

Planejamento de experimentos (análise DOE) e otimização em processos de fabricação de materiais

Bárbara Cristina Mendanha Reis (UFMG) babi_mreis@hotmail.com
Rafael Lucas Machado Pinto (UFOP) rafaelucas@gmail.com
Michele Lisboa Silveira (UFMG) michelesilveira1991@gmail.com
Christianne Lacerda Soares (UFMG) chrislacerda3@hotmail.com
Paulo Eustáquio Faria (UFMG) paulofaria@ufmg.br

Resumo:

Uma das áreas da engenharia de produção é a engenharia de qualidade, que contempla o *Design of Experiments* (DOE – planejamento de experimentos) como uma ferramenta para gerar, estruturar e otimizar dados em processos de manufatura. A usinagem de materiais é um processo de fabricação que permite conferir forma, dimensões e acabamento a uma determinada peça. Dentre as diversas operações de usinagem, destaca-se o torneamento, operação em que a peça gira em torno de seu eixo, enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal. O presente estudo busca aplicar a técnica DOE em um experimento de torneamento. Em decorrência da competitividade entre as empresas, é de suma importância que os produtos atendam requisitos mínimos de qualidade, e esta abordagem estatística tem sido aplicada no meio industrial. Inicialmente o estudo identifica como a velocidade de corte, avanço e ambiente influenciam, separadamente, a temperatura e a rugosidade na operação de torneamento. Em seguida, aplicou-se uma ferramenta de otimização para encontrar os melhores níveis de cada um destes parâmetros, a fim de garantir melhor desempenho simultâneo das variáveis resposta. Constatou-se que o avanço é o parâmetro influente sobre a rugosidade e o ambiente é o que mais significativo sobre a temperatura. Em relação à otimização, os níveis dos fatores que garantiram os melhores resultados foram a profundidade 0,5 mm, avanço de 1,5 mm/rev e ambiente de jorro de fluido.

Palavras chave: fabricação, usinagem, planejamento de experimentos, otimização

Design of experiments (DOE analysis) and optimization of materials manufacturing processes

Abstract

One of the areas of production engineering is the quality of engineering, which includes the Design of Experiments (DOE) as a tool to generate, structure and optimize data in manufacturing processes. The machining of materials is a manufacturing process that allows checking shape, dimensions and finished to a given part. Among the various machining operations, there is turning, operation in which the play revolves around its axis, while the cutting tool performs the movements of longitudinal and/or transverse advance. This study seeks to apply the DOE technique in turning experiment. As a result of competition between companies, it is very important that the products meet minimum quality requirements, and this statistical approach has been applied in the industrial environment. Initially, the study identifies as the depth of cut, feed rate and environment influence separately, temperature and

roughness in turning operation. Then, it was applied an optimization tool to find the optimum levels of each of these parameters in order to ensure optimal performance of response variables simultaneously. It was found that the feed rate is the influential parameter on the roughness and the environment is the most significant on the temperature. Regarding optimization, the levels of the factors that ensured the best results were 0.5 mm depth of cut, feed 1.5 mm/rev and environment with cutting fluid.

Key-words: manufacturing , machining, design of experiments , optimization

1. Introdução

A fim de estabelecer vantagem competitiva em um mercado globalizado, cada vez mais, as organizações buscam utilizar de Sistemas Integrados de Manufatura em seus processos produtivos. Desde os primeiros passos de Taylor, na administração científica, os processos de manufatura têm sido analisados cientificamente com propósito de garantir uma máxima eficiência na fabricação de bens, aliando inovação tecnológica para satisfazer os aspectos econômicos e socioambientais.

Atualmente, na indústria de manufatura, existe a tendência em produzir peças cada vez mais sofisticadas, com rigorosos parâmetros de tolerância geométrica, de acabamento e dimensional concomitante à cobrança por redução de custos, investimento em tecnologia e o cumprimento de legislações ambientais e trabalhistas.

Ao se observar tal paradigma na indústria metal mecânica, percebe-se que estudos sobre parâmetros de processos de corte podem agregar vantagens competitivas devido à redução na geração de resíduos, além da garantia de qualidade na tríade processo, produto e ambiente. Neste cenário, enquadra-se o processo de torneamento de materiais que, de maneira geral, trata-se da aplicação de um material bruto a ação de uma ou mais ferramentas em uma máquina para ser usinado, combinando os movimentos de rotação da peça e avanço da ferramenta, ressaltando que, em algumas aplicações, a peça pode estar parada e a ferramenta girando ao seu redor para remoção de material.

No meio industrial, em especial no processo de desenvolvimento de produto, geralmente obtêm-se informações sobre produtos e processos de maneira empírica. Em busca de maior precisão e confiabilidade, faz-se necessário projetar experimentos, coletar dados e analisá-los. No torneamento, os experimentos podem ser empregados para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura e entender a influência de variáveis, tais como deformação plástica, desgaste, vibração, parâmetros de corte (velocidade de corte (V_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f)) sobre o controle da usinagem, todos envolvidos no processo de usinagem e nos processos de fabricação.

Logo, o Planejamento de Experimentos (em inglês *Design of Experiments*, DOE) é uma opção à indústria manufatureira ao invés do empirismo. Esta técnica deve ser utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Este trabalho tem por objetivo investigar o efeito na temperatura e rugosidade pela influência dos parâmetros de usinagem (profundidade, avanço e meio lubrificador) no processo de torneamento cilíndrico do aço ABNT 4340.

Através da aplicação do DOE será possível alcançar maior qualidade dos resultados dos testes podendo levar a um projeto de otimização dos parâmetros de corte capazes de garantir desempenho superior, seja em termos de suas características funcionais como também sua robustez. Neste trabalho, foi utilizado o programa computacional *Minitab 17*. Com os dados

otimizados, será possível determinar condições de corte que permitirão melhorar o rendimento do processo de manufatura.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho é realizar o DOE e estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte (ambiente, avanço e profundidade de corte), a temperatura e a rugosidade final da superfície ao longo do processo de usinagem, levando-se em consideração, também, a variação simultânea dos fatores para a resposta de interesse. O artigo está organizado da seguinte forma: seção 2 apresenta o referencial teórico sobre os temas abordados; seção 3 a abordagem metodológica; seção 4 contextualiza e analisa os dados do torneamento e da análise DOE ; e seção 5 apresenta as principais conclusões.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Usinagem

Dentre os processos de fabricação pelos quais os materiais são concebidos na indústria, a usinagem contribui significativamente para o desenvolvimento de diversos setores produtivos.

Segundo Machado *et al.* (2015), a usinagem é descrita da seguinte forma: “processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos”. A usinagem é considerada complexa devido a dificuldades em determinar as condições ideais de corte. Ao mesmo tempo é simples, pois pode dispensar intervenções dos operadores.

Entre as operações de usinagem, são conhecidas a furação, fresamento, torneamento, roscamento, alargamento, brochamento, serração, aplainamento, entre outros.

O torneamento é uma operação convencional de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida. Ferraresi (1977) define torneamento como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar (retilínea ou curvilínea) com o referido eixo. A Figura 1 mostra os principais tipos de operações de torneamento.

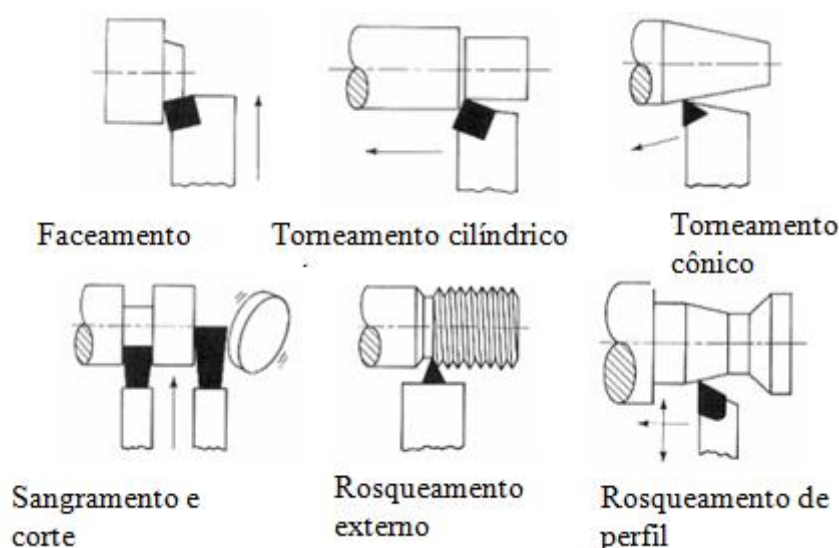


Figura 1 – Operações de torneamento (FERRARESI, 1977)

2.2 Análise DOE

Nos últimos anos, a simulação de eventos discretos tem sido utilizada de forma crescente para auxiliar a tomada de decisões em diversas áreas de conhecimento, sobretudo a área de manufatura (BANKS et al., 2010). Por consequência, cresce também o interesse por investigações científicas que utilizem a simulação computacional combinada com outras técnicas que possam complementar a análise, como por exemplo, projeto de experimentos (DOE) (MONTGOMERY, 2009).

Um experimento é um teste (ou uma série de testes) no qual as alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pelas variáveis respostas, bem como as razões de suas alterações.

O planejamento de experimentos (DOE) utiliza técnicas estatísticas para melhorar o desempenho de um processo de fabricação através das muitas variáveis controláveis que podem descrever este processo. Os resultados do planejamento de experimentos podem melhorar o rendimento do processo além de reduzir a variabilidade do processo, tempo de projetos e de desenvolvimento de custos e operação. A figura 2 representa a análise DOE.



Figura 2 – Análise DOE Fonte: Os autores

No estudo em questão, são considerados fatores de entrada a profundidade de corte, o avanço e o ambiente, a fim de verificar a influência desses fatores sobre a temperatura e rugosidade.

Por fim, observa-se que a análise DOE é uma abordagem de otimização que permite combinar todas as possíveis interações entre os fatores de entrada, bem como a influência dos fatores sobre a variável resposta, de modo que o tempo necessário para gerar dados passíveis de interpretação é menor quando comparado a outros métodos estatísticos. Este é o diferencial perante outras análises, que raramente revelam condições ideais para um processo e não consideram fatores de ruído, além da necessidade de um número significativamente maior de experimentos. (ANDERSON e WEISSMAN, 2015).

3. Procedimentos Metodológicos

Segundo Prodanov e Freitas (2013) pesquisa científica é buscar conhecimentos fundamentando-se em procedimentos capazes de dar confiabilidade aos resultados. A classificação das pesquisas científicas baseia-se no enfoque dado pelo autor, entretanto, este trabalho será caracterizado devido sua abordagem, sua natureza, seus objetivos e métodos utilizados.

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, este trabalho trata-se de uma pesquisa aplicada, pelo seu interesse prático, onde o conhecimento teórico adquirido durante a revisão bibliográfica é utilizado na realidade dos experimentos para otimizar os dados encontrados.

Quanto aos objetivos, esta pesquisa é classificada como normativa, pois de acordo com Turroni & Mello (2011) está primariamente interessada em desenvolver estratégias e ações para aperfeiçoar os resultados disponíveis conforme a literatura existente a fim de encontrar uma solução ótima para novas definições dos parâmetros de corte.

Analisando-se a abordagem, a pesquisa é qualificada como quantitativa, uma vez que buscou transformar todas as informações em números para melhor classificá-las e então analisá-las, utilizando para isto técnicas estatísticas.

Por fim, relativo ao método, pode-se classificar esta pesquisa como um experimento, pois de acordo com Turroni e Mello (2011), este método é empregado quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

A próxima seção caracteriza o ensaio destacando as características do processo de usinagem, o objeto de estudo é caracterizado em função das propriedades químicas e mecânicas e sua importância comprovada por suas aplicações, como também, os instrumentos e métodos de coleta de dados.

3.1.Caracterização do ensaio

Os ensaios foram realizados com os ambientes de usinagem a seco, jorro de fluido e mínima quantidade de líquido (MQL) conhecida também por mínima quantidade de fluido (MQF). No método MQL a vazão foi de 60 ml/h e a pressão de 6,0 bar. Um óleo lubrificante a névoa KSO45 distribuído pela empresa Kampmann foi utilizado como fluido, em uma proporção de 5% de óleo e 95% de água.

O aço ABNT 4340, foi o objeto de trabalho porque este é largamente utilizado para componentes mecânicos, em geral, sob a ação de tensões dinâmicas. Trata-se de um material destinado para a fabricação de peças na indústria automotiva, na indústria petrolífera e construção naval. A composição química deste material pode ser vista na Tabela 1.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,38–0,43	0,15–0,35	0,60–0,80	≤ 0,035	≤ 0,040	0,70–0,90	0,20–0,30	1,65–2,00

Fonte: ASM International (1997)

Tabela 1- Faixa de composição química do aço ABNT 4340

O processo de usinagem escolhido para a realização deste experimento foi o torneamento cilíndrico. A Figura 3 mostra a geometria básica do processo de torneamento, onde se observam a direção da profundidade de corte (a_p) e os vetores avanço (f) e velocidade de corte (V_c).

A velocidade de corte (v_c) [m/min] é a velocidade instantânea do ponto selecionado sobre a aresta de corte, no movimento de corte, em relação à peça. O avanço por revolução (f) [mm] é a distância linear percorrida pela ferramenta durante uma rotação completa dessa ferramenta, sendo este medido no plano de trabalho. Por fim, a profundidade de corte (a_p) [mm] é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho.

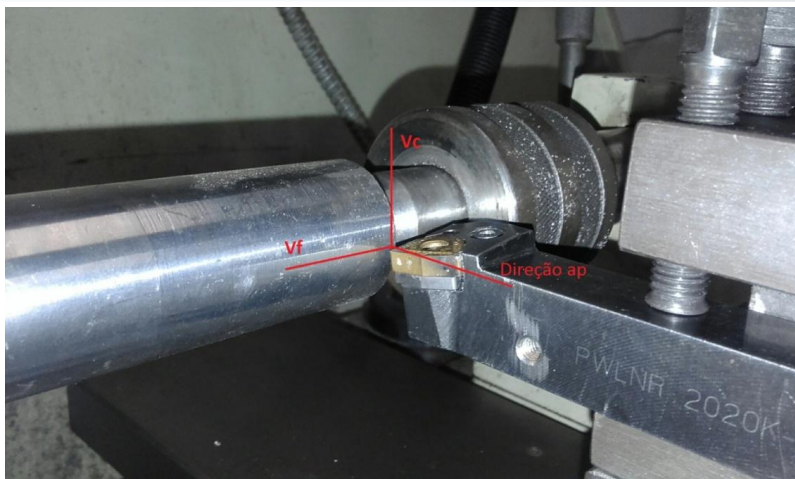


Figura 3 – Representação esquemática dos movimentos de corte no processo de torneamento Fonte: Os autores

Os corpos de prova cilíndricos possuíam diâmetro inicial de aproximadamente 3 polegadas (cerca de 73 mm). Afim de eliminar tensões residuais deixados sobre o material durante o sua fabricação, estes foram tratados termicamente pelo processo de recozimento na temperatura de patamar de 930 °C durante cinco horas, sendo que o resfriamento dos corpos de prova ocorreu dentro do próprio forno.

Os ensaios foram realizados em um torno CNC ROMI, mostrado na Figura 4 a), modelo Centur 30S (5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm), disponível no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal de Minas Gerais. A Figura 4 b) mostra com detalhe, como o bico com a saída do fluido de corte foi direcionado para interface ferramenta-peça. Essa posição é indicada na literatura como sendo a mais eficiente, seja na usinagem do níquel, do ferro fundido e do aço.

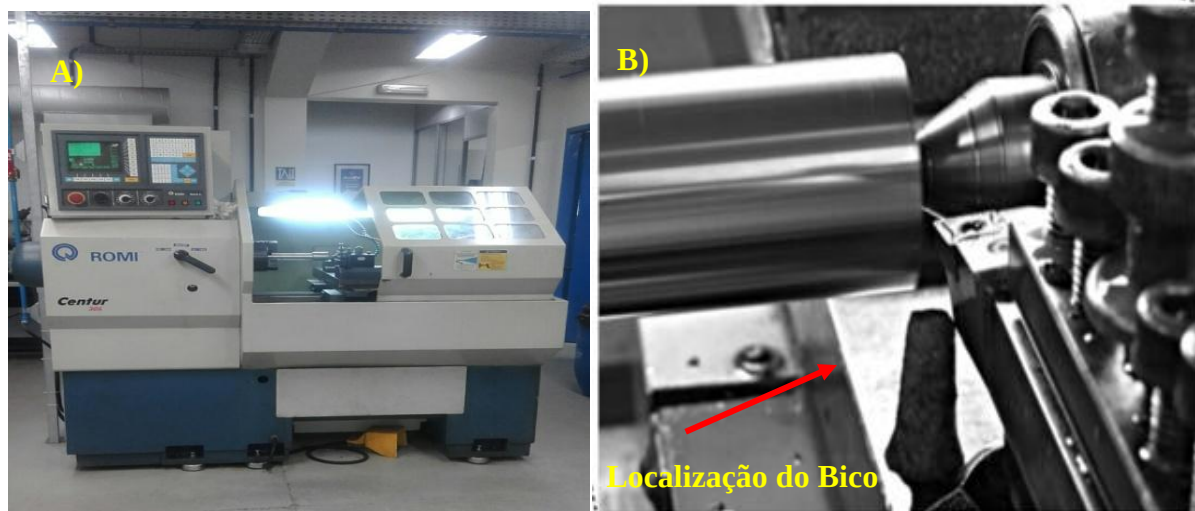


Figura 4 – a) Torno CNC ROMI b) Montagem do experimento Fonte: Os autores

Optou-se por utilizar a técnica de Planejamento de Experimentos Fatorial completo, pois mede todas as combinações dos níveis dos fatores experimentais. As combinações dos níveis dos fatores representam as condições experimentais nas quais as respostas são mensuradas. Cada condição experimental é um ensaio e cada resposta medida é uma observação. O conjunto de todos os ensaios é o experimento.

Nesta pesquisa, foram selecionados 3 parâmetros experimentais: tipo de ambiente, valores de avanço e profundidade de corte. Cada fator foi manipulado em 2 níveis: alto e baixo. Este delineamento experimental representa um modelo Fatorial Completo 2^3 . Já as variáveis respostas escolhidas foram temperatura e rugosidade. A Tabela 2 ilustra os valores dos parâmetros de entrada definidos pelos autores para este experimento.

Parâmetro	Simbologia utilizada	Unidade	Níveis	
			Baixo (-1)	Alto (+1)
Profundidade de Corte	A	mm	0,5	1,5
Avanço	B	mm/rev	0,15	0,3
Ambiente	C	-	Seco	Jorro

Fonte: Os autores

Tabela 2 - Valores dos parâmetros utilizados no experimento

A velocidade de corte foi mantida constante em 200 m/min durante todo os testes e réplicas. Os valores de rugosidade (R_q) foram coletados com um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 301 empregando um comprimento de amostragem de 0,8 mm. Após cada conjunto de testes realizados, a rugosidade foi medida em três pontos equidistantes do corpo e o valor médio foi calculado.

O método termopar inserido na ferramenta permitiu verificar a variação de temperatura com o tempo. Utilizou-se um fio de reduzido diâmetro inserido a um microfuro, realizado por eletroerosão, de forma a causar a menor perturbação possível no campo de temperatura permitindo encontrar o máximo valor na interface cavaco- ferramenta.

Frequentemente, é impossível correr todas as observações em planejamento fatorial 2^k sob condições homogêneas. Devido a variação entre as arestas das ferramentas de corte utilizadas pelo teste principal e para as réplicas tornou-se necessário o uso da técnica de blocagem a qual permitiu controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante de tal fator que perturbaria o sistema, mas que não tínhamos interesse em estudá-lo.

Foi utilizado o software Minitab 17 para gerar o experimento, de forma a garantir aleatoriedade do mesmo. Usou-se as ferramentas Modelo Fatorial Completo do Planejamento de Experimentos, Análise de Variância (ANOVA), Gráficos Fatoriais e Otimização de Respostas. Cada ensaio foi replicado uma vez para análise de variabilidade. Foi adotado um nível de significância (α) de 0,05. Isto significa que a probabilidade de se cometer um erro tipo I, que é rejeitar a H_0 no teste de hipóteses sendo a mesma verdadeira, é de 0,05.

4. Apresentação dos Resultados e Análises

Inicialmente, serão analisados separadamente as variáveis respostas Temperatura e Rugosidade. Utilizando-se a análise do modelo fatorial completo 2^3 fornecida pelo software *Minitab 17*, para cada uma destas variáveis respostas serão encontrados os resultados ótimos em relação aos níveis de cada variável de entrada selecionada para este experimento. Em seguida, será empregada uma técnica de otimização de múltiplas resposta, também fornecida pelo mesmo pacote estatístico, para encontrar os níveis de cada variável de entrada capaz de otimizar as duas variáveis resposta simultaneamente.

4.1. Análise da Temperatura

A Figura 6 representa o diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta Temperatura gerada pelo software *Minitab 17*. Por meio deste gráfico, é possível identificar quais termos mais contribuem para a variabilidade na resposta. Ele exibe os termos, de cima para baixo, em ordem decrescente de importância. Uma linha pontilhada de referência, fixada neste estudo ao nível de significância $\alpha=0,05$, determina quais termos são significativos. Qualquer barra que se estenda além dessa linha representa um efeito significativo. Nesta mesma figura também é possível observar os P-valores provenientes da Análise de Variância (ANOVA) utilizando-se a variável resposta Temperatura. Todos os termos cujo P-valor é menor que o nível de significância $\alpha=0,05$ são considerados significativos.

Por meio da Figura 5, nota-se que os fatores Profundidade de Corte (A) e Ambiente (C), além das interações entre Profundidade de Corte e Ambiente (AC) e entre Avanço e Ambiente (BC), são consideradas significativas neste estudo. Isto significa que estes termos afetam significativamente a Temperatura, e os demais termos não afetam. Embora o diagrama de Pareto produza uma visualização clara da magnitude de cada efeito, o mesmo não fornece informação sobre a direção do efeito. Os resultados obtidos coincidem com os resultados encontrados via ANOVA. Para analisar o modelo, é necessário reduzi-lo, removendo os termos não significativos.

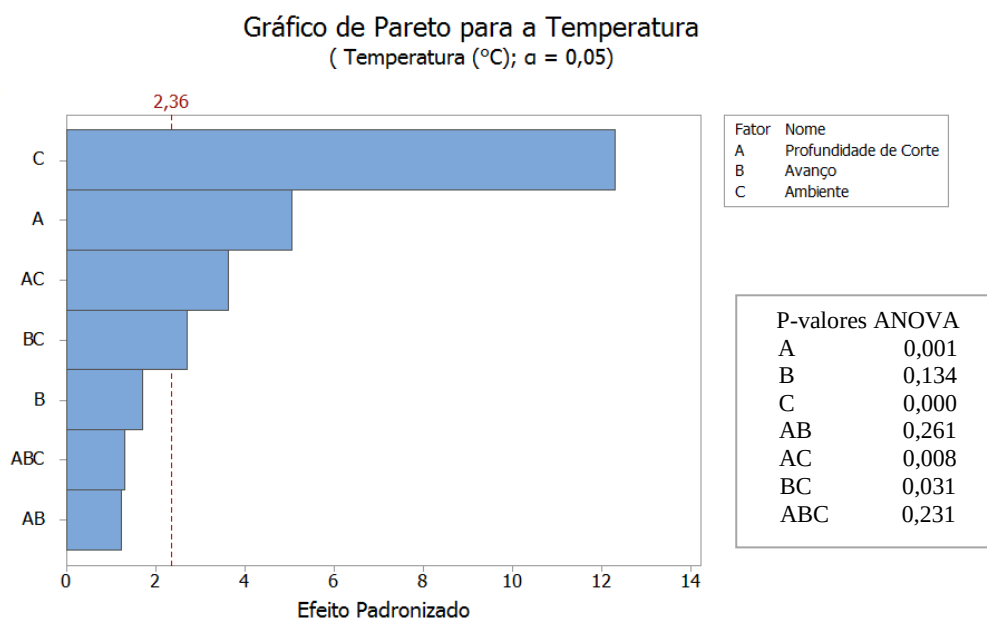


Figura 5- Diagrama de Pareto para a Temperatura

Após reduzir o modelo, torna-se necessário checar todas as suposições do modelo. Esta análise pode ser feita por meio dos gráficos de resíduos, procedimentos que avaliam se os erros apresentam as seguintes características: são normalmente distribuídos, a variância mantém-se constante para todos os valores ajustados e são aleatórios ao longo do tempo (independentes). A Figura 6 ilustra os gráficos de resíduos para a variável resposta Temperatura. Por meio do gráfico Probabilidade Normal, nota-se que os pontos descrevem, aproximadamente, uma linha reta, o que satisfaz aos pressupostos de normalidade. Por meio do gráfico Resíduo *versus* Fits, observa-se uma dispersão aleatória, o que indica uma variância constante. Já o gráfico Resíduo *versus* Order apresenta os resíduos na ordem de coleta de dados. Como os resíduos

estão aleatoriamente distribuídos em torno de zero, os resíduos podem ser considerados independentes. Desta forma, o modelo reduzido atende todas as suposições.

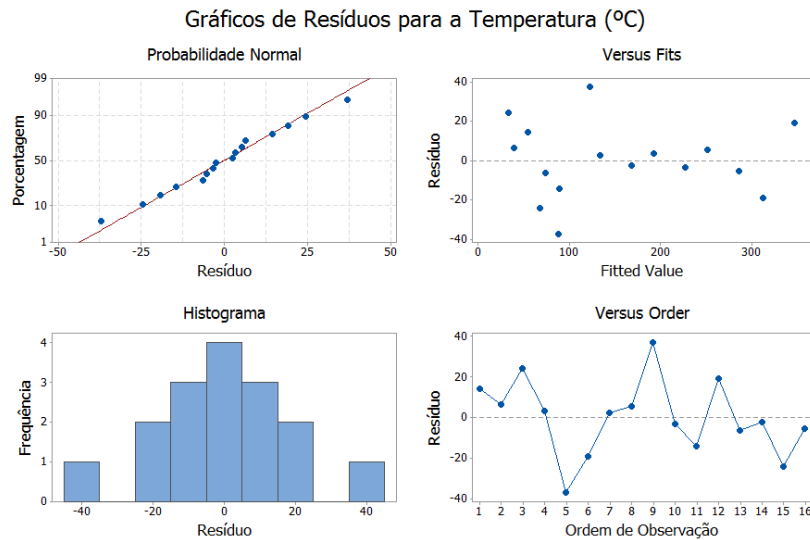


Figura 6- Gráficos de Resíduos para a Temperatura

O modelo reduzido apresentou coeficiente de correlação (R^2) de 0,953, isto significa que o modelo é capaz de explicar 95,30% da variabilidade dos dados coletados. A equação de regressão para a Temperatura é descrita pela Equação 1.

$$\text{Temperatura}(^{\circ}\text{C}) = 51,4 + 69,5 A + 155,0 B + 20,9 C - 49,8 A * C - 246,7 B * C \quad (\text{Equação 1})$$

A Figura 7 mostra o gráfico de efeitos principais para a Temperatura. Nota-se que a variável ambiente é a mais significativa, seguida pela profundidade de corte. Os resultados coincidem com o gráfico de Pareto ilustrado pela Figura 6, tendo em vista que a variável avanço não apresenta efeito significativo na Temperatura. Por meio da Figura 7 também é possível identificar os níveis de cada fator que minimizam a Temperatura. Com relação à variável profundidade de corte, o nível baixo (0,5), o avanço é indiferente, pelo fato de ser uma variável não significativa, e o nível alto do ambiente (jorro (1)) minimizam a temperatura.

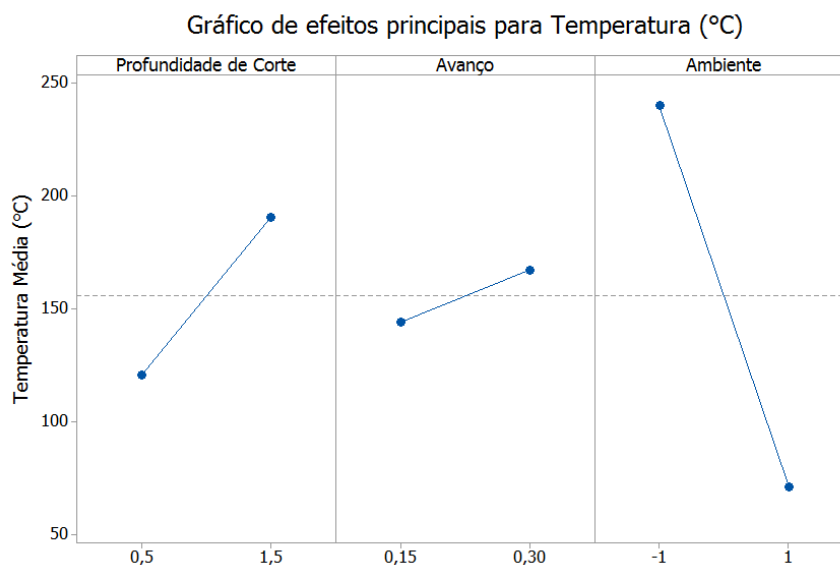


Figura 7- Gráfico de Efeitos Principais para a Temperatura

4.2. Análise da Rugosidade

Para a variável resposta Rugosidade, foi empregado o mesmo procedimento feito para a Temperatura. Inicialmente, foi gerado o modelo completo. Por meio do diagrama de Pareto, observou-se que o único termo significativo foi o avanço. Esse resultado vai de encontro com a literatura, Machado et al. (2015) mostram que entre as condições de corte que apresentam efeito sobre a rugosidade, o avanço é o parâmetro influente, isto é, a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço.

Em seguida, as suposições do modelo foram checadas, satisfazendo os pressupostos de normalidade, variância constante, variância constante para todos os valores ajustados e aleatórios ao longo do tempo (independentes). O modelo reduzido apresentou um R^2 de 0,9249, o que significa que o modelo é capaz de explicar 92,49% da variabilidade dos dados coletados. A equação de regressão é representada pela Equação 2.

$$\text{Rugosidade } (\mu\text{m}) = -0,623 + 17,82 B \quad (\text{Equação 2})$$

A Figura 9 exibe o gráfico de efeitos principais para a Rugosidade. Nota-se que o único parâmetro significativa é o Avanço (B), pois variando-se do nível baixo para o nível alto desta fator, percebe-se uma grande alteração na Rugosidade, fato não observado para as demais variáveis. Por meio desta Figura também é possível identificar os níveis de cada fator que minimizam a Rugosidade. Por se tratar de uma variável de minimização, o nível do fator Avanço que minimiza a Rugosidade é o nível baixo (0,15) e indiferente quanto aos níveis das demais variáveis de entrada, exibidos em cinza na Figura 8.

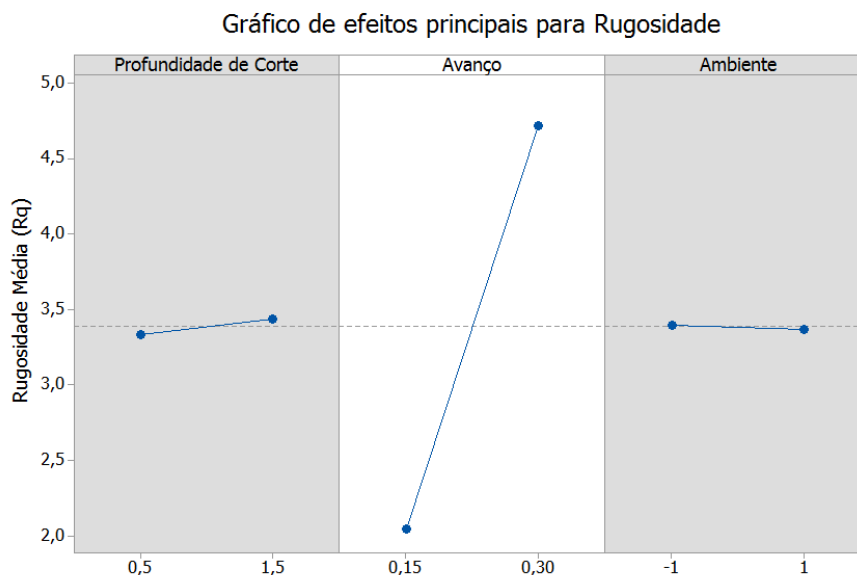


Figura 8- Gráfico de Efeitos Principais para a Rugosidade

4.3. Otimização Global da Temperatura e Rugosidade Simultaneamente

Em muitas situações, quando envolve a análise de múltiplas respostas, os resultados que otimizam uma determinada variável Resposta podem não ser os melhores para as demais respostas. Para estas situações cujos resultados ótimos são conflitantes, pode ser interessante realizar um tratamento global de forma a encontrar os níveis dos fatores capazes de otimizar as múltiplas respostas simultaneamente.

Para conduzir a otimização simultânea das múltiplas variáveis respostas deste sistema, foi utilizada a ferramenta “*Response Optimizer*” do Software *Minitab 17*. Os critérios para buscar as configurações ótimas globais dos fatores são baseados na função *desirability* individuais (di) e composta (Di). As configurações ótimas dos fatores são as que maximizam a função *desirability*. A utilização desta ferramenta requer a definição do intervalo de especificação para cada variável resposta, o nível de importância relativa e os pesos de cada variável resposta.

Para a definição do valor alvo e do intervalo de especificação para as variáveis resposta, foi utilizado o trabalho de Soares (2016), devido ao fato da autora ter desenvolvido testes preliminares com as mesmas condições de operação do presente estudo. Desta forma, os melhores resultados encontrados para estas duas variáveis resposta foram utilizados como *Benchmarking* para a otimização destas respostas no presente estudo. Para a variável Resposta Temperatura, o alvo definido foi de 44°C, menor valor encontrado no conjunto de testes com parâmetros de V_c 200 (m/min), avanço 0,15 (mm/rev) e profundidade de corte 0,5mm. Já para a variável Resposta Rugosidade, o alvo foi 1,64 μ m, menor valor encontrado no conjunto de testes com parâmetros iguais aos citados anteriormente. Por ser tratar de duas variáveis com função objetivo de minimização, foi preciso definir os limites superiores de especificação, que nesse caso serão adotados valores 10% maiores do que os valores alvo.

Quanto ao nível de importância das respostas, foi considerado que as duas variáveis são igualmente importantes. Já em relação ao peso, o experimento foi configurado de tal forma que será dado igual importância ao alvo e aos limites de especificação das variáveis resposta. A Figura 9 ilustra os resultados da otimização, sendo que em vermelho estão mostrados os valores otimizados de cada variável de entrada.

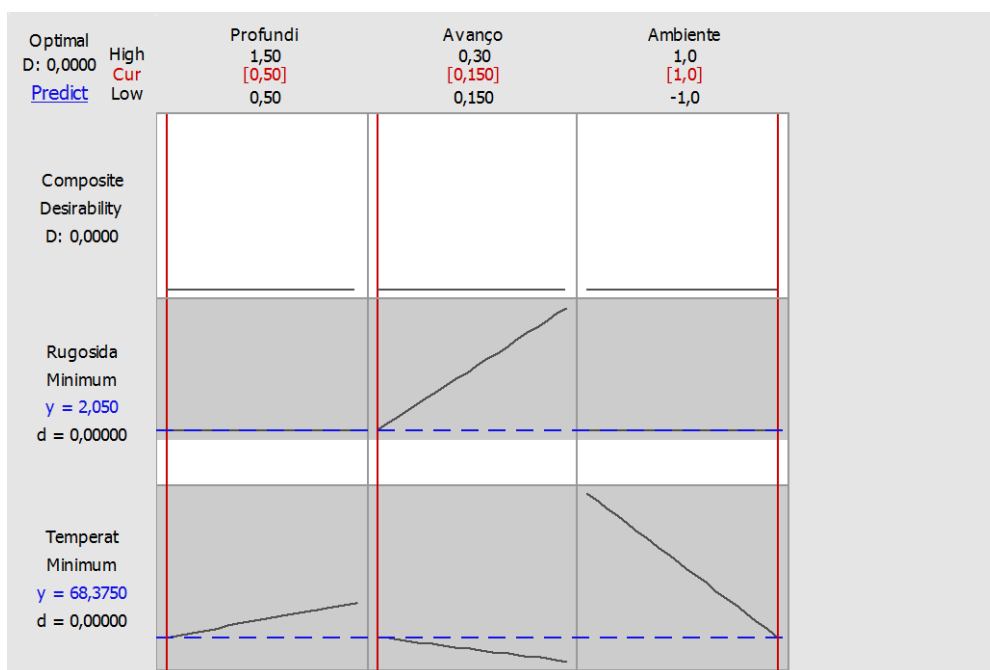


Figura 9- Otimização Global da Rugosidade e Temeparatura

5. Considerações Finais

A partir da análise DOE dos experimentos de torneamento do aço ABNT 4340 realizados neste estudo, foi possível analisar a correlação entre os diversos parâmetros investigados e, além disto, verificar como as mudanças comportamentais de uma variável afetam as demais, estado este que pode dificultar a determinação da configuração de parâmetros ótimos. Em

relação à rugosidade, pode ser concluído que a aplicação da análise DOE permitiu detectar que o parâmetro mais influente sobre a rugosidade é o avanço. Os resultados corroboraram a hipótese estatística, atestando o avanço como parâmetro de maior influência, exemplificado pela mudança significativa nos valores de rugosidade ao modificar os níveis deste fator. O emprego de fluido de corte contribuiu de forma desprezível na diminuição dos valores da rugosidade, da mesma forma que variações nos níveis na profundidade de corte não contribuem para a melhoria da qualidade superficial, ou seja, menores valores de rugosidade. Em relação à temperatura, pode ser concluído que a aplicação da análise DOE, Gráfico de Pareto e ANOVA possibilitou perceber que os parâmetros influentes sobre a temperatura são os efeitos principais profundidade de usinagem e ambiente e as interações entre profundidade de corte e ambiente, e entre avanço e ambiente. Por fim, através da otimização global da temperatura e rugosidade simultaneamente foi atestado que os níveis ótimos são profundidade de corte 0,5 mm, avanço de 1,5 mm/rev e ambiente jorro de fluido.

Referências

- ASM INTERNATIONAL. Materials Selection and Design. In: **ASM Handbook**. EUA: ASM International, 1997. v. 20.
- BANKS, J., CARSON, J.S., NELSON, B.L., NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 5nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- MACHADO, A.R.et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. 3ª edição.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 7th edition. John Wiley & Sons, Inc, Toronto, CA, 2009.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Universidade Feevale, 2ª Edição, 2013.
- SOARES,C.L. **Influência do fluido de corte sobre o torneamento do Aço ABNT 4340**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. 2011. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.
- WEISSMAN, S.A; ANDERSON, N.G. **Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications** . Organic process research & development [1083-6160] Weissman, S A yr:2015 vol:19 iss:11 pg:1605 -1633