

## DOE – Estudo de Caso em um Processo de Usinagem

Jorge Mazutti Junior (Faculdades Integra Einstein de Limeira) jorge.mazutti@yahoo.com.br  
Bruno Eduardo Torrezan (Faculdades Integra Einstein de Limeira) brunoetorrezan@gmail.com  
Ivan Correr (Faculdades Integra Einstein de Limeira) ivancorrer@yahoo.com.br

### Resumo:

Devido à alta competitividade atualmente, as empresas automobilísticas estão em busca por reduções de custo em seus processos e serviços. Com base nesse cenário, uma alternativa para atingir esse objetivo, é troca do aço para o alumínio devido as vantagens deste material. No entanto, o processo de usinagem do alumínio, possui diversas variáveis, que impactam diretamente na qualidade do produto.

Este artigo apresenta um estudo de análise de causa raiz, em uma válvula termostática com trinca. É descrito detalhadamente como o uso da metodologia DOE (Delineamento de Experimentos) pode analisar a influência de cada variável existente em um processo de usinagem, identificar as mais impactantes, e assim criar controles para reduzir a probabilidade de suas ocorrências.

**Palavras chave:** Análise, causa raiz, DOE.

## DOE - Case Study in a Machining Process

### Abstract

Due to the high competitiveness nowadays, the automotive companies are looking for cost reductions in their processes and services. Based on this scenario, an alternative to achieve this goal, it is changing the steel to aluminum because of the advantages of this material. However, the process of machining of aluminum, has several variables that directly impact on the quality of the product. This article presents a study of root cause analysis in a thermostatic valve with a crack. It described in detail how to use the methodology DOE (Design of Experiments) can analyze the influence of each variable exists in a machining process, identify the most impactful, and then create controls to reduce the probability of their occurrence.

**Key-words:** Analysis, root cause, DOE.

### 1. Introdução

Nos dias de hoje, qualidade não é mais um diferencial, a mesma faz parte do conceito do produto. Atualmente, a compra já não se define somente pelo valor do produto, e sim pela constante busca pela a qualidade e segurança, na qual é preciso conhecer tais requisitos e dessa forma decidir pela compra do melhor produto (TROGIANI *et al.*, 2006.).

Segundo Campos (1992) um produto ou serviço de qualidade é “aquele que atenda perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo, às necessidades do cliente”.

Já para Juran (1974), “Qualidade é o nível de satisfação alcançado por um determinado produto, no atendimento aos objetivos do usuário, durante a sua utilização, chamado de adequação ao uso”. E para Deming (1950), “Qualidade é o controle estatístico do processo (redução da variabilidade)”.

Os problemas podem ser gerados por causas comuns ou causas desconhecidas. No caso das causas comuns, a variação observada é inerente ao processo e portanto a sua diminuição é alcançada com melhorias diretamente realizadas no processo em estudo. No caso das causas

desconhecidas, é necessária a correção dos processos. Para ambos os casos, o DOE é uma excelente ferramenta para estabelecer entre causa e efeito. (COLOMBARI,2004).

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Possibilidades de ocorrências em um processo de usinagem

Conforme citado por Castillo (2005), os fatores mais importantes e econômicos que afetam diretamente o desgaste, é a vida da ferramenta e o ângulo de incidência, que tem como função a diminuição do atrito entre o flanco principal e a peça.

Para aquelas empresas que buscam otimizar os seus processos, elas precisam aumentar a eficiência e diminuir os custos do processo de produção. No entanto, quando se fala em ligas de alumínio fundidas sob pressão, alguns fatores como as taxas de desgaste, os mecanismos de desgastes de ferramentas e adesão, não atendem as necessidades da indústria.(ZHANG; LIU; ZHOU, 2001).

Uma das vantagens em usinar peças de alumínio, são os tempos curtos de processo, ocasionados pelas altas velocidades de corte (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991).

O que é algo extremamente positivo para quem está pensando em produção de alto volume, além de propicia furos maiores que o diâmetro da broca, devido a facilidade de deformação plástica do material (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991).

A usinagem de alumínio quando usinado com ferramentas convencionais, geram algumas dificuldades no processo. Pois devido à aderência do material na superfície, faz com que surge rebarbas dentro dos furos. Nesse tipo de processo que exige muito da ferramenta, a causa mais comum de danos à ferramenta, é formação de aresta postiça, que resulta na redução da vida útil da ferramenta. Portanto para reduzir a adesão na superfície da ferramenta, a utilização de fluídos de corte, tem papel primordial. (NOUARI *et al.*, 2003).

A seguir algumas grandezas dos processos de usinagem segundo Diniz *et al*(2008):

Velocidade de Corte ( $V_c$ ) a velocidade de corte é considerada a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para operações como torneamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem ao mesmo tempo.

Avanço ( $f$ ) –pode ser definido como o percurso em cada curso da ferramenta ou o avanço em cada volta.

Profundidade de corte ( $a_p$ ) –É a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça.

Devido ao custo operacional de produção e as questões ecológica, leis ambientais, sustentabilidade e integridade do colaborador é discutido cada vez a mais a utilização ou não de fluídos de corte, gerando varias pesquisas nessas áreas. (DINIZ, 2008).

### 2.2 Desgaste de ferramenta

Quando falamos em danos à ferramenta, o mesmo se divide em dois grupos: desgaste e avaria. O desgaste é ocasionado pela perda de material em pequena quantidade, seja no nível molecular ou atômico, mas de forma agressiva e contínua. Diferentemente da avaria, que é caracterizada pela grande quantidade de perda do material e de forma súbita (CHILDS *et al.*, 2000).

Segundo Childs *et al.*(2000), todos os materiais de ferramenta estão sujeitos à sofrerem os efeitos existentes no processo de usinagem. Devido às altas temperaturas, tensões normais e fricções, as ferramentas de corte devem ser projetadas a fim de suportar tais requisitos. No universo da usinagem, os danos da ferramenta e a taxa de desgaste estão diretamente ligados às mudanças das condições de corte. O desgaste da ferramenta é algo inerente do processo,

certamente ocorrerá, mas a sua ocorrência pode ser reduzida, desde que os seus mecanismos estejam entendidos e controlados.

O desgaste da ferramenta apresenta diversas variações na classificação de suas estruturas (MACHADO; SILVA, 2004). Para a maioria dos autores existem as seguintes definições:

- a) Desgaste frontal (ou de flanco): esse desgaste é ocasionado devido ao contato entre a ferramenta e a peça, na parte frontal da ferramenta. Todos os processos de usinagem estão sujeitos a esse tipo de desgaste, no qual o aumento da velocidade de corte contribui para o surgimento do mesmo;
- b) Desgaste de cratera: é ocasionado pelo atrito do cavaco com a ferramenta, na área de superfície de saída. Quando o desgaste de cratera se depara com o desgaste frontal ocorre a quebra da ferramenta;
- c) Deformação plástica da aresta de corte: é ocasionado devido às altas temperaturas na região da ponta da ferramenta e a sobreposição dos efeitos da pressão aplicada neste local. O crescimento dessa deformação resulta em piora do acabamento superficial, além de poder gerar a quebra da aresta de corte. A escolha pela geometria adequada da ferramenta é o que pode evitar tal problema;
- d) Lascamento: o lascamento ocorre em materiais frágeis, retirando partículas maiores de uma só vez, diferente do desgaste de cratera e da deformação plástica da aresta, que retira pequenas partículas. Como solução para esse problema o uso adequado do ângulo de incidência é requerido;
- e) Trincas: as trincas são causadas pela variação de temperatura que acarreta em duas situações: fadiga térmica e ou esforços mecânicos. A fadiga térmica ocorre perpendicularmente à aresta de corte. Já os esforços mecânicos, ocorrem paralelos à aresta.

### 2.3 Ocorrências de Falhas

São inúmeras as razões porque as falhas podem ocorrer, mas o que sabe ao certo, é que elas podem ser causadas dentro de alguma operação, por falhas do material ou de informações, e podem até mesmo ser causadas por ações dos clientes (SLACK *et al.*, 2002).

Ao se projetar um produto, você só consegue prever aquelas situações mais prováveis que podem ocorrer, no entanto, quando esse produto começa a ser produzido de fato, é aí que as circunstâncias reais aparecem e as inadequações se tornam evidentes. As máquinas para funcionarem, precisam da intervenção humana, e qualquer ser humano está sujeito a falhas. A classificação das falhas humanas são divididas em dois grupos: erros e violações. Erros são ocasionados por enganos de julgamento, já as violações estão ligadas diretamente aos atos contrários de procedimentos operacionais constituídos anteriormente (SLACK *et al.*, 2002).

Para Colombari (2004) os problemas são divididos em causas comuns e causas desconhecidas. Causas comuns por se tratarem de variações inerentes ao processo, as mesmas podem ser reduzidas através de melhorias contínuas realizadas no processo. Já para causas desconhecidas, a correção dos processos se faz necessária.

### 2.4 DOE

O impacto gerado pelas entradas de um processo as saídas são avaliadas pela ferramenta de delineamento de experimentos, onde para obter um maior controle do processo e reduzir a variabilidade de resultados são realizados testes de forma planejada. (FARIA, 1992; GALDÁMEZ, 2002; ROTONDARO *et al.*, 2002).

Com o intuito de descobrir algo em um processo específico são realizados experimentos em todos os campos. No meio industrial, são realizados experimentos de modificação ou

intervenção no processo padrão para entender e acompanhar as causas dessas intervenções. (MONTGOMERY, 1984).

Para reproduzir a variabilidade e os custos totais e para aperfeiçoar o processo, aproximando os valores de saída aos requisitos nominais são usados planejamento de experimentos. Em projetos, usa-se para avaliar materiais alternativos e fixar os parâmetros-chave do projeto, ou seja, os parâmetros que impactam no desempenho do produto e para selecionar parâmetros que tornem o projeto robusto, avaliar materiais alternativos. (CALEGARE, 2001).

O DOE pode ser utilizado para diferentes propósitos:

- a) Verificação: Reduzir o número de variáveis X;
- b) Focalização: Verificar e quantificar as relações significativas entre variáveis X-Y;
- c) Otimização: Determinar as melhores definições para X.

O Plano experimental é configurado de modo a obter todas as informações possíveis a partir de todas as variáveis incluídas no *design* (cada fator será testado igualmente em cada nível). Isso permite conferir os principais efeitos e interações dos fatores:

- a) Principal efeito: efeito de uma variável independente de outras.
- b) Efeito Interativo: o efeito depende de influência de duas variáveis ao mesmo tempo.

## 2.5 Válvula Termostática

A válvula termostática é um componente indispensável no motor, o qual controla a passagem do líquido de refrigeração para o radiador e para o motor, mantendo a temperatura de trabalho nos limites ideais, evitando que o mesmo trabalhe muito quente ou muito frio, correndo risco de sofrerem maiores desgastes.

A válvula termostática (figura 1) é considerada a gerente de todo o sistema de refrigeração a qual não é um dispositivo que auxilia na refrigeração, mas age como controladora do sistema. Se o motor estiver apresentando superaquecimento, não adianta retirar a válvula termostática, porque se não for um problema de funcionamento da válvula, a causa está no sistema de refrigeração que é, efetivamente, o encarregado de dissipar o calor gerado pelo motor.

Os benefícios do uso da válvula:

- a) Rápido aquecimento do motor;
- b) Reduz o desgaste do motor;
- c) Economia de combustível e óleo lubrificante;
- d) Menor índice de poluentes na emissão de gases.

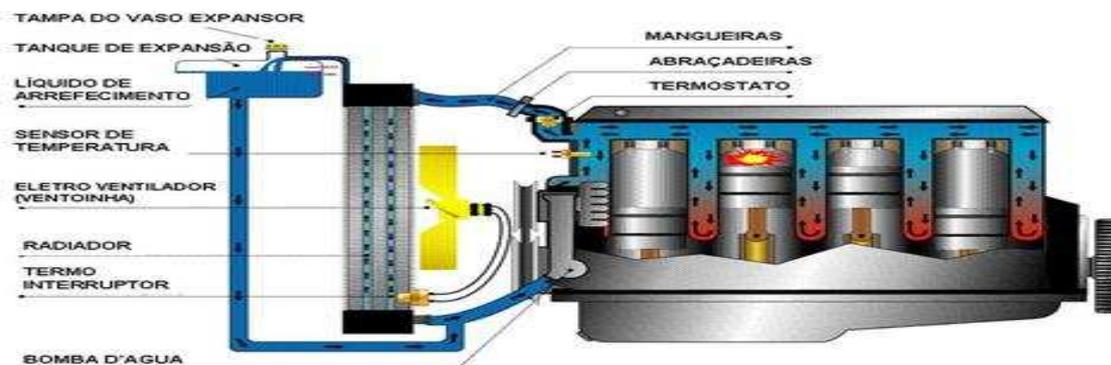


Figura 1 - Localização do termostato no motor

### 3. Materiais e Método

#### 3.1 Abordagem Inicial do Problema

A peça utilizada nesta pesquisa foi uma válvula termostática para motores 1.0 / 1.4 / 1.6 que apresentava problema de trinca na região do tubo (gargalo) usinado.

O gargalo usinado tem como objetivo receber a mangueira de passagem do líquido de arrefecimento, e uma trinca nessa região resulta em vazamento do mesmo, podendo então comprometer todo o motor do veículo.

Inicialmente era impossível dizer com propriedade o que fez gerar a trinca naquela região, devidas às inúmeras variáveis existentes no processo de fundição, usinagem e até mesmo na montagem do termostato.

Até que as análises da causa raiz finalizassem, uma medida de contenção se fez necessário para conter o problema. Depois de ter analisado todas as peças devolvidas pelo cliente, analisou-se, que a grande maioria das peças com trinca, não eram perceptíveis a olho nu, o que dificultou ainda mais o trabalho. Portanto, para evitar o risco de enviar peças não conformes, foi instalado no final da linha de produção, um microscópio óptico para inspecionar 100% das peças produzidas.

Como primeira análise, foram enviadas peças para um laboratório acreditado especializado em análise de falhas, com o objetivo de descobrir a causa raiz do problema de trinca. Segue abaixo algumas informações quanto a essa análise:

Foram enviadas para esse laboratório três peças com trinca no gargalo, uma peça que não apresentou problemas e uma peça fundida sem usinagem. Abaixo as fotos da micrografia das peças com trinca (figura 2 e 3):

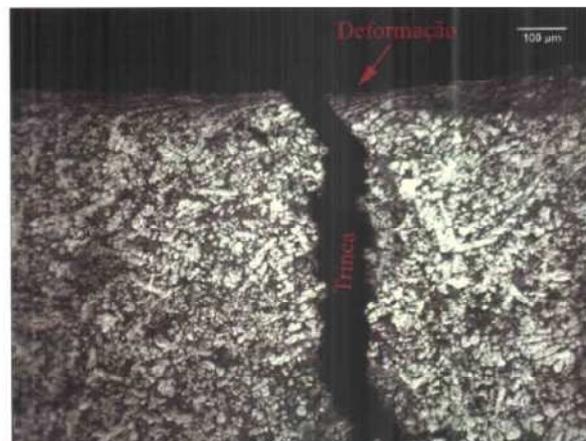


Figura 2 - Micrografia ampliada do lado interno do gargalo da peça com trinca. Observa-se que nesta região há deformação da microestrutura

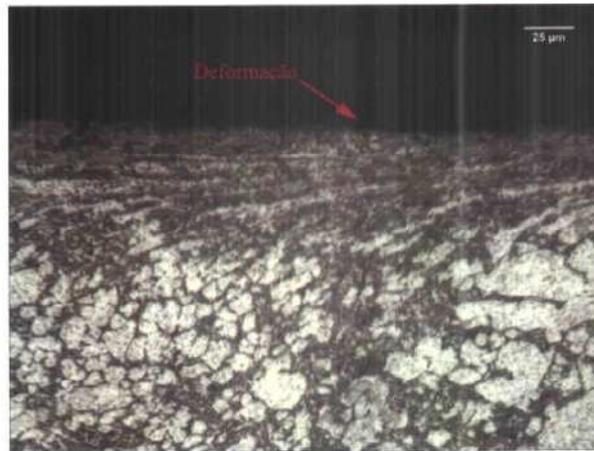


Figura 3 - Micrografia ampliada do lado interno do gargalo da peça com trinca. Observa-se que a usinagem do furo provocou deformação da microestrutura

As amostras analisadas apresentaram microestruturas semelhantes. Verificou-se que a microestrutura é constituída por matriz de alumínio com fino eutético de silício característica típica de materiais fundidos sob pressão. Não há discontinuidades microestruturais inerentes ao processo de fundição.

Avaliando a microestrutura da superfície interna do gargalo do termostato com trinca (figura 2) é possível observar que há grande deformação plástica. Isto indica que durante a usinagem da peça com trinca foi aplicada tensão acima do limite de escoamento do material o que pode ter levado ao surgimento das trincas.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que as trincas no gargalo dos termostatos provavelmente surgiram por tensões provocadas pela usinagem. Portanto as análises passaram a ser do processo de usinagem, e tal operação é realizada por terceiro.

Para analisar a causa raiz do surgimento de trincas, foi utilizado a ferramenta DOE (Delineamento de Experimentos), uma vez que o laudo do laboratório indicava que o processo de usinagem deformou o material, eliminando assim grande parte das variáveis existentes nos outros processos da peça como a fundição e montagem, restando as variáveis mais impactantes do processo de usinagem para serem avaliadas.

Com base no relatório de análise de falhas que foi realizado em laboratório acreditado, para executar o DOE foi definido que o mesmo seria executado no fornecedor de usinagem levando em consideração as principais variáveis existentes no processo de usinagem.

Primeiramente foi definido um time multifuncional tanto na organização como no fornecedor, definindo as pessoas que iriam participar do DOE, além da definição de um líder.

Após definição do time, foram analisadas e discutidas as principais variáveis existentes no processo de usinagem que poderiam sozinhas ou combinadas, resultar na trinca no gargalo, conforme tabela 1 abaixo:

Nº	Variáveis consideradas no DOE	Máquina de usinagem	Meios para detectar a trinca após a realização do DOE
1	Peça do Molde W161	Centro de usinagem Brother 104-16	Microscópio e aplicação de líquido penetrante
2	Peça do Molde W162		
3	RPM com 30% acima do especificado Especificado = 7500 RPM RPM considerado no DOE = 9750 RPM		
4	Avanço de corte com 30% acima do estabelecido Especificado = 2400 mm/min Avanço considerado no DOE = 3120 RPM		
5	Ferramenta no final da vida útil (50.000 peças produzidas)		
6	Ferramenta acima da vida útil (Desgastada / Sem corte)		

Fonte: Relatório de ensaio nº54/12 – Propriedade da organização fabricante da Válvula

Tabela 1 – Lista de variáveis para elaboração do DOE

Após a definição das variáveis e dos meios de detecção da falha, foram elaboradas as combinações duplas e triplas das variáveis. O número de experimentos (N) necessário para analisar as variáveis (K) em dois e três níveis usando fatoriais completos, pode ser descrito através das seguintes equações:

$$N = 2^k$$

$$N = 3^k$$

Deste modo o número de experimentos combinando duas variáveis é 64. E o número de experimentos para três níveis é 729.

#### 4. Resultados e discussões

Como pode ser observado na tabela 2, o uso da técnica DOE como ferramenta de descoberta de causa raiz, demonstrou-se ser eficaz ao reproduzir a trinca, através da combinação de RPM acima do especificado acrescido do uso da ferramenta desgastada. Além dessa combinação, somente o uso da ferramenta desgastada também resulta em trinca.

Combinação	Molde	Resultado
RPM acima 30% e Broca Desgastada, sem corte	W161	100,00% Reprovado
RPM acima 30% e Broca Desgastada, sem corte	W162	100,00% Reprovado
Broca Desgastada, sem corte	W161	100,00% Reprovado
Broca Desgastada, sem corte	W162	100,00% Reprovado

Fonte: Relatório de ensaio nº54/12 – Propriedade da organização fabricante da Válvula

Tabela 2 – Resultado do DOE

Portanto independente do molde, cavidade e ferramenta no fim da vida útil, as variáveis impactantes para o surgimento da trinca, é o RPM e a ferramenta desgastada. Logo com base nessas informações, foi possível implementar os seguintes controles no processo do fornecedor de usinagem:

Controle para brocas desgastada:

- a) Alterado material da ferramenta (broca) de aço rápido para de PCD (diamante).
- b) Implementado controle diário do estado da ferramenta, com o objetivo de detectar o desgaste da broca com atencendência.

Controle para o RPM acima do especificado:

- a) Foi bloqueado o painel do centro de usinagem para impedir qualquer alteração dos parâmetros. O mesmo só pode ser liberado pelo Supervisor de Produção.
- b) Implementado controle diário para o inspetor da qualidade verificar se os parâmetros estão conforme especificado.

## 5. Conclusão

A aplicação do DOE como metodologia de análise de causa raiz, evidencia ser uma ferramenta eficaz, quando se tratando de problemas mais complexos e que existem diversas variáveis no processo, pois através de combinações e simulações, é possível repetir a falha e encontrando assim a verdadeira causa raiz do problema. Com os resultados DOE, é possível implementar ações para reduzir a probabilidade da falha e auxiliar na elaboração de projetos futuros.

## Bibliografia

- CALEGARE, ÁLVARO J. A.** *Introdução ao delineamento de experimentos 1ª ed.* Ed Edgar Blucher SP 2001.
- CAMPOS, V. F.** *TQC – Controle de qualidade total.* Belo Horizonte: Fundação de Christiano Ottoni, Escola de engenharia da UFMG, Rio de Janeiro: Bloch, 1992.
- CASTILLO, W. G.** *Furação de ferro fundido cinzento GC 25 com brocas de metalduro com canais retos. 2005.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CHILDS, T.H.C. et al.** *Metal Machining: Theory and Application.* Londodn: Arnold, 2000.
- COLOMBARI, R.R.** *Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção.* Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. 119p – 2004
- DEMING, W. E.** *Qualidade. A redução da administração. 1º Edição.* São Paulo: Marques Saraiva, 1990.
- DINIZ, A.E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L.** *“Tecnologia da usinagem dos metais”,* Artliber Editora, São Paulo, 6ª Edição 2008.
- FARIA, A. L.** *Aplicação da metodologia Taguchi no estudo de um processo de pintura numa fábrica de caminhões.* Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- GALDÁMEZ, E. V. C.** *Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos.* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- JURAN, JOSEPH M.** *Quality control handbook.* New York: McGraw-Hill, 1974.
- MACHADO, A. R. E DA SILVA, M.B.,** *“Usinagem dos Metais”,* apostila, 8a versão, EDUFU, Uberlândia, 2004.
- MARQUES, W. L.** *Implantação da Qualidade Total.* 2007.
- NOURARI, M et al.** *Experimentals analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminium alloys.* Wear 255 (2003)

**ROTONDARO, R. G. Et al.** *Seis Sigma: Estratégia Gerencial para Melhoria de Processos, Produtos e Serviços*. São Paulo: Ed. Atlas, 2002.

**SLACK, Nigel...**[et al.]. *Administração da Produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

**TROGIANI, C.; FREITAS, R.; BUTOW, E. A.; MARINOVIV, G.** *Apostila de Plano de Negócios*. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP. 2006.

**ZHANG, M. Z.; LIU, Y. B; ZHOU, H.** *Wear mechanism maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy*. Tribology International. 2001.

**WEINGAERTNER, W.L., AND SCHROETER, R.B.**, “*Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas*”, 2ª ed., São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.