

OTIMIZAÇÃO DUAL MULTI OBJETIVO NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 12L14

Lucas da Silva Lia
Anderson Paulo de Paiva
Valberlam Ferrer
Pedro José Papandréa
valberlam9@gmail.com

Orientador:

Resumo: Este trabalho propõe a aplicação da função de Erro Quadrático Médio na minimização dos parâmetros de rugosidade superficial (R_a , R_y , R_q , R_t e R_z) no processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14, através de ensaios de curta duração utilizando ferramenta de metal duro. Para a coleta dos dados utilizou-se um projeto robusto composto de um arranjo interno do tipo “Superfície de Resposta”, obtido a partir de variações controladas nos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e um arranjo externo composto por um fatorial 2^2 , formado pelas variáveis de ruído (esbelte e desgaste da ferramenta). Em seguida, obtiveram-se os modelos polinomiais de segunda ordem para as médias e desvios padrão de todas as respostas. O Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) foi o algoritmo utilizado como procedimento de busca, tornando possível a identificação de uma solução ótima para o problema estudado, fornecendo bases para a indústria metal-mecânica e pesquisas futuras.

Palavras-chave: Otimização, Aço ABNT 12L14, Erro Quadrático Médio, Superfície de Resposta

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a necessidade da melhoria contínua da qualidade é muito presente em diversas empresas, devido a combinação de uma série de fatores como, por exemplo, consumidores cada vez mais exigentes e mercados cada vez mais competitivos.

Um produto tem melhor qualidade se ele é mais adequado ao usuário a que se destina. Assim, ouvir o cliente torna-se fundamental para se obter um nível de qualidade satisfatório, uma vez que as melhorias efetivas advêm dos benefícios concretos gerados aos clientes.

Tendo, portanto, a satisfação do cliente como objetivo principal, a qualidade deve ser projetada e desenvolvida no processo produtivo a partir de necessidades e características desejadas pelos próprios consumidores, enquanto que no processo produtivo são criadas as condições necessárias para que o produto atenda aos anseios previamente estabelecidos. Tratando-se exclusivamente de produtos (bens tangíveis), a satisfação do cliente passa, então, pelo gerenciamento e a otimização dos processos de manufatura.

Quanto mais complexas forem as necessidades dos consumidores, mais atributos de qualidade serão necessários para atingir tal expectativa, resultando em um maior esforço para se encontrar uma configuração rentável para o processo de manufatura. Portanto, este perfil atual dos clientes, quase sempre traduzido em número superlativo de características críticas de qualidade, pode conferir aos processos de manufatura o caráter multivariado.

Ao se tratar de processos ou produtos que possuam múltiplos atributos de qualidade, é sempre difícil se encontrar um conjunto de parâmetros ótimos para todas as características de interesse a partir da otimização individual de cada função de transferência pré-estabelecida. Além deste tipo de otimização ser de eficácia improvável, as inter-relações entre as várias características podem levar a análise univariada a conclusões equivocadas e sem sentido (WU, 2005; KHURI e CORNELL, 1996). Por isso, propõe-se a utilização de uma média geométrica dos Erros Quadráticos Médios individuais de cada resposta, obtendo-se um Erro Quadrático Médio Global, viabilizando a otimização de múltiplas respostas.

Neste contexto, este trabalho propõe a otimização do processo de usinagem do aço ABNT 12L14, através do estudo dos melhores parâmetros de usinagem para a obtenção dos menores valores possíveis de múltiplos parâmetros de rugosidade (R_a , R_y , R_t , R_q , R_z) nos materiais produzidos através deste processo, para assim, obter produtos de melhor qualidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aços de corte fácil e sua usinabilidade

Aços de corte fácil podem ser definidos como sendo aqueles aços especialmente desenvolvidos para oferecer os melhores resultados mediante operações com arranque de cavacos. As demais características mecânicas como ductilidade, resistência à tração, resposta ao tratamento térmico e outras são consideradas como secundárias para este tipo de aço. Esse tipo de aço possui baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de um teor de manganês que garanta uma relação manganês-enxofre propícia para a formação de sulfetos de manganês, em vez de sulfetos de ferro. Nos aços de corte fácil o enxofre estabiliza a aresta postiça de corte devido à menor resistência ao cisalhamento que o sulfeto de manganês oferece. A ação do enxofre se dá indiretamente através do sulfeto de manganês. Os aços de corte fácil são caracterizados por boa usinabilidade e por gerarem cavacos facilmente quebráveis (KLUJSZO e SOARES, 2003; MACHADO, 2004).

Importantes pesquisas metalúrgicas nos últimos anos estão sendo realizadas com o objetivo de aumentar o desempenho da usinagem (usinabilidade) dos aços devido a razões econômicas (BERTRAND, 1998). Através dessas pesquisas surgiram os aços de usinabilidade melhorada que tem como objetivo cumprir as características mecânicas de emprego e também aumentar sua aptidão a usinagem por razões econômicas. As técnicas no desenvolvimento dos aços de usinabilidade melhorada variam desde um controle apurado do processo de fabricação/transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte e até mesmo a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação (KLUJSZO e SOARES, 2003). Nos aços de corte fácil também existe uma investigação e desenvolvimento para incrementar a sua resposta à usinagem. Além das soluções citadas anteriormente para melhorar a usinabilidade dos aços, existem as soluções clássicas, como o uso de enxofre ou do chumbo e soluções através de metalurgia secundária, como adição de Te e Se para controle das inclusões de sulfetos de manganês, pois contribuem para a sua formação; ou o tratamento ao cálcio ou controle de alumínio para se ter um total controle da morfologia de inclusões (MACHADO, 2004).

Os aços de corte fácil são amplamente aplicados na produção de peças em tornos automáticos multifuso. Para esta aplicação utilizam-se normalmente barras de aços trefiladas com diâmetros iguais ou menores que 50 mm, de forma que as velocidades de corte raramente ultrapassam 200 m/min (MACHADO, 2004). Ele também é muito utilizado para fabricação

de componentes para bombas, buchas, pistões, componentes de aparelhos domésticos, etc (PRADO e PIMENTEL, 2004). Entre os tipos de aços de corte fácil, o aço ABNT/SAE 12L14 destaca-se por possuir uma maior demanda de produção nas siderúrgicas, tornando este trabalho ainda mais relevante.

Mais recentemente, Almeida *et al.* (2010) desenvolveram um trabalho para estudar o efeito dos elementos residuais cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu) na usinabilidade do aço de corte fácil ABNT/SAE 12L14. Através da utilização da metodologia de Planejamento de Experimentos verificaram que os diferentes níveis destes elementos residuais têm influência na usinabilidade do aço estudado.

2.2 Rugosidade Superficial

A característica de qualidade considerada neste trabalho é representada pelo acabamento superficial, pois as superfícies das peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são caracterizadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionabilidade do par acoplado.

O acabamento superficial é fundamental onde houver exigências quanto a desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluídos e superfícies de medição tais como blocos-padrão, micrômetros e paquímetros. O acabamento superficial é medido através da rugosidade superficial, a qual é expressa em micrometros (μm). A rugosidade superficial obtida varia diretamente em função do conjunto máquina-ferramenta adotada no processo de fabricação, bem como em função dos parâmetros de usinagem escolhidos.

A Rugosidade Média Aritmética (Ra) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m), conforme Figura 1.

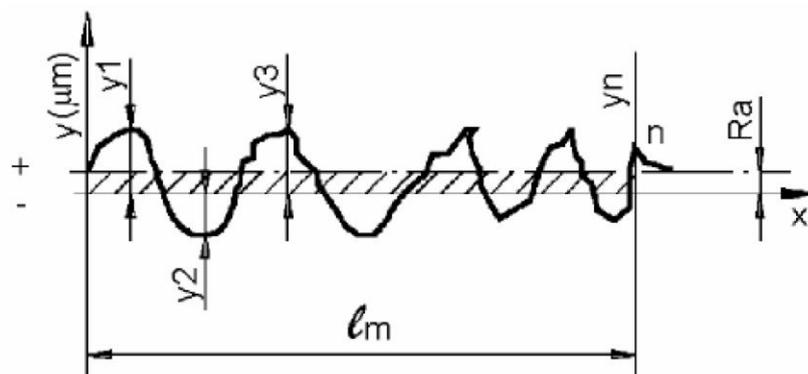


Figura 1- Medição parâmetro Ra

O parâmetro Ra é amplamente utilizado, sendo aplicável na maioria dos processos de fabricação. Porém, somente o parâmetro Ra não é capaz de descrever totalmente uma superfície. Sua desvantagem é evidenciada quando um vale ou pico não típico é detectado na

superfície, porém não interfere no cálculo do valor médio, mantendo praticamente oculto o defeito.

A Rugosidade Máxima (R_y) é definida como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m), conforme mostrado na Figura 2.

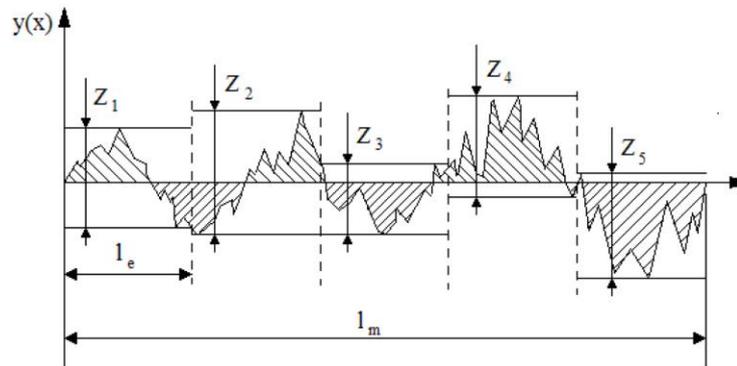


Figura 2 - Medição parâmetros R_y e R_z

O parâmetro R_y tem grande aceitação uma vez que informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça e fornece informações complementares ao parâmetro R_a . Porém, individualmente, o parâmetro R_y também não apresenta informação suficiente a respeito da superfície.

A Rugosidade Média (R_z) corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade superficial, mostrados na Figura 2. Este parâmetro informa a distribuição média da superfície vertical e define muito bem a superfície em perfis periódicos.

A Rugosidade Total (R_t) Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i), conforme mostrado na Figura 3.

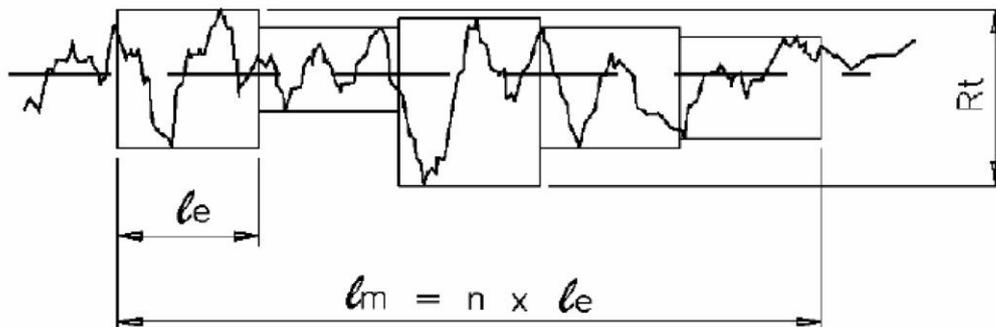


Figura 3 - Medição parâmetro R_t

O parâmetro R_t tem o mesmo emprego do parâmetro R_y , porém com maior rigidez, uma vez que considera o comprimento de amostragem igual ao comprimento de medição.

A Rugosidade Média Quadrática (R_q) é o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação a linha média, dentro do comprimento de medição (l_m). É um parâmetro muito similar ao R_a .

2.3 Projeto Robusto

Como primeira estratégia experimental para a avaliação da influência dos fatores de ruído sobre as características de qualidade, propõe-se o arranjo da Tabela 1. Este arranjo é formado por dois arranjos auxiliares: um interno formado com as variáveis controláveis e outro externo, formado por duas fontes de ruído.

Tabela 1- Arranjo Experimental para fatores de ruído.

Arranjo Interno					Arranjo Externo (Fatores de Ruído) – Fatorial 2 ²				Medidas de Resumo	
					-1	1	-1	1		
n	B	X1	X2	X3	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y	s
1	1	-1	-1	-1	y ₁₁₁	y ₁₁₂	y ₁₁₃	y ₁₁₄	\bar{y}_{11}	s ₁₁
2	1	+1	-1	-1	y ₁₂₁	y ₁₂₂	y ₁₂₃	y ₁₂₄	\bar{y}_{12}	s ₂₁
3	1	-1	+1	-1						
4	1	-1	+1	+1						
			M							
8	1	+1	+1	+1						
			M							
12	2	-2	0	0						
			M							
18	2	0	0	0	y ₁₍₁₈₎₁	y ₁₍₁₈₎₂	y ₁₍₁₈₎₃	y ₁₍₁₈₎₄	$\bar{y}_{1(18)}$	s _{1(18)}}

A terminologia y₁₂₃ representa o resultado experimental obtido para a resposta 1, na condição experimental controlada número 2, executada na condição de ruído (ou réplica) número 3. Conforme já descrito anteriormente, o arranjo externo gera a variação nas respostas para se avaliar em que níveis os parâmetros de controle tornam-se menos sensíveis a esta variação. Para o caso em questão, um arranjo de superfície de resposta será usado como um arranjo interno, enquanto que um fatorial completo 2² servirá como arranjo externo.

O Projeto Robusto é um importante método para reduzir a variação e melhorar o desempenho de produtos e processos a baixo custo incluindo características de qualidade controláveis e ruídos (WU, 2009).

2.4 Metodologia de Superfície de Resposta

De acordo com Montgomery (2001), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas para os quais desejamos respostas, que são influenciadas por inúmeras variáveis. Geralmente, o relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecido. Procura-se encontrar uma razoável aproximação do relacionamento real entre as respostas (y) e o conjunto de variáveis independentes (x). Usualmente, um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse é empregado. Entretanto, se existir curvatura no sistema, então a função de aproximação mais usada é um polinômio de ordem superior, como o modelo de segunda ordem apresentado pela Eq. (1).

$$\hat{\sigma} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{1}$$

onde: σ é a resposta; k é o número de fatores; x_i são as variáveis independentes; β_i são os coeficientes; ε é o erro.

Montgomery (2001) considera improvável que um modelo polinomial aproxime de um modelo real para todo o espaço experimental coberto para as variáveis independentes. Para uma região específica, entretanto, a aproximação tem se mostrado eficiente. O método dos mínimos quadrados ordinários (Ordinary least squares – OLS) é usado para estimar os parâmetros (β) que, em forma matricial, podem ser representados como:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{2}$$

onde: X é a matriz de fatores codificados; Y é a matriz resposta.

A validação da presença da curvatura no modelo é baseada na análise dos pontos centrais para os fatores codificados.

Os arranjos da Metodologia de Superfície de Respostas (MSR), tais como o arranjo do composto central (Central Composite Design – CCD), por exemplo, usa uma combinação de arranjos fatoriais (completos ou fracionados), pontos médios dos fatores nivelados (pontos centrais) e o pontos axiais (extremos) para ajustar, quando necessário, um modelo polinomial de segunda ordem (MONTGOMERY, 2001). Este modelo é adequado, uma vez que muitos processos podem ser aproximados por uma expansão em série de Taylor, truncada em um termo quadrático.

2.5 Superfície de Resposta Dual

Da própria natureza dos processos, dois objetivos principais devem ser avaliados quando se busca sua melhoria: a distância entre um valor real e um valor desejado para uma dada característica de qualidade, e sua variância. Da própria motivação para a Metodologia Seis Sigma, vem a máxima de que um bom processo é aquele que está “no alvo, com a mínima variação” (HARRY e SCHROEDER, 2001). Acerca dessa circunstância, Vining e Myers (1990) afirmaram que atingir a otimização das médias e das variâncias simultaneamente pode ser realizada via metodologia de superfície de resposta dual. Especificamente, supondo a resposta variável como sendo Y e as variáveis experimentais controladas como sendo x_1, \dots, x_k , ajusta-se um modelo polinomial de segunda ordem para a média (μ) e outro para o desvio padrão (σ). Conforme eq. (3) e eq. (4).

$$\omega_{\mu} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\mu} \tag{3}$$

$$\omega_{\sigma} = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \gamma_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\sigma} \tag{4}$$

Lin e Tu (1995), baseados no trabalho de Vining e Myers (1990), propuseram a substituição do sistema de equações (3 e 4) pelo o Erro Quadrático Médio (EQM), tal que:

$$= - + \tag{5}$$

Onde: T é o alvo da característica

A função EQM, tal como descrita na equação 5, pode ser utilizada para problema de otimização do tipo NTB (Nominal-the-best), ou seja, a minimização de (5) conduz a um ponto de ótimo que minimiza a distância entre a média e o alvo enquanto minimiza também sua variância. O mesmo conceito pode ser estendido para o caso de múltiplas respostas correlacionadas, tais como as rugosidades (Ra, Ry, Rq, Rt e Rz).

Köksoy e Yalcinoz (2006) propuseram duas estratégias para a otimização de múltiplas respostas: a) a aglutinação das equações do Erro Quadrático Médio de cada resposta através da sua soma ponderada; ou b), a escolha da equação do Erro Quadrático Médio da resposta de maior importância como função objetivo, atribuindo às demais o caráter de restrição.

Assim, gera-se o EQM global para todas as respostas através de uma média geométrica dos EQM individuais de cada resposta.

$$= () / \tag{6}$$

Através da Eq. (6) pode-se fazer uma otimização de múltiplas respostas, possibilitando o desenvolvimento deste trabalho.

3. APLICAÇÃO PRÁTICA

Resumidamente, a aplicação prática deste trabalho consistiu em realizar um planejamento experimental para um problema de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14, seguido dos ensaios de usinagem e posterior medição das rugosidades estudadas, ambas as etapas realizadas em laboratórios da Universidade Federal de Itajubá. Após a compilação dos dados, a otimização de múltiplos tipos de rugosidade foi realizada pelo método proposto na Figura 1.

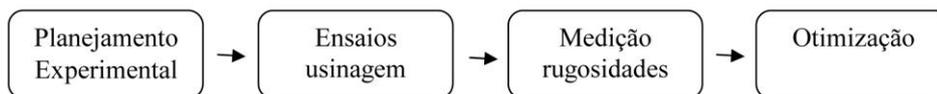


Figura 4 - Fluxograma resumo da aplicação prática

O material dos corpos de provas utilizados nos ensaios foi o aço de corte fácil especificação ABNT 12L14 fornecido pela Empresa Aços Villares S.A. Este material foi fornecido com a composição química apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 12L14 utilizado.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Pb	N2
%	0,090	0,030	1,240	0,046	0,273	0,15	0,080	0,260	0,001	0,020	0,280	0,0079

Os experimentos foram realizados em um torno CNC da marca NARDINI, modelo LOGIC 175, com as seguintes características: comando numérico CNC MCS Série 500, potência de 7,5 CV, rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm, torre porta-ferramenta com

Edição 04 – Ano 2 – 2013

8 posições, diâmetro máximo 100 mm e comprimento máximo torneável de 300 mm, entre pontas.

As ferramentas de corte utilizadas neste trabalho são Bits de metal duro classe ISO P35 revestido com três coberturas (Ti(C,N), Al₂O₃, TiN), (GC 4035 Sandvik) na geometria ISO SNMG 09 03 04 – PM e o suporte tem designação ISO DSBNL 1616H 09.

Após a usinagem, o rugosímetro MITUTOYO SJ-201P foi utilizado para a obtenção dos parâmetros de rugosidade.

Durante o planejamento experimental, optou-se por um projeto robusto composto de um arranjo interno do tipo Superfície de Resposta, obtido a partir de variações controladas nos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e um arranjo externo composto por um fatorial 2², formado pelas variáveis de ruído (esbeltez e desgaste da ferramenta). As Tabelas 3 – 7 apresentam este projeto robusto com as respostas obtidas para cada parâmetro de rugosidade.

Tabela 3 – Projeto robusto do planejamento experimental para Ra

r	Arranjo interno			Arranjo externo					ȳ	s
				Esbeltez	+	+	-	-		
	Vc	f	Ap	Desgaste	+	-	+	-		
1	220	0,08	0,7	1	0,826	1,875	1,953	0,799	1,363	0,918
2	340	0,08	0,7	2	0,762	1,891	2,008	1,951	1,653	1,046
3	220	0,12	0,7	3	1,138	2,098	2,134	1,759	1,782	0,664
4	340	0,12	0,7	4	1,190	2,284	1,519	2,364	1,839	0,643
5	220	0,08	1,2	5	1,253	1,669	4,255	1,688	2,216	2,349
6	340	0,08	1,2	6	1,007	1,565	2,405	3,870	2,212	1,825
7	220	0,12	1,2	7	1,575	1,697	1,688	2,330	1,822	0,433
8	340	0,12	1,2	8	1,624	1,609	2,214	3,493	2,235	1,223
9	179,1	0,1	0,95	9	1,179	1,546	2,491	2,373	1,897	1,131
10	380,9	0,1	0,95	10	1,001	1,857	2,793	2,701	2,088	1,398
11	280	0,07	0,95	11	1,372	2,011	2,492	1,528	1,850	0,922
12	280	0,13	0,95	12	1,403	2,082	2,163	1,741	1,847	0,566
13	280	0,1	0,53	13	1,217	2,352	1,144	2,009	1,680	0,586
14	280	0,1	1,37	14	1,412	2,367	2,601	2,844	2,306	1,143
15	280	0,1	0,95	15	1,329	2,264	3,034	2,648	2,319	1,521
16	280	0,1	0,95	16	1,257	2,257	2,858	2,587	2,240	1,432
17	280	0,1	0,95	17	1,024	2,439	2,800	3,271	2,383	1,497

Edição 04 – Ano 2 – 2013

Tabela 4 – Projeto robusto do planejamento experimental para Ry

n	Arranjo interno			Arranjo externo				\bar{y}	s	
				Esbeltez	+	+	-			-
	Vc	f	Ap	Desgaste	+	-	+			-
1	220	0,08	0,7	1	5,690	14,101	12,561	4,728	9,270	5,107
2	340	0,08	0,7	2	4,512	14,344	10,748	12,823	10,607	5,845
3	220	0,12	0,7	3	6,841	11,672	10,384	10,827	9,931	3,031
4	340	0,12	0,7	4	7,367	12,594	8,011	12,609	10,145	3,191
5	220	0,08	1,2	5	7,701	12,829	23,288	13,671	14,372	9,217
6	340	0,08	1,2	6	6,969	11,175	13,497	22,409	13,512	8,724
7	220	0,12	1,2	7	7,485	9,928	9,825	16,884	11,031	4,239
8	340	0,12	1,2	8	7,773	8,960	12,123	23,165	13,005	8,306
9	179,1	0,1	0,95	9	8,152	10,778	13,586	16,654	12,293	5,468
10	380,9	0,1	0,95	10	7,928	9,857	15,344	16,200	12,332	5,336
11	280	0,07	0,95	11	7,098	10,841	14,362	10,112	10,603	4,325
12	280	0,13	0,95	12	7,881	10,142	12,483	12,108	10,653	2,964
13	280	0,1	0,53	13	5,724	10,187	7,233	11,871	8,753	3,137
14	280	0,1	1,37	14	8,722	10,253	14,873	20,281	13,533	6,315
15	280	0,1	0,95	15	7,151	10,087	15,451	17,548	12,559	7,271
16	280	0,1	0,95	16	7,231	9,861	14,711	18,598	12,600	7,414
17	280	0,1	0,95	17	6,023	11,629	13,903	19,588	12,786	7,450

Tabela 5 – Projeto robusto do planejamento experimental para Rz

n	Arranjo interno			Arranjo externo				\bar{y}	s	
				Esbeltez	+	+	-			-
	Vc	f	Ap	Desgaste	+	-	+			-
1	220,00	0,08	0,70	1	4,057	9,474	10,552	4,041	7,031	4,283
2	340,00	0,08	0,70	2	3,747	9,824	9,415	10,337	8,331	4,635
3	220,00	0,12	0,70	3	5,434	9,695	9,183	9,551	8,466	2,754
4	340,00	0,12	0,70	4	5,954	10,303	7,269	11,561	8,772	2,854
5	220,00	0,08	1,20	5	5,799	8,593	19,831	10,512	11,184	9,128
6	340,00	0,08	1,20	6	5,125	7,964	11,768	19,993	11,212	8,688
7	220,00	0,12	1,20	7	6,711	7,983	8,253	12,934	8,970	2,834
8	340,00	0,12	1,20	8	6,889	7,374	10,254	18,389	10,727	6,248
9	179,09	0,10	0,95	9	6,130	7,941	11,891	13,545	9,877	4,835
10	380,91	0,10	0,95	10	5,183	8,236	13,282	13,914	10,154	5,353
11	280,00	0,07	0,95	11	6,075	8,453	12,353	8,296	8,794	3,984
12	280,00	0,13	0,95	12	6,354	8,562	10,534	10,401	8,963	2,558
13	280,00	0,10	0,53	13	5,206	8,554	6,138	9,625	7,381	2,364
14	280,00	0,10	1,37	14	6,519	9,103	12,741	15,053	10,854	5,358
15	280,00	0,10	0,95	15	5,344	8,491	13,763	13,799	10,349	6,680
16	280,00	0,10	0,95	16	5,701	8,445	13,178	13,692	10,254	6,462
17	280,00	0,10	0,95	17	5,025	9,606	12,894	14,309	10,458	6,306

Edição 04 – Ano 2 – 2013

Tabela 6 – Projeto robusto do planejamento experimental para Rq

n	Arranjo interno			Arranjo externo					\bar{y}	s
				Esbeltez	+	+	-	-		
	Vc	f	Ap	Desgaste	+	-	+	-		
1	220,00	0,08	0,70	1	0,999	2,824	2,406	0,988	1,804	1,203
2	340,00	0,08	0,70	2	0,921	2,364	2,401	2,384	2,018	1,245
3	220,00	0,12	0,70	3	1,347	2,494	2,459	2,220	2,130	0,763
4	340,00	0,12	0,70	4	1,434	2,738	1,795	3,056	2,256	0,790
5	220,00	0,08	1,20	5	5,816	2,081	5,181	2,128	3,802	4,356
6	340,00	0,08	1,20	6	1,238	1,933	2,925	4,719	2,703	2,178
7	220,00	0,12	1,20	7	1,867	2,056	2,034	2,916	2,219	0,548
8	340,00	0,12	1,20	8	1,921	1,957	2,638	4,354	2,717	1,506
9	179,09	0,10	0,95	9	1,500	1,903	2,992	2,943	2,334	1,316
10	380,91	0,10	0,95	10	1,249	2,197	3,342	3,275	2,516	1,569
11	280,00	0,07	0,95	11	1,641	2,354	3,024	1,863	2,220	1,079
12	280,00	0,13	0,95	12	1,690	2,380	2,578	2,301	2,237	0,635
13	280,00	0,10	0,53	13	1,434	2,701	1,401	2,649	2,046	0,817
14	280,00	0,10	1,37	14	1,709	2,741	3,143	3,465	2,764	1,353
15	280,00	0,10	0,95	15	1,602	2,587	3,608	3,183	2,745	1,780
16	280,00	0,10	0,95	16	1,509	2,579	3,416	3,159	2,666	1,697
17	280,00	0,10	0,95	17	1,284	2,824	3,358	3,358	2,706	1,707

Tabela 7 – Projeto robusto do planejamento experimental para Rt

n	Arranjo interno			Arranjo externo					\bar{y}	s
				Esbeltez	+	+	-	-		
	Vc	f	Ap	Desgaste	+	-	+	-		
1	220,00	0,08	0,70	1	5,852	14,532	12,828	4,926	9,535	5,214
2	340,00	0,08	0,70	2	4,577	16,332	10,990	13,058	11,239	6,499
3	220,00	0,12	0,70	3	6,952	11,846	10,531	10,984	10,078	3,040
4	340,00	0,12	0,70	4	7,468	12,861	8,351	12,898	10,395	3,254
5	220,00	0,08	1,20	5	7,789	13,076	23,536	14,537	14,734	9,260
6	340,00	0,08	1,20	6	7,196	11,395	13,630	23,066	13,822	8,991
7	220,00	0,12	1,20	7	7,611	10,326	10,041	17,189	11,292	4,296
8	340,00	0,12	1,20	8	7,887	9,195	12,457	23,873	13,353	8,577
9	179,09	0,10	0,95	9	9,948	10,736	13,856	17,483	13,006	5,309
10	380,91	0,10	0,95	10	7,900	13,500	15,628	16,562	13,397	6,346
11	280,00	0,07	0,95	11	7,247	11,043	14,672	10,396	10,839	4,410
12	280,00	0,13	0,95	12	7,974	10,400	12,644	12,399	10,854	2,999
13	280,00	0,10	0,53	13	5,847	10,421	7,378	12,142	8,947	3,258
14	280,00	0,10	1,37	14	8,841	10,404	15,130	20,685	13,765	6,446
15	280,00	0,10	0,95	15	6,681	10,186	15,597	17,801	12,566	7,446
16	280,00	0,10	0,95	16	7,442	9,387	14,890	19,216	12,734	7,617
17	280,00	0,10	0,95	17	6,081	11,801	14,144	19,957	12,996	7,552

Os níveis das variáveis de corte foram escolhidos em função do material da ferramenta, do material e acabamento da peça e do limite de rotação da máquina. Para os níveis das variáveis de ruído, suas definições obedeceram as seguintes considerações. Com relação ao desgaste da ferramenta, utilizaram-se ferramentas novas e ferramentas desgastadas, definidas por um desgaste medido na aresta de corte tenha sido de aproximadamente 0,3 mm. Já com relação à esbeltez (relação entre o comprimento e o diâmetro da peça), utilizaram-se peças com diâmetro de 50mm e 25mm.

O impacto do arranjo externo, ou seja, dos ruídos nos resultados ocorre da seguinte forma. Durante o torneamento da peça, o diâmetro diminui, aumentando assim a sua esbeltez, gerando maiores vibrações que resultam em uma rugosidade maior. Assim como, com o aumento do desgaste da ferramenta, o processo torna-se menos eficiente, existindo uma tendência de aumento da rugosidade superficial.

Para minimizar a influência de diferentes vibrações presentes em regiões distintas dos corpos de prova, devido a diferentes tipos de apoio, as medições de rugosidade foram realizadas da seguinte forma: para cada peça foram feitas 3 medidas em 4 pontos equidistantes noventa graus de 3 diferentes regiões, que são as que tem contato mais próximo com a castanha, com o centro e o contra-ponto, mostrados nesta ordem na Figura 2.

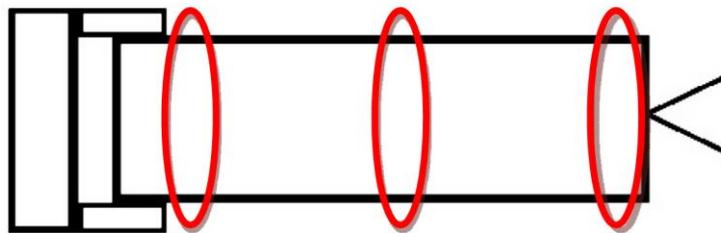


Figura 5 - Regiões de medição de rugosidade nos corpos de prova.

A partir dos dados obtidos utilizou-se o software Minitab para ajustar um modelo polinomial de segunda ordem para as médias () e desvio padrão () de cada um dos parâmetros de rugosidade, que são apresentadas pelas Eqs. (7) – (16)

Equações para o parâmetro Ra:

$$= 2,316 + 0,079 \cdot X_1 + 0,017 \cdot X_2 + 0,212 \cdot X_3 - 0,121 \cdot X_4 - 0,172 \cdot X_5 - 0,120 \cdot X_6 + 0,023 \cdot X_7 + 0,001 \cdot X_8 - 0,123 \cdot X_9 \quad (7)$$

$$= 1,470 + 0,062 \cdot X_1 - 0,276 \cdot X_2 + 0,256 \cdot X_3 - 0,030 \cdot X_4 - 0,214 \cdot X_5 - 0,172 \cdot X_6 + 0,146 \cdot X_7 + 0,020 \cdot X_8 - 0,233 \cdot X_9 \quad (8)$$

Equações para o parâmetro Ry:

$$= 12,635 + 0,200 \cdot X_1 - 0,261 \cdot X_2 + 1,465 \cdot X_3 - 0,074 \cdot X_4 - 0,670 \cdot X_5 - 0,488 \cdot X_6 + 0,214 \cdot X_7 - 0,054 \cdot X_8 - 0,506 \cdot X_9 \quad (9)$$

$$= 7,280 + 0,311 \cdot X_1 - 0,909 \cdot X_2 + 1,366 \cdot X_3 - 0,358 \cdot X_4 - 0,979 \cdot X_5 - 0,597 \cdot X_6 + 0,498 \cdot X_7 + 0,334 \cdot X_8 - 0,083 \cdot X_9 \quad (10)$$

Equações para o parâmetro Rz:

$$= 10,350 + 0,282 \rangle * - 0,040 + + 1,123 , - - 0,106 \rangle * - 0,508 + - 0,424 , - + 0,092 \rangle * * + + 0,022 \rangle * * , - - 0,572 + * , - \tag{11}$$

$$= 6,402 + 0,315 \rangle * - 1,058 + + 1,275 , - - 0,214 \rangle * - 0,858 + - 0,650 , - + 0,450 \rangle * * + + 0,315 \rangle * * , - - 0,682 + * , - \tag{12}$$

Equações para o parâmetro Rq:

$$= 2,697 + 0,003 \rangle * - 0,071 + + 0,325 , - - 0,071 \rangle * - 0,141 + - 0,078 , - + 0,189 \rangle * * + - 0,117 \rangle * * , - - 0,267 + * , - \tag{13}$$

$$= 1,697 - 0,053 \rangle * - 0,448 + + 0,402 , - - 0,006 \rangle * - 0,201 + - 0,120 , - + 0,390 \rangle * * , - + 0,161 \rangle * * , - - 0,448 + * , - \tag{14}$$

Equações para o parâmetro Rt:

$$= 12,761 + 0,280 \rangle * - 0,0,307 + + 1,469 , - + 0,168 \rangle * - 0,664 + - 0,484 , - + 0,198 \rangle * * , - - 0,109 \rangle * * , - - 0,451 + * , - \tag{15}$$

$$= 7,441 + 0,531 \rangle * - 0,964 + + 1,353 , - - 0,269 \rangle * - 1,020 + - 0,614 , - + 0,435 \rangle * * , - + 0,314 \rangle * * , - + 0,005 + * , - \tag{16}$$

Iniciou-se a otimização através da minimização da Eq. (5), com o objetivo de avaliar EQM individual para cada parâmetro de rugosidade. Para isso, utilizou-se o algoritmo GRG da ferramenta Solver do Microsoft Excel como procedimento de busca. Como as saídas esperadas do problema são do tipo quanto menor melhor, adotou-se o alvo como sendo 0. Porém, para cada parâmetro de rugosidade foram obtidos diferentes pontos de ótimo, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Otimização Individual para cada parâmetro de rugosidade

	Resposta		Ponto ótimo		
	Média	Desvio Padrão	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)
Ra (µm)	1,799	0,342	234,581	0,130	0,948
Ry (µm)	8,798	3,463	258,358	0,100	0,539
Rq (µm)	2,005	0,217	226,917	0,129	0,922
Rz (µm)	6,801	2,540	280,045	0,085	0,571
Rt (µm)	8,874	3,445	270,311	0,100	0,531

Então, utilizou-se a Eq. (6) para a realização da otimização através do EQM global. Utilizando novamente a ferramenta Solver e o GRG como procedimento de busca, chega-se no seguinte ponto ótimo para o processo, Tabela 9.

Tabela 9 – Otimização Global do processo

Ponto ótimo					
	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)		
	235,6245	0,1296	0,8754		
	Ra (µm)	Ry (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
Média	1,797	10,088	2,022	8,694	10,211
Desvio Padrão	0,384	2,463	0,239	2,041	2,368

Para visualização do ponto de ótimo encontrado, gerou-se um gráfico de contorno utilizando o software Minitab, Figura 3.

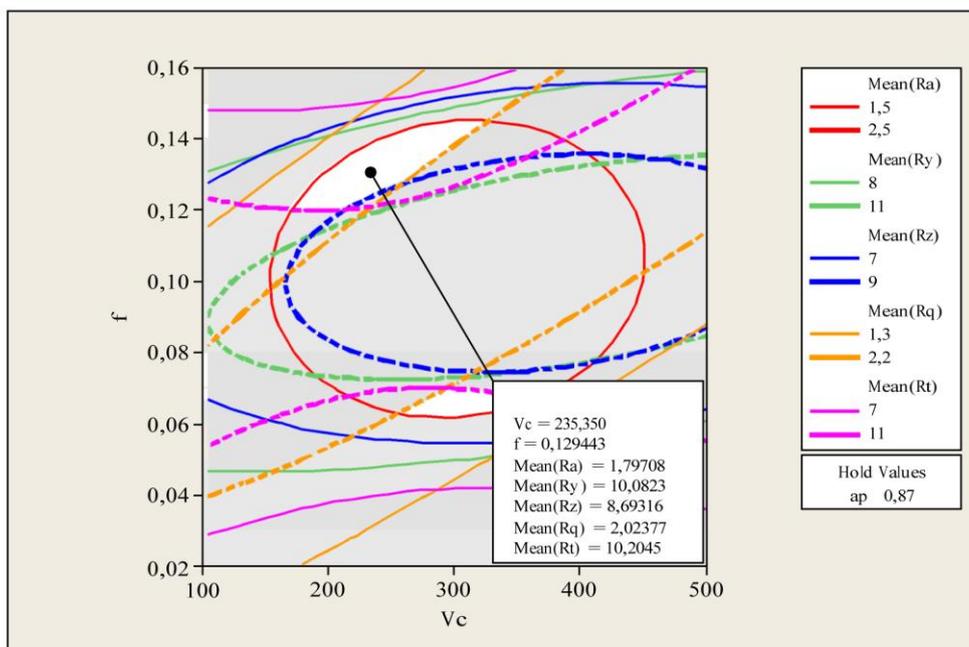


Figura 6 - Gráfico de Contorno

Este gráfico facilita o entendimento da solução, pois trata-se de um problema de otimização com múltiplas respostas, ou seja, um problema complexo que não possui solução trivial.

4. CONCLUSÕES

Através da realização dos experimentos foi possível realizar a otimização do torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14 utilizando o Erro Quadrático Médio Global, derivado dos Erros Quadráticos Médios Individuais dos parâmetros de rugosidade estudados (Ra, Ry, Rz, Rq, Rt). Assim, chegou-se a uma configuração ótima para o processo estudado, através da otimização de múltiplas respostas, com a seguinte combinação das variáveis de corte: Velocidade de Corte de 235,6245 m/min, Avanço de 0,1296 mm/rot e Profundidade de 0,8754 mm.

A utilização do Erro Quadrático Médio Global foi eficiente para otimização do problema, pois observa-se que os valores das respostas, tanto da média, como do desvio padrão são próximos daqueles encontrados na otimização individual dos parâmetros, para alguns até menores.

Além disso, foi gerada uma grande base de dados, possibilitando o início de novos trabalhos para mesmo aço, a fim de contribuir com as indústrias do setor e com futuras pesquisas relacionadas a este tema. Embora os resultados obtidos não possam ser generalizados, a aplicação da metodologia utilizada é viável para a otimização de outros processos de fabricação com múltiplas respostas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. C.; FERREIRA, J. R.; LUÍS, N. E.; MACHADO, A. R.; OLIVEIRA, D. C.; PIMENTEL, M. F. **A study of the effect of residual elements (Cr, Ni and Cu) on the machinability of the free-machining steel AISI 12L14 using design of experiment.** Journal of Engineering Manufacture, Volume 224, Number 10, 2010.

BERTRAND, C.; DEL SOLAR, M. **Can we survive without Leaded Steels?** 4th International Conference on Behaviour of Materials in Machining: Opportunities and Prospects for Improved Operations, pp 123-132, London, 1998.

HARRY, M.; SCHROEDER, R. **Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the World's Top Corporations.** 2nd ed., Random House, New York, 2000.

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response Surfaces: Designs and Analyses.** Marcel Dekker Inc, 2 ed, New York, USA, 510p, 1996.

KLUJSZO, L. A. C.; SOARES, R. B. **Novos desenvolvimentos de aços de usinabilidade melhorada.** Revista Máquinas e Metais, abril, 2003.

KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T. **Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm.** Appl. Math. Comput., n.175, p.1657-1674, 2006.

LIN, D. K. J.; TU, W. **Dual response surface optimization.** Journal of Quality Technology 27:34-39, 1995.

MACHADO, A. R. **Investigação com vistas ao desenvolvimento de aços de corte livre alternativos sem adição de chumbo.** Rede de Pesquisa de Materiais Avançados de Usinabilidade Melhorada, Sub-Projeto Tema 1, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Designs and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, 4ed, 2001.

PRADO, E. L., PIMENTEL, M.F. **Produção de Aços-de-corte-fácil na Aços Villares.** Workshop de Materiais Avançados com Usinabilidade Melhorada, Campinas, SP, Julho, 2004.

VINING, G. G.; MYERS, R. H. **Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach.** Journal of Quality Technology 22:38-45, 1990.

WU, F. C. Optimization of Correlated Multiple Quality Characteristics Using Desirability Function. Quality Engineering, v 17, n 1, pp. 119-126, 2005.

WU, F. C. Robust design of nonlinear multiple dynamic quality characteristics. Computers & Industrial Engineering, Volume 56, Issue 4, pp. 1328-1332, 2009.