

## **METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA APLICADA À MEDIÇÃO DE TENSÕES EM CHAPAS**

**Alexandre Aparecido Buenos, alebuenos@fem.unicamp.br<sup>1</sup>**  
**Auteliano Antunes dos Santos Júnior, aute@fem.unicamp.br<sup>1</sup>**  
**Alessandro Roger Rodrigues, roger@mat.feis.unesp.br<sup>2</sup>**  
**Ruís Camargo Tokimatsu, ruis@dem.feis.unesp.br<sup>2</sup>**  
**Pedro Paulo Balestrassi, pedro@unifei.edu.br<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico, Rua Mendeleev, 200, Caixa Postal 6122, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, Barão Geraldo, CEP 13083-970, Campinas – SP, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil, 56, Caixa Postal 31, Centro, CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. BPS, 1301, BPS, CEP 37500-000, Itajubá – MG, Brasil.

**Resumo:** *O planejamento experimental é uma ferramenta muito importante na análise de dados. Seu principal objetivo é verificar quais variáveis são importantes em um determinado experimento. Para a análise existem diversas técnicas que podem ser utilizadas dentre as quais estão os experimentos fatoriais, de mistura e Taguchi. Uma outra técnica bastante empregada em análises estatísticas é a metodologia da superfície de resposta, que foi utilizada neste trabalho. Essa técnica visa desenvolver, melhorar e otimizar uma resposta de interesse que é influenciada por diversas variáveis. Esse trabalho apresenta uma breve revisão da metodologia da superfície de resposta aplicada ao estudo das tensões residuais introduzidas pelo processo de usinagem e medidas através da técnica de ondas longitudinais criticamente refratadas (Lcr) utilizando acustoelasticidade. Posteriormente é realizada uma discussão sobre os resultados e as limitações da metodologia aplicada. Como resultado do trabalho, conclui-se que a metodologia é adequada para a avaliação de quais são os parâmetros de usinagem que influenciam na tensão residual gerada.*

**Palavras-chave:** *Planejamento experimental, metodologia de superfície de resposta, tensões residuais, ensaios não destrutivos.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O objetivo deste trabalho é utilizar a metodologia RSM (*Response Surface Methodology*) para análise experimental das tensões residuais geradas em chapas metálicas pelo processo de usinagem. A metodologia RSM possui ampla utilização e pode ser empregada em diversas análises de experimentos e processos, quando se deseja analisar quais as variáveis exercem maior influência sobre a resposta de interesse e com isso determinar qual a condição ótima de ajuste de parâmetros. No decorrer desse trabalho será realizada uma breve revisão que abordará os fundamentos básicos do planejamento experimental, metodologia da superfície de resposta e experimentos compostos centrais. Essa metodologia apresenta fácil compreensão e análise dos resultados e, também apresenta vantagens no que diz respeito à relação entre a quantidade de corpos de prova necessários para realização do experimento e os resultados esperados.

A metodologia RSM surgiu a partir de estudos realizados por Box e Wilson (1951) relativos a problemas levantados por Hotelling (1941) e Friedman e Savage (1947), que buscavam em suas pesquisas a realização de experimentos para a obtenção de condições ótimas. Desde então foram realizados inúmeros trabalhos relacionados a essa metodologia, grande parte produzidos por Box, que foi um dos grandes precursores, juntamente com seus colaboradores. Dentre os trabalhos que abordam esse tema estão os de Hinkelmann e Kempthorne (1994), Grosh e Rao (1996), Mason, Gunst e Hess (2003), Montgomery (2005) e Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), cada um com abordagens específicas mostrando a viabilidade do emprego da metodologia.

Com o intuito de atingir o objetivo proposto neste trabalho foi realizado um estudo da influência dos principais parâmetros de usinagem na tensão residual gerada pelo processo, a fim de definir as condições ótimas de usinagem utilizando a metodologia RSM. Para isso, foram utilizados corpos de prova produzidos em aço ASTM A36 submetidos ao processo de fresamento de topo para introduzir tensões residuais. Os parâmetros de usinagem controlados foram velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de usinagem ( $a_p$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ). As tensões residuais foram

determinadas através de um método não destrutivo ultra-sônico de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ) utilizando a acustoelasticidade. Esse método permite que sejam medidos os tempos de percurso (TOF) das ondas ( $L_{cr}$ ) para os corpos de prova (CP) no estado livre de tensões e após serem submetidos ao processo de usinagem. Mediante a variação do TOF entre as duas medições citadas anteriormente foi possível determinar as tensões residuais. Aplicando-se a metodologia RSM com o auxílio do software *Minitab versão 15* foi possível determinar quais os parâmetros de usinagem mostraram-se significativos na resposta, possibilitando a determinação das condições ótimas de usinagem para o caso em estudo.

## 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental (DOE – Design of Experiments) representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (Button, 2005).

Esse objetivo maior pode ser dividido em outros objetivos de acordo com o propósito dos ensaios. Dentre eles está a determinação de quais variáveis são mais influentes nos resultados, a atribuição de valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados, a minimização da variabilidade dos resultados e a minimização da influência de variáveis incontroláveis.

O planejamento experimental pode ser dividido em quatro etapas: planejamento, caracterização do processo, otimização e verificação. Na etapa de planejamento deve ser definido o problema, o objetivo e o plano experimental com informações sobre o experimento em estudo. É importante também certificar-se de que o processo e o sistema de medição estão sob controle. Na etapa de caracterização do processo, pode-se identificar as variáveis principais e, posteriormente, reduzir o número de variáveis. Nesta etapa, podem ser utilizados os métodos de experimentos fatoriais completos, experimentos fatoriais fracionados com dois níveis, experimentos Plackett Burman e experimentos fatoriais completos gerais.

Na etapa de otimização é definido o nível máximo e mínimo dos intervalos das variáveis que serão empregadas no experimento. Essa etapa pode ser realizada utilizando os experimentos fatoriais, de superfície de resposta, de mistura, Taguchi e, além desses, pode ser realizada uma otimização da resposta. Na etapa de verificação tem-se a análise dos dados obtidos no experimento após a otimização. Podem ser realizados novos experimentos nas novas condições estabelecidas na etapa de otimização. Assim, pode-se confirmar os resultados obtidos no processo de otimização.

Button (2005) destaca alguns benefícios da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental:

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

### 2.1. Metodologia da Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta denominada em inglês por RSM (Response Surface Methodology) é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para desenvolver, melhorar e otimizar uma resposta de interesse, que é influenciada por diversas variáveis dentro de um processo de medição e análise experimental (Myers, Montgomery e Anderson-Cook, 2009).

Existem diversos objetivos quando se emprega a metodologia de superfície de resposta e, dentre eles, o principal é o uso da superfície de resposta como tentativa de entender melhor o comportamento do sistema mediante a variação dos parâmetros.

De acordo com Mason, Gunst e Hess (2003) existem quatro razões importantes para utilização da metodologia de superfície de resposta.

- A função de resposta é caracterizada em uma região de interesse;
- Inferências estatísticas podem ser feitas sobre a sensibilidade da resposta aos fatores de interesse;
- Níveis de fatores podem ser determinados para que a variável da resposta seja otimizada (por exemplo, máximo ou mínimo), e
- Níveis de fatores podem ser determinados a fim de simultaneamente, otimizar diversas respostas; se a otimização simultânea não for possível, compensações são facilmente perceptíveis.

Segundo Draper e Lin (1996) e Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) a relação que descreve uma resposta ( $y$ ) em função de diversas variáveis é

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + E \quad (1)$$

$$E(y) = \eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (2)$$

Para se determinar a resposta (y) utiliza-se a função da superfície de resposta ( $\eta$ ) determinada através das variáveis do sistema ( $\xi_1, \xi_2, \xi_k$ ) e depois de somada ao erro (E).

A superfície de resposta pode apresentar funções de aproximação denominadas de modelo de regressão polinomial de 1º ordem, que representa o efeito linear, ou modelo de 2º ordem, que representa o efeito de curvatura através de uma combinação do efeito linear, quadrático e de interação. Os efeitos de primeira ordem são descritos por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \xi_1 + \beta_2 \xi_2 + \dots + \beta_k \xi_k + E \quad (3)$$

Os efeitos de segunda ordem são descritos por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \xi_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \xi_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \xi_i \xi_j + E \quad (4)$$

O modelo de segunda ordem inclui todos os termos de primeira ordem, somado aos termos quadráticos  $\beta_{ii} \xi_i^2$  e os termos das interações dos modelos  $\beta_{ij} \xi_i \xi_j$ , sendo que  $\beta$  representa os estimadores dos parâmetros do modelo juntamente com os índices i e j. Segundo Box e Draper (1987 apud Draper e Lin, 1996) quando se utiliza em um experimento uma metodologia adequada de superfície de resposta, o experimento apresentará características que devem:

- Gerar distribuição satisfatória das informações sobre o comportamento da variável de resposta em toda uma região de interesse;
- Assegurar que os valores da análise de amostragem serão o mais próximo possível do valor real;
- Permitir a detecção de ajuste não satisfatório;
- Permitir que as experiências sejam realizadas em blocos;
- Permitir que projetos de ordem crescente sejam construídos seqüencialmente;
- Fornecer uma estimativa interna de erro;
- Exigir um número mínimo de pontos experimentais;
- Fornecer padrões de dados simples que permitam a apreciação visual evidente;
- Garantir a simplicidade de cálculo;
- Comportar-se bem quando ocorrem erros nas configurações das variáveis de previsão;
- Não requerer um número impraticável de níveis de variáveis de previsão;
- Fornecer uma verificação da "constância de variância" pressuposta.

Sabe-se que é praticamente impossível um experimento satisfazer todas essas características simultaneamente. Dentre os experimentos mais utilizados na metodologia da superfície de resposta estão os experimentos de Box-Behnken (BBD – Box-Behnken Design) e compostos centrais (CCD – Central Composite Design). Neste trabalho será dada maior ênfase ao CCD, que será o método utilizado para as análises feitas.

Os experimentos compostos centrais (CCD) são empregados para obtenção dos dados para criação de uma superfície de um modelo de 2º ordem. Eles podem ser blocados, não-blocados e rotacionais. Os blocados permitem que os efeitos dos termos do modelo e dos blocos sejam estimados independentemente e minimizam a variação dos coeficientes estimados. Já os rotacionais fornecem propriedades desejáveis de variância de previsão constante em todos os pontos equidistantes dos pontos centrais, melhorando a qualidade da previsão. Os experimentos compostos centrais apresentam três formas diferentes que são: os pontos fatoriais ou cúbicos, os pontos axiais ou estrela e os pontos centrais. Esse último foi utilizado neste trabalho e será descrito em maiores detalhes a seguir.

- Pontos centrais – também conhecidos como planejamento esférico. Representam uma junção dos pontos fracionais (de cubo) com os pontos axiais (estrela) com a adição de replicas nos pontos centrais (Figura 1a e b). São utilizados para verificar a curvatura da superfície de resposta.

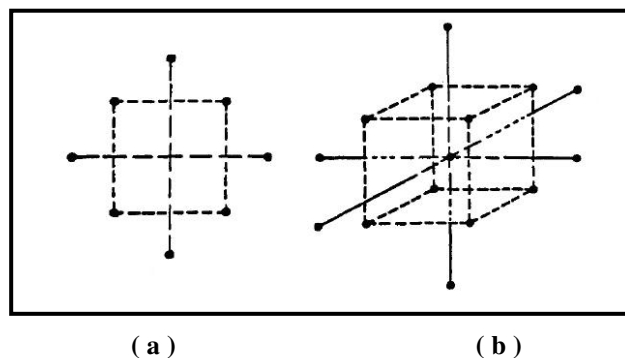


Figura 1 – Pontos centrais cubo-estrela em um experimento com (a) 2 e (b) 3 fatores (Draper e Lin, 1996; Barros, Scarminio e Bruns, 2007).

Os resultados podem ser apresentados em forma de gráficos de superfície de resposta que apresentam uma superfície tridimensional sobre um plano com dois parâmetros (Figura 2a) ou gráficos de contorno que são bidimensionais em relação a um parâmetro (Figura 2b).

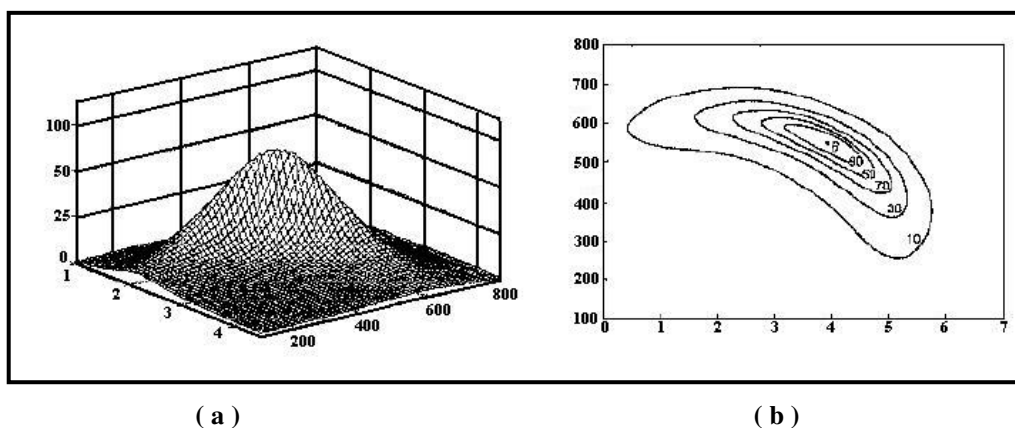


Figura 2 - Gráficos de representação da metodologia RSM. (a) Superfície de resposta; (b) Contorno (Myers, Montgomery e Anderson-Cook, 2009).

Para a análise estatística dos resultados e a determinação da superfície de resposta é fundamental utilizar recursos computacionais. Dentre os softwares disponíveis pode-se citar o *Microsoft Office Excel* (Microsoft®), *Minitab* (Minitab®) e *Statistica* (StatSoft®).

### 3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA NA MEDIÇÃO DE TENSÕES

As tensões em um determinado material são medidas baseando-se na deformação sofrida na região que está sob tensão e nas relações constitutivas deste material.

Segundo Bray e Stanley (1997), as tensões em um determinado material, podem ser calculadas através das constantes elásticas do material e o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas. Eles utilizaram o método de ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas  $L_{cr}$ ) e a equação (5). Para isso, é feita a transformação das deformações ( $\epsilon$ ) em tensões ( $\sigma$ ) utilizando a relação constitutiva (Lei de Hooke). Para tensões uniaxiais, a variação da tensão ( $d\sigma$ ) é determinada multiplicando a variação da deformação ( $d\epsilon$ ) pelo o módulo de elasticidade ( $E$ ). As tensões podem ser calculadas tanto a partir da velocidade da onda como, para o método utilizado, pelo tempo de percurso entre dois transdutores com distância fixa um do outro. Esse tempo é mostrado na equação como um tempo relativo ( $d_t/t_0$ ).

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (5)$$

Para o experimento foram utilizados vinte corpos de prova de aço ASTM A36 com dimensões de 15,88 (5/8”) X 310 X 310 mm. Esses foram submetidos a um tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) em lotes de três corpos de prova cada, totalizando 7 lotes. Para isso, foi utilizado um forno da marca Elinco série 8000 com atmosfera não controlada e temperatura de patamar de 600°C durante o período de 1h, sendo que o resfriamento foi realizado lentamente no interior do forno. Já o processo de fresamento de topo foi realizado utilizando um centro de usinagem

CNC, marca ROMI, modelo Discovery 560 com rotação máxima de 10.000 rpm, potência de 11 kW e velocidade de avanço máxima de 30 m/min e uma fresa de facear, marca SANDVIK, código R245-080Q27-12M, modelo árvore, com diâmetro de 80mm, 6 pastilhas em ângulo de posição de 45°, passo médio e com cone de fixação removível ISO BT40. Na ferramenta foram colocados insertos (pastilhas) de metal duro com cobertura especial de TiAlN (Nitreto de Titânio e Alumínio) própria para o uso em acabamento e desbaste de peças de aço, marca SANDVIK, código R245-12 T3 M-PM 4230, com quatro arestas cortantes. As faixas de variação para os parâmetros de usinagem principais selecionados foram determinadas de acordo com o intervalo desejado e em comum acordo com especificações do fabricante do equipamento e da ferramenta (Tabela 1).

**Tabela 1 – Níveis dos parâmetros de usinagem.**

Parâmetro de Usinagem	Símbolo	Unidade	Valor Mín.	Valor Max.
Velocidade de corte	$v_c$	m/min.	100	400
Avanço por dente	$f_z$	mm/dente	0,04	0,17
Profundidade de usinagem	$a_p$	mm	0,4	2,00

Para a medição das tensões residuais foi utilizado um sistema de aquisição de dados desenvolvido pela Universidade Estadual de Campinas a partir de equipamentos comerciais. O sistema desenvolvido foi adaptado para os experimentos deste trabalho e atualizado para uma versão mais recente dos programas de aquisição. É composto por um software construído em plataforma *LabVIEW versão 8.2*, juntamente com uma placa de aquisição da National Instruments NI 5911 de 100 MHz, um emissor/receptor da Parametrics modelo 5072 PR e um conjunto para medição denominado “Probe”. Esse é composto por dois transdutores (emissor e receptor) de frequência 2,25 MHz acoplados a sapatas de PMMA (Acrílico) com ângulo de aproximadamente 28° (primeiro ângulo crítico). Tal ângulo gera uma onda longitudinal que se propaga paralelamente à superfície da chapa. Esses transdutores foram submetidos a calibração através do método pulso-eco e utilizando um bloco padrão tipo 1 da marca PANAMETRICS, modelo PT NO. 1054-1, ASTM E164 IIW produzido em aço 1018.

A temperatura do sistema de medição e corpo de prova foi monitorada, pois exerce forte influência sobre o tempo de percurso das ondas (Bray e Stanley, 1997). Os tempos de percurso das ondas ( $L_{cr}$ ) foram medidos sobre a área da superfície dos corpos de prova (310 X 310 mm) na região central, em seis posições diferentes. Para cada medição foram realizadas cinco repetições em cada posição, sendo que essa etapa foi realizada três vezes consecutivas. Esse procedimento foi realizado em duas ocasiões diferentes: após os corpos de prova serem submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões e após passarem pelo processo de fresamento de topo. Os cálculos das tensões residuais foram realizados através da variação do tempo de percurso entre ambas as medições para cada corpo de prova. A seqüência de usinagem e medições segue o planejamento discutido na próxima seção.

### 3.1. Planejamento Seqüencial utilizando a Superfície de Resposta

A seqüência utilizada para o tratamento térmico de alívio de tensões, usinagem e medições do tempo de percurso obtida para os testes utilizando a metodologia de superfície de resposta foi aleatória. O número de corpos de prova foi determinado utilizando programa *Minitab v.15*, através da definição do número de fatores a serem considerados (velocidade de corte [ $v_c$ ], profundidade de usinagem [ $a_p$ ] e avanço por dente [ $f_z$ ]) com seus níveis e o planejamento experimental utilizado neste trabalho.

A Tabela 2 mostra a seqüência dos ensaios aleatorizados, bem como os níveis de cada variável para cada um dos vinte corpos de prova. Por ser aleatória, a seqüência poderia ser qualquer uma que não fosse definida sob qualquer motivação específica. A seqüência escolhida foi gerada pelo programa. Extraindo-se os dados não significativos da tabela dada pelo *Minitab v.15*, tem-se:

Tabela 2 – Seqüência dos ensaios aleatorizados.

Ordem Estatística	Ordem do Ensaio	$V_c$ (m/min)	$a_p$ (mm)	$f_z$ (avanço/dente)
1	1	160	0,72	0,072
<b>17</b>	<b>2</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
14	3	250	1,20	0,200
4	4	340	1,68	0,072
<b>16</b>	<b>5</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
<b>19</b>	<b>6</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
13	7	250	1,20	0,040
12	8	250	2,00	0,120
2	9	340	0,72	0,072
<b>18</b>	<b>10</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
5	11	160	0,72	0,168
3	12	160	1,68	0,072
<b>20</b>	<b>13</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
10	14	400	1,20	0,120
9	15	100	1,20	0,120
6	16	340	0,72	0,168
11	17	250	0,40	0,120
<b>15</b>	<b>18</b>	<b>250</b>	<b>1,20</b>	<b>0,120</b>
8	19	340	1,68	0,168
7	20	160	1,68	0,168

A primeira coluna indica a seqüência aleatorizada dos corpos de prova sugerida pelo programa *Minitab v.15*. A segunda coluna contém os vinte corpos de prova determinados para a realização do experimento. As linhas em negrito indicam os seis pontos centrais determinados para esse experimento. Nesses pontos os parâmetros de usinagem são iguais. Com isso pode-se obter a repetibilidade do experimento.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tratamento térmico de alívio de tensões foi realizado através de um mesmo procedimento estabelecido para todos os lotes de corpos de prova, sendo considerado constante para todos os corpos de prova. A calibração dos transdutores emissor/receptor apresentaram variação inferior a 1 ns, sendo considerado não significativos na resposta. Já a temperatura do sistema de medição influencia diretamente nos resultados das medições de tempo de percurso, sendo assim necessário realizar a verificação dos efeitos da temperatura sobre o tempo de percurso. Após verificação chegou-se a um fator de correção de 11,12 ns/°C com coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,98, que ao ser aplicado aos resultados gerou um desvio padrão de 1,35 ns. Isso mostra que o modelo pode ser explicado e não apresenta influência significativa nos resultados.

A função erro está ligada a incerteza na repetibilidade das medições. O tempo de percurso médio dos vinte corpos de prova para cada uma das três medições realizadas em seis posições diferentes apresentou desvios padrões muito próximos de 1 ns com coeficiente de variação máximo de 0,029%. Isso demonstra uma boa precisão entre as três medições, sendo assim considerado constante.

A tabela 3 mostra os resultados das tensões calculadas para os vinte corpos de prova nas seis posições (P1, P2,...,P6) separadamente e em uma média geral das posições. A tabela contém também os desvios padrões para cada corpo de prova (CP) e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 3 – Tensões calculadas por posição e geral com os desvios padrões.

CP	Tensão Residual (MPa)						MÉDIA	DESVIO	CV (%)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6			
1	66,35	87,03	65,69	72,02	92,36	57,35	<b>73,35</b>	<b>13,52</b>	18,43
17	191,72	193,39	139,37	136,71	176,05	162,71	<b>166,72</b>	<b>24,85</b>	14,91
14	93,36	123,04	72,69	75,02	20,34	23,01	<b>67,69</b>	<b>40,10</b>	59,24
4	138,04	141,04	154,38	143,71	150,38	143,37	<b>145,04</b>	<b>6,09</b>	4,20
16	100,03	103,36	114,70	125,04	96,03	98,03	<b>106,36</b>	<b>11,34</b>	10,66
19	67,35	118,70	85,36	71,02	83,02	84,36	<b>84,69</b>	<b>18,15</b>	21,43
13	-10,67	10,00	-23,34	-23,01	-1,00	30,68	<b>-3,00</b>	<b>20,88</b>	-
12	164,38	106,36	122,04	111,37	97,36	96,03	<b>116,37</b>	<b>25,45</b>	21,87
2	51,01	41,35	26,34	28,34	30,01	46,01	<b>37,34</b>	<b>10,33</b>	27,64
18	82,02	36,68	21,34	45,35	47,35	22,01	<b>42,35</b>	<b>22,34</b>	52,75
5	98,70	66,69	109,70	113,70	110,37	88,03	<b>97,69</b>	<b>17,98</b>	18,41
3	164,38	159,38	108,03	95,69	104,36	130,04	<b>127,04</b>	<b>29,35</b>	23,10
20	67,35	96,03	64,69	48,01	59,68	78,36	<b>69,02</b>	<b>16,53</b>	23,95
10	133,71	120,70	97,69	108,36	95,03	111,70	<b>111,03</b>	<b>14,48</b>	13,04
9	139,71	125,70	107,36	126,04	124,37	121,04	<b>124,04</b>	<b>10,39</b>	8,38
6	69,35	37,34	74,69	73,69	67,02	67,35	<b>64,69</b>	<b>13,88</b>	21,46
11	-19,01	-46,01	13,67	-20,01	32,68	17,67	<b>-3,67</b>	<b>29,57</b>	-
15	130,70	110,70	86,36	99,03	116,70	110,37	<b>108,70</b>	<b>15,15</b>	13,94
8	185,72	134,37	130,70	106,70	134,71	151,04	<b>140,71</b>	<b>26,33</b>	18,71
7	202,06	176,38	145,38	159,71	193,39	197,06	<b>179,05</b>	<b>22,69</b>	12,67

Na Tabela 3 nota-se que na comparação entre as tensões residuais nas seis posições o maior desvio padrão obtido foi de 40,10 MPa com coeficiente de variação de 59,24%, encontrado no corpo de prova 14, sendo que a média geral dos desvios padrões para os vinte corpos de prova foi de 19,47 MPa, isso corresponde a 7,8% do limite de escoamento do material que é de 250 MPa, ou seja, cerca de 20 MPa. Utilizando os dados da Tabela 3 e com o auxílio do software *Minitab v.15* chegou-se ao gráfico da Figura 3, que mostra os efeitos dos parâmetros de usinagem na tensão residual para o tempo de percurso médio.

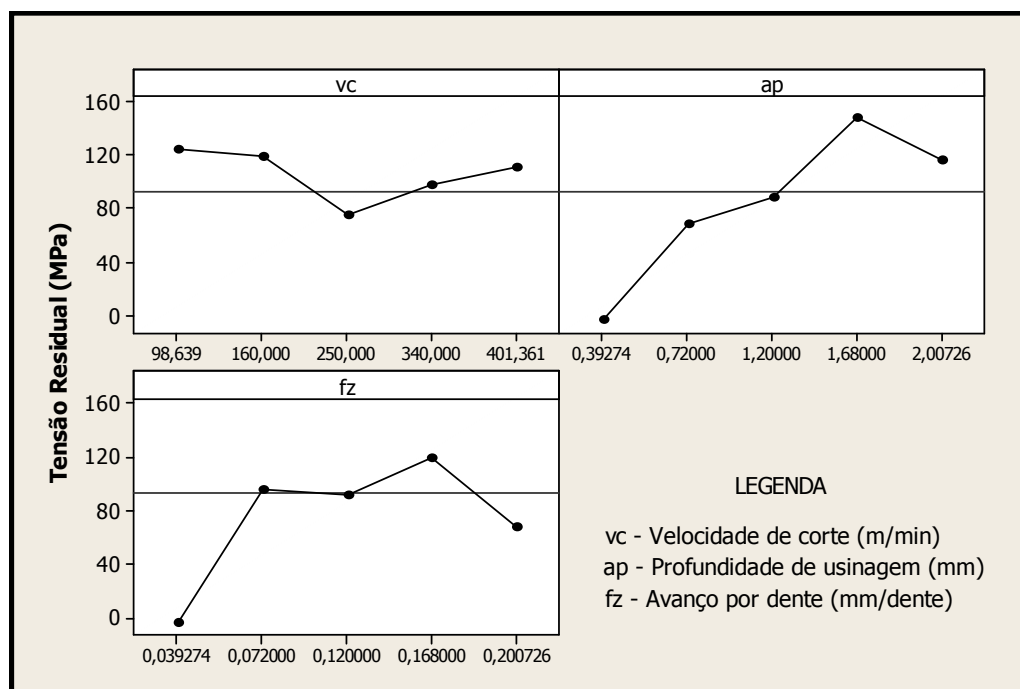


Figura 3 – Efeitos dos Parâmetros de Usinagem sobre a tensão residual.

De acordo com o gráfico da figura 3, a tensão residual apresenta uma tendência a aumentar com o aumento da profundidade de usinagem ( $a_p$ ) e do avanço por dente ( $f_z$ ) até um certo ponto. Já a velocidade de corte ( $v_c$ ) não

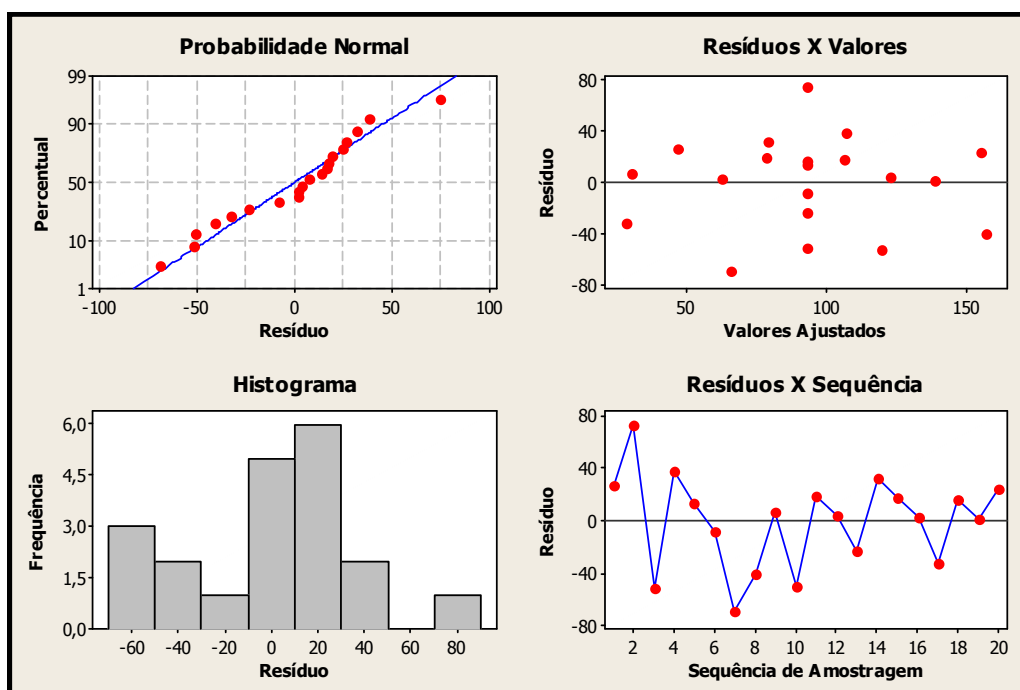
influência na tensão residual na faixa de valores analisados. A Figura 4 mostra os resultados da regressão da superfície de resposta para a média das seis posições, obtida com o programa *Minitab* v.15.

**Tabela 4 – Regressão da Superfície de Resposta.**

<b>1 - Coeficiente de Regressão Estimados para Tensão Residual</b>	
TERMOS	FATOR P
Velocidade de Corte ( $v_c$ )	0,446
Profundidade de Usinagem ( $a_p$ )	0,002
Avanço por Dente ( $f_z$ )	0,145
<b>2 - Análise de Variância para Tensão Residual</b>	
FONTE	FATOR P
Regressão	0,009
Linear	0,009
<b>3 - Observações Não Usuais para Tensão Residual</b>	
CORPO DE PROVA	TENSÃO RESIDUAL
13	-3,00

Na Tabela 4, o único parâmetro de usinagem que possui influência significativa na resposta é a profundidade de usinagem ( $a_p$ ). Tal afirmação considera 95% de certeza, ou seja, o valor mostrado deve estar abaixo de 0,05. Nesse caso, considera-se que o termo influencia significativamente na resposta. Os valores acima de 0,05 são considerados não significativos. A velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço por dente ( $f_z$ ) não apresentam influência significativa na resposta.

Na análise de variância da tensão residual, o valor P da regressão mostra que os termos do modelo apresentam efeito sobre a resposta. Já o valor de P da análise de linearidade considera o modelo como sendo linear e suficiente para representar a superfície de resposta. Desta forma não é necessário criar um modelo de ordem maior (modelo quadrático). Sendo assim, não será necessário também realizar uma análise das interações. O corpo de prova 13 apresentou valores dispersos dos demais, sendo assim considerado como não usual. A figura 4 mostra os resíduos gerados pela análise da resposta (tensão residual) para uma média geral das posições.



**Figura 4 – Resíduos da tensão residual.**

Na figura 4 pode se observar que os resíduos seguem uma distribuição normal no gráfico de probabilidade normal. Ao analisar o gráfico de Resíduos X Valores e Resíduos X Sequência pode-se observar que os pontos se distribuem aleatoriamente em torno do eixo zero. Sendo assim o modelo pode ser considerado satisfatório, pois não apresenta nenhuma tendência.



## 5. CONCLUSÕES

A análise de tensões residuais através da metodologia de superfície de resposta mostrou ser uma técnica bastante promissora e útil para avaliar a influência dos parâmetros variáveis na resposta de interesse. Além disso, essa metodologia mostrou ter características de rapidez na aplicação do método e eficiência na apresentação dos resultados.

Para este caso em estudo, os resultados apresentaram influência significativa da profundidade de usinagem ( $a_p$ ) na tensão residual medida através do método ultra-sônico de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ) utilizando a acustoelasticidade. Já os parâmetros de usinagem de velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ) não foram significativos na resposta, sendo assim considerados como não influentes nas tensões residuais medidas.

A Metodologia da Superfície de Resposta permitiu verificar que um menor valor da profundidade de usinagem leva a um menor valor da tensão gerada, como esperado. Deve ser ressaltado que os resultados obtidos nesse trabalho são aplicáveis apenas dentro das faixas das variáveis de influência analisadas, considerando os equipamentos e sistemas empregados na usinagem. Em especial, as conclusões com certeza especificada, de 95%, servem apenas para os pontos medidos, embora sejam um indicativo adequado do comportamento na faixa de variação dos parâmetros de usinagem estudados.

## 6. REFERÊNCIAS

- Barros Neto, B., Scarminio, I. S., Bruns, R. E., 2007, "Como fazer Experimentos", Unicamp, São Paulo, 480 p.
- Box, G. E. P., Wilson, K. B., 1951, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), vol.13, n.1, Blackley, Manchester, pp. 1-45.
- Bray, D. E., Stanley, R. K., 1997, "Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service", CRC Press, Boca Raton, 586 p.
- Button, S. T., 2005, "Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados", Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 88 p.
- Draper, N. R., Lin, D. K. J., 1996, "Response Surface Designs", In: Ghosh, S., Rao, C. R., "Handbook of Statistics: Design and Analysis Experiments", Elsevier Science, v. 13, cap. 11, New York, USA, p. 343-375.
- Hinkelmann, K., Kempthorne, O., 1994, "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, vol.1, USA, pp. 401-427.
- Mason, R. L., Gunst, R. F., Hess, J. L., 2003, "Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science", John Wiley & Sons, cap. 17, USA, pp. 568-613.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M., 2009, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments", John Wiley & Sons, cap.1, USA, pp. 1-13.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## RESPONSE SURFACE METHODOLOGY APPLIED TO MEASUREMENT OF STRESS IN SHEETS

Alexandre Aparecido Buenos, alebuenos@fem.unicamp.br<sup>1</sup>  
Auteliano Antunes dos Santos Júnior, aute@fem.unicamp.br<sup>1</sup>  
Alessandro Roger Rodrigues, roger@mat.feis.unesp.br<sup>2</sup>  
Ruís Camargo Tokimatsu, ruis@dem.feis.unesp.br<sup>2</sup>  
Pedro Paulo Balestrassi, pedro@unifei.edu.br<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico, Rua Mendeleev, 200, Caixa Postal 6122, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, Barão Geraldo, CEP 13083-970, Campinas – SP, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil, 56, Caixa Postal 31, Centro, CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. BPS, 1301, BPS, CEP 37500-000, Itajubá – MG, Brasil.

**Abstract:** *The design of experiments is a very important tool in data analysis. Its main objective is to verify which variables are important in a given experiment, and its upper and lower limits. For the analysis there are several techniques that can be used among which are the factorial experiments, mixture and Taguchi. Another common technique used in statistical analysis is the response surface methodology, which was used in this work. This technique aims at developing, improving and optimizing a response of interest that is influenced by several variables. This paper presents a brief review of the surface response methodology applied to the study of residual stresses introduced by the machining process and measured using the technique of critically refracted longitudinal waves ( $L_{cr}$ ) using acoustoelasticity. It is then held a discussion on the results and limitations of the methodology applied. As a result of the work, it can be concluded that the methodology is appropriate for the evaluation of which are the machining parameters that influence the residual stress generated.*

**Keywords:** *Design of experiments, response surface methodology, residual stress, nondestructive testing.*

### 1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.