

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Rafael Nascimento e Silva

Otimização do Pino-Fusível de um Equipamento de *Quick-Stop* para Torneamento

Uberlândia
2023

RAFAEL NASCIMENTO E SILVA

Otimização do Pino-Fusível de um Equipamento de *Quick-Stop* para Torneamento.

Trabalho de Conclusão de Curso ou
Dissertação ou Tese apresentado à Faculdade
de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Usinagem

Orientador: Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586
2023 Silva, Rafael Nascimento e, 1998-
Otimização do Pino-Fusível de um Equipamento de Quick-
Stop para Torneamento [recurso eletrônico] / Rafael
Nascimento e Silva. - 2023.

Orientador: Leonardo Rosa Ribeiro da Silva Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Leonardo Rosa
Ribeiro da Silva, 1991-, (Orient.). II. Universidade
Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica.
III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

RAFAEL NASCIMENTO E SILVA

Otimização do Pino-Fusível de um Equipamento de *Quick-Stop* para Torneamento

Trabalho de Conclusão de Curso ou
Dissertação ou Tese apresentado à Faculdade
de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Usinagem

Uberlândia, 05/12/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva – Professor Adjunto (FEMEC - UFU)

Prof. Dr. Luciano José Arantes – Professor Associado I (FEMEC - UFU)

M.Sc. Felipe Chagas Rodrigues de Souza – (FEMEC-UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir que meus objetivos fossem alcançados durante todo o período de faculdade, que foi repleto de momentos marcantes, mas principalmente por ter superado o período que pandemia.

Agradeço aos meus pais por me incentivarem em momentos difíceis, por me cobrarem e sempre me apoiarem por toda a jornada da graduação e de vida.

Agradeço também, aos amigos, que estiveram ao meu lado e me deram suporte.

Agradeço ao meu orientador Leonardo por me guiar na elaboração do presente trabalho e aos colegas de laboratório por me ajudarem e proporcionarem grandes aprendizados.

RESUMO

O processo de usinagem consiste na remoção de material de uma peça para que forma, dimensões e/ou acabamento superficial sejam atingidos. Com o avanço das tecnologias e a criação de máquinas mais eficientes, a manufatura de peças e componentes mais precisos necessita de maior tecnologia na usinagem e o estudo de cada parte que constitui esse processo. Um dos problemas enfrentados nesse processo é a dificuldade de obter o cavaco nas mesmas condições que ele apresenta quando está sendo retirado da peça, o que prejudica na obtenção de dados precisos e na melhoria do processo. Para solucionar esse problema, o mecanismo de *Quick-Stop* é utilizado. Esse mecanismo possibilita que haja um encurtamento do tempo entre a parada do processo de corte e a retirada do cavaco, uma parada brusca, de modo que o cavaco retirado se mantenha em condições muito próximas ao cavaco durante o corte, sem que seja alterada a estrutura e os outros parâmetros. O mecanismo de *Quick-Stop* utiliza um acionador, que pode ser de diversos tipos, como ação explosiva de uma espoleta disposta em uma arma de fogo, pneumático e martelo de impacto. O pino fusível é utilizado para garantir que o *Quick-Stop* seja realizado de forma correta. As condições impostas para o pino fusível devem ser próximas das ideais para garantir que o *Quick-Stop* seja realizado de forma correta. O pino deve ser forte o suficiente para suportar as forças do processo de corte mas frágil o bastante para sofrer quebra no impacto da ferramenta de *Quick-Stop*, e a concentração de tensão gerada por sua geometria é um problema a ser resolvido. Assim, o estudo de material, diâmetro, comprimento, dureza, tratamento térmico e outros parâmetros deve convergir para atingir condições perfeitas. O presente trabalho avaliou condições específicas de tamanho de chanfro para os pinos em busca da geometria mais adequada para o processo que gere concentração de tensão suficiente para aguentar as forças de corte e quebrar no impacto da ferramenta, além da influência de tratamento térmico para o mesmo. Foi utilizado o *software* SOLIDWORKS® para a confecção do modelo do equipamento de *Quick-Stop* junto ao *software* ANSYS® para a realização da simulação computacional das condições de trabalho para cada caso avaliado. A condição do pino otimizada foi a de chanfro com 1mm de profundidade e foi determinado que a realização de têmpera com resfriamento em água apresentou melhoria do processo.

Palavras-chave: usinagem; cavaco; *Quick-Stop*; processo de corte; torneamento;

ABSTRACT

The machining process consists of removing material from a workpiece to achieve the desired shape, dimensions, and/or surface finish. With the advancement of technologies and the creation of more efficient machines, the manufacture of more precise parts and components requires greater technology in machining and the study of each part that constitutes this process. One of the problems faced in this process is the difficulty of obtaining the chip in the same conditions as it presents when it is being removed from the workpiece, which impairs obtaining precise data and improving the process. To solve this problem, the *Quick-Stop* mechanism is used. This mechanism enables a shortening of the time between the cutting process stop and the chip removal, an abrupt stop, so that the removed chip remains in very close conditions to the chip during cutting, without altering the structure and other parameters. The *Quick-Stop* mechanism uses an actuator, which can be of various types, such as the explosive action of a detonator arranged in a firearm, pneumatic, and impact hammer. The fuse pin is used to ensure that the *Quick-Stop* is carried out correctly. The conditions imposed on the fuse pin must be close to ideal to ensure that the *Quick-Stop* is carried out correctly. The pin must be strong enough to withstand the forces of the cutting process but fragile enough to break upon impact with the *Quick-Stop* tool, and the stress concentration generated by its geometry is a problem to be solved. Therefore, the study of material, diameter, length, hardness, heat treatment and other parameters must converge to achieve perfect conditions. This work evaluated specific chamfer size conditions for the pins in search of the most suitable geometry for the process that generates sufficient stress concentration to withstand the cutting forces and break upon tool impact, in addition to the influence of heat treatment on the same. SOLIDWORKS® software was used to create the model of the *Quick-Stop* equipment together with ANSYS® software to carry out a computer simulation of the working conditions for each case evaluated. The optimized pin condition was a 1mm deep chamfer and it was determined that quenching with water cooling improved the process.

Keywords: Machining; Chip; *Quick-Stop*; Cutting process; Turning.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivo Específico	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Usinagem e Torneamento.....	15
2.2	Cavaco.....	18
2.2.1	Interface Feramenta/cavaco.....	27
2.3	<i>Quick-Stop</i>	31
2.4	ANSYS®	33
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Equipamentos e Insumos	35
3.1.1	Software SOLIDWORKS®	35
3.1.2	Software ANSYS®.....	35
3.2	O Quick Stop.....	35
3.3	Cálculo da energia cinética	Erro! Indicador não definido.
3.4	Pinos	36
3.5	Simulação ANSYS®	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	Desenho feito	45
4.2	Pinos	49
4.3	Simulação.....	49
4.4	Têmpera dos pinos.....	57
5	CONCLUSÕES.....	61

1 INTRODUÇÃO

Desde o fim do período neolítico há cerca de 5 mil anos, a humanidade congregou suas tecnologias de forma a permitir a substituição do uso de madeira e pedras por finalmente a capacidade da utilização de metais para confecção de mecanismos cada vez mais complexos, e assim a forma dos componentes também se tornou mais complexa, necessitando métodos de fabricação mais avançados. A partir da Revolução Industrial, surgiram novos materiais que impulsionaram o desenvolvimento de aços-liga para confecção de ferramentas de corte (Rocha et al, 2015) e possibilitaram a evolução dos processos de corte.

O processo mecânico de transformação de uma peça bruta em uma peça com uso determinado é conhecido como usinagem, e isso representa a maior parte da produção dos componentes utilizados industrialmente (Walker, 1996). Esse processo consiste na remoção de material de uma peça para que forma, dimensões e/ou acabamento superficial sejam atingidos. Com esses parâmetros sendo atingidos e padronizados, a vida útil de peças e equipamentos aumentou consideravelmente, visto que foram diminuídas falhas de fabricação e erros por peças com acabamento mal feito, e o corte nos gastos de manutenção e troca de peças ruins possibilitou investimento no crescimento e desenvolvimento do setor industrial.

Com o avanço de tecnologias e a criação de máquinas mais eficientes, a manufatura de peças e componentes mais precisos necessita de maior tecnologia na usinagem e o estudo de cada parte que constitui esse processo visto que 10% da produção total de metais se torna cavaco através dos processos de usinagem (Trent e Wright, 2000).

O ponto em comum entre todos os processos de usinagem e um dos mais importantes componentes do processo é o cavaco (Trent e Wright, 2000), que é o material que é removido da peça e apresenta características diferentes para cada processo. As características que o cavaco apresenta determinam o acabamento da superfície e a qualidade do processo, e a partir dele é possível obter diferentes relações entre parâmetros de usinagem como velocidade de corte e avanço em relação ao resultado final do processo. O estudo do cavaco é extremamente importante para o processo de usinagem e por isso deve ser feito em busca de maior eficiência para o processo.

Um dos empecilhos no estudo do cavaco é a dificuldade de obter o cavaco nas mesmas condições que ele apresenta quando está sendo retirado da peça (MHAMDI, 2022), quando está sendo realizado o corte, pois ao parar a ferramenta de corte, a temperatura muda, as forças mudam e todos os parâmetros são alterados, de modo que, o cavaco já retirado não é mais correspondente ao cavaco durante o processo. Isso complica o estudo pois a partir desse novo

cavaco com as características após o corte são estimados os parâmetros durante o corte e, mesmo com o avanço dos métodos de cálculo, isso gera erros visto que os valores obtidos são estimativas e não os valores reais, o que prejudica na obtenção de dados precisos e na melhoria do processo.

A solução proposta para resolver esse problema é a utilização de mecanismo de *Quick-Stop* (MHAMDI, 2022), que como a tradução do inglês sugere é “parada rápida”. Esse tipo de mecanismo possibilita que haja um encurtamento do tempo entre a parada do processo de corte e a retirada do cavaco, uma parada brusca, de modo que o cavaco retirado se mantenha em condições muito próximas ao cavaco durante o corte, sem que seja alterada a estrutura e os outros parâmetros.

O mecanismo de *Quick-Stop* utiliza um acionador, que pode ser de diversos tipos, entre eles ação explosiva de uma espoleta disposta em uma arma de fogo (Silva et al., 2011), pneumático e martelo de impacto (Luiz, 2007), martelo de pêndulo (MHAMDI, 2022), explosivos (Brown, 1976), entre outros. O porta-ferramenta é posicionado sobre um pino fusível e uma massa de amortecimento. Quando o acionador gera a força sobre o porta ferramenta, o pino fusível é quebrado e assim o movimento brusco ocorre, preservando o cavaco na sua forma sem alterações. O pino fusível deve ser fabricado em condições específicas que para que não gere erros no processo, ele deve ser forte o suficiente para que suporte as forças de corte durante o processo de usinagem sem se romper precocemente, e ao mesmo tempo, frágil o suficiente para se romper ao receber a força gerada pelo mecanismo de acionamento e não suportar essa força tempo demais para que não carregue esse esforço para o restante do sistema podendo danificar a ferramenta de corte e demais componentes.

As condições impostas para o pino fusível devem ser próximas das ideais para garantir que o *Quick-Stop* seja realizado de forma correta. Assim, o estudo de material, diâmetro, comprimento, dureza, tratamento térmico e outros parâmetros deve convergir para atingir condições perfeitas (Trent e Wright, 2000). A obtenção de todos critérios do pino é obtida através de experimentos. O método experimental ao ser realizado para a obtenção do modelo é extremamente complexo e trabalhoso. O tratamento térmico, por exemplo, é algo que demora tempo e controle de temperatura, ou seja, um processo complexo para ser repetido diversas vezes, e junto com cada condição como diâmetro e material, torna o método experimental de tentativa e erro inviável para a obtenção das condições ideais.

A solução para esse problema é a utilização de softwares para a simulação do experimento pois neles é possível obter um leque de condições amplo utilizando o processamento computacional para obter resultados e assim economizar tempo (STOLARSKI

et al, 2018). Por meio de simulação é possível testar todos os parâmetros necessários e diminuir o tempo de obtenção das condições. A utilização de softwares como ANSYS®, que podem realizar o estudo de forças e esforços em um modelo e obter todas as implicações resultantes, é de extrema importância para pesquisas pela possibilidade de simular as condições reais sem necessitar do esforço e tempo gasto no método experimental. O método de obtenção das condições do pino fusível é a utilização conjunta do método experimental e do método computacional, visto que a simulação em software será utilizada para obter os parâmetros iniciais e os ensaios de impacto serão o teste para provar as condições estabelecidas previamente.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é realizar simulação via software ANSYS® para estimar forças de impacto geradas sobre o pino fusível pelo mecanismo acionador na realização do processo de *Quick-Stop* durante procedimento de usinagem e, então, realizar ensaios de impacto para avaliar a veracidade dos resultados obtidos via simulação e testar se o pino fusível realmente suporta as condições de trabalho, comprovando o estudo feito.

1.2 Objetivo Específico

Os objetivos deste trabalho incluem:

-Desenhar em Cad o equipamento como etapa na simulação. Foi reito um desenho em SOLIDWORKS® do mecanismo de QuickStop utilizando todas as medidas e parâmetros do equipamento real para que seja utilizado durante o estudo de forças e sejam obtidas as condições ideais do pino fusível a ser fabricado e testado.

-Realizar tratamento térmico dos pinos para fragilizar as peças utilizando um forno e obter o níveis de dureza e fragilidade necessários para o processo.

-Realizar ensaios de impacto para testar as condições do pino fusível e validar o estudo feito via simulação em software ANSYS®.

-Realizar estudo de comparação entre os dados obtidos via simulação e via método experimental e retirar conclusões que validem o estudo e possam melhorar futuros estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente trabalho os pinos foram avaliados de acordo com o tamanho do chanfro. O tamanho do chanfro dos pinos de Quickstop pode variar de acordo com a aplicação, sendo que um chanfro maior pode fornecer mais estabilidade e segurança para a peça a ser usinada. No entanto, um chanfro muito grande pode afetar a precisão da fixação, especialmente em peças pequenas. A variação do tamanho do chanfro foi escolhida visto que é possível alterar essa medida para cada tipo de material que está à disposição, possibilitando o uso de materiais além dos mais comuns da indústria. Os materiais mais comuns para pinos de Quickstop são o aço temperado e o carbeto de tungstênio, como mencionado anteriormente.

O método de simulação via elementos finitos foi utilizado para dimensionar o tamanho de chanfro ideal de acordo com o material utilizado no estudo, e foi obtido um tamanho ideal que suporta as forças de usinagem necessárias no processo mas também sofre ruptura no momento desejado sem danificar os outros componentes da ferramenta. Além do estudo sobre a geometria, foi realizado um estudo de otimização levando em consideração tratamento térmico dos pinos, no caso têmpera, para avaliar a melhoria das propriedades do material do pino.

2.1 Usinagem e Torneamento

A usinagem segundo Trent (2000) é um termo que inclui operações nas quais uma fina camada de metal (cavaco ou limalhas) é removido por uma ferramenta em forma de cunha de um corpo maior, ou seja, é o processo que transforma um material em um produto com as qualidades necessárias, dando ao material forma, dimensões e acabamentos desejados e como resultado do processo produz cavaco, que é o resíduo gerado pela remoção de material da peça.

Esse processo passou por diversas evoluções para chegar em como é hoje, estando presente nos primórdios da engenharia, desde quando o ser humano começou a criar construções. O principal material utilizado para confecção de peças na engenharia era a madeira (Trent, 2000). Com a Revolução Industrial surgiram novos materiais e processos de fabricação que ajudaram a mudar completamente o material utilizado na indústria.

A fabricação de máquinas a vapor era principalmente feita utilizando ferro fundido, latão e bronze e as ferramentas de corte para esses materiais era de aço-carbono temperado da época. Com o passar das décadas os processos foram aprimorados e surgiram os primórdios dos processos que hoje em dia são conhecidos. Em 1774 surgiu a primeira mandriladora, criada por John Wilkinson, em seguida, Henry Maudslay criou o primeiro torno com avanço automático

em 1797. E logo após, em 1860, foi criada a primeira retificadora. Em 1962 foi desenvolvida a primeira fresadora universal, criada por J.R. Brown.

No século XX, o avanço no estudo de materiais trouxe uma melhora considerável na durabilidade e qualidade, e conseqüente aumento na dificuldade de produção de tais, sendo necessária a melhoria dos processos de usinagem. A utilização de novos materiais para as ferramentas possibilitou melhorias nos processos, como aço rápido e carboneto de tungstênio.

O avanço na tecnologia trouxe novas máquinas automáticas e posteriormente máquinas comandadas por código numérico. E em 1940 processos não convencionais ganharam espaço na usinagem pela melhoria de produção de geometrias complexas com qualidade elevada quando comparados aos processos convencionais (Kalpakjian,1995).

Os processos sofreram grandes avanços e atualmente há diversas áreas dentro da usinagem, cada uma sendo tendo propriedades específicas e servindo para fabricar diversos tipos de geometria e materiais diferentes. A escolha do método de usinagem para cada situação depende de diversos fatores e o produto final é resultado de diversos processos diferentes. Na escolha de processos (Kalpakjian,1995) devem ser considerados os seguintes fatores:

- Tipo do Material e suas propriedades.
- Propriedades finais desejadas.
- Tamanho, forma e complexidade do componente.
- Tolerâncias e acabamento superficial exigidos.
- Processo subsequente envolvido.
- Projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz.
- Sucata gerada e seu valor.
- Disponibilidade do equipamento e experiências operacionais.
- Tempo de espera necessário para iniciar a produção.
- Número de partes requeridas e taxa de produção desejada.
- Custo total do processamento

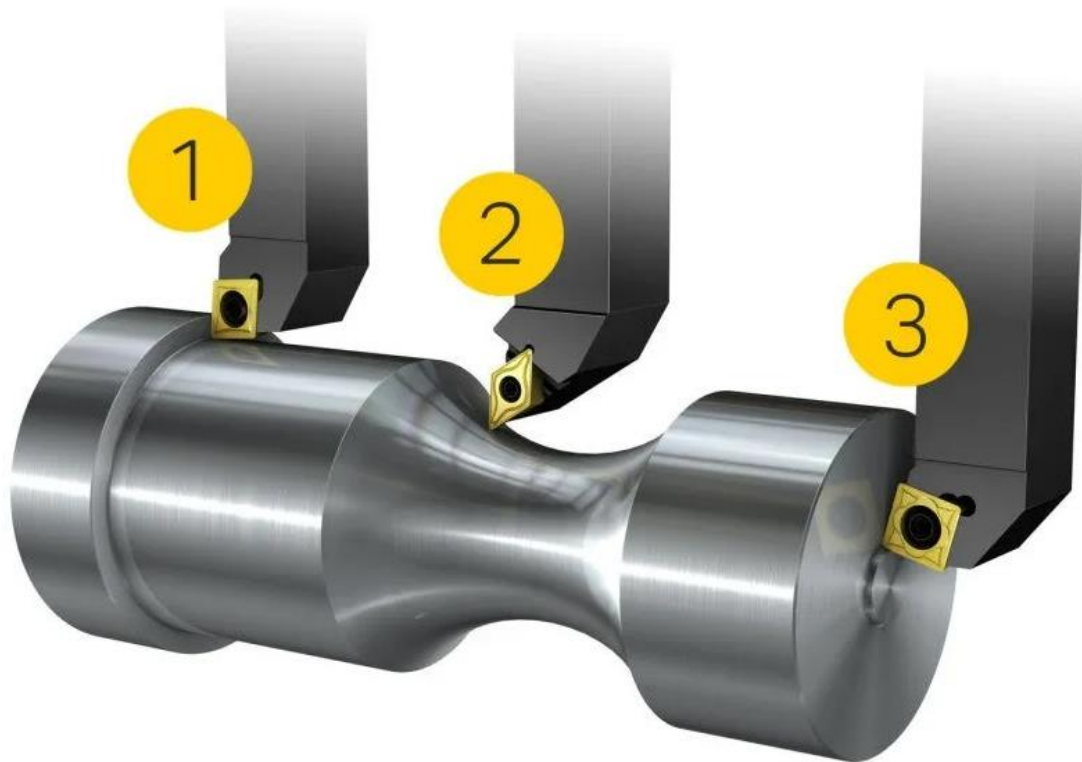
Com tamanho leque de possibilidades, é notável que na fabricação de produtos que sejam de um grampeador ou um avião, há a necessidade da utilização de diversos processos para que os materiais sejam fabricados com as determinadas qualidades requeridas e quanto maior e mais complexo o produto a ser fabricado, maior será a necessidade de utilização dos diversos processos de usinagem.

Os processos de usinagem podem ser classificados em convencional e não-convencional (Trent, 2000). A usinagem convencional é a mais comum, em que consiste na remoção de metal em excesso por meio de cisalhamento utilizando uma ferramenta de corte com formato de cunha

e assim obter as características necessárias. Já a usinagem não convencional é caracterizada pela utilização de máquina controlada por computadores para automatizar o processo, sendo mais moderna e podendo atingir características inviáveis para a usinagem convencional. Dentro dos processos da usinagem convencional estão inclusos o torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento, refiticação, entre outros. Dentro dos processos de usinagem não-convencional estão inclusos jato de água, jato abrasivo, fluxo abrasivo, ultrassom, eletroquímica, eletroerosão, feixe de elétrons, laser, plasma, química, fotoquímica, entre outros.

Um dos principais processos de usinagem é o torneamento (Figura 1), que é o processo mecânico destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (Ferrarezi, 1977). Ou seja, consiste na fusão de dois elementos, a rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta. A peça gira em torno do próprio eixo e a ferramenta de corte se movimenta nas direções longitudinal e/ou transversal, gerando superfícies cilíndricas, cônicas ou curvas.

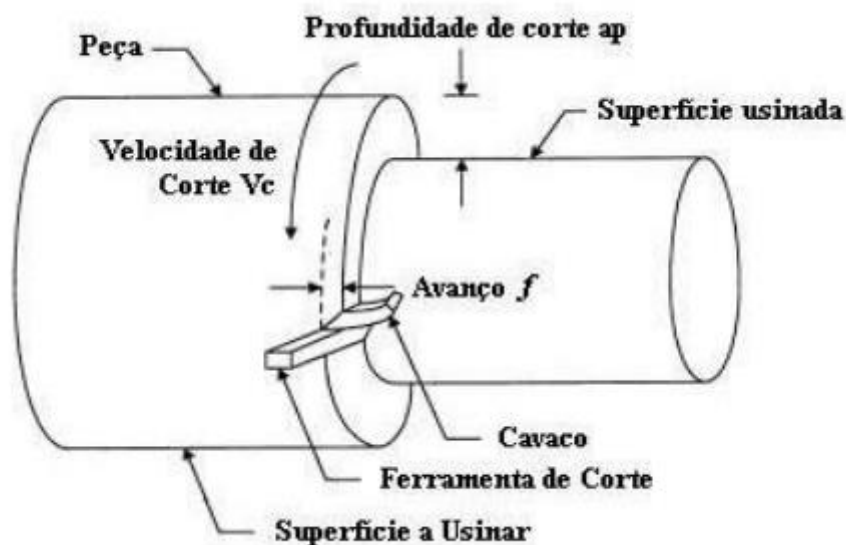
Figura 1: Torneamento externo



Fonte: Sandvik Coromant do Brasil S.A

Nesse processo, a geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte ditam o resultado do processo, independente do material da peça ou ferramenta utilizada. Os parâmetros utilizados são a velocidade de corte (V_c), que representa a taxa em que a superfície da peça se move na direção da ponta de corte da ferramenta (m/min), o avanço (f), que é a medida do caminho percorrido pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p), que é a medida de penetração da ferramenta perpendicular ao plano de corte. Tais parâmetros de corte são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Parametros de corte e superficies em tornamento cilíndrico externo



Fonte: Borges (2020)

2.2 Cavaco

O cavaco em usinagem é o nome dado aos resíduos gerados durante o processo em que a ferramenta de corte remove o excesso de metal da peça por meio de um cisalhamento em um plano que vai da aresta da ferramenta até a posição onde a parte superior da superfície do cavaco perde contato com a superfície de trabalho (Figura 3). Nessa região, é gerada uma tensão de grande proporção em um curto período de tempo que nem todo material suporta sem sofrer fratura, o que gera o desprendimento do cavaco da superfície do material. A resistência do material à fratura, sua ductibilidade e a velocidade de corte determinam a forma do cavaco. Materiais mais frágeis geram cavacos fragmentados. Com o aumento da ductibilidade o cavaco pode ser segmentado e até contínuo. Cavacos contínuos podem se aglomerar de diversas formas

como em formato de hélice, reto ou embaçado dependendo das condições de operação ou por exemplo de técnicas empregadas como a adoção de uma ferramenta de corte com ranhuras para forçar o enrolamento do cavaco em uma hélice. Cabe à tecnologia empregada no projeto da ferramenta determinar as condições para que um cavaco ideal para o processo seja gerado pois cada tipo de cavaco apresenta suas propriedades, sendo o cavaco descontínuo por exemplo uma forma que tem elevada praticidade de ser removida da superfície durante o corte, não necessitando de interrupção do processo como em casos de cavaco contínuo em que a grande quantidade de material retirada que é acumulada na região de corte pode interferir no mecanismo de corte.

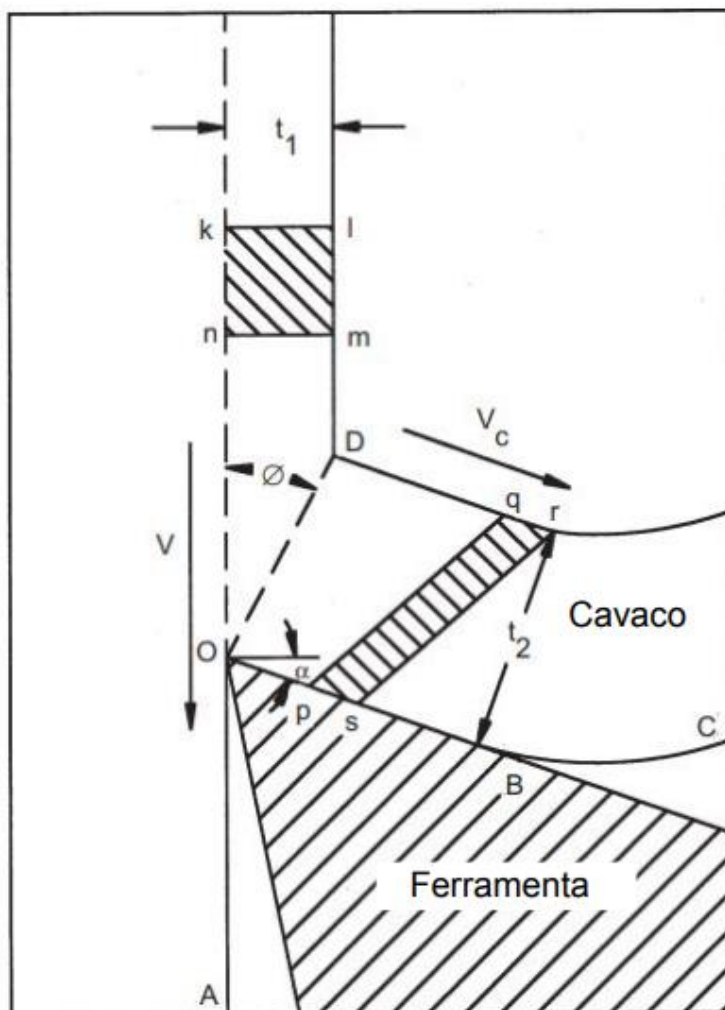
Há vários tipos de cavaco com diversas variações em forma e tamanho, mas no geral são basicamente lascas de metais. O tipo e forma do cavaco são parâmetros importantes para o processo de usinagem pois a partir do estudo desse material podem-se obter informações sobre a interface ferramenta de corte/peça e sobre o procedimento de corte. O acabamento da peça é ligado diretamente ao tipo de cavaco gerado. Portanto o estudo do cavaco é de extrema importância para a evolução e melhoria dos processos de usinagem.

Na evolução da pesquisa científica sobre o cavaco, sua formação e propriedades, foram propostos modelos com simplificações sobre as características do processo para possibilitar o estudo de diversas condições diferentes. Um exemplo é o corte ortogonal, que consiste na utilização de uma aresta reta, que é posicionada normal à direção de corte e à direção do avanço, garantindo, assim, que a formação do cavaco seja bidimensional e ocorra no plano de trabalho (normal à aresta cortante). Mesmo com a utilização do corte ortogonal, o cavaco formado não é perfeitamente retangular, pois a ferramenta limita apenas uma direção de movimento, e a largura do cavaco tende a ser levemente maior que a profundidade de corte devido ao movimento de material gerado no corte. Assim, para garantir que o modelo seja utilizado em outras operações de usinagem são necessárias as seguintes simplificações: Cavacos contínuos, sem aresta postiça de corte (APC); superfície de folga da ferramenta e a usinada não realizam contato; espessuras de corte desprezível em relação à largura de corte; largura de corte e largura do cavaco são equivalentes; aresta de corte afiada e perpendicular ao plano de trabalho. Dessa maneira é possível realizar o estudo matemático de atividades de corte utilizando um modelo simplificado como mostrado na Figura 3.

São necessários vários métodos para a abordagem correta nas pesquisas sobre o cavaco pois é um processo que envolve altas velocidades de corte e pequenas escalas de visualização das estruturas que são modificadas. Diversas técnicas de fotografia já foram utilizadas para tentar captar o momento de desprendimento de material da peça durante a realização do corte,

mas mesmo que sejam consideradas válidas para determinados campos de trabalho, ainda possuem limitações de qualidade de informação obtida com base nas condições de trabalho como a velocidade de corte e o estudo da formação do cavaco no ponto final, ou seja, após o corte ser parado, não condiz com as condições reais do processo de formação, o que gera maior propagação de erro. Para a resolução desse problema, é necessária a interrupção do corte de maneira repentina, para que as condições que ocorrem durante a atividade se mantenham ao máximo e os erros de aproximação sejam minimizados. Para isso foram criados os mecanismos de *Quick-Stop*, que mantêm o ponto de estudo do corte o mais próximo do momento de corte a partir da utilização de aparatos de acionamento que forcem o sistema a parar bruscamente mas mesmo assim podem gerar erros, então são utilizadas diversas amostras para que seja feito o estudo das características comuns entre elas e sejam obtidas as características do instante que o processo de corte do material foi cessado.

Figura 3 – Diagrama de corte de metal (adaptado de Trent)



Fonte: adaptado de Trent (2000, p. 22)

Figura 4 – Formas de cavaco



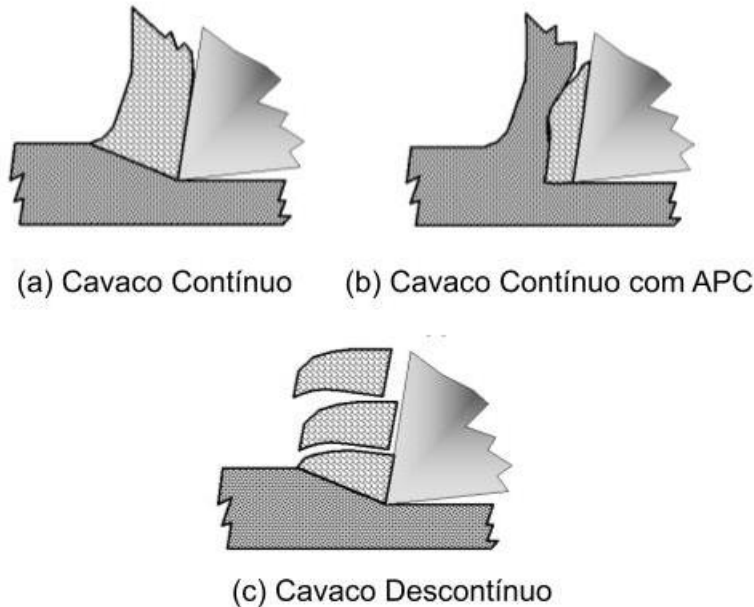
Fonte: Trent (2000, p. 23)

No processo de usinagem, uma nova superfície é criada na peça de trabalho removendo o material na forma de cavacos, que pode assumir diversas características como mostrado na Figuras 4 e 5. Em questão de forma, o chip pode ser contínuo, descontínuo e segmentado, mas em abordagens mais específicas é acrescentada à classificação o tipo “parcialmente contínuo”. Cavacos contínuos geralmente são gerados ao usinar materiais dúcteis, enquanto descontínuos são gerados como resultado da formação fluxos de material que se estilhaçam durante o trabalho de corte em materiais frágeis. Há vários pontos positivos na produção de cavacos curtos, por exemplo a segurança da atividade e a não interferência do material descartado no procedimento de corte. Assim como na usinagem de bronze e ferro fundido, a quebra de cavacos pode ocorrer automaticamente durante sua formação, ou pode ser obtida por meio da utilização de um quebra-cavacos. O cavaco contínuo, parcialmente contínuo e descontínuo dependem da ductilidade do material para serem formados, já o segmentado é comumente formado ao usinar materiais com condutividade térmica ruim e ocorrem quando há cisalhamento adiabático ou catastrófico.

A usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre, produz cavacos contínuos. Nesse evento, o material é cisalhado na zona de cisalhamento primária com demasiadas distorções e permanece homogêneo sem que haja fragmentação. Embora não haja

evidências nítidas de quebra ou rhadura na forma das bandas externas, esses fenômenos ocorrem devido à formação de novas superfícies.

Figura 5 – Tipos de cavaco segundo classificação mais simples



Fonte: adaptado de Coelho et al. (2018)

As condições de atrito na área de interação cavaco/ferramenta e o ângulo de cisalhamento são fatores determinantes para as propriedades do cavaco pois influenciam diretamente à tensão normal no plano de cisalhamento. Quando o cavaco é formado continuamente, há um balanceamento entre tensão normal e a tensão de cisalhamento, de modo que a fenda que ocorre no momento da falha não se espalhe muito e o cavaco não quebre rapidamente. Ambos fatores dependem das condições de atrito no campo de interação cavaco/ferramenta, ou seja, o que gera a tensão de cisalhamento que forma a trinca é delimitação de movimento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta, de modo a tensão cresce com o aumento dessa limitação. A tensão de compressão é criada da mesma maneira e é ela que é capaz de impedir o alargamento da ruptura.

Há maneiras de diminuir as tensões normal e de cisalhamento a partir do aumento da capacidade de movimento do cavaco na zona secundária de cisalhamento para ajudar na propagação da trinca como a adição de chumbo e enxofre aos aços. Tais elementos também geram lubrificação na interface cavaco/ferramenta e fragilizam o material, diminuindo a tensão essencial para o surgimento da trinca. Mas mesmo com essas técnicas, a rigidez da ferramenta,

a geometria da aresta e o ângulo de saída ainda são fatores determinantes no tipo de cavaco formado.

De todo modo, os cavacos contínuos são os menos desejados já que o acúmulo de material resultante do corte pode, além de danificar os componentes de corte do processo, ainda gerar acidentes. Se no procedimento realizado for identificado que será gerado cavaco contínuo, é necessário a utilização de um quebra-cavacos para realizar a fragmentação do mesmo.

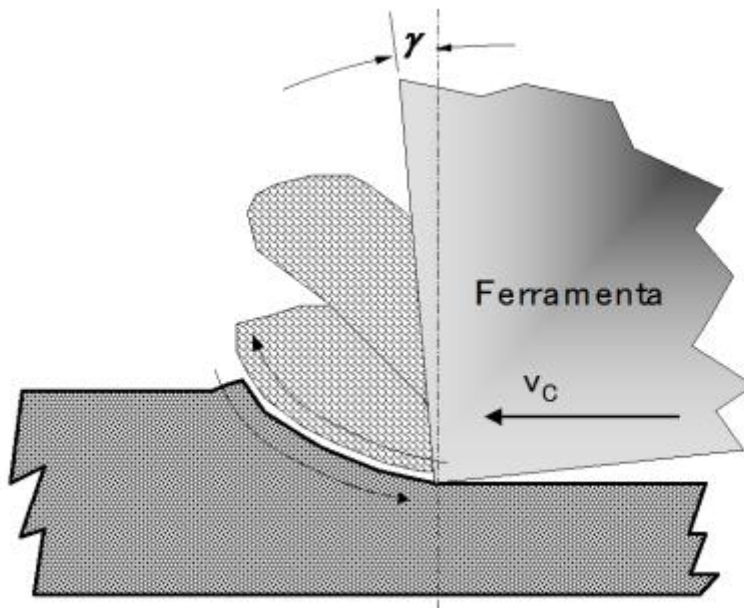
Com características que se encontram entre cavacos contínuos e descontínuos, o cavaco parcialmente contínuo se caracteriza pela propagação parcial da trinca ao longo do plano de cisalhamento. O espalhamento da trinca é impedido devido à presença de altas tensões compressivas nas superfícies cisalhadas e da perda de contato na interface cavaco/ferramenta gerada pelo acúmulo de energia elástica insuficiente para a propagação da trinca por todo o plano de cisalhamento.

Na usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferro fundido cinzento, o tipo de cavaco que predomina é o descontínuo, já que devido à fragilidade, não suportam altas tensões de deformação e sofrem ruptura. Esse tipo de cavaco também pode ser resultante de processos de corte em materiais de ductilidade baixa caso sejam utilizados baixas velocidades de corte em conjunto com pequeno ângulo de saída e grandes avanços. Nessa condição é importante a manutenção de baixas velocidades por com o aumento da velocidade, mais calor é produzido, o que resulta no aumento da ductilidade do material e diminui a entrada de impurezas, na interface de corte, que diminuem a tensão no plano de cisalhamento, o que leva o cavaco a ser contínuo. O cavaco descontínuo é formado pelo aumento da relação entre força tangencial, que no início do processo é melhor que a força necessária para desprender o cavaco da superfície, e normal, que gera a separação do cavaco da zona de material estático, assim a trinca é propagada por todo o plano de cisalhamento e gera a partição do cavaco.

O último tipo de cavaco a ser abordado é o cavaco segmentado. Esse tipo se diferencia por grandes deformações seguidas por bandas estreitas entre as seções com mínimas deformações internas. A geração do cavaco segmentado é resultante do incremento de temperatura, gerado pelas deformações plásticas locais nas bandas de cisalhamento, que promove a redução da resistência mecânica do material. Essa diminuição de resistência iguala ou supera o adicional de resistência mecânica resultante do endurecimento a frio do material. Esse fenômeno está ligado à materiais como o titânio e suas ligas devido à sua baixa condutividade térmica. A formação desse tipo de cavaco envolve mecanismos muito diferentes da formação do cavaco contínuo, visto que o cisalhamento que inicia a formação do cavaco começa em um plano de cisalhamento específico, no momento em que as tensões geradas pela

movimentação da ferramenta na direção da peça ultrapassam o limite de escoamento do material da peça. Calor é originado da conversão da energia de deformação e por conseguinte há o aumento de temperatura em vista das pobres propriedades térmicas do material, não somente um grande incremento de temperatura, mas em forma concentrada, resultando na redução de resistência de material em uma área específica e num plano de deslizamento. Na continuação do processo, o plano de cisalhamento sofre uma rotação e se distancia da ponta da ferramenta, se movimentando sobre a superfície de saída. Essa mudança se mantém até que o aumento da força, provocada pela rotação, exceda a força necessária para deformar um material a temperatura menor, em outro plano mais favorável (MACHADO et al. 2015). Esse fenômeno é chamado de “cisalhamento adiabático” e resulta na formação de cavacos com formato de dentes de serra.




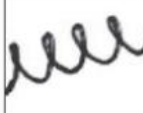














Figura 6 – Cavaco Segmentado



Fonte: Coelho et al. (2018)

Se tratando da forma, o cavaco pode assumir as seguintes configurações: fitas, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços. Além disso, algumas classificações específicas foram determinadas pela norma ISO 3685 (Figura 6).

Figura 7 – Classificação do formato de cavaco de acordo com a ISO 3685:2017

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

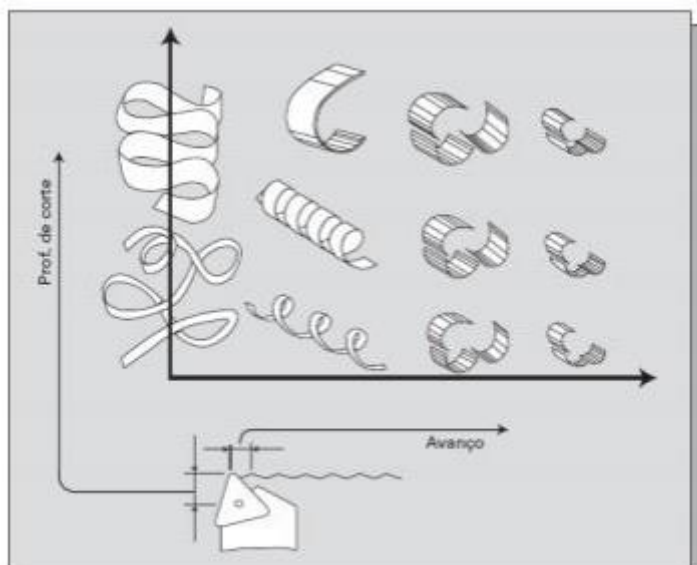
Fonte: ABNT NBR ISO 3685:2017

Cavacos contínuos, parcialmente contínuos e segmentados podem ser criados nas formas apresentadas na Figura 7, podendo uma operação gerar um cavaco contínuo em fita por exemplo de acordo com as características do corte e do quebra-cavacos utilizados. Já cavacos descontínuos apresentam lascas ou pedaços como forma de apresentação.

Dentre todas as variáveis presentes na operação de corte do metal, o material da peça é o que predomina na questão da influencia sobre a forma e o tipo do cavaco, porém outros parâmetros também exercem demasiada influencia sobre tais fatores. O incremento da velocidade de corte, diminuição no avanço ou acréscimo no ângulo de saída induzem a formação de cavacos em fitas contínuas.

Os parâmetros de corte que mais influenciam a forma do cavaco são o avanço e a profundidade de corte, sendo o avanço predominante como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Influência das condições de corte no perfil do cavaco



Fonte: Machado et al., 2009.

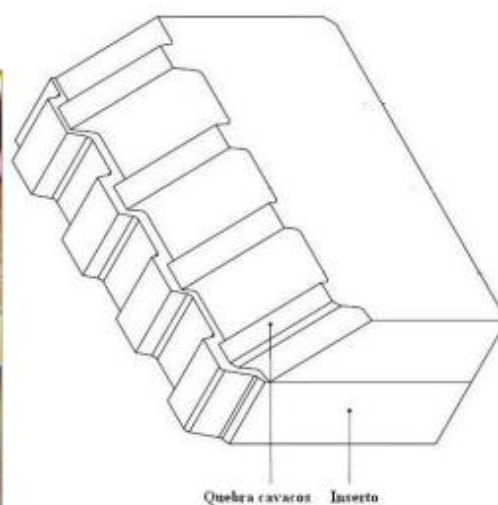
Cada forma de cavaco tem sua vantagem de uso, sendo específica de cada processo, porém em relação à facilidade de manuseio e segurança, os cavacos longos são os mais indesejados pois podem causar acidentes e prejudicar a produtividade das operações já que necessitam de demasiado cuidado e manuseio especial. O cavaco em fita ocupa muito espaço, é de difícil transporte e seu acúmulo na interface da ferramenta pode causar acidentes. O cavaco em lascas é desejado quando há limitação de espaço no processo ou será realizada remoção do mesmo via utilização de fluido refrigerante. Dentre todos os tipos o mais desejado é o helicoidal devido ao fácil manuseio e remoção.

Processos que geram cavacos longos estão sujeitos a diversos problemas durante a operação. O alto volume ocupado por esse tipo de cavaco associado à sua baixa densidade atrapalha os processos subsequentes e o descarte. Devido ao acúmulo de cavaco próximo à interface da ferramenta, é possível que o material resultante do corte de metal seja grudado na peça, partes do maquinário ou mesmo ferramenta e entre em movimento junto com as altas velocidades de corte podendo gerar acidentes. Devido ao material que pode aderir aos componentes, o acabamento superficial pode ser danificado e a aresta de corte pode sofrer ruptura, a força de usinagem aumenta junto com a temperatura e com isso a vida útil das peças é reduzida. Além disso, o material indesejado pode interromper o fluxo de fluido de corte na área do corte, prejudicando a lubrificação do processo.

A partir das vantagens de cada forma de cavaco, os parâmetros de corte podem ser selecionados para se obter a forma de cavaco desejada ou diminuir a formação de rejeitos

contínuos, porém a mais comum solução para o problema dos cavacos indesejados é a utilização de quebra-cavacos (Figura 9). Esse componente pode ser posticho ou inerente no sistema e gera um aumento na curvatura do cavaco, o que leva à sua quebra por flexão. Em máquinas CN é possível alterar a velocidade de avanço de modo que essa é aproximada de zero para promover a concentração de tensão e gerar a ruptura do cavaco. A utilização de fluido de corte é uma outra maneira de resolver o problema de acúmulo de cavaco na interface de corte, visto que a injeção do mesmo, em alta pressão na superfície de saída em direção contrária à formação do cavaco, com intensidade o suficiente promove a quebra do cavaco. A flexibilidade do cavaco aumenta proporcionalmente à sua espessura, ou seja, quando mais fino o cavaco, mais flexível se torna. E com o aumento da flexibilidade, é necessária uma maior deformação crítica para romper o material. Essa deformação pode ser controlada com a diminuição do raio de curvatura do cavaco pois a alteração de parâmetros como avanço e espessura de usinagem, que também aumentam a deformação crítica, influenciam negativamente no acabamento superficial, de modo que não se torna viável para o processo.

Figura 9 – Exemplo de quebra-cavaco



Fonte: NORONHA et al. (2015)

2.2.1 Interface Ferramenta/cavaco

O processo de geração do cavaco via cisalhamento no plano de cisalhamento é mecanismo de corte de metal mais importante para entender o processo de usinagem. O estudo dessa ação é de extrema importância para o entendimento da usinabilidade e atuação da ferramenta de corte e se concentra na movimentação do cavaco e na intecção do material de

trabalho com os mecanismos presentes na interface de corte. A geração do cavaco é periódica e cada fase é dividida em quatro partes diferentes. O movimento do cavaco na face de saída da ferramenta é a última parte, a qual ocorre sob condições que são uma função de todo o processo, principalmente na formação de cavacos, forças de usinagem, aumento de temperatura durante o corte e desgaste das partes envolvidas no corte. Portanto é de alta importância o entendimento do movimento do cavaco na face de saída para que haja melhorias nos processos.

Nos primeiros estudos realizados sobre a formação do cavaco foi considerado que esse processo é desencadeado por forças de atrito que delimitam o movimento na superfície da ferramenta e os parâmetros foram baseados no coeficiente de atrito entre a ferramenta e o metal, utilizando conceitos do atrito clássico. Porém pesquisas específicas sobre a interface de corte determinaram que a abordagem como um problema de atrito clássico é incorreta para a grande parte das situações de usinagem.

O conceito de atrito clássico proposto por Amontons e Coulomb determina que a força requerida para iniciar ou manter o deslizamento entre duas superfícies sólidas em contato é proporcional à força normal à superfície que está ocorrendo o deslizamento. O coeficiente de atrito depende somente das forças, não sofrendo interferência da área de escorregamento.

Contudo, estudos mostraram que superfícies sólidas não são completamente planas numa escala microscópica, ou seja, possuem pequenos desníveis que passam despercebidos ao olho nu, porém, que podem afetar as grandezas físicas envolvidas no processo. Com isso, foi demonstrado que duas superfícies sólidas em contato nunca estão completamente em contato, o verdadeiro contato ocorre entre os picos presentes na área de contato, que representa apenas uma pequena parte da área da superfície, enquanto os vales ficam separados por vãos.

Dessa maneira, a área de contato real é muito pequena, normalmente representa somente um centésimo da área de contato aparente entre as superfícies em deslizamento. A tensão média que atua nessa pequena área de contato real é igual à tensão de escoamento do material. Se a força normal que age sobre a superfície sofrer aumento, há um ponto em que os picos que sustentam o contato sofrem deformação plástica até que a área real de contato seja aumentada e a tensão média entre eles permaneça constante. Na área de contato real, os átomos das duas superfícies são colocados em tanta proximidade que sofrem atuação de grandes forças atrativas que geram ligações atômicas. Assim, a força de atrito é o esforço necessário para gerar cisalhamento nessas áreas de contato real, e por isso é proporcional à área de contato real e à força normal.

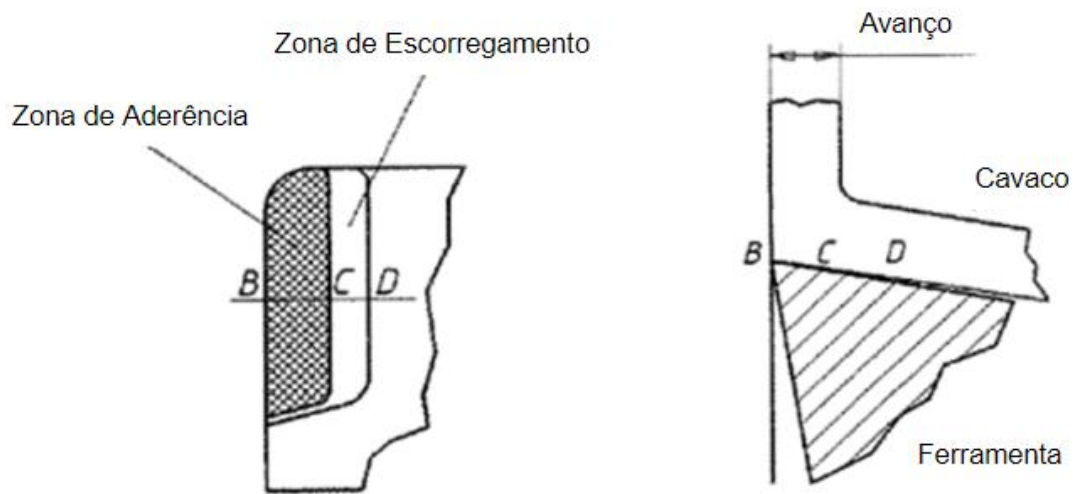
A deformação dos picos gerada pelo aumento da força normal chega ao limite quando a proporção da área de contato real é grande comparada à área de contato aparente, de modo

que não há mais relação direta entre a carga aplicada e a deformação de picos. Considerando um cenário ideal no qual as superfícies possuem contato completo, ou seja, área real e aparente são iguais, a área real de contato perde a dependência da força normal. Assim, a força de atrito passa a ser o esforço requerido para realizar o cisalhamento de toda a interface de contato. No caso de materiais diferentes, portanto com propriedades distintas, em contato, assim como em operações de usinagem, o esforço requerido para realizar cisalhamento na superfície mais fraca entre os dois materiais é a força para realizar o deslizamento, de modo que essa força não sofre dependência considerável da força normal mas continua a ser dependente da área aparente de contato, ou seja, contrariando a teoria do atrito clássico.

As altas velocidade de saída de cavaco e a baixa área de contato na interface de corte são condições que tornam o estudo dessa região de corte muito difícil. Velocidades podem chegar a 2 m/s e área de contato em 6 mm². As teorias modernas foram possíveis de serem realizadas a partir da utilização de dispositivos *quick-stop* para interromper o corte, já que esses dispositivos são capazes de separar a ferramenta do metal a velocidades de duas a três vezes maior que a velocidade de corte, o que possibilita que o cavaco recém formado permaneça com as características do processo em si e possa ser analisado corretamente. Além de *quick-stop*, foram utilizadas microscopia óptica e eletrônica, e ferramentas gastas e lascas para chegar nas teorias atuais.

A descoberta mais importante sobre esse tema é que o contato entre a ferramenta e as superfícies de trabalho é tão quase completo em uma grande parte da área total da interface que o deslizamento na interface é impossível na maioria das condições de corte (TRENT, 2000). Essa área de contato completo foi chamada de “zona de aderência” (*seizure zone*), pois a movimentação na interface ocorre devido ao cisalhamento do material do cavaco. Além dessa região, uma outra zona de cisalhamento é criada ao lado, chamada de “zona de fluxo” (*flow zone*) (TRENT, 2000), tais zonas são ilustradas na Figura 10. O “contato absoluto” presente na zona de aderência se dá devido às condições do processo que geram ligações atômicas na interface.

Figura 10 – Zonas de aderência e escorregamento na interface ferramenta-cavaco.



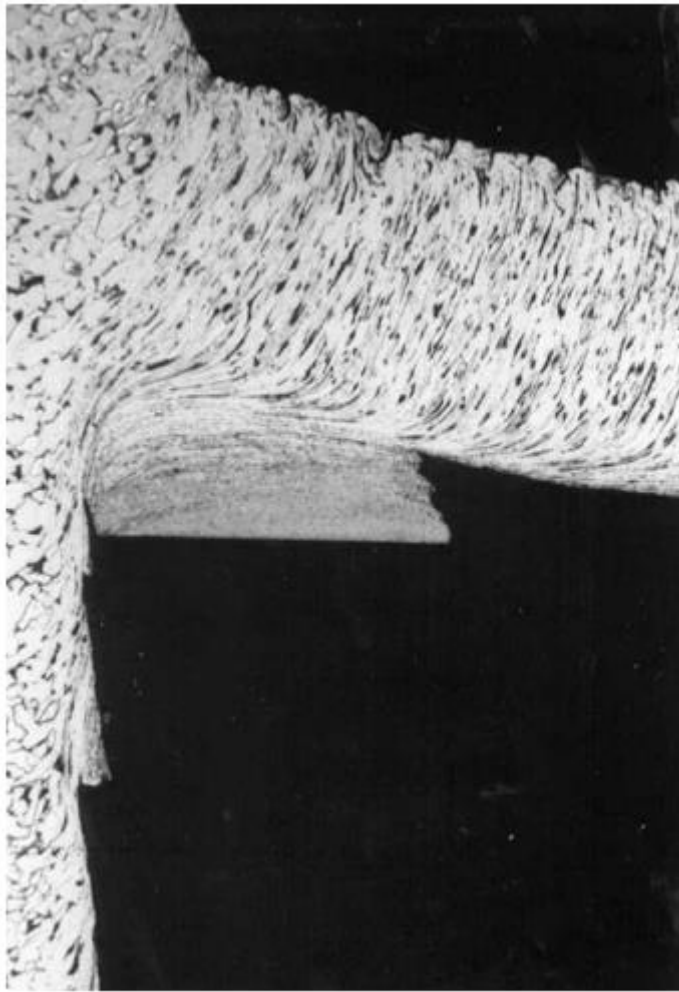
Fonte: Adaptado de TRENT (2000).

Em adição à zona de aderência, também é observada uma zona de escorregamento na qual a área real é mínima quando comparada à área aparente, determinando a presença de ligações entre as superfícies de menor intensidade que as ligações internas dos materiais de corte. Além disso, é possível que oxigênio tenha a entrada possibilitada na interface, o que forma óxidos que impedem a formação de ligações metálicas fortes entre as superfícies do cavaco e da ferramenta.

A aderência de material na área de corte pode gerar, além de uma zona de aderência ou uma zona de fluxo, uma aresta postiça de corte (APC). Esse fenômeno consiste no acúmulo de material endurecido por deformação durante o processo de corte, que se adere na aresta de corte e na saída da ferramenta, formando uma nova aresta de corte, que impede o contato do cavaco diretamente com a ferramenta (Figura 11) e com isso gera alterações no processo, visto que o corte passa a ser realizado por um elemento novo o qual não foi projetado. A formação da APC é característica de corte de ligas, e não é observada em procedimentos com metais puros. Sua aparição é notada na usinagem em velocidades intermediárias, já que em baixas velocidades ocorre deslizamento e em altas velocidades pode ser formada uma zona de fluxo, mas ainda depende do material usinado.

Embora seja um corpo novo, a APC não é separada da aresta de corte, visto que ela é um corpo contínuo de metal, e por sua elevada resistência à tensão, ela se mantém durante o procedimento de corte.

Figura 11 – Aresta postiça de corte em usinagem de aço carbono 0.15%



Fonte: TRENT (2000)

2.3 *Quick-Stop*

A usinagem é um processo industrial utilizado para a fabricação de peças e componentes de diversos materiais. As tecnologias empregadas nos processos de usinagem permitem que sejam fabricadas peças com qualidade superficial e geometrias que não eram possíveis no passado. A evolução de tais processos é ligada ao estudo da formação do cavaco, que é o principal mecanismo que ocorre durante a usinagem. No entanto, o estudo da formação do cavaco é difícil devido à diferença de grandezas do processo: a pequena escala dos fenômenos a serem estudados em comparação com as altas velocidades alcançadas durante o corte de material (Trent, 2000).

Se o processo de remoção do material é parado de maneira convencional, não é possível realizar o estudo do processo de forma correta e obter informações úteis pois o a área em que o

cavaco é formado pode resfriar e sofrer deformação até serem capturados os dados. A solução para esse problema é realizar a parada abrupta da operação para que as condições do processo no momento de formação do cavaco sejam mantidas e o estudo tenha dados fiéis ao processo, essa técnica é conhecida como parada rápida, ou Quick-stop.

O quick-stop consiste em uma ação que permite a interrupção imediata do processo de usinagem (Trent, 2000). Assim o estudo das condições do processo de usinagem pode ser realizado com efetividade e assim, possibilita a evolução dos processos. Essa técnica é aplicada tanto na área de pesquisas quanto na industrial.

Na indústria, é uma abordagem crucial que se destina a avaliar e controlar a qualidade do processo de maquinagem em tempo real, garantindo a conformidade das peças usinadas com as especificações de projeto. Esta técnica é particularmente valiosa em aplicações de usinagem de alta precisão, onde as tolerâncias dimensionais e a qualidade superficial das peças são de extrema importância, como na indústria aeroespacial e médica. O método envolve a interrupção abrupta do processo de usinagem em um ponto predeterminado, geralmente quando a peça atinge uma etapa crítica de produção, a fim de realizar uma análise imediata da integridade da peça e da condição da ferramenta de corte.

Para implementar o método de Quick-stop, o operador ou sistema CNC (Controle Numérico Computadorizado) programado para interromper o processo em um ponto de interesse específico da usinagem. A interrupção do processo pode assumir várias formas, como a ação explosiva de uma espoleta em uma arma de fogo (Silva et al., 2011), acionamento pneumático e martelo de impacto (Luiz, 2007), bem como o martelo de pêndulo (MHAMDI, 2022), explosivos (Brown, 1976) e outras alternativas. Nesse processo, o porta-ferramentas é posicionado sobre um pino fusível, adjacente a uma massa de amortecimento. Quando o mecanismo de acionamento aplica força ao porta-ferramentas, o pino fusível é rompido, desencadeando um movimento abrupto, o que preserva a integridade do cavaco, mantendo-o inalterado. A fabricação do pino fusível requer condições específicas; ele deve ser suficientemente robusto para suportar as forças de corte durante a usinagem sem se romper prematuramente. Ao mesmo tempo, deve ser frágil o bastante para se quebrar quando submetido à força gerada pelo mecanismo de acionamento, evitando assim a transmissão desse esforço ao restante do sistema, o que poderia danificar a ferramenta de corte e outros componentes.

Após a interrupção, a peça é removida da máquina e submetida a uma inspeção meticulosa. Isso geralmente envolve a utilização de instrumentos de medição de alta precisão, como micrômetros, paquímetros e rugosímetros, para avaliar as dimensões, a rugosidade da superfície e a qualidade geral da peça. Além disso, ensaios não destrutivos, como líquidos

penetrantes ou ultrassom, podem ser empregados para identificar trincas ou falhas internas que possam não ser visíveis a olho nu.

O principal objetivo do método de Quick-stop na indústria é a detecção precoce de desvios das especificações de projeto, defeitos ou problemas no processo de usinagem. Isso permite que as correções sejam implementadas de forma imediata, minimizando o desperdício de recursos e evitando a produção em série de peças defeituosas. A análise dos resultados obtidos com o método Quick-stop também pode fornecer informações valiosas para otimizar os parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço da ferramenta e taxa de remoção de material, a fim de melhorar a qualidade das peças usinadas de forma contínua.

O método de *Quick-Stop* encontra aplicação em diversos cenários críticos na usinagem, desempenhando um papel fundamental na garantia da qualidade e no controle de processos. Em particular, é frequentemente empregado em operações de torneamento, fresamento e perfuração de materiais de alta dureza, como ligas de titânio e superligas de níquel, onde a integridade da peça e a vida útil da ferramenta de corte são de extrema importância.

Como vantagens, o mecanismo de parada rápida demonstra sua relevância na indústria de fabricação por meio de uma série de vantagens substanciais. Sua capacidade de detectar precocemente problemas, defeitos e desvios de tolerância durante o processo de usinagem, possibilitando correções imediatas, contribui significativamente para a melhoria da qualidade das peças produzidas. Isso se traduz em economia de custos substancial, reduzindo o desperdício de material e recursos e otimizando os parâmetros de usinagem, como velocidade de corte e alimentação, para aumentar a eficiência. Além disso, o *Quick-Stop* aumenta a confiabilidade dos produtos finais, sendo particularmente valioso em setores críticos, como aeroespacial e médico. Ao minimizar riscos e melhorar a manutenção de ferramentas, esse método se destaca como uma ferramenta eficaz para o controle de processos, oferecendo benefícios substanciais à indústria de usinagem e fabricação como um todo.

2.4 ANSYS®

ANSYS® é um software de simulação utilizado para modelar, simular e analisar o comportamento de sistemas complexos em diversas áreas da engenharia, como mecânica, automotiva, de energia, naval, entre outras. O software é capaz de prever o desempenho de componentes e sistemas em condições extremas, reduzindo a necessidade de testes físicos e aumentando a eficiência do processo de desenvolvimento de produtos.

Ele utiliza métodos numéricos para resolver problemas de análise estrutural, de fluidos, eletromagnéticos, térmicos, acústicos, entre outros. O software oferece uma ampla variedade de ferramentas e recursos para modelagem e simulação, como geometria paramétrica, malha automática, interface gráfica intuitiva e linguagem de script.

A simulação com ANSYS® começa com a criação de um modelo digital do sistema ou componente que será analisado. A geometria do modelo é criada no software ou importada de outras ferramentas de CAD. Em seguida, o modelo é dividido em elementos finitos para permitir a análise numérica. O software também permite a aplicação de condições de contorno e propriedades de materiais.

Uma vez criado o modelo, o programa realiza a simulação, fornecendo resultados precisos sobre o comportamento do sistema ou componente em condições específicas. Com base nesses resultados, é possível identificar problemas, otimizar o projeto e prever o desempenho do sistema em diferentes condições.

O ANSYS® também oferece uma ampla variedade de ferramentas para visualização e análise de resultados. As ferramentas incluem gráficos 2D e 3D, animações, relatórios personalizados, entre outros. Isso permite que os engenheiros e projetistas interpretem os resultados da simulação de forma eficiente e tomem decisões informadas em relação ao projeto.

O ANSYS® é amplamente utilizado em empresas e instituições de pesquisa em todo o mundo. O software é capaz de lidar com problemas complexos e críticos, permitindo que engenheiros e pesquisadores desenvolvam projetos mais avançados e inovadores. O software é constantemente atualizado e aprimorado, incorporando as últimas tecnologias e métodos de simulação.

É uma ferramenta poderosa para a resolução de problemas de engenharia e é amplamente utilizado. O software é capaz de lidar com problemas complexos, permitindo que os usuários desenvolvam projetos mais avançados e inovadores.

O ANSYS® é uma ferramenta essencial para a análise de componentes e sistemas críticos, como turbinas a gás, motores de avião, sistemas de propulsão de foguetes, sistemas de transmissão de energia, entre outros. O software permite que os engenheiros e projetistas identifiquem e resolvam problemas em fases mais iniciais do processo de desenvolvimento, reduzindo custos e aumentando a eficiência. O ANSYS® também pode ser utilizado para otimização de projetos, permitindo que os usuários encontrem a melhor solução para um determinado problema.

3 METODOLOGIA

3.1 Equipamentos e Insumos

3.1.1 Software SOLIDWORKS®

O SOLIDWORKS® é um software de modelagem 3D utilizado para criar modelos e projetos de peças, montagens e desenhos técnicos. Ele é amplamente utilizado em diversas áreas, como engenharia mecânica, design de produtos, arquitetura e muitas outras. O software oferece ferramentas intuitivas e fáceis de usar, permitindo que os usuários possam criar modelos precisos em um curto espaço de tempo. Além disso, o SOLIDWORKS® conta com recursos avançados, como simulação de movimento, análise de tensão, gerenciamento de dados e muito mais. Isso torna o SOLIDWORKS® uma ferramenta indispensável para qualquer profissional que trabalha com design e desenvolvimento de produtos.

3.1.2 Software ANSYS®

O ANSYS® é um software de simulação de engenharia utilizado para realizar análises e testes virtuais em modelos de produtos e sistemas. Ele oferece uma ampla gama de recursos e ferramentas avançadas para ajudar os engenheiros a entender o comportamento dos produtos em diferentes condições e ambientes, como análise estrutural, dinâmica de fluidos, eletromagnetismo, acústica, entre outros. Com o ANSYS®, é possível realizar testes virtuais para validar projetos, reduzir custos e tempo de desenvolvimento, e melhorar a eficiência e desempenho de produtos e sistemas.

3.2 O *Quick-Stop*

O *Quick-Stop* é um dispositivo que tem como objetivo garantir a segurança e a precisão do processo de usinagem de peças. O método de operação do *Quick-Stop* é composto por várias etapas que funcionam em conjunto para garantir um processo seguro e eficiente.

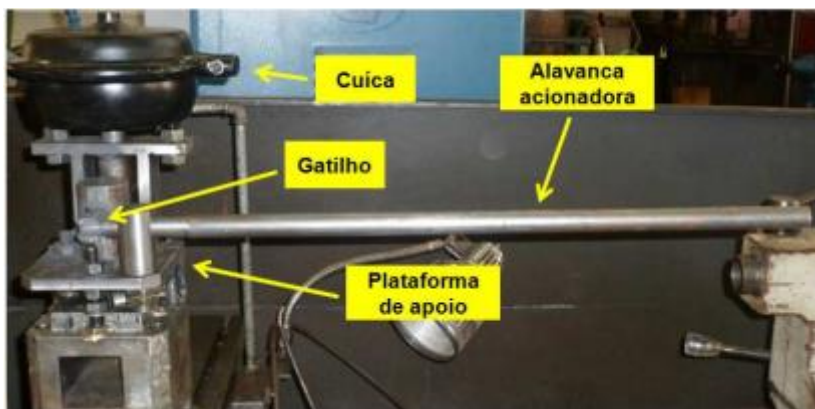
A primeira etapa do método é a injeção de ar comprimido em uma cuíca de freio (Figura 12), onde é armazenado sob uma pressão específica. Essa pressão é determinada previamente e pode variar dependendo das especificações da peça que está sendo usinada. Essa cuíca é normalmente utilizada em freios de caminhões, mas no caso do *Quick-Stop*, é utilizada para

armazenar energia. A cuíca utilizada pode armazenar cargas de pressão que vão de 6 a 13 bar, mas para questões de segurança para não forçar os equipamentos a trabalharem no limite, são utilizadas pressões de no máximo 9 bar.

Em seguida, a alavanca é acionada, liberando a trava da cuíca. Quando a trava é liberada, o ar comprimido é liberado e aciona uma mola. Essa mola, por sua vez, aciona um martelo, que pressiona o suporte que contém a ferramenta de corte. Esse martelo é capaz de exercer uma pressão considerável, e pode atingir uma força de impacto significativa.

O suporte que contém a ferramenta de corte é mantido no lugar por um pino que serve como base. Esse pino é rompido quando o martelo pressiona o suporte, permitindo que o suporte seja rapidamente baixado. Quando o suporte é baixado, o contato entre a ferramenta de corte e a peça é interrompido, garantindo que a peça não seja danificada.

Figura 12 – *Quick-Stop* utilizado no experimento

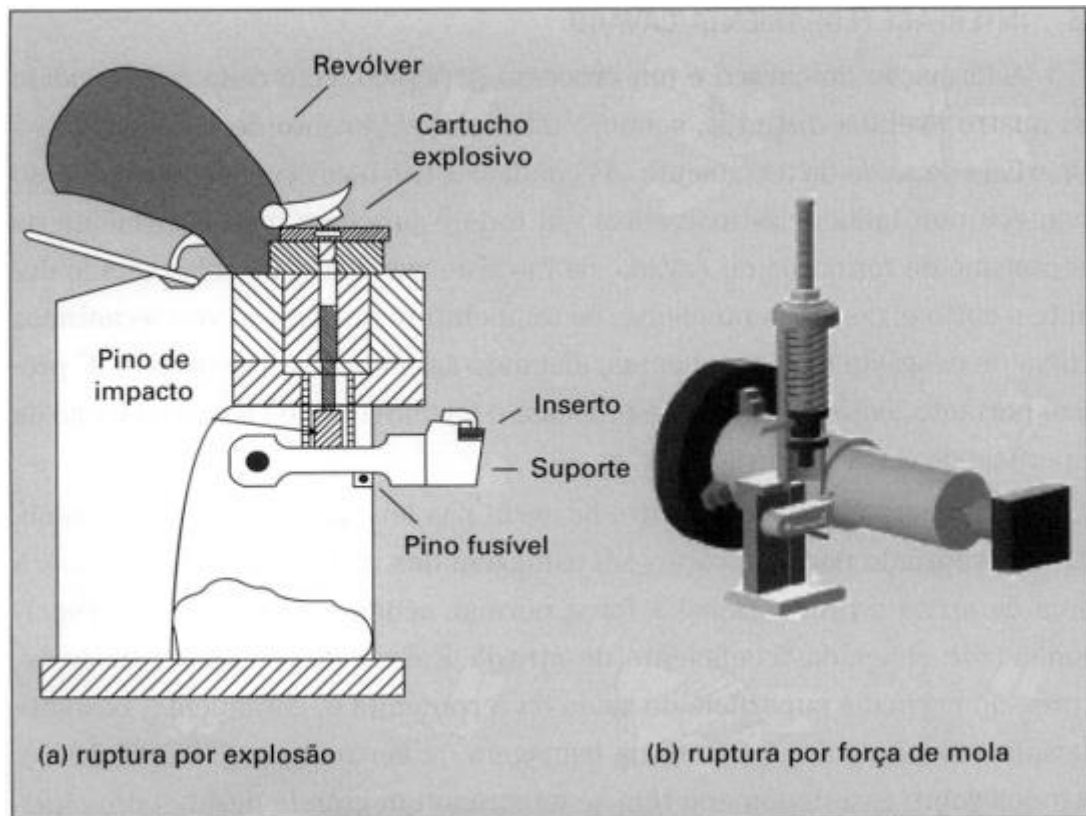


Fonte: SILVA et al. (2014)

3.3 Pinos

O pino fusível utilizado no *Quick-Stop* de usinagem é uma peça que serve como base para o suporte que contém a ferramenta de corte. Ele é localizado na parte superior do suporte e mantém a ferramenta de corte no lugar durante o processo de usinagem, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Exemplos de dispositivos de quick-stop



Fonte: MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015. Página 64.

Quando o martelo acionado pelo ar comprimido pressiona o suporte, ele rompe o pino que serve como base, permitindo que o suporte seja rapidamente baixado e interrompendo o contato entre a ferramenta de corte e a peça. Esse pino é uma peça importante no processo de operação do *Quick-Stop*, garantindo que a ferramenta de corte seja mantida em uma posição segura durante a usinagem e que seja interrompida instantaneamente quando necessário.

O pino utilizado no *Quick-Stop* pode ser produzido em uma variedade de materiais, como aço, latão ou plástico. A escolha do material depende do tipo de usinagem que está sendo realizada, bem como das especificações do processo de usinagem. É importante que o pino seja resistente o suficiente para suportar a pressão exercida pelo martelo e que seja facilmente substituível, caso seja necessário.

Os pinos utilizados neste estudo são feitos de aço 1020 e possuem 135mm de comprimento e 8mm de diâmetro. A literatura indica que podem ser utilizados materiais como ferro fundido e tungstênio além do aço carbono para a fabricação de pinos fusíveis, porém o aço 1020 foi escolhido para o presente estudo pois é o material disponível para utilização no laboratório onde foram feitos os testes experimentais. As variações utilizadas para pesquisa

foram na profundidade dos chanfros feitos a 33,5mm da ponta dos pinos, com comprimeiro de 3mm. Foram utilizados três tipos diferentes de pinos na avaliação. O primeiro pino (Figura 14) possui chanfro de 1mm de profundidade, gerando um diâmetro interno de 6mm na região do cranfro. O segundo pino (Figura 15) possui chanfro de 2,5mm de profundidade, gerando um diâmetro interno de 3mm na região do cranfro. O terceiro pino (Figura 16) não possui chanfro. Essa diferença na profundidade das seções muda a concentração de tensões e conseqüentemente altera a carga que o pino suporta. Como o Aço 1020 é um material resistente, o pino deve ser dimensionado de modo a aguentar as forças de corte provenientes das operações de usinagem porém deve ser rompido durante o impacto do martelo, sem apresentar tamanha resistência que trasmita o impacto do martelo para o restante das ferramentas.

Figura 14 – Pino 1

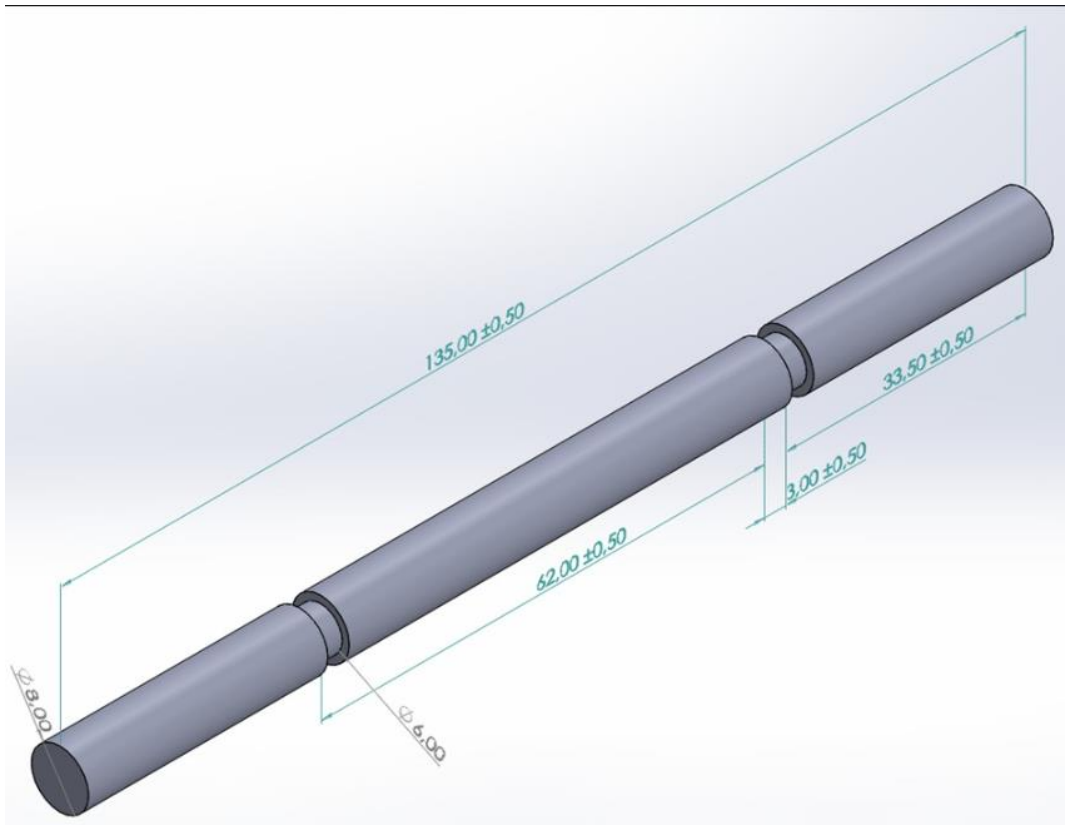


Figura 15 – Pino 2

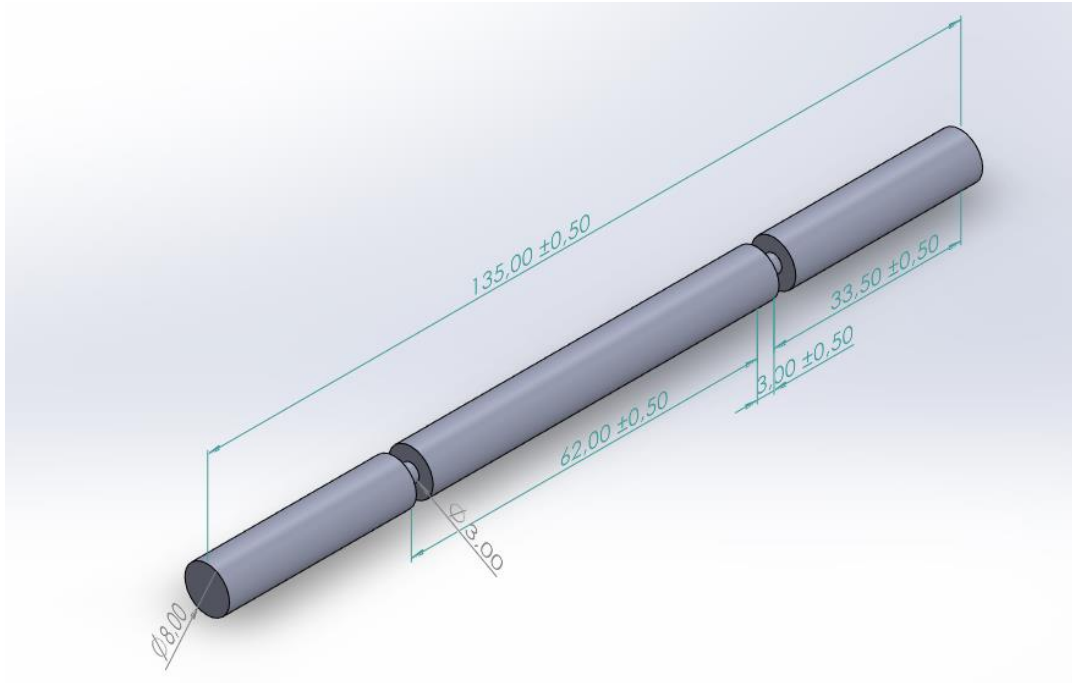
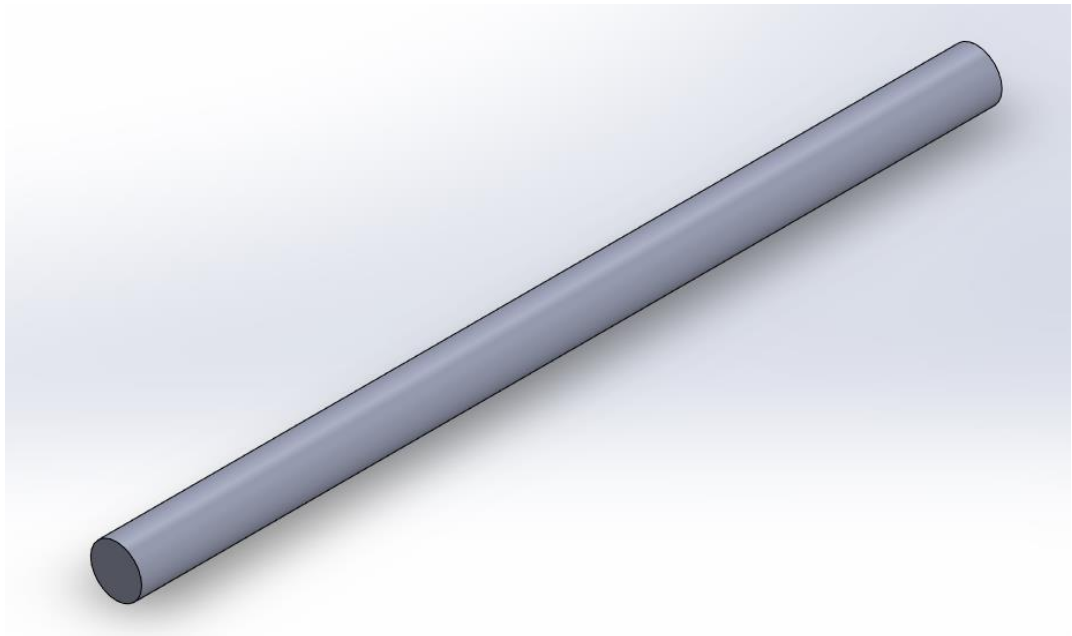


Figura 16 – Pino 3



3.4 Simulação ANSYS®

Figura 17 – Concentração de tensão da simulação no Pino 1

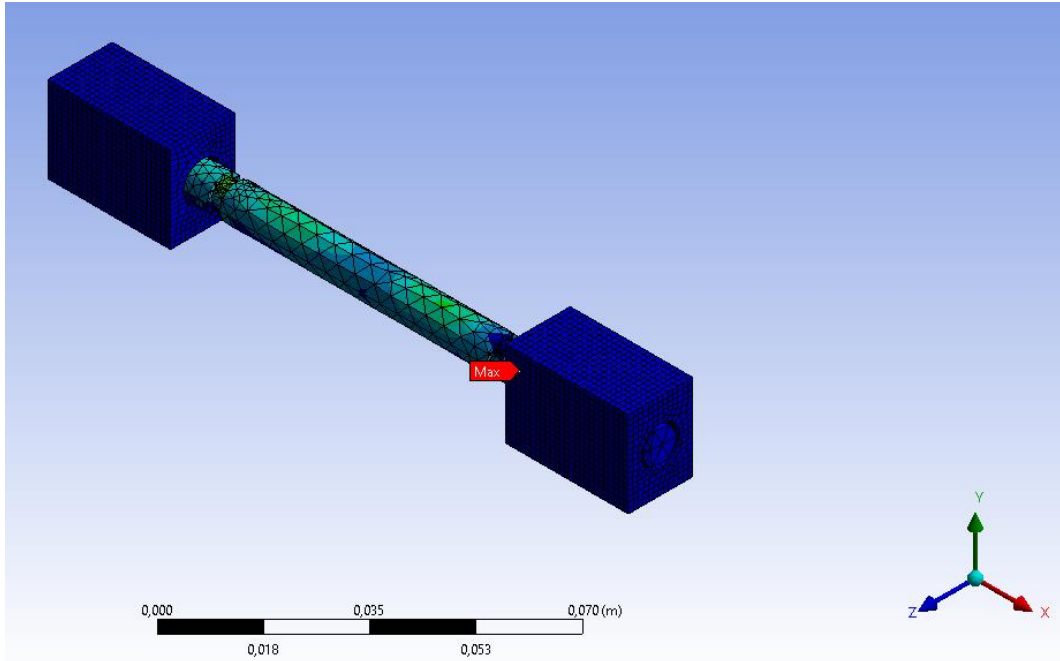


Figura 18 – Vista lateral para evidenciar onde é o ponto de concentração de tensão na simulação do pino 1.

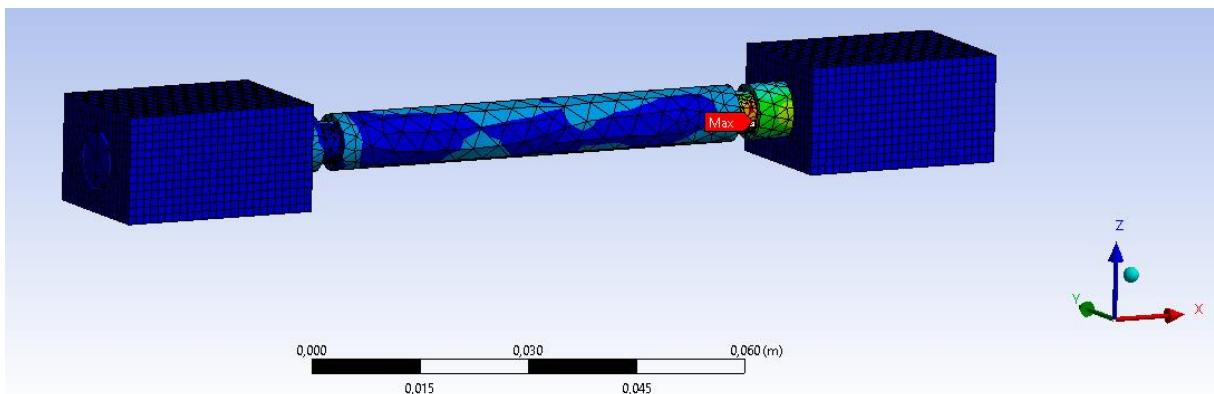


Figura 19 – Deformação exagerada do pino 1 para ilustrar as forças

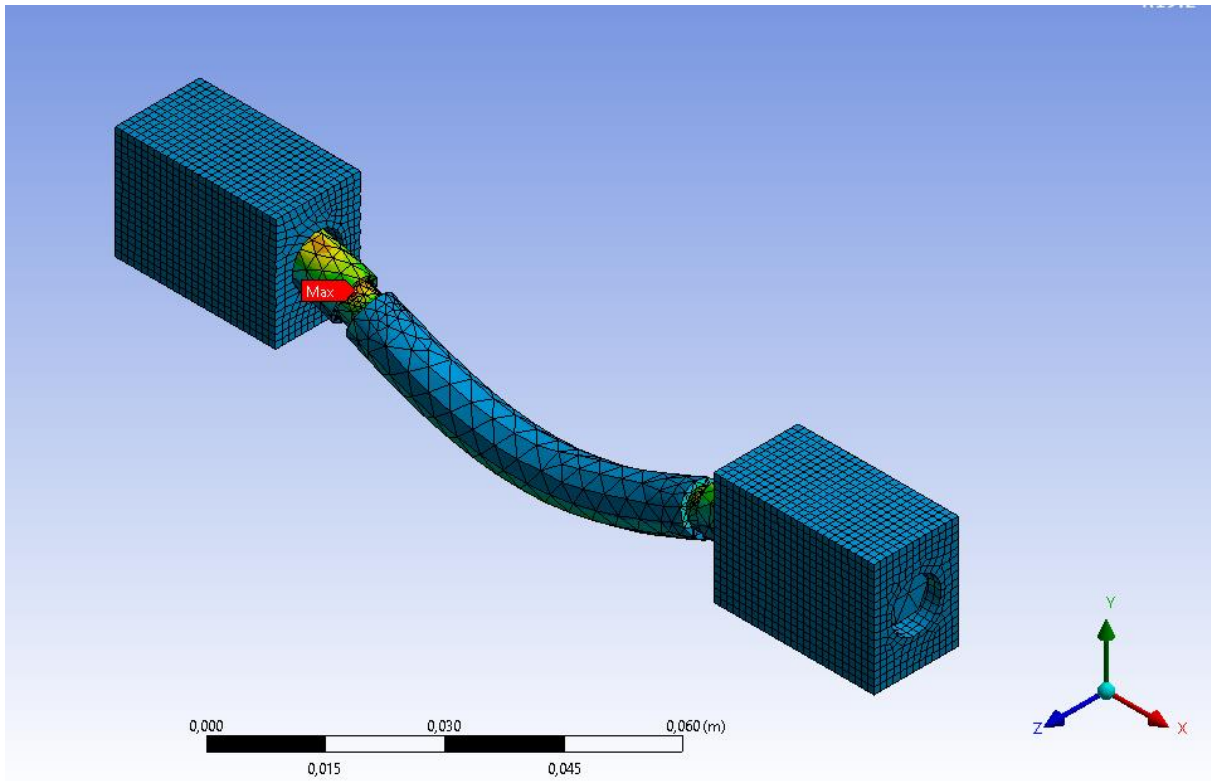


Figura 20 – Concentração de tensão da simulação no Pino 2

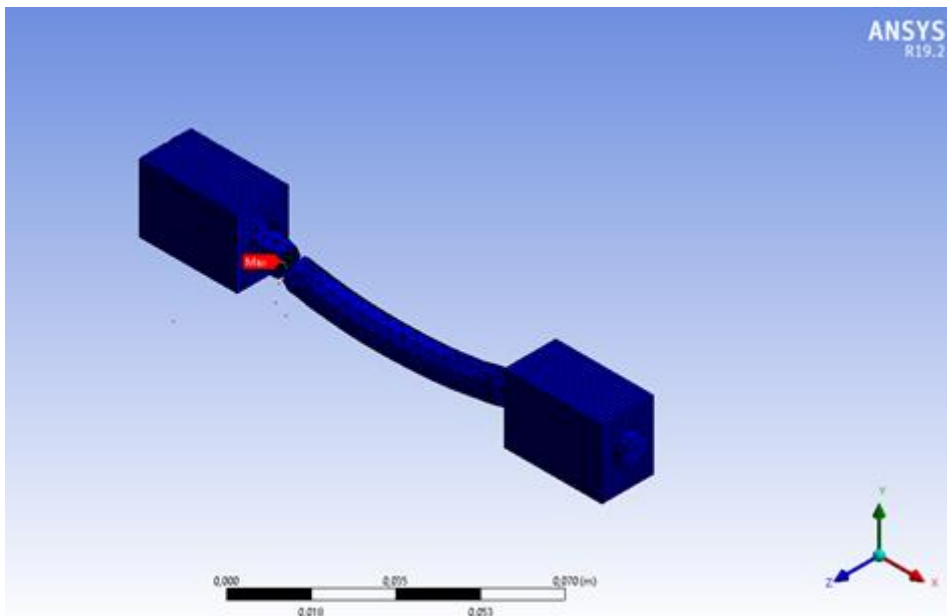


Figura 21 – Concentração de tensão da simulação no Pino 2, vista aproximada.

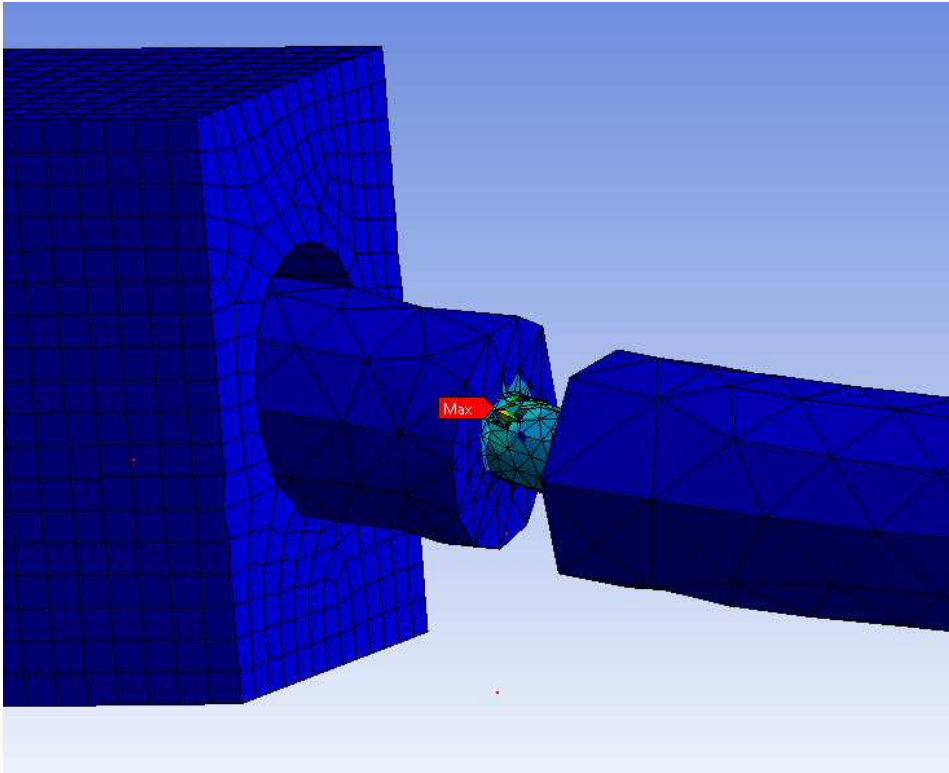


Figura 22 – Pino 3 e malha utilizada na simulação

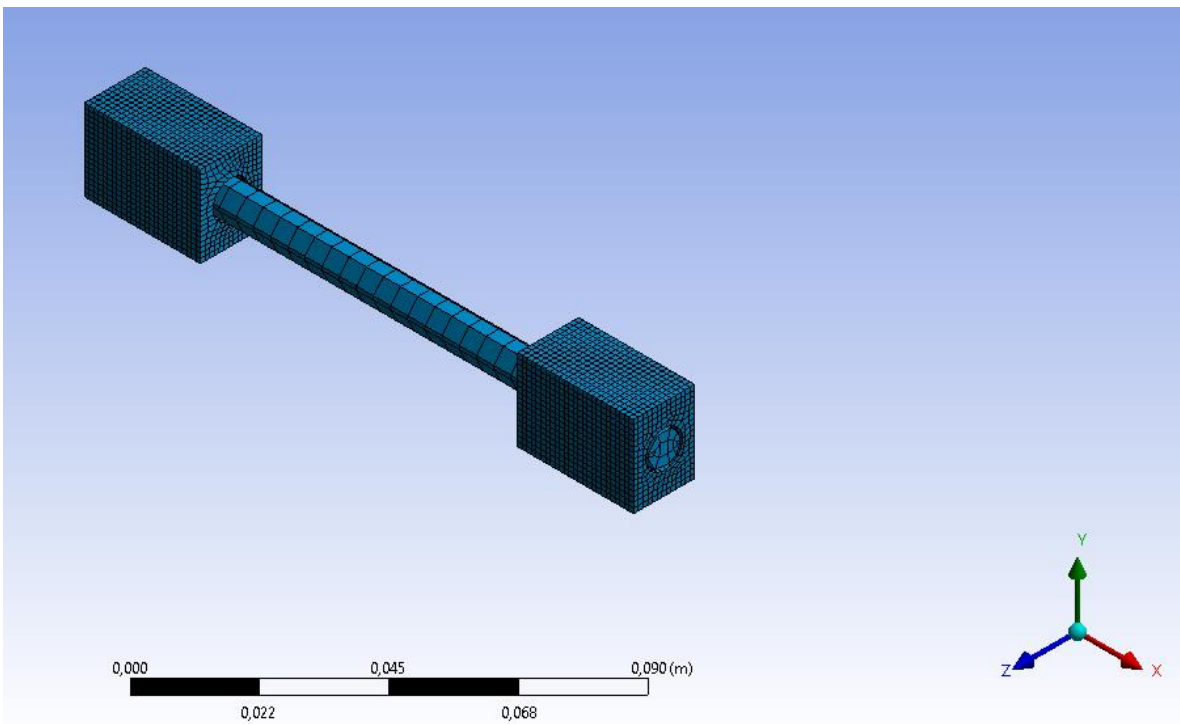
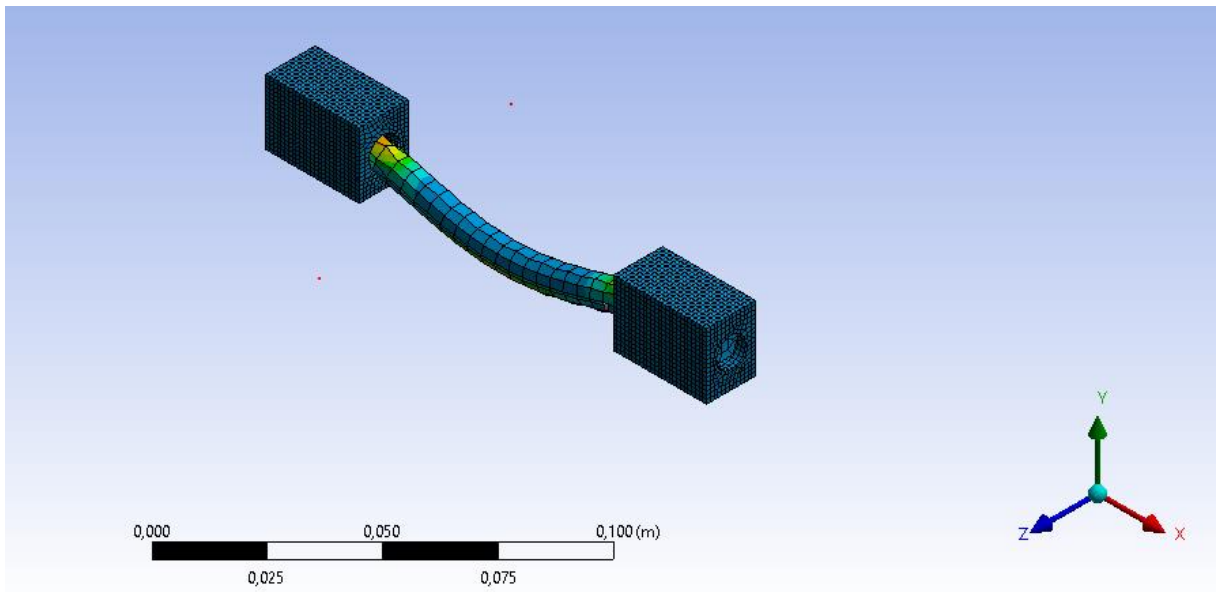


Figura 23 – Concentração de tensão da simulação no Pino 2



A concentração de tensão é um fenômeno que ocorre em um material quando há uma mudança abrupta em sua geometria, como é o caso de um chanfro em um pino. Quando um chanfro é criado em um pino, a mudança na geometria da peça causa uma alteração na distribuição do campo de tensão ao longo do material. Essa mudança abrupta pode resultar em um acúmulo de tensões em áreas específicas do chanfro, chamadas de pontos de concentração de tensão.

Os pontos de concentração de tensão são locais onde as tensões aplicadas ao material se acumulam e se tornam significativamente maiores do que a tensão média aplicada na peça. Essa concentração de tensão pode levar a um aumento da deformação plástica e, em alguns casos, a falhas no material. Por exemplo, em um pino com um chanfro mal dimensionado, a concentração de tensão pode levar a rachaduras ou fraturas no chanfro, reduzindo a resistência e a durabilidade da peça.

O rompimento dos pinos ocorrem justamente a partir de propagação de trinca nos pontos de concentração de tensão.

Figura 24 – Quebra do pino 1

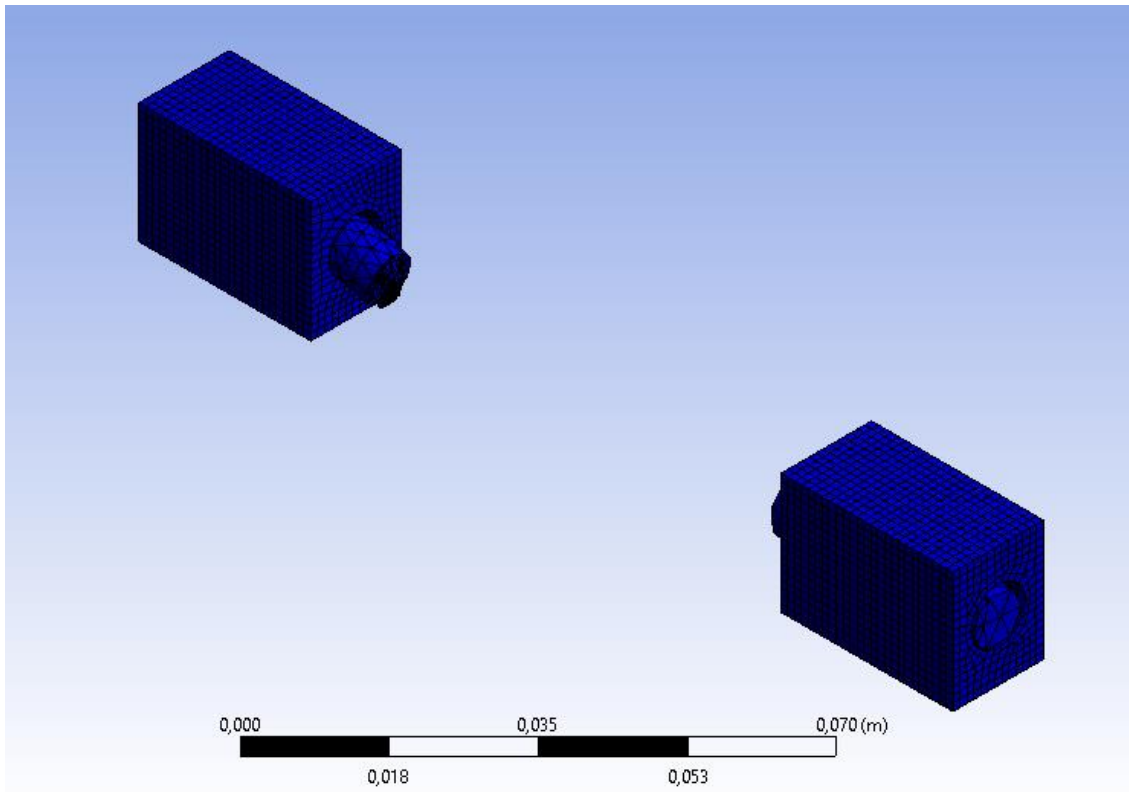
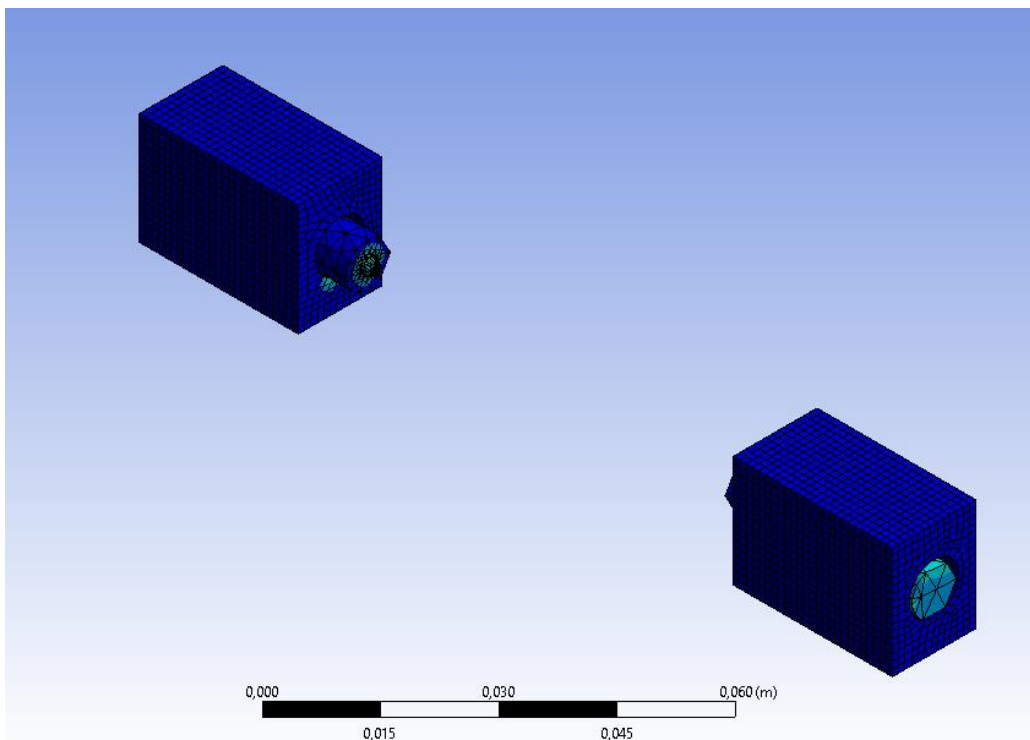


Figura 25 – Quebra do pino 2



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenho feito

Para realização do estudo foi utilizado o SOLIDWORKS® para confecção do desenho do *Quick-Stop* nas proporções reais.

Figura 26 - Mecanismo de *Quick-Stop*

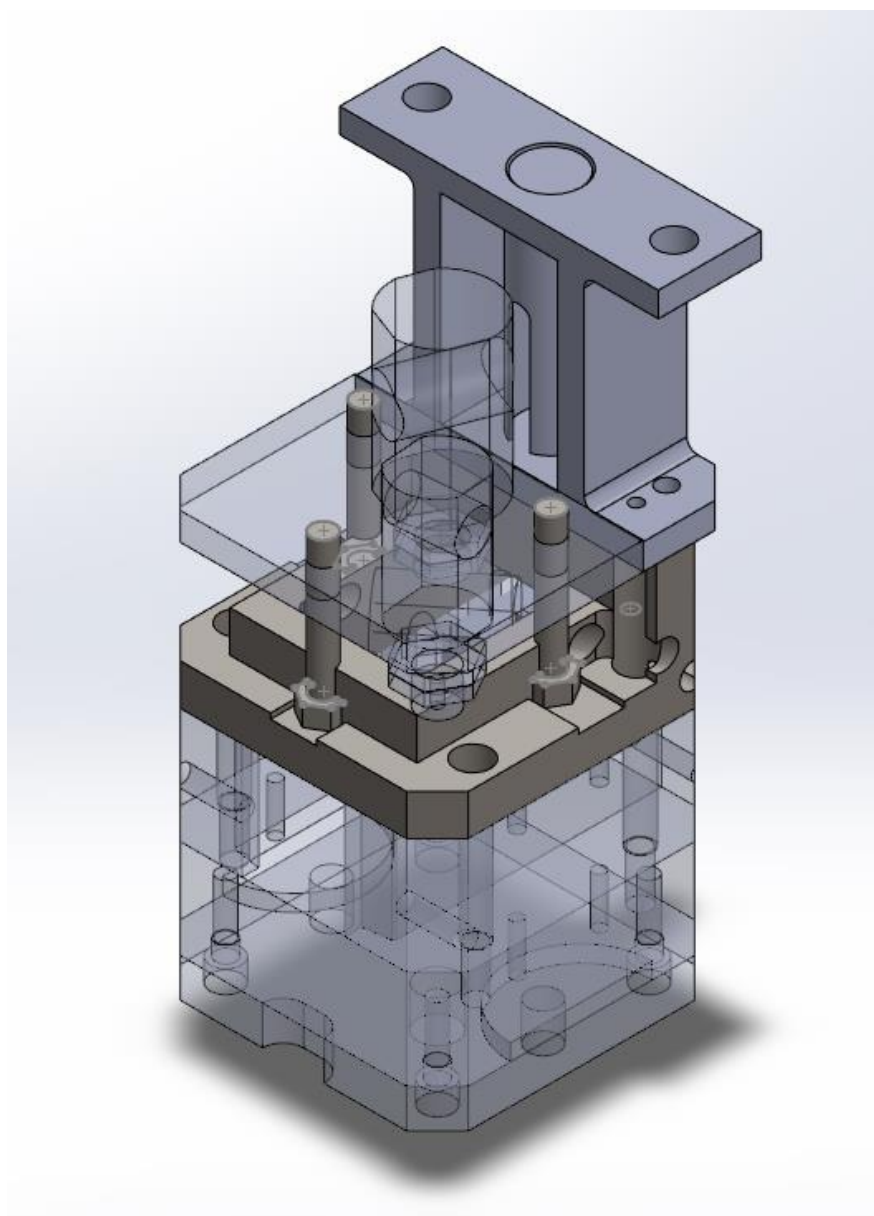


Figura 27 - Mecanismo de *Quick-Stop*, vista frontal

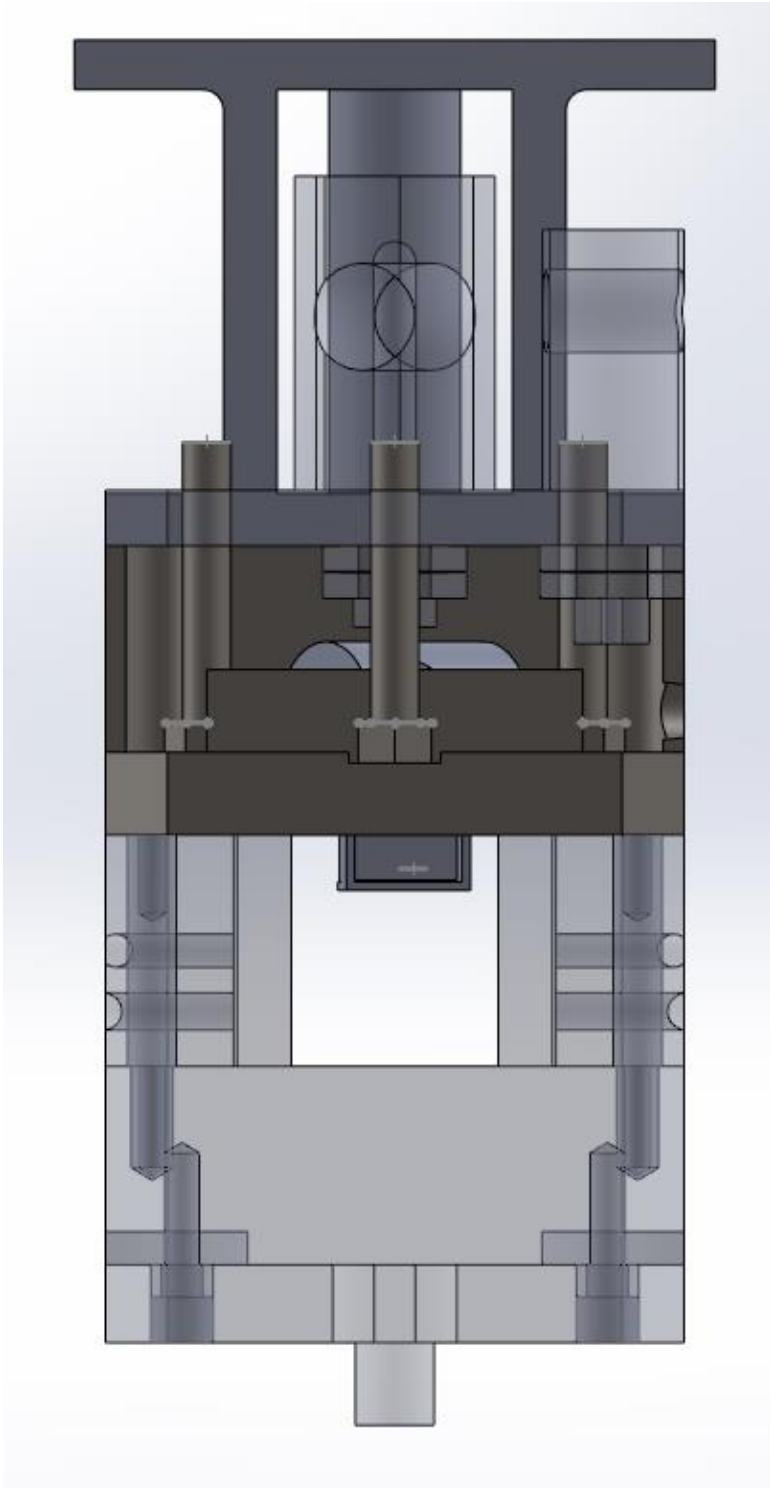


Figura 28: Mecanismo de *Quick-Stop*, vista lateral

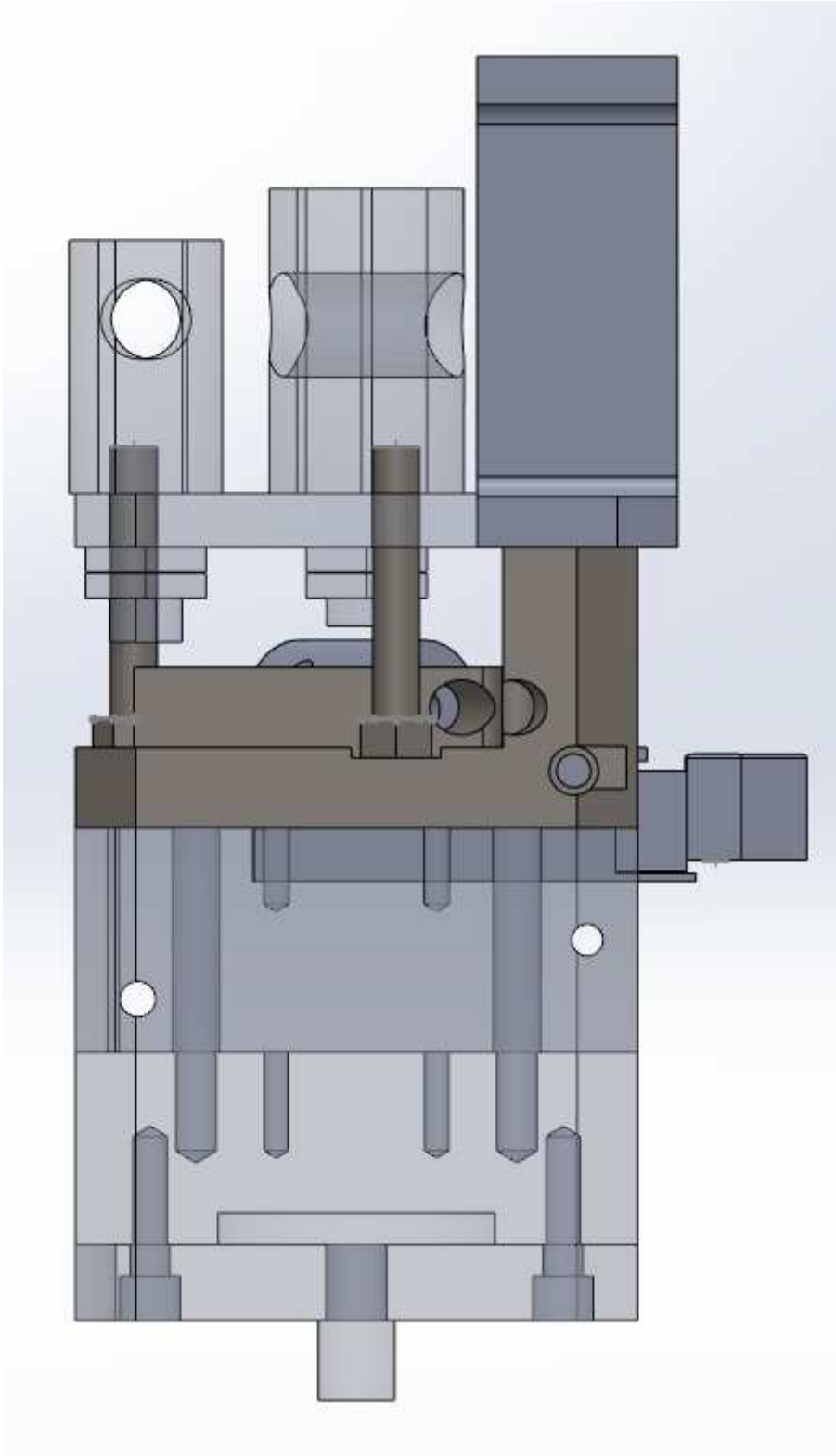
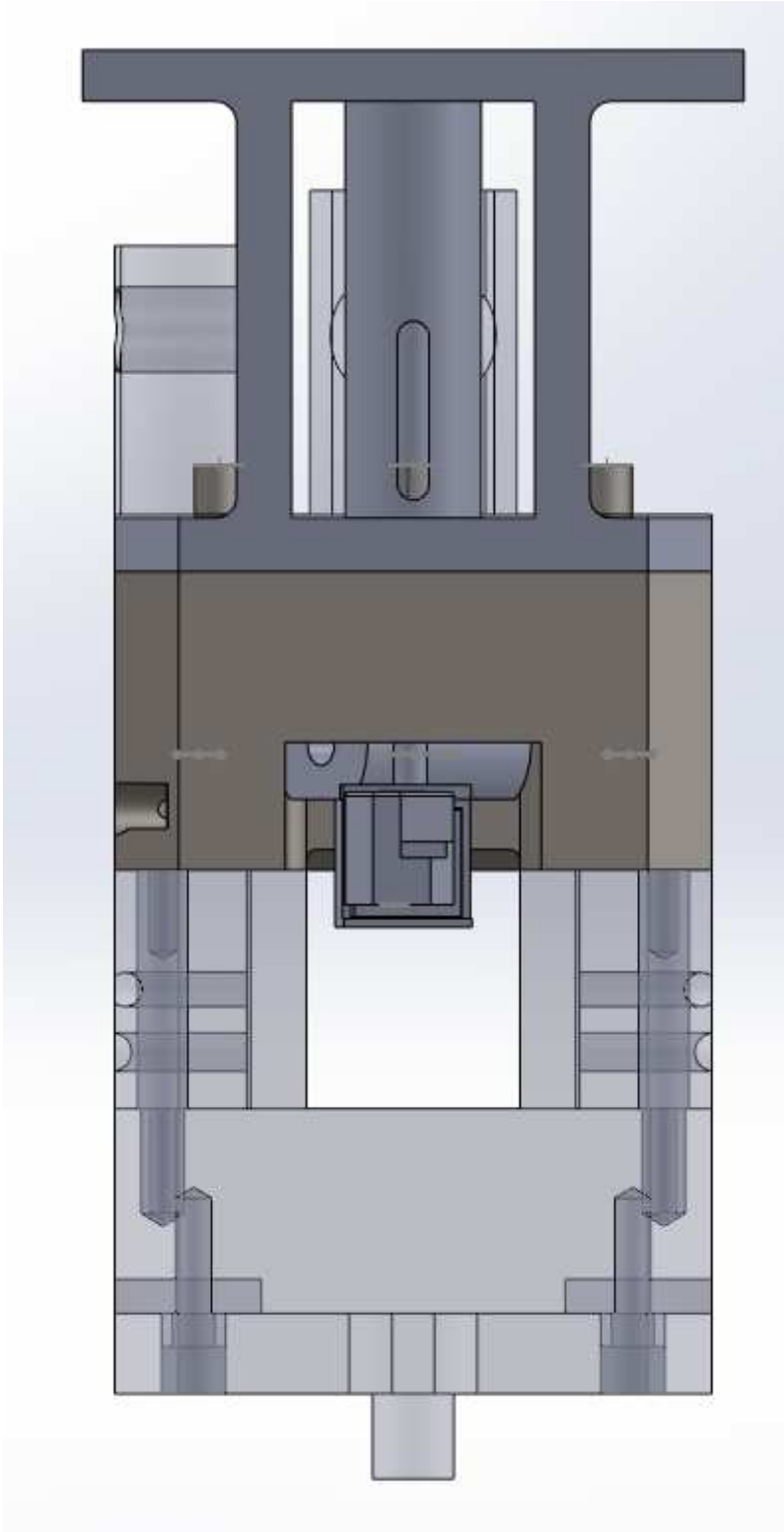


Figura 29 - Mecanismo de *Quick-Stop*, vista da outra lateral



4.2 Pinos

4.3 Simulação

Utilizando o programa ANSYS®, foram realizadas simulações em duas condições, a primeira considerando as forças de corte geradas durante o processo de usinagem, que podem chegar à 150N, para verificar se o pino suporta as condições de corte. A segunda foi realizada considerando a pressão gerada na superfície do pino em contato com a base da ferramenta de corte, que podem chegar a 300MPa. As tensões utilizadas, tanto força de corte quanto pressão sobre o pino foram medidas através de testes experimentais. Cada uma dessas condições foi realizada para três tipo de pinos variando a profundidade do chanfro. Pelos resultados das simulações, foram notadas concentrações de tensão no chanfro dos pinos nos casos 1 e 2. A simulação feita no ANSYS® considerou o material dos pinos sendo Aço 1020 para realização dos cálculos. Após a realização do processamento computacional, as tensões provenientes dos resultados da simulação necessitam de interpretação para a obtenção de uma conclusão.

Tabela 1 - Pino 1: Análise durante o corte

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	6.595,50	24817	15.706,25
1,00E-04	2.725,80	15655	9.190,40
1,50E-04	2.726,20	15701	9.213,60
2,00E-04	3.139,20	36212	19.675,60
2,50E-04	3.332,70	17348	10.340,35
3,00E-04	3.176,20	16871	10.023,60
3,50E-04	3.149,70	17028	10.088,85
4,00E-04	3.152,40	17120	10.136,20
4,50E-04	3.150,10	17348	10.249,05
5,00E-04	3.137,00	19263	11.200,00
5,50E-04	65.662,00	22455	44.058,50
6,00E-04	627.820,00	33.456.780,90	17.042.300,45
6,50E-04	1.074.700,00	29.876.054,32	15.475.377,16
7,00E-04	814.650,00	34.561.789,01	17.688.219,51
7,50E-04	1.180.700,00	22.290.123,45	11.735.411,73
8,00E-04	1.046.300,00	30.765.432,10	15.905.866,05
8,50E-04	1.246.200,00	12.598.765,27	6.922.482,64
9,00E-04	1.280.400,00	3.428.571,42	2.354.485,71
9,50E-04	278.030,00	3.098.765,27	1.688.397,64
1,00E-03	582.650,00	3.765.432,10	2.174.041,05
Limite	2.725,80	34.561.789,01	17.282.257,41
SOLIDWORKS®	31.210,00	34.632.256,00	17.331.733,00

Gráfico 1 - Pino 1: Análise durante o corte

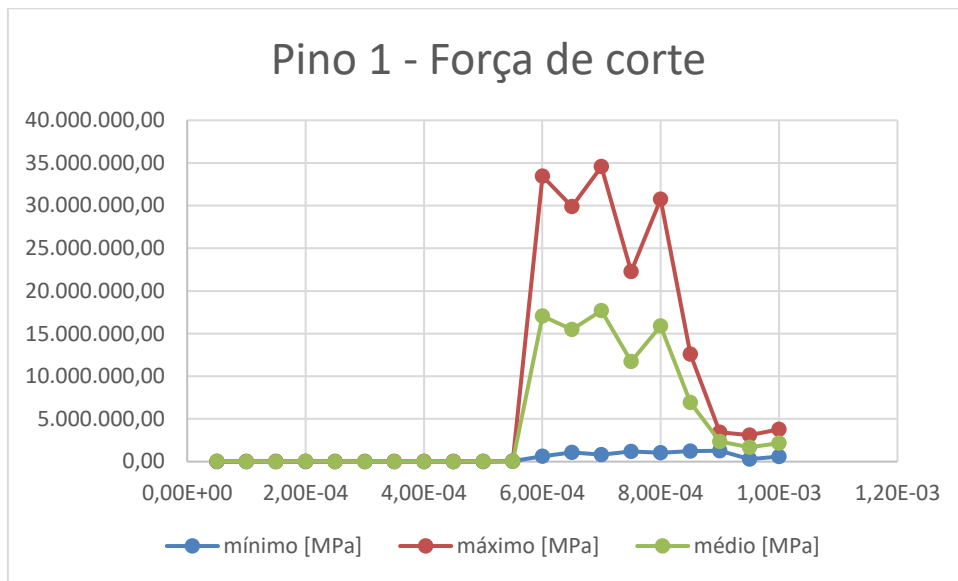


Tabela 2 – Pino 1: Análise do impacto do martelo

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-04	5.671.200,00	400.333.924,00	203.002.562,00
1,00E-03	11.460.000,00	407.347.000,00	209.403.500,00
1,50E-03	9.562.000,00	359.870.000,00	184.716.000,00
2,00E-03	16.151.000,00	350.472.000,00	183.311.500,00
2,50E-03	10.702.000,00	338.220.000,00	174.461.000,00
3,00E-03	17.942.000,00	350.380.000,00	184.161.000,00
3,50E-03	9.944.800,00	443.510.000,00	226.727.400,00
3,53E-03	14.063.000,00	330.870.000,00	172.466.500,00
Limite	5.671.200,00	443.510.000,00	224.590.600,00
SOLIDWORKS®	73.575,00	423.221.924,00	211.647.749,50

Gráfico 2 – Pino 1: Análise do impacto do martelo

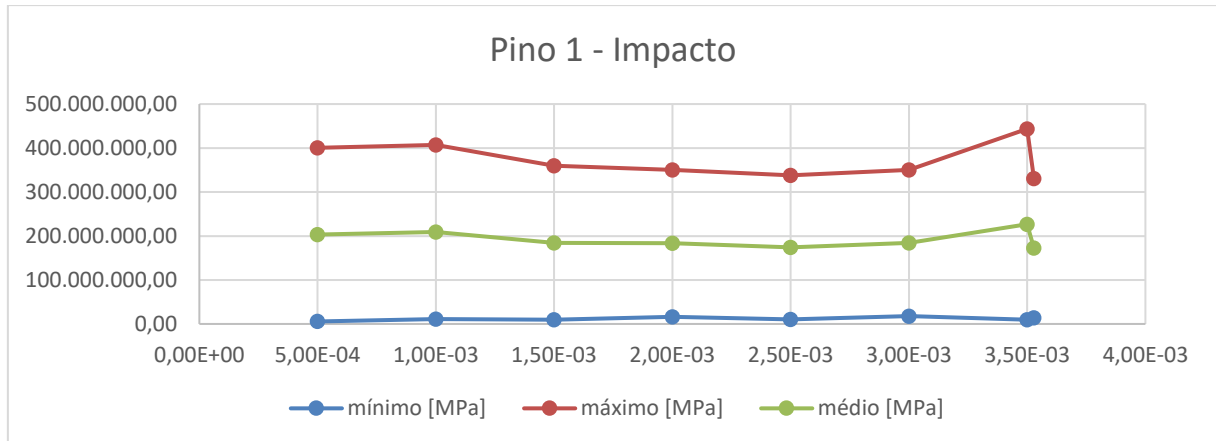


Tabela 3 - Pino 2: Análise durante o corte

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	321,53	29.750.000,00	14.875.160,77
1,00E-04	324,47	29.750.000,00	14.875.162,24
1,50E-04	328,13	32.306.000,00	16.153.164,07
2,00E-04	332,51	34.949.000,00	17.474.666,26
2,50E-04	337,62	37.678.000,00	18.839.168,81
3,00E-04	343,12	40.493.000,00	20.246.671,56
3,50E-04	356,72	43.393.000,00	21.696.678,36
4,00E-04	417,55	46.378.000,00	23.189.208,78
4,50E-04	396,80	49.447.000,00	24.723.698,40
5,00E-04	407,03	52.599.000,00	26.299.703,52
5,50E-04	591,40	55.833.000,00	27.916.795,70
6,00E-04	691,81	59.150.000,00	29.575.345,91
6,50E-04	393,54	62.548.000,00	31.274.196,77
7,00E-04	477,57	66.027.000,00	33.013.738,79
7,50E-04	1.199,10	69.587.000,00	34.794.099,55
8,00E-04	685,44	73.227.000,00	36.613.842,72
8,50E-04	1.638,80	72.823.000,00	36.412.319,40
9,00E-04	1.924,40	72.407.000,00	36.204.462,20
9,50E-04	1.244,20	71.980.000,00	35.990.622,10
1,00E-03	699,13	71.541.000,00	35.770.849,57
Limite	321,53	73.227.000,00	36.613.660,77
SOLIDWORKS®	2.844,00	37.668.461,00	18.835.652,50

Gráfico 3 - Pino 2: Análise durante o corte

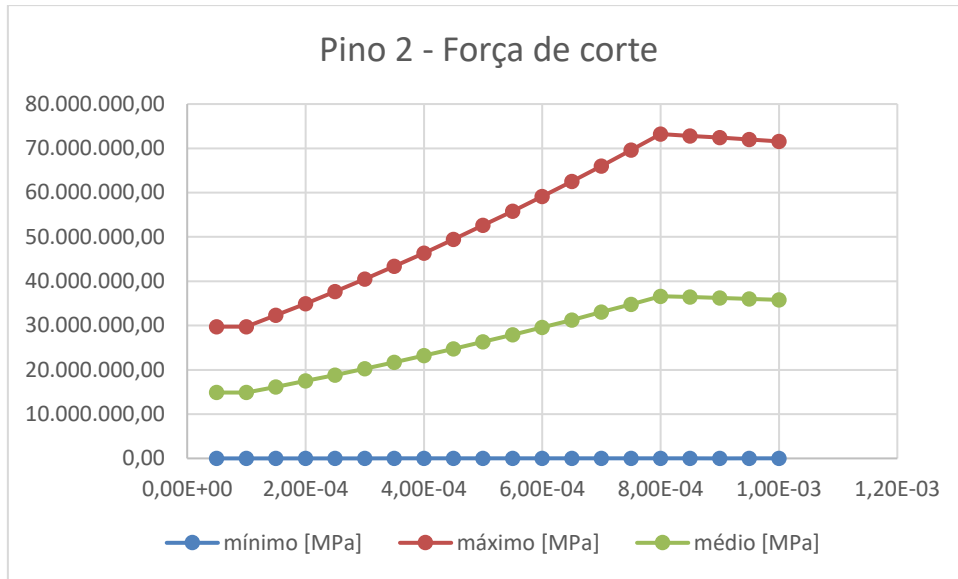


Tabela 4 - Pino 2: Análise do impacto do martelo

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	25.267.000,00	551.258.026,00	288.262.513,00
1,00E-04	37.387.000,00	563.349.092,00	300.368.046,00
1,50E-04	28.558.000,00	575.440.158,00	301.999.079,00
2,00E-04	42.718.000,00	587.531.224,00	315.124.612,00
2,50E-04	31.849.000,00	599.622.290,00	315.735.645,00
3,00E-04	48.049.000,00	687.548.752,00	367.798.876,00
3,50E-04	35.140.000,00	687.383.508,00	361.261.754,00
4,00E-04	53.380.000,00	687.218.264,00	370.299.132,00
Limite	25.267.000,00	687.548.752,00	356.407.876,00
SOLIDWORKS®	42.219,00	676.401.917,00	338.222.068,00

Gráfico 4 - Pino 2: Análise do impacto do martelo

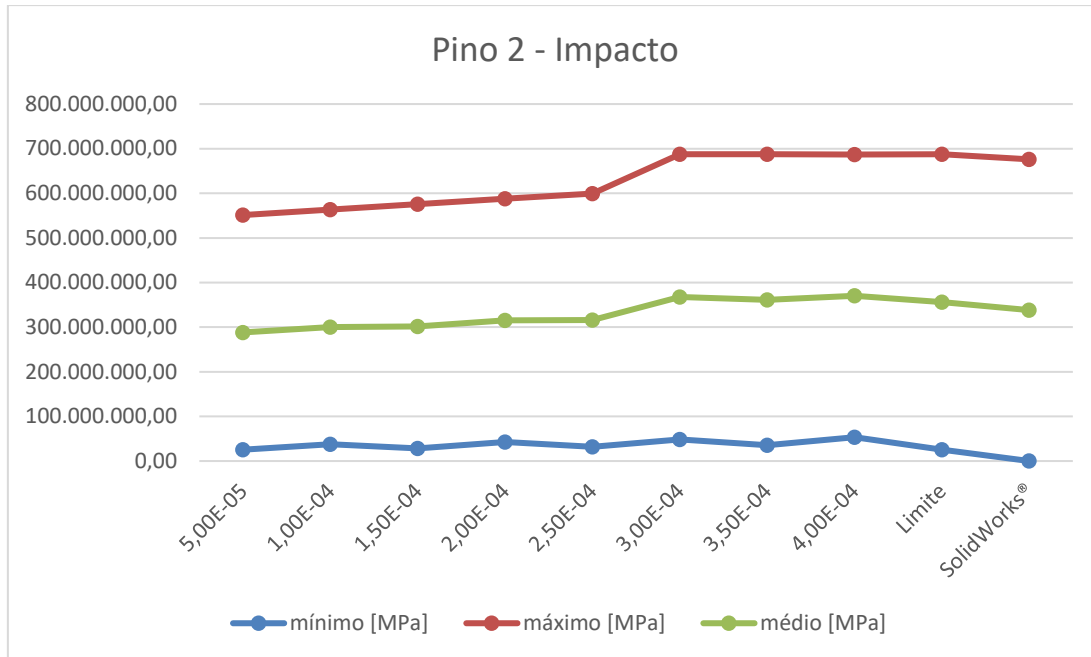


Tabela 5 - Pino 3: Análise durante o corte

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	6408,3	24.719,00	15563,65
1,00E-04	2474,6	18.173,00	10323,8
1,50E-04	3483,3	14.917,00	9200,15
2,00E-04	3192,3	16.317,00	9754,65
2,50E-04	3012,1	29.891,00	16451,55
3,00E-04	3045,8	29.917,00	16481,4
3,50E-04	3045,8	29.938,00	16491,9
4,00E-04	3033,3	16.990,00	10011,65
4,50E-04	3033,1	16.915,00	9974,05
5,00E-04	3034,1	16.914,00	9974,05
5,50E-04	2994,9	213.870,00	108432,45
6,00E-04	2992,5	6.724.300,00	3.363.646,25
6,50E-04	2988,6	12.668.000,00	6.335.494,30
7,00E-04	2987,1	8.113.500,00	4.058.243,55
7,50E-04	2979,6	11.674.000,00	5.838.489,80
8,00E-04	2979,6	23.084.000,00	11.543.489,80
8,50E-04	2979,6	24.969.000,00	12.485.989,80
9,00E-04	2979,6	22.216.000,00	11.109.489,80
9,50E-04	2979,6	4.084.800,00	2.043.889,80
1,00E-03	2979,6	5.518.000,00	2.760.489,80
Limite	2.474,60	24.969.000,00	12.485.737,30
SOLIDWORKS®	7.038,00	19.953.544,00	9.980.291,00

Gráfico 5 - Pino 3: Análise durante o corte

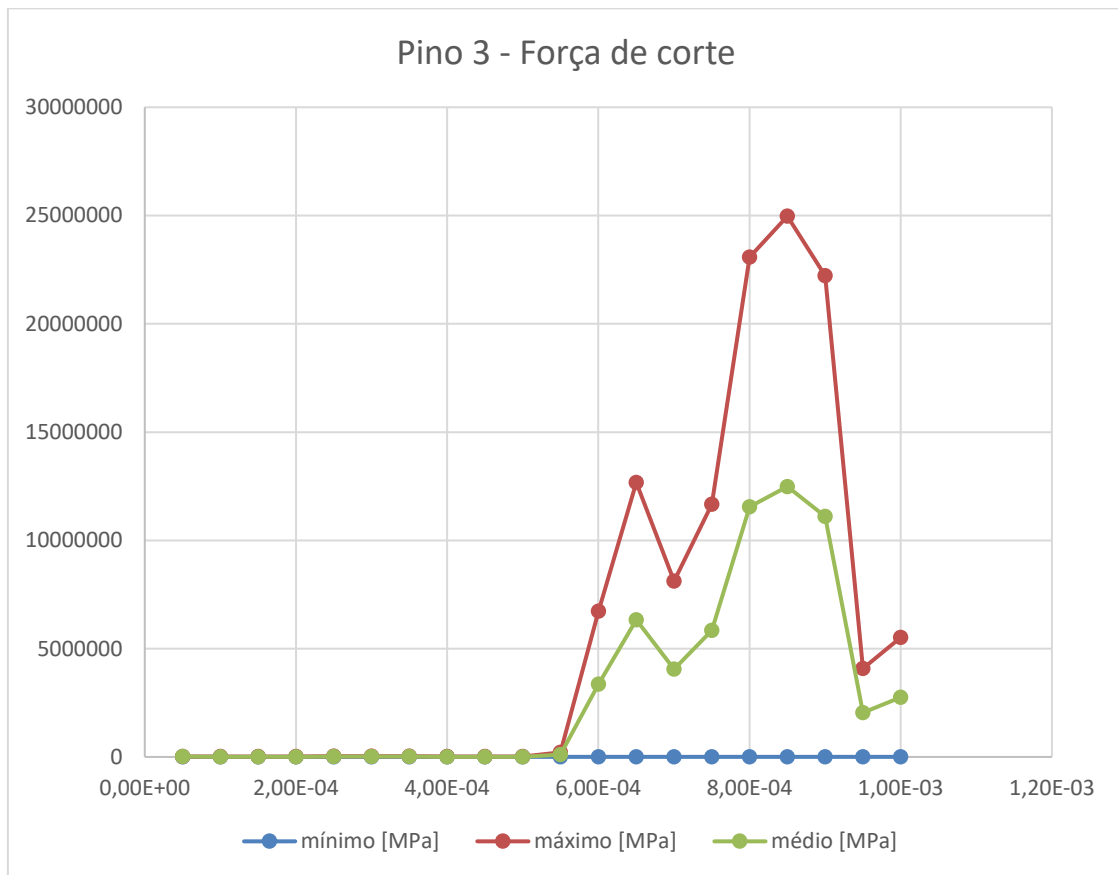


Tabela 6 - Pino 3: Análise do impacto do martelo

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	1.034.800,00	277.984.567,00	139.509.683,50
1,00E-04	1.584.800,00	289.073.456,00	145.329.128,00
1,50E-04	5.886.800,00	301.162.345,00	153.524.572,50
2,00E-04	4.315.300,00	313.251.234,00	158.783.267,00
2,50E-04	1.746.600,00	325.340.123,00	163.543.361,50
3,00E-04	1.103.800,00	337.429.012,00	169.266.406,00
3,50E-04	806.230,00	349.517.901,00	175.162.065,50
4,00E-04	999.320,00	230.606.790,00	115.803.055,00
4,50E-04	1.411.300,00	242.795.679,00	122.103.489,50
5,00E-04	2.175.900,00	254.884.567,00	128.530.233,50
5,50E-04	2.515.800,00	266.973.456,00	134.744.628,00
6,00E-04	1.482.400,00	278.062.345,00	139.772.372,50
6,50E-04	1.617.300,00	290.151.234,00	145.884.267,00
7,00E-04	1.198.800,00	302.240.123,00	151.719.461,50
7,50E-04	1.320.600,00	314.329.012,00	157.824.806,00

8,00E-04	1.281.100,00	326.417.901,00	163.849.500,50
8,50E-04	1.727.500,00	338.506.790,00	170.117.145,00
9,00E-04	1.774.100,00	350.595.679,00	176.184.889,50
9,50E-04	1.560.400,00	231.684.567,00	116.622.483,50
1,00E-03	1.289.900,00	243.773.456,00	122.531.678,00
Limite	806.230,00	350.595.679,00	175.700.954,50
SOLIDWORKS®	80.865,00	346.322.636,00	173.201.750,50

Gráfico 6 - Pino 3: Análise do impacto do martelo

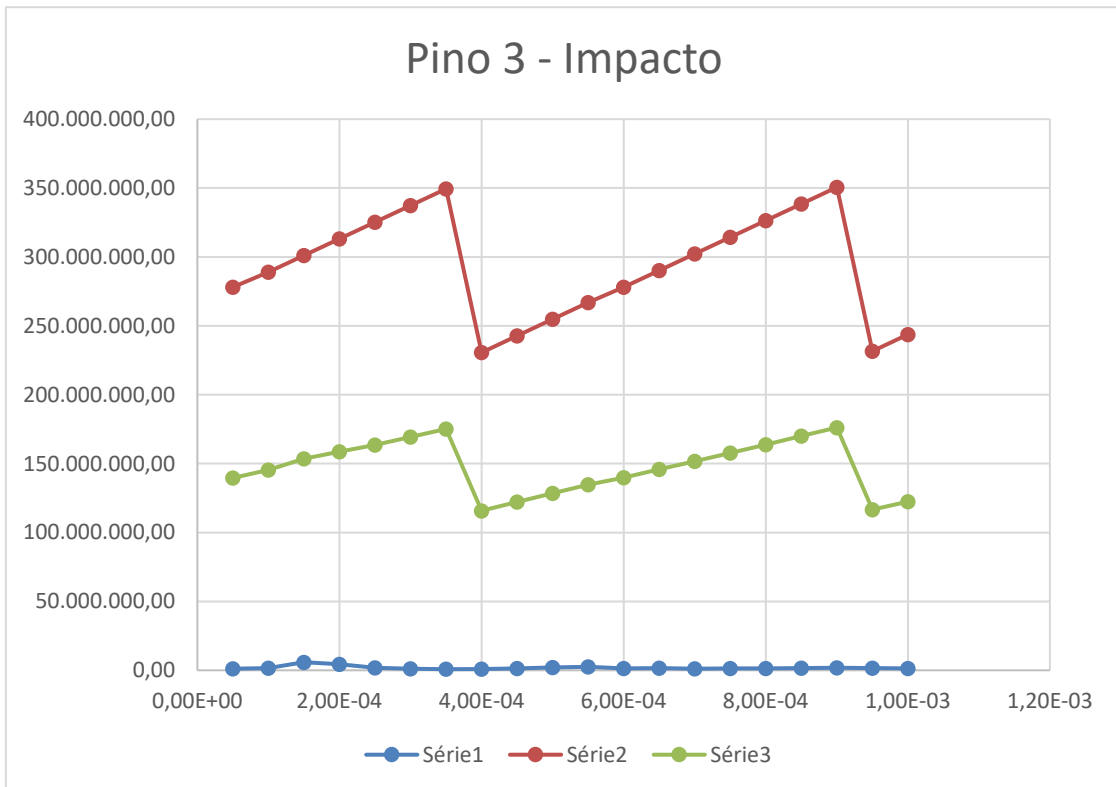


Gráfico 7 - Comparação: Análise da Força de corte

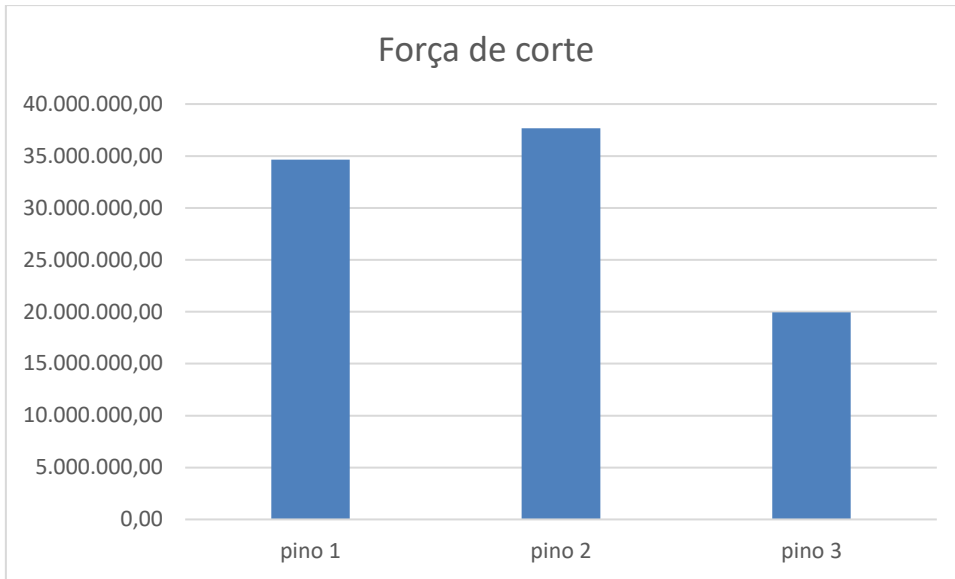
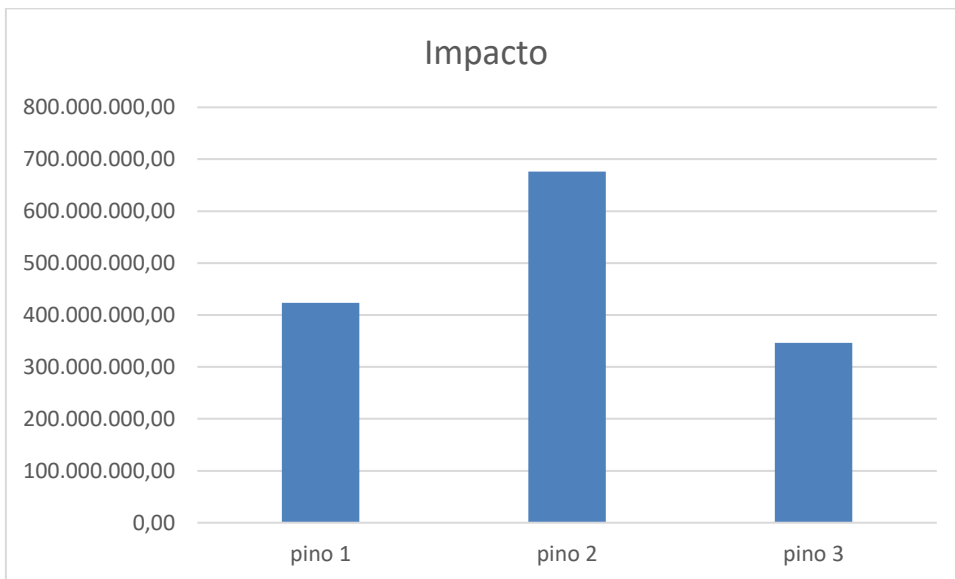


Gráfico 8 – Comparação: Análise do impacto do martelo



Nos resultados obtidos foi evidenciado que houve uma concentração de tensão muito superior à resistência do material, que é de 350 MPa, evidenciando que houve ruptura do sistema, ou seja, o pino não suportou tamanha carga.

Nos resultados que a carga foi inferior aos 350 MPa o pino suporta a carga e não há ruptura.

Na análise da força de corte do processo de usinagem, o pino 1 apresentou máxima tensão de 34 MPa, pino 2 apresentou tensão máxima de 73 MPa e o pino 3 apresentou tensão máxima de 25 MPa. Todos os pinos suportaram as forças de corte. O pino 3 foi o que apresentou a menor concentração de tensão devido ao seu formato.

Na análise da pressão gerada pelo impacto do aparato de *Quick-Stop*, o pino 1 apresentou máxima tensão de 443 MPa, pino 2 apresentou tensão máxima de 687 MPa e o pino 3 apresentou tensão máxima de 350 MPa. Os pinos 1 e 2 não suportaram o impacto do martelo, como desejado, e o pino 3 apresentou uma tensão igual ao limite de escoamento, o que indica que pode ocorrer a ruptura, porém não é um evento garantido.

Com os dados obtidos, fica claro que o tamanho de chanfro ideal é o do pino 1, visto que ele consegue suportar as forças de corte durante o processo e sofre a ruptura desejada no impacto do mecanismo de *Quick-Stop*. O pino 1 se mostra superior ao pino 2 pois este sofre um rompimento prematuro durante a operação de corte devido à maior concentração de tensão causada pelo formato, o que pode causar danos no equipamento. O evento do pino 3 (sem chanfro) se mostrou inadequado para o processo já que absorve toda a tensão e a transmite para o equipamento, podendo gerar danos na estrutura da máquina.

4.4 Têmpera dos pinos

Após a realização da simulação de impacto com os pinos dos casos 1,2 e 3, foi feito um estudo para caso de tratamento térmico nos pinos, para avaliar se a realização de têmpera possui significativa relevância no processo. A condição de têmpera foi considerada apenas para a geometria do pino 1, que foi a mais adequada seguindo as considerações anteriores. Foram escolhidas duas condições diferentes, ambos processos de têmpera a 60 minutos no forno a 900°C porém com diferença no método de resfriamento, o caso 1 foi para resfriamento a óleo e o caso 2 foi para resfriamento a água.

Tabela 7 - Pino 1 têmpera resfriada a óleo: Análise durante o corte

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	2.230,68	12.371,20	7.300,94
1,00E-04	2.232,44	12.407,00	7.319,72
1,50E-04	2.233,24	12.420,40	7.326,82
2,00E-04	2.429,04	29.292,40	15.860,72
2,50E-04	2.733,24	14.232,80	8.483,02
3,00E-04	2.576,84	13.886,40	8.231,62

3,50E-04	2.548,34	14.040,40	8.294,37
4,00E-04	2.551,04	14.127	8.339,12
4,50E-04	2.548,74	14.329,60	8.439,17
5,00E-04	2.535,54	16.154	9.344,97
5,50E-04	50.098,24	18.148	34.123,32
6,00E-04	47.140,64	277.232,24	162.186,44
6,50E-04	86.226,84	252.437,24	169.332,04
7,00E-04	63.122,24	298.284,64	180.703,44
7,50E-04	98.726,44	176.568,04	137.647,24
8,00E-04	85.287,24	2.600.321,64	1.342.804,44
8,50E-04	1.229.100,00	22.298.765,00	11.763.932,50
9,00E-04	1.253.300,00	23.328.571,00	12.290.935,50
9,50E-04	270.930,00	2.998.765,00	1.634.847,50
1,00E-03	575.550,00	3.665.432,00	2.120.491,00
Limite	2.230,68	23.328.571,00	11.665.400,84
SOLIDWORKS®	25.128,00	27.706.160,00	13.865.644,00

Tabela 8 - Pino 1 têmpera resfriada a óleo: Análise durante o impacto do martelo

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-04	4.642.160,00	320.266.629,60	162.454.394,80
1,00E-03	9.219.400,00	326.572.300,00	167.895.850,00
1,50E-03	8.149.600,00	293.893.000,00	151.021.300,00
2,00E-03	14.096.400,00	285.429.440,00	149.762.920,00
2,50E-03	8.831.200,00	269.132.000,00	138.981.600,00
3,00E-03	16.142.800,00	285.294.000,00	150.718.400,00
3,50E-03	8.450.400,00	338.465.000,00	173.457.700,00
3,53E-03	12.656.800,00	267.907.000,00	140.281.900,00
Limite	4.642.160,00	338.465.000,00	171.553.580,00
SOLIDWORKS®	52.853,00	346.298.448,00	173.175.650,50

Tabela 9 - Pino 1 têmpera resfriada a água: Análise durante o corte

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-05	7.874,60	30.020,00	18.947,30
1,00E-04	3.267,20	18.726,00	10.996,60
1,50E-04	3.268,00	18.802,00	11.035,00
2,00E-04	3.758,00	43.054,00	23.406,00
2,50E-04	4.001,00	19.947,00	11.974,00
3,00E-04	3.843,00	18.207,00	11.025,00
3,50E-04	3.813,00	18.414,00	11.113,50
4,00E-04	3.816,00	18.524,00	11.170,00
4,50E-04	3.814,00	18.747,00	11.280,50
5,00E-04	3.801,00	21.829,00	12.815,00

5,50E-04	82.790,00	26.727,00	54.758,50
6,00E-04	792.740,00	40.401.921,00	20.597.330,50
6,50E-04	1.311.950,00	30.386.807,00	15.849.378,50
7,00E-04	986.975,00	42.208.263,00	21.597.619,00
7,50E-04	1.420.925,00	25.074.506,00	13.247.715,50
8,00E-04	1.265.950,00	38.009.632,00	19.637.791,00
8,50E-04	1.567.350,00	1.489.752,00	1.528.551,00
9,00E-04	1.592.600,00	4.214.028,00	2.903.314,00
9,50E-04	361.255,00	42.900.875,00	21.631.065,00
1,00E-03	724.975,00	4.053.063,00	2.389.019,00
Limite	3.267,20	42.900.875,00	21.452.071,10
SOLIDWORKS®	35.289,00	44.996.252,00	22.515.770,50

Tabela 10 - Pino 1 têmpera resfriada a água: Análise durante o impacto do martelo

Tempo	mínimo [MPa]	máximo [MPa]	médio [MPa]
5,00E-04	6.238.320,00	440.400.708,80	223.319.514,40
1,00E-03	12.606.000,00	488.816.400,00	250.711.200,00
1,50E-03	10.518.200,00	431.844.000,00	221.181.100,00
2,00E-03	18.392.300,00	418.166.400,00	218.279.350,00
2,50E-03	11.225.200,00	421.864.800,00	216.545.000,00
3,00E-03	19.913.040,00	420.456.800,00	220.184.920,00
3,50E-03	11.429.280,00	515.133.200,00	263.281.240,00
3,53E-03	15.255.460,90	397.044.000,00	206.149.730,45
Limite	6.238.320,00	515.133.200,00	260.685.760,00
SOLIDWORKS®	84.445,68	500.377.341,28	250.230.893,48

Gráfico 9 - Comparação: Análise da Força de corte no tratamento térmico

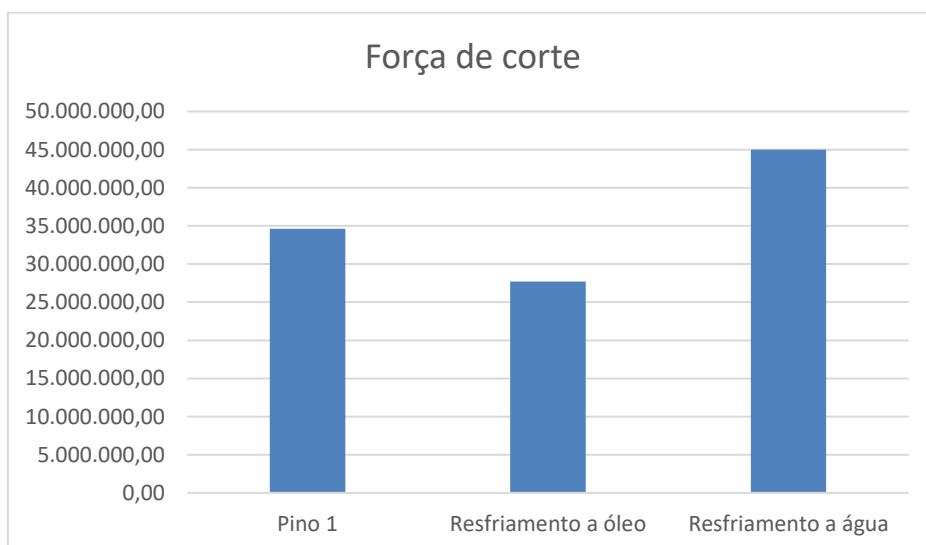
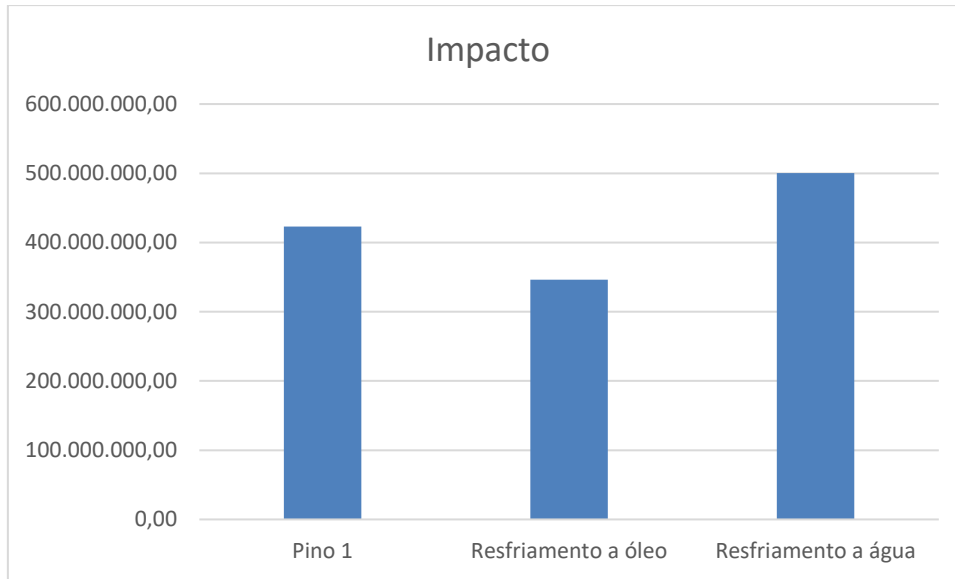


Gráfico 10 - Comparação: Análise do impacto no tratamento térmico



A partir dos dados coletados, conclui-se que o resfriamento a óleo reduziu as tensões e não deixou a peça mais frágil, o que resultou na absorção do impacto e o pino não quebra, pois o limite de escoamento do material é de 350Mpa, e as tensões não passaram esse valor. O resfriamento a água fragilizou os pinos e melhorou as condições de quebra no *Quick-Stop*, pois aumentou a concentração de tensão no impacto.

Assim, foi evidenciada que a realização do processo utilizando resfriamento a óleo não foi suficiente para fragilizar os pinos e reduziu as tensões, o que fez os pinos absorverem o impacto da cúica e não se romperem, já o resfriamento por água conseguiu deixar os pinos mais frágeis, melhorando o processo de quebra durante a operação de *Quick-Stop*, assim como evidenciado em “Influência das condições de têmpera na energia de impacto e fratura de barras de dispositivo quick-stop para usinagem” (REGES, 2023).

5 CONCLUSÕES

A concentração de tensão é um fenômeno que ocorre em um material quando há uma mudança abrupta em sua geometria, como é o caso de um chanfro em um pino. Quando um chanfro é criado em um pino, a mudança na geometria da peça causa uma alteração na distribuição do campo de tensão ao longo do material. Essa mudança abrupta pode resultar em um acúmulo de tensões em áreas específicas do chanfro, chamadas de pontos de concentração de tensão.

Os pontos de concentração de tensão são locais onde as tensões aplicadas ao material se acumulam e se tornam significativamente maiores do que a tensão média aplicada na peça. Essa concentração de tensão pode levar a um aumento da deformação plástica e, em alguns casos, a falhas no material. Por exemplo, em um pino com um chanfro mal dimensionado, a concentração de tensão pode levar a rachaduras ou fraturas no chanfro, reduzindo a resistência e a durabilidade da peça.

É evidenciado que o chanfro do pino gera a concentração de tensão necessária para o rompimento dele durante o processo de *Quick-Stop*, já que o aço utilizado na fabricação é resistente, o controle do processo se dá por meio do controle na concentração de tensão. Assim, o dimensionamento do chanfro é feito em função dos esforços de usinagem, que variam para cada tipo de corte de cada material e outras condições de processo.

Com base nos resultados obtidos no estudo dos pinos de QuickStop em usinagem, é possível concluir que a escolha do tipo de pino adequado é fundamental para garantir a eficiência e a segurança do processo de usinagem. Como já foi mencionado, a concentração de tensão gerada pelo chanfro do pino é essencial para o acionamento rápido do mecanismo, mas é preciso levar em consideração outros fatores como a resistência à deformação e à ruptura.

A tensão gerada pela concentração de tensão obtida pela alteração do tamanho do chanfro na geometria dos pinos sofreu um aumento de 8.76% entre os pinos 1 e 2 no teste de força de corte e um aumento de 59.82% no teste de impacto

O pino 1 mostrou-se ser o mais adequado para o processo, já que suporta as forças de usinagem e apresentou uma boa quebra pelo impacto do martelo, de modo a não danificar o sistema. O pino 2 mostrou-se muito frágil para suportar as forças de usinagem, podendo ser rompido caso haja alguma interferência que cause um aumento brusco de força durante o corte do metal. O pino 3 foi muito resistente às forças de usinagem, de modo que ao sofrer baixa deformação, as forças resultantes do processo poderiam sobrecarregar outros componentes da máquina de usinagem, além do que durante o ensaio de impacto, ele suportou a carga de

impacto, não sofrendo rompimento pelo acionamento do *Quick-Stop*, assim danificando o sistema e inutilizando o propósito da parada rápida do mecanismo.

A tensão gerada pela concentração de tensão, após o tratamento térmico dos pinos, sofreu um aumento de 29.92% entre os pinos 1 e o resfriado a água no teste de força de corte e um aumento de 18.23% no teste de impacto.

A tensão gerada pela concentração de tensão, após o tratamento térmico dos pinos, sofreu uma redução de 19.99% entre os pinos 1 e o resfriado a óleo no teste de força de corte e uma redução de 18.17% no teste de impacto.

Além disso, o processo de resfriamento a óleo não foi eficaz em fragilizar os pinos, reduzindo as tensões e permitindo que absorvessem o impacto sem rompimento durante a operação da cuíca. Por outro lado, o resfriamento por água foi mais bem-sucedido em tornar os pinos mais frágeis, aprimorando o processo de quebra durante o *Quick-Stop*.

Entre os testes realizados no estudo, a alteração que apresentou maior efeito sobre as tensões geradas foi a alteração da geometria, pois essa pode gerar pontos de concentração de tensão que aumentam consideravelmente as tensões máximas geradas nos testes de estresse do pino. O tratamento térmico influencia o processo porém somente altera as propriedades do material e não gera novos pontos de concentração de tensão.

Dessa forma, é importante levar em consideração as características do material a ser usinado, as forças a serem aplicadas e as limitações da máquina de usinagem ao escolher o tipo de pino adequado. Uma escolha inadequada pode levar a falhas no material, danos à máquina ou mesmo colocar em risco a integridade física dos operadores envolvidos no processo.

REFERÊNCIAS

- SILVA, Márcio Aurélio et al. Adaptação de arma de fogo a um dispositivo de quick-stop.
- LUIZ, Nelis Evangelista et al. Usinabilidade do aço de corte-fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais (cromo, níquel e cobre). 2007.
- SILVA, Flávia Cristina Sousa et al. Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco. 2007.
- SOUSA, Marcelo do Nascimento et al. 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.
- MHAMDI, Mohamed Baccar et al. A new quick-stop device to study the chip formation mechanism in metal cutting: Computational and experimental investigation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 236, n. 6, p. 2884-2900, 2022. <https://doi.org/10.1177/09544062211034210>
- STOLARSKI, Tadeusz; NAKASONE, Yuji; YOSHIMOTO, Shigeka. Engineering analysis with ANSYS software. Butterworth-Heinemann, 2018.
- CHERN, Gwo-Lianq. Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 7-8, p. 789-794, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.013>
- ELLIS, J.; KIRK, R.; BARROW, G. The development of a quick-stop device for metal cutting research. International Journal of Machine Tool Design and Research, v. 9, n. 3, p. 321-339, 1969. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(69\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0020-7357(69)90007-9)
- BROWN, R. H. A double shear-pin quick-stop device for very rapid disengagement of a cutting tool. International Journal of Machine Tool Design and Research, v. 16, n. 2, p. 115-121, 1976. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(76\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0020-7357(76)90029-9)
- WU, C. L.; WANG, K. S.; TSAI, L. C. A new electromagnetic quick stop device for metal cutting studies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 29, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2608-y>
- MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015.
- ASTAKHOV, V. P. Tribology of Metal cutting. 1. ed. Elsevier, 2006. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31683-8_1
- KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1: Cutting. Londres: Editora Springer, 2011. 517 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>
- FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos materiais. Edgard Blücher, SP, 1977.

COELHO, Reginaldo T. et al. FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE EM TORNEAMENTO, 2018.

MACHADO, A.R.; SILVA, M.B. Usinagem dos Materiais. Universidade Federal de Uberlândia, 8ª edição, 2004.

NORONHA, Alexandre Martins de et al. Desenvolvimento de um quebra-cavacos para a operação de roscamento do aço ABNT 4133 modificado. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 20, p. 353-367, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0036>

REGES, Thiago França. Influência das condições de têmpera na energia de impacto e fratura de barras de dispositivo quick-stop para usinagem. 2023.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K. *Metal Cutting*. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

WALKER, J. M. *Handbook of Manufacturing Engineering*. New York: Marcel Dekker, 1996.