Planejamento de Experimentos aplicado à linha de próteses de joelho

Silvio Nunes dos Santos (CEUCLAR) silvionu@gmail.com
Álvaro Azevedo Cardoso (Unitau) azevedo@unitau.br
Carlos Alberto Chaves (Unitau) carlosachaves@yahoo.com.br
José Rubens de Camargo (Unitau) jcamargo@unitau.br
Alexandre Arthuzo (Unitau) a.arthuzo@terra.com.br
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Resumo: *Stuart Hunter citando G.E.P Box diz que os fundamentos do método cientifico estão vinculados a 4 conceitos: hipótese, projeto de experimentos, produção de dados e analise. Lembrando Deming, Hunter cita que estes quatro conceitos combinados com o ciclo PDCA estabelecem um ciclo constante de idéias novas. Hunter aconselha que para entender o planejamento estatístico de experimentos deve-se iniciar com um projeto simples. Este artigo faz uma revisão dos conceitos sobre design of experiments e apresenta os resultados obtidos em um estudo sobre recuperação de próteses de joelho pelo processo MAG. Na década de 90 com a propagação de novas metodologias da qualidade descobriu-se que a robustez dos produtos é muito mais função de um bom projeto que de um controle rígido dos processos. Os processos de soldagem não são muito freqüentes na indústria proteses cirurgicas. A qualidade está relacionada à perda para sociedade causada pelo produto durante seu ciclo de vida, quando se trata de um processo de solda esta perda não é tolerável devido ao impacto na segurança do cliente.*
Palavras-Chave: *Planejamento de experimentos, Hipóteses, Fatoriais.*

1. INTRODUÇÃO

Experimentos têm por objetivos: determinar os fatores que influenciam na saída do processo. Ajustar e fixar os fatores controláveis buscando obter respostas dentro dos valores desejados que normalmente são os valores nominais especificados em projeto. (CALEGARE, 2001)

Tornar o projeto robusto, sendo 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 usa-se para selecionar parâmetros que tornem o projeto robusto, avaliar materiais alternativos e fixar os parâmetros-chave do projeto, ou seja, os parâmetros que impactam no desempenho do produto. (CALEGARE, 2001)

Existem diversos tipos de planejamento de experimentos para a pesquisa de campo foram estudados 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, 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 analise 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, um experimento fatorial 2^k sendo k acima de 5 fatores gera dificuldades no experimento, porque 2^5 resultam em 32 experimentos. Usando-se 4 corpos de prova em cada ensaio, serão necessários 128 ensaios. (UMETRICS, 2000)

Experimentos Ortogonais: Segundo Ross (1991), os arranjos ortogonais se constituem numa invenção matemática cujo registro mais antigo data de 1897. O valor real da utilização do arranjo consiste na capacidade de avaliar diversos fatores (atributos) com um número mínimo de testes (alternativas). Considera k fatores, n níveis cada. Testa todos os níveis de cada fator de uma maneira equilibrada. O número de experimentos é 1+k(n-1). Este é o menor plano equilibrado de experimentação. Os efeitos e interações principais são confundidos. ROSS (1991)

Um exemplo usando L9: Um experimento L9 usando 4 fatores e 3 níveis, 1+k(n-1) = 1 + 4.(3-1) = 1 + 8 = resulta em 9 alternativas ou ensaios. (ROSS, 1991)

TABELA 1 – Planejamento ortogonal L9

Ensaio nº.	1	2	3	4	Resposta
1	0	0	0	0	R1
2	0	1	1	1	R2
3	0	2	2	2	R3
4	1	0	1	2	R4
5	1	1	2	0	R5
6	1	2	0	1	R6
7	2	0	2	1	...
8	2	1	0	2	...
9	2	2	1	0	R9

Fonte: Adaptado de ROSS (1991)

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 niveis 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. Um experimento fatorial fracionado ocorre quando apenas uma fração do fatorial completo é testada. WERKEMA (1996)

1.2 Analise de Variância para experimentos de Taguchi

Para estudar os parâmetros de controle e de ruído Taguchi (1995) recomenda o uso de matrizes ortogonais. A seleção do arranjo ortogonal a ser utilizada depende do:

1. Número de parâmetros e interações de interesse;
2. Número de níveis para os parâmetros de interesse.

Estes dois itens determinam o total de graus de liberdade exigidos para todos os experimentos. Os graus de liberdade para cada parâmetro consistem no número de níveis menos 1.

$v_A = k_A - 1$, onde, k_A é o numero de níveis do parâmetro A.

O número de graus de liberdade para uma interação é o produto dos graus de liberdade dos parâmetros nessa interação. $v_{AxB} = v_A \cdot v_B$.

O mínimo de graus de liberdade exigido em série de experimentos consiste na somatória de todos os graus de liberdade de parâmetro e interação.

A análise da variância consiste em uma técnica matemática que decompõe origens que justificam a variação total, isto é a variação total é decomposta em seus componentes apropriados.

Obtem-se a variabilidade total dos dados pela soma dos quadrados dos desvios do valor médio. Estima-se ,assim, a contribuição de cada parâmetro e do residual com relação à

variabilidade. $SQ_T = [Z(\ )i - m]^2$ $SQ_T = [Z(\ )i]^2 - (FC)^2/n$

A variação ocorrida devido a cada parâmetro calcula-se, mais usualmente, para qualquer número de níveis do parâmetro por: $SQP = [(Pi^2)] - FC^2/n$ onde, P= parâmetro em estudo.

Supondo que (A x B)i representa a somatória de dados sob a i-ésima condição das combinações de parâmetros A e B; considerando-se também c o número de combinações possíveis dos parâmetros que interagem e n(A x B)i o número de valores observados sobre esta condição, tem-se, para calcular a variação devida à interação dos supostos parâmetros A e B, utilizado com maior freqüência, a seguinte fórmula: $SQ_{AxB} = [(A \times B)i / n(A \times B)i] - FC^2/n - SQ_A - SQ_B$.

Segundo Ross (1991), o modo mais fácil para se calcular a variação do erro, é utilizando a técnica lenta. Qualquer variação usada para considerações futuras, além da que é justificável, consiste em erro, onde $SQ_T = [SQ_{P1} + SQ_{P2} +...+ SQ_{Pi}]+[SQ_{(P1x\ P2)} +...+ SQ_{(Pi\ x\ Pj)}]+ SQe$ logo, $SQ_e = SQ_T + [SQ_{P1} +...+ SQ_{Pi}] + [SQ(_{P1} \times _{P2}) +...+ SQ_{(Pi \times Pj)}]$. SQ_e - Soma Quadrática do Erro. $SQ_{(Pi \times Pj)}$ - Soma Quadrática das Interações. SQ_{Pi} - Soma Quadrática dos Parâmetros.

Calculam-se os graus de liberdade da seguinte forma: $v_r = n - 1$ igualmente, $v_p=[v_{P1}+...v_{Pi}]+[v_{(P1xP2)}+...v_{(PixPj)}]+v_e$, onde, v_{P1} é o grau de liberdade dos parâmetros: $v_{P1=}\ k_{P1-1;}\ k_{P1}$: número de níveis do parâmetro. Graus de liberdade das interações (Pi x Pj): $v_{(PixPj)} = v_{(Pi)} \times v_{(Pj)}$ Graus de liberdade do erro: $v_e = v_T - v_{Pi} - v_{(PixPj)}$

A variância (V) será encontrada dividindo-se a soma dos quadrados (SQ) pelos graus de liberdade, conforme cada caso. Então se tem: $V_T = SQ_T/v_T$; $VPi = SQ_{Pi}/v_{Pi}$; $V_{(Pi \times Pj)} = SQ_{(Pi \times Pj)}/v_{(Pi \times Pj)}$; $Ve = SQe/ve$.

Estatisticamente, existe uma ferramenta que proporciona uma decisão com um certo nível de confiança quanto ao fato de estas estimativas serem significativamente diferentes. Esta ferramenta é chamada de teste F. O teste F consiste simplesmente na razão de variância de amostras: $F_{Pi} = V_{Pi}/V_e$, e $F_{(Pi \times Pj)} = V_{(Pi \times Pj)}/V_{\hat{e}}$.

1.3 Processo de Soldagem

A soldagem é hoje um dos processos de fabricação mais importantes e populares para a união de materiais metálicos. A garantia de sua qualidade requer, no entanto, em determinadas aplicações, avaliações e qualificações da junta soldada. AWS (1988).

A inspeção e a aceitabilidade de determinada solda deve atender a critérios preestabelecidos em normas especificas. AWS (1980).

Nos paises desenvolvidos, onde a qualidade do produto é fator determinante da sua aceitabilidade no mercado, o desenvolvimento de normas e inspeção e aprovação do produto torna-se necessidade indispensável.

O processo de soldagem é muito antigo e comum na maioria das indústrias. Apesar da evolução das técnicas, ainda existe um número elevado de processos que dependem da experiência do operador no ajuste dos parâmetros. Estes parâmetros são importantes e estão relacionados com defeitos e dificuldades comuns em processos de soldagem: má aderência do cordão de solda, porosidades, mordeduras, falta de penetração, entre outras. WAINER (1976).

O processo de soldagem MAG é bastante versátil. Algumas de suas principais vantagens são: taxa de deposição maior que a de soldagem com eletrodo revestido, menos gás e fumaça na soldagem, alta versatilidade, larga capacidade de aplicação além de poder ser aplicado em uma faixa ampla de espessuras e materiais. O uso do processo MAG é atualmente o método mais utilizado na Europa Ocidental, Estados Unidos e Japão. Isto ocorre entre outras coisas, devido a sua alta produtividade e facilidade de automação. WAINER (1976).

Na indústria cirúrgica, a influência das variações dos parâmetros de solda em componentes soldados pode comprometer a qualidade do produto no aspecto estético e afetar diretamente o bom funcionamento da protese e consequentemente o bem estar do usuário.

Por conseguinte, o presente trabalho apresenta um estudo sobre as influencias de 4 tipos de variações de solda: [A] ângulo da tocha, [B] inclinação de soldagem (figura 1), [C] extensão do eletrodo e [D] posição do eletrodo, com o objetivo de estabelecer qual o limite máximo de cada um dos parâmetros que podem influenciar a qualidade do cordão de solda. Nesse trabalho os parâmetros do equipamento de solda como: corrente, voltagem, velocidade de solda, tipo do gás (80% Ar + 20% CO_2), fluxo de gás e tipo do arame foram fixados.

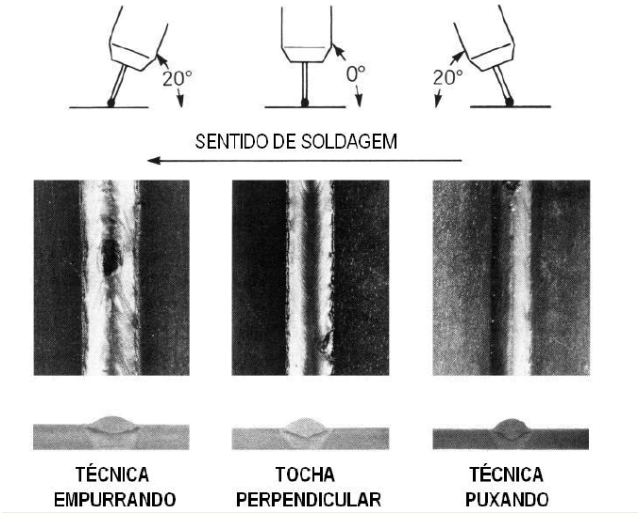


FIGURA 1 – Técnicas de Soldagem
Fonte: Apostila de Métodos de Soldagem MIG-MAG Esab

1.4 Prótese de joelho

A articulação normal do joelho tem três compartimentos. Havendo necessidade, estes compartimentos são substituídos por um dispositivo mecânico em aço inoxidável. Este dispositivo chama-se protese total de joelho e compõem-se normalmente dos componentes mostrados na figura 2. Os quadros [2] e [4] mostram o componente femoral, o quadro [3] mostra o platô tibial. SURIN (2005). STRYKER ORTHOPAEDICS (2006).

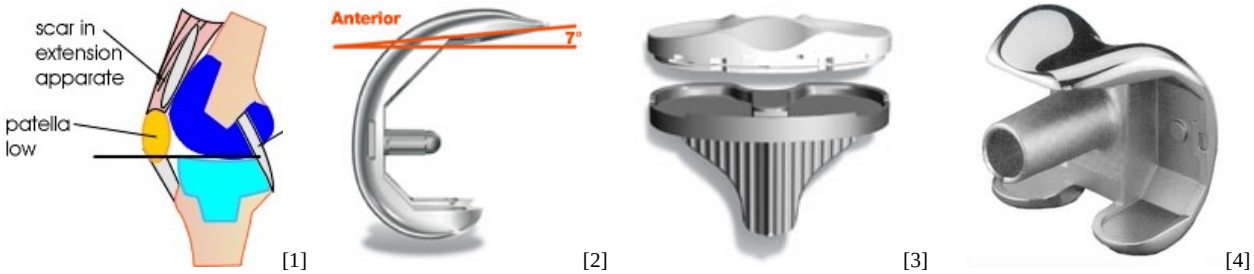


FIGURA 2 - Componentes de um sistema total de protese de joelho

O componente femoral geralmente é fundido e passa pelo processo de polimento. Havendo porosidade ou fissuras no componente este recebe enxerto de material através do processo de soldagem.

2. MÉTODO

Nos testes, se utilizou corpos-de-prova de chapas de aço inoxidável 304 L usados na produção de componentes cirúrgicos e arame de aço da classe E 317 L de 1,2 mm de diâmetro. Foi usada uma mistura contendo 80% Ar e 20% CO2 como gás de proteção, com uma vazão de 20 litros/min. O material refere-se a uma chapa com dimensões originais de 115 x 70 x 2,0 mm. Os corpos-de-prova foram soldados pelo processo MAG.

Para fixação das chapas a serem soldadas foi utilizado um dispositivo especial com grampos. As superfícies antes do processo de soldagem foram raspadas e limpas em ultra-som com tricloroetileno. Os testes foram realizados no laboratório metalúrgico da empresa observando-se as respectivas normas de soldagem e suas especificações.

Foram realizadas soldagens com apenas um cordão de solda e retirado dois corpos-de-prova para cada variação dos parâmetros, que foram analisados através de micrografia (penetração, garganta, largura da solda) e pelo aspecto visual (porosidade, furos, falhas no cordão, descontinuidade e mordedura) e ensaio de tração.

Para a realização da solda, os seguintes parâmetros de solda foram fixados: corrente, voltagem, fluxo e tipo de gás, arame de solda e velocidade de soldagem. A tabela 1 mostra as condições de soldagem e a avaliações das amostras na junta com chapas sobreposta.

Um planejamento usando arranjo ortogonal L9 foi realizado baseado na tabela 1. Escolheu-se o arranjo L9 para se reduzir ao máximo o numero de testes necessários.

Pode-se verificar na revisão bibliográfica que um experimento fatorial completo para o caso apresentado deveria ser um experimento 3^4, 4 fatores e 3 níveis, que requisitaria 81 testes no mínimo. Usando-se um fatorial fracionário poderia se reduzir em 1 grau de liberdade o experimento, mesmo assim ainda seriam necessários 27 ensaios, ou seja, 3^{4-1}. Não considerando repetições.

Os arranjos ortogonais, entretanto reduzem o numero de ensaios sem perda na exatidão dos resultados. No caso apresentado tem-se 4 variáveis aferidas: (A) Ângulo de tocha, (B) Inclinação de Soldagem, (C) Extensão do Eletrodo e (D) Posição do Eletrodo. O objetivo era saber qual combinação geraria a melhor resposta em termos de soldagem usando o processo MAG. Os números: N1, N2, N3, representam os códigos dos ensaios realizados.

TABELA 2 - Parâmetro do Experimento

Codificação do parâmetro			→		**1**	**2**	**3**
Variáveis	**Angulo de Tocha**	A	Grau	Multinível	15º	30º	45º
	Inclinação de Soldagem	B	Grau	Multinível	30º	0º	-30º
	Extensão de Eletrodo	C	mm	Multinível	0	15	30
	Posição de Eletrodo	D	mm	Multinível	2	1	0

Para os experimentos do estudo de campo se usou o software Modde 7® e se aplicou a centralização de um fator o que aloca mais um ensaio ao projeto. O arranjo ortogonal L9 pode ser representado graficamente. (figura 3). Esta representação mostra a ortogonalidade entre os fatores.

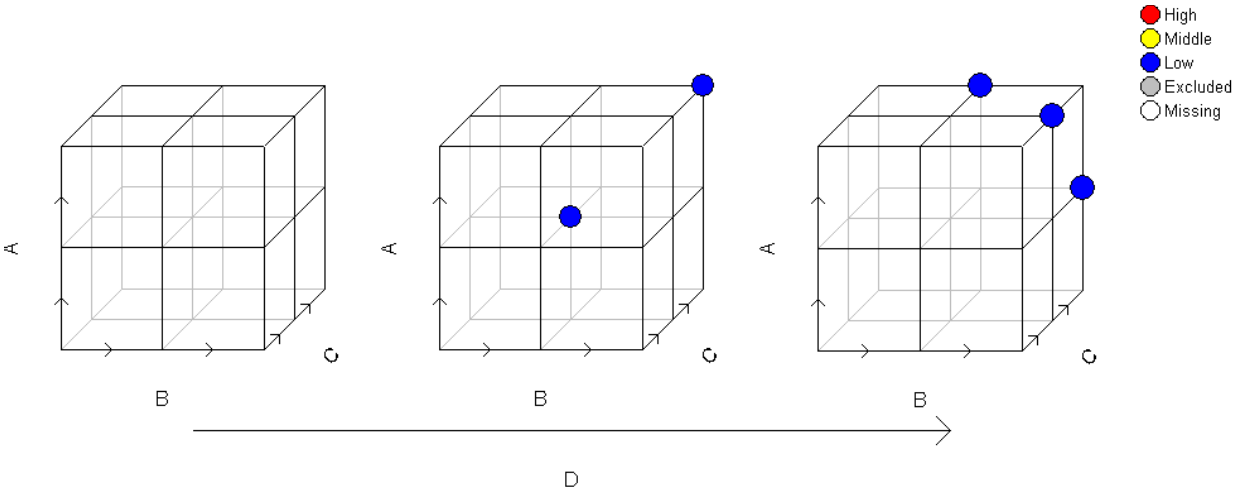


FIGURA 3 - Projeto de Experimentos L9 com 3 Níveis para Tração
Fonte: Modde 7 ® Umetrics

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

Foram realizados 2 ensaios para cada linha da tabela 3 (1 replicação), totalizando 20 experimentos. Os valores na coluna "resposta" estão registrados em mm. A ordem dos ensaios é aleatória. O ensaio N1, sexto ensaio realizado, define valores "1" para todos os fatores dos ensaios desta linha significando uma combinação estruturada da seguinte forma: (A) ângulo de tocha a: 15º, (B) Inclinação de Soldagem a 10º, (C) Extensão do Eletrodo a 0 mm e (D) Posição do Eletrodo a 2 mm das peças a serem soldadas.

TABELA 3 – Quadro parcial de respostas ao delineamento do sistema de joelho

Experimento		**Planejamento**				**Resposta**
Nome	**Ordem**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Micrografia**
N01	01	1	1	1	1	3,2
N02	01	1	1	1	1	3,1
N03	07	1	2	2	2	3,0
N04	07	1	2	2	2	3,1
N05	04	1	3	3	3	2,9
N06	04	1	3	3	3	2,9
N07	10	2	1	2	3	4,2
N08	10	2	1	2	3	4,1
N09	02	2	2	3	1	3,5
N10	02	2	2	3	1	3,5
N11	09	2	3	1	2	3,8
N12	09	2	3	1	2	3,6
N13	08	3	1	3	2	3,1
N14	08	3	1	3	2	3,2
N15	05	3	2	1	3	3,2
N16	05	3	2	1	3	3,1
N17	06	3	3	2	1	3,1
N18	06	3	3	2	1	3,2
N19	03	2	2	2	2	2,5
N20	03	2	2	2	2	2,5

A tabela 4 apresenta uma analise de variação multivariada. A coluna p indica se o modelo estatístico é significativo. DF: graus de liberdade. R^2: indica a percentagem de variação do modelo. Q^2: a percentagem de variação da resposta predita pelo modelo de acordo com a validação transversal. $Radj^2$: resíduo. Std-dev: desvio padrão. RMS: superfície de resposta.

F-value: valor do teste "f". Indica se o modelo é significativo.

TABELA 4 – Analise de Variância

Y1	**Coefficient**	**Std-dev.**	**f-value**	**p-value**	**Min**	**Max**	**Act.-value**	**Padronizar**
Constant	1.166888							
A	0.019139	0.042079	0.454838	0.656	1	3	2	((A-2)/1)
B	-0.03294	0.042079	-0.78279	0.446	1	3	2	((B-2)/1)
C	-0.02296	0.042079	-0.54568	0.593	1	3	2	((C-2)/1)
D	0.014618	0.042079	0.34739	0.733	1	3	2	((D-2)/1)
R^2=0.0762	**DF=15**							
$Radj^2$=-0.17			**RMS=0.4774**				**RMS/Ym=0.15**	
Q^2=-0.2771								

De acordo com os resultados obtidos podemos concluir fazendo um resumo dos melhores parâmetros de soldagem MAG, conforme tabela 5.

TABELA 5 – Melhores parâmetros de soldagem MAG

Parâmetros	Resultados
Ângulo da Tocha	30º
Inclinação de Soldagem	10º
Extensão	15 mm
Posição do Eletrodo	0 mm

4. CONCLUSÕES

Para condições de folga de até 1 mm deve-se utilizar arames normalizados acima dessa espessura como por exemplo (1,2mm) e nunca inferior como por exemplo 0,8mm, pois acarretaria na reprovação da solda.

Conforme literatura, a extensão do arame de soldagem (stick out) deve ser de 13 a 20 mm, sendo que neste trabalho, o melhor parâmetro encontrado foi de 15 mm (tabela 5), confirmando o resultado prático com a teoria.

O planejamento de experimentos L9 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 analise.

REFERÊNCIAS

AWS, Standard for AWS certification of welding inspectors; American Welding Society USA, 1988, 10p

AWS, AWS B2.1 Standard for welding Procedure and performance Qualification American Welding Inspection Society, USA 1999

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1978. 653 p.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Gas Metal Arc Welding, Artigo Info Solda, PHD, 2003

CALADO Verônica e MONTGOMERY Douglas. Planejamento de Experimentos usando o Statistica. 1° ed, editora E-papers. 2003. Rio de Janeiro. 260 p.

FORTES, Cleber. Manual de Soldagem MIG-MAG. ESAB BR. 2005. Disponível em: http://www.esab.com.br/literatura/apostilas/Apostila%20Soldagem%20MIG-MAG.pdf acessado em 18/08/2006

ROSS, Phillip J. Aplicações das técnicas de Taguchi na engenharia da qualidade**.** São Paulo. Makkron, 1991

SUBBARAO, E.C. et. – Experiências de Ciência dos Materiais, Edgard Blucher, 1973.

SURIN, Valdemar. What is a Total Knee Prosthesis 2005 disponivel em: http://www.totaljoints.info/OUTLINE_total_KNEE.htm

STRYKER ORTHOPAEDICS. Stryker Total Knee Replacement Systems, disponível em: http://www.stryker.com/jointreplacements/sites/triathlon/fit.php acessado em 10/08/2006 as 01h25min AM.

TAGUCHI, Genichi. Quality Engineering (Taguchi Methods) for the Development of Electronic Circuit Technology. IEE Transactions on Reliability**,** v. 44, n. 2, p. 225-229, june 1995.

TATINI, Selma e Ivanise. SENAI- SP – Soldagem Org. Coleção Tecnologia Senai. São Paulo, 1997

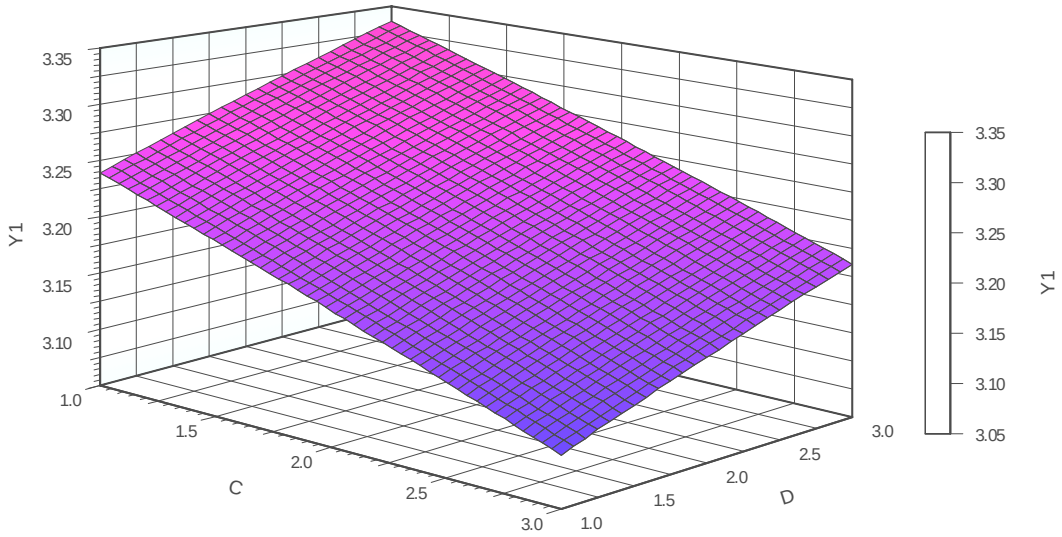
UMETRICS. Design of Experiments – Principles and Applications. Umetrics DOE guide. Learnwais AB. 2000

WAINER, E; Soldagem. Associação Brasileira dos Metais. 9ª Ed. São Paulo 1976.

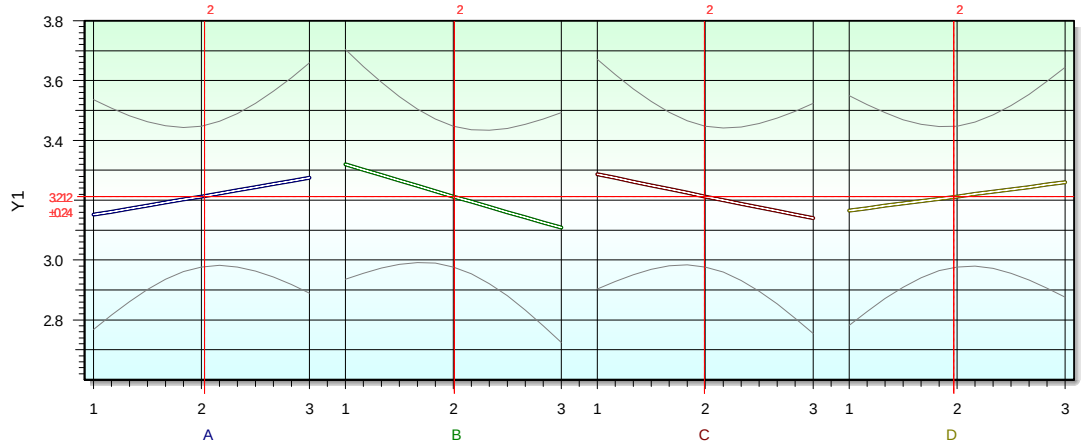
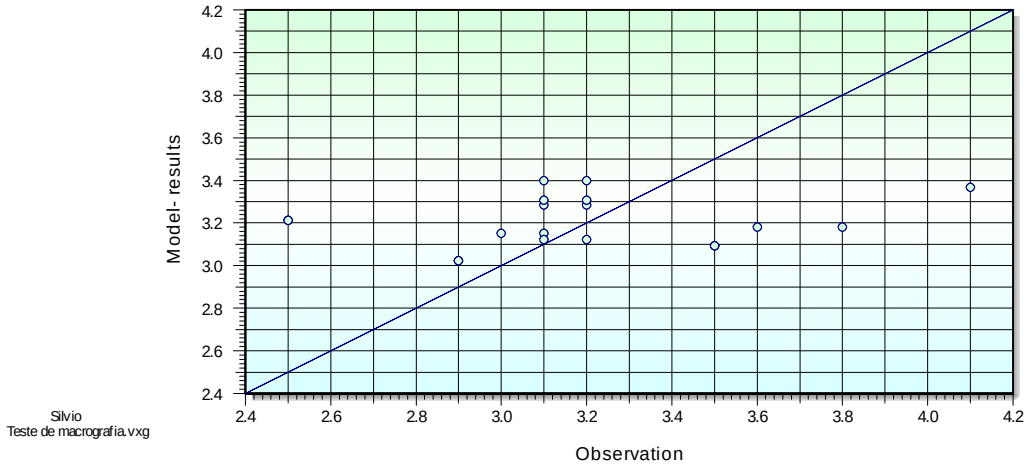
WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. – Planejamento e análise de experimentos. Série Ferramentas da Qualidade. Belo Horizonte: FCO, 1996. 294 p.

Anexo A - Superfície de Resposta do Ensaio de Micrografia

$$Y1 = e^{-0.02296 \cdot \frac{C-2}{1} + 0.014618 \cdot \frac{D-2}{1} + 1.16689}$$



Anexo B – Regressão Múltipla Fatores versus Micrografia



Anexo C – Resíduos versus Micrografia