

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS DEFORMAÇÕES
RESIDUAIS EM PAINÉIS ESTRUTURAIS FORMADOS DE
CHAPAS FINAS DE AÇO

EDISON GONÇALVES

ORIENTADOR:

PROF. DR. CÉLIO TANIGUCHI

TESE DE MESTRADO APRESENTADA À
ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

50

AGOSTO

1976

FD-421
e.3

ERRATA

TRABALHO: - ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS DEFORMAÇÕES RESIDUAIS EM PAINÉIS ESTRUTURAIS FORMADOS DE CHAPAS FINAS DE AÇO.

Pag. 2 - 29a.linha - A palavra ocasionais deve ser li da ocasionadas.

Pag. 8 e 9 - Figura 2.2 - O nome referente à curva "C" , Masubuchi deve ser lido Hirai e Nakamura.

Pag. 45 - 1 a. linha - A expressão $\emptyset = \frac{\delta}{4b}$ deve ser lida $\emptyset = \frac{4\delta}{b}$.

*Aos meus pais,
Armando e Conceição.*

À minha noiva, Nanci.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Célso Taniguchi, nosso agradecimento pela orientação e estímulo recebidos durante todo o curso de mestrado, possibilitando a concretização deste objetivo.

À Marinha do Brasil e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que, pelo seu apoio, tornaram possível este trabalho.

À Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, por facultar o uso de seu laboratório de soldagem.

Aos assistentes-alunos Mario Antonio Borin e José Kauffmann Neto, nosso reconhecimento pela significativa ajuda prestada.

RESUMO

O presente trabalho aborda uma análise das deformações residuais que ocorrem em painéis estruturais soldados compostos de chapas de aço com espessura de até 10 mm.

Baseando-se em resultados experimentais, obtidos através da realização sistemática de ensaios de soldagem em corpos de prova, o autor utiliza-se da análise dimensional para tentar encontrar o melhor correlacionamento entre as variáveis envolvidas no processo. Em seguida, utilizando-se dos recursos da análise de regressão, tenta-se obter algoritmos que facilitem a tarefa de prever as deformações nos referidos painéis.

ABSTRACT

This study deals with an analysis of residual distortion on welded structural panels with plate thickness up to 10 mm. From a systematic set of experiments conducted for welded test panels, tentative correlations were done in order to relate the major variables involved in the welding process by means of dimensional analysis. Furthermore, by utilizing regression analysis, appropriate equations were developed so that they could be used in the prediction of the residual distortion of the above mentioned panels.

ÍNDICE GERAL

	<u>Pág.</u>
AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO - ABSTRACT	ii
ÍNDICE GERAL	iii
ÍNDICE DAS FIGURAS	v
ÍNDICE DAS TABELAS	vii
NOMENCLATURA	viii
DEFINIÇÕES	x
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - Explicações Gerais.....	1
1.2 - Objetivos do Estudo.....	2
CAPÍTULO II - ESTUDO COMPARATIVO PRELIMINAR ENTRE - OS DIVERSOS MÉTODOS EXISTENTES	
2.1 - Juntas Livres	6
2.2 - Juntas Restritas	7
2.3 - Conclusões	11
CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS EXPERI- MENTAIS	
3.1 - Objetivo dos Ensaios.....	15
3.2 - Planejamento Inicial das Expe- riências	15
3.2.1- Variáveis Significativas nos Ensaios Experimen- tais.....	16
3.2.2- Materiais Empregados....	17
3.2.3- Corpos de Prova para os Ensaios.....	17
3.2.4- Banco de Provas.....	19
3.2.5- Equipamento Utilizado...	19
3.2.6- Tipo e Número de Experi- ências.....	19

3.2.7- Escolha das Condições de Soldagem.....	21
3.2.8- Sequência de Soldagem.....	23
3.2.9- Procedimento na Execução dos Ensaios.....	24
3.3 - Apresentação dos Resultados Experimentais.....	25
CAPÍTULO IV - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
4.1 - Observações Iniciais.....	35
4.1.1- Quanto ao Tipo de Passe.....	35
4.1.2- Quanto ao Diâmetro do Eletrodo.....	35
4.1.3- Quanto à Sequência de Soldagem Longitudinal.....	39
4.1.4- Quanto à Sequência de Soldagem Transversal.....	39
4.1.5- Quanto à Espessura da Chapa Base.....	42
4.2 - Análise Baseada nos Métodos Existentes.....	42
4.3 - Método Proposto.....	50
4.3.1- Análise Dimensional.....	50
4.3.2- Cálculo dos Momentos Inerentes.....	54
4.3.3- Elaboração de Algoritmos e Gráficos.....	58
4.3.4- Comparação entre δ_{cal} e δ_{exp}	65
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
5.1 - Conclusões Finais.....	67
5.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
APÊNDICE A:	
Método de Masubuchi.....	74

ÍNDICE DAS FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1.1 - Painel Estrutural com Reforços Longitudinais e Transversais.....	3
FIGURA 1.2 - Sequência Geral do Estudo.....	5
FIGURA 2.1 - Junta Livre (Perfil "T").....	7
FIGURA 2.2 - Deformações Angulares em Juntas Livres - Estudo Comparativo.....	8
FIGURA 2.3 - Junta Restrita.....	11
FIGURA 2.4 - Deformações Transversais em Juntas Restritas ($a/b > 3$)-Estudo Comparativo.....	12
FIGURA 3.1 - Representação Esquemática do Corpo de Prova para Juntas Livres.....	18
FIGURA 3.2 - Representação Esquemática do Corpo de Prova Utilizado no Ensaio para a Determinação das Deformações Residuais em Painéis Estruturais Soldados (Juntas Restritas).....	18
FIGURA 3.3 - Representação Esquemática do Banco de Provas.....	20
FIGURA 3.4 - Sequências de Soldagem Longitudinal Utilizadas nos Ensaios.....	23
FIGURA 3.5 - Sequências de Soldagem Transversal Utilizadas nos Ensaios.....	24
FIGURA 3.6 - Representação Esquemática de uma Junta Livre Deformada - Indicação - das Variáveis Envolvidas.....	34
FIGURA 4.1 - Influência do Tipo de Passe nos Níveis de Deformação.....	36
FIGURA 4.2 - Influência do Diâmetro de Eletrodo nos Níveis de Deformação.....	37

FIGURA 4.3	- Influência da Sequência de Soldagem Longitudinal nos Níveis de Deformação.....	40
FIGURA 4.4	- Influência da Sequência de Soldagem Transversal nos Níveis de Deformação.....	41
FIGURA 4.5	- Deformação Angular para as Juntas - Livres - Resultados Experimentais...	43
FIGURA 4.6	- Deformação Angular para as Juntas - Restritas - Resultados Experimentais	43
FIGURA 4.7	- Deformação Angular em Juntas Livres Gráficos Comparativos entre os Resultados Experimentais e os propostos por OKERBLOM e MASUBUCHI.....	46
FIGURA 4.8	- Representação Esquemática dos Momentos Inerentes Distribuídos ao Longo da Junta Soldada do Corpo de Prova..	54
FIGURA 4.9	- Representação Esquemática do Chapeamento entre dois Reforços - Sistema de Coordenadas Adotado.....	56
FIGURA 4.10	- Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\omega dv/VI$ sobre os Momentos Inerentes Distribuídos ao Longo dos Reforços.....	59
FIGURA 4.11	- Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\omega dv/VI$ sobre as Deformações Angulares para as Juntas Livres....	63

ÍNDICE DAS TABELAS

	<u>Pág.</u>
TABELA 3.1 - Variáveis Principais na Condução dos Ensaios Experimentais.....	16
TABELA 3.2 - Tipo e Número de Ensaios Realizados.	21
TABELA 3.3 - Condições de Soldagem Utilizadas nos Ensaios Experimentais.....	22
TABELA 3.4 - Resultados Experimentais para as Juntas Livres.....	27
TABELA 3.5 - Resultados Experimentais para as Juntas Restritas ($a/b > 3$).....	30
TABELA 3.6 - Taxas de Deposição do Eletrodo AWS E6013.....	34
TABELA 4.1 - Diâmetros de Eletrodo e Correntes de Soldagem Seleccionadas por Espessura da Chapa Base.....	38
TABELA 4.2 - Coeficiente C.....	49
TABELA 4.3 - Comparação entre os Valores Experimentais e Calculados de Deformação Transversal.....	66

NOMENCLATURA

θ_0	Deformação Angular em Juntas Livres (rad)
h	Espessura da Chapa Base (mm)
w	Peso de Eletrodo Consumido por Unidade de Comprimento de Solda (g/cm)
θ	Deformação Angular em Juntas Restritas (rad)
F_R	Fator de Restrição
a	Comprimento do Painel (mm)
b	Distância (vão) entre Reforços (mm)
$O-x,y,z$..	Sistema de Coordenadas adotado
δ	Deformação Transversal Média (mm)
CE_t	Sequência de Soldagem Transversal Centro-Extremidade
EE_t	Sequência de Soldagem Transversal Extremidade-Extremidade
CE_l	Sequência de Soldagem Longitudinal Centro-Extremidade
EE_l	Sequência de Soldagem Longitudinal Extremidade-Extremidade
h_s	Espessura da Chapa do Reforço (mm)
d	Diâmetro do Eletrodo (mm)
n_p	Número de Passes
I	Corrente de Soldagem (A)
V	Voltagem de Soldagem (V)
v	Velocidade de Avanço do Arco Elétrico (mm/s)
δ_e, δ_d ..	Deformações Transversais Medidas nos Corpos de Prova das Juntas Livres
s	Distância entre o Reforço e os Pontos de Leitura das deflexões (δ_e e δ_d) (mm)
N_e	Número de Eletrodos Efetivamente Consumidos nos Dois Lados do Reforço
P_e	Peso do Eletrodo (g)

L	Comprimento dos Corpos de Prova (cm)
p	Altura (ou perna) do Filete (mm)
γ	Peso Específico do Metal de Solda (g/cm^3)
η	Taxa de Deposição do Eletrodo
$\delta_1, \dots, \delta_6$...	Deformações Transversais Medidas nos Corpos de Prova das Juntas Restritas (mm)
D	$= \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$
C	Coeficiente Determinado pelas Condições de Soldagem e pelas características Geométricas da Estrutura (kg.mm/mm)
E	Módulo de Elasticidade (kg/mm)
ν	Coeficiente de Poisson
M	Momento Fletor Uniformemente Distribuído ao Longo dos Reforços do Painel
δ_{cal}	Deformação Transversal Calculada pelo Algoritmo Proposto (mm)
δ_{exp}	$= \delta$

Nomenclatura do Apêndice A

ϵ_x, ϵ_y ...	Componentes das Deformações Relativas
σ_x, σ_y ...	Componentes das Tensões Normais
θ_{max}	$= \theta$ (variável auxiliar de integração)
M_0	$= M$ (variável auxiliar de integração)
E_w	Energia Necessária para Diminuir a Deformação Angular de θ_0 para θ
E_b	Energia de Deformação Devido ao Momento Fletor (M)
E_t	Energia Total Armazenada em um tramo do painel.

DEFINIÇÕES

Para melhor compreensão do texto as seguintes definições se fazem necessárias:

- Cordão de Solda** - Material depositado em um ou mais passes de eletrodo.
- Filete.....** - O mesmo que cordão de solda.
- Junta Livre.....** - Estrutura constituída apenas de uma flange e uma alma.
- Junta Fixa.....** - O mesmo que Junta Restrita.
- Junta Restrita.** - Estrutura constituída pela chapa base e por vários reforços, recebendo esta denominação devido ao efeito restritivo, que os demais - reforços e a própria base exercem sobre as deformações originadas da soldagem de um determinado reforço.
- Passe.....** - Progressão genérica do eletrodo ao longo do eixo da solda, com depósito de material.
- Tecimento.....** - Tipo de passe caracterizado por pequenos e - contínuos movimentos perpendiculares ao eixo da solda.
- Sequência de Soldagem Longitudinal** - Sequência em que os trechos de passe são executados (fica subentendido - que a execução do passe seja em apenas um lado de um único reforço).
- Sequência de Soldagem Transversal** - Sequência em que os passes - são executados considerando os diversos reforços.

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

1.1 - Explicações Gerais

As vantagens decorrentes da utilização da soldagem como processo de união entre elementos estruturais metálicos, já são sobejamente conhecidas. No entanto, apesar das inúmeras vantagens e dos constantes aprimoramentos que os processos de soldagem vêm sofrendo com o decorrer do tempo, ainda hoje a moderna tecnologia não conseguiu eliminar problemas como os das tensões e deformações que permanecem na estrutura após a soldagem.

Este problema adquire uma maior importância dentro da construção naval, uma vez que a sua ocorrência além de prejudicar a estética e aumentar a resistência hidrodinâmica, pode em combinação com os elevados níveis de esforços que agem sobre a estrutura, tornar crítico o problema da resistência e estabilidade estrutural. As implicações econômicas também são mais críticas, uma vez que há um estreito interrelacionamento entre as resistências estrutural e hidrodinâmica com fatores econômicos, tais como peso de aço, consumo de óleo combustível, velocidade e capacidade de carga da embarcação.

A análise do problema das tensões e deformações residuais em estruturas soldadas, tem estado praticamente restrita ao campo das deformações, talvez pelo fato destas se apresentarem de uma forma visível e portanto facilmente mensuráveis. Existem basicamente três maneiras de se abordar o problema na tentativa de resolvê-lo. A primeira dessas maneiras, é procurar minimizar as deformações pela escolha de processos de soldagem e procedimentos de fabricação. A segunda, é através da fixação

de padrões racionais para os limites permissíveis de deformações. Finalmente, a terceira, baseia-se na utilização de técnicas apropriadas para a remoção das deformações.

Dentro dos recursos que se dispõe atualmente, não se consegue eliminar as deformações que ocorrem na estrutura; - dessa forma, procura-se mantê-las dentro de certos limites fixados por diversas normas, como é o caso da "NAVSHIPS 0900-000-1000. Fabrication, Welding and Inspection of Ship Hulls", publicada pela Marinha Americana em 1966. No entanto, em muitos casos esses limites são ultrapassados e uma vez ocorridas as deformações, estas são de difícil remoção, podendo inclusive ocasionar a perda da estrutura. Portanto, o mais racional seria efetuar-se uma previsão das deformações, através de métodos analíticos ou empíricos, e comparar os valores obtidos com os máximos permissíveis; caso estes sejam ultrapassados, procurar por meio da escolha de processos de soldagem, técnicas de fabricação ou mesmo pela alteração do projeto da estrutura, uma forma de reduzir as deformações.

1.2 - Objetivos do Estudo

Fundamentalmente, este trabalho consistirá em desenvolver métodos para a previsão de deformações em estruturas soldadas, uma vez que ficou patente nas explanações gerais apresentadas no item anterior, ser esta a melhor forma de se abordar o problema das deformações. No entanto, a resolução desse problema de forma global é praticamente impossível, tendo em vista principalmente, a grande quantidade de variáveis envolvidas e a amplitude dos seus campos de variação. Desta maneira, no presente trabalho, optou-se apenas em abordar a análise das deformações ocasionais pelas soldas de canto, utilizando-se o processo de soldagem a arco elétrico manual com eletrodo revestido, em painéis estruturais de aço carbono comum, do tipo apresentado na Figura 1.1. Lembra-se, de passagem, que problemas com essas características são frequentemente encontrados em estaleiros e indús-

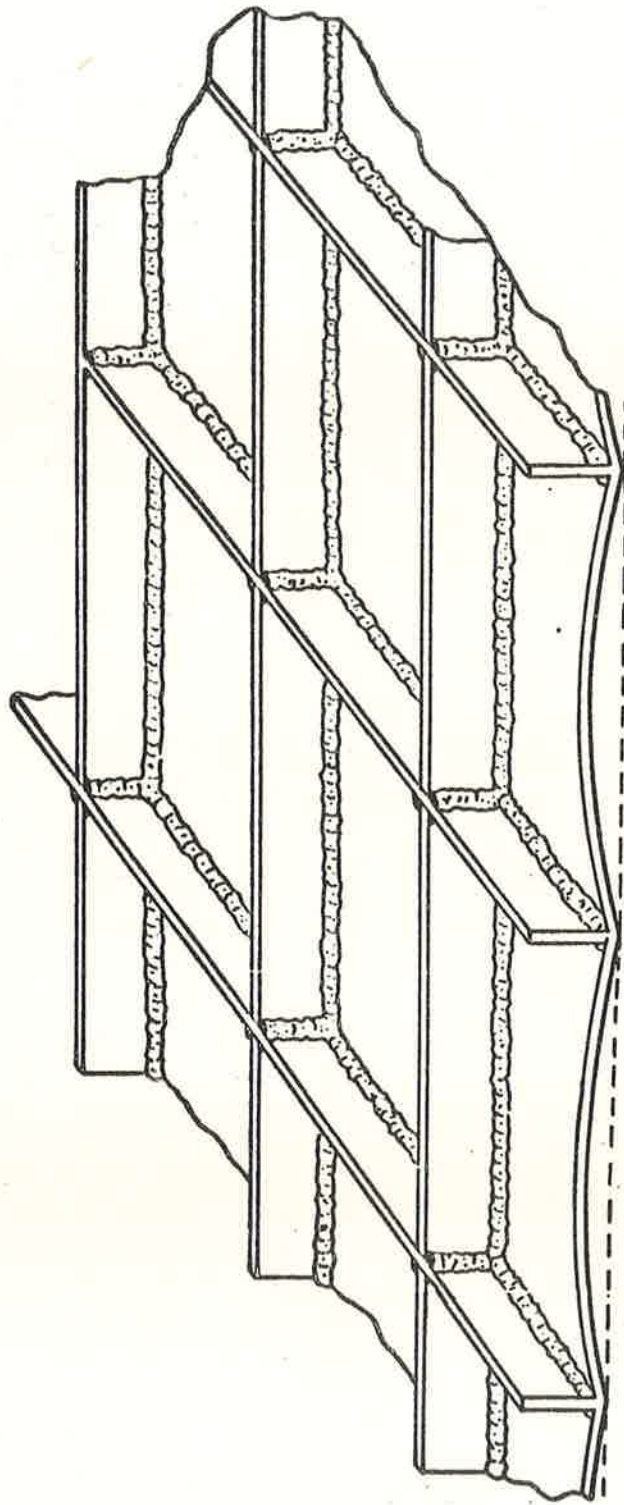


FIGURA 1.1 - Painel Estrutural com Reforços Longitudinais e Transversais.

trias de estruturas metálicas em geral, fato este, que vem de certa forma mostrar a conveniência da escolha efetuada.

O simples desenvolvimento de um método para a previsão de deformações não teria interesse algum, se esse método não apresentasse um grau de confiabilidade elevado, de tal forma que permitisse a sua utilização na prática. A grande complexidade dos fenômenos elasto-plásticos, que ocorrem quando da soldagem, aliada às características geométricas da estrutura, contribuem para que um método puramente analítico apresente uma confiabilidade abaixo da aceitável.

Seguindo uma filosofia adotada pela maioria dos pesquisadores sobre o assunto e levando em consideração os motivos acima mencionados, julgou-se melhor desenvolver um estudo teórico - experimental. Onde os resultados obtidos através da realização de ensaios experimentais fornecessem subsídios para uma análise teórica dando origem a gráficos e algoritmos, que traduzissem da melhor forma possível a influência das diversas variáveis nos níveis finais de deformação.

Antes, contudo, da realização da análise teórico - experimental propriamente dita, é feito um breve estudo comparativo entre os diversos métodos disponíveis atualmente, para a previsão de deformações em painéis estruturais soldados. Com este estudo preliminar, feito após um exaustivo levantamento bibliográfico, procura-se delimitar o escopo geral do estudo, somente aos casos realmente carentes de uma análise mais criteriosa.

Para elucidar, é apresentado de forma esquemática na Figura 1.2, a sequência geral seguida neste trabalho.

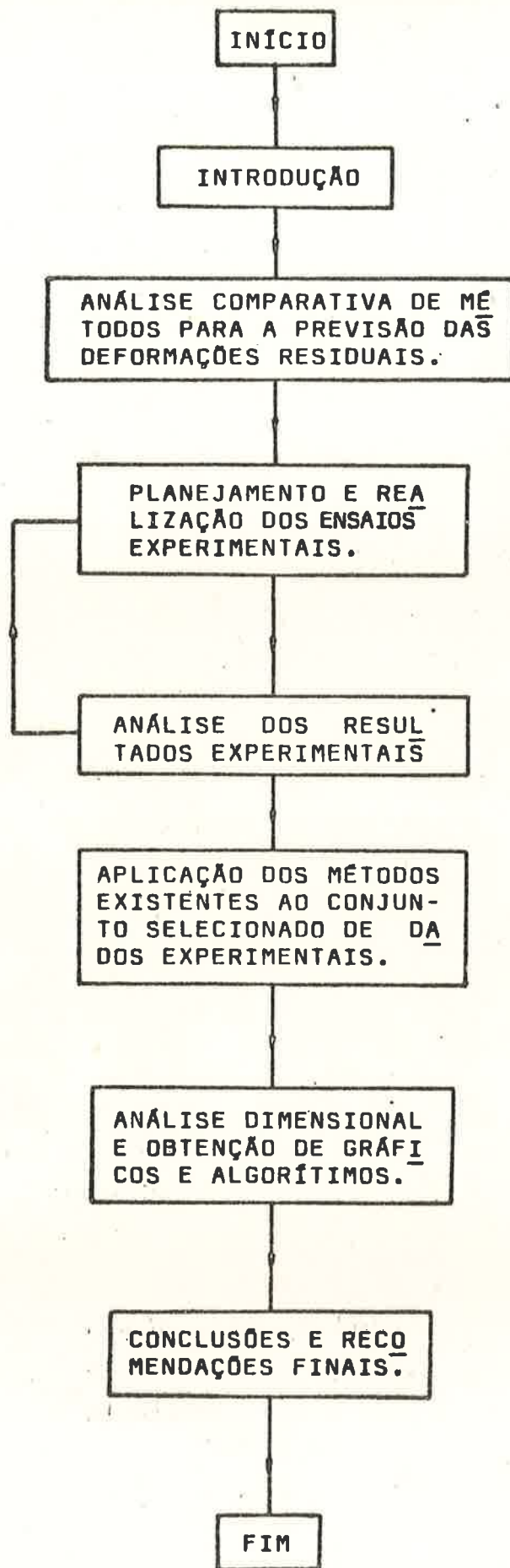


FIGURA 1.2 - Sequência Geral do Estudo

CAPÍTULO II

ESTUDO COMPARATIVO PRELIMINAR ENTRE OS DIVERSOS MÉTODOS EXISTENTES

O estudo das deformações em estruturas soldadas - tem recebido a atenção de vários pesquisadores, podendo-se citar entre eles HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾, BLODGETT⁽⁶⁾, OKERBLOM⁽⁷⁾, MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾, WATANABE e SATOH⁽⁵⁾, GERBEAUX e RENAULT⁽¹⁰⁾, SPRARAGEM e ETTINGER⁽¹¹⁾, MALISIUS⁽¹¹⁾, GURYOT⁽¹¹⁾, etc. No entanto, apesar do grande número de autores, ficou constatado que apenas os cinco primeiros tratam especificamente do problema das deformações em painéis estruturais. Esse levantamento bibliográfico, a seleção e análise dos métodos que se propõem a solucionar o problema em questão, além de uma criteriosa análise comparativa entre os resultados numéricos dos diversos métodos, exigiram um considerável esforço de pesquisa, que neste capítulo é apresentado de forma resumida. Maiores detalhes dessa análise, inclusive com as formulações e as hipóteses necessárias para compatibilizar a confrontação entre diversos métodos, são apresentados na referência bibliográfica (14).

Devido à própria característica dos estudos, a análise comparativa foi dividida em duas partes: a primeira que trata das chamadas juntas livres e a outra referente aos painéis estruturais propriamente ditos, também denominados de juntas - restritas.

2.1 - Juntas Livres

Junta livre, é o termo pelo qual se denomina uma estrutura constituída apenas de uma flange e uma alma, unidos entre si através de soldas de canto, formando uma viga tipo "T". A Figura 2.1 abaixo, apresenta uma estrutura com es-

sas características, após já ter sofrido uma deformação angular

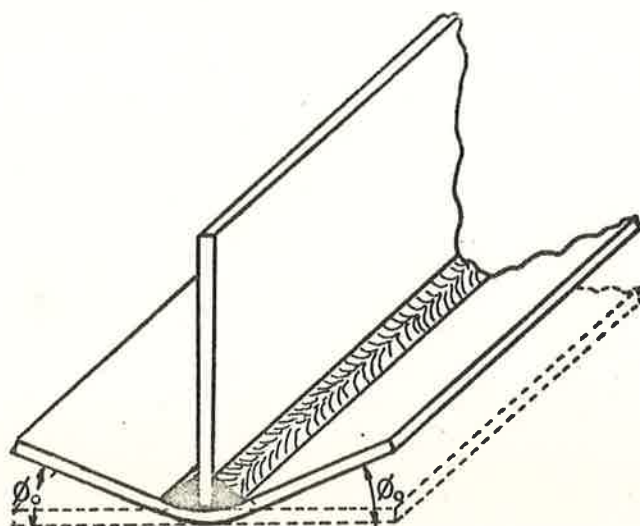


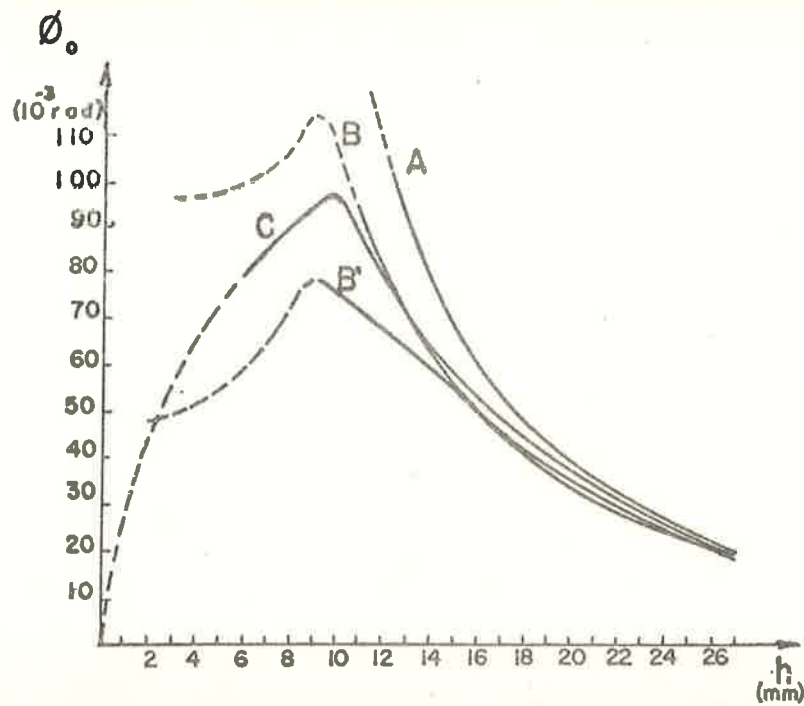
FIGURA 2.1 - Junta Livre (Perfil "T")

HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾, BLODGETT⁽⁶⁾ e OKERBLOM⁽⁷⁾ são os autores que apresentam estudos referentes às deformações em juntas livres. Os dois primeiros desenvolveram seus métodos de forma puramente empírica, enquanto o OKERBLOM⁽⁷⁾, utiliza os conhecimentos sobre as transformações físicas que ocorrem na junta soldada associados a dados experimentais.

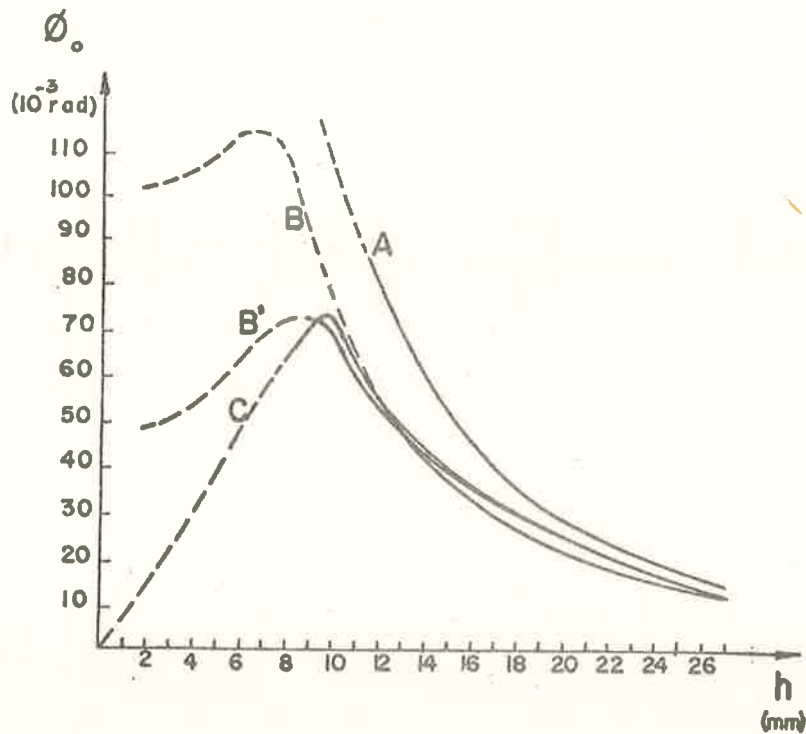
Os resultados numéricos desses estudos, após serem colocados em forma de parâmetros comuns, são apresentados em forma de gráficos na Figura 2.2, sendo que os significados das variáveis estão indicados no início deste trabalho.

2.2 - Juntas Restritas

Nos estudos de OKERBLOM⁽⁷⁾, MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ e mais no de WATANABE e SATOH⁽⁵⁾ são propostos métodos para a previsão de deformações nos painéis estruturais propriamente ditos. A denominação genérica de junta restrita dada a esses painéis deve-se ao efeito restritivo, que os demais reforços e a própria chapa base exercem sobre as deformações originadas da soldagem de um determinado reforço.



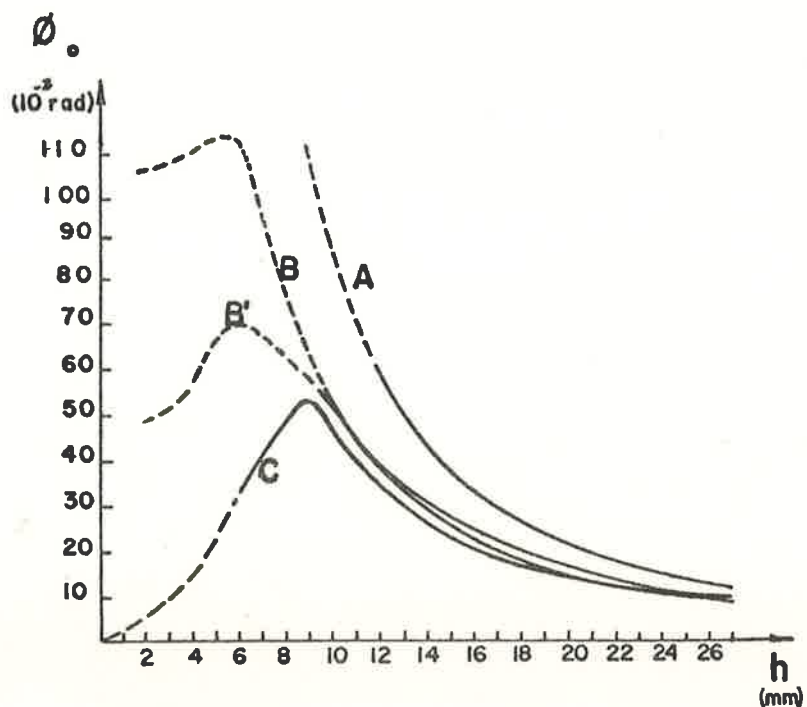
$\text{Log}_{10} w = 1,0$



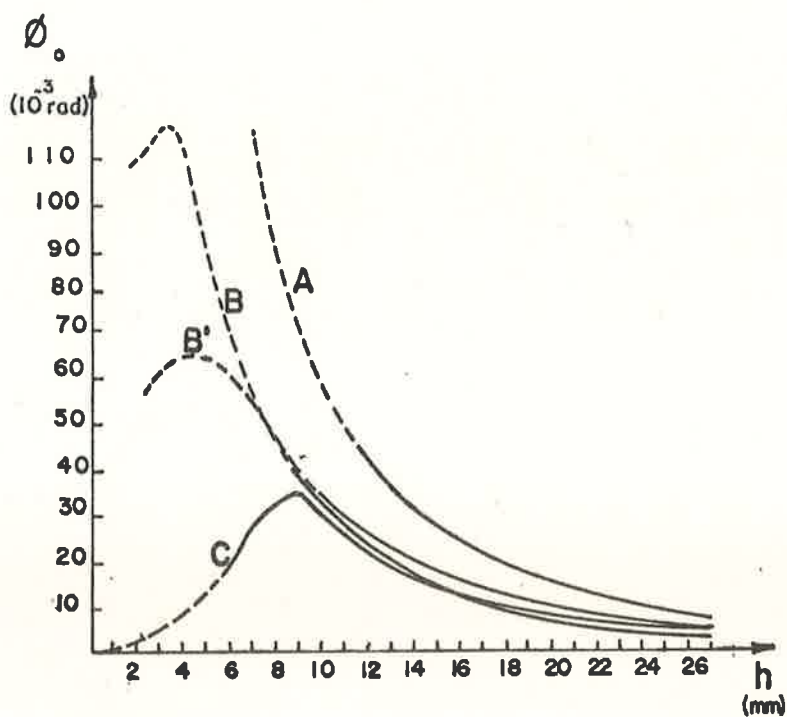
$\text{Log}_{10} w = 0,8$

- Curvas A... Blodgett
B... Okerblom (soldagem sucessiva)
B'... Okerblom (soldagem simultânea)
C... Masubuchi

FIGURA 2.2 - Deformações Angulares em Juntas Livres -
Estudo Comparativo



$\text{Log}_{10} w = 0,6$



$\text{Log}_{10} w = 0,4$

- Curvas A.... Blodgett
 B.... Okerblom (soldagem sucessiva)
 B'.... Okerblom (soldagem simultânea)
 C.... Masubuchi

FIGURA 2.2 - Deformações Angulares em Juntas Livres -
 Estudo Comparativo

Supondo que as deformações angulares de uma junta soldada não sejam afetadas pela existência ou não de elementos restritivos, o método de OKERBLOM⁽⁷⁾ simplesmente aplica as deformações angulares, obtidas para as juntas livres, às extremidades da chapa base junto aos reforços, e calcula as deflexões no centro do painel, através das formulações fornecidas pela Teoria de Vigas (cada tramo do painel é suposto como uma viga bi-apoiada).

Tanto o estudo de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ como o de WATANABE e SATOH⁽⁵⁾ adotam os resultados de HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾, referentes às juntas livres. Estes autores admitem que a deformação angular para as juntas restritas (θ) se relaciona com a deformação angular para juntas livres (θ_0), através de um fator de restrição (F_R), que para cada material empregado, é função da geometria da estrutura e das condições de soldagem utilizadas. Em ambos os estudos, é proposta a Relação 2.1, abaixo:

$$\theta = F_R \theta_0 \quad (2.1)$$

Aplicando o princípio da mínima energia potencial armazenada na estrutura, para a obtenção de F_R , MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ dedicam-se apenas aos painéis estruturais de grande razão de aspecto, ou seja, painéis cuja a relação comprimento/vão entre enrijecedores é maior do que três ($a/b > 3$). Painéis com essas características, que podem ser representados pelo modelo apresentado na Figura 2.3, são empregados em inúmeras partes estruturais dos navios.

O estudo desenvolvido por WATANABE e SATOH⁽⁵⁾, por sua vez, considera tanto o efeito restritivo dos enrijecedores longitudinais - paralelos à junta soldada - como o dos enrijecedores transversais, podendo portanto ser utilizado para painéis de baixa razão de aspecto ($a/b < 3$). O fator de restrição (F_R) é obtido através de um estudo paramétrico onde é utilizado o princípio dos trabalhos virtuais.

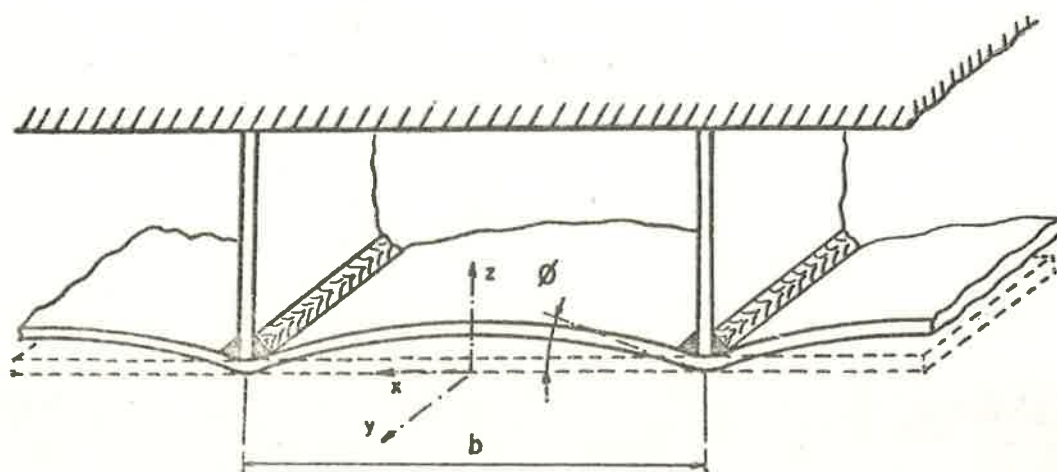
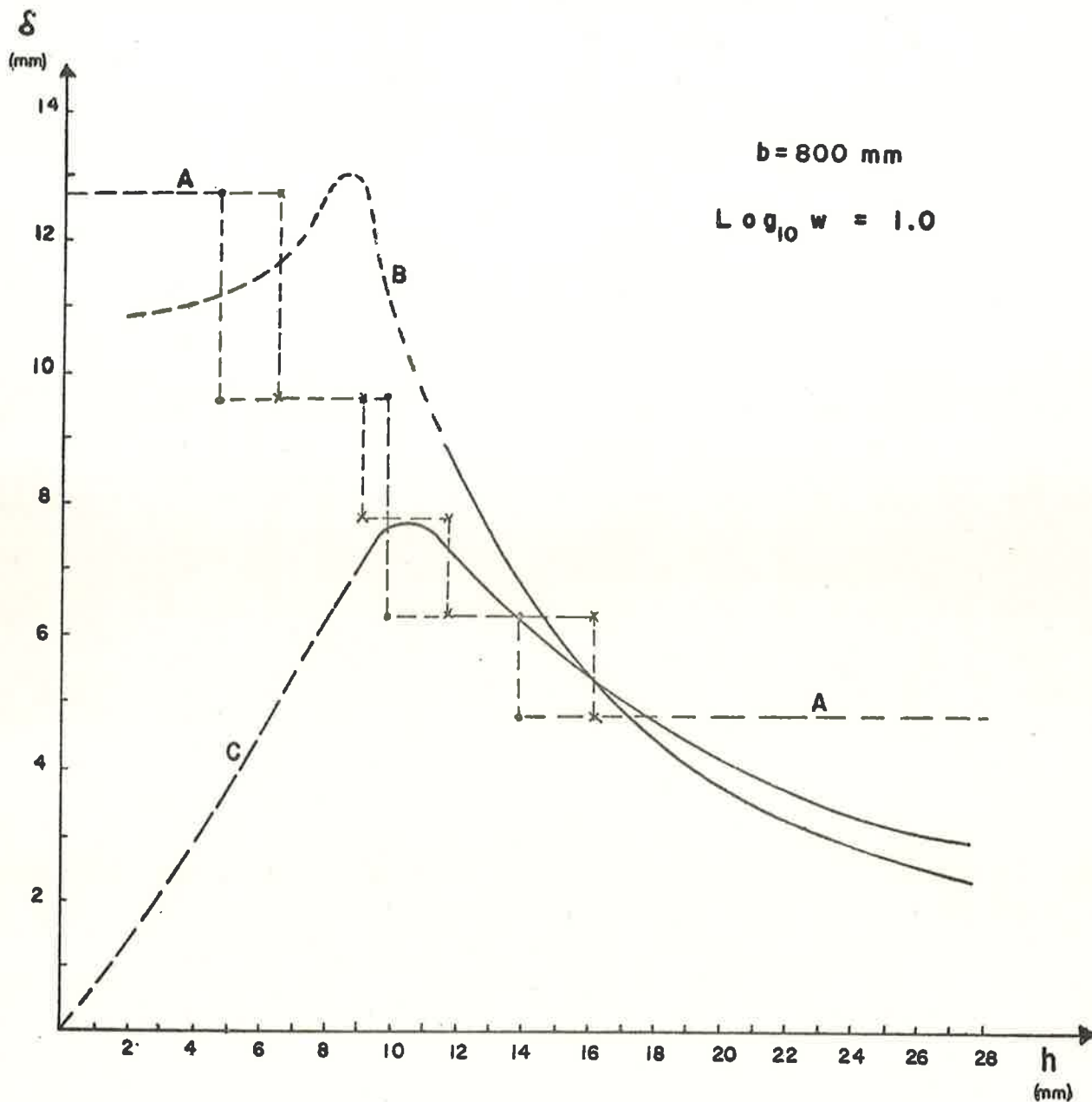


FIGURA 2.3 - Junta Restrita

Seguindo uma sistemática idêntica a das juntas livres, foram feitos uma série de gráficos com os resultados numéricos obtidos da aplicação dos métodos de OKERBLOM⁽⁷⁾ e MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾. Nesses gráficos, cujo um exemplo é apresentado na Figura 2.4, também foram colocados os valores das máximas deflexões permissíveis pela NAVSHIPS⁽¹³⁾, para que através de uma simples confrontação de curvas, fosse permitido verificar quais painéis seriam rejeitados, caso fossem construídos.

2.3 - Conclusões

Através da análise dos estudos apresentados neste capítulo, pôde-se obter algumas conclusões que ajudaram a estabelecer uma orientação, para a continuidade deste trabalho. O número relativamente reduzido de conclusões aqui apresentadas, é decorrência principalmente, do desconhecimento de algumas das variáveis de soldagem utilizadas nos ensaios experimentais que deram origem aos diversos métodos pesquisados. Tendo conhecimento do problema, procurou-se através de um estabelecimento coerente de hipóteses adicionais e de uma análise criteriosa garantir a veracidade das conclusões obtidas. Dentro desse princípio, as conclusões são as seguintes:



Curvas: A Máximos Permissíveis - NAVSHIPS(13)
 - - - - - Convés
 * - - - * Casco
B Okerblom
C Masubuchi

FIGURA 2.4 - Deformações Transversais em Juntas Restritas ($a/b > 3$) - Estudo Comparativo.

- (i) No estágio atual, parece impossível o desenvolvimento de um método puramente analítico que possibilite, com razoável confiabilidade, a previsão de deformações em painéis estruturais soldados. Portanto, torna-se evidente a necessidade de realização de ensaios experimentais para o desenvolvimento de um método com essa finalidade.
- (ii) De um modo geral, as curvas das deflexões em juntas restritas (Figura 2.4) comportam-se de maneira semelhante as das juntas livres (Figura 2.2). Esse fato, de certa forma, já justifica a realização de ensaios com juntas livres, uma vez que a análise das deformações em juntas livres possibilita a obtenção de conclusões referentes à influência do tipo e diâmetro do eletrodo, número de passes e sequência de soldagem no nível final de deformações, conclusões estas que a princípio parecem ser extrapoláveis para as juntas restritas.
- (iii) Apesar de BLODGETT⁽⁶⁾ não ter explicitado o campo de validade de sua relação, o comportamento das curvas obtidas pelo seu método, demonstra claramente que a utilização do mesmo, deve ficar restrito às juntas livres com chapas de espessuras acima de 12 mm.
- (iv) Para chapas de face com espessuras superiores a 12 mm, constatou-se uma razoável concordância entre as curvas apresentadas nos gráficos das Figuras 2.2 e 2.4. Esse comportamento relativo entre curvas de um mesmo gráfico, associado ao fato que cada curva foi obtida por métodos baseados em princípios diferentes, demonstram que para a faixa de espessuras acima mencionada, os métodos existentes apresentam um elevado grau de confiabilidade, nada obstando, portanto, que sejam utilizados na prática.
- (v) São para espessuras inferiores a 12 mm, existe uma acentuada divergência entre as diversas curvas. Dessa forma, eliminada a hipótese de utilização do método de BLODGETT⁽⁶⁾, torna-se difícil afirmar qual dos métodos restantes, apresenta -

níveis de deformações compatíveis aos que ocorrem na prática.

- (vi) A tendência demonstrada pelas curvas obtidas da NAVSHIPS⁽¹³⁾ - vide Figura 2.4 -, onde para chapas finas os níveis de deformações tolerados são maiores, levam a crer que na fixação desses níveis não foram adotados critérios hidrodinâmicos e nem estéticos. De certa forma, tal tendência apenas é justificada sob o ponto de vista estrutural, uma vez que para chapas finas, a maior parcela de responsabilidade em manter a resistência e estabilidade estrutural, recai sobre os enrijecedores.
- (vii) Em princípio, apesar de não se poder analisar comparativamente os resultados apresentados por WATANABE e SATOH⁽⁵⁾, parece prematuro o desenvolvimento de um método que pretenda prever deformações em painéis de baixa razão de aspecto ($a/b < 3$), numa faixa de espessuras tão ampla. Ainda - mais sabendo-se que em determinada parte dessa faixa de espessuras não se conseguiu resultados satisfatórios mesmo - em casos simples como é o das juntas livres.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Objetivo dos Ensaios

A realização dos ensaios experimentais teve como objetivo principal o levantamento de dados, que se fizeram necessários, uma vez constatada a dubiedade de resultados, obtidos na análise comparativa apresentada no capítulo anterior.

Essa discrepância nos resultados ocorreu principalmente para painéis com chapas de espessuras inferiores a 12mm, indúzindo assim, a realização de ensaios experimentais - utilizando chapas abaixo dessa espessura.

Os resultados dos referidos ensaios serviram para, juntamente com outros derivados dos autores investigados, desenvolver este estudo, de forma a possibilitar a previsão, com maior exatidão, das deformações que ocorrem nas estruturas em estudo, para a faixa de espessuras em questão.

3.2 - Planejamento Inicial das Experiências

O planejamento inicial das experiências procurou ser o mais geral possível, incluindo o maior número de variáveis que pudessem influir no nível de deformações, bem como englobando uma faixa de espessuras relativamente ampla, a fim de obter maiores subsídios para a condução da análise posterior.

Além disso, sempre dentro da filosofia de se partir dos casos mais simples, os ensaios foram iniciados para as juntas livres, para só depois abordar as juntas restritas, onde prevaleceram os painéis de grande razão de aspecto ($a/b > 3$).

3.2.1 - Variáveis Significativas nos Ensaios Experimentais

A Tabela 3.1 abaixo apresenta a relação das variáveis que inicialmente foram consideradas de interesse durante a realização das experiências, bem como as faixas de variação ou a especificação de cada uma delas quando definidas de antemão.

TABELA 3.1
Variáveis Principais na Condução dos Ensaios Experimentais

Variável	Faixa de Variação ou Especificação
M_p - Material do painel	Aço comum
S_e - Sentido de Laminação	Não foi controlado
T_e - Tipo de Eletrodo	Revestido de acordo com as especificações: - E 6013
P_s - Processo de Soldagem	Arco Elétrico- Manual
T_f - Tipo de Filete	Contínuo
T_p - Tipo de Passe	Cordão e Tecimento
S_{st} - Sequência de Soldagem Transversal	CE_t e EE_t (Vide Figura 3.5)
S_{sl} - Sequência de Soldagem Longitudinal	CE_l e EE_l (Vide Figura 3.4)
h_s - Espessura dos Reforços (mm)	6,350(1/4") e 9,525(3/8")
h - Espessura da Chapa (mm)	3,175(1/8"); 4,763 (3/16"); 6,350(1/4"); 7,938(5/16") e 9,525(3/8").
b - Vão do painel (mm)	400 - 600 - 800
d - Diâmetro do eletrodo (mm)	2,5 - 3,25 - 4,0 - 5,0
n_p - Número de passes	$1 < n_p < 4$
I - Corrente (A)	$90 < I < 210$
V - Voltagem (V)	$20 < V < 30$
v - Velocidade (mm/s)	$2,0 < v < 3,8$
w - Peso de Eletrodo consumido por unidade de comprimento Solda (g/cm)	$0,9 < w < 6,2$

Durante a realização das experiências, observou-se que algumas das variáveis acima podiam ser consideradas de importância secundária com relação à sua influência no nível de deformação final dos painéis em estudo. Como este assunto será abordado mais adiante com detalhe, por ora apenas serão tecidas rápidas considerações sobre a preparação das experiências.

3.2.2 - Materiais Empregados

De acordo com as idéias básicas que nortearam o desenvolvimento deste estudo, apenas foi utilizado o aço carbono comum, como material base dos painéis. Entende-se por aço - carbono comum, o aço que recebe o Grau B dentro das especificações do American Bureau of Shipping (ABS) e que na especificação da Society of Automotive Engineers (SAE) compreende os aços carbono em torno de SAE 1020.

Na soldagem dos corpos de prova, empregou-se o eletrodo com revestimento rutílico AWS-E6013 (ABNT 4825-R), uma vez que algumas de suas características - por exemplo baixa penetração - o indicam para a soldagem de chapas finas em juntas de canto.

3.2.3 - Corpos de Prova para os Ensaios

Foram utilizados dois tipos de corpos de prova. Para uma verificação preliminar da influência das condições de soldagem nos níveis de deformações, sem a presença de elementos estruturais restritivos foram utilizados corpos de prova conforme o apresentado na Figura 3.1, e que são genericamente chamados de Juntas Livres. Com o intuito de procurar simular condições estruturais reais em painéis de grande razão de aspecto - ($a/b \geq 3$), foram idealizados corpos de prova, do tipo apresentado na Figura 3.2.

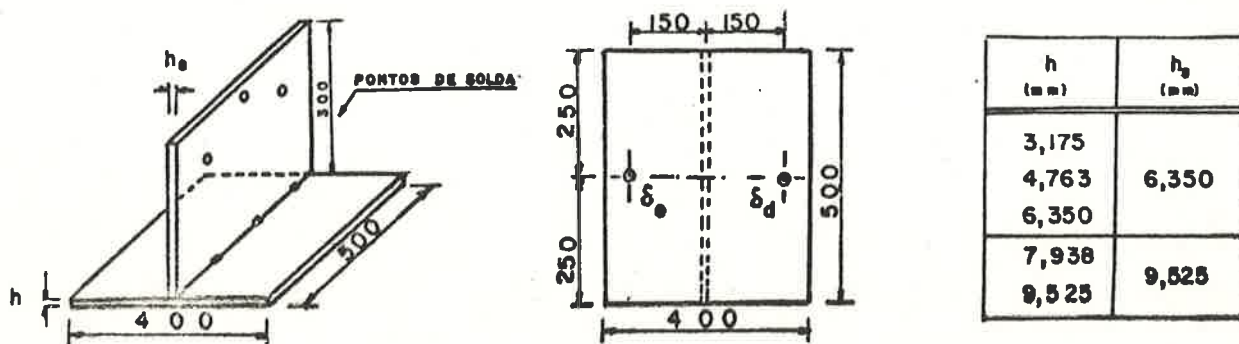


FIGURA 3.1 - Representação Esquemática do Corpo de Prova para as Juntas Livres

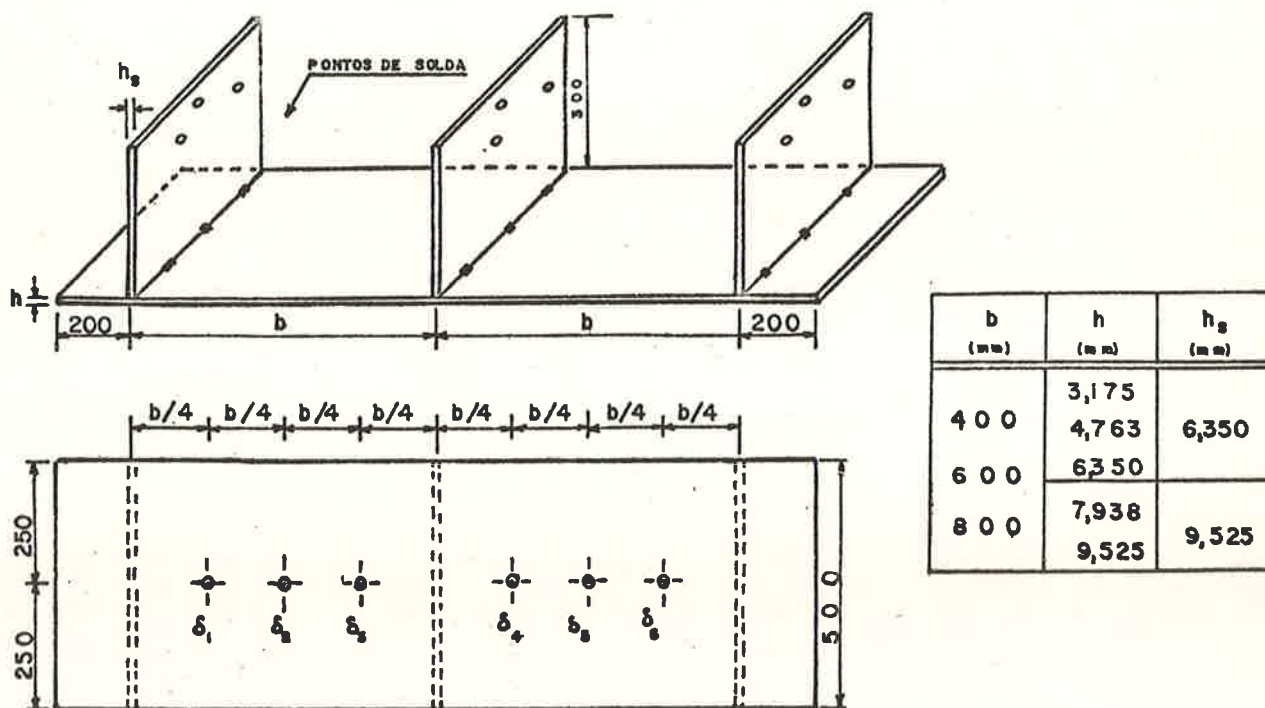


FIGURA 3.2 - Representação Esquemática do Corpo de Prova Utilizado no Ensaio para Determinação das Deformações Residuais em Painéis Estruturais Soldados (Juntas Restritas).

As duas Figuras, acima mencionadas, apresentam uma vista esquemática em perspectiva dos referidos corpos de prova, - juntamente com uma vista de planta, com indicações dos locais onde foram tomadas as medidas das deflexões.

3.2.4 - Banco de Provas

Para a realização dos ensaios experimentais foi necessária a utilização do banco de provas apresentado esquematicamente na Figura 3.3. A principal preocupação quando da idealização desse banco de provas, foi para que o mesmo não permitisse movimentos relativos entre os reforços do corpo de prova. Tal condição foi conseguida, superdimensionando a estrutura superior do banco de provas, através da utilização de duas vigas tipo "I" de grande momento de inércia.

3.2.5 - Equipamento Utilizado

Para a realização da solda elétrica, foi utilizado o retificador a silício, marca Soldex, modelo RS-500V, possuindo as seguintes características:

Alimentação.....	220/380/440 V
Frequência.....	50 - 60 Hz
Abertura de Arco.....	65 / 75 V
Corrente Nominal.....	440 Amp.

Os valores das deflexões foram medidos através de relógios comparadores, genericamente denominados de defletômetros, marca Käfer, propiciando uma precisão de até centésimo de milímetro (0,01mm), suficiente para assegurar a exatidão das medidas no tipo de experiência que foram executadas.

3.2.6 - Tipo e Número de Experiências

Foi realizado um total de 42 ensaios experimentais sendo 20 com juntas livres, 22 com juntas restritas.

Na Tabela 3.2 está especificado o número de ensaios realizados, sendo que para juntas restritas, são apresentados as combinações de espessura de chapas e vãos dos painéis.

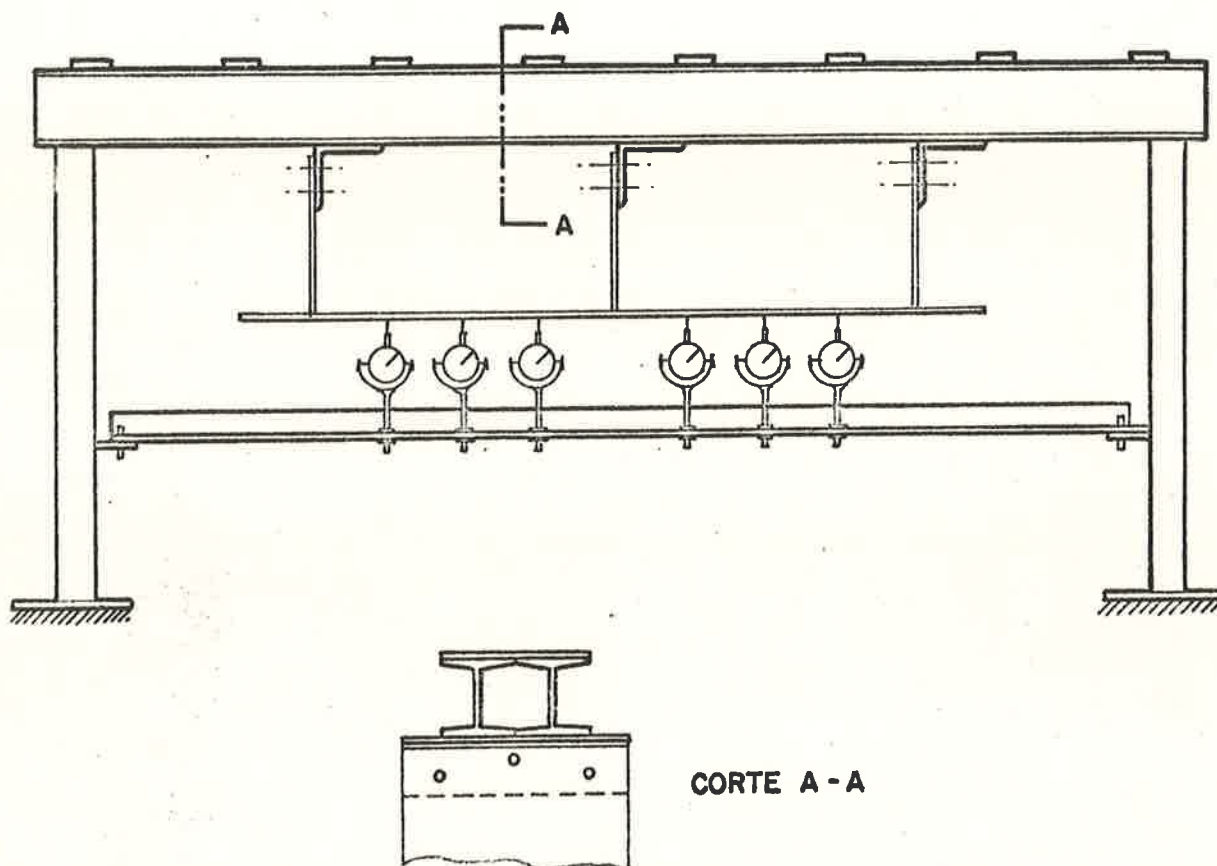


FIGURA 3.3 - Representação Esquemática do Banco de Provas.

TABELA 3.2 - Tipo e Número de Ensaio Realizados

TIPOS DE JUNTAS E VÃOS (mm)		ESPESSURA DAS CHAPAS(mm)					TOTAL POR TIPO
		3.175	4,763	6,350	7,938	9,525	
JUNTAS LIVRES		2	3	8	2	5	20
JUNTAS RESTRITAS (a/b > 3)	400	1	1	1	1	1	5
	600	1	1	5	2	2	11
	800	1	2	1	1	1	6
TOTAL POR ESPESSURA		5	7	15	6	9	42

3.2.7 - Escolha das Condições de Soldagem

Na escolha das condições de soldagem, foram efetuados alguns ensaios prévios para estabelecer, para cada espessura - de chapa, diâmetro de eletrodos e tipo de cordão, as variáveis que, em princípio, possibilitassem a execução de uma junta soldada de boa qualidade, aliada também às características de bom acabamento.

Através desses critérios foram escolhidas as variáveis operacionais de soldagem, como a voltagem e corrente para serem utilizadas com o eletrodo AWS-E6013.

Em todos os ensaios, utilizou-se corrente contínua, - com polaridade direta, ou seja, com o eletrodo sendo o polo negativo.

Por tratar-se de um processo manual, a velocidade não foi fixada de antemão, mas através de cronometragens, pode-se estimar uma velocidade média para cada passe de solda, correspondente àquelas condições consideradas ideais, dentro das limitações existentes.

A Tabela 3.3 apresenta o resumo das condições de soldagem utilizadas para a realização dos ensaios experimentais

TABELA 3.3 - Condições de Soldagem Utilizadas nos Ensaios Experimentais.

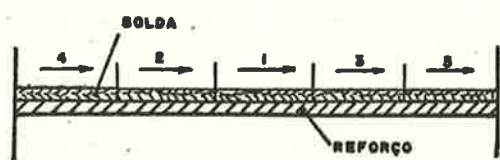
	Espessura da Chapa (mm-pol)	Nº de Exp.	Diâmetro Eletr. (mm)	Corrente (A)	Voltagem (V) min-máx.	Velocidade (mm/s) min.-máx.
JUNTAS LIVRES	3,175 ($\frac{1}{8}$)	2	2,5	90	23-25	2,46-3,18
	4,763 ($\frac{3}{16}$)	3	2,5	90	20-24	2,60-3,21
	6,350 ($\frac{1}{4}$)	1	2,5	90	25	2,47-2,93
		6	3,25	120	25-27	2,16-3,71
		1	4,0	160	25	2,71-2,76
	7,938 ($\frac{5}{16}$)	2	3,25	120	25	2,02-3,29
	9,525 ($\frac{3}{8}$)	4	3,25	120	25	2,13-3,23
		1	5,0	210	30	2,24-2,64
JUNTAS RESTRITAS	3,175 ($\frac{1}{8}$)	3	2,5	90	23-24	2,50-2,77
	4,763 ($\frac{3}{8}$)	4	2,5	90	23-24	2,38-3,05
	6,350 ($\frac{1}{4}$)	7	3,25	120	23-24	2,14-2,93
	7,938 ($\frac{5}{16}$)	4	3,25	120	23-24	2,10-3,21
	9,575 ($\frac{3}{8}$)	4	3,25	120	24	2,24-2,52

3.2.8 - Sequência de Soldagem

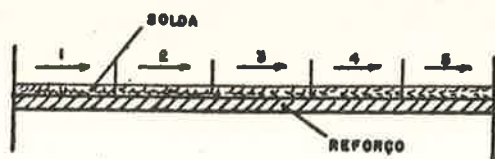
A sequência de soldagem é um dos parâmetros que deve ser otimizado para minimizar as deformações residuais do painel soldado. Desta maneira ela se constitui em um ponto bastante importante na determinação das condições de soldagem, durante as experiências.

Com a finalidade de facilitar a análise convencionou-se dividir as sequências de soldagem em longitudinal e transversal. A primeira, refere-se à sequência em que os trechos de um mesmo passe são executados; a sequência de soldagem transversal por sua vez, está relacionada com a progressão da soldagem de um enrijecedor para outro, após a execução de cada passe.

A Figura 3.4 apresenta, em forma esquemática, as sequências de soldagem longitudinal utilizadas nos ensaios. Devido à ordem de deposição dos trechos de passes relativamente aos corpos de prova, conforme pode ser verificado na Figura abaixo, essas duas sequências foram genericamente denominadas de Centro-Extremidade Longitudinal (CE_l) e Extremidade-Extremidade Longitudinal (EE_l), para simplificação de linguagem.



CENTRO - EXTREMIDADE
LONGITUDINAL (CE_l)



EXTREMIDADE-EXTREMIDADE
LONGITUDINAL (EE_l)

FIGURA 3.4 - Sequências de Soldagem Longitudinal Utilizadas nos Ensaios.

As sequências de soldagem transversal adotadas, são apresentadas na Figura 3.5, e denominadas de Centro-Extremidade Transversal (CE_t) e Extremidade-Extremidade Transversal (EE_t).

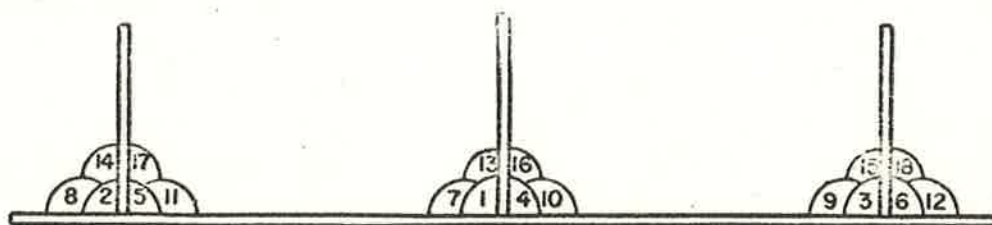
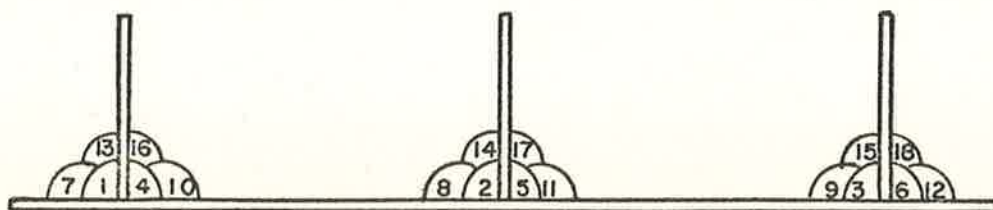
CENTRO-EXTREMIDADE TRANSVERSAL (CE_t)EXTREMIDADE-EXTREMIDADE TRANSVERSAL (EE_t)

FIGURA 3.5 - Sequências de Soldagem Transversal Utilizadas nas Experiências.

3.2.9 - Procedimento na Execução dos Ensaios

Após a fixação dos corpos de prova no dispositivo de ensaio e o posicionamento correto dos defletômetros, as experiências programadas foram executadas sequencialmente. Durante os ensaios foram tomadas várias leituras nos defletômetros, bem como foram cronometradas as operações de soldagem, a fim de serem extraídos os tempos de arco, para o cálculo da velocidade média de avanço do eletrodo.

A fim de não afetar os resultados, a retirada da escória após cada passe foi efetuada com bastante cuidado, devido à alta sensibilidade dos defletômetros empregados.

Em algumas experiências foi tentada a utilização de extensômetros (strain-gages) para se medir o nível de deformações

e a partir daí calcular os valores das tensões atuantes nos diferentes pontos do painel. Tal tentativa, entretanto, foi totalmente prejudicada, pois não se dispunha no momento de extensômetros para altas temperaturas, de modo que as leituras efetuadas no monitor não possuíam o mínimo de confiabilidade para serem utilizadas na prática.

3.3 - Apresentação dos Resultados Experimentais

Os resultados obtidos nas experiências realizadas estão apresentados em forma de tabelas, sendo que o conjunto de Tabelas 3.4 referem-se às juntas livres, ao passo que o conjunto de Tabelas 3.5, às juntas restritas.

As tabelas incluem, além dos resultados finais para cada caso estudado, a evolução das deformações após a execução de um conjunto de cordões de solda, conforme indicado no item 3.2.8, relativo às sequências de soldagem transversal adotadas. Além disso, as condições de soldagem utilizadas em cada uma das experiências realizadas constam das respectivas tabelas, obedecendo desta maneira a orientação traçada no início deste estudo, de especificar sempre as variáveis operacionais utilizadas. Isto facilitará as análises subsequentes e principalmente o estabelecimento das faixas de validade das equações e algoritmos desenvolvidos, baseados naqueles resultados.

Os valores das deformações angulares (θ_0) para o caso das juntas livres, apresentados nas Tabelas 3.4, foram calculados através da Relação 3.1, sendo os valores de δ_e e δ_d obtidos através de leituras nos defletômetros.

$$\theta_0 = \frac{\delta_e + \delta_d}{2s} \quad (3.1)$$

onde,

- θ_0 - deformação angular para as juntas livres (rad)
- δ_e e δ_d - deformações transversais de pontos situados respectivamente a esquerda e a direita do reforço (mm)
- s - distância entre o reforço e os pontos de leituras das deflexões (δ_e e δ_d). (mm)

Tendo em vista a facilidade de medição durante a operação de soldagem, resolveu-se expressar a quantidade de solda utilizada através do peso de eletrodo consumido por unidade de comprimento de solda (ω), o qual teve seus valores calculados pela Relação 3.2 e apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5

$$\omega = \frac{N_e \cdot P_e}{2 \cdot L} \quad (3.2)$$

onde,

- ω - peso de eletrodo consumido por unidade de comprimento de solda (g/cm)
- N_e - número de eletrodos efetivamente consumidos nos dois lados do reforço (precisão de até 0,02 de eletrodo)
- P_e - peso do eletrodo (g)
- L - comprimento dos corpos de prova (cm)

Dispondo-se do valor de (ω), é possível de se obter a altura de filete (p), de grande importância em termos de projeto da junta soldada, através da Relação 3.3, abaixo

$$p = 10 \sqrt{\frac{2\omega \eta}{\gamma}} \quad (3.3)$$

- onde p = altura (ou perna) do filete (mm)
- γ = peso específico do metal de solda (g/cm^3)
($\gamma_{\text{aço}} = 7,85 \text{ g/cm}^3$)
- η = taxa de deposição do eletrodo

As taxas de deposição do eletrodo E6013, foram obtidas experimentalmente para cada diâmetro utilizado e os valores encontrados, são apresentados na tabela 3.6. O peso específico do metal de solda foi admitido ser igual ao do aço comum, e o valor adotado ($\gamma = 7,85 \text{ g/cm}^3$), foi obtido da Referência (19).

O significado de algumas das variáveis que fazem parte das relações acima apresentadas, pode ser melhor compreendido pela observação da Figura 3.6.

TABELA 3.4 - Resultados Experimentais para Juntas Livres.

Exp. Nº	h (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	θ_0 (10^{-3} Rad)	OBS.
1L	3,175	90	25	2,68	2,5	1,015	5,84	-CE _g
	-	-	-	2,46	-	2,205	17,14	
2L	3,175	90	23	2,75	2,5	1,032	7,7	-CE _g
	-	-	-	2,78	-	2,082	16,07	
	-	-	-	2,98	-	2,957	32,67	
3L	4,763	90	24	2,985	2,5	0,945	16,57	-CE _g
	-	-	-	3,175	-	1,785	27,47	
	-	-	-	3,205	-	2,66	40,33	
	-	-	-	3,105	-	3,675	54,07	
4L	4,763	90	20	2,60	2,5	1,00	30,99	-CE _g
	-	-	-	2,62	-	2,00	39,65	
	-	-	-	2,67	-	2,94	67,13	
5L	4,763	90	20	2,67	2,5	1,00	17,05	-EE _g
	-	-	-	2,71	-	1,96	37,98	
	-	-	-	2,72	-	2,91	55,14	
6L	6,350	120	27	2,28	3,25	1,53	15,53	-CE _g
7L	6,350	90	25	2,93	2,5	1,14	22,43	-CE _g
	-	-	-	2,93	-	2,10	46,07	
	-	-	-	2,76	-	3,24	57,80	
	-	-	-	2,47	-	4,72	76,30	
8L	6,350	120	26	2,37	3,25	1,53	21,07	-CE _g Tecimento
	-	-	-	2,27	-	3,37	46,05	
	-	-	-	2,24	-	5,32	71,50	

TABELA 3.4 (continuação)

Exp. Nº	h (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	θ_0 (10^{-3} Rad)	OBS-
9L	6,350	120	26	2,62	3,25	1,53	22,73	- CE _g
	-	-	-	2,37	-	3,06	36,47	
	-	-	-	2,16	-	4,96	55,53	
10L	6,350	120	26	2,56	3,25	1,45	30,87	- EE _g
	-	-	-	2,71	-	2,74	47,0	
	-	-	-	2,66	-	4,18	69,33	
11L	6,350	160	25	2,76	4,0	2,77	21,83	- CE _g
	-	-	-	2,71	-	5,75	47,73	
	-	-	-	-	-	-	-	
12L	6,350	120	25	2,73	3,25	1,61	27,09	- CE _g
	-	-	-	3,04	-	2,91	51,99	
	-	-	-	3,33	-	3,94	64,18	
13L	6,350	120	25	2,93	3,25	1,47	29,23	- CE _g
	-	-	-	3,44	-	2,42	55,61	
	-	-	-	3,71	-	3,42	66,07	
14L	7,938	120	25	2,398	3,25	1,56	21,30	- CE _g
	-	-	-	2,114	-	3,52	43,27	
	-	-	-	2,024	-	5,58	61,40	
15L	7,938	120	25	2,64	3,25	1,56	21,76	- EE _g
	-	-	-	2,98	-	2,85	46,60	
	-	-	-	3,29	-	3,87	54,71	
16L	9,525	120	25	2,58	3,25	1,38	19,43	- CE _g
	-	-	-	2,51	-	2,44	41,6	-Teci- mento
	-	-	-	2,47	-	3,97	57,13	
				2,48	-	5,53	70,87	

TABELA 3.4 (continuação)

Exp. Nº	h (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	θ_0 (10^{-3} Rad)	OBS-
17L	9,525	120	25	2,69	3,25	1,53	16,2	- CE _l
	-	-	-	2,84	-	2,82	32,5	
	-	-	-	2,95	-	4,12	37,13	
	-	-	-	2,99	-	5,37	50,33	
18L	9,525	120	25	2,13	3,25	1,57	19,73	- EE _l
	-	-	-	2,74	-	2,74	42,74	
	-	-	-	3,02	-	4,10	53,91	
	-	-	-	2,87	-	5,76	71,44	
19L	9,525	120	25	2,60	3,25	1,66	17,90	- CE _l
	-	-	-	3,09	-	2,85	39,95	
	-	-	-	3,23	-	4,12	53,18	
	-	-	-	2,97	-	6,03	72,24	
20L	9,525	210	30	2,24	5,0	3,195	19,93	- CE _l
	-	-	-	2,64	-	5,43	43,17	

TABELA 3.5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA JUNTAS RESTRITAS (a/b > 3)

Exp Nº	h (mm)	b (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ_4 (mm)	δ_5 (mm)	δ_6 (mm)	OBS.
1R	3,175	800	90	23	2,504	2,5	1,056	-0,67	-2,67	-0,15	-0,51	-1,57	-2,83	-CE _t
	-	-	-	-	2,506	-	2,123	-0,86	-3,59	-0,87	-0,75	-2,45	-3,92	
2R	3,175	600	90	24	2,767	2,5	1,108	-0,95	0,46	1,44	1,05	1,31	0,76	-EE _t
	-	-	-	-	2,609	-	2,182	-1,14	0,18	1,25	1,22	1,80	1,08	
3R	-	-	-	-	2,527	-	3,267	-0,58	1,07	1,96	1,99	2,62	1,48	
	3,175	400	90	23	2,555	2,5	1,053	0,89	1,04	0,47	-1,09	-1,32	-0,69	-CE _t
4R	-	-	-	-	2,578	-	2,112	1,20	1,80	1,0	-1,21	-1,60	-0,63	
	-	-	-	-	2,588	-	3,150	1,82	2,36	1,31	-0,49	-0,76	-0,65	
5R	4,763	800	90	24	2,517	2,5	1,088	3,18	3,75	2,37	1,90	2,23	1,30	-CE _t
	-	-	-	-	2,628	-	2,036	4,94	6,28	3,91	3,42	4,25	2,59	
6R	-	-	-	-	2,691	-	2,989	6,58	8,28	5,63	5,10	6,15	3,90	
	4,763	800	90	23	2,63	2,5	1,130	2,17	3,15	2,47	2,49	3,12	2,12	-EE _t
5R	-	-	-	-	2,76	-	2,090	4,90	6,70	5,09	4,97	6,51	4,76	
	-	-	-	-	2,87	-	3,03	6,70	9,44	7,34	6,89	8,68	6,22	
6R	4,763	600	90	24	2,947	2,5	0,875	+1,09	+1,80	1,41	1,09	1,27	0,73	-EE _t
	-	-	-	-	2,994	-	1,718	1,82	2,97	2,75	1,11	1,17	0,47	
6R	-	-	-	-	3,047	-	2,537	3,08	4,67	3,66	2,75	3,12	1,89	

TABELA 3.5 (continuação)

Exp. No	h (mm)	b (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ_4 (mm)	δ_5 (mm)	δ_6 (mm)	OBS.
7R	4,763	400	90	24	2,431	2,5	0,901	0,80	1,17	0,82	0,93	1,13	0,78	-EE _t
	-	-	-	-	2,376	-	2,044	1,21	1,57	1,06	1,07	1,38	1,05	
	-	-	-	-	2,386	-	3,164	2,03	2,73	2,06	1,88	2,19	1,57	
8R	6,350	800	120	24	2,117	3,25	1,88	1,34	1,76	1,23	2,60	3,68	2,79	-EE _t
	-	-	-	-	2,28	-	3,51	2,97	4,02	2,96	4,29	5,97	4,50	
	-	-	-	-	2,37	-	5,05	4,14	5,69	4,44	5,83	7,65	5,74	
9R	6,350	600	120	24	2,75	3,25	1,32	0,44	1,15	1,07	1,17	1,30	0,76	-EE _t
	-	-	-	-	2,80	-	2,64	1,24	2,20	1,84	2,05	2,71	1,77	
	-	-	-	-	2,85	-	3,92	2,18	3,55	3,10	3,35	3,88	2,65	
10R	6,350	600	120	24	2,35	3,25	1,45	1,51	2,58	2,16	0,65	0,81	0,41	-CE _t
	-	-	-	-	2,44	-	2,88	2,55	4,16	3,35	1,88	2,50	1,60	
	-	-	-	-	2,53	-	4,14	3,28	5,20	4,25	2,25	3,10	2,03	
11R	6,350	600	120	24	2,14	3,25	1,74	3,13	3,06	2,79	2,80	3,87	2,88	-CE _t
	-	-	-	-	2,21	-	3,36	4,68	5,30	4,44	4,41	5,95	4,37	
	-	-	-	-	2,25	-	4,95	5,33	6,25	5,27	5,60	7,23	5,18	
12R	6,350	600	120	23	2,36	3,25	1,82	0,88	1,20	0,81	0,84	1,13	0,76	-EE _t
	-	-	-	-	2,68	-	3,15	1,71	2,26	1,59	1,67	2,29	1,68	
	-	-	-	-	2,93	-	4,28	2,78	3,79	2,90	3,23	4,02	2,88	

TABELA 3.5 (continuação)

Exp. No	h (nm)	b (nm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ρ_w (g/cm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ_4 (mm)	δ_5 (mm)	δ_6 (mm)	OBS.
13R	6,350	600	120	24	2,58	3,25	1,65	1,23	1,42	0,91	1,28	2,23	1,77	-CE _t
	-	-	-	-	3,23	-	2,66	2,64	3,25	2,25	2,56	4,01	3,17	
	-	-	-	-	3,50	-	3,71	3,06	3,85	2,88	3,41	4,87	3,70	
14R	6,350	400	120	24	2,56	3,25	1,61	0,82	1,31	0,63	0,69	1,14	0,73	-EE _t
	-	-	-	-	2,59	-	3,19	1,43	2,25	1,26	1,25	1,86	1,31	
	-	-	-	-	2,63	-	4,73	2,09	2,75	2,17	2,07	2,66	1,96	
15R	7,938	800	120	24	2,10	3,25	1,923	2,06	2,53	1,85	3,34	4,42	3,16	-EE _t
	-	-	-	-	2,30	-	3,53	5,19	5,56	4,06	5,89	7,91	5,81	
	-	-	-	-	2,40	-	5,06	7,78	7,15	5,40	7,53	9,69	7,15	
16R	7,938	600	120	24	2,21	3,25	1,65	2,17	2,83	1,98	1,98	2,59	2,04	-CE _t
	-	-	-	-	2,36	-	3,19	3,89	5,10	3,66	3,52	4,61	3,54	
	-	-	-	-	2,39	-	4,76	4,65	6,16	4,60	4,51	5,67	4,28	
17R	7,938	600	120	23	2,58	3,25	1,64	1,43	2,00	1,43	1,77	2,39	2,14	-EE _t
	-	-	-	-	2,95	-	2,80	2,93	3,99	2,89	3,41	4,59	4,16	
	-	-	-	-	3,21	-	3,87	3,44	4,79	3,66	4,09	5,30	4,81	
18R	7,938	400	120	24	2,23	3,25	1,70	0,62	0,95	0,62	0,84	1,08	0,75	-EE _t
	-	-	-	-	2,29	-	3,27	1,21	1,71	1,09	1,55	2,05	1,46	
	-	-	-	-	2,37	-	4,81	1,74	2,49	1,79	2,31	2,88	2,07	

TABELA 3.5 (continuação)

Exp. Nº	h (mm)	b (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/s)	d (mm)	ω (g/cm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ_4 (mm)	δ_5 (mm)	δ_6 (mm)	OBS.
19R	9,525	800	120	24	2,49	3,25	1,63	1,88	2,74	2,12	3,12	3,96	2,55	- EE _t
	-	-	-	-	2,52	-	3,16	4,01	5,69	4,37	5,59	7,23	4,80	
	-	-	-	-	2,51	-	4,76	4,76	6,66	5,33	6,65	8,16	5,65	
20R	9,525	600	120	24	2,26	3,25	1,76	1,20	1,99	1,04	1,17	1,65	1,06	- CE _t
	-	-	-	-	2,28	-	3,38	2,26	3,75	2,10	2,20	3,35	1,93	
	-	-	-	-	2,31	-	5,01	2,81	4,72	2,80	2,90	4,15	2,38	
21R	9,525	600	120	23	2,24	3,25	1,94	1,57	2,16	1,74	2,12	2,68	1,87	-EE _t
	-	-	-	-	2,34	-	3,68	2,99	4,01	3,20	3,72	4,78	3,51	
	-	-	-	-	2,38	-	5,48	3,69	4,92	4,05	4,55	5,70	4,18	
22R	9,525	400	120	24	2,29	3,25	1,70	0,70	1,06	0,77	0,91	1,18	0,80	-EE _t
	-	-	-	-	2,40	-	3,27	1,35	2,01	1,50	1,72	2,24	1,57	
	-	-	-	-	2,50	-	4,79	1,67	2,44	1,88	2,13	2,62	1,84	

OBS:- As deformações transversais δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 e δ_6 foram medidas de acordo c/o posicionamento indicado na Figura ao lado.

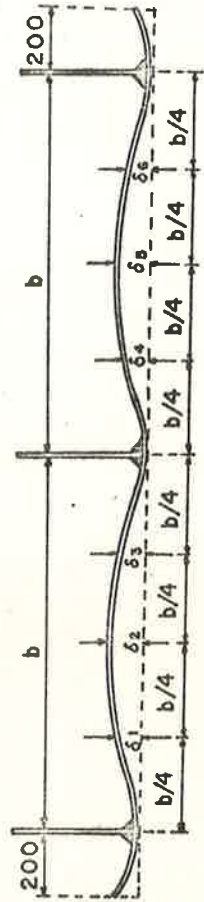


TABELA 3.6 - Taxas de Deposição do Eletrodo AWS E 6013

d (mm)	I (A)	η
2,5	90	0,503
3,25	120	0,576
4,0	160	0,648
5,0	210	0,651

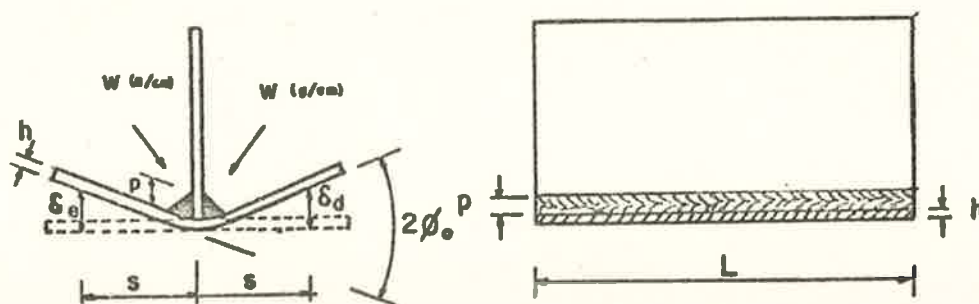


FIGURA 3.6 - Representação Esquemática de uma Junta Livre Deformada - Indicação das Variáveis Envolvidas.

CAPITULO IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Observações Iniciais

O objetivo principal deste capítulo é, através da análise dos resultados obtidos experimentalmente, propor um método para a previsão das deformações.

Não menos importante, contudo, foi a análise que realizada paralelamente aos ensaios, possibilitou orientar e relacionar o conjunto de ensaios que serviriam de base para o desenvolvimento do método. A esse respeito, são apresentados a seguir, algumas observações sobre a influência de determinadas variáveis nos níveis finais de deformação.

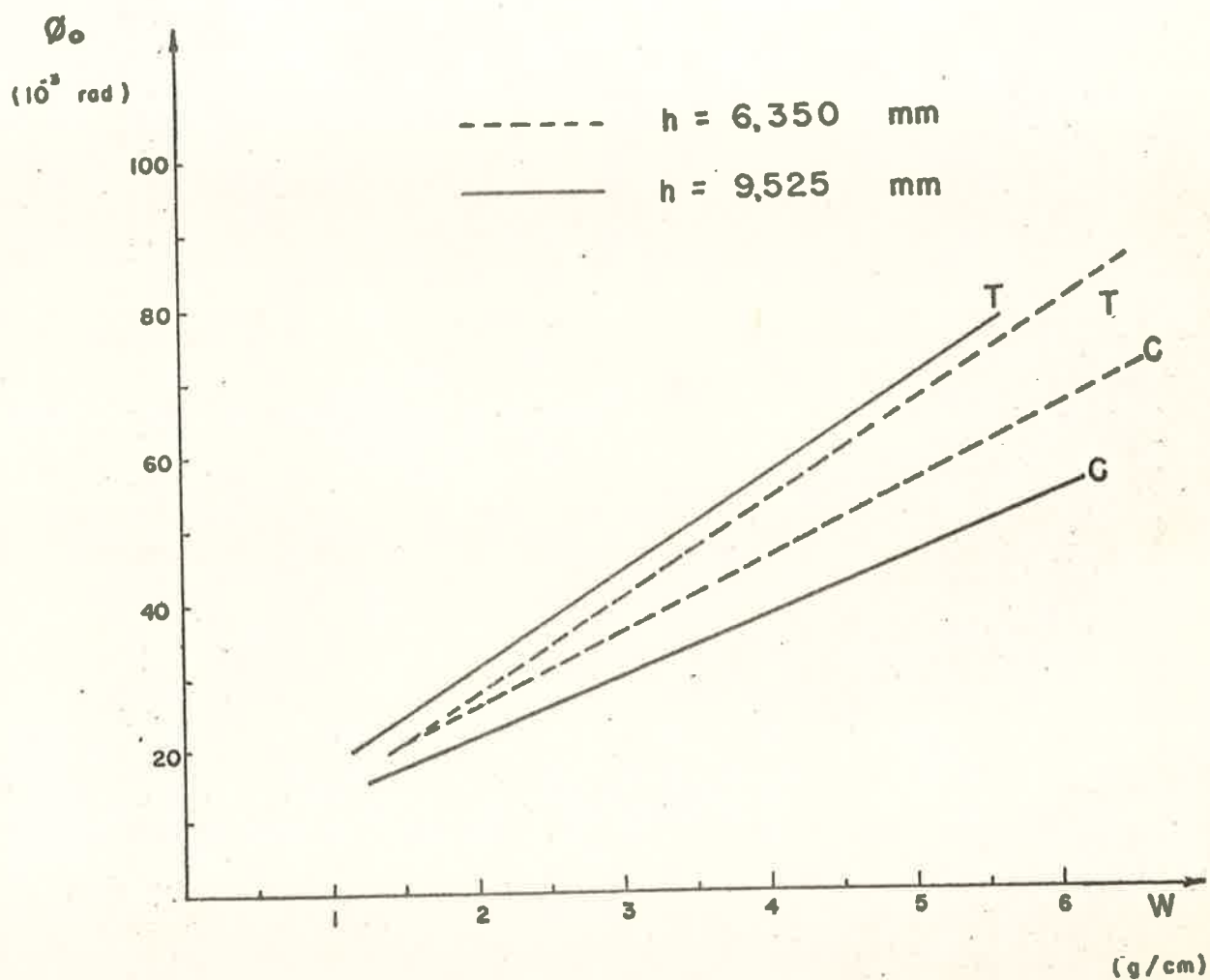
4.1.1 - Quanto ao Tipo de Passe

A investigação feita para a escolha do tipo de passe demonstrou, que o passe tipo cordão ocasiona níveis de deformação inferiores aos ocasionados pelo passe tipo tecimento. Fato este que pode ser constatado na Figura 4.1.

Para a continuidade do estudo, foram apenas consideradas as experiências realizadas com passe tipo cordão. Pode-se considerar tal decisão plenamente justificável, uma vez que a filosofia deste estudo, é propor um método que preveja os máximos níveis de deformações em painéis estruturais soldados, utilizando processos de soldagem que provoquem as menores deformações possíveis.

4.1.2 - Quanto ao Diâmetro do Eletrodo

Durante as experiências foi verificado que eletrodos de maior diâmetro, utilizando correntes com amperagens maiores, induziram níveis de deformação inferiores aos causados pelos eletrodos de menor diâmetro; fato este que pode ser constatado no gráfico da Figura 4.2.



C - Passe Tipo Cordão
T - Passe Tipo Tecimento

FIGURA 4.1 - Influência do Tipo de Passe nos Níveis de Deformação.

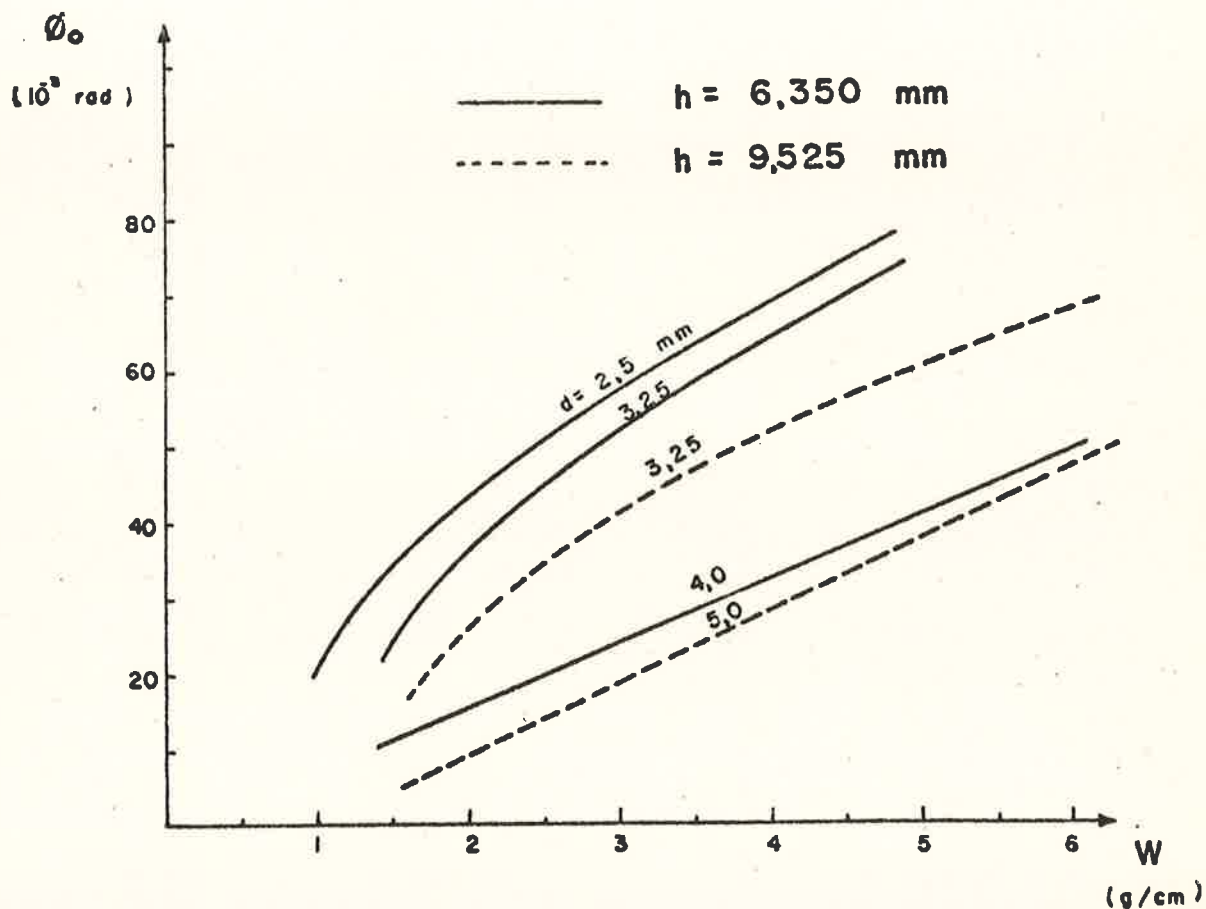


FIGURA 4.2 - Influência do Diâmetro de Eletrodo nos Níveis de Deformação.

Este comportamento pode ser explicado pelos efeitos de uma maior penetração dos eletrodos de menor diâmetro, e também, pelo aumento do nível de rigidez da junta soldada, ao se executar os primeiros passes com eletrodo de maior diâmetro.

Constatada a dependência dos níveis de deformação - em relação aos diâmetros dos eletrodos, decidiu-se por fixar, para cada faixa de espessura, um diâmetro de eletrodo (e a corrente de soldagem) que fosse o maior possível compatível com o tipo de junta soldada, uma vez que a utilização de altas correntes de soldagem, próprias dos eletrodos de maior diâmetro, aumentava a tendência de ocorrer mordeduras, tanto na chapa base como no reforço. Dentro deste critério decidiu-se, para a continuidade do estudo, utilizar os valores de diâmetro de eletrodo e corrente de soldagem conforme a Tabela 4.1 abaixo:

TABELA 4.1 - Diâmetros de Eletrodo e Correntes de Soldagem Seleccionadas por Espessura da Chapa Base.

h (mm)	d (mm)	I (A)
3,175	2,5	90
4,763	2,5	90
6,350	3,25	120
7,938	3,25	120
9,525	3,25	120

Não obstante, procurou-se encontrar um meio, conforme será visto mais adiante, de relacionar o diâmetro de eletrodo e a corrente de soldagem com os níveis de deformação. Uma vez que a ocorrência de mordeduras, pode ter sido causada por um manejo inadequado do eletrodo por parte do soldador.

4.1.3 - Quanto à Sequência de Soldagem Longitudinal

A Figura 4.3 apresenta uma confrontação entre os resultados dos ensaios realizados com diferentes sequências de soldagem longitudinal. Conforme pode ser constatado, as experiências com corpos de prova de mesma espessura, realizadas com sequência de soldagem (CE_l) apresentaram níveis de deformação inferiores - aos das experiências realizadas com a sequência (EE_l). Por este motivo, resolveu-se adotar apenas a sequência (CE_l) para a continuidade do estudo.

4.1.4 - Quanto à Sequência de Soldagem Transversal

No que se refere à sequência de soldagem transversal, para o caso das juntas restritas, não se pôde chegar a um resultado conclusivo sobre qual das sequências (CE_t ou EE_t) induz os menores níveis de deformação, pois, conforme pode ser constatado nos gráficos da Figura 4.4, para os casos em que foram utilizadas as duas sequências transversais, dois apresentaram-se favoráveis à sequência (CE_t) e os outros dois à sequência (EE_t).

Após a realização de um grande número de ensaios experimentais, surgiu a dúvida quanto a adequacidade dos corpos de prova com apenas dois tramos, para se estudar as sequências de soldagem transversal. Diante disso, e das impossibilidades práticas, para a realização de mais ensaios, decidiu-se por utilizar na continuidade do estudo, apenas os resultados obtidos com a sequência (EE_t). Este procedimento, apesar da incerteza quanto a adequacidade da sequência adotada, garantirá a coerência das formulações propostas, facilitando, portanto, suas aplicações em estudos futuros.

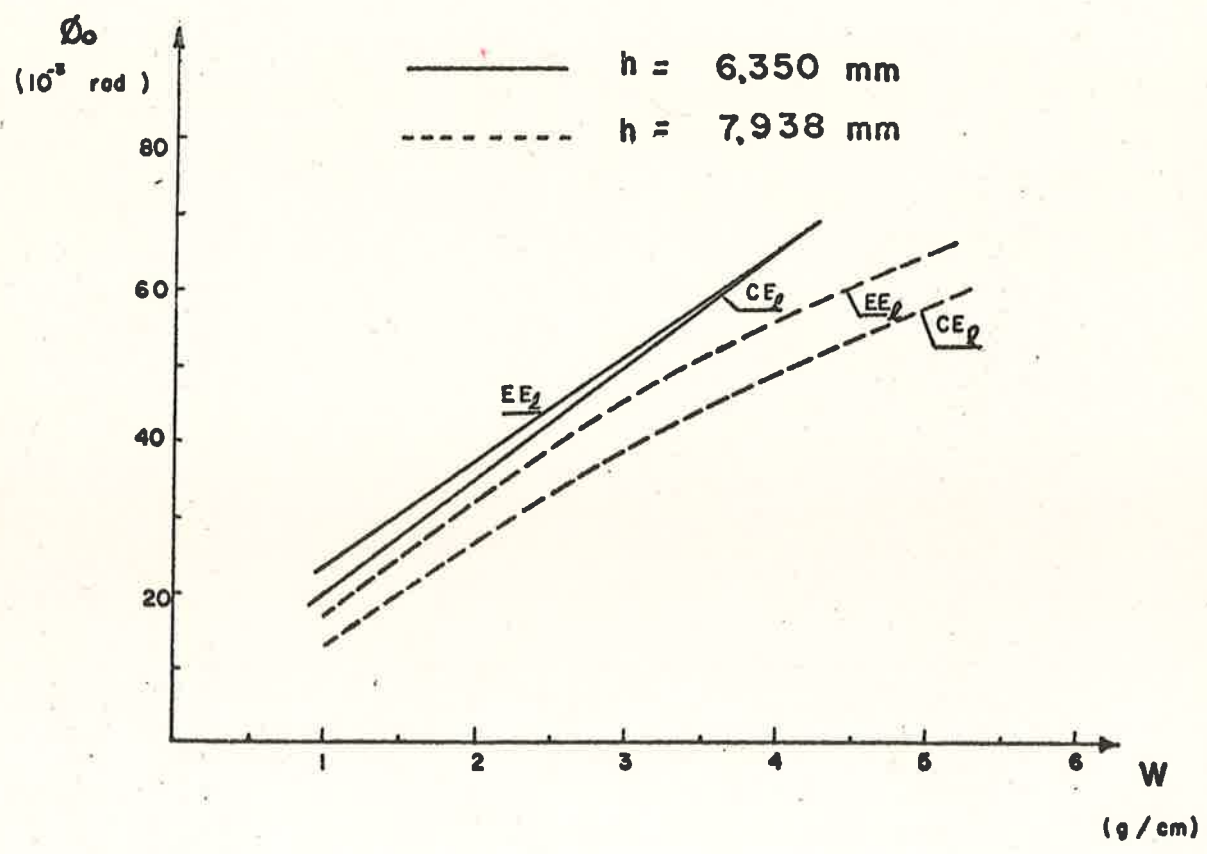
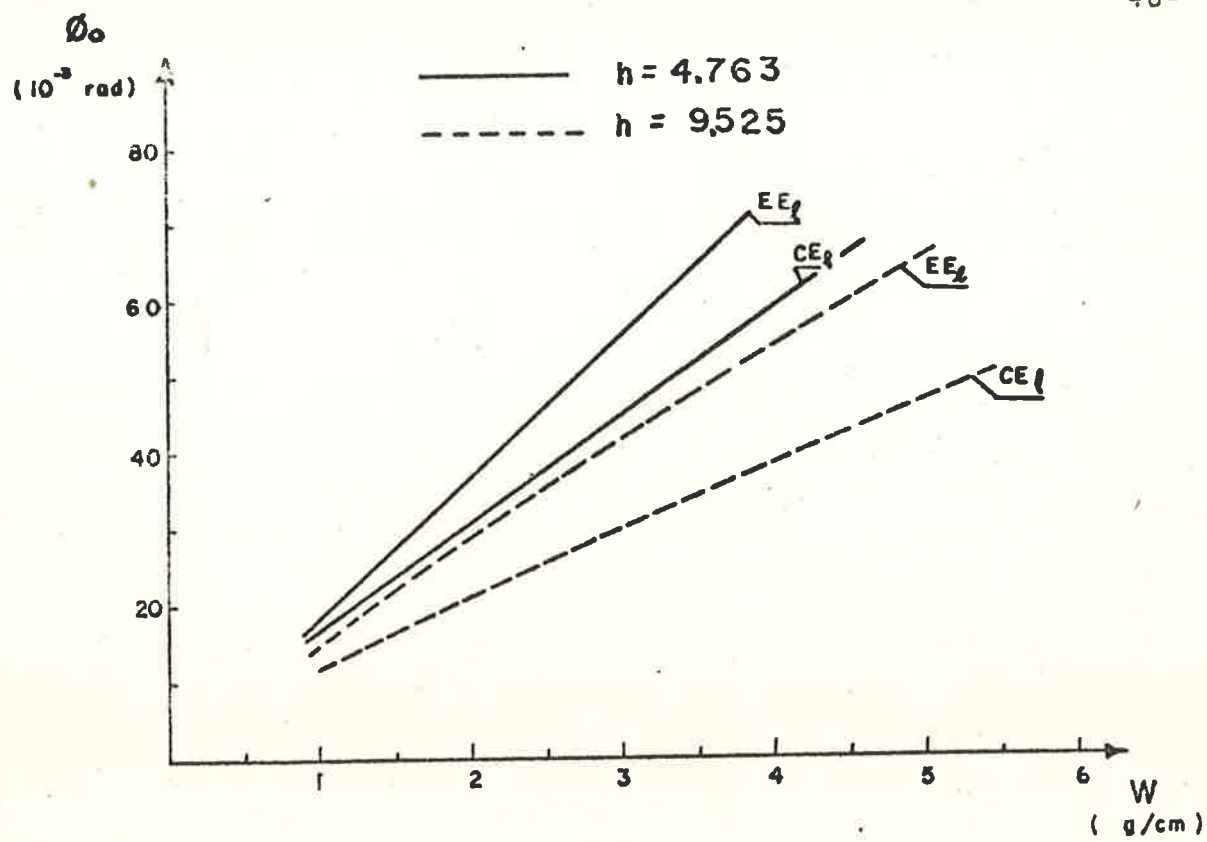


FIGURA 4.3 - Influência da Sequência de Soldagem Longitudinal nos Níveis de Deformação

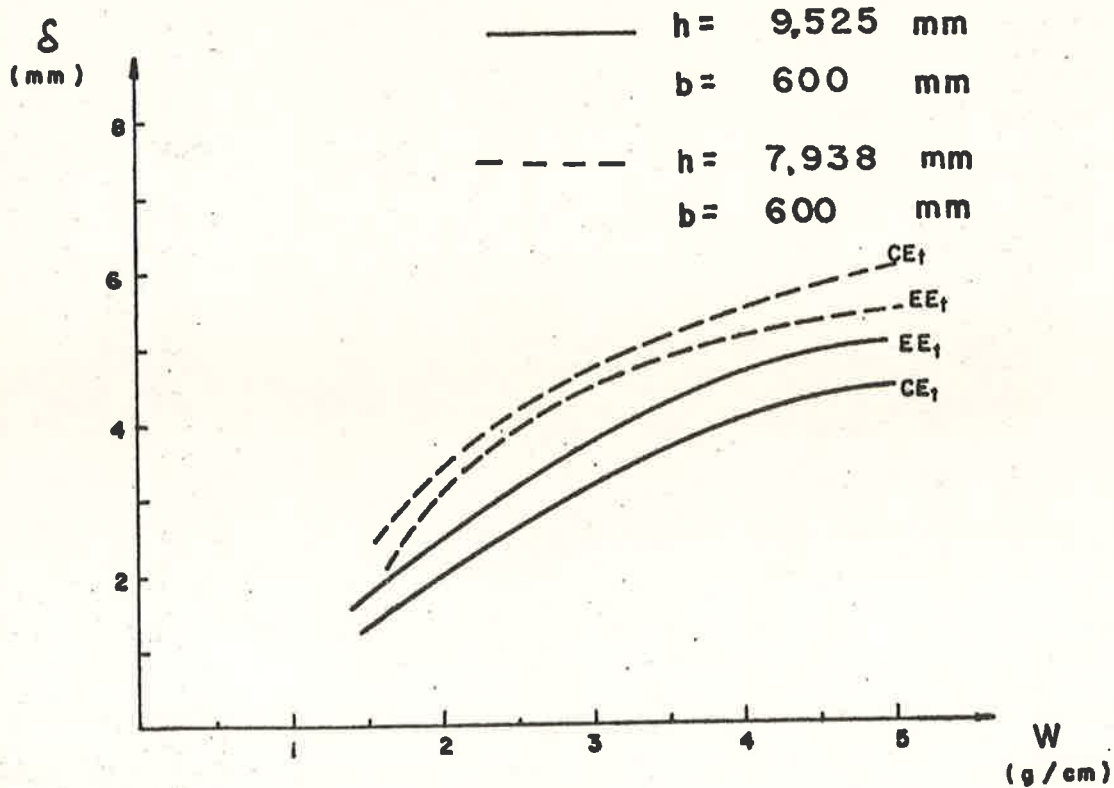
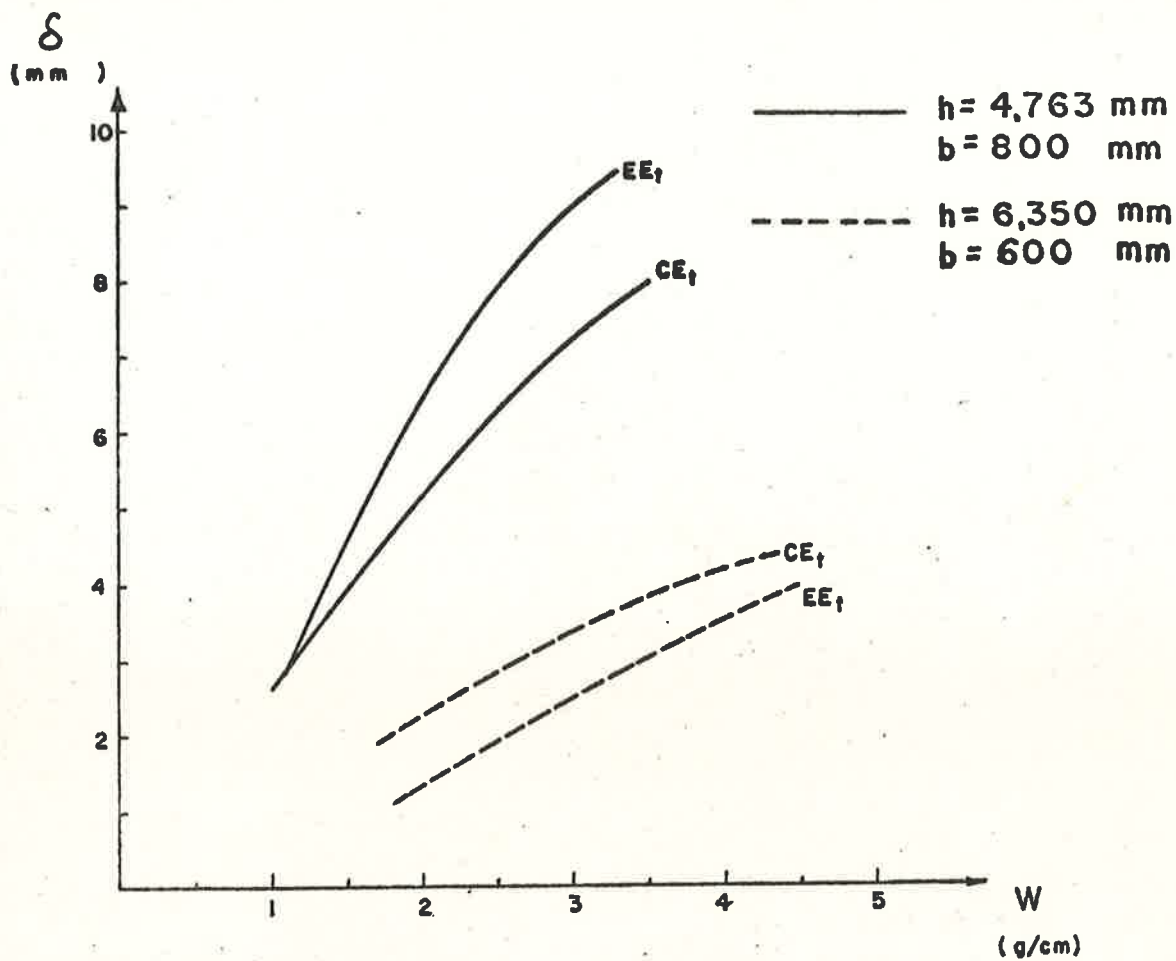


FIGURA 4.4 - Influência da Sequência de Soldagem Transversal nos Níveis de Deformação

4.1.5 - Quanto à Espessura da Chapa Base

Conforme pode ser constatado nas Tabelas 3.5, relativas às juntas restritas, os corpos de prova com chapas de 3,175mm de espessura apresentaram valores negativos de deformação transversal, isto é, as flechas no meio dos vãos eram dirigidas para baixo, ao invés, de seguir a tendência usual de apresentar a concavidade voltada para baixo. Este fato muito provavelmente seja indicativo de que, para chapas de espessura em torno de 3,175mm, existe um outro fenômeno envolvido nas transformações térmica e mecânica que ocorrem na chapa, como por exemplo - um caso de instabilidade da estrutura provocada pela contração longitudinal do filete. Uma vez que a análise deste problema foge ao escopo do presente estudo, merecendo inclusive uma pesquisa específica, decidiu-se por não incluir na continuidade da análise, os resultados obtidos com juntas restritas de 3,175mm de espessura.

4.2 - Análise Baseada nos Métodos Existentes

De posse do conjunto selecionado de dados experimentais, pode-se dar continuidade à análise comparativa apresentada no Capítulo II, procurando com isso, além de sanar algumas dúvidas referentes à confiabilidade e utilização, verificar também a possibilidade de adaptação dos métodos ali analisados, ao atual conjunto de dados experimentais.

Os níveis de deformações angulares para as juntas livres (θ_0) e juntas restritas (θ), obtidas experimentalmente, são respectivamente apresentadas nos gráficos das Figuras 4.5 e 4.6, os quais foram colocados em função da espessura (h), para valores constantes de $\log_{10} \omega$.

Para as juntas restritas, os valores das deformações angulares (θ), utilizados para a elaboração dos gráficos, foram calculados de maneira idêntica à feita no método de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾, ou seja,

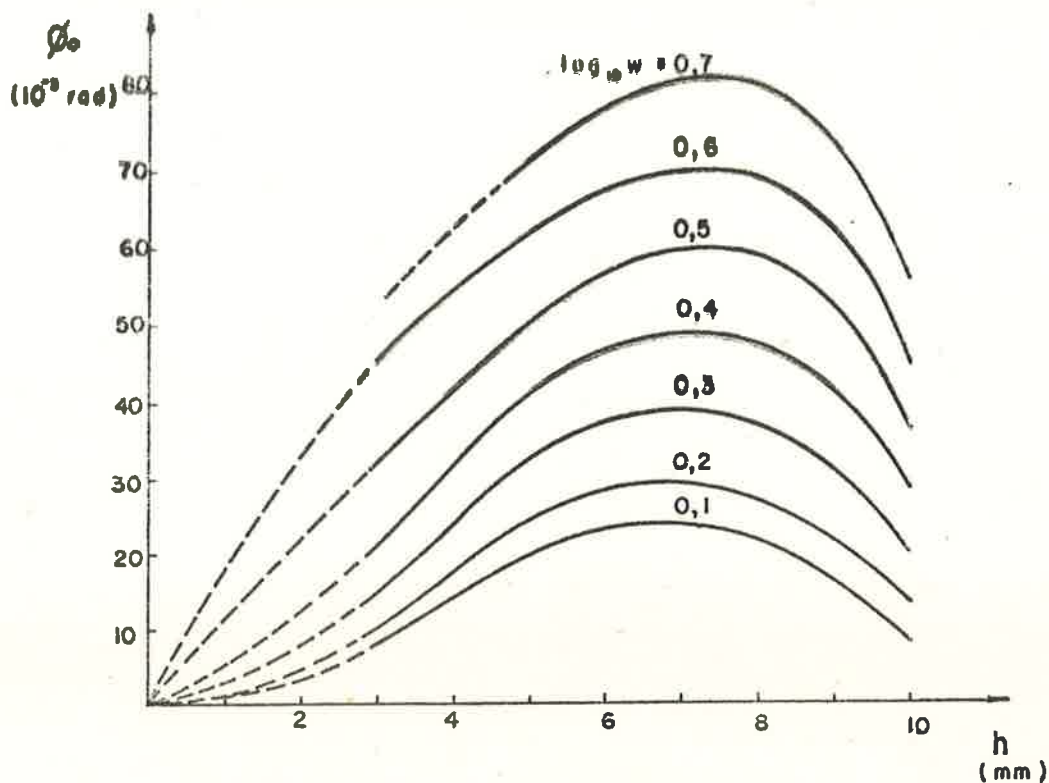


FIGURA 4.5 - Deformação Angular para as Juntas Livres - Resultados Experimentais

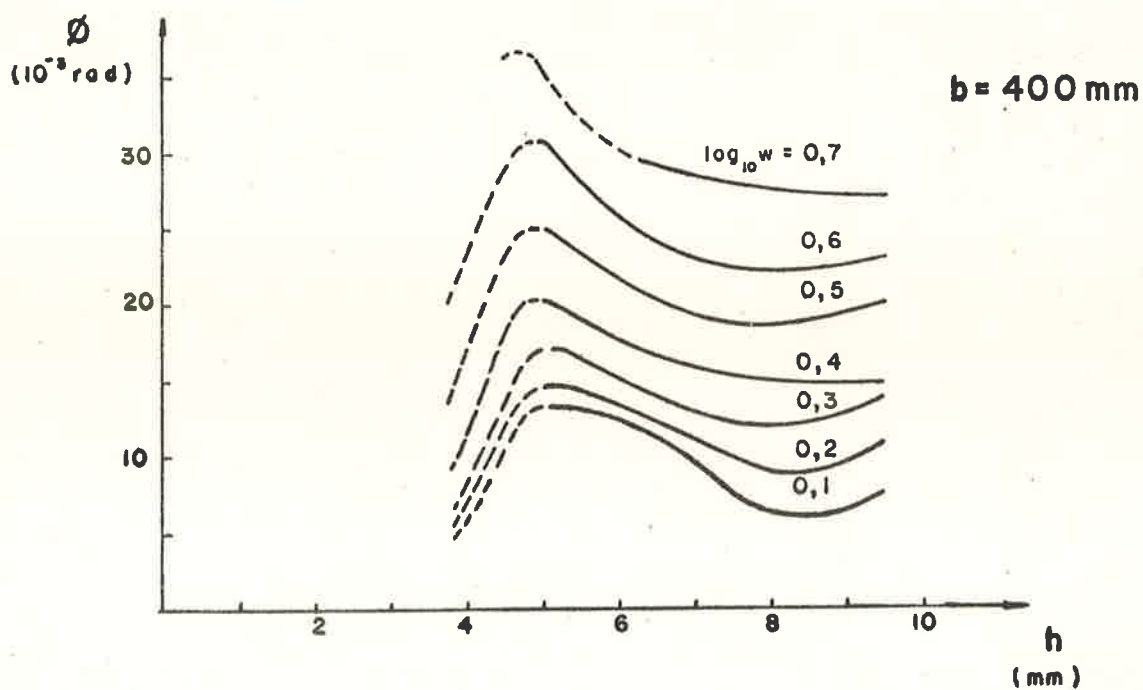


FIGURA 4.6 - Deformação Angular para as Juntas Restritas - Resultados Experimentais

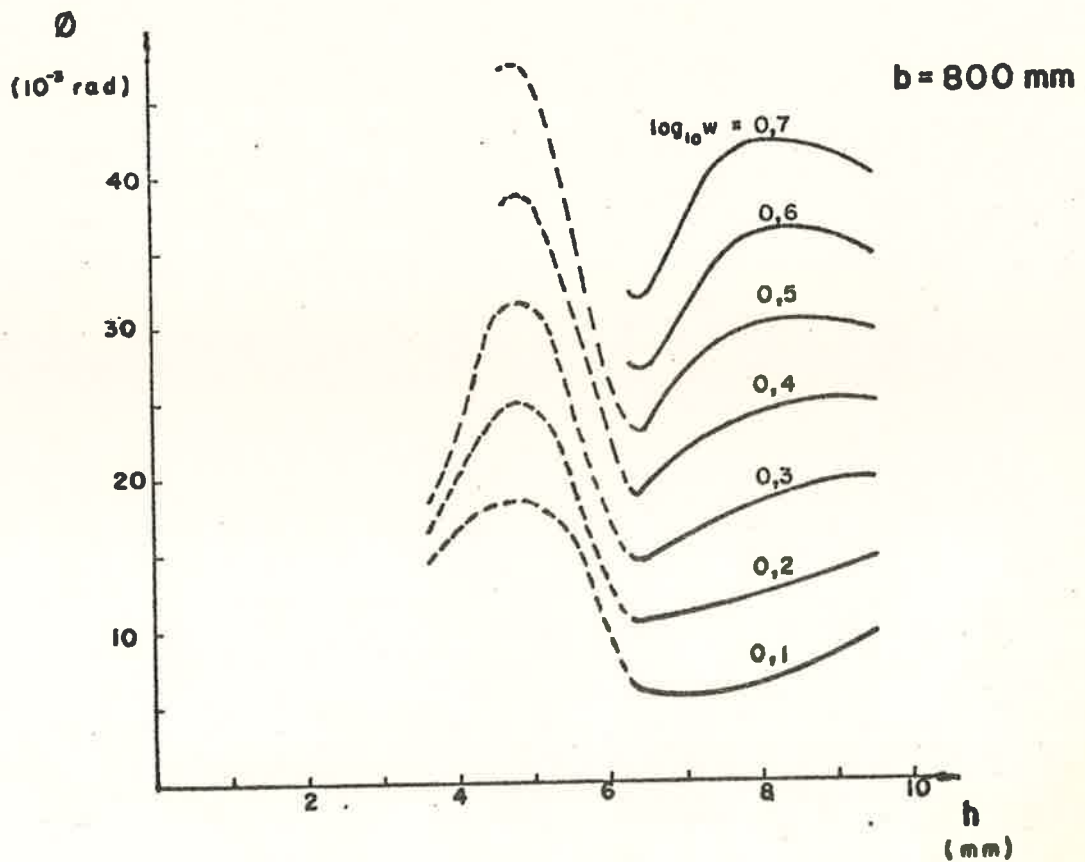
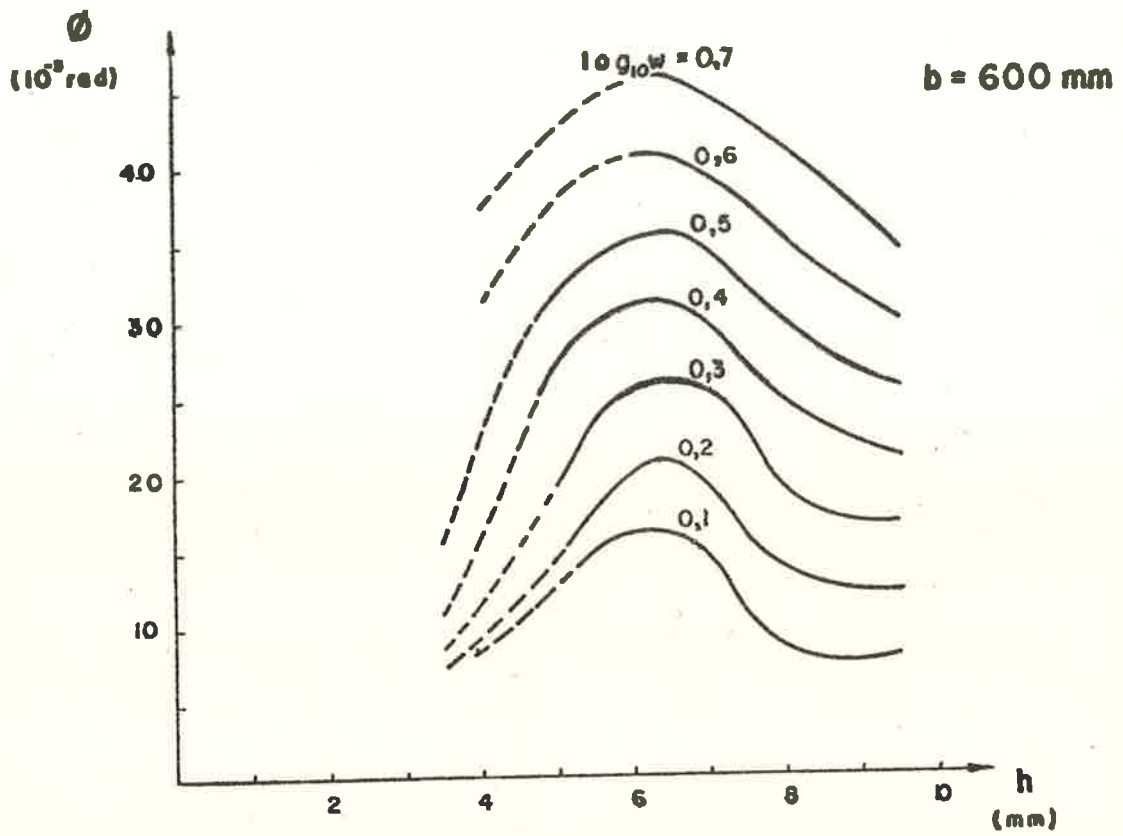


FIGURA 4.6 - Deformação Angular para as Juntas Restritas - Resultados Experimentais

$$\emptyset = \frac{\delta}{4b} \quad (4.1)$$

onde, δ foi tomado como sendo o valor médio das deformações transversal nos centros dos dois tramos, conforme a relação 4.2, abaixo

$$\delta = \frac{\delta_2 + \delta_5}{2} \quad (4.2)$$

Nesses gráficos, apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, apenas as curvas relativas ao vão de 800mm apresentaram um comportamento inesperado; onde para a espessura de 4,7625mm, os níveis de deformação (\emptyset) foram excessivamente altos, superando inclusive os níveis de deformação das juntas livres, em casos equivalentes. A ocorrência deste fato, muito provavelmente, deve estar ligada a problemas de estabilidade estrutural, merecendo por isso, um tratamento diferente ao que vem sendo dado neste estudo. Dessa forma resolveu-se desconsiderar os resultados obtidos com o corpo de prova de 4.7625mm de espessura e 800mm de vão, mesmo porque verificou-se que painéis com essas características são raramente utilizados na prática.

Os gráficos da Figura 4.7 apresentam, para as juntas livres de até 10mm de espessura, as curvas obtidas através dos resultados experimentais (Figura 4.5), juntamente com as curvas obtidas de OKERBLOM⁽⁷⁾ e HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾ (Figura 2.2), para valores de $\log_{10}\omega$ correspondentes. Por esses gráficos, pode-se observar que as curvas obtidas experimentalmente, possuem a mesma tendência das fornecidas por HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾, o mesmo não acontecendo em relação às curvas obtidas através do método de OKERBLOM⁽⁷⁾.

O fato dos níveis de deformação fornecidos pelas curvas de HIRAI e NAKAMURA⁽⁵⁾ serem sempre inferiores aos obtidos experimentalmente, deve-se provavelmente à utilização de eletrodos de maior diâmetro nos ensaios realizados por aqueles autores, o que de certa forma demonstra, não ter havido uma preocupação quanto à

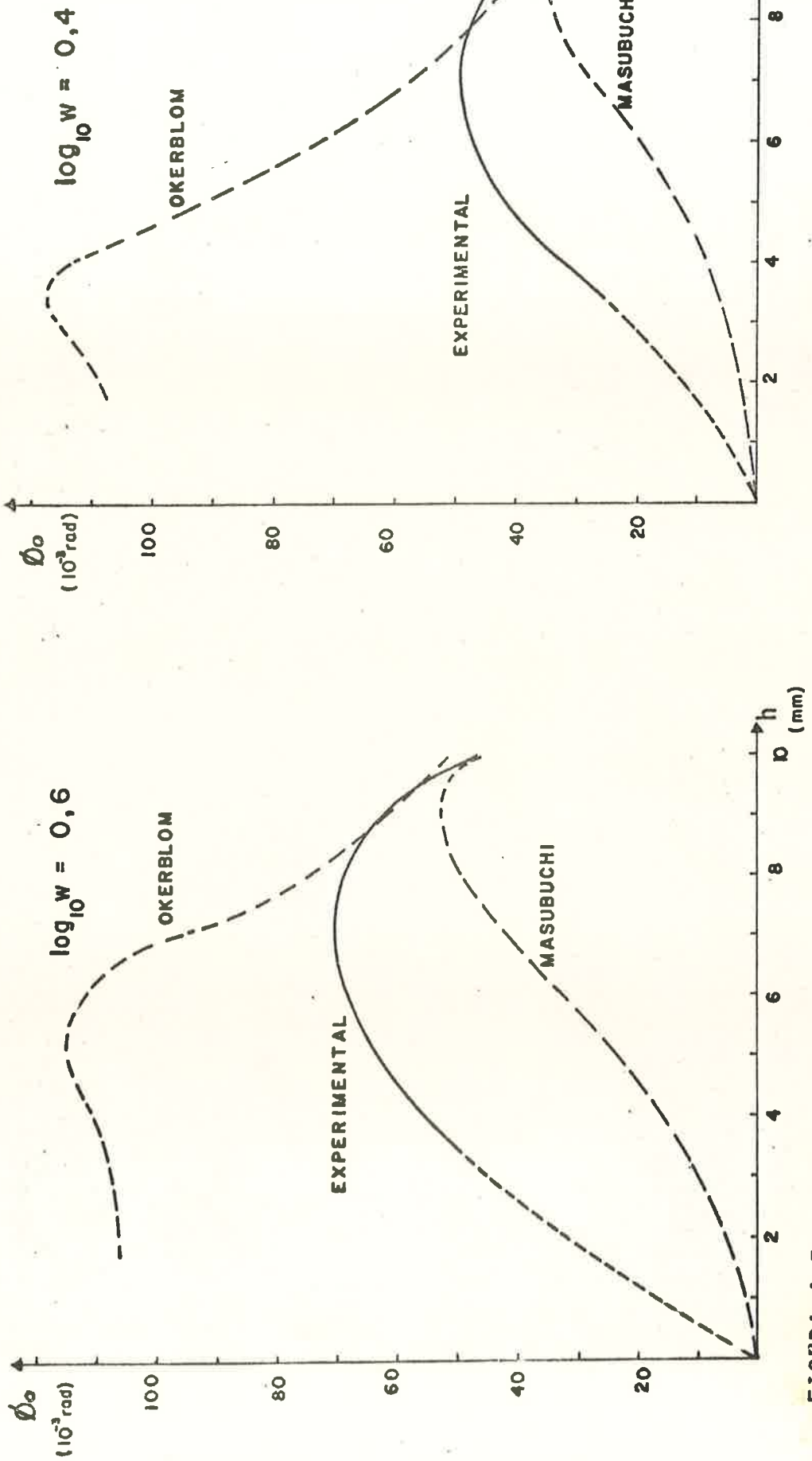


FIGURA 4.7 - Deformação Angular em Juntas Livres - Gráficos Comparativos entre os Resultados Experimentais e os Propostos por OKERBLOM e MASUBUCHI

qualidade da junta soldada, principalmente quando a mesma era formada de chapas finas.

A tendência das curvas apresentadas na Figura 4.7, parece demonstrar haver uma razoável concordância entre elas, em espessuras acima de 10mm. Dessa forma, pode-se concluir, que para a mesma quantidade de solda depositada, os níveis de deformação - para as chapas finas, são mais susceptíveis às variações das condições de soldagem, do que os níveis de deformação que ocorrem - nas chapas grossas.

A não concordância das curvas para o caso das juntas livres de espessuras até 10mm, faz com que seja desnecessária a mesma espécie de confrontação para o caso das juntas restritas. Uma vez que tanto o método de OKERBLOM⁽⁷⁾ como o de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ relativos às juntas restritas, utilizaram-se dos resultados das juntas livres.

Quanto a possibilidade de aplicação da metodologia desenvolvida nesses dois estudos, ao conjunto de dados experimentais, apenas a desenvolvida por MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ mereceu maiores atenções. A não tentativa de aplicação do método de OKERBLOM⁽⁷⁾, ao conjunto de dados experimentais, deve-se à constatação experimental de que as deformações angulares são afetadas pela existência de elementos restritos, fato este, que contraria hipótese feita no estudo de OKERBLOM⁽⁷⁾.

No Apêndice A é apresentada a metodologia desenvolvida por MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾, também utilizada por TANIGUCHI⁽⁹⁾ para painéis de alumínio, que se baseia na aplicação do princípio da mínima energia potencial armazenada na estrutura.

Pelo método de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ chega-se às seguintes relações:

$$\theta = F_R \theta_0 \quad (4.3)$$

$$F_R = \frac{1}{1 + \frac{2D}{b} \frac{1}{c}} \quad (4.4)$$

onde:

θ - Deformação angular para as juntas restritas (rad)

θ_0 - Deformação angular para as juntas livres (rad)

F_R - Fator de restrição

b - Distância entre reforços (vão) (mm)

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$$

h - Espessura da chapa base (mm)

E - Módulo de Elasticidade ($E_{\text{aço}} = 21.000 \text{Kg/mm}^2$ - Ref.19)

ν - Coeficiente de Poisson ($\nu_{\text{aço}} = 0.3$ - Referência 19)

C - Coeficiente determinado pelas condições de soldagem e pelas características geométricas da estrutura (Kg.mm/mm)

A adaptação desse método ao atual conjunto de dados experimentais, foi feita através do coeficiente "C", apresentado na Tabela 4.2.

Para o cálculo dos valores do coeficiente "C", utilizou-se da Relação 4.5 abaixo, derivada das Relações 4.3 e 4.4

$$C = \frac{2D}{b} \frac{\theta}{\theta_0 - \theta} \quad (4.5)$$

Conforme pode ser verificado na Tabela 4.2, o coeficiente "C", para a mesma combinação de espessura (h) e peso de eletrodo consumido (w), apresenta valores acentuadamente diferentes - para cada vão (b), fato este que não ocorreu tanto no estudo de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ como no de TANIGUCHI⁽⁹⁾ para o alumínio, onde são apresentadas relações de "C" como função apenas de (h) e (w). A falta deste tipo de correlacionamento, até mesmo para cada vão em separado, de certa forma, vem mostrar a inviabilidade de generalização de aplicação do método da mínima energia potencial para o caso das chapas finas.

TABELA 4.2 - Coeficiente "C" (10^3 Kg.mm/mm)

ω (g/cm)	$\log_{10}\omega$	b (mm)	h (mm)			
			4,76	6,35	7,94	9,52
1,26	0,1	400	2,12	2,26	1,94	12,46
		600	1,12	3,44	2,06	8,31
		800	-	0,41	0,91	14,73
1,58	0,2	400	1,57	1,87	2,34	12,46
		600	0,88	4,31	3,32	12,09
		800	-	0,70	1,93	20,08
2,00	0,3	400	1,14	1,45	2,26	9,33
		600	0,81	3,52	3,47	9,62
		800	-	0,74	2,22	13,13
2,51	0,4	400	1,05	1,32	2,20	6,08
		600	1,27	3,06	3,52	8,02
		800	-	0,81	2,43	10,39
3,16	0,5	400	-	1,34	2,23	6,65
		600	-	2,70	3,40	7,41
		800	-	0,80	2,47	7,91
3,98	0,6	400	-	1,33	2,28	6,07
		600	-	2,40	3,39	6,78
		800	-	0,80	2,55	7,31
5,01	0,7	400	-	1,39	2,54	5,54
		600	-	2,27	3,41	6,26
		800	-	0,82	2,59	6,64

TABELA 4.2 - Coeficiente "C" (10^3 Kg.mm/mm)

ω (g/cm)	$\log_{10}\omega$	b (mm)	h (mm)			
			4,76	6,35	7,94	9,52
1,26	0,1	400	2,12	2,26	1,94	12,46
		600	1,12	3,44	2,06	8,31
		800	-	0,41	0,91	14,73
1,58	0,2	400	1,57	1,87	2,34	12,46
		600	0,88	4,31	3,32	12,09
		800	-	0,70	1,93	20,08
2,00	0,3	400	1,14	1,45	2,26	9,33
		600	0,81	3,52	3,47	9,62
		800	-	0,74	2,22	13,13
2,51	0,4	400	1,05	1,32	2,20	6,08
		600	1,27	3,06	3,52	8,02
		800	-	0,81	2,43	10,39
3,16	0,5	400	-	1,34	2,23	6,65
		600	-	2,70	3,40	7,41
		800	-	0,80	2,47	7,91
3,98	0,6	400	-	1,33	2,28	6,07
		600	-	2,40	3,39	6,78
		800	-	0,80	2,55	7,31
5,01	0,7	400	-	1,39	2,54	5,54
		600	-	2,27	3,41	6,26
		800	-	0,82	2,59	6,64

As grandezas fundamentais apresentadas entre colchetes, possuem os seguintes significados:

- L - comprimento
- T - tempo
- M - massa
- Q - carga elétrica

Para a verificação do número de grupos adimensionais independentes, que podem ser utilizados para representar o fenômeno em questão, aplicou-se o teorema de π de Buckingham. Com essa finalidade montou-se a matriz dimensional do problema que é apresentada abaixo:

	h	b	d	v	ω	V	I
M	0	0	0	0	1	1	0
L	1	1	1	1	0	2	0
T	0	0	0	-1	-2	-2	-1
Q	0	0	0	0	0	-1	1

A maior matriz quadrada dessa matriz base cujo o determinante é diferente de 0 (zero) e formado pelas colunas de v, ω , V e I.

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = -1$$

Resultando com isso, que a característica da matriz dimensional é igual a quatro (4). Portanto, pelo teorema de π de Buckingham, verifica-se que o número de grupos adimensionais independentes será igual a três (3), ou seja, o valor obtido subtraindo-se do número total de variáveis independentes, o valor da característica da matriz dimensional (NQ de grupos adimensionais = $7 - 4 = 3$).

Verificado o número de grupos dimensionais que inter-
vêm no problema, a determinação desses grupos é feita a partir -
da representação funcional (4.6), que substituindo o seu segundo
membro por uma série infinita, apresenta-se como abaixo:

$$\delta = (K_1 h^{A_1} b^{B_1} d^{C_1} v^{D_1} \omega^{E_1} V^{F_1} I^{G_1}) + (K_2 h^{A_2} b^{B_2} d^{C_2} v^{D_2} \omega^{E_2} V^{F_2} I^{G_2}) + \dots (4.7)$$

onde $K_1, K_2 \dots$ são coeficientes dimensionais e $A_1, B_1, \dots, A_2, B_2, \dots$, são os expoentes requeridos pela série.

Uma vez que cada um dos termos da Equação anterior de-
ve ter as mesmas dimensões (princípio da homogeneidade dimensio-
nal), na representação dimensional da Equação 4.6, basta inclu-
ir apenas um único termo da série. Dessa forma, suprimindo-se o
subíndice dos expoentes e expressando a equação dimensionalmente
obtem-se:

$$[L] \equiv [L]^A [L]^B [L]^C \left[\frac{L}{T} \right]^D \left[\frac{M}{T^2} \right]^E \left[\frac{M L^2}{Q T^2} \right]^F \left[\frac{Q}{T} \right]^G$$

Igualando os expoentes das grandezas fundamentais em -
ambos os membros, obtém-se as seguintes equações:

$$\text{para } L : \quad A + B + C + D + 2F = 1$$

$$\text{para } M : \quad D + 2E + 2F + G = 0$$

$$\text{para } T : \quad E + F = 0$$

$$\text{para } Q : \quad G - F = 0$$

Como existem sete incôgnitas e apenas quatro equações,
pode-se obter quatro das incôgnitas em função das outras três

$$C = 1 + D - B - A$$

$$E = -D$$

$$F = -D$$

$$G = -D$$

Substituindo os expoentes do primeiro termo da Equação
4.6, obtém-se:

$$\delta = K(h^A \cdot b^B \cdot d^{1+D-B-A} v^D \omega^D v^{-D} I^{-D})$$

Agrupando as variáveis com os mesmos expoentes e estendendo o resultado aos outros termos da série, resulta

$$\frac{\delta}{d} = K_1 \left(\frac{h}{d} \right)^{A_1} \left(\frac{b}{d} \right)^{B_1} \left(\frac{\omega d v}{V I} \right)^{D_1} + K_2 \left(\frac{h}{d} \right)^{A_2} \left(\frac{b}{d} \right)^{B_2} \left(\frac{\omega d v}{V I} \right)^{D_2} + \dots$$

Voltando à representação funcional da série, tem-se:

$$\frac{\delta}{d} = f \left[\left(\frac{h}{d} \right), \left(\frac{b}{d} \right), \left(\frac{\omega d v}{V I} \right) \right] \quad (4.8)$$

Uma outra tentativa, para relacionar as sete variáveis independentes com os níveis de deformação, foi feita através dos momentos inerentes, os quais representados esquematicamente na Figura (4.8), são considerados constantes ao longo de toda a junta soldada. Como no caso das deformações transversais, os momentos inerentes foram considerados dependentes das mesmas sete variáveis, ou seja

$$M = f_1 (h, b, d, v, \omega, V, I) \quad (4.9)$$

obtendo-se pela análise dimensional, a seguinte representação funcional

$$\frac{M}{\omega d} = f_1 \left[\left(\frac{h}{d} \right), \left(\frac{b}{d} \right), \left(\frac{\omega d v}{V I} \right) \right] \quad (4.10)$$

onde:

M - Momentos inerentes constantes ao longo da junta soldada

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] \text{ (momento por unidade de comprimento)}$$

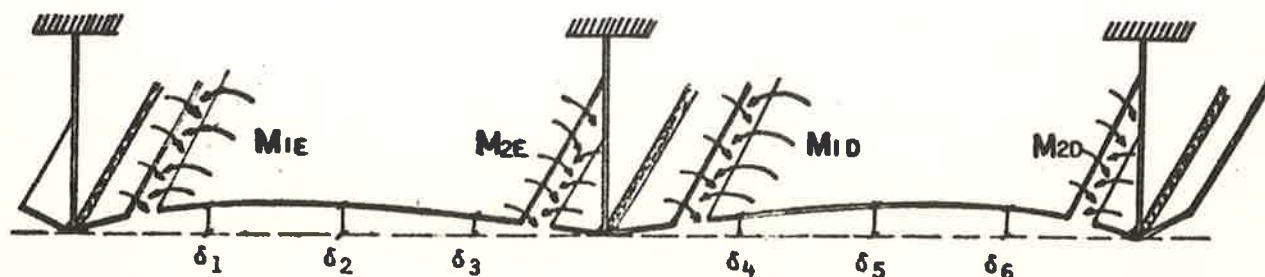


FIGURA 4.8 - Representação Esquemática dos Momentos Inerentes Distribuídos ao Longo da Junta Soldada do Corpo de Prova.

Desenvolvendo a análise dimensional de maneira análoga, encontrou-se a seguinte representação funcional para a deformação angular (θ_0), para o caso das juntas livres.

$$\theta_0 = f_2 \left[\left(\frac{h}{d} \right), \left(\frac{\omega dv}{VI} \right) \right] \quad (4.11)$$

A diminuição do número de grupos adimensionais deve-se à eliminação da influência do vão entre enrijecedores (b), sobre os níveis de deformação (θ_0), para o caso das juntas livres.

4.3.2 - Cálculo dos Momentos Inerentes

Os valores do momento inerente (M), utilizados para se buscar o relacionamento com as variáveis envolvidas no problema, foram obtidos pela média aritmética dos momentos distribuídos em cada uma das extremidades dos dois tramos do corpo de prova, ou seja,

$$M = \frac{M_{1E} + M_{2E} + M_{1D} + M_{2D}}{4} \quad (4.12)$$

onde, M_{1E} , M_{2E} , M_{1D} e M_{2D} estão esquematicamente indicados na Figura 4.8.

A adoção desse valor médio para M , deveu-se a dois fatores. Primeiramente, ao fato de se ter utilizados a média dos valores da velocidade (v) e do peso de eletrodo consumido por unidade de comprimento de solda (w), para cada conjunto de seis passes, não se fazendo distinção, portanto, entre as condições de soldagem de um reforço para outro. E em segundo lugar, devido ao fato de que a falta de simetria na curvatura da chapa base formada, tanto num mesmo tramo como de um tramo para outro, ter sido provavelmente causada pela utilização de corpos de prova com apenas dois tramos.

Para o cálculo dos momentos M_{1E} , M_{2E} , M_{1D} e M_{2D} , partiu-se do pressuposto de que as deformações transversais em cada tramo, satisfizessem a equação

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} = 0 \quad (4.13)$$

e as seguintes condições de contorno

$$z = 0 \quad \text{para} \quad x = \pm b/2$$

$$\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)_{x=b/2} = \frac{-M_1}{D} \quad (4.14)$$

$$\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)_{x=-b/2} = \frac{-M_2}{D}$$

na qual M_1 e M_2 representam os momentos constantes ao longo dos

lados da chapa, (Eliminou-se o índice "E" e "D" uma vez que este desenvolvimento é válido para os dois tramos do corpo de prova), conforme é apresentado na Figura (4.9), juntamente com o sistema de coordenadas utilizado.

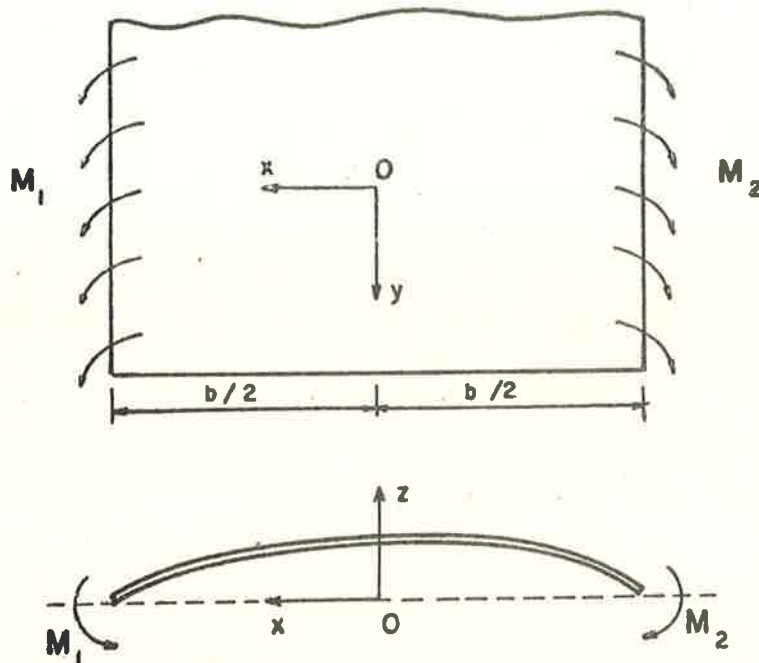


FIGURA 4.9 - Representação Esquemática do Chapeamento entre dois Reforços - Sistema de Coordenadas Adotado.

A hipótese de que os momentos M_1 e M_2 são constantes - ao longo dos lados da chapa (Figura 4.9) faz com que as deformações transversais (z) também sejam consideradas constantes na direção (y). Dessa forma, a equação diferencial (4.13) fica

$$\frac{d^4 z}{dx^4} = 0 \quad (4.15)$$

que possui como solução uma equação do tipo

$$z = A_3 x^3 + A_2 x^2 + A_1 x + A_0 \quad (4.16)$$

Aplicando as condições de contorno (4.14) à Equação 4.16 obtém-se as seguintes relações para A_3 , A_2 , A_1 e A_0 .

$$\begin{aligned}
 A_3 &= \frac{1}{6bD} (M_2 - M_1) \\
 A_2 &= -\frac{1}{4D} (M_2 + M_1) \\
 A_1 &= -\frac{b}{24D} (M_2 - M_1) \\
 A_0 &= \frac{b^2}{16D} (M_2 + M_1)
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

Com os valores das deformações transversais, obtidos experimentalmente, obtem-se os momentos M_1 e M_2 para cada tramo. Para o tramo da esquerda, por exemplo, o procedimento foi o seguinte: Sabendo-se que

$$z = \delta_1 \quad \text{para } x = b/4$$

$$z = \delta_2 \quad \text{para } x = 0$$

obteve-se

$$\begin{aligned}
 M_{1E}^* &= \frac{D}{b^2} (64 \delta_1 - 40 \delta_2) \\
 M_{2E}^* &= \frac{D}{b^2} (56 \delta_2 - 64 \delta_1)
 \end{aligned}$$

e com

$$\begin{aligned}
 z &= \delta_3 \quad \text{para } x = -b/4 \\
 z &= \delta_2 \quad \text{para } x = 0
 \end{aligned}$$

obteve-se

$$\begin{aligned}
 M_{1E}^{**} &= \frac{D}{b^2} (56\delta_2 - 64\delta_3) \\
 M_{2E}^{**} &= \frac{D}{b^2} (64\delta_3 - 40\delta_2)
 \end{aligned}$$

Uma vez verificado que

$$\begin{aligned}
 M_{1E}^* &\approx M_{1E}^{**} \\
 \text{e } M_{2E}^* &\approx M_{2E}^{**}
 \end{aligned}$$

mostrando que o modelo matemático adotado para representar a curvatura da chapa era adequado, calculou-se M_{1E} e M_{2E} , como sendo

$$M_{1E} = \frac{M_{1E}^* + M_{1E}^{**}}{2}$$

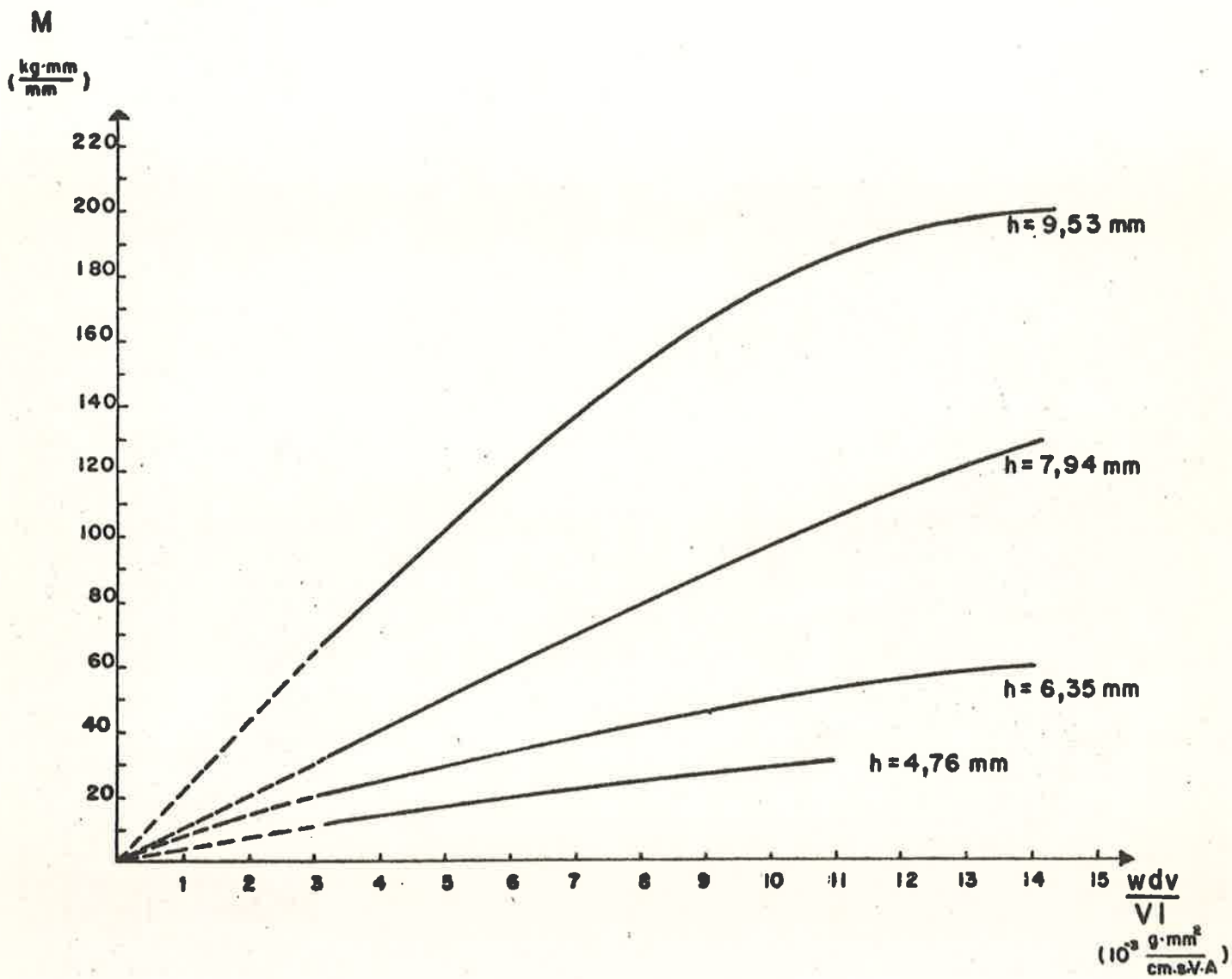
$$M_{2E} = \frac{M_{2E}^* + M_{2E}^{**}}{2}$$

Com um procedimento análogo para o tramo da direita, - utilizando as deformações δ_4 , δ_5 e δ_6 (apresentadas na tabela - 3.5) obteve-se os momentos M_{1D} e M_{2D} .

4.3.3 - Elaboração de Algoritimos e Gráficos

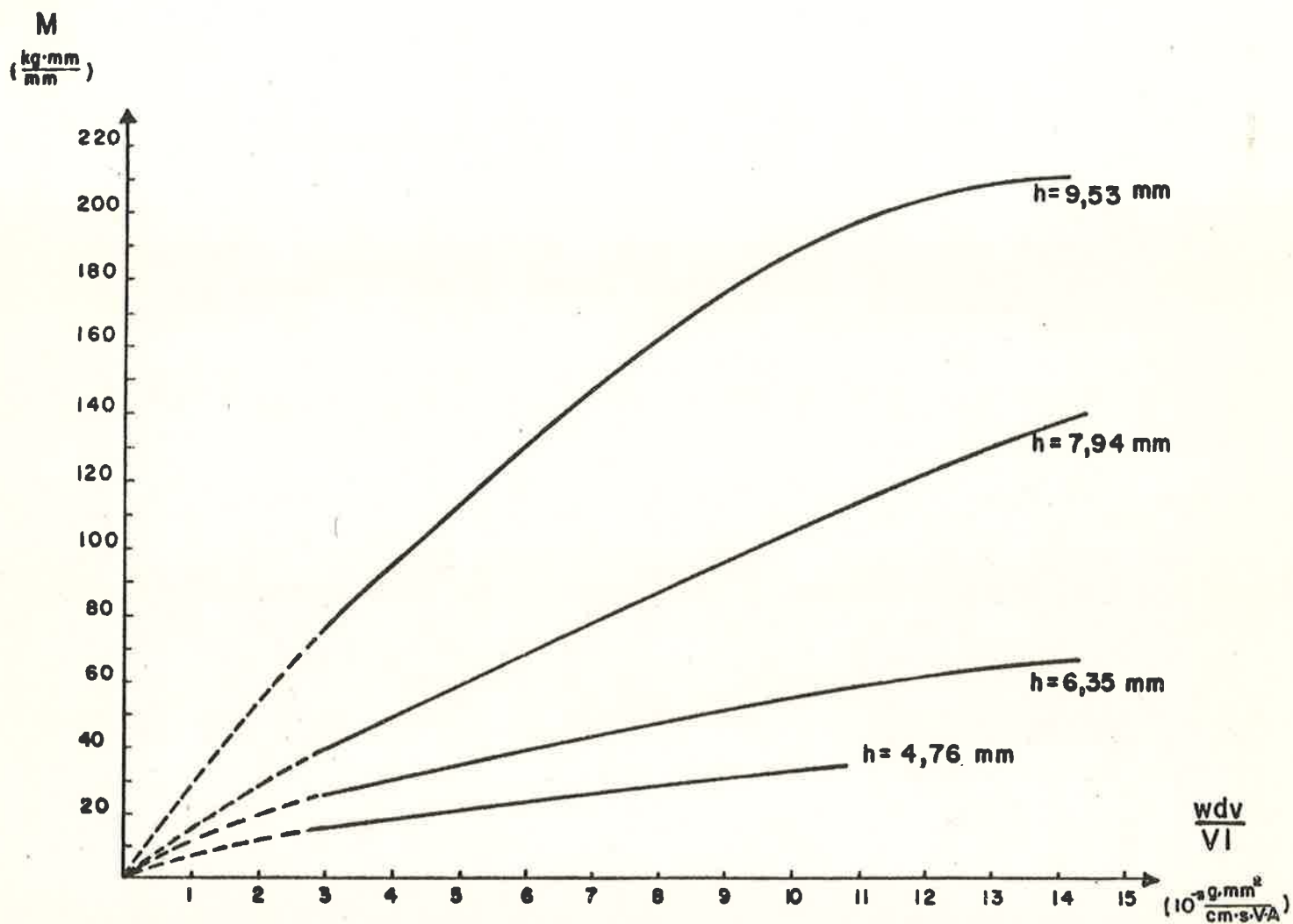
Com as relações propostas no decorrer deste estudo e de posse do conjunto selecionado de dados experimentais, pôde-se verificar através de gráficos, qual combinação de variáveis tenderia apresentar o melhor correlacionamento. Com esse intuito, tentou-se elaborar gráficos utilizando os parâmetros δ , δ/b , δ/h , δ/d , M , $M/\omega d$, $M/\omega h$, $Mb/\omega h^2$, $Mb/\omega d^2$, Mb/h e $M(b/h)^2$; em função de $\omega d v/VI$, $\omega h v/VI$, $VI/\omega d v$, $VI/\omega h v$ e ω ; para valores constantes de b/d e h/d ou de b e h . Deve-se ressaltar que em muitos desses gráficos, bastou a confrontação de algumas poucas curvas, para que ficasse evidenciada a total impossibilidade de se obter um correlacionamento entre as variáveis utilizadas.

As curvas apresentadas nos gráficos da Figura 4.10, relacionando valores de M em função de $\omega d v/VI$ e parametrizadas em b e h , foram dentre todas as que mostraram o melhor correlacionamento entre as variáveis consideradas, pois além de possuírem a mesma tendência quanto a variação de $\omega d v/VI$, apresentaram coerência quanto à variação de b e h . A utilização do grupo adimensional $\omega d v/VI$, apresentou bons resultados também



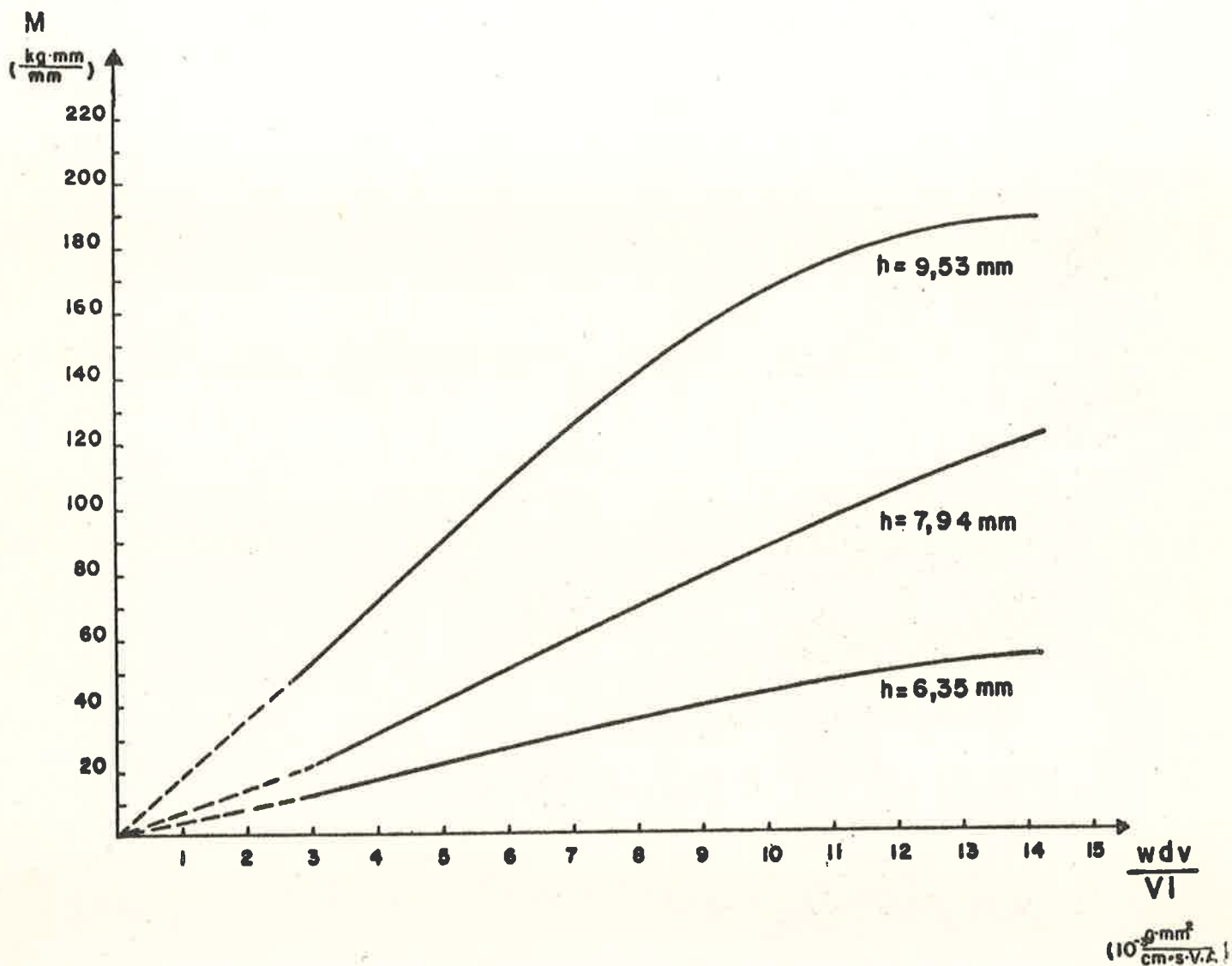
$b = 400 \text{ mm}$

FIGURA 4.10 - Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\frac{wdv}{VI}$ sobre os Momentos Inerentes Distribuídos ao longo dos Reforços.



$b = 600 \text{ mm}$

FIGURA 4.10 - Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\omega dv/VI$ sobre os Momentos Inerentes Distribuidos ao longo dos Reforços.



$b = 800 \text{ mm}$

FIGURA 4.10 - Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\frac{wdv}{VI}$ sobre os Momentos Inerentes Distribuidos ao longo dos Reforços.

com os ensaios em juntas livres, onde mesmo utilizando-se diferentes diâmetros de eletrodo para a mesma espessura de chapa, conseguiu-se uma razoável uniformidade na distribuição dos níveis de deformação, obtendo-se daí as curvas apresentadas na Figura 4.11.

Na obtenção do valor numérico de $\omega dv/VI$ não se considerou a coerência de unidades, mas foram utilizados para cada variável as unidades mais comuns na prática, facilitando, dessa forma, o uso dos gráficos e dos algoritmos propostos a seguir.

Com relação à obtenção dos algoritmos para a previsão das deformações, a principal dificuldade residiu na existência de três variáveis independentes ($\omega dv/VI$, b e h); no entanto, devido à acentuada tendência dos níveis de momentos (M) variarem linearmente com o vão (b), pôde-se encontrar relações que representassem analiticamente os coeficientes das retas em termos das outras duas variáveis ($\omega dv/VI$ e h), ou seja

$$M = f_0(\omega dv/VI, h) + f_1(h) b \quad (4.18)$$

A análise de regressão propriamente dita, para a obtenção de f_0 e f_1 , foi realizada com o auxílio de programa computacional composto de subrotinas do SSP da IBM⁽²¹⁾, tendo sido escolhidas as expressões que, entre todas, apresentaram os maiores índices de correlação (I_{cr}) e os menores desvios relativos. As expressões obtidas foram as seguintes:

$$f_0(\omega dv/VI, h) = 11,3172 h^{2,33762} \left(\frac{\omega dv}{VI} \right)^{0,54} (I_{cr}=0,992)$$

$$f_1(h) = 1,8 \cdot 10^{-3} h^{1,545} (I_{cr}=0,998)$$

(4.19)

Para a previsão das deformações transversais, admitiu-se que em painéis reais, devido a existência de vários tramos, houvesse simetria na curvatura do chapeamento entre dois reforços, ocorrendo portanto

com os ensaios em juntas livres, onde mesmo utilizando-se diferentes diâmetros de eletrodo para a mesma espessura de chapa, conseguiu-se uma razoável uniformidade na distribuição dos níveis de deformação, obtendo-se daí as curvas apresentadas na Figura 4.11.

Na obtenção do valor numérico de $\omega dv/VI$ não se considerou a coerência de unidades, mas foram utilizados para cada variável as unidades mais comuns na prática, facilitando, dessa forma, o uso dos gráficos e dos algoritmos propostos a seguir.

Com relação à obtenção dos algoritmos para a previsão das deformações, a principal dificuldade residiu na existência de três variáveis independentes ($\omega dv/VI$, b e h); no entanto, devido à acentuada tendência dos níveis de momentos (M) variarem linearmente com o vão (b), pôde-se encontrar relações que representassem analiticamente os coeficientes das retas em termos das outras duas variáveis ($\omega dv/VI$ e h), ou seja

$$M = f_0(\omega dv/VI, h) + f_1(h) b \quad (4.18)$$

A análise de regressão propriamente dita, para a obtenção de f_0 e f_1 , foi realizada com o auxílio de programa computacional composto de subrotinas do SSP da IBM⁽²¹⁾, tendo sido escolhidas as expressões que, entre todas, apresentaram os maiores índices de correlação (I_{cr}) e os menores desvios relativos. As expressões obtidas foram as seguintes:

$$f_0(\omega dv/VI, h) = 11,3172 h^{2,33762} \left(\frac{\omega dv}{VI} \right)^{0,54} (I_{cr}=0,992)$$

$$f_1(h) = 1,8 \cdot 10^{-3} h^{1,545} (I_{cr}=0,998)$$

(4.19)

Para a previsão das deformações transversais, admitiu-se que em painéis reais, devido a existência de vários tramos, houvesse simetria na curvatura do chapeamento entre dois reforços, ocorrendo portanto

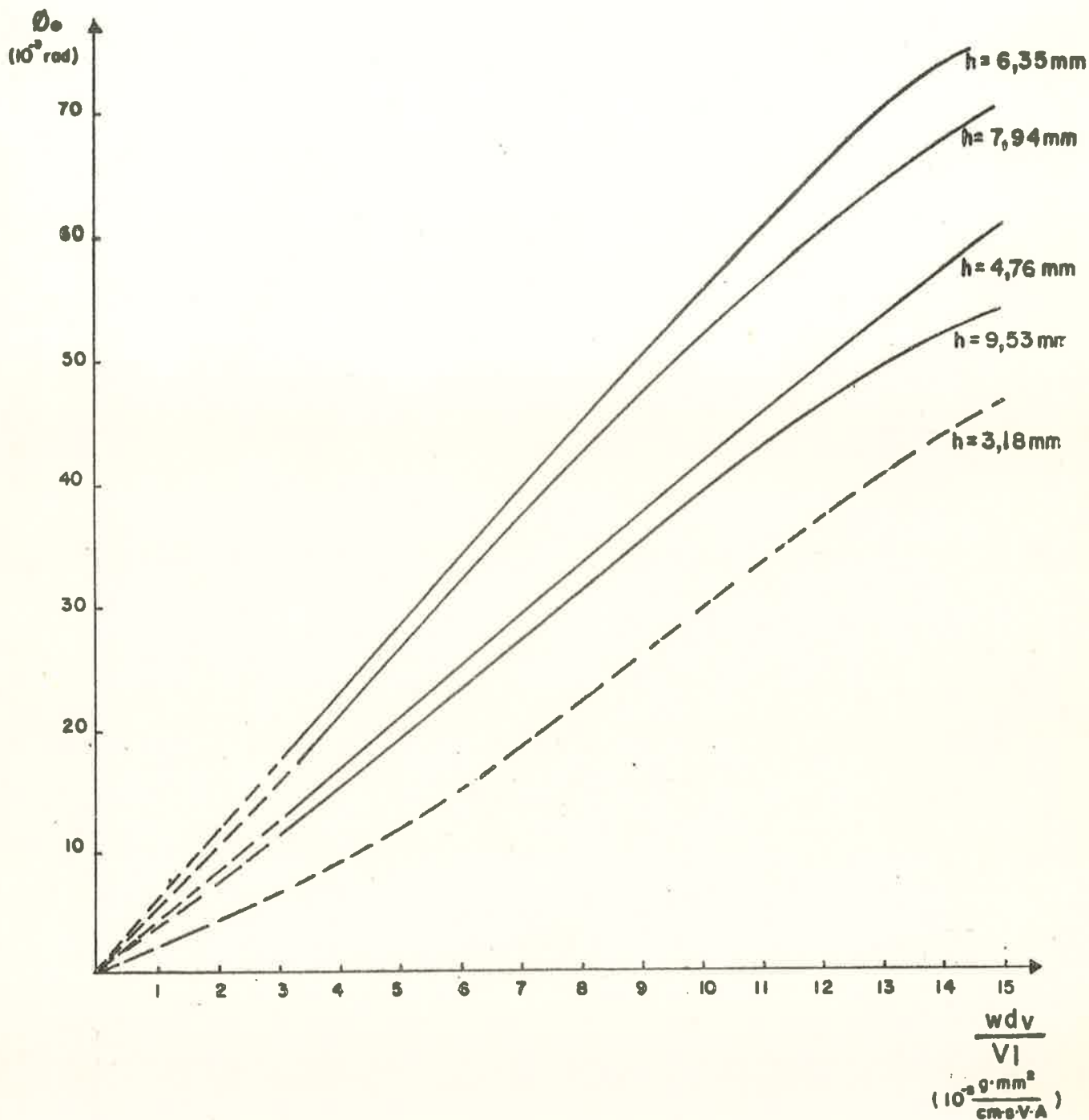


FIGURA 4.11 - Efeito da Variação do Grupo Adimensional $\omega d v / VI$ sobre as Deformações Angulares para as Juntas Livres.

$$M = M_1 = M_2$$

que substituído nas equações (4.17) e (4.16) obtem-se

$$z = \frac{M}{2D} \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right) \quad (4.20)$$

e com as deformações transversais máximas ocorrendo no centro do vão ($x = 0$) obtem-se

$$\delta_{\max} = \frac{M b^2}{8D} \quad (4.21)$$

portanto

$$M = \frac{8D}{b^2} \delta_{\max} \quad (4.22)$$

Igualando (4.22) e (4.18) resulta

$$\delta_{\max} = \frac{b^2}{8D} \left[11,3172 h^{2,33762} \left(\frac{\omega d v}{V I} \right)^{0,54} + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot h^{1,545} \cdot b \right] \quad (4.23)$$

ou

$$\delta_{\max} = \frac{b^2 (1-\nu^2)}{E} \left[16,9758 h^{-0,66238} (\omega d v / V I)^{0,54} + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot h^{-1,455} b \right]$$

O campo de validade dessa expressão, de acordo com as hipóteses formuladas no decorrer deste estudo, é limitado para os seguintes intervalos das variáveis

- i) $4,5 \leq h \leq 10,0$ (mm)
- ii) $400 \leq b \leq 600$ para $4,5 \leq h \leq 6,0$ (mm)
 $600 \leq b \leq 800$ para $6,0 \leq h \leq 10,0$ (mm)
- iii) $0,9 \leq \omega \leq 6,0$ (g/cm)
- iv) $2,5 \leq d \leq 3,5$ (mm)
- v) $90 \leq I \leq 130$ (A)
- vi) $2,8 \leq \left(\frac{\omega dv}{VI} \right) \leq 15,5$ $\left(\times 10^{-3} \frac{\text{g} \cdot \text{mm}^2}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{V} \cdot \text{A}} \right)$

4.3.4 - Comparação entre δ_{cal} e δ_{exp} .

Na Tabela 4.3 são apresentados, para alguns casos, os níveis de deformação obtidos experimentalmente (δ_{exp}) juntamente com os calculados pela Relação 4.23 (δ_{cal}), onde pode-se perceber uma razoável concordância entre ambos.

As maiores diferenças ocorreram para os painéis - com chapas de pequenas espessura e com vãos de 800 mm, justamente para os casos onde a não simetria nas curvaturas dos chapeamentos, podem ter tornado inadequado a utilização, para efeito comparativo, de um valor médio das deformações transversais no centro dos dois tramos, sendo interessante, portanto, a confrontação dos níveis - de deformação calculados (δ_{cal}) com os níveis que ocorrem em painéis de estruturas reais.

TABELA 4.3 - Comparação entre os Valores Experimentais e Calculados de Deformação Transversal.

h (mm)	b (mm)	$\omega dv/VI$ ($10^3 g.mm^2/cms.VA$)	δ_{exp} (mm)	$\delta_{cal.}$ (mm)
4.763	600	2.98	1.54	1.47
		8,95	3,90	4,77
	400	5,62	1,48	1,78
		8,74	2,46	2,46
6,350	800	4,60	2,72	3,50
		9,03	5,00	6,83
	600	8,34	2,46	4,15
		12,61	3,72	5,62
	400	9,32	2,06	2,26
		14,04	2,71	2,95
7,938	800	4,56	3,48	3,55
		9,16	6,74	6,53
	600	4,98	2,20	2,59
		9,73	4,29	4,26
	400	4,28	1,02	1,20
		8,45	1,88	1,90
9,525	800	4,58	3,35	3,52
		13,48	7,41	8,08
	600	5,12	2,42	2,50
		15,36	5,31	5,29
	400	4,39	1,12	1,13
		13,51	2,53	2,31

CAPITULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões Finais

Após o término do desenvolvimento da análise propriamente dita, não obstante já haverem sido emitidas conclusões específicas em cada parte do estudo, ainda restam algumas conclusões de caráter geral que merecem ser aqui mencionadas. As conclusões são as seguintes:

- i) Ficou mais uma vez patente, com o decorrer do estudo, a quase total impossibilidade em desenvolver um método puramente analítico para a previsão das deformações residuais em painéis estruturais soldados. Este fato, deve-se à verificação experimental da grande influência exercida por alguns fatores não quantificáveis sobre os níveis finais de deformação, fatores estes tais como a sequência de soldagem-transversal e longitudinal - , tipo de passe, tipo de eletrodo, número de passes, etc.
- ii) Não obstante a falta de comprovação, através da medida de deformações em painéis reais, pode-se dizer que o método proposto, desenvolvido utilizando os recursos da análise dimensional, apresentou resultados altamente satisfatórios, principalmente se comparados com os alcançados pelos outros métodos na resolução do mesmo problema.

iii) Problemas de estabilidade estrutural que surgem durante a soldagem, ocasionados por incompatibilidade das características geométricas, apesar de satisfazerem os requisitos estruturais de projeto, pode aumentar consideravelmente os níveis de deformação da estrutura. Caso, por exemplo, que ocorreu com o corpo de prova de vão 800 mm e 4,7625 mm de espessura, cujas deformações atingiram níveis muito acima do esperado, inclusive superiores aos registrados pelas juntas livres.

iv) A escolha das condições de soldagem não pode ser feita pensando-se apenas na minimização das deformações residuais. Uma vez que a interdependência que surge entre as variáveis envolvidas, quando se procura manter a execução da junta soldada dentro de um padrão razoável de qualidade, torna incompatível, muitas vezes, a prefixação dessas variáveis. É o caso, por exemplo, de se procurar construir um painel com chapas de 5 mm utilizando eletrodos de 4 mm, onde a necessidade de utilização de correntes de soldagem na faixa de 150 a 170 A, poderia, em chapas dessa espessura, provocar o aparecimento de mordeduras, e outros tipos de defeitos que poderiam condenar a estrutura final.

5.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros

A realização do presente estudo suscitou o aparecimento de alguns tópicos de pesquisa que merecem ser desenvolvidos em futuros trabalhos. Os mais importantes seriam os seguintes:

- i) Procurar verificar, através da realização de ensaios experimentais, a possibilidade de generalização do método aqui proposto para casos semelhantes. A utilização do método para a previsão de deformações em painéis de baixa razão de aspecto ($a/b < 3$) parece bastante viável. Para isto, bastaria modificar convenientemente as condições de contorno aplicadas à equação diferencial (4.13) recaindo na teoria de placas, obtendo-se daí os momentos inerentes distribuídos ao longo das juntas soldadas. Da mesma forma, poder-se-ia investigar a adequacidade do método para painéis constituídos de outros metais, tais como alumínio e aços especiais.

- ii) Realizar ensaios experimentais em painéis com chapas de espessuras inferiores a 4 mm, onde procurar-se-ia analisar a influência que os problemas de estabilidade estrutural, exercem sobre os níveis finais de deformação. Para a realização desses ensaios, sugere-se a utilização de corpos de prova de maior comprimento do que os utilizados neste trabalho, e possuindo no mínimo três tramos. Sugere-se, também a medida dos níveis de deformação em diferentes pontos ao longo do comprimento do corpo de prova, uma vez que, em ocorrendo problemas de estabilidade estrutural, o máximo nível de deformação pode não se localizar no centro do corpo de prova.

- iii) Desenvolver um estudo, visando verificar a influência das sequências de soldagem transversal nos níveis finais de deformação. Para isso, sugere-se a utilização de corpos de prova com três ou mais tramos, aproximando-se, dessa forma, das condições existentes em painéis reais. Num estudo dessa espécie, seria interessante a utilização de extensômetros (strain-gages), apro-

priados para alta temperatura, por meio dos quais poder-se-ia acompanhar a distribuição de tensões ao longo do chapeamento, durante e após a execução de cada passe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - TANIGUCHI, C., "Análise do Mecanismo de Deformações Elasto-Plásticas no Processo de Conformação à Chama", Tese de Doutorado - apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1974.
- (2) - ROSENTHAL, D., "The Theory of Moving Sources of Heat and its Application to Metal Treatments", Transactions of ASME, November 1946.
- (3) - MENDELSON, A., "Plasticity: Theory and Application", The Macmillan Company, New York, 1968
- (4) - ANDREWS, J.B., ARITA, M., and MASUBUCHI, K., "Analysis of Thermal Stress and Metal Movement During Welding", Massachusetts Institute of Technology, Report n° 71-1, 1971.
- (5) - KIHARA, H., WATANABE, M., MASUBUCHI, K., and SATOH, K., "Researches on Welding Stress and Shrinkage Distortion in Japan", The Society of Naval Architects of Japan, 60th Anniversary Series, Volume 4, Tokyo, 1959.
- (6) - BLODGETT, O.W., "Design of Welded Structures", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Ohio, 1966.
- (7) - OKERBLOM, N.O., "The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures", Department of Scientific and Industrial Research, - Her Majesty's Stationery Office, London, 1958.

- (8) - MASUBUCHI, K., OGURA, Y., ISHIHARA, Y., and HOSHINO, J., - "Studies on the Mechanism of the Origin and Method of Reducing the Deformation on Shell Plating in Welded - Ships", International Shipbuilding Progress, Volume 3, Nº 19, 1956.
- (9) - TANIGUCHI, C., "Out-of-Plane Distortion Caused by Fillet Welds in Aluminium", Tese de Mestrado apresentada ao - M.I.T., September, 1972.
- (10) - GERBEAUX, H., et RENAULT, J.P., "Previsions et Compensations des Deformations Dues au Retrait en Soudage Electrique a L'Arc", Publications de la Soudure Autogène, Paris, 1972.
- (11) - MASUBUCHI, K., "Control of Distortion and Shrinkage in Welding", - Welding Research Council, Bulletin 149, 1970
- (12) - MASUBUCHI, K., Class notes of the Course 13.151 J, Welding Engineering, Departments of Ocean Engineering, 1971.
- (13) - NAVSHIPS 0900-000-1000, "Fabrication, Welding and Inspection of Ship Hulls", Editada pela Marinha Americana, March, 1966.
- (14) - GONÇALVES, E., e TANIGUCHI, C., "Análise Comparativa de Métodos para a Previsão de Deformações em Painéis Estruturais Soldados com Reforços", seminário apresentado como parte do programa de mestrado, EPUSP, Dezembro, 1974.

- (15) - DEN HARTOG, J.P., "Advanced Strength of Materials", McGraw-Hill Book Company, New York, 1952.
- (16) - KINNARD, I.F., "Medidas Elétricas y sus Aplicaciones", Ediciones Técnicas Marcombo S.A., Barcelona, 1958.
- (17) - SHAMES, I.H., "Mechanics of Fluids", McGraw-Hill Book Company, Tokyo, 1962.
- (18) - TIMOSHENKO, S., e WOINOWSKY-KRIEGER, S., "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- (19) - "Manual del Ingeniero", Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1964.
- (20) - "Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor", EPUSP, São Paulo, 1972.
- (21) - "Scientific Subroutine Package - Programmer's Manual" Program Number 1130-CM-02X, IBM, New York, 1970.

APÊNDICE A

MÉTODO DE MASUBUCHI

O método para previsão de deformações em painéis estruturais soldados desenvolvidos por MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾, que é apresentado a seguir neste apêndice, foi extraído do estudo feito por TANIGUCHI⁽⁹⁾, onde o método foi aplicado para painéis de alumínio.

Tendo sua nomenclatura adaptada à do texto principal deste trabalho, o método de MASUBUCHI e outros⁽⁸⁾ foi desenvolvido da seguinte forma:

Primeiramente, considerou-se o modelo uni-dimensional da Figura 2.3, bem como o sistema de coordenadas nela indicada; a relação entre δ e θ foi desenvolvida, uma vez admitida a condição de igual carregamento para todos os vãos e idêntica rigidez para todas as juntas, simplesmente utilizando a teoria de barras, aplicada a uma estrutura estaticamente indeterminada.

Admitiu-se ainda que o problema pode ser considerado como de deformações planas, desprezando-se as deformações que ocorrem na direção (y), as seguintes equações foram escritas, aplicadas a uma tira de largura unitária da barra.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (\text{A.1})$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (\text{A.2})$$

Da condição de que $\epsilon_y = 0$

$$\sigma_y = \nu\sigma_x \quad (\text{A.3})$$

E, portanto,

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} \epsilon_x \quad (\text{A.4})$$

Utilizando (A.4) e calculando-se a expressão geral para o momento fletor, chegou-se à equação diferencial para as deformações causadas pelo momento fletor (M) em uma estrutura de barra, ou seja,

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{d\theta}{dx} = - \frac{M}{D} \quad (A.5')$$

onde, $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}$ = Rigidez à flexão da tira com largura unitária.

Supôs-se que, os momentos fletores que atuam nos vãos são constantes através do vão, ou em outras palavras, a barra está submetida a uma distribuição constante de momentos fletores. Chamando a este valor constante do momento fletor de M_0 , (A.5') pôde ser escrita da maneira representada em (A.5).

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{d\theta}{dx} = - \frac{M_0}{D} \quad (A.5)$$

Resolvendo a equação (A.5), utilizando as condições de contorno tais que:

$$z = 0 \text{ em } x = \pm b/2 \quad (A.6a)$$

$$\theta = 0 \text{ em } x = 0 \quad (A.6b)$$

Chegou-se aos valores de θ_{\max} e δ que são dados pelas equações (A.7) e (A.8) abaixo.

$$\theta_{\max} = \frac{M_0 b}{2D} \quad (A.7)$$

$$\delta = \frac{M_0 b}{2D} \cdot \frac{b}{4} = \frac{b}{4} \theta_{\max} \quad (A.8)$$

Assim a equação (A.8) mostra que dispondo-se do valor de ϑ_{\max} para um dado caso, a deformação transversal será obtida, podendo desta forma estimar qual a possível deformação que ocorrerá na estrutura.

Para relacionar ϑ_{\max} com ϑ_0 , ou seja obter F_R , utilizou-se do princípio da mínima energia potencial armazenada em estrutura estaticamente indeterminada, tendo sido antes, porém, efetuadas as seguintes hipóteses:

- (i) Para as juntas livres, a quantidade total de eletrodo consumido causará a deformação angular total ϑ_0 do painel.
- (ii) Para as juntas fixas, a deformação angular ϑ_{\max} é causada pelos dois filetes internos a cada vão, de modo que a quantidade de eletrodo consumido corresponderia à mesma quantidade de eletrodo que causa ϑ_0 .
- (iii) ϑ_0 é maior que ϑ_{\max} .

Se ϑ_{\max} é menor do que ϑ_0 , uma certa energia será necessária para diminuir a deformação angular de ϑ_0 para ϑ_{\max} . Esta energia poderá ser escrita de uma maneira geral, conforme a equação (A.9) abaixo.

$$\frac{dE_w}{d(\vartheta_0 - \vartheta)} = C (\vartheta_0 - \vartheta) \quad (A.9)$$

onde E_w = energia necessária para diminuir a deformação angular de painéis de juntas fixas de ϑ_0 a ϑ_{\max} .

C = coeficiente genericamente denominado de COEFICIENTE DE RIGIDEZ ANGULAR, e que é função das características geométricas da estrutura, quantidade de eletrodo consumido e o processo de soldagem.

Portanto,

$$E_w = \int_0^{(\theta_0 - \theta_{\max})} C(\theta_0 - \theta) d(\theta_0 - \theta) = \frac{C(\theta_0 - \theta_{\max})^2}{2} \quad (\text{A.10})$$

De outro lado, admitindo que cada filete, em cada junta, é responsável pela energia de deformação armazenada em meio vão, utilizando-se a equação geral da energia de deformação devido ao momento fletor.

$$dE_b = \frac{M_o d\theta}{2} \quad (\text{A.11})$$

e utilizando a equação (A.5) com o sinal apropriado, tem-se:

$$dE_b = \frac{M_o^2}{2D} dx \quad (\text{A.12})$$

que integrada, fornece o valor da energia de deformação armazenado devido a um filete de solda

$$E_b = \int_0^{b/2} \frac{M_o^2}{2D} dx = \frac{M_o^2 b}{4D} \quad (\text{A.13})$$

Utilizando (A.7), tem-se

$$E_b = \frac{D \cdot \theta_{\max}^2}{b} \quad (\text{A.14})$$

A energia total armazenada em meio vão será então expressa por

$$E_t = E_w + E_b = \frac{C(\vartheta_0 - \vartheta_{\max})^2}{2} + \frac{D \cdot \vartheta_{\max}^2}{b} \quad (\text{A.15})$$

O primeiro termo representa a energia necessária - para diminuir a deformação angular nas juntas fixas, de ϑ_0 a ϑ_{\max} o segundo termo, por sua vez, representa a energia armazenada no painel, devido a flexão do mesmo até a uma deformação angular ϑ_{\max} .

A condição de equilíbrio é expressa pelo fato de - que a energia total armazenada no sistema seja mínima, ou em outras palavras,

$$\frac{dE_t}{d\vartheta_{\max}} = -C(\vartheta_0 - \vartheta_{\max}) + \frac{2D}{b} \vartheta_{\max} = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\vartheta_{\max} = \frac{\vartheta_0}{1 + \frac{2D}{b} \cdot \frac{1}{C}} \quad (\text{A.17})$$

A equação (A.17) mostra que uma vez conhecido o valor do coeficiente de rigidez C, para um determinado caso em - estudo, ϑ_{\max} , e portanto δ , poderá ser estimado, pois utilizando (A.8), obtêm-se a (A.18) abaixo

$$\delta = \frac{\vartheta_0 \cdot \frac{b}{4}}{1 + \frac{2D}{b} \cdot \frac{1}{C}} \quad (\text{A.18})$$

$$\text{ou } \delta = F_R \vartheta_0 \frac{b}{4} \quad (\text{A.19})$$

$$\text{com } F_R = \frac{1}{1 + \frac{2D}{b} \cdot \frac{1}{c}}$$

(A.20)