

# Pré-Calibração de um Equipamento de Quick-Stop para Torneamento Através de Método dos Elementos Finitos

Felipe Chagas Rodrigues de Souza<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-4446-3077>

Leonardo Carvalho Aires<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0009-0002-9142-6084>

## RESUMO

Este trabalho consiste na simulação da ruptura de pinos do equipamento de quick-stop para torneamento de Alumínio e Inconel®718. Através do software Ansys®, foi procurado otimizar as condições de pressão no quick-stop para dois diferentes matérias para o pino: aço estrutural e ferro fundido cinzento temperado. Concluiu-se que o aço estrutural dá ao pino uma resistência à ruptura muito alta, que exige operar o quick-stop sob pressões que pode danificar a ferramenta. Já para o pino em ferro fundido a simulação constatou que os testes são eficientes para torneamento de alumínio com pressão de acionamento à 350 Mpa. Já para Inconel®718, o pino de ferro fundido rompe prematuramente.

## Palavras-chave

Quick-Stop; Usinagem; Elementos Finitos.

## Pre-Calibration of a Quick-Stop Turning Equipment Using the Finite Element Method

## ABSTRACT

This work consists of simulating the rupture of pins in the quick-stop equipment for turning aluminum and Inconel®718. Using Ansys® software, the aim was to optimize the pressure conditions in the quick-stop for two different materials for the pin: structural steel and tempered gray cast iron. It was concluded that structural steel gives the pin a very high rupture resistance, which requires operating the quick-stop under pressures that can damage the tool. For the cast iron pin, the simulation found that the tests are efficient for turning aluminum with a drive pressure of 350 Mpa. For Inconel®718, the cast iron pin ruptures prematurely.

## Keywords

Quick-Stop; Machining; Finite Elements.

Submetido em: 13/01/2025 – Aprovado em: 31/01/2025 – Publicado em: 31/01/2025

1 Doutorando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, [felipechagas@ufu.br](mailto:felipechagas@ufu.br).

2 Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, [leonardo.aires@ufu.br](mailto:leonardo.aires@ufu.br).



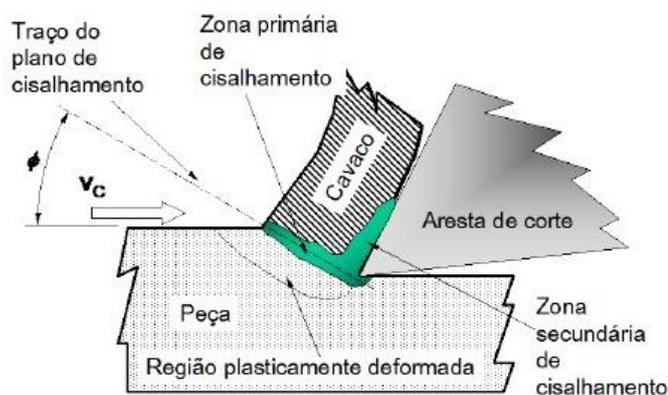
## 1 INTRODUÇÃO

Usinagem é um dos tipos de processo de fabricação que é caracterizado por haver remoção de material de uma peça. O material removido da superfície da peça durante a usinagem é denominado cavaco, que é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem, pois é o subproduto final presentes em todos eles, e pode variar (em tipo, forma e extensão) para cada operação de usinagem (FERRARESI, 1977).

Dentre os vários processos de usinagem (destacados na Figura 1), o mais comum em estudos é o torneamento, pois é um processo de simples experimentação e cujo resultados podem servir de referência para variadas situações dentro da usinagem. Torneamento é o processo usado para fabricar peças que podem ser definidas por sólidos de revolução, no qual a ferramenta desenvolve um deslocamento linear, enquanto a peça exerce um movimento rotacional.

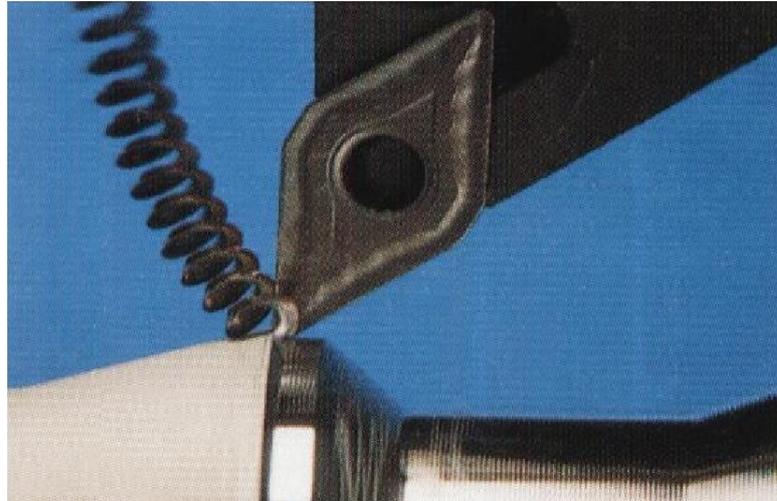
Nos processos de usinagem existem vários parâmetros que são de grande influência para definir projetos: velocidade de corte, profundidade de corte, presença de lubrificantes ou refrigerantes etc. Mas em todos estes processos, de forma direta ou indireta, a base de todos os parâmetros e seus efeitos no processo é a formação do cavaco (Figura 1 e Figura 2). Assim sendo, a formação do cavaco está correlacionada às forças de corte, geração de calor, desgaste da ferramenta de corte etc. Compreender a formação do cavaco é fundamental para planejar um bom processo de usinagem e otimizá-lo. Nos últimos 70 anos as condições da interface cavaco-ferramenta têm sido estudadas, entretanto descrições e interpretações precisas da geometria do contato ainda não estão disponíveis (RAMAN et. al., 2002), o estudo da interface é uma tarefa difícil em função de suas dimensões reduzidas e das altas velocidades envolvidas nos processos de usinagem.

**Figura 1.** Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária num processo de usinagem



Fonte: Machado et.al., 2011

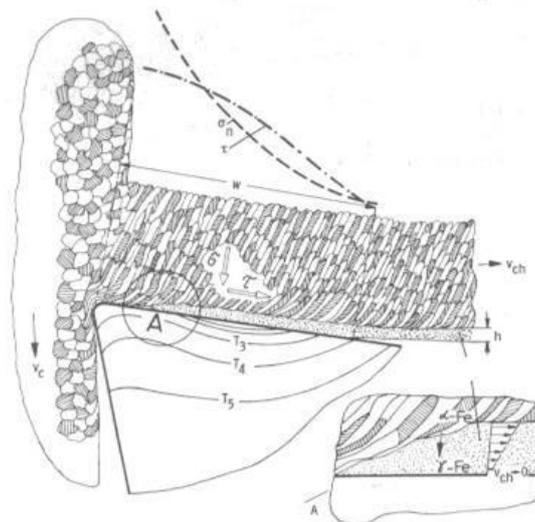
**Figura 2.** Exemplo de formação de cavaco num processo de torneamento



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Se tratando dos parâmetros relativos ao cavaco, o grau de recalque é um dos mais importantes e, portanto, um dos mais utilizados para representar a usinabilidade do material. Um grau de recalque elevado significa que o cavaco sofreu grandes deformações no plano de cisalhamento primário (Figura 3), devido à grande restrição sofrida para escorregar no plano de cisalhamento secundário, aumentando a espessura do cavaco e ao mesmo tempo, consumindo mais energia e conseqüentemente maior força e menor usinabilidade (MACHADO et al., 2011).

**Figura 1.** Zona de fluxo na interface e grãos do metal



Fonte: König and Klocke, 1997

À vista disso, o cavaco se forma com características relacionadas a todos os parâmetros envolvidos no processo, desde materiais às condições de corte. Assim estudando o cavaco, sua morfologia e microestrutura e demais característica é possível realizar uma análise extremamente detalhada sobre o processo de usinagem que o gerou.

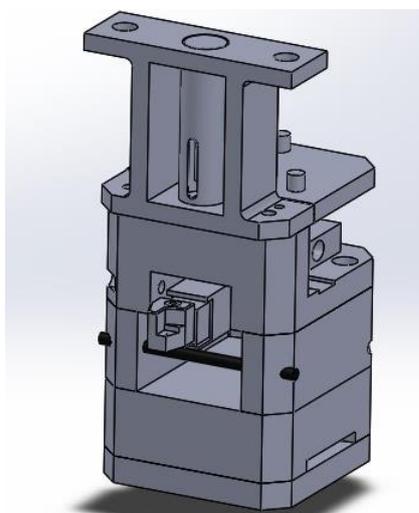
## 2. PROBLEMA DE PESQUISA

Para realizar estudo do cavaco (zonas de aderência, curvatura e demais características) é preciso avaliar sua curvatura no momento exato do corte. Somente o cavaco formado durante o processo de usinagem em suas condições de corte (velocidade de trabalho) é que o cavaco está dotado das informações específicas dos experimentos.

Se um corte é interrompido de maneira tradicional, com uma desaceleração progressiva, à medida que a velocidade cai, o cavaco se molda para a respectiva velocidade de corte, em que as características diferem do que vigoram durante o processo de corte. Se tratando de segurança e durabilidade dos equipamentos, os processos de cortes são interrompidos de com esta desaceleração progressiva, mesmo que seja uma rápida desaceleração. Assim sendo, o último cavaco formado não será útil como objeto de estudo.

Então, para resolver tão questão, foi desenvolvido um equipamento capaz de interromper o corte de forma instantânea. Este equipamento é conhecido como Quick-Stop (Figuras 4 e 5), que ao realizar a interrupção do corte instantaneamente, o cavaco remanescente permanece com as características do processo de corte realizado em sua velocidade de trabalho utilizada.

**Figura 4.** Desenho em CAD do equipamento Quick-Stop para torneamento. Destaque para o pino (na cor preta) que sustenta o suporte da ferramenta de corte.



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Figura 5. Equipamento Quick-Stop para torneamento e seus detalhes.



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

O Quick-Stop funciona da seguinte maneira:

- Ar comprimido com uma pressão previamente determinada é direcionado para dentro de uma cúica de freio, e então é armazenado.
- Uma alavanca libera a trava da cúica e o ar comprimido aciona uma mola que por sua vez aciona um martelo (Figura 4 C). Este martelo pressiona o suporte que contém a ferramenta de corte e rompe um pino que é a base do suporte.
- Após o rompimento do pino, o suporte da ferramenta desce de forma instantânea, e então o contato entre ferramenta e peça é cessado.

O suporte deve descer numa velocidade superior a rotação da peça torneada pra não haver contato entre cavaco e ferramenta durante o processo. Segundo Vorm (1976), o tempo mínimo de resposta de um dispositivo quick-stop, ou seja, o tempo necessário para acelerar a ferramenta de zero até a velocidade de corte deveria ser menor que o tempo que o cavaco leva para ser cisalhado. Black e James (1981) afirmam que a velocidade com que a ferramenta se afasta da peça é um importante parâmetro de desempenho de dispositivos quick-stop, pois caso ela não seja adequada, a microestrutura do material próximo à região de formação da raiz fica comprometida, apresentando aspectos não reais de aderência.

A má execução do equipamento, como por exemplo, pressão excessiva do ar comprimido, pode gerar um impacto muito brusco no suporte então a ferramenta pode ser danificada. Outro problema consiste no pino ser excessivamente frágil, e romper somente com as forças de corte, impedindo os experimentos.

Logo o pino deve ter resistência mínima para suportar as forças de corte da usinagem, mas abaixo de uma resistência máxima para não exigir uma pressão muito elevada para seu rompimento e assim danificar a ferramenta de corte.

A análise deste trabalho está em torno deste pino, que é a base do suporte que contém a ferramenta de usinagem. Definindo as principais características do pino é possível prever possíveis problemas durante os ensaios para diferentes materiais torneados. Sabendo a faixa das forças de corte para o torneamento do material proposto para torner, é possível estimar a pressão ideal para a execução do experimento de Quick-Stop evitando possíveis danos na ferramenta, assim como rompimento prematuro do pino.

Durante os ensaios foram gastos vários pinos, e por isso foram produzidos pinos com dimensões comuns na comercialização de metais. O pino estudado trata-se de ferro fundido cinzento temperado (Figura 5). Assim sendo o diâmetro fixo do pino é fixa e não será variada nos parâmetros da simulação. Como a área da seção transversal é fixa, o parâmetro que vai ser referencial nesta peça é a tensão de cisalhamento do material do pino.

**Figura 5.** Pinos de Ferro Fundido Cinzento Temperados. Diâmetro de 7 mm e comprimento de 140 mm. Os chanfros se encontram a 30 mm das extremidades e neles o diâmetro é de 6 mm



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Os pinos possuem chanfros que atuam como acumuladores de tensão e definirão um ponto de ruptura no pino.

O objetivo da simulação é determinar se um pino de determinado material, com determinada pressão de ar comprimido na cuíca do Quick-Stop será viável para realizar experimentos para um torneamento de determinado material. Logo existe um ponto ótimo para executar o Quick Stop, tendo como parâmetros em variação a tensão de cisalhamento do pino (de seu respectivo material) e a pressão do ar comprimido.

### 3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

O MEF (método dos elementos finitos) é definido como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados.

Para simular o comportamento do pino num ensaio de Quick-Stop, foram realizadas simulações no software Ansys®, como o intuito de buscar uma condição ótima para os ensaios neste equipamento. Esta condição ótima envolve: as forças de corte no torneamento, pressão do ar comprimido atuante e a resistência ao cisalhamento do pino.

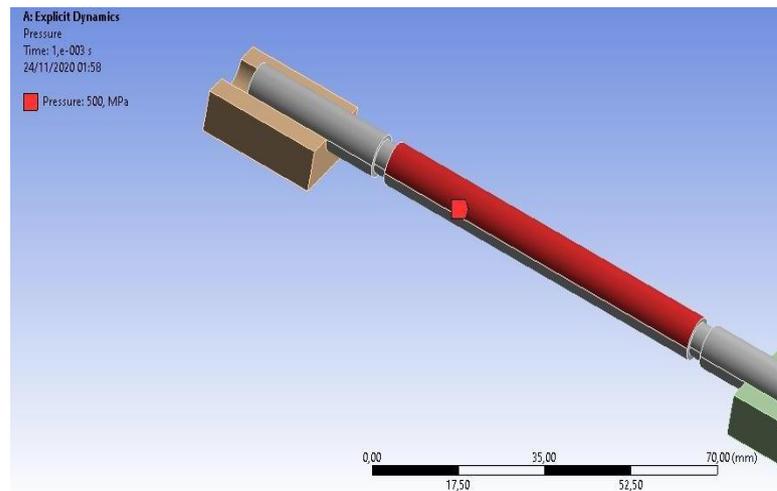
Para simular, é preciso converter tais parâmetros experimentais em forças atuantes diretamente no pino, que correspondem à um ensaio dinâmico. Assim sendo:

- A pressão do ar comprimido, aciona na cuíca uma mola que impulsiona o martelo, que por sua vez pressiona o pino até o rompimento. Logo é possível calcular através do Princípio de d'Alembert o fator dinâmico que o martelo exerce. A força é distribuída na área de contato entre o suporte e o pino (Figura 6).
- A tensão de cisalhamento do pino é o parâmetro de referência no material escolhido (como dito anteriormente, a área da seção transversal é fixa). Os materiais estudados foram aço estrutural e ferro fundido cinzento temperado.
- À priori, apenas essa observação da variação da pressão para uma determinada tensão de cisalhamento do material, já podem definir parâmetros ótimos. Contudo, não haverá variação nas dimensões do chanfro ou do pino em si.
- O refinamento da malha dá maior confiabilidade nos resultados, especialmente o refinamento da malha nas regiões dos chanfros, que é onde ocorre a ruptura (visto na Figura 7).
- As forças de corte que fazem uma exigência de uma resistência mínima para o pino, podem ser definidas por processos de torneamento já conhecidos na literatura em função da ferramenta e do material. Foram consideradas forças de corte com parâmetros de cortes (velocidade, avanço e profundidade) similares para dois materiais diferentes. Neste estudo, as forças de corte analisadas são provenientes do torneamento de Alumínio e de liga de Inconel®718, e são respectivamente matérias de fácil e difícil usinagem.

Estas forças atuam na ferramenta, mas o ponto de contato do pino é a base do suporte. Logo é preciso calcular o momento gerado por essas forças baseada no comprimento do suporte escolhido. Assim, normal e momento das forças de corte pode ser convertidas em tensão atuante no pino.

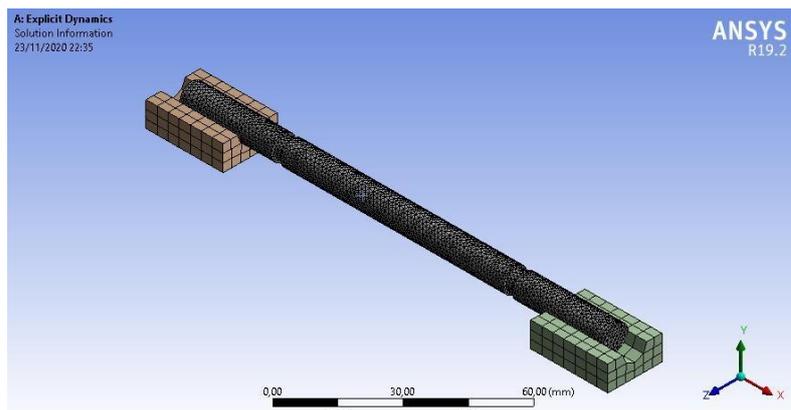
- O modelo de Jhonson Cook é um modelo que define a falha. Ele estabelece que a deformação limite é função exponencial da triaxilidade, que depende de constantes do material. O dano é acumulado linearmente, sendo a razão entre a deformação plástica atual e a de ruptura.

**Figura 6.** Pressão resultante do Quick-Stop no pino



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

**Figura 7.** Malha do pino



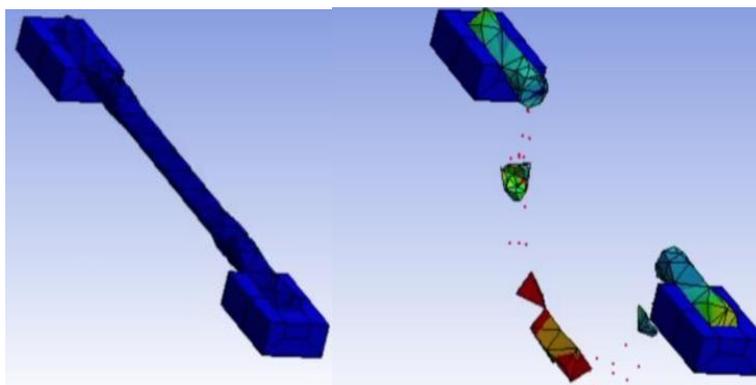
Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Dessa maneira a carga dinâmica gerada sobre o pino tem uma boa representação no modelo computacional, englobando os detalhes anteriormente pontuados.

## 5. RESULTADO E DISCUSSÕES

A primeira simulação foi realizada para estimar o tempo de simulação, pois se tratando de uma simulação dinâmica, o gasto de recurso computacional é alto. A primeira simulação consistiu no pino de aço estrutural, com a malha de 15 mm para a base de apoio do pino e 5 mm para o pino (Figura 8). A pressão resultante aplicada no pino foi de 1000 MPa e a tensão máxima registra foi de 490 MPa. Esta simulação consumiu um tempo de 5 horas em um computador de com processador i3 2,4 Ghz e RAM 4 GB.

**Figura 8.** Rompimento do pino de aço estrutural com malha de baixa resolução

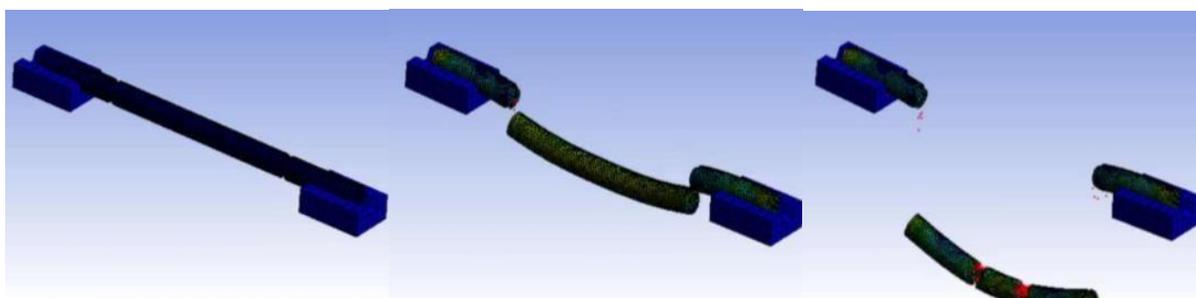


Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Feito o refinamento da malha, novas simulação foram realizadas para o pino de ferro fundido. Começando com uma pressão inicial de 1000 MPa, e reduzindo-a até a mínima capaz de romper o pino, foi definido também uma nova condição ótima para o uso do Quick-Stop, com baixo risco de danificar a ferramenta.

Os resultados para o pino de aço estrutural se estabilizaram numa malha com resolução de 4 mm para a base de apoio do pino e 0,5 mm para o pino (Figura 9). A pressão resultante aplicada no pino foi de 500 MPa e a tensão máxima registra foi de 631 MPa.

**Figura 9.** Rompimento do pino de aço estrutural com malha de alta resolução



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

O Quadro 1 apresenta os resultados da simulação com a pressão mínima de ruptura dos pinos para ambos os pinos com a malha já refinada, tendo células de 0,5mm equivalentes à menor dimensão do chanfro.

**Quadro 1** - Resultados das simulações.

Material do Pino	Aço Estrutural	Ferro Fund. Temp.
Pressão Mínima do Martelo para Romper o Pino	500 MPa	350 MPa
Tensão Máxima no Pino para a Mínima Pressão	631 MPa	495 MPa
Suporta Forças de Corte de Al (114 MPa)	sim	sim
Suporta Forças de Corte de Inconel®718 (430 MPa)	sim	não

Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Notamos que o pino de aço necessita de uma pressão muito alta no ar comprimido do sistema, sendo aproximadamente 7% acima da pressão limite recomendada para o equipamento (470 Mpa). Já o pino de ferro fundido temperado não tem este problema, apesar de romper prematuramente com as forças de corte do torneamento de Inconel®718. Destaca-se que as forças de corte sugeridas no Quadro 1 para Alumínio e Inconel®718 são oriundas de observações práticas realizadas durante testes experimentais de trabalhos paralelos ainda não publicados.

## 6. CONCLUSÕES

O pino de aço estrutural suporta, segundo a simulação, as forças de corte para uma condição abrangente de metais, que vai desde o Alumínio que tem fácil usinabilidade até o Inconel®718 que possui difícil usinabilidade. Porém para rompê-lo é preciso de uma pressão muito alta para acionar o martelo, o qual faz o suporte se chocar no equipamento de forma excessivamente brusca. Observações práticas realizadas durante testes experimentais mostraram que condições de alta pressão podem causar o empenamento do suporte de ferramenta atualmente utilizado no Quick-Stop, devendo trabalhar com uma pressão inferior a 470 Mpa para não danificar o equipamento.

O pino de ferro fundido cinzento temperado por sua vez, mostra-se eficiente para o experimento na usinagem de Alumínio. Mas para Inconel®718, o pino tem grandes chances de se romper durante o torneamento devida as forças de corte, indicando que para este material, o Quick-Stop não deve ser utilizado com este tipo de pino.

Em todas as simulações, a ruptura do pino correu de forma instantânea, e não progressiva, respeitando a condição da velocidade de abaixamento do suporte ser superior à velocidade de corte utilizada durante o torneamento.

Como sugestão para trabalhos futuros, a realização de ensaios com metais de difícil usinabilidade como o Inconel®718, pode ser avaliados pinos de ferro fundidos não temperados, que terão uma resistência ao cisalhamento maior.

## REFERÊNCIAS

BLACK, J. T.; JAMES, C. R. The hammer QSD – Quick stop device for high-speed machining and rubbing. **J. of Eng. for Industry** – Trans. of the ASME. Vol. 103. 1981.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora EdgardBlücher Ltda, São Paulo, 751 p., 1977.

KLOCK, F. AND KÖNIG, W., *Fertigungs verfahren 3: Abtragen, Generieren Laser material bearbeitung*, **VDI-Buch, Springer-Verlag**, Berlin, 389p, 2007.

MACHADO, A. R; SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 2 ed. Uberlândia. Editora Blucher, 384p, 2011.

RAMAN, S.; LONGSTREET, A.; GUHA, D. A fractal view of tool–chip interfacial friction in machining., **Wear**.n. 253, p. 1111–1120, 2002.

SOUSA, M.N. **Influência das Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio na Usinabilidade – Foco no Grau de Recalque, na Dimensão da Zona de Fluxo e na Microdureza dos Cavacos**. 2013. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

VORM, T. Development of a quick-stop device and an analysis of the “frozen-chip” technique. **Int. J. Mach. Tool Des. Res.**, Vol. 16, pp 241-250. Pergamon Press 1976.