	7,82	7,96	7,89	7,10
12	9,95	10,03	9,99	8,52
14	12,39	12,96	12,68	9,94
16	18,36	18,42	18,39	11,36
Ruptura				

VIGA 04	Data do ensaio: 05 de março de 2012			
	Deflexões			
Força (kN)	R01 (mm)	R02 (mm)	Deformação média (mm)	Teórico
				R01 e R02 (mm)
2	1,90	1,60	1,75	1,43
4	3,37	3,25	3,31	2,85
6	5,18	5,01	5,10	4,27
8	6,75	6,53	6,64	5,69
10	8,23	7,88	8,06	7,10
12	10,61	10,09	10,35	8,52
14	13,00	12,69	12,85	9,94
16	18,05	18,20	18,13	11,36
Ruptura				

VIGA 05	Data do ensaio: 05 de março de 2012			
	Deflexões			
Força (kN)	R01 (mm)	R02 (mm)	Deformação média (mm)	Teórico R01 e R02 (mm)
2	1,41	1,44	1,43	1,43
4	3,24	3,31	3,28	2,85
6	4,85	4,91	4,88	4,27
8	6,50	6,56	6,53	5,69
10	7,94	7,98	7,96	7,10
12	10,04	10,16	10,10	8,52
14	12,59	12,73	12,66	9,94
16	16,46	16,46	16,46	11,36
17	17,90	19,75	18,83	12,07
Ruptura				

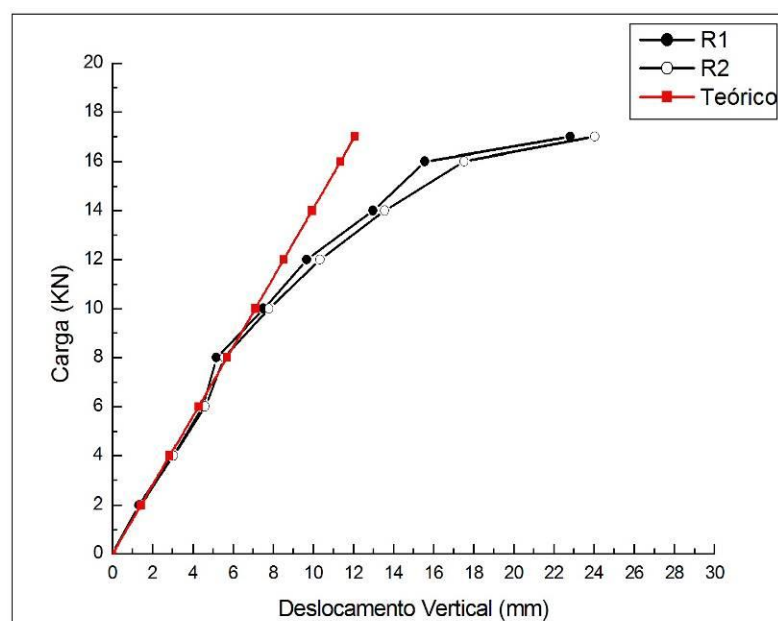


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 01.

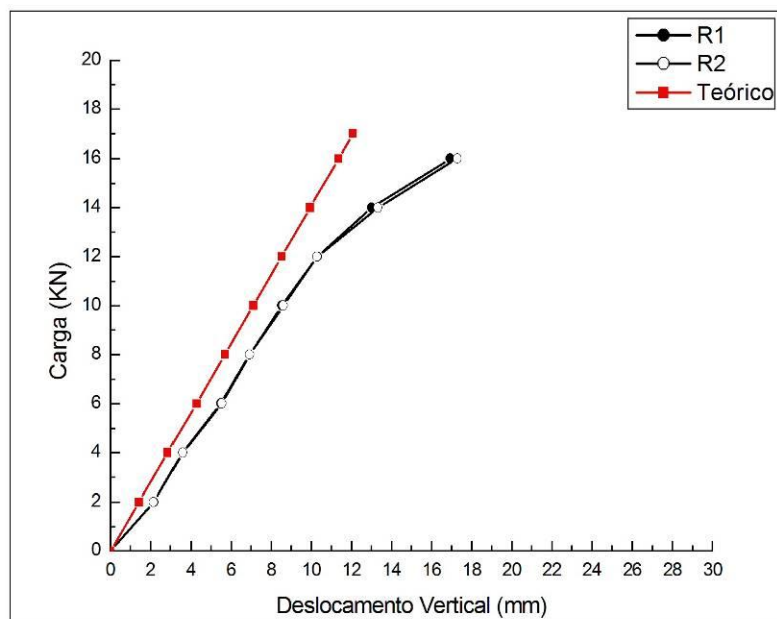


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 02.

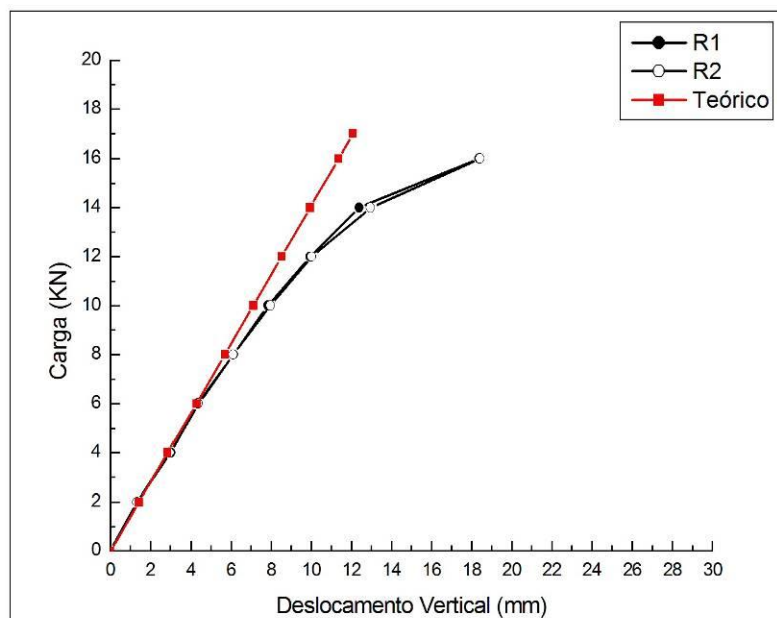


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 03.

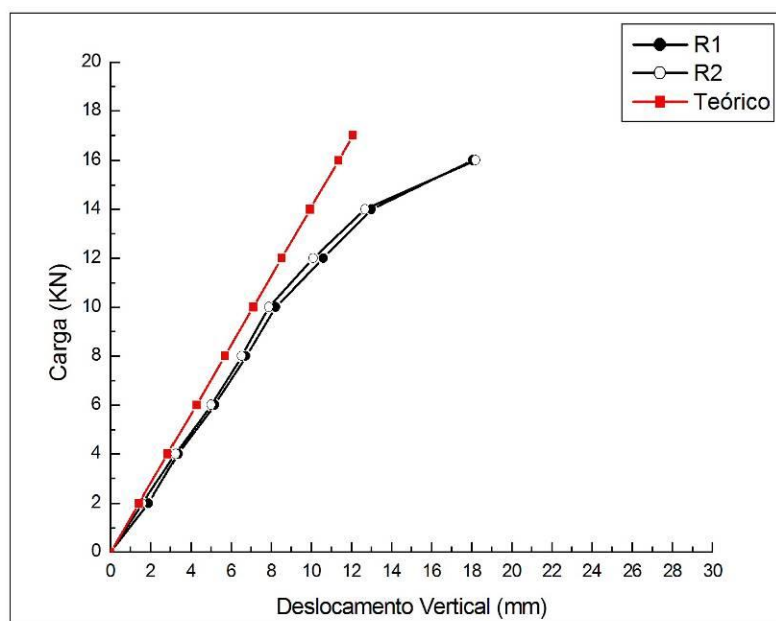


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 04.

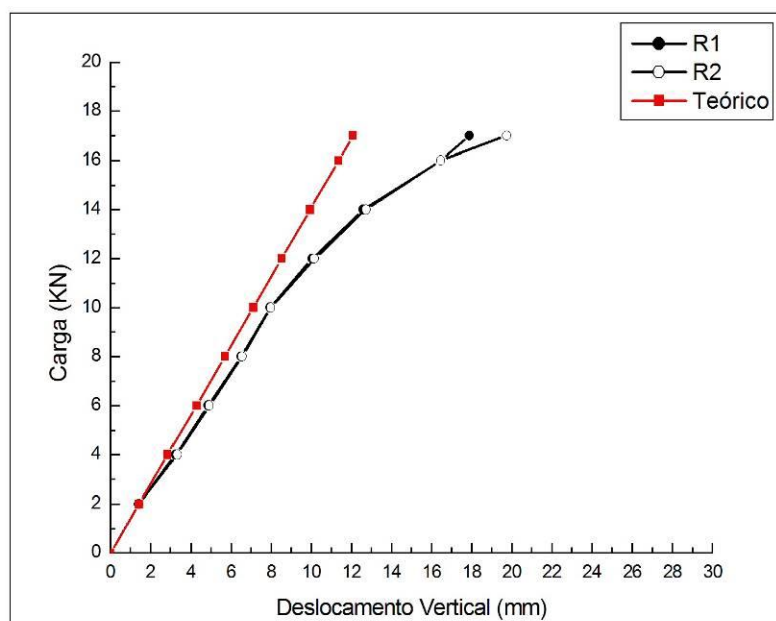


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – viga 05.

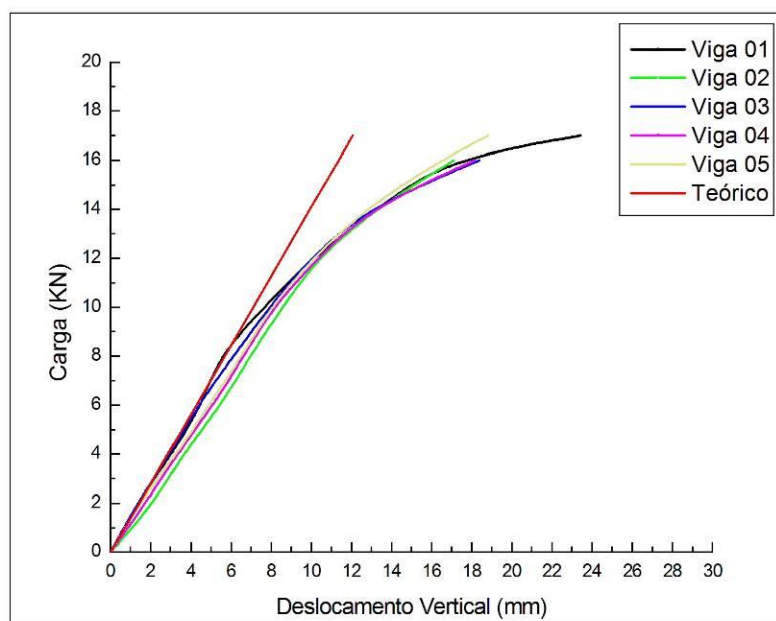


Gráfico carga aplicada x deslocamento vertical – todas as vigas.