



**MARINHA DO BRASIL
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESCOLA POLITÉCNICA
MBA EM GESTÃO E TECNOLOGIA
EM CONSTRUÇÃO NAVAL**



ALAN SALA BOURGUIGNON

**PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM EM PAINÉIS ESTRUTURAIS
SOLDADOS DE CHAPAS FINAS VISANDO MINIMIZAÇÃO DE
DEFORMAÇÕES RESIDUAIS.**

Nº 196
MBA/CN
B667p

**SÃO PAULO
2011**



**MARINHA DO BRASIL
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESCOLA POLITÉCNICA
MBA EM GESTÃO E TECNOLOGIA
EM CONSTRUÇÃO NAVAL**



ALAN SALA BOURGUIGNON

**PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM EM PAINÉIS ESTRUTURAIS DE
CHAPAS FINAS VISANDO MINIMIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES
RESIDUAIS.**

Orientador: Prof. Célio Taniguchi, Dsc. em Engenharia Metalúrgica..

Monografia do curso de pós-graduação lato sensu em gestão e tecnologia da construção naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Alan Sala Bourguignon

Célio Taniguchi

SÃO PAULO
2011

ALAN SALA BOURGUIGNON

**PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM EM PAINÉIS ESTRUTURAIS DE
CHAPAS FINAS VISANDO MINIMIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES
RESIDUAIS.**

Orientador: Prof. Célio Taniguchi

Aprovado em 28 de junho de 2011.

Banca Examinadora:

Prof. Célio Taniguchi
Titulação: Prof. titular
Instituição: POLI - USP

Prof. André Bergsten Mendes
Titulação: Dsc.
Instituição: POLI - USP

DEDICATÓRIA

Ao Prof. Dr. Célio Taniguchi, pela orientação, amizade, dedicação e apoio.

Aos funcionários e colegas da Escola Técnica do Arsenal de Marinha, pela amizade e incentivo na realização deste trabalho.

À minha família, pelo carinho e presença motivadora.

À diretoria e aos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

*A Deus e Nosso Senhor Jesus Cristo,
aos meus pais
Argeu e Pedrelina,
aos meus irmãos
Átila e Argeu,
à minha noiva
Daniele*

EPÍGRAFE

“Olhar um átomo muda-o,
olhar um homem transforma-o,
olhar o futuro subverte-o”

Gaston Berger

RESUMO

O presente trabalho apresenta o planejamento fatorial aplicado à pesquisa conduzida pela equipe de Tecnologia de Construção Naval da ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, onde foram feitos ensaios de soldagem em painéis estruturais compostos de chapas finas, ou seja, inferiores a 10 mm de espessura. No referido trabalho foram detectadas discrepâncias existentes entre os resultados de diversos métodos, onde não se chegou a uma formulação geral para prevenção de deformações residuais em chapas finas. É apresentado neste trabalho um planejamento fatorial, especificamente o planejamento 2^3 , onde foram utilizados os dados experimentais contidos em gráficos e tabelas existentes. Os resultados do planejamento podem orientar o Engenheiro a determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. Para os cálculos matemáticos foram utilizados os softwares Scilab™ e Maple™. Economia e praticidade são imprescindíveis. Planejar um experimento de forma racional é juntar ambos.

Palavras-chave: Fatores ou variáveis, Níveis, Planejamento fatorial, Painéis Estruturais Soldados.

ABSTRACT

This paper presents the factorial design applied to research conducted by the team of shipbuilding technology USP's Polytechnic School, where, tests of welding in structural panels composed of thin plates, ie, less than 10 mm thick. In that study were detected discrepancies between the results of various methods, where there has not been a general formulation for the prevention of residual strain in thin plates. It is presented in this paper a factorial design, specifically planning 2^3 , where we used the experimental data contained in charts and tables available. The planning results can guide the engineer to determine the influence of one or more variables on another variable of interest. For the calculations we used the mathematical software Maple™ and Scilab™. Economy and practicality are essential. Plan an experiment in a rational way is to join both.

Keywords: Factors or variables, levels, factorial design, structural panels Soldiers.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
1	INFLUÊNCIA DO FATOR HUMANO	13
2	DISTORÇÕES DE SOLDAS	14
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	17
4	EXECUTANDO O PLANEJAMENTO FATORIAL	19
5	ANALISANDO OS RESULTADOS	23
6	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
	ANEXO A	33
	ANEXO B	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos da corrente, comprimento do arco e velocidade de soldagem	13
Figura 2 – Deflexão longitudinal de uma barra pelo calor de soldagem	14
Figura 3 – Distorções básicas: Contrações transversal e longitudinal e distorção angular....	15
Figura 4 – Flexão de uma viga T e flambagem em chapas finas.....	15
Figura 5 – Rotação durante a soldagem para baixo e alto aporte térmico	15
Figura 6 – Distorção angular em juntas T de aço carbono.....	16
Figura 7 – Flexão de uma viga	16
Figura 8 – Estrutura esquemática do planejamento fatorial	18
Figura 9 – Deformação angular para as juntas Restritas, resultados experimentais(ref.9)....	20
Figura 10 – Matriz de coeficientes de contraste	21
Figura 11 – Matriz de coeficientes de contraste com os divisores	21
Figura 12 – Vetor dos efeitos	21
Figura 13 – Gráfico de probabilidade Normal	24
Figura 14 – Representação geométrica do planejamento fatorial 2^3	25
Figura 15 – Superfície de resposta.....	26
Figura 16 – Gráfico de probabilidade Normal	29
Figura 17 – Representação geométrica do planejamento fatorial 2^3	29
Figura 18 – Superfície de resposta.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento fatorial com 3 fatores e 2 níveis escolhidos	19
Tabela 2 – Resultados das combinações dos níveis.....	20
Tabela 3 – Organizando a matriz de planejamento	21
Tabela 4 – Tabela de coeficientes de contraste	21
Tabela 5 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^3 com seu erros padrões	24
Tabela 6 – Planejamento fatorial com 3 fatores e 2 níveis escolhidos	26
Tabela 7 – Resultados experimentais para juntas livres (ref.9).....	27
Tabela 8 – Resultados das combinações dos níveis.....	28
Tabela 9 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^3 com seus erros padrões	28

INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como escopo o desenvolvimento de conhecimentos estatísticos aplicados a um problema atual de ocorrência de deformações residuais em estruturas navais, tais como o fundo, costado e convés de embarcações, através de uma técnica chamada planejamento fatorial, que pode ser considerada como uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de processos, principalmente quando um grande número de variáveis está envolvido. Eles são úteis em investigações preliminares, nas quais se deseja saber se existe influência – e se ela é relevante – de um determinado fator sobre a resposta, podendo ser estendida, posteriormente, para formar planejamentos mais elaborados.

Por que planejar o experimento é tão importante?

Em processos industriais, de desenvolvimento e de pesquisa, é muito comum a existência de vários fatores ou variáveis que afetam a qualidade global do produto final. No caso de embarcações, o problema de deformações residuais em estruturas pode influir nas características hidrodinâmicas do navio bem como a resistência e estabilidade de sua própria estrutura, além de logicamente afetar a estética geral, tanto externa como interna da embarcação. Faz-se necessário, então, a utilização de ferramentas adequadas para que a tarefa de otimização não se torne uma busca assaz dispendiosa e prolongada.

Um experimento, então, é um teste ou um conjunto de testes efetuados como parte importante de um processo elucidativo que leve à compreensão do funcionamento de sistemas e processos desejados.

Não é raro aparecerem problemas nos quais é necessário estudar, ao mesmo tempo, várias propriedades e os fatores experimentais que as influenciam. E, para que estes experimentos não venham a consumir muitos insumos e tempo, se faz necessário o planejamento. A veracidade das conclusões extraídas dos experimentos, também depende, em grande parte, deste planejamento.

Assim, é possível otimizar as condições de processo, maximizando rendimentos, produtividades e viabilidade comercial, minimizando custos, ou mesmo conduzindo o processo à obtenção de um produto com as especificações desejadas, obtendo resultados com expressiva confiabilidade.

1. INFLUÊNCIA DO FATOR HUMANO

O fator humano é muito importante, já que o soldador influi decisivamente na qualidade da solda. Não há como prever todos os aspectos psicológicos envolvidos na execução adequada do trabalho de soldagem, os processos manuais são influenciados diretamente pela ação do homem, e podem estar sujeitos a erros mais freqüentes, caso não tenha sido estudada, de maneira aprofundada, todas as condições sujeitas à operação.

O treinamento tem importância fundamental para garantir a execução adequada das tarefas de soldagem, seja no caso de aplicação de novos produtos, novos processos, ou a título de revisão, apenas para reciclagem de informações.

Pode-se demonstrar que o fator humano é decisivo na qualidade da soldagem, na *figura 1*, pode-se observar os efeitos da corrente (Amperagem), comprimento do Arco, e velocidade de soldagem.

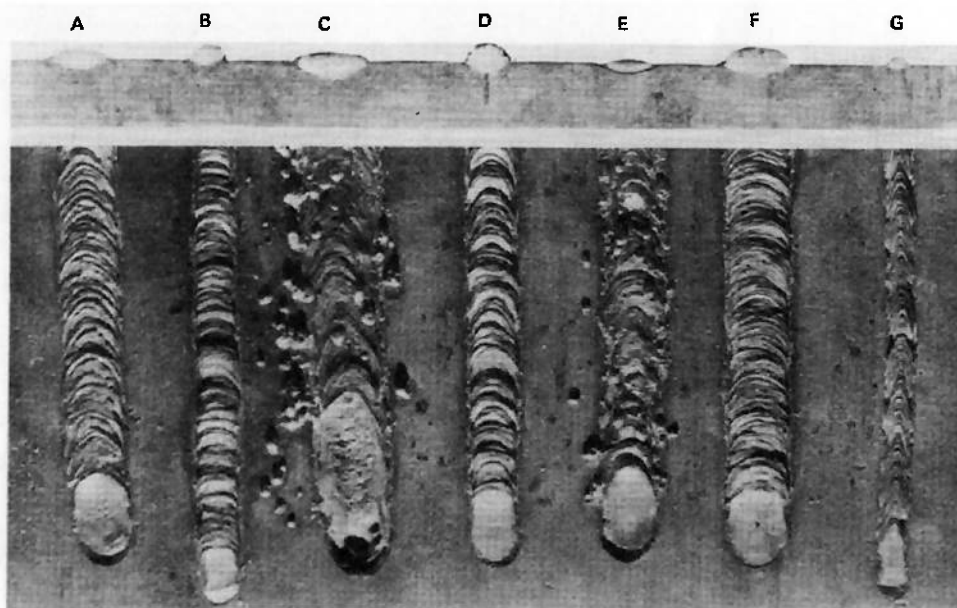


Figura 1 : A - Corrente, tamanho do arco e velocidades corretas; B – Corrente muito baixa; C – Corrente muito alta; D – Comprimento do arco muito curto; E – Comprimento do arco muito longo; F – Velocidade de soldagem muito lenta; G – Velocidade de soldagem muito rápida.

2. DISTORÇÕES DE SOLDAS

Distorções de Soldas são alterações de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento de material (deformação plástica) que ocorre em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A distorção final de um componente soldado é sempre oposta e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem.

Em juntas simples, três tipos básicos de distorção podem ocorrer: (1) contração transversal (perpendicular à linha da solda), (2) contração longitudinal (paralela à linha da solda) e (3) distorção angular (rotação em torno da linha da solda), figura 3. Estas distorções básicas causam distorções mais complexas em juntas reais de solda como, por exemplo, a flexão (figura 4a) e a torção de vigas e a distorção por flambagem em juntas de peças de pequena espessura (figura 4b). Durante a soldagem de componentes livres (isto é, que não estejam presos por soldas de ponteamto ou por algum dispositivo de fixação), estes podem sofrer distorção rotacional (figura 5), o que pode dificultar as condições de soldagem e modificar o padrão final da distorção da junta soldada.

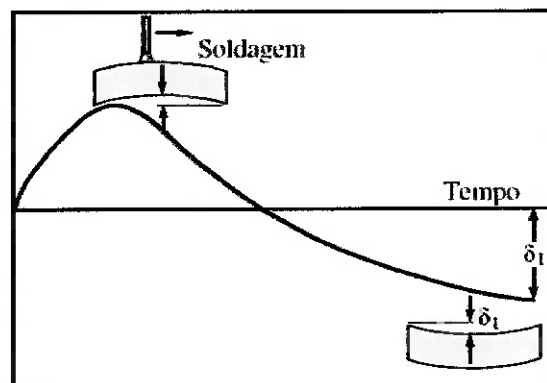


Figura 2 : Deflexão longitudinal de uma barra pelo calor de soldagem.
 δt – Deflexão(distorção) final.

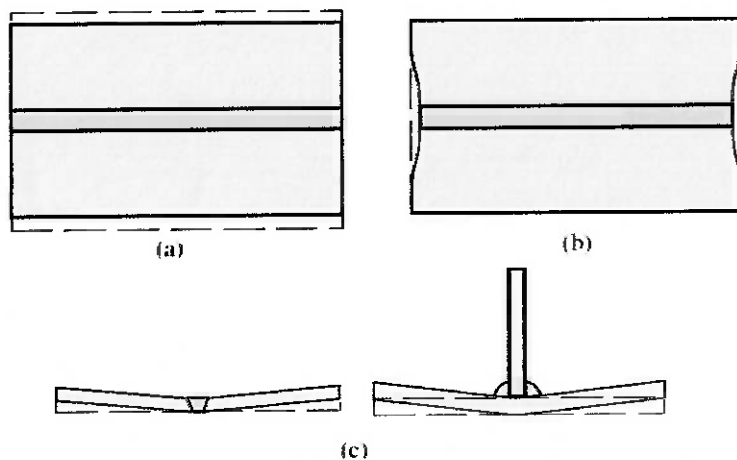


Figura 3: Distorções básicas: (a) Contração transversal, (b) contração longitudinal e (c) distorção angular.

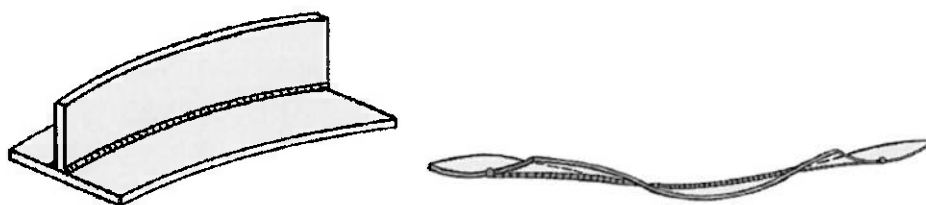


Figura 4 : (a) Flexão de uma viga T e (b) Flambagem em chapas finas.

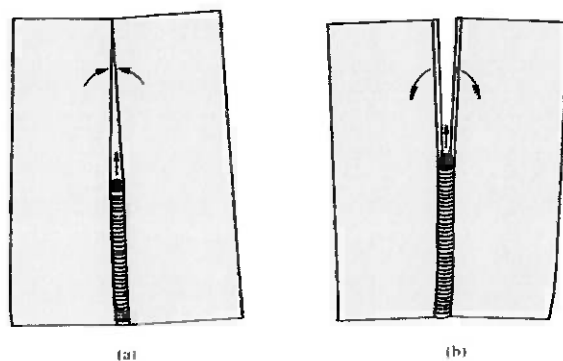


Figura 5 - Rotação durante a soldagem para (a) baixo e (b) alto aporte térmico.

A distorção angular ocorre quando a contração transversal não é uniforme ao longo da espessura da junta, podendo ocorrer tanto em soldas de topo como em soldas de filete (figura 3c). A figura 6 ilustra as variações angulares em juntas T de aço carbono soldadas dos dois lados da junta em função da espessura do flange e do peso de metal depositado por comprimento da junta.

A flexão de uma viga de aço soldada ao longo de todo o seu comprimento (L) pode ser estimada por (figura 7):

$$\Delta = 0,005 \frac{A_w d L^2}{I}$$

Equação 1: Distorção angular em juntas T.

Onde A_w é a área da seção transversal da solda ou soldas, d é a distância do centro de gravidade da(s) solda(s) à linha neutra da viga e I é o momento de inércia do membro.

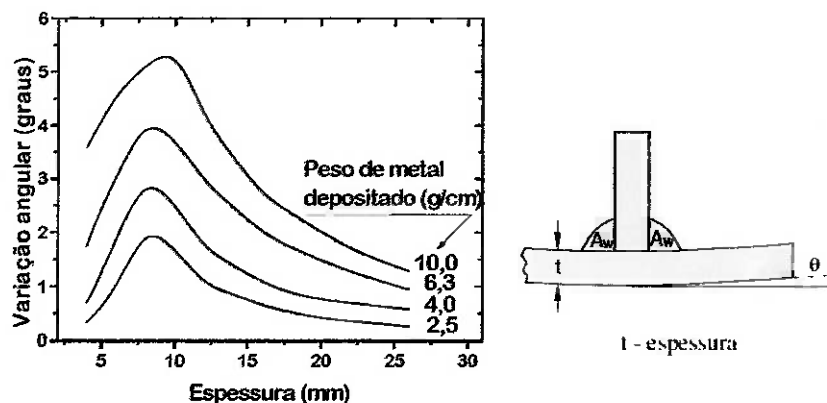


Figura 6: Distorção angular em juntas T de aço carbono.

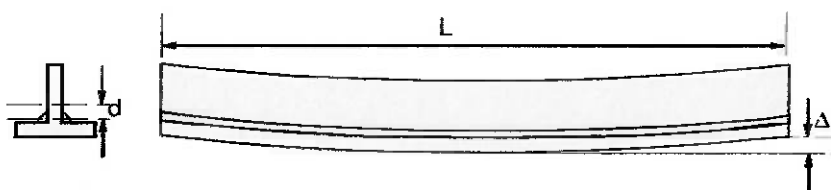


Figura 7 : Flexão de uma viga.

Estruturas soldadas tendem a apresentar uma distribuição complexa de tensões residuais que pode ser caracterizada, na região da solda, por esforços de tração em duas (ou três) dimensões. Este estado de tensão tende a dificultar a deformação plástica da região da solda podendo favorecer o desenvolvimento de rupturas localizadas (trincas) nessa região quando essa apresenta baixa ductilidade ou quando a estrutura é colocada em um ambiente agressivo e/ou submetida a solicitações severas.

Conclui-se que a distribuição de tensões residuais em um componente soldado é afetada por diversos fatores, incluindo as características do metal de base e da solda (à temperatura ambiente e a altas temperaturas), a geometria da junta soldada e a sua ligação com outros componentes e as condições de soldagem (que afetam a distribuição de temperaturas resultante na peça durante a soldagem).

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Experimentos têm por objetivos: procurar os fatores que influenciam a saída do processo e também ajustar e fixar os fatores controláveis buscando obter respostas dentro dos valores desejados que normalmente são os valores nominais especificados em projeto.

Tornar o projeto robusto, sendo tanto mais robusto quanto menos o projeto for impactado por fatores de ruído interno ou externo. A robustez de um produto é mais função de um bom projeto que da rigidez dos controles dos processos de fabricação. (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978) O planejamento de experimentos, por conseguinte é usado para aperfeiçoar o processo, aproximando os valores de saída aos requisitos nominais, outrossim, para reduzir a variabilidade e os custos totais. Em projetos, é comum selecionar parâmetros que os tornem robustos, avaliar materiais alternativos e fixar os parâmetros-chave do projeto, ou seja, os parâmetros que impactam no desempenho do produto.

Existem diversos tipos de planejamento de experimentos para a pesquisa de campo. Foram estudadas 3 categorias. Tratamento em blocos: Planejamento no qual as parcelas experimentais são distribuídas em grupos ou blocos de tal forma que fiquem o mais uniforme possível dentro de cada bloco. O número de parcelas por bloco deve ser múltiplo do número de tratamentos, sendo que geralmente o número de blocos é igual ao número de tratamentos.

Os tratamentos são designados às parcelas de forma aleatória, sendo esta casualização feita dentro de cada bloco. (CALADO e MONTGOMERY, 2003) As variáveis de um problema podem se apresentar na forma de um bloco heterogêneo, o tratamento em blocos propõe uma análise agrupando os elementos em blocos homogêneos. O tratamento em blocos reduz a quantidade de experimentos a serem realizados. Os tratamentos fatoriais por sua vez requisitam uma quantidade enorme de ensaios

Experimentos Fatoriais: São aqueles que incluem todas as combinações de vários conjuntos de tratamentos ou fatores. O planejamento fatorial é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Normalmente codificam-se os níveis dos fatores com os sinais (+) atribuídos ao nível superior e (-) atribuído ao nível inferior. Podem ser completos ou fracionados. Um experimento fatorial completo ocorre quando todas as possíveis combinações de níveis dos fatores são testadas.

1. Cada fator é analisado em vários níveis;
2. Nível é o valor (ou classe) que cada fator pode assumir no experimento;
3. Método univariado (ou clássico): estuda um fator de cada vez, os outros devem ser mantidos constantes. A interação entre os fatores não são levados em conta;
4. Método multivariado: todos os fatores estudados são variados ao mesmo tempo;
5. Efeito sinérgico: efeito de interação positiva, isto é, o aumento de um fator reforça o outro;
6. Efeito antagônico: efeito de interação negativo.
7. Planejamento fatorial completo: os experimentos são realizados em todas as possíveis combinações de níveis dos fatores.

Planejamento fatorial 2^k : é um planejamento fatorial de k fatores em dois níveis.

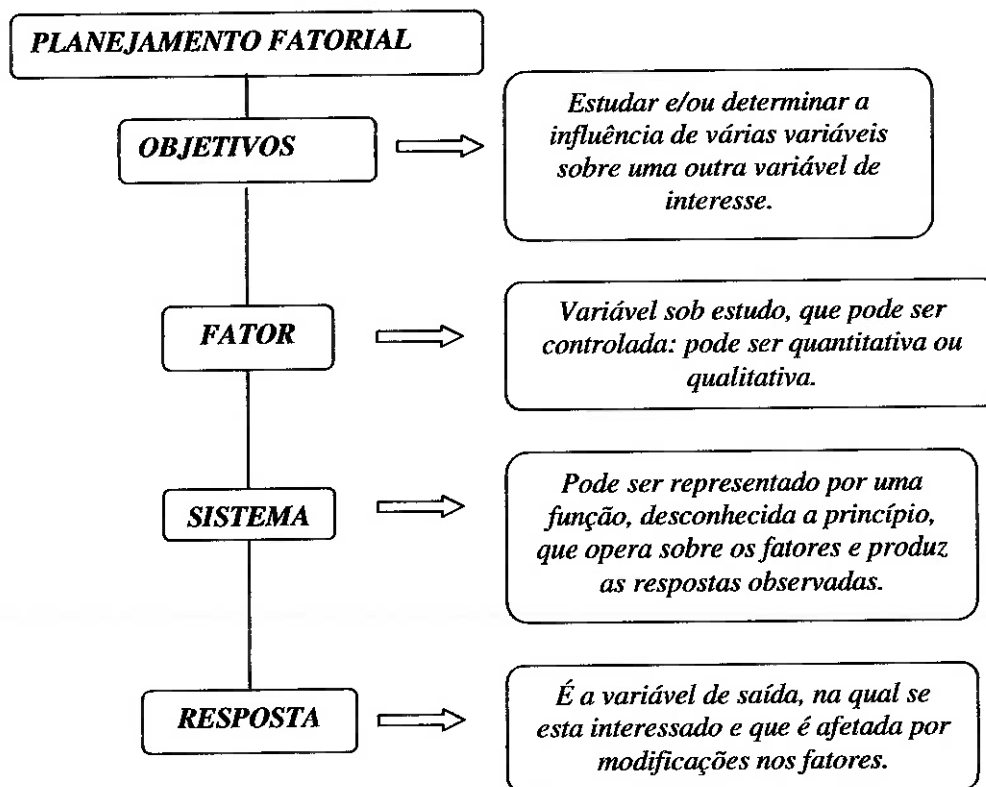


Figura 8: Estrutura esquemática do planejamento fatorial

4. EXECUTANDO O PLANEJAMENTO FATORIAL

A primeira etapa é definir as variáveis relevantes a serem estudadas (temperatura, composição do produto, tempo de reação, concentrações, etc.) e as respostas desejadas (consistência, sabor, cor, aroma, pureza, rendimentos, produtividades, etc.). Especifica-se os níveis nos quais cada fator deverá ser estudado, convencionando os sinais – para o mínimo e + para o máximo. Faz-se, então, com que cada um deles varie nesses níveis e se observa a influência na resposta. Toma-se o cuidado de realizar os experimentos em todas as combinações possíveis desses níveis. Para um planejamento com dois níveis e k fatores, serão efetuados 2^k ensaios.

Neste trabalho, deseja-se estudar a deformação angular de painéis estruturais soldados de embarcações. Três fatores são importantes, neste experimento: Velocidade de soldagem (fator A), Espessura da chapa (fator B) e Amperagem de soldagem (fator C). A Tabela 1 apresenta cada um dos fatores e seus respectivos níveis.

Tabela 1: Planejamento fatorial com 3 fatores e 2 níveis escolhidos

Fatores	Níveis selecionados	
	Mínimo (–)	Máximo (+)
A – Velocidade de soldagem	2,38 mm/s	3,05 mm/s
B – Espessura da chapa	3/16"	1/4"
C - Amperagem	90 A	120 A

Utilizando o planejamento fatorial 2^3 descrito acima, para o caso de um painel que apresenta um espaçamento entre reforços de 600 mm , obtém-se os resultados apresentados na **Tabela 2**, os dados em vermelho foram retirados do trabalho da equipe de Tecnologia de Construção Naval da EPUSP que em seu texto apresenta o gráfico de deformação angular de juntas restritas .

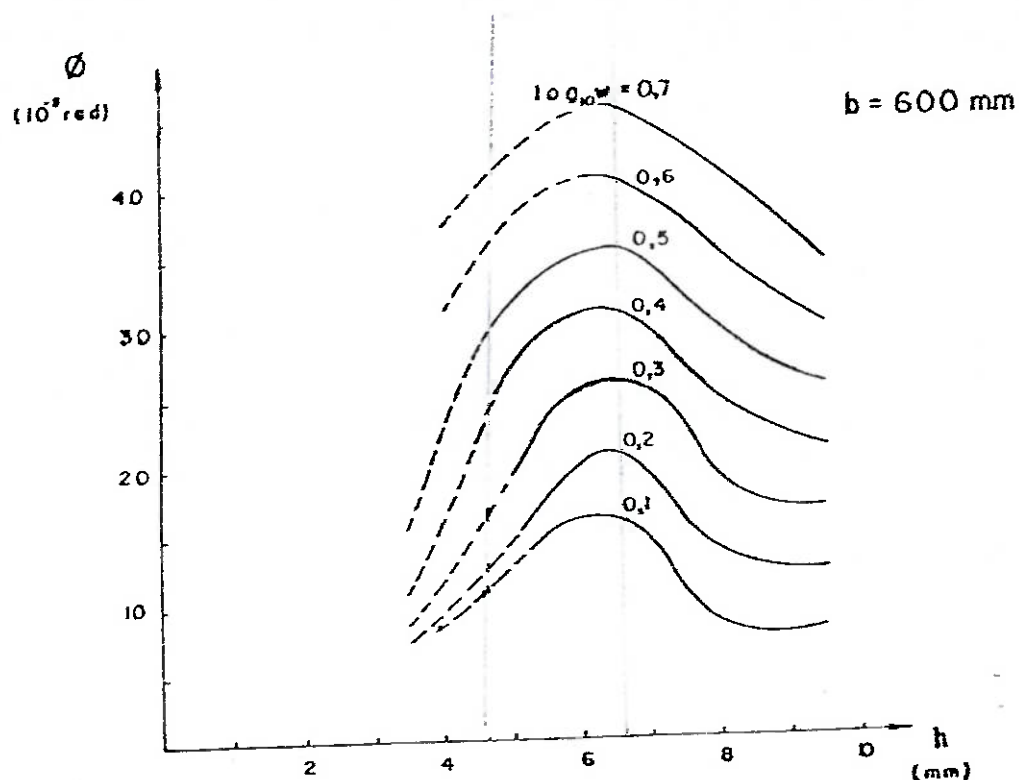


Figura 9: Deformação angular para as juntas Restritas, resultados experimentais (ref. 9).

Tabela 2: Resultados das combinações dos níveis

Vão de 600mm	Espessura da chapa(mm/pol)			
	- (4,750mm[3/16"])		+ (6,35mm[1/4"])	
	Amperagem (A)		Amperagem (A)	
Velocidade (mm/s)	- (90)	+ (120)	- (90)	+ (120)
- (2,38)	12	15	14	17
	13	18	15	18
Total	25	33	29	35
+(3,05)	21	30	23	32
	25	34	30	36
Total	46	64	53	68

As respostas dos experimentos são medidas de deformação angular (10^{-3} rad).

Reescrevendo a matriz de planejamento da tabela 2, substituindo os elementos pelos sinais – (para o nível mínimo) e + (para o nível máximo), tem-se:

Tabela 3: Organizando a matriz de planejamento

Ensaio (i)	Fatores do planejamento			Totais	Médias
	A	B	C		
1	-	-	-	25	12,5
2	+	-	-	46	23
3	-	+	-	29	14,5
4	+	+	-	53	26,5
5	-	-	+	33	16,5
6	+	-	+	64	32
7	-	+	+	35	17,5
8	+	+	+	68	34

Acrescentando na tabela uma coluna de sinais positivos no início – chamada de elemento identidade, uma vez que, ao se multiplicar qualquer coluna por esta não há alteração – e também a combinação dos fatores, ter-se-á a **Tabela 4** de coeficientes de contraste.

Tabela 4: Tabela de coeficientes de contraste

i	E.I.	Fatores do planejamento			Combinação dos fatores				Médias
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
1	+	-	-	-	+	+	+	-	12,5
2	+	+	-	-	-	-	+	+	23
3	+	-	+	-	-	+	-	+	14,5
4	+	+	+	-	+	-	-	-	26,5
5	+	-	-	+	+	-	-	+	16,5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	32
7	+	-	+	+	-	-	+	-	17,5
8	+	+	+	+	+	+	+	+	34

A **Tabela 4** contém todos os sinais necessários para o cálculo dos efeitos. Todas as colunas dos efeitos têm quatro sinais positivos e quatro negativos e a soma dos produtos desses sinais, em todas as colunas, é zero, isto é, as colunas são ortogonais. Incluindo a unidade, tem-se a matriz da **Figura 10**.

$$M = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Figura 10: Matriz de coeficientes de contraste

Para um planejamento 2^k , os divisores serão 2^k para a média representada pelo elemento identidade e $2^{(k-1)}$ para os efeitos. Logo, no caso deste exemplo, os divisores são 8 para a média e 4 para os demais. Tem-se, então, a matriz representada pela **Figura 11**.

$$M = \begin{vmatrix} 1/8 & -1/4 & -1/4 & -1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & -1/4 \\ 1/8 & 1/4 & -1/4 & -1/4 & -1/4 & -1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1/8 & -1/4 & 1/4 & -1/4 & -1/4 & 1/4 & -1/4 & 1/4 \\ 1/8 & 1/4 & 1/4 & -1/4 & 1/4 & -1/4 & -1/4 & -1/4 \\ 1/8 & -1/4 & -1/4 & 1/4 & 1/4 & -1/4 & -1/4 & 1/4 \\ 1/8 & 1/4 & -1/4 & 1/4 & -1/4 & 1/4 & -1/4 & -1/4 \\ 1/8 & -1/4 & 1/4 & 1/4 & -1/4 & -1/4 & 1/4 & -1/4 \\ 1/8 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \end{vmatrix}$$

Figura 11: Matriz de coeficientes de contraste com os divisores

Chamando o vetor das médias dos valores obtidos nos ensaios de y , calcula-se os efeitos através do produto Mty , onde Mt é a transposta da matriz M , utilizando um software de álgebra linear denominado *Scilab*TM. Para o presente exemplo, obter-se-á o vetor:

Média global		22,06
A		13,63
B		2,125
C	=	5,875
AB		0,625
AC		2,375
BC		-0,625
ABC		-0,125

Figura 12: Vetor dos efeitos

5. ANALISANDO OS RESULTADOS

Para a estimativa do erro, primeiramente deve-se proceder ao cálculo da estimativa conjunta da variância de uma observação individual dada pela *Equação 2*, onde $N = 8$ e d_i é a diferença entre duas observações correspondentes ao i -ésimo termo:

$$V(y) = s^2 = \frac{\sum d_i^2}{2N}$$

Equação 2 : Variância de uma observação individual

Ou pode-se usar a forma do produto escalar, chamando de d o vetor coluna das diferenças e d' o transposto:

$$s^2 = \frac{d' d}{2N}$$

Equação 3 : Forma de produto escalar

Substituindo os valores, obtém-se $s^2 = 6,8125$. A variância da média de duas observações será $s^2/2$. Como cada efeito é uma combinação linear de oito valores com coeficientes $+ 1/4$ e $- 1/4$, e admitindo que esses valores são independentes, podemos obter a estimativa de um efeito, fazendo uso da Equação 4, onde a_i são os coeficientes citados:

$$V(efeito) = \sum_1^8 a_i^2 \frac{s^2}{2}$$

Equação 4 : Variância de um efeito

Obtém-se $V(efeito) = 1,703125$. Como o erro padrão de um efeito é a raiz quadrada deste último valor, ter-se-á, aproximadamente, **1.3050383**. O erro padrão do rendimento médio global será metade deste valor, pois seus coeficientes são todos iguais a $1/8$, logo seu valor será **0.6525192**. Sendo assim, obtém-se a *Tabela 5*, com os efeitos e seus erros padrões respectivos:

Tabela 5: Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^3 com seus erros padrões

Média global	22.0625 ± 0.6525192
Efeitos principais	
A (Velocidade)	13.625 ± 1.3050383
B (Espessura)	2.125 ± 1.3050383
C (Amperagem)	5.875 ± 1.3050383
Interações de dois fatores	
AB	0.625 ± 1.3050383
AC	2.375 ± 1.3050383
BC	-0.6250 ± 1.3050383
Interação de três fatores	
ABC	-0.1250 ± 1.3050383

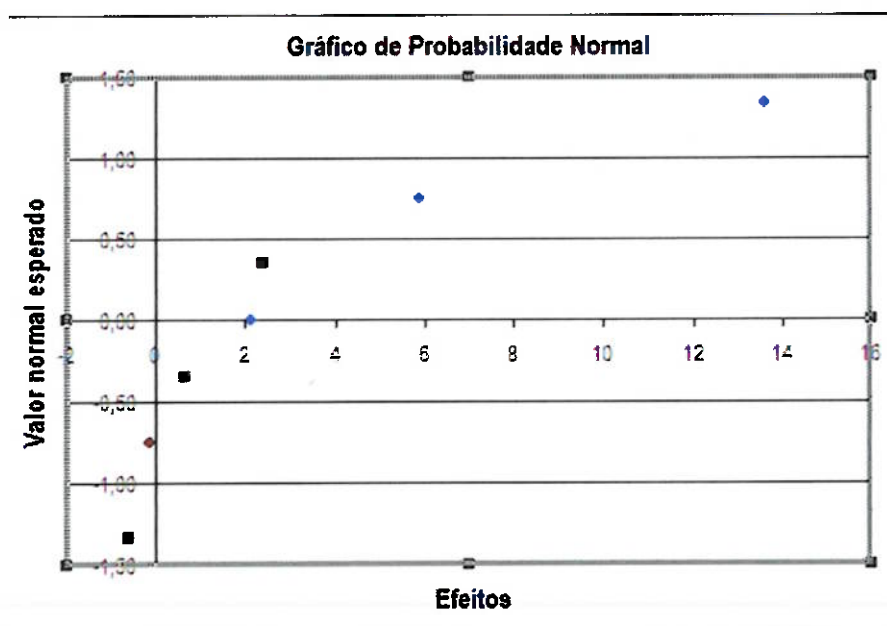


Figura 13: Gráfico de probabilidade Normal

Ainda utilizando o exemplo, pode-se interpretar os efeitos calculados num fatorial 2^3 como contrastes geométricos em um cubo e faces de um cubo, cujos vértices são os oito ensaios. Os efeitos principais são contrastes entre dois planos (faces) opostos. A direção das setas da **Figura 14** representa o aumento dos níveis de cada fator.

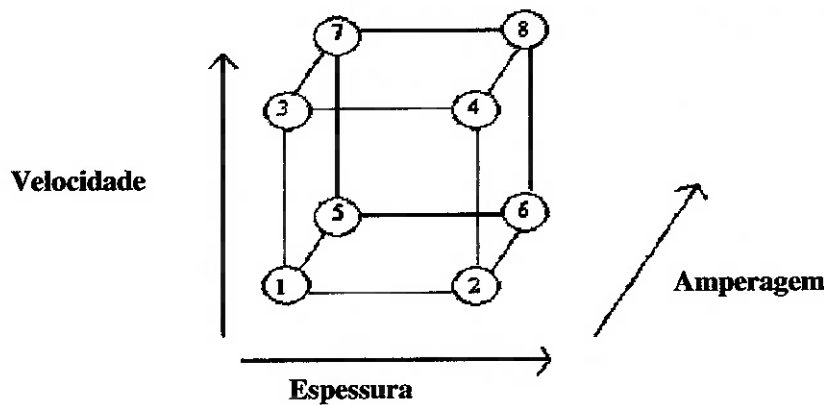


Figura 14: Representação geométrica do planejamento fatorial 2^3

O modelo estatístico pode ser construído através da **Equação 5** onde β_0 corresponde à média global e os demais são estimados como metade das estimativas dos efeitos correspondentes:

$$y(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \varepsilon(x_1, x_2, x_3)$$

Equação 5 : Estimativa de uma observação na combinação de níveis (x_1, x_2, x_3)

Observando o vetor da Figura 12, nota-se que os três maiores efeitos são o A (Velocidade de Soldagem), o C (Amperagem) e a interação AC (Velocidade e Amperagem), o que é bastante plausível e já se é sabido que esses fatores são decisivos nos níveis finais de distorção. Assim, substituindo na Equação 4, tem-se:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= 22.0625 + \frac{13.625}{2} A + \frac{5.875}{2} C + \frac{2.375}{2} AC \\ \hat{y} &= 22.0625 + 6.8125 A + 2.9375 C + 1.1875 AC \end{aligned}$$

Equação 6 : Equação da superfície de resposta.

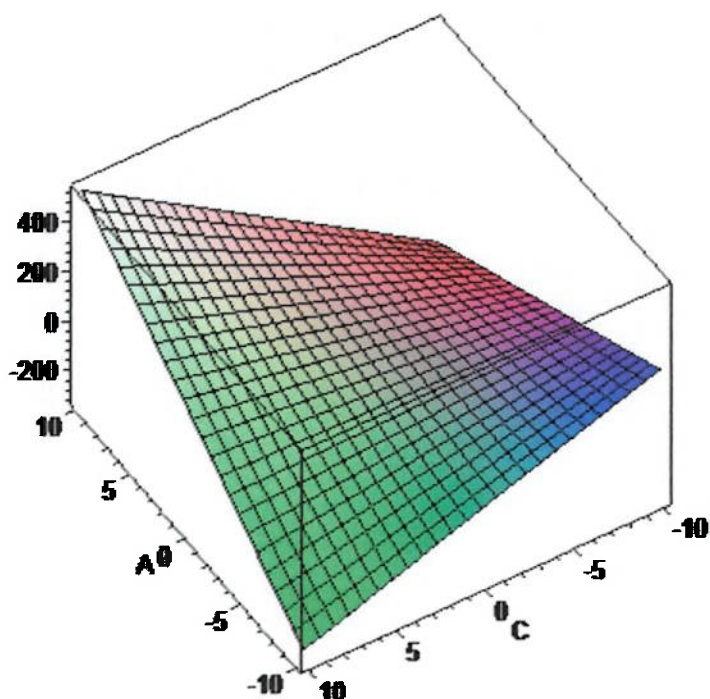


Figura 15: Superfície de resposta

A *figura 15* apresenta a visualização da interação entre as variáveis A e C através de um gráfico bidimensional denominado de superfície de resposta.

A partir desses resultados, resolveu-se fazer outro planejamento fatorial 2^3 , utilizando dados experimentais com outros fatores que foram apresentados no mesmo trabalho da equipe de Tecnologia de Construção Naval da EPUSP (ref.9). Os fatores são:

Velocidade de soldagem (fator A), Espessura da chapa (fator B) e o peso de eletrodo consumido por unidade de comprimento do cordão de solda (fator C). Na **Tabela 6**, vê-se cada um dos fatores e seus respectivos níveis.

Tabela 6: Planejamento fatorial com 3 fatores e 2 níveis escolhidos

Fatores	Níveis selecionados	
	Mínimo (-)	Máximo (+)
A – Velocidade de soldagem	2,60 a 2,78mm/s	2,98 a 3,54 mm/s
B – Espessura da chapa	1/8"	3/16"
C – peso de eletrodo consumido por unidade de comprimento do cordão de solda	(0,945 a 1,96) g/m	(2,082 a 2,957)g/m

Utilizando o planejamento fatorial 2^3 descrito acima, para o caso de um painel de juntas livres, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8, os dados em vermelho foram retirados do trabalho da equipe de Tecnologia de Construção Naval da EPUSP, que apresenta na tabela 7 resultados experimentais para juntas livres (Ref. 9).

Tabela 7: Resultados experimentais para juntas livres (Ref. 9)

h (mm)	i (A)	V (V)	v (mm/s)	D (mm)	w (g/cm)	θ (10^3 Rad)
3,175	90	25	2,68	2,5	1,015	3,84
-	90	25	2,46	2,5	2,205	17,14
3,175	90	23	2,75	2,5	1,032	7,7
-	90	23	2,78	2,5	2,082	16,07
-	90	23	2,98	2,5	2,957	32,67
-	90	23	3,178	2,5	3,85	44,6
3,175	90	23	2,698	2,5	1,01	5,2
-	-	-	3,042	-	1,858	33,07
-	-	-	3,080	-	2,672	48,77
-	-	-	3,206	-	3,454	64,26
4,763	90	24	2,985	2,5	0,945	16,57
-	-	-	3,175	-	1,785	27,47
-	-	-	3,205	-	2,86	40,33
-	-	-	3,105	-	3,675	54,07
4,763	90	20	2,60	2,5	1,00	30,99
-	-	-	2,62	-	2,00	39,65
-	-	-	2,67	-	2,94	67,13
4,763	90	20	2,67	2,5	1,00	17,05
-	-	-	2,71	-	1,96	37,98

Tabela 8: Resultados das combinações dos níveis

Juntas livres	Espessura da chapa(mm/pol)			
	- (3,175mm[1/8"])		+ (4,763mm[3/16"])	
	W(g/cm)		W(g/cm)	
	- (1,01 a 1,858)	+ (2,082 a 2,957)	- (0,945 a 1,96)	+ (2,91 a 2,94)
- (2,60 a 2,78)	5,84	16,07	30,99	55,14
	7,7	17,14	37,98	67,13
Total	13,54	33,21	68,97	122,27
+ (2,98 a 3,54)	32,67	44,6	16,57	40,33
	35,07	48,77	27,47	54,07
Total	67,74	93,37	44,04	94,4

Obs: As respostas dos experimentos são medidas de deformação angular (10^{-3} rad).

E aplicando o planejamento fatorial, obtém-se a **Tabela 9**, com os efeitos e seus erros padrões respectivos:

Tabela 9: Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^3 com seus erros padrões

Média global	33,928125 ± 16,002048
Efeitos principais	
A – Velocidade de soldagem	4,18375 ± 4,000256
B – Espessura da chapa	14,56375 ± 4,000256
C – peso do eletrodo consumido por unidade de comprimento de solda	19,28375 ± 4,000256
Interações de dois fatores	
AB	-17,38 ± 4,000256
AC	-3,134 ± 4,000256
BC	6,631 ± 4,000256
Interação de três fatores	
ABC	- 0,1250 ± 1,3050383

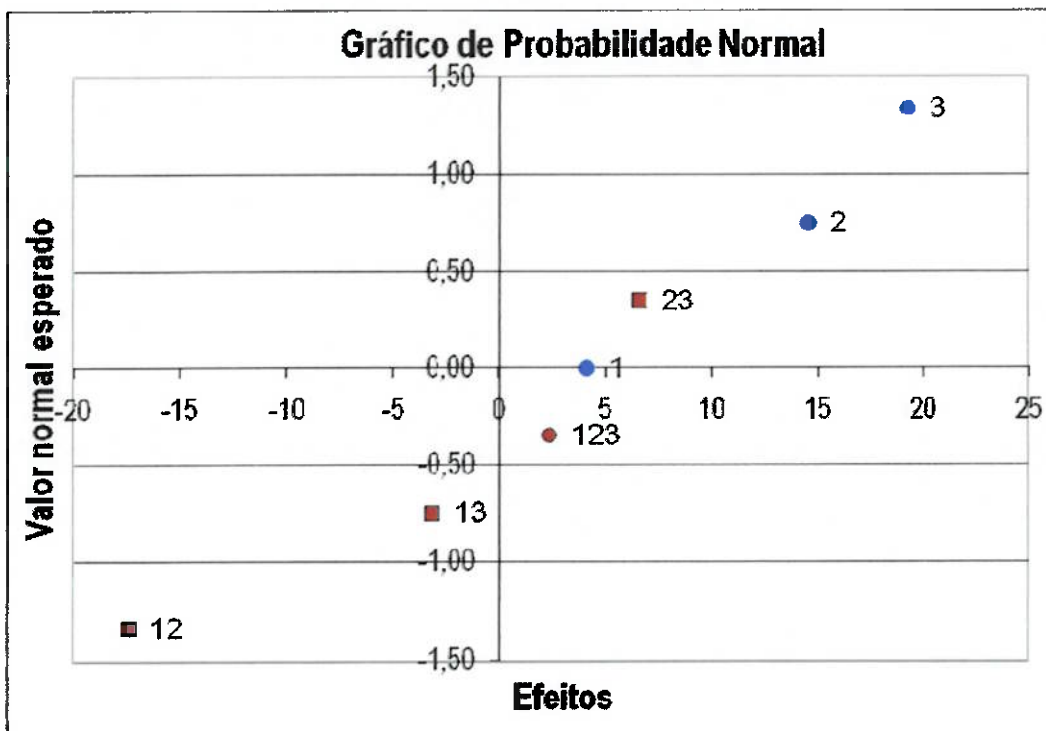


Figura 16: Gráfico de probabilidade Normal

Ainda utilizando o exemplo, é possível interpretar os efeitos calculados num fatorial 2^3 como contrastes geométricos em um cubo faces de um cubo, cujos vértices são os oito ensaios. Os efeitos principais são contrastes entre dois planos (faces) opostos. A direção das setas da **Figura 17** representa o aumento dos níveis de cada fator.

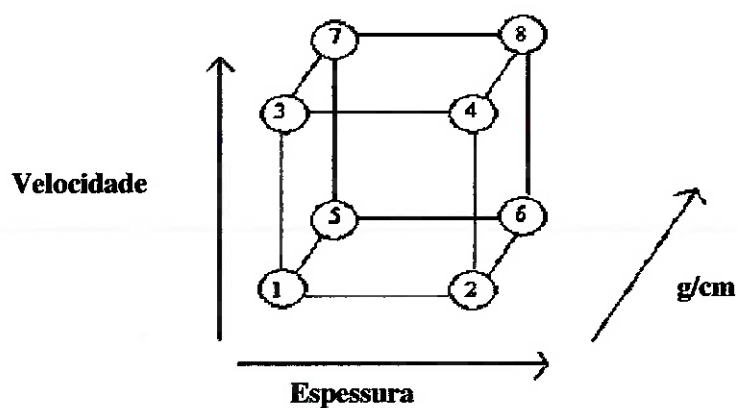


Figura 17: Representação geométrica do planejamento fatorial 2^3

Observando o vetor da **Tabela 9**, nota-se que os três maiores efeitos são o C, o B e a interação BC. Assim, substituindo na **Equação 4**, ter-se-á:

$$\hat{y} = 33,928125 + \frac{14,56375}{2}B + \frac{19,28375}{2}C + \frac{6,631}{2}BC$$

$$\hat{y} = 33,928125 + 7,281875B + 9,641875C + 3,3155BC$$

Equação 7 : Equação da superfície de resposta.

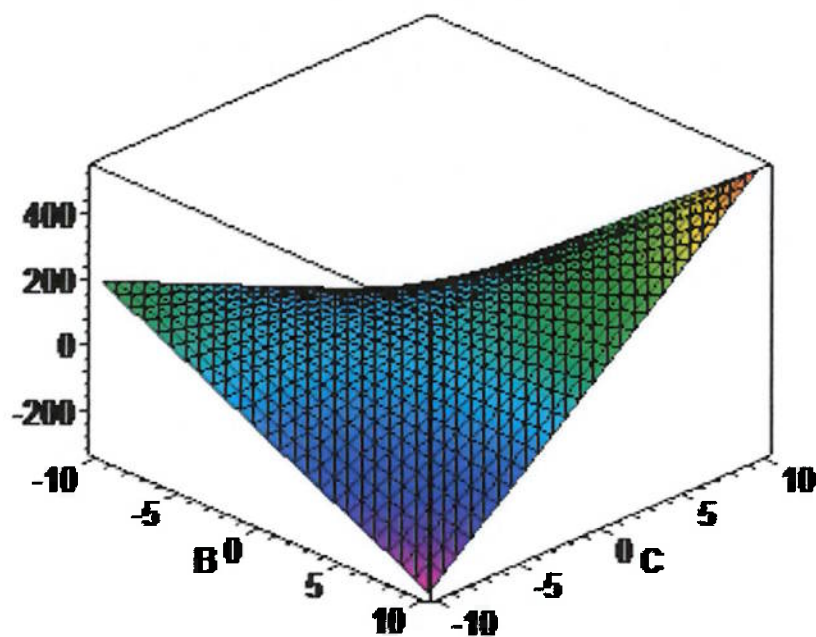


Figura 18: Superfície de resposta

A *figura 18* apresenta a visualização da interação entre as variáveis B e C através de um gráfico bidimensional denominado de superfície de resposta.

6. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi apresentar uma aplicação do planejamento fatorial para análise de deformações residuais em painéis estruturais soldados, tendo como objetivos identificar os parâmetros que mais influenciam o processo, obter o melhor ajuste dos parâmetros para otimização dos resultados do processo e, por fim, determinar os modelos matemáticos para melhor prever os resultados do processo em questão. Os resultados obtidos através das análises realizadas apontaram que a aplicação do planejamento fatorial no processo de soldagem por eletrodo revestido foi bem-sucedida.

Observou-se uma forte interação da velocidade de soldagem com amperagem para juntas restritas conforme o primeiro planejamento fatorial e no segundo planejamento observou-se uma forte interação da espessura da chapa com o peso do eletrodo consumido por unidade de comprimento do cordão de solda para juntas livres, pode-se perceber uma relação direta entre os planejamentos e mostrando que é viável a sua utilização no preparo de experimentos.

O planejamento de experimentos reduz drasticamente o número de ensaios a serem realizados representando redução de custos e flexibilidade nos ensaios desta natureza, sem perda do rigor matemático da análise. Portanto, o planejamento fatorial demonstrou ser também ferramenta muito útil e poderosa para ser aplicada no processo produtivo da indústria naval, devendo ser ampliado a outros processos de engenharia desse setor.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN WELDING SOCIETY, Available at: <http://www.aws.org/w/a> (Accessed: 2011, April 28).
2. BARROS NETO, Benício de, Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria, Campinas: UNICAMP, 3ª Edição, 2007.
3. BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1978. 653 p.
4. CALADO Verônica e MONTGOMERY Douglas. Planejamento de Experimentos usando o Statistica™. 1º ed, editora E-papers. 2003. Rio de Janeiro. 260 p.
5. MASUBUCHI, K. (1980) Analysis of Welded Structures, Pergamon Press.
6. MONTGOMERY, Douglas C. & Runger, George C., Applied statistics and probability for engineers, New York: John Wiley & Sons, 1st Edition, 1994.
7. OKIMURA, T. & TANIGUCHI, C. (1982) Engenharia de Soldagem e Aplicações, LTC, capítulo 5.
8. RODRIGUEZ, M. V. R. Gestão Empresarial Organizações que Aprendem. Qualimark, Rio de Janeiro, 2002.
9. TANIGUCHI, C., Gonçalves, E., Análise das Deformações residuais em painéis estruturais de chapas finas, VI - Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval – Setembro – 1976.

ANEXO A

Rotina do Scilab™ para o planejamento fatorial 2^3

```
// Display mode  
mode(0);
```

```
// Display warning for floating point exception  
ieee(1);
```

```
// Planejamento fatorial com três fatores a dois níveis( $2^3$ )
```

```
xdel(winsid())  
clear
```

```
// Resposta das observações
```

```
x1 = [5.84;32.67;30.99;16.57;16.7;33.21;55.14;40.33];  
x2 = [7.7;35.07;37.98;27.47;33.21;48.77;67.13;54.07];
```

```
//Média das respostas
```

```
r = (x1+x2)/2;
```

```
// Matriz de contraste
```

```
m = [1/8,-1/4,-1/4,-1/4,1/4,1/4,1/4,-1/4;1/8,1/4,-1/4,-1/4,-1/4,1/4,1/4,-1/4;1/8,-1/4,1/4,-1/4,-1/4,1/4,-1/4,1/4;1/8,1/4,1/4,-1/4,-1/4,-1/4,1/4,-1/4;1/8,-1/4,-1/4,1/4,1/4,-1/4,-1/4,1/4;1/8,1/4,-1/4,1/4,-1/4,1/4,1/4,-1/4;1/8,-1/4,1/4,1/4,-1/4,-1/4,1/4,1/4;1/8,1/4,1/4,1/4,1/4,1/4,1/4,1/4];
```

```
// Calculando os efeitos
```

```
Efeitos = m'*r
```

```
// Estimativa conjunta da variância experimental
```

```
d = x1-x2;  
VarExp = (d'*d)/(2*8)  
VarEfeito = VarExp/4
```

```
// Erro padrão de um efeito
```

```
ErroEfeito = sqrt(VarEfeito)
```

```
// Erro padrão da média global
```

$\text{ErroMediaGlobal} = \text{ErroEfeito}/2$

Startup execution:

loading initial environment

Efeitos =

33.928125

4.18375

14.56375

19.28375

- 17.38375

- 3.13375

6.63125

2.39875

VarExp =

64.008194

VarEfeito =

16.002048

ErroEfeito =

4.000256

ErroMediaGlobal =

2.000128

ANEXO B

Rotina do Maple™ para plotar gráficos 3d.

```
> f:=33.928125+7.281875*B+9.641875*C+3.3155*B*C;
```

$$f := 33.928125 + 7.281875 B + 9.641875 C + 3.3155 B C$$

```
> plot3d(f,B=-10..10,C=-10..10,shading=Z);
```

