

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXSANDER NUNES OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE ENSAIO QUICK STOP PARA
AVALIAR A FORMAÇÃO DO CAVACO

São Leopoldo

2021

ALEXSANDER NUNES OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE ENSAIO QUICK STOP PARA
AVALIAR A FORMAÇÃO DO CAVACO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Engenharia Mecânica, pelo Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Eng. Mec. Walter Andrey Fontana

São Leopoldo

2021

Dedico este trabalho à minha esposa, ao meu filho, à minha mãe, aos meus irmãos, amigos e colegas. Também dedico à minha avó Olinda Nunes (*in memoriam*), que contribuiu para a escolha de minha profissão, e aos meus irmãos Valter (*in memoriam*) e Elton (*in memoriam*) que infelizmente não puderam estar presentes neste momento tão importante da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Eng. Mec. Walter Andrey Fontana, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio e dedicação que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu filho Alison, que abdicou horas de lazer, para estar ao meu lado em incessantes momentos de pesquisas.

Ao corpo docente desta instituição, que fizeram parte de minha trajetória contribuindo para o meu aprendizado.

“Não existe assunto tão antigo que não se possa dizer algo novo sobre ele”.
(DOSTOIÉVSKI apud NORTON, 2013, p. 29).

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto detalhado e a fabricação de um dispositivo de ensaio que foi desenvolvido, e utilizado em torno mecânico, para a obtenção de amostras por meio de parada rápida da ferramenta para avaliar a formação do cavaco por análise metalográfica. Para isso, são apresentados os requisitos de projeto e a fundamentação teórica necessária para efetuar os cálculos e dimensionamento do *quick stop device* (QSD) proposto. Diante do conhecimento da força de corte máxima utilizada no torno de ensaios e demais preceitos foram efetuados os cálculos e o projeto do dispositivo, o modelamento foi executado no software 3d Autodesk Inventor Professional 2022. Para a fabricação do QSD utilizou-se máquinas, equipamentos e ferramentas disponíveis nos laboratórios da Universidade Unisinos. Após a fabricação do protótipo foram efetuados os ensaios com doze amostras variando velocidade de corte, microestrutura, avanço e inserto. Os corpos de prova foram analisados por metalografia, onde foi possível capturar imagens para avaliação da região de cisalhamento, zona de fluxo, formação de aresta postiça de corte (APC). Com auxílio do software ImageJ foram coletadas medidas da espessura do cavaco antes de formado, a espessura do cavaco recalcado e do ângulo de cisalhamento. Com estes dados foi possível gerar gráficos que contribuem para análise comparativa de variados parâmetros de usinagem. Os resultados encontrados foram satisfatórios onde é possível verificar, por exemplo, a influência da APC na região de fluxo ou a comparação do ângulo de cisalhamento com diferentes materiais.

Palavras-chave: Quick Stop Device. Raiz do cavaco. Ângulo de cisalhamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de usinagem PrimeTurning™	16
Figura 2 – Representação da seção de corte.....	20
Figura 3 – Representação das relações geométricas h e h'	20
Figura 4 – Regiões de deformação e micrografia da raiz do cavaco	22
Figura 5 – Formas de cavacos conforme ISO 3685	23
Figura 6 – Efeito do avanço e profundidade de corte na forma dos cavacos.....	23
Figura 7 – Plano de cisalhamento e zona de fluxo por Trent.....	26
Figura 8 – Alongamento da perlita por Trent	26
Figura 9 – Aresta postiça de corte por Trent	27
Figura 10 – <i>Quick stop device</i> acionado por arma de fogo desenvolvido por Ellis....	28
Figura 11 – <i>Quick Stop</i> acionado por impacto de arma de fogo	28
Figura 12 – Modelo (a) acionado por explosão e modelo (b) por força de mola	29
Figura 13 – Dispositivo QSD pneumático	29
Figura 14 – Modelo desenvolvido por Chern	30
Figura 15 – Sentido de avanço por Chern.....	30
Figura 16 – Dispositivo mecânico com acionamento pneumático	31
Figura 17 – Sentido de avanço por Lucas	31
Figura 18 – Força de usinagem em torneamento	32
Figura 19 – Macro fases e fases do PDP	39
Figura 20 – Foto do torno IH40	40
Figura 21 – Disposição para fixação do dispositivo no torno	41
Figura 22 – Representação do funcionamento QSD	43
Figura 23 – Esforços e reações	43
Figura 24 – Modelagem do dispositivo fixo no Inventor	46
Figura 25 – Modelagem do suporte móvel no Inventor.....	47
Figura 26 – Modelagem do dispositivo travado (esquerda) e acionado (direita)	47
Figura 27 – Vista explodida do conjunto Quick Stop Device	48
Figura 28 – Foto do dispositivo desenvolvido.....	50
Figura 29 – Atuador pneumático para acionar o dispositivo	51
Figura 30 – Dispositivo instalado no torno.....	51
Figura 31 – Dispositivo desarmado e cavaco fixo na peça	52
Figura 32 – Movimento para rearmar o dispositivo.....	52

Figura 33 – Corpos de prova aço ABNT 1141 com formação de cavaco	53
Figura 34 – Amostras cortadas prontas para embutir.....	54
Figura 35 – Amostras embutidas.....	54
Figura 36 – Equipamento óptico Olympus CX31	55
Figura 37 – Ilustração com o dispositivo rearmado após teste	56
Figura 38 – Amostra 1A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	57
Figura 39 – Amostra 1B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	57
Figura 40 – Amostra 1C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	58
Figura 41 – Amostra 2A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.	58
Figura 42 – Amostra 2B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.	59
Figura 43 – Amostra 2C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.	59
Figura 44 – Amostra 3A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.....	60
Figura 45 – Amostra 3B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.....	60
Figura 46 – Amostra 3C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.....	61
Figura 47 – Amostra 4A, Aço 1050, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	61
Figura 48 – Amostra 4B, Aço 1050, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	62
Figura 49 – Amostra 4C, Aço 1050, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x. ...	62
Figura 50 – Ângulo de cisalhamento (ϕ), espessuras do cavaco h e h'	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Pressão específica de corte x avanço.....	35
Gráfico 2 – Pressão específica de corte x profundidade de corte.....	36
Gráfico 3 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função do material.....	64
Gráfico 4 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função da velocidade de corte....	64
Gráfico 5 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função da geometria da pastilha	65

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	ângulo de cisalhamento	(°)
γ	ângulo de saída da ferramenta	(°)
λ_s	ângulo de inclinação	(°)
θ_{rev}	deflexão angular da mola	[]
σ_{cis}	tensão cisalhante	(Pa)
A	área	(mm ²)
ap	profundidade de corte	(mm)
Cs	coeficiente de segurança	[]
d	diâmetro do arame da mola	(mm)
D	diâmetro	(mm)
D _{mín}	diâmetro mínimo	(mm)
Di _{mín}	diâmetro mínimo à flexão da mola	(mm)
E	módulo de elasticidade	(GPa)
F	força	(Kgf)
F _{ap}	força de apoio	(N)
FC	força de corte	(N)
F _f	força de avanço	(N)
f _n	avanço	(mm/rot)
F _p	força passiva	(N)
F _U	força de usinagem	(N)
F _y	força no eixo y	(N)
h	espessura do cavaco antes de formado	(mm)
h'	espessura do cavaco depois de formado	(mm)
K _s	força específica de corte	(N/mm ²)
K _{s1}	constantes do material	(N/mm ²)
L1	braço da mola	(mm)
L2	braço da mola	(mm)
M	momento	(N.m)
MB	momento em B	(N.mm)
M _t	momento torçor	(N.mm)
n	rotação	(rpm)

Na	número de espiras ativas	[]
Nb	número de espiras da mola	[]
Ne	número equivalente de espiras	[]
Pc	potência de corte	(Kw)
PF	geometria da pastilha	[-]
PR	geometria da pastilha	[-]
r ϵ	raio de ponta da ferramenta	(mm)
RA	reação em A	(N)
RB	reação em B	(N)
Rc	grau de recalque	[]
Suc	máxima resistência à compressão	(Pa)
Sut	máxima resistência à tração	(Pa)
Sy	tensão normal de escoamento	(Pa)
Sys	tensão de cisalhamento no escoamento	(Pa)
Vc	velocidade de corte	(m/min)
Xr	ângulo de posição	(°)
z	constantes do material	[]

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de aços resulfurados	24
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem para obtenção das amostras.....	53
Tabela 3 – Ângulo de cisalhamento	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
APC	Aresta postiça de corte
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido Por Computador)
Isso	Society of Automobile Engineers
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
QSD	Quick stop device (Dispositivo de Parada Rápida)
SAE	Organização Internacional de Normalização

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema	16
1.2 Delimitação do Tema	16
1.3 Problema	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo Geral	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 Justificativa	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 A formação do cavaco e o plano de cisalhamento	18
2.1.1 Parâmetros de formação de cavaco.....	19
2.1.2 Classificação de cavacos	22
2.1.3 Formação do cavaco em aços resulfurados	24
2.2 Sistemas de observação e mensuração do plano de cisalhamento	25
2.2.1 Sistemas de observação direta	25
2.2.2 Sistemas <i>quick stop</i>	27
2.2.3 Vantagens e desvantagens	31
2.3 Forças no torneamento	32
2.3.1 Método de cálculo	33
2.3.2 Parâmetros e fatores de influência	34
3 METODOLOGIA	37
3.1 Fluxograma do projeto	38
3.2 Projeto do dispositivo	38
3.2.1 Requisitos	39
3.2.2 Concepções de dispositivo.....	41
3.2.3 Projeto.....	42
3.3 Fabricação	48
3.3.1 Técnicas de fabricação aplicadas ao dispositivo	49
3.4 Análise	55
3.4.1 Ensaios metalográficos (avaliação da microestrutura).....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Sobre o dispositivo	56

4.2 Resultados das metalografias.....	57
4.3 Medição do ângulo de cisalhamento	62
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICE A – PROJETO DETALHADO DO DISPOSITIVO QUICK STOP.....	69
ANEXO A – VALORES DE $K_{S,0,4}$ TABELADO	74
ANEXO B – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	77
ANEXO C – CATÁLOGO CILINDROS PNEUMÁTICOS.....	79

1 INTRODUÇÃO

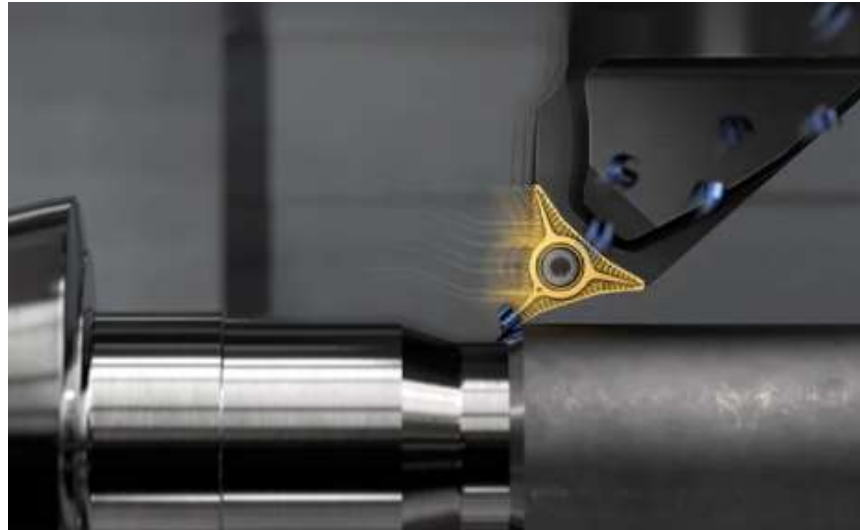
Com a otimização de processos na usinagem e à medida que a indústria evolui se faz necessário o desenvolvimento de ferramentas e novos materiais que atendam as mais variadas complexidades do setor. Para o desdobramento desta questão, o estudo da formação dos cavacos se torna fundamental proporcionando embasamento na obtenção de novas geometrias de corte e microestruturas. Uma alternativa para a análise é a utilização de um dispositivo de parada rápida de corte que tem a função de preservar a raiz do cavaco.

Na sua formação, antes da ruptura, o cavaco é recalçado e deformado. Essa deformação progride gerando zonas de tensão e de cisalhamento que podem ser examinadas por metalografia. O entendimento da formação dos cavacos permite aprimorar ferramentas, máquinas, ligas e materiais tanto para indústria aeroespacial quanto para os setores agrícolas e hospitalares.

O *quick stop device* (QSD) é um equipamento de ensaio, relativamente simples, responsável por afastar repentinamente a ferramenta da zona de corte deixando o cavaco formado e unido ao corpo de prova. Estes dispositivos são normalmente utilizados em tornos e consistem basicamente em uma ferramenta que gira sobre um eixo acelerada pela ação de uma mola ou explosivo. O QSD foi apresentado à literatura, desde os anos 1950, por diversos autores com variadas configurações e alguns com características peculiares no projeto.

São inúmeras aplicações e há muitas oportunidades relacionadas ao estudo da formação dos cavacos. Recentemente a Sandvik lançou a metodologia PrimeTurning™ que permite a usinagem em variadas direções de maneira produtiva e eficiente. O conceito está vinculado à otimização e utilização de software com ferramentas específicas de torneamento como mostrado na figura 1. O desenvolvimento de novos formatos de pastilhas e parâmetros de usinagem são resultados do conhecimento das forças e deformações associadas ao comportamento do material na formação dos cavacos. (SANDVIK, 2020).

Figura 1 – Ilustração de usinagem PrimeTurning™



Fonte: Sandvik (2020, p 1).

1.1 Tema

Neste trabalho será desenvolvido e fabricado um dispositivo de ensaio, a ser utilizado em torno mecânico, para avaliação da formação dos cavacos por análise metalográfica. Serão utilizados materiais disponíveis nos laboratórios da Universidade Unisinos para a confecção do equipamento e observação das amostras por microscopia.

1.2 Delimitação do Tema

Não fazem parte do escopo deste trabalho análise por elementos finitos e considerações térmicas inerentes da formação do cavaco.

1.3 Problema

Neste trabalho serão apresentados o desenvolvimento e a aplicação de um dispositivo para avaliar o comportamento do plano de cisalhamento variando avanço, velocidade de corte, geometria da ferramenta e material. Este tipo de avaliação permite reduzir as incertezas do projeto de ferramentas e materiais para usinagem e contribui para o entendimento dos fenômenos de formação do cavaco na usinagem.

1.4 Objetivos

Os objetivos são divididos em geral e específicos, os quais são descritos na sequência do texto.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um dispositivo de ensaio quick stop para avaliar a formação do cavaco.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Projetar e fabricar um dispositivo de parada rápida;
- b) Testar o desempenho do dispositivo em amostras com variação de microestrutura, velocidade de corte, inserto e avanço;
- c) Analisar a formação dos cavacos nas amostras por ensaio metalográfico.

1.5 Justificativa

Com base nas necessidades de desenvolvimento de novos materiais tanto com intuito adquirir ligas de fácil usinabilidade quanto para usinagem de novas ligas de titânio, ligas à base de níquel e polímeros reforçados com fibra de carbono, torna-se fundamental a análise do comportamento de diversos materiais e ferramentas. Muitas das teorias relacionadas à usinagem são derivadas do estudo da formação do cavaco por meio de dispositivos de parada rápida da ferramenta.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos de usinagem inerentes ao escopo deste trabalho de pesquisa e desenvolvimento. Deste modo, alguns dos fundamentos mais relevantes da usinagem dos metais e sistemas de mensuração do plano de cisalhamento serão demonstrados na sequência.

2.1 A formação do cavaco e o plano de cisalhamento

Em um processo de usinagem a formação do cavaco está diretamente relacionada com aspectos econômicos e de qualidade da peça usinada devido à sua influência nos fatores de desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor produzido na usinagem, dentre outros. No processo de formação de cavaco também estão envolvidos aspectos de melhor performance na utilização da máquina-ferramenta e indispensavelmente na segurança do operador. (DINIZ *et al.*, 2010).

O estudo experimental da usinagem é de essencial importância, pois a *teoria da plasticidade* não permite explicar satisfatoriamente os fenômenos observados. No processo de formação do cavaco, as velocidades de corte e as deformações que ocorrem são muito grandes, comparadas com aquelas tratadas na teoria da plasticidade. (FERRARESI, 1970, p. 89, grifo do autor).

De acordo com Ferraresi (1970), a formação de cavaco em condições normais de usinagem geralmente procede da seguinte forma:

- a) o cavaco é recalçado (ainda unido à peça) contra a superfície de saída da ferramenta devido a penetração da ferramenta na peça;
- b) o material recalçado sofre uma deformação plástica contínua e progressiva, até que as tensões de cisalhamento aumentem dando origem a um deslizamento entre o cavaco e a peça. Este deslizamento é realizado segundo aos planos de cisalhamento dos cristais, gerando assim a região de cisalhamento;
- c) continuando o avanço ocorre a ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e condições de usinagem;

- d) na sequência inicia-se um escorregamento do cavaco deformado e cisalhado sobre a superfície da ferramenta, repetindo conseqüentemente o fenômeno.

Em consideração a isso, o fenômeno de formação de cavaco comporta-se como um fenômeno periódico alternando entre fase de recalque e fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido. (BASTIEN apud FERRARESI, 1970).

2.1.1 Parâmetros de formação de cavaco

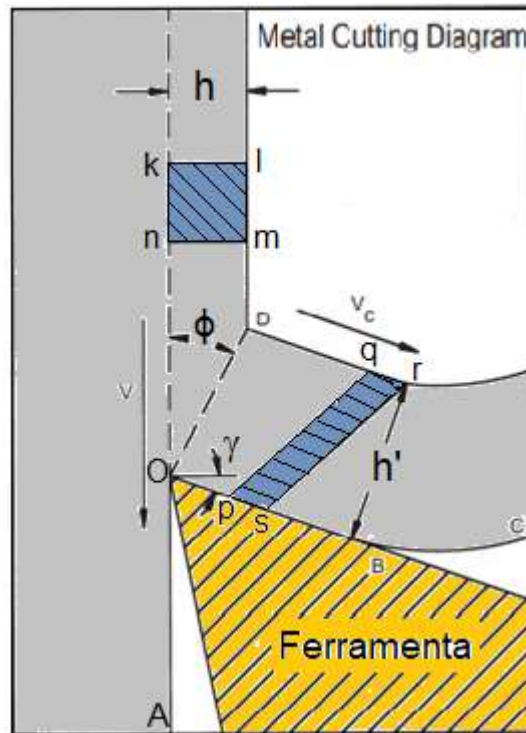
De forma analítica, para o estudo da formação do cavaco faz-se necessário assimilar a região de cisalhamento à um plano de cisalhamento. Utiliza-se o corte ortogonal como exemplo para consideração de um fenômeno bidimensional. Algumas simplificações são citadas por diversos autores.

De acordo com Machado *et al.* (2012), são admitidas algumas simplificações que permitem um tratamento matemático do corte ortogonal e podem ser aplicadas a outras operações de usinagem. Admite-se então, que:

- a) os cavacos são do tipo contínuos e sem formação de aresta postiça de corte;
- b) não existe contato entre a superfície da peça e superfície de folga da ferramenta;
- c) a espessura de corte, equivalente ao avanço, é pequena em relação à largura de corte;
- d) a largura da aresta de corte é maior que a largura de corte;
- e) a largura de corte é igual à largura do cavaco;
- f) a aresta de corte é perpendicular ao plano de trabalho e idealmente afiada.

O ângulo formado entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é denominado de ângulo de cisalhamento (ϕ). A área da seção (K-n-l-m) ilustra o material antes do contato com a ferramenta, e a área (p-s-q-r) representa o perfil do cavaco já recalcado após ter passado pelos regimes de deformação elástica e plástica dependendo da ductilidade do material. Esta representação pode ser entendida na figura 2. (TRENT *et al.*, 2000).

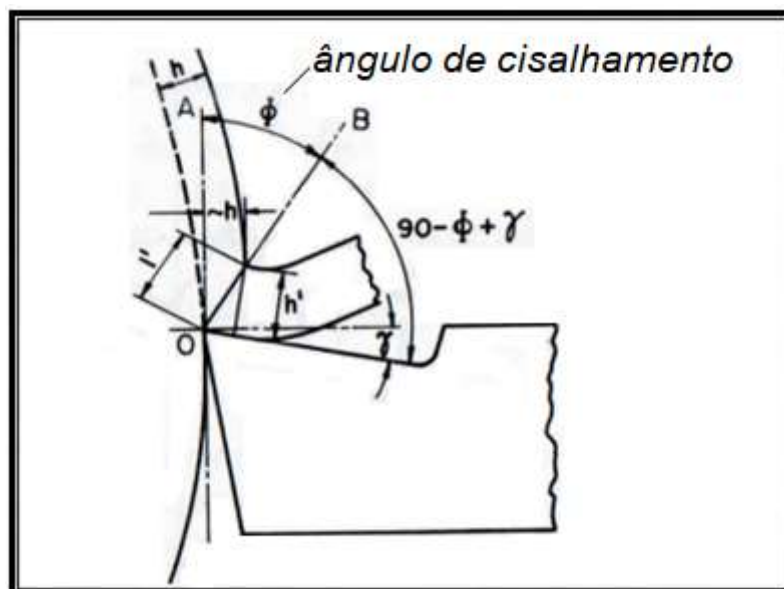
Figura 2 – Representação da seção de corte



Fonte: Adaptado pelo autor de Trent *et al.* (2000, p 22).

Na figura 3 pode-se verificar além das relações geométricas (h) e (h'), o ângulo de saída da ferramenta (γ) e o plano de cisalhamento (O-B) o qual forma o ângulo de cisalhamento (ϕ) com o plano de corte (A-O).

Figura 3 – Representação das relações geométricas h e h'



Fonte: Adaptado pelo autor de Ferraresi (1970, p 109).

Enfatizando as relações geométricas na formação dos cavacos, quanto menor o ângulo de saída da ferramenta (γ), maior será a variação da direção de fluxo do cavaco, maior sua deformação e menor será o ângulo de cisalhamento (ϕ). Como efeito, maior será o grau de recalque (Rc) definido pela razão da espessura do cavaco depois de formado (h') pela espessura do cavaco antes de formado (h), expressa na equação (1). (DINIZ *et al.*, 2010).

$$Rc = \frac{h'}{h} \quad (1)$$

Onde, (h') obtém-se pela medição direta do cavaco recalcado e (h) pode ser obtido pelas condições de usinagem de avanço (fn) e o ângulo de posição (Xr) conforme equação (2).

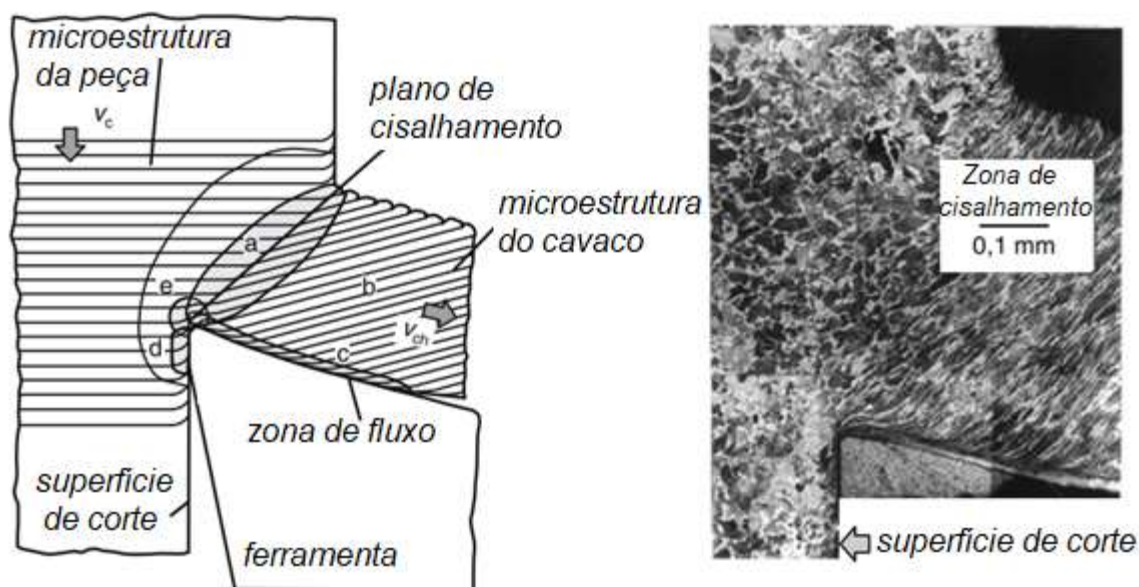
$$h = fn * \text{sen}(Xr) \quad (2)$$

O ângulo de cisalhamento pode elucidar a quantidade de deformação exercida na região de cisalhamento, assim dizendo, quando o grau de recalque possuir valores elevados o ângulo de cisalhamento será pequeno, indicando que houve uma grande deformação na região. Pode-se obter o ângulo (ϕ) pela equação (3).

$$\tan \phi = \frac{\cos \gamma}{Rc - \text{sen} \gamma} \quad (3)$$

A figura 4 demonstra o plano de cisalhamento, a região de deformação pelo gume da ferramenta, deformação na superfície de corte e a região de fluxo interno do cavaco no deslizamento sobre a ferramenta. Também é possível verificar estas regiões de deformação na micrografia da raiz do cavaco exemplificada na figura. (KLOCKE, 2011).

Figura 4 – Regiões de deformação e micrografia da raiz do cavaco



Fonte: Adaptado pelo autor de Klocke (2011, p49)

2.1.2 Classificação de cavacos

Conforme Ferraresi apud Diniz *et al* (2010), os cavacos são classificados de diversas maneiras. Em simplificação, os métodos mais didáticos são os que identificam por tipo e formas. Os tipos de cavacos podem ser descritos como:

- a) cavaco contínuo: são constituídos por lamelas (grãos cristalinos) justapostas numa distribuição contínua. A distinção das lamelas não é nítida. São derivadas da usinagem de materiais dúcteis, onde o ângulo de saída deve assumir valores elevados;
- b) cavaco de cisalhamento: na sua formação apresenta grupos lamelares justapostos e bem distintos. Estes elementos de cavaco foram cisalhados na região de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida;
- c) cavaco de ruptura: são constituídos por fragmentos arrancados da peça usinada. Apresenta uma ruptura completa do material em grupos lamelares, os quais permanecem separados.

As formas de cavaco são:

- a) cavaco em fita;
- b) cavaco helicoidal;
- c) cavaco espiral;

d) cavaco em lascas ou pedaços.

A figura 5 apresenta a classificação dos cavacos conforme a norma ISO 3685 (1993), são representados de uma forma mais detalhada. (MACHADO *et al.*, 2012).

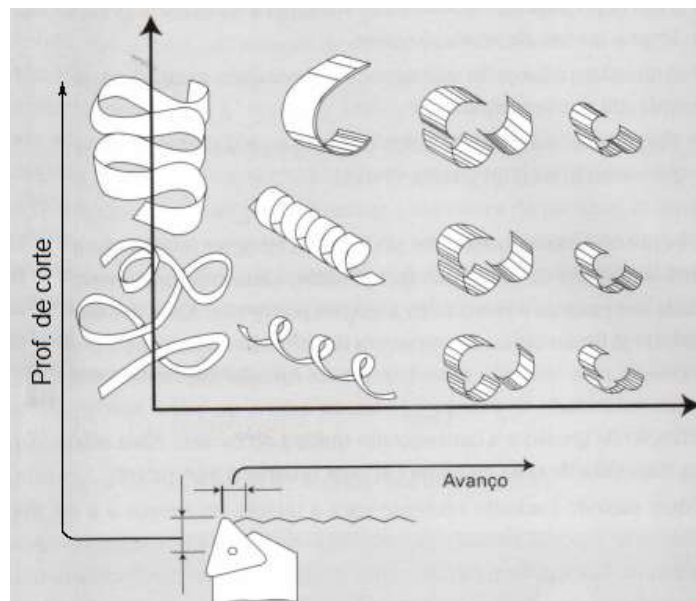
Figura 5 – Formas de cavacos conforme ISO 3685

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal 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- Conectado		
							
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: ISO 3685 apud Machado *et al* (2012, p72)

O efeito do avanço e da profundidade de corte tem grande relevância na formação dos cavacos, e está representado de forma ilustrativa na figura 6.

Figura 6 – Efeito do avanço e profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: Smith apud Machado *et al* (2012, p73)

A maior influência na forma e no tipo do cavaco está relacionada ao material da peça usinada, seguido dos parâmetros de corte onde o avanço influencia mais do que a profundidade de corte. Apesar das atuações dos parâmetros de corte, o método mais efetivo para produzir cavacos curtos é a utilização de quebra-cavacos. (MACHADO *et al.*, 2012).

2.1.3 Formação do cavaco em aços resulfurados

Os aços que apresentam fácil usinabilidade são aqueles que contém em sua microestrutura, de modo controlado, inclusões não metálicas. Essas inclusões são de sulfeto de manganês pelo acréscimo de enxofre e manganês, formando uma série de sulfetos que são insolúveis no aço. Elas causam a formação de um cavaco quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante impedindo a formação de aresta postiça de corte. (CHIAVERINI, 1990).

A tabela 1 apresenta a composição química de alguns aços resulfurados.

Tabela 1 – Composição química de aços resulfurados

Faixas de composição de aço-carbono SAE-AISI resulfurados			
Designação AISI-SAE	Composição %		
	C	Mn	S
1110	0,08-0,03	0,30-0,60	0,08-0,13
1117	0,14-0,20	1,00-1,30	0,08-0,13
1118	0,14-0,20	1,30-1,60	0,08-0,13
1137	0,32-0,39	1,35-1,65	0,08-0,13
1139	0,35-0,43	1,35-1,65	0,13-0,20
1140	0,37-0,44	0,70-1,00	0,08-0,13
1141	0,37-0,45	1,35-1,65	0,08-0,13
1144	0,40-0,48	1,35-1,65	0,24-0,33
1146	0,42-0,49	0,70-1,00	0,08-0,13
1151	0,48-0,55	0,70-1,00	0,08-0,13

O fósforo é mantido no máximo a 0,040%. Devido ao efeito adverso do silício sobre a usinabilidade, estes aços não são desoxidados com silício.

Fonte: adaptado de Chiaverini (1990, p277).

As inclusões melhoram a usinabilidade dos aços gerando na zona de cisalhamento a presença de um campo de tensão heterogêneo com uma intensa concentração de tensões em torno destas inclusões, ocasionando micro trincas e favorecendo a fragmentação do cavaco. (PEREIRA *et al.*, 2005).

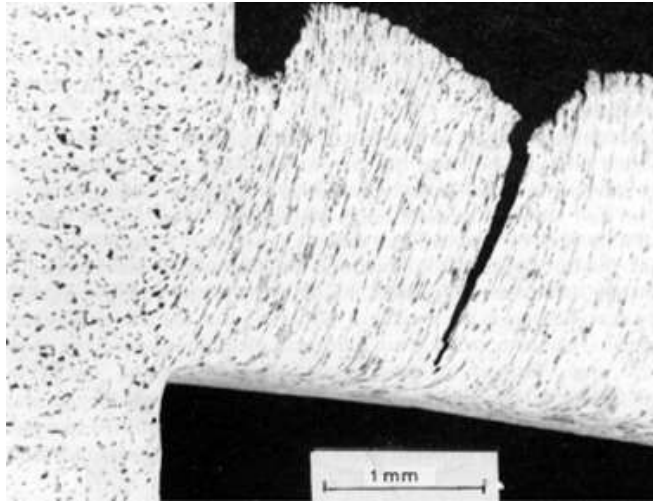
2.2 Sistemas de observação e mensuração do plano de cisalhamento

Como supramencionado, o plano de cisalhamento é fortemente utilizado para análise da formação do cavaco. Devido às condições usuais de corte, os estudos relacionados às deformações nas zonas de cisalhamento têm se mostrado um grande desafio principalmente por conta das altas velocidades. A maior parte das teorias atuais foram fundamentadas nas pesquisas envolvendo equipamentos do tipo Quick Stop Device (QSD), em que a ferramenta é retraída com velocidade superior à velocidade de corte preservando assim a raiz do cavaco para análise detalhada por metalografia. (MACHADO *et al.*, 2012).

2.2.1 Sistemas de observação direta

Em observação do plano de cisalhamento por micrografias percebe-se que a maior parte da deformação ocorre na zona de cisalhamento primária, mas o cavaco se move como um corpo rígido em atrito com a superfície da ferramenta gerando a zona de cisalhamento secundária onde também ocorrem deformações severas. Imagens para estudo podem ser obtidas através de uma parada rápida do corte. A figura 7 exemplifica esta observação. (TRENT *et al.*, 2000).

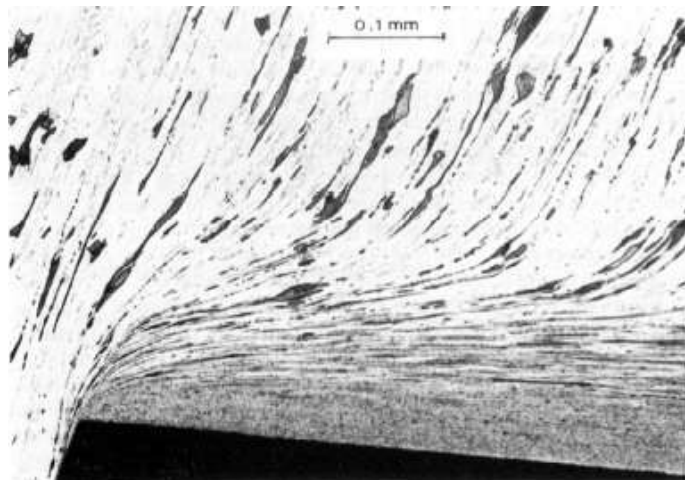
Figura 7 – Plano de cisalhamento e zona de fluxo por Trent



Fonte: Trent *et al* (2000, p 42).

A figura 8 mostra o plano de cisalhamento com deformação e alongamento de perlita e uma região altamente deformada perto da interface cavaco-ferramenta.

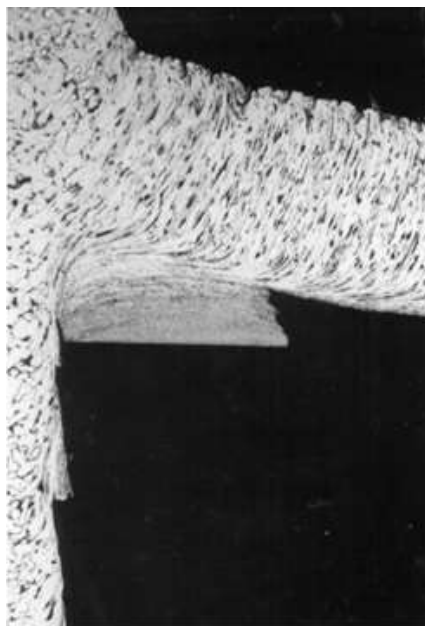
Figura 8 – Alongamento da perlita por Trent



Fonte: Trent *et al* (2000, p 42).

Este tipo de observação permite analisar não somente a região de cisalhamento primária e secundária. É também, comumente utilizada para avaliar a formação de aresta postiça de corte como demonstrado na figura 9.

Figura 9 – Aresta postiça de corte por Trent



Fonte: Trent *et al* (2000, p 44).

É possível verificar que a APC formada altera o fluxo da formação da perlita na interface ferramenta e plano de corte antes mesmo da região de cisalhamento.

2.2.2 Sistemas *quick stop*

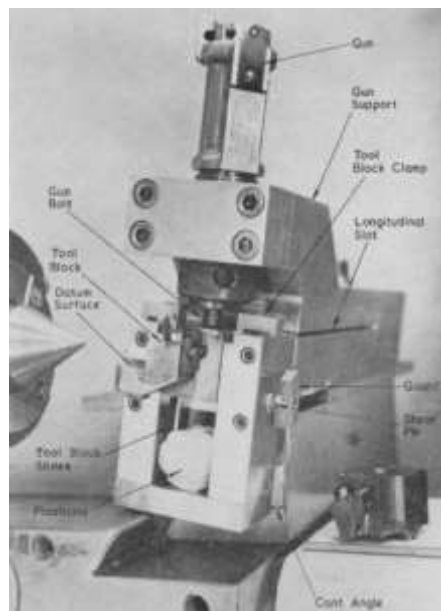
Conforme Ellis *et al.* (1969), um QSD é um instrumento utilizado para pesquisa de corte de metais que afasta a ferramenta da peça de forma instantânea permitindo que sejam feitas investigações nas zonas de cisalhamento seguindo os requisitos:

- a) o tempo de separação entre a ferramenta e peça deve ser pequeno;
- b) a distância percorrida pela ferramenta deve ser pequena;
- c) mudanças geométricas da peça e cavaco devem ser mínimas;
- d) vibrações devem ser mínimas;
- e) o dispositivo deve apresentar boas características estáticas e dinâmicas;
- f) a ferramenta não deve ser danificada no processo de separação;
- g) o QSD deve ser seguro e de fácil utilização, deve ser confiável e capaz de produzir resultados.

Ainda de acordo com Ellis *et al.* (1969), não é possível produzir um dispositivo que atenda a todos estes requisitos.

Variados dispositivos de inúmeras configurações já foram mencionados na literatura. Na figura 10 pode-se verificar um modelo de dispositivo acionado por arma de fogo.

Figura 10 – *Quick stop device* acionado por arma de fogo desenvolvido por Ellis



Fonte: Ellis *et al* (1969, p 324).

A figura 11 apresenta outro modelo de dispositivo que foi fabricado recentemente e utiliza arma de fogo como acionamento. Geralmente os dispositivos são compostos por um pino de cisalhamento que rompe com a explosão gerada fazendo com que a ferramenta pivote sobre um eixo, afastando-a repentinamente da zona de corte.

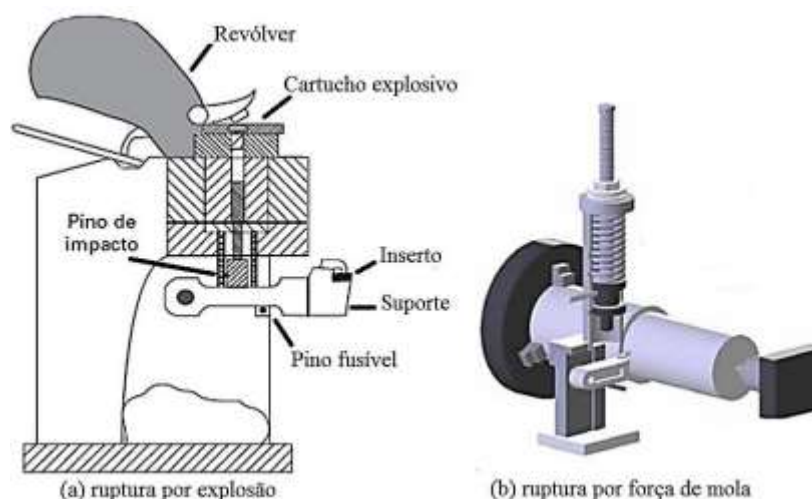
Figura 11 – *Quick Stop* acionado por impacto de arma de fogo



Fonte: Shunmugavel *et al* (2019, p111)

Em um dispositivo de parada rápida o princípio de funcionamento é simples. Eles têm a função de estabelecer a operação de usinagem com o suporte de ferramenta apoiado em um pino de aço temperado. Normalmente a ruptura do pino de cisalhamento se dá pela força de impacto de um martelo, mola, ou até mesmo pela explosão de uma arma de fogo. Na figura 12 tem dois exemplos de acionamento. (MACHADO *et al.*, 2012).

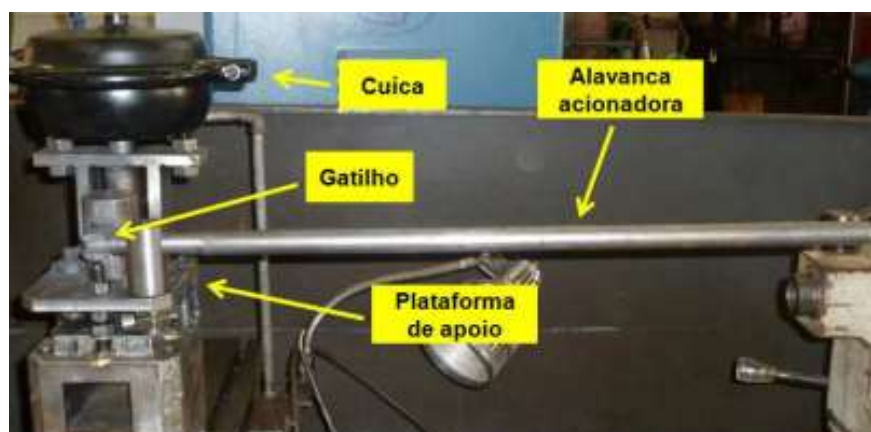
Figura 12 – Modelo (a) acionado por explosão e modelo (b) por força de mola



Fonte: Machado *et al.* (2012, p80).

O protótipo da figura 13 tem acionamento pneumático e, segundo os autores, foi utilizado pressão de trabalho entre 6 e 9 bar para a obtenção das amostras. (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

Figura 13 – Dispositivo QSD pneumático



Fonte: Nascimento *et al.* (2012, p3).

Outra disposição de sistema QSD pode ser obtida pela utilização de mecanismos de deslizamento. Este modelo não necessita de pinos de cisalhamento nem da utilização de arma de fogo ou impacto. Esta configuração simplifica ainda mais o dispositivo, e seu funcionamento consiste em armazenar energia potencial de uma mola e liberar por um mecanismo de alavanca. O *quick stop device* é demonstrado na figura 14. (CHERN, 2005).

Figura 14 – Modelo desenvolvido por Chern

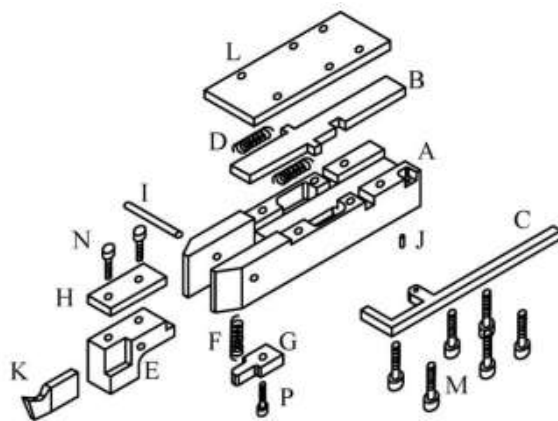


Fig. 1. Components of the quick-stop device.

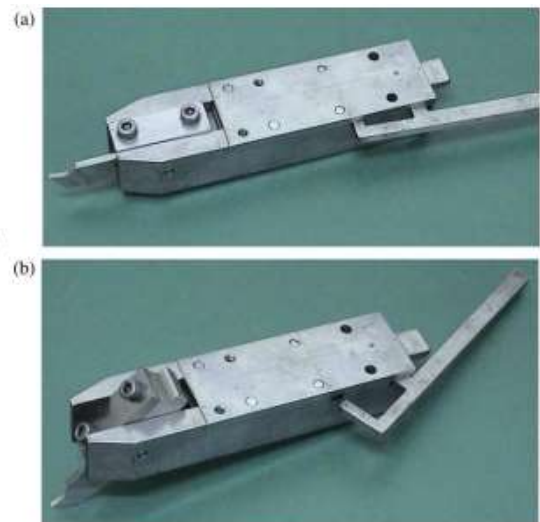
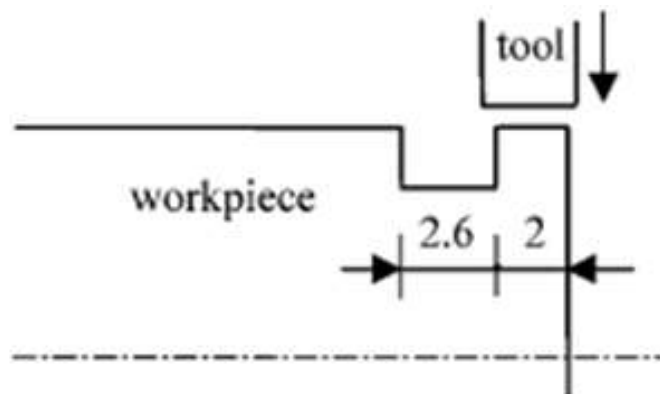


Fig. 2. Photos of the QSD: (a) before triggering; (b) after triggering.

Fonte: Chern (2005, p790-791)

Na figura 15 é possível verificar o sentido do corte ortogonal utilizado por Chern em seus ensaios.

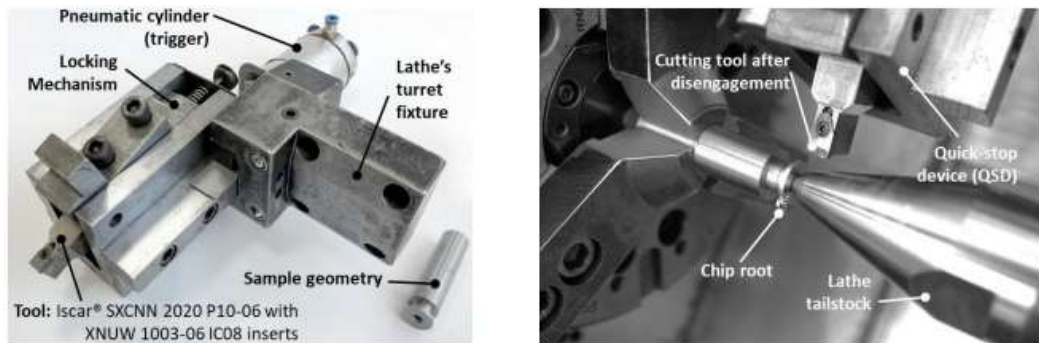
Figura 15 – Sentido de avanço por Chern



Fonte: Chern (2005, p791)

Dentre os dispositivos pesquisados destaca-se um dispositivo com princípio de funcionamento similar ao proposto por Chern, porém com acionamento pneumático. Este dispositivo também foi utilizado com sentido de corte ortogonal para a obtenção das amostras. A figura 16 apresenta a o conjunto dispositivo com o atuador pneumático e a torre de fixação do torno. (LUCAS *et al.*, 2017).

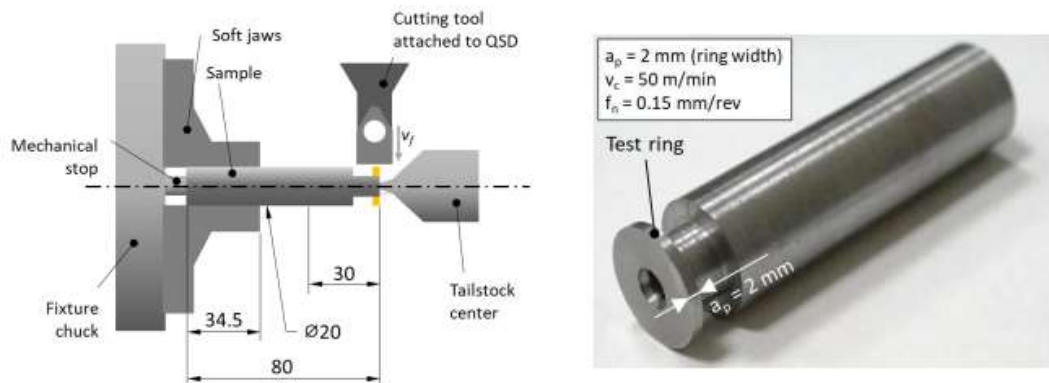
Figura 16 – Dispositivo mecânico com acionamento pneumático



Fonte: Lucas *et al.* (2017, p4)

Na figura 17 é possível verificar o sentido do corte ortogonal utilizado por Lucas *et al.* (2017) em seus ensaios.

Figura 17 – Sentido de avanço por Lucas



Fonte: Lucas *et al.* (2017, p4)

2.2.3 Vantagens e desvantagens

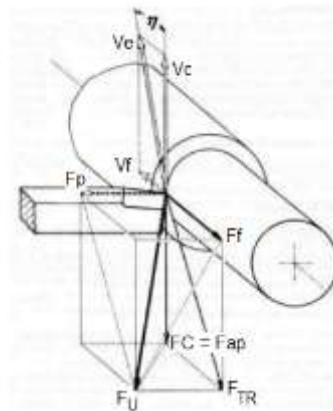
O estudo detalhado da formação da raiz dos cavacos e a mensuração do plano de cisalhamento permite entender as distribuições de forças na usinagem, o comportamento da microestrutura de diversos materiais, a formação da aresta postíça de corte, o aquecimento gerado pelo atrito da interface ferramenta-cavaco, entre

outros. Estas observações favorecem o desenvolvimento de novas ferramentas de corte, a otimização de processos e máquinas, reduções de custos, aumento de lucratividade, além da possibilidade de formular novas ligas metálicas.

2.3 Forças no torneamento

As decomposições das forças de corte sobre a cunha cortante possibilitam estimar a potência necessária para o corte, otimizar parâmetros de usinagem, como também as resultantes das forças atuantes nos elementos da máquina ferramenta. A figura 18 apresenta uma ilustração das forças no torneamento. (MACHADO *et al.*, 2012).

Figura 18 – Força de usinagem em torneamento



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2012, p94).

De acordo com Machado *et al.* (2012), os três componentes básicos de usinagem podem ser representados por:

- força de corte (FC): projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
- força de avanço (Ff): projeção da força de usinagem sobre plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço;
- força passiva (Fp): projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A força de usinagem é normalmente decomposta conforme a equação (4).

$$F_U[N] = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4)$$

A determinação teórica do ângulo do plano de cisalhamento permite a projeção da força (FU) nas diversas condições de interesse. Experimentalmente foi constatado que os componentes da força de usinagem variam com a seção do cavaco de maneira quase linear, especialmente a força de corte (FC). (MACHADO *et al.*, 2012).

Então, a força teórica de corte pode ser definida pela equação (5).

$$F_c [N] = K_s * A \quad (5)$$

Onde (A) representa a área da seção transversal de corte.

2.3.1 Método de cálculo

Um fator importante no torneamento é a determinação teórica da pressão específica de corte (Ks). Kienzle sugeriu uma fórmula suficientemente precisa para o cálculo de (Ks). Onde, (Ks1) e (z) são constantes do material e (h) a espessura de corte citado no capítulo 2.1.1 deste trabalho. (DINIZ *et al.*, 2010).

Assim, (Ks) pode ser representado na equação (6).

$$K_s \left[\frac{N}{mm^2} \right] = K_{s1} * h^{-z} \quad (6)$$

Contudo, o método apresentado pela empresa Sandvik também pode ser usado e fornece valores tabelados de (Ks) para h= 0,4mm com uma relação mais completa de materiais (anexo A) e apresenta a equação (7) de correção para (Ks) quando (h) apresentar valores diferentes de (0,4). (MACHADO *et al.*, 2012).

$$K_s \left[\frac{N}{mm^2} \right] = K_{s0,4} * \left(\frac{0,4}{h} \right)^{0,29} \quad (7)$$

A potência de usinagem é a resultante da soma das potências necessárias para cada componente de força de usinagem. Sendo assim, os componentes de corte e avanço contribuem para a potência de usinagem. A expressão da potência de corte (Pc) é apresentada na equação (8). (MACHADO *et al.*, 2012).

$$P_c [KW] = \left(\frac{F_c * V_c}{6 * 10^4} \right) \quad (8)$$

Sendo a velocidade de corte (Vc) expressa na equação (9).

$$V_c [m/min] = \left(\frac{\pi * d * n}{10^3} \right) \quad (9)$$

2.3.2 Parâmetros e fatores de influência

A pressão específica de corte, admitindo que a ferramenta não possua ponta, é a força necessária para remoção de material de uma área de 1mm². Estudos comprovaram que a pressão específica está relacionada com diversos fatores além da tensão de ruptura do material. (MACHADO *et al.*, 2012).

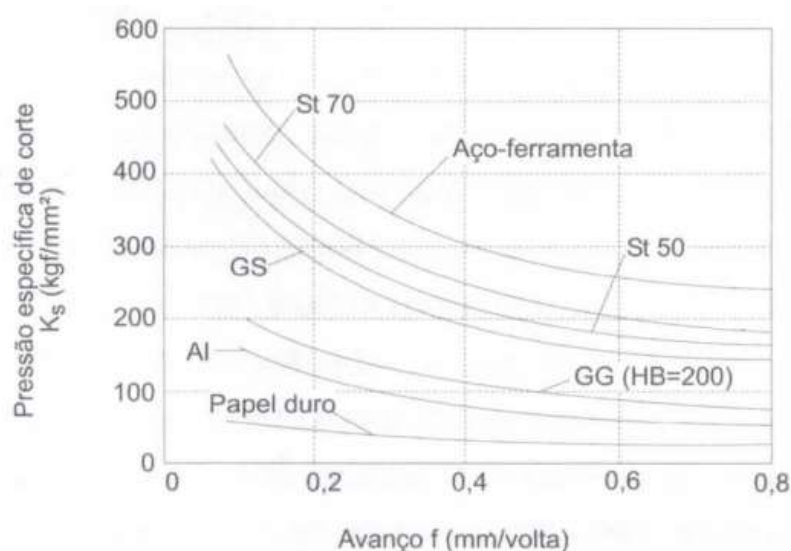
De acordo com Diniz *et al.* (2010), os fatores que influenciam a pressão específica de corte são:

- a) material da peça: quanto maior o percentual de carbono nos aços, maior é o valor de Ks. Diversos elementos como o fósforo, o chumbo, boro e sulfeto de manganês produzem, durante a formação do cavaco, planos de baixa resistência fazendo com que a pressão específica seja menor. Dentre as propriedades do material, a tensão de escoamento é a mais correlacionada com a pressão específica de corte;
- b) material da ferramenta: variando o material da ferramenta apresenta uma pequena diminuição do coeficiente de atrito entre a interface cavaco e saída da ferramenta, sendo mais significativo em ferramentas com cobertura de nitreto de titânio;
- c) geometria da ferramenta; quanto maiores os ângulos de saída e de inclinação menor será a deformação do cavaco e do valor de Ks. No entanto, nos materiais frágeis ocorre menor deformação à ruptura, sendo de pouca influência a variação de saída e de inclinação;
- d) seção de corte: a pressão específica de corte diminui com a área da seção de corte devido, principalmente, ao aumento do avanço;
- e) velocidade de corte: a presença de APC tende a diminuir o valor de Ks devido ao efeito de aumento do ângulo efetivo de saída proporcionado por ela. Sem APC, a pressão específica tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte devido à diminuição da deformação. Portanto, a influência da Vc em Ks é pequena;

- f) condições de lubrificação e refrigeração: quanto mais eficiente for a penetração e maior o efeito lubrificante deste fluido, maior será a diminuição de K_s ;
- g) estado de afiação da ferramenta: desgaste no flanco da ferramenta tende a aumentar K_s .

À proporção que (f_n) e (h) crescem, o fluxo lateral do cavaco se torna relativamente menor, sendo que quase todo o volume de material deformado se transforma em cavaco. Portanto quando aumenta o avanço a pressão específica de corte diminui. O gráfico 1 ilustra (K_s) para alguns materiais. (DINIZ *et al.*, 2010).

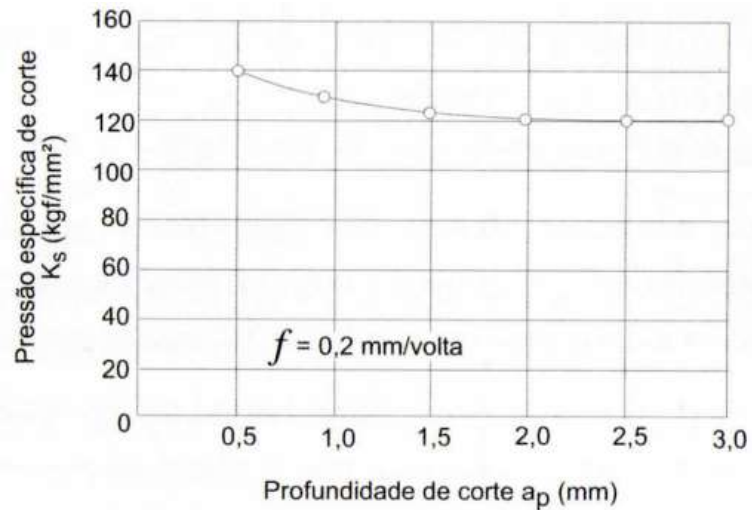
Gráfico 1 – Pressão específica de corte x avanço



Fonte: Diniz *et al.* (2010, p65).

Aumentando a profundidade de corte (a_p) praticamente não altera o valor de (K_s) , a não ser para pequenos valores de (a_p) . Podendo ser verificado no gráfico 2. (DINIZ *et al.*, 2010).

Gráfico 2 – Pressão específica de corte x profundidade de corte



Fonte: Diniz *et al.* (2010, p66).

No entanto, é importante o estudo do comportamento da força de profundidade de corte, porque ela é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte. Contudo, o crescimento da força de corte é proporcional ao da profundidade de corte, mas quando o avanço cresce, a força de corte também cresce. Mas, não na mesma proporção já que ocorre uma diminuição da pressão específica de corte. (DINIZ *et al.*, 2010).

Outros fatores que tem influência considerável nas forças de usinagem são o ângulo de posição (X_r), o ângulo de inclinação (λ_s) e o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). (DINIZ *et al.*, 2010).

3 METODOLOGIA

Um *quick stop device* tem a função de afastar a ferramenta da zona de corte durante um processo de usinagem, com velocidade superior à velocidade de corte. O objetivo de sua utilização é a obtenção e preservação da raiz do cavaco sobre a peça com a finalidade de adquirir amostras para serem analisadas por ensaio metalográfico.

O princípio de funcionamento de um QSD é basicamente simples, e consiste em fixar uma ferramenta em um torno de tal maneira que ela possa ser deslocada da zona de corte de forma repentina. O acionamento do sistema precisa ser eficaz de modo que consiga superar os limites estabelecidos no processo.

Sabe-se da necessidade de rigidez e estabilidade que os portas ferramentas precisam ter para suportar os esforços em um processo de torneamento para que não ocorram problemas de acabamento, vibrações, sobreaquecimento, quebra de ferramentas, erros dimensionais, rugosidade etc. (ELLIS *et al.*, 1969).

A ferramenta em contato com a peça está sobre ação de forças resultantes do processo de usinagem, tendendo a reagir sobre o sistema de fixação e sobre a superfície da peça podendo gerar vibrações indesejadas e ainda reações que possam ser impeditivas para o funcionamento do conjunto.

Foi efetuado o estudo teórico sobre os principais parâmetros de funcionamento de dispositivos de parada rápida, por exemplo, tipos de acionamentos utilizados e a influência do corte ortogonal no resultado das amostras. Por meio de investigação e recorrência à estudos já concluídos sobre o tema, encontrou-se fundamentos e efeitos que apoiam a teoria aplicada.

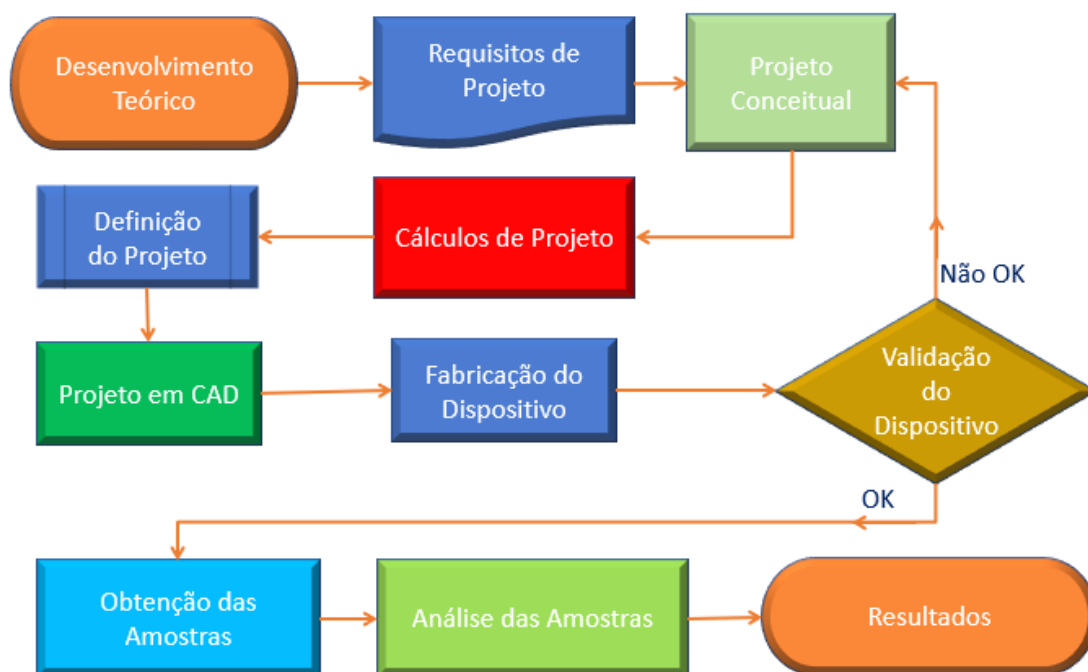
Para as definições dos parâmetros de influência do projeto como os carregamentos e as forças reativas, baseou-se essencialmente nos princípios da terceira lei de Newton. (NORTON, 2013).

Nas próximas seções, são estabelecidas as equações dos principais esforços que são submetidos no conjunto para atender as solicitações de classe quatro. Serão apresentados os cálculos que determinam a resistência às forças estáticas com análise dinâmica sobre o eixo e alavanca de maneira que será possível dimensionar os principais componentes e selecionar o acionamento requerido.

3.1 Fluxograma do projeto

Para atingir os objetivos deste trabalho, foram obedecidos os processos de acordo com o fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Fluxograma do processo



Fonte: Elaborado pelo autor.

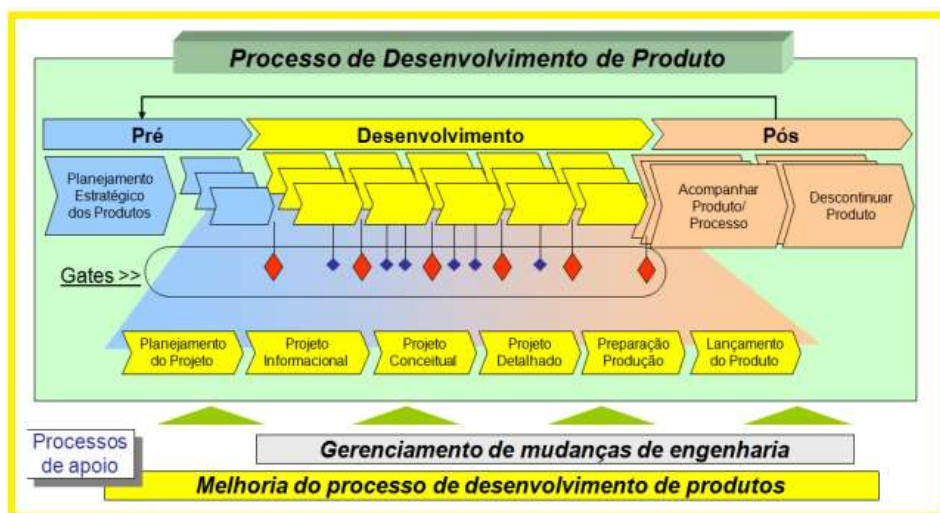
O diagrama foi produzido de forma linear com um ponto de tomada de decisão para validação do dispositivo.

3.2 Projeto do dispositivo

O projeto do dispositivo teve início na sua ideação, quando formulado para a proposta do presente trabalho com o intuito de promover um método para estudo e análise de da microestrutura da raiz do cavaco.

Dentre as fases do Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP), no projeto conceitual é onde ocorre a concepção propriamente dita por meio de pesquisa, ideação, representação e apuração de soluções. Esta fase tem como principal objetivo gerar recursos capazes de proporcionar fundamentação para o projeto detalhado. Na figura 19 é possível verificar as fases e as macro fases do PDP. (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Figura 19 – Macro fases e fases do PDP



Fonte: Rozenfeld *et al.* (2006, p.71).

A fase do projeto conceitual tem maior potencial de otimização de retorno de um investimento. É uma fase de desenvolvimento que apresenta baixo custo e alto benefício. Nesta etapa surgem os esboços da ideia do produto que é expressa através de uma forma estética que leve em conta as restrições relacionadas ao projeto, os requisitos funcionais e ergonômicos. (BAXTER, 2000).

A atividade de desenvolvimento de um novo produto não é tarefa simples. Ela requer pesquisa, planejamento cuidadoso, controle meticuloso e, mais importante, o uso de métodos sistemáticos. Os métodos sistemáticos de projeto exigem uma abordagem interdisciplinar, abrangendo métodos de *marketing*, engenharia de métodos e a aplicação de conhecimentos sobre estética e estilo. (BAXTER, 2000, p. 3, grifo do autor).

3.2.1 Requisitos

Desenvolver o dispositivo *quick stop device* para ser instalado no torno mecânico marca Romi, modelo IH40, localizado no laboratório de usinagem da universidade. Esta máquina está equipada com proteções de segurança conforme a norma NR12. Ela é utilizada para ensaios e medições de esforços de usinagem, está instrumentada com um dinamômetro situado na parte anterior do carro transversal e não poderá ser removido para a instalação e utilização do QSD. Uma foto do torno está ilustrada na figura 20.

Figura 20 – Foto do torno IH40



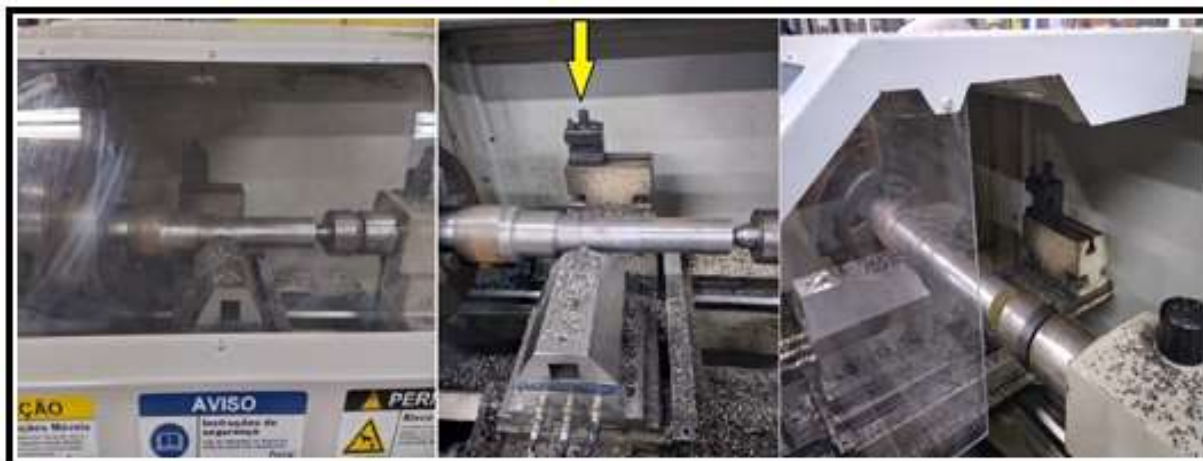
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os principais requisitos do projeto são:

- a) utilizar a torre posterior do carro transversal para fixar o dispositivo;
- b) projetar o equipamento para utilização de ferramentas comerciais;
- c) prever um acionamento com atuador pneumático;
- d) com base nos ensaios realizados anteriormente nesta máquina, o conjunto *quick stop* deve apresentar rigidez e resistência para suportar esforços de usinagem considerando força de corte máxima de 5000N;
- e) capacidade de rearmar o sistema sem a necessidade de substituir quaisquer componentes mecânicos.

A fixação disponibilizada na máquina de ensaios da universidade, fica situada na torre posterior do carro transversal. Nota-se que existe um porta ferramentas disponível para utilização, é importante observar a necessidade de utilizar ferramentas esquerdas devido à esta atribuição. Este, pode ser visualizado conforme demarcado na figura 21.

Figura 21 – Disposição para fixação do dispositivo no torno



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Concepções de dispositivo

Como já mencionado no item 2.2.2, muitos autores já propuseram dispositivos de parada rápida com concepções variadas. A grande maioria utiliza uma ferramenta sobre um pino de cisalhamento que rompe quando acionado por força de mola, martelo ou explosivo.

Em perspectiva aos dispositivos pesquisados na literatura, pode-se observar alguns tipos de configurações:

- a) inclinado ou plano, com pino de cisalhamento e acionados por arma de fogo;
- b) inclinado ou plano, com pino de cisalhamento e acionados por mola e martelo;
- c) plano, com pino de cisalhamento e acionamento pneumático;
- d) plano, com mola, deslizamento mecânico e acionado manualmente;
- e) plano, com mola, deslizamento mecânico e acionamento pneumático;

Os dispositivos inclinados apresentam vantagem do gume não colidir com a peça por atuação do avanço no momento do acionamento, por outro lado modificam os ângulos da ferramenta em relação à peça. Já os que possuem pino de cisalhamento, não apresentam boa repetitividade por necessitar de um novo pino para cada teste realizado. Os que são acionados por arma de fogo atingem velocidades elevadas, mas também utilizam pino de cisalhamento e podem gerar riscos.

3.2.3 Projeto

O desenvolvimento do projeto, tal como a formulação dos requisitos, pesquisa, modelagem, cálculos, usinagem, testes, ensaios, metalografia e análises, foram realizados na Universidade Unisinos. Para tanto, foram utilizados livros, materiais, equipamentos, ferramentas, instrumentos e máquinas disponíveis nos laboratórios.

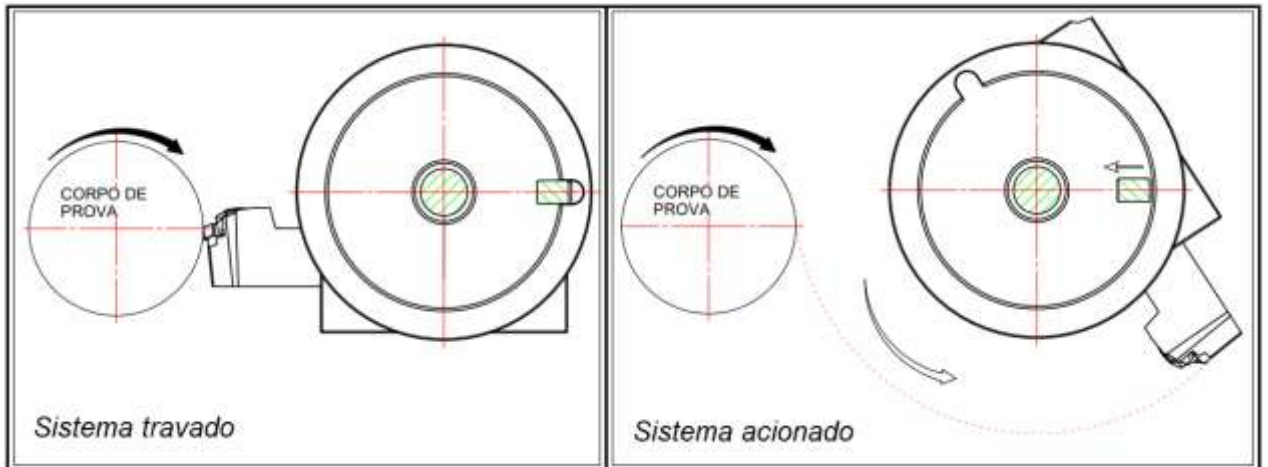
Após um estudo minucioso dos requisitos de projeto e análise fundamentada de diversos dispositivos já existentes, com suas respectivas atribuições e aplicações, o projeto teve direcionamento a um modelo que fosse compacto, com acionamento pneumático, com sistema de deslizamento mecânico, e que atendesse os requisitos do item 3.2.1.

O dispositivo projetado constitui-se de um porta ferramentas que pode ser fixado em um suporte na torre posterior do carro transversal do torno. Sendo assim, torna-se necessário utilizar ferramentas esquadras e o sentido de rotação do eixo árvore deve ser no sentido anti-horário, olhando a placa pela posição traseira. O QSD contempla basicamente três peças principais, são elas:

- a) dispositivo fixo: parte fixa do dispositivo que serve como base e é preso no carro transversal do torno;
- b) suporte: peça onde é fixada a ferramenta, com a função de girar sobre o dispositivo fixo sob a ação da mola de torção.
- c) alavanca: peça que têm a função de manter o suporte travado e liberá-lo quando acionada.

Com o sistema travado a usinagem pode ser executada considerando uma força máxima de corte equivalente a 5000N. Uma das considerações deste projeto foi a possibilidade de fixar ferramentas comerciais para teste e análise com pastilhas de torneamento de variados formatos, tamanhos, classes, raios etc. O funcionamento do quick stop device consiste na liberação da alavanca pelo acionamento do atuador pneumático, ocasionando o giro do suporte pela ação da energia potencial armazenada na mola de torção, fazendo com que a ferramenta se afaste rapidamente da zona de corte deixando o cavaco preso na superfície da peça. A figura 22 representa o funcionamento em duas etapas, com o sistema travado e acionado.

Figura 22 – Representação do funcionamento QSD

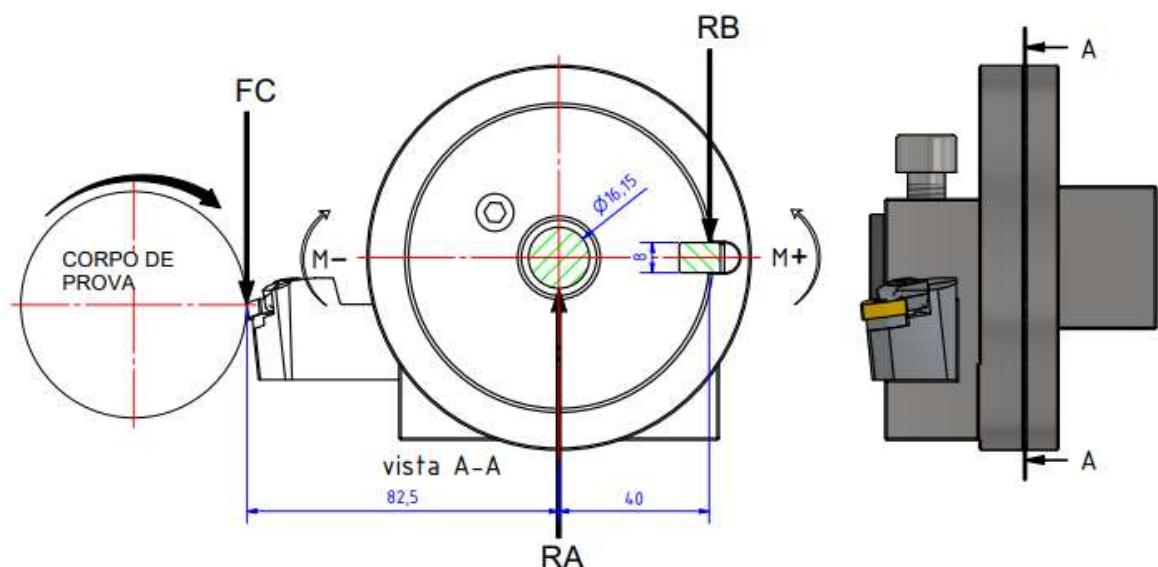


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em determinação às solicitações, o dispositivo se divide em elemento imóvel com solicitação variável e em elemento móvel com solicitação variável. Ou seja, o conjunto é dividido em classe 3 e 4 necessitando de análise estática e dinâmica. No entanto, muitos sistemas tridimensionais podem ser analisados em duas dimensões se seus movimentos ocorrerem em apenas um plano. (NORTON, 2013).

O dispositivo quando acionado estará somente sobre o efeito de ação da mola, por estar destravado (liberado), despreza-se o efeito de (FC) nesta condição. Para fins de dimensionamento, serão considerados os esforços e reações com o dispositivo “travado” conforme está apresentado na figura 23.

Figura 23 – Esforços e reações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assume-se uma análise estática de carregamento e despreza-se a variação em y para o cálculo do momento em B. A força teórica de corte é definida pela pressão específica de corte e a área da seção de corte conforme consta no item 2.3. Deseja-se dimensionar o dispositivo para atender a possibilidade de ensaiar diversos materiais com variadas condições de corte. Para isso, será utilizado $FC=5000N$ conforme descrito no requisito do item 3.2.1.

Considerando as solicitações e requisitos do sistema, foi possível realizar os cálculos para dimensionamento do conjunto. As propriedades dos materiais utilizadas nos cálculos são apresentados no “anexo B”. Segue nas equações (10); (11); (12) os cálculos das reações impostas ao dispositivo. (NORTON, 2013).

$$\sum Fy = 0 \quad (10)$$

$$\sum Fy = -FC + RA - RB$$

$$RA = FC + RB$$

$$RB = RA - FC$$

$$\sum MB = 0 \quad (11)$$

$$\sum MB = -RA * 40 \text{ mm} + FC * 122,5 \text{ mm}$$

$$RA = 15.312,5N \quad (12)$$

$$RB = 10.312,5N$$

Nas equações (13); (14); (15); (16) é apresentado o dimensionamento e cálculo da força cisalhante no eixo utilizando o coeficiente de segurança (CS) igual a 1,5 e a tensão de escoamento como segue: o material da peça “dispositivo fixo (apêndice A)” é aço ABNT1020.

$$S_{ys} = 0,577 \cdot S_{y_{Aço1020}} = 119,44MPa \quad (13)$$

$$S_{adm} = \frac{119,4MPa}{1,5} = 79,62MPa \quad (14)$$

$$A_{mín.} = \frac{15.312,5N}{79,62MPa} = 192,32mm^2 \quad (15)$$

$$D_{mín.} = 15,65mm \quad (16)$$

Qualquer que seja o pino onde uma mola de torção trabalhe, este deve ser limitado à aproximadamente 90% do diâmetro mínimo à flexão plena da mola. Sendo assim, o diâmetro do eixo foi corrigido conforme a equação (17). (NORTON, 2013).

$$Di_{mím} = \frac{D * Nb}{Nb + \theta_{rev}} - d = 17,95mm \quad (17)$$

Onde: D é o diâmetro médio da mola; N_b é o número de espiras da mola; $\theta_{rev}=0,4=144^\circ$ (deflexão angular da mola) e d o diâmetro do arame.

O fator CS em função da determinação do diâmetro do eixo de $\varnothing 16,15$ mm, que corresponde à 90% de 17,95mm, é calculado nas equações (18); (19); (20).

$$A_{seção\ do\ eixo} = 204,84mm^2 \quad (18)$$

$$\sigma_{cis.\ eixo} = \frac{15.312,5N}{204,84mm^2} = 74,75MPa \quad (19)$$

$$CS = \frac{119,44MPa}{74,75MPa} = 1,59 \quad (20)$$

Assim, o diâmetro do eixo definido é de $\varnothing 16,15$ mm com coeficiente de segurança de 1,59.

Para a mola de torção foram utilizadas as equações (21); (22); (23).

$$N_e = \frac{L1 + L2}{3 * \pi * D} = 0,38 \quad (21)$$

$$N_a = N_b + N_e = 4,38 \quad (22)$$

$$\theta_{rev} = 10,8 \frac{M * D * N_a}{d^4 * E} = 0,4 \quad (23)$$

Onde: (N_e) é o número equivalente de espiras; (L) é braço da mola; (N_a) é o número de espiras ativas; (E) é o módulo de elasticidade do aço; ($M = 3,03N.m$) é o momento assumido para a operação do dispositivo.

O cálculo de força cisalhante da peça “alavanca (apêndice A)”, material é aço ABNT1045, está representado nas equações (24); (25); (26); (27). A área da seção da alavanca submetida à força cortante tem dimensões de 8mm x 9mm.

$$A_{seção\ da\ alavanca} = 72mm^2 \quad (24)$$

$$S_{ys} = 0,577.Sy_{Aço1045} = 178,87MPa \quad (25)$$

$$\sigma_{cis.alavanca} = \frac{10.312,5N}{72mm^2} = 143,22MPa \quad (26)$$

$$CS = \frac{178,87MPa}{143,22MPa} = 1,24 \quad (27)$$

A área da seção da alavanca submetida à força de compressão é de 30,15mm². O cálculo da força de compressão exercida sobre esta área e suas considerações estão representados na equações (28); (29); (30); (31); (32).

$$A_{esmagamento} = 30,15mm^2 \quad (28)$$

$$S_{utAço1045} = 565MPa \cong S_{uc} \quad (29)$$

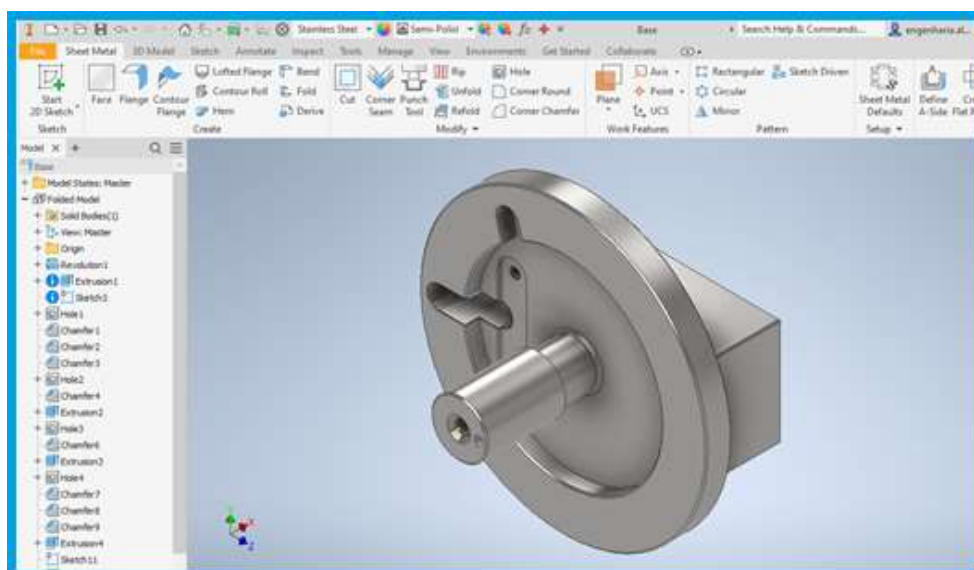
$$M_t = 412.500N.mm \quad (30)$$

$$\sigma_c = \frac{412.500N \cdot mm}{42mm} * \frac{1}{30,15mm^2} = 325,75MPa \quad (31)$$

$$CS = \frac{565MPa}{325,75MPa} = 1,73 \quad (32)$$

Para o modelamento do dispositivo, foi utilizado o software 3d Autodesk Inventor Professional 2022 (com acesso educacional). Para a modelagem da peça “dispositivo fixo” foram considerados: os requisitos de fixação na máquina, os cálculos das reações de esforços, as interfaces de montagem, o alojamento para as molas e limitador de curso, usinabilidade, acabamento, atrito, entre outros aspectos necessários para sua concepção. A figura 24 apresenta uma vista perspectiva em 3D da peça no software Inventor.

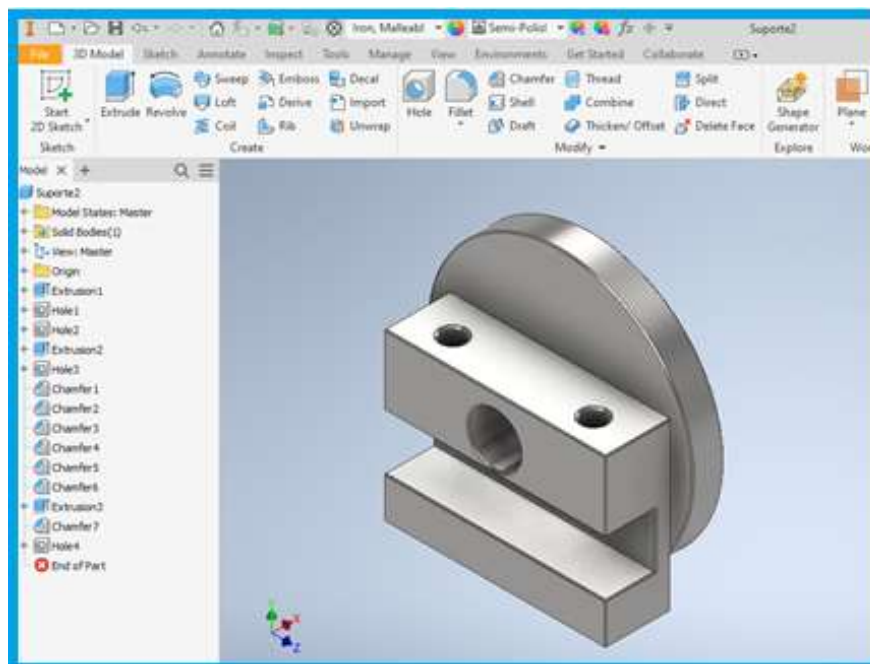
Figura 24 – Modelagem do dispositivo fixo no Inventor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a modelagem da peça “suporte móvel” foram considerados: os requisitos de fixação de ferramentas comerciais e neste caso podem ser utilizados quaisquer porta ferramentas esquerdo com fixação de vinte milímetros, os cálculos das reações de esforços, as interfaces de montagem, usinabilidade, acabamento, entre outros aspectos necessários para sua concepção. A figura 25 apresenta uma vista perspectiva em 3D no software Inventor.

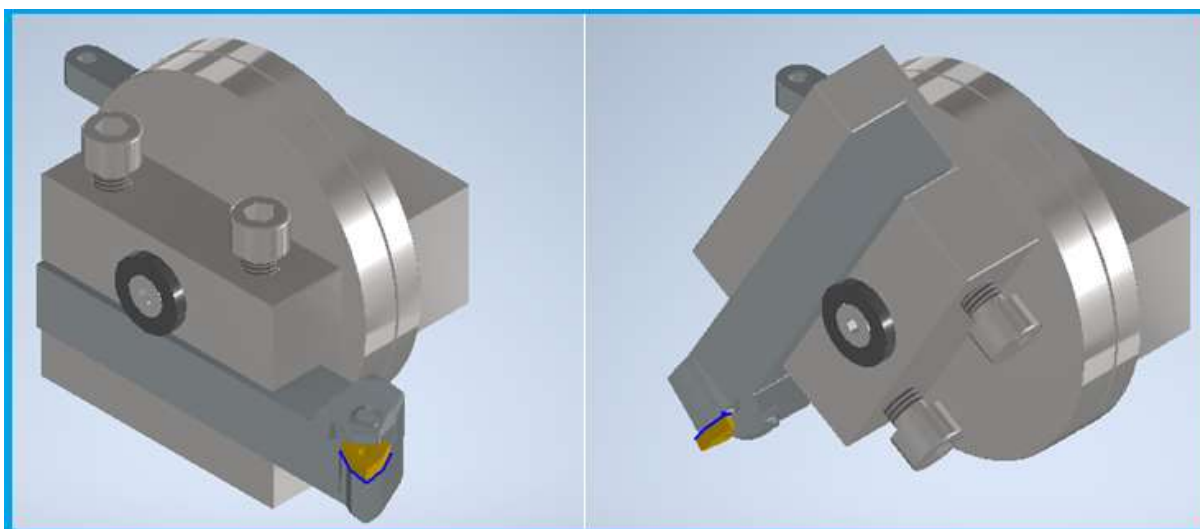
Figura 25 – Modelagem do suporte móvel no Inventor



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 26 ilustra o conjunto quick stop device modelado e montado em 3D no software Inventor com uma ferramenta instalada para exemplificar o dispositivo travado e acionado.

Figura 26 – Modelagem do dispositivo travado (esquerda) e acionado (direita)



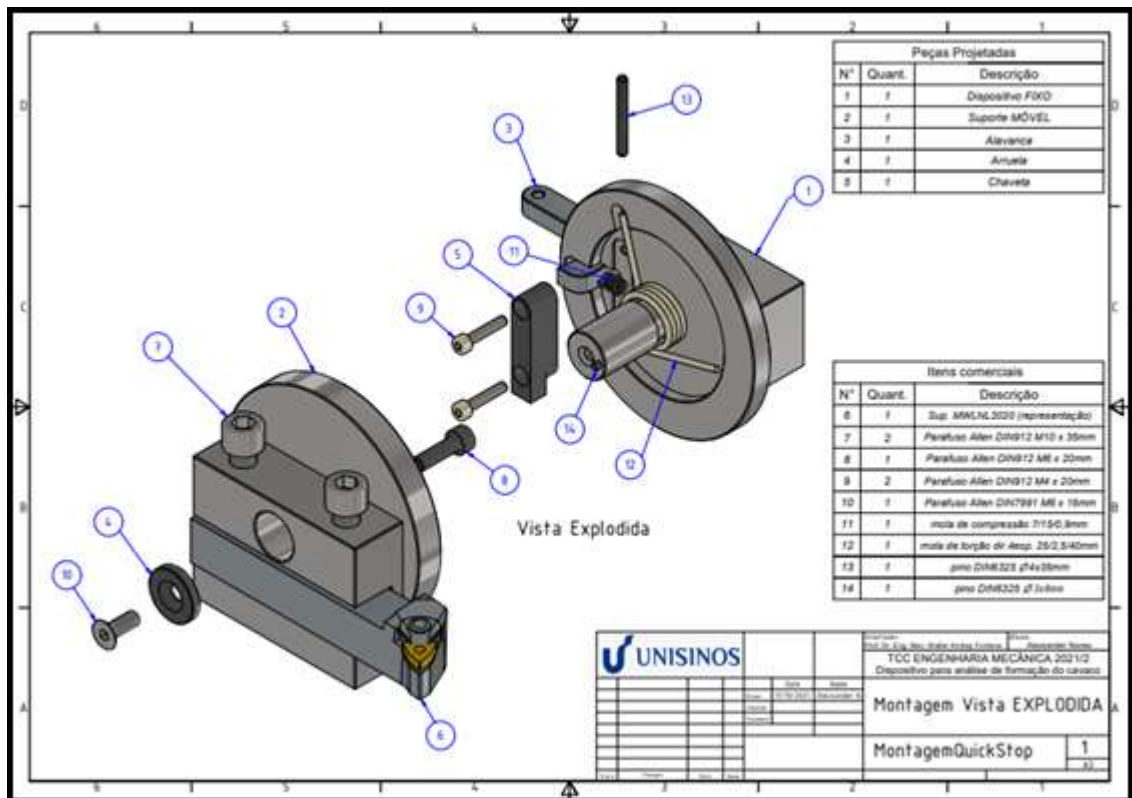
Fonte: Elaborado pelo autor.

O conjunto QSD desenvolvido apresenta características específicas para a utilização no torno IH40 Romi conforme mencionado no item 3.2.1. Este dispositivo é composto por três peças principais que são: dispositivo fixo, suporte móvel e alavanca.

Além destes foram confeccionados: uma chaveta que tem a função de limitar a alavanca, sustentar a mola de retorno da alavanca e também limitar o movimento de giro do suporte móvel; uma arruela com a função de manter o dispositivo montado e permitir o deslizamento com o suporte móvel.

A figura 27 apresenta um vista explodida do conjunto incluindo os itens comerciais como parafusos, molas e pinos. Os desenhos detalhados dos componentes do dispositivo estão disponíveis no apêndice A deste trabalho.

Figura 27 – Vista explodida do conjunto Quick Stop Device



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Fabricação

Neste capítulo será descrito os principais processos de fabricação e suas respectivas operações de usinagem para obtenção das peças e montagem do quick stop device desenvolvido neste trabalho. Todas as técnicas de manufatura foram executadas nos laboratórios da Universidade Unisinos. Para a fabricação do

dispositivo utilizou-se máquinas, equipamentos e ferramentas como será descrito na sequência.

3.3.1 Técnicas de fabricação aplicadas ao dispositivo

Para a fabricação do “dispositivo fixo” (peça 1), foi utilizado aço ABNT1020 conforme estabelecido no projeto decorrente dos cálculos do item 3.2.3. Foram efetuadas operações de torneamento externo e interno em torno mecânico convencional equipado com proteções conforme NR12. Cuidados de acabamento superficial e dimensional foram necessários como pode ser visto no desenho técnico situado no apêndice A. Posteriormente foram executadas operações de fresamento e furação em fresadora ferramenteira também equipada com proteções conforme NR12. Observa-se a necessidade de acabamento superficial e dimensional no rasgo de 8mm, onde serve de deslizamento para a alavanca.

Na fabricação do “suporte móvel” (peça 2), também foi utilizado aço ABNT1020 conforme estabelecido no projeto decorrente dos cálculos do item 3.2.3. Optou-se por utilizar material cilíndrico para a fabricação desta peça de modo a facilitar o processo de usinagem. As operações realizadas foram inicialmente torneamento externo e interno e posteriormente fresamento, furação e rosqueamento.

A peça “alavanca” (peça 3), foi fabricada em aço ABNT1045 conforme descrito no projeto referente aos cálculos do item 3.2.3. Foram executadas operações de fresagem, furação e retificação plana na peça com objetivo de adquirir menor rugosidade na superfície de deslizamento.

Outras peças que também foram confeccionadas são: a “arruela” (peça 4) necessitou somente operação de torneamento e furação; a “chaveta” (peça 5) apenas com operações de fresamento e furação.

Após a usinagem o dispositivo foi montado em bancada com seus respectivos componentes, parafusos, molas, arruela e pinos. A figura 28 apresenta o quick stop device desenvolvido.

Figura 28 – Foto do dispositivo desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em testes estáticos sobre a morsa, o acionamento do dispositivo pôde ser feito manualmente. Sendo assim, foi selecionado um atuador pneumático marca Werschott, disponível no campus, com referência CWM-0258821-0060 apresentado na figura 29 conforme norma ISO6432. Para a escolha do atuador, foram necessárias algumas considerações iniciais:

- a) a pressão disponível de 6 bar;
- b) curso mínimo de 10mm;
- c) diâmetro da haste mínima de 10mm, para evitar flambagem.

Para fins de cálculos, assume-se a pressão disponível de 5 bar (5,09 kgf/cm²) devido às perdas de carga na linha pneumática do laboratório. Em consideração a isso, foi calculada a força necessária para o acionamento conforme as equações (33); (34).

$$A = 4,91\text{cm}^2 \quad (33)$$

$$F = \frac{5,0985\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 4,91\text{cm}^2 = 25,03\text{kgf} \quad (34)$$

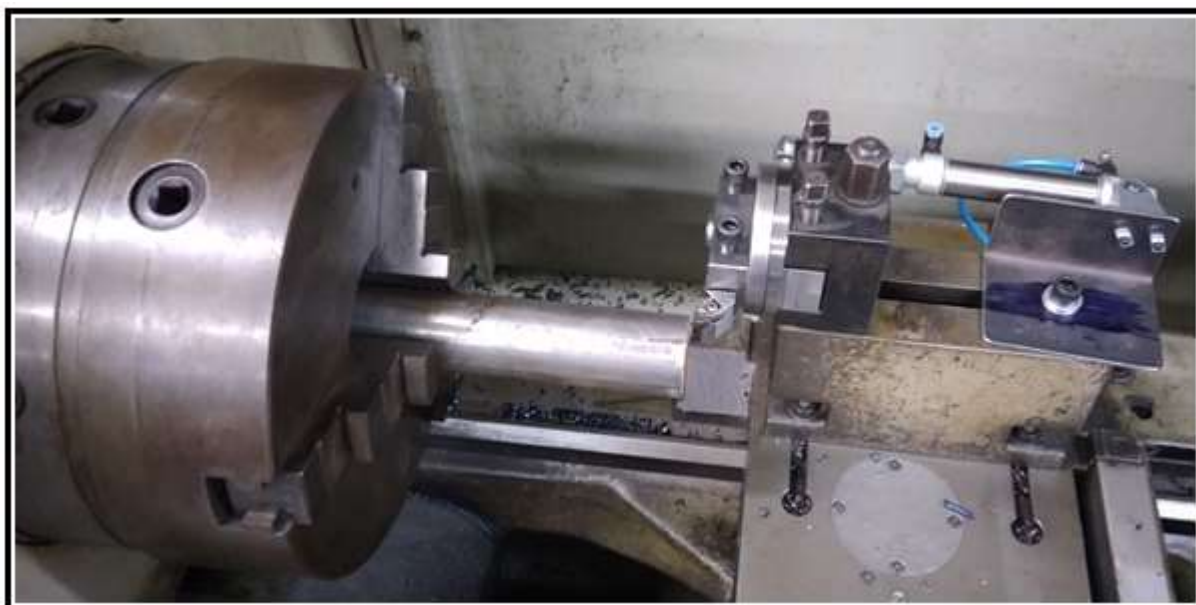
Figura 29 – Atuador pneumático para acionar o dispositivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O dispositivo foi lubrificado com graxa grafitada para evitar desgastes prematuros e diminuir atrito entre as partes móveis dos componentes. A figura 30 demonstra o dispositivo e o atuador pneumático instalados no torno com a peça fixada na placa.

Figura 30 – Dispositivo instalado no torno



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram efetuados testes iniciais do conjunto no torno mecânico com o atuador pneumático instalado ao dispositivo e com parâmetros de usinagem de: $a_p=2\text{mm}$, $V_c=100\text{m/min}$ e material ABNT1141. Na figura 31 é possível verificar o dispositivo já

desarmado após conclusão do teste. E, também se observa o cavaco unido à peça satisfazendo assim a funcionalidade do QDS desenvolvido neste trabalho.

Figura 31 – Dispositivo desarmado e cavaco fixo na peça



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para rearmar o dispositivo basta girar manualmente no sentido anti-horário, visualizado pela face frontal, até que a alavanca se encaixe na posição armada devido à ação da mola de compressão, conforme exemplificado na figura 32.

Figura 32 – Movimento para rearmar o dispositivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a validação do dispositivo foram realizados os ensaios no torno mecânico com a utilização de uma porta ferramenta convencional da marca Sandvik com as seguintes especificações: ISO MWLNL 2020K 06, tipo de fixação W, ângulo da aresta de corte da ferramenta (KAPR) 95°, ângulo de saída ortogonal -6°, pastilha padrão WNMG 06 04 08, ângulo de inclinação -6°, altura funcional 20 mm, sentido L (esquerdo). As pastilhas utilizadas para o ensaio foram também da marca Sandvik

conforme referência: WNMG 06 04 08 – PR classe 4325 e WNMG 06 04 08 – PF classe 4325. Os parâmetros de usinagem estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de usinagem para obtenção das amostras

Ensaio	Material	fn (mm)			VC (m/min)	Geometria do Inserto
		A	B	C		
1	ABNT 1141	0,05	0,1	0,2	100	PR
2	ABNT 1141	0,05	0,1	0,2	15	PR
3	ABNT 1141	0,05	0,1	0,2	100	PF
4	ABNT 1050	0,05	0,1	0,2	100	PR

Fonte: Elaborado pelo autor.

O dispositivo apresentou boa eficiência e repetibilidade nos ensaios realizados com os parâmetros descritos acima. Foram efetuados doze ensaios com variação de material, avanço, velocidade de corte e geometria do “quebra cavaco”. Na figura 33 é possível observar a formação do cavaco, unido à peça, nas diferentes condições de usinagem praticadas nos ensaios para o aço ABNT 1141.

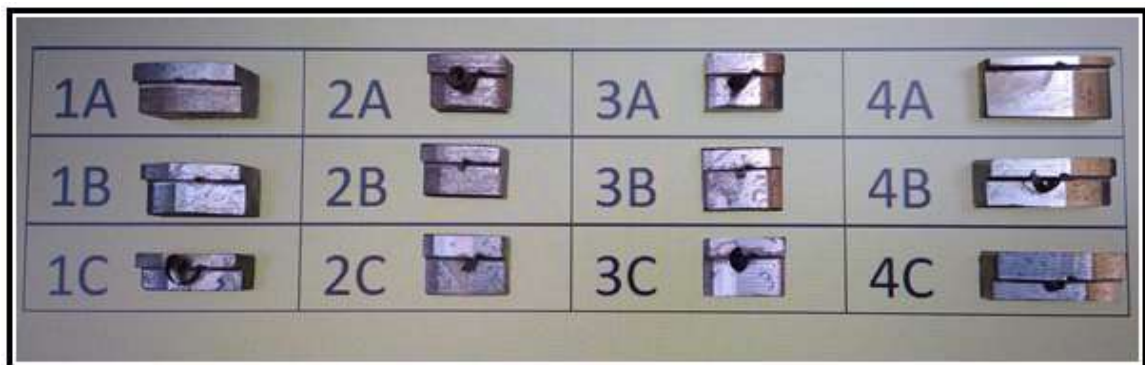
Figura 33 – Corpos de prova aço ABNT 1141 com formação de cavaco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para separar as amostras da peça, foi utilizado uma serra automática para a realização do corte transversal e posteriormente foram cortadas em pedaços menores, alguns cavacos se desprenderam durante este processo, conforme apresentado na figura 34. As amostras seguem a identificação pelo número dos ensaios seguido da ordem do avanço conforme já demonstrado na tabela 2 dos parâmetros de usinagem.

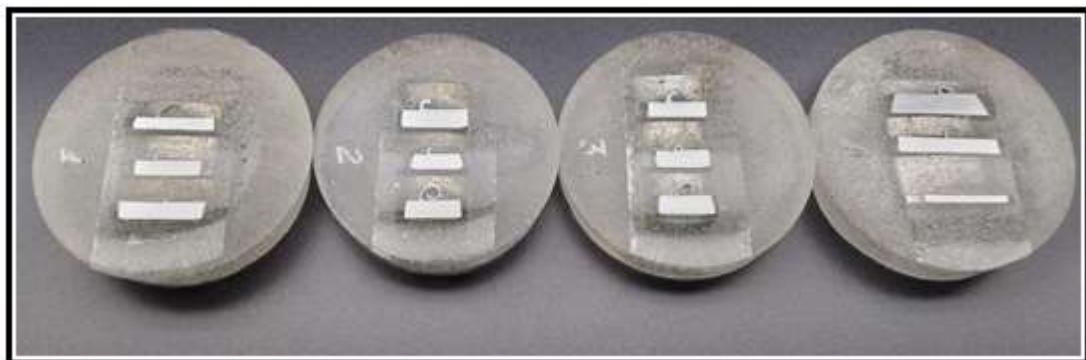
Figura 34 – Amostras cortadas prontas para embutir



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram embutidos em resina acrílica a frio e unidas pela ordem dos ensaios para facilitar o processo de lixamento e polimento como visualizado na figura 35. Inicialmente foi utilizado a lixadeira plana do laboratório para unificar a superfície e posteriormente foram lixadas manualmente com granulometrias na seguinte ordem: 220, 280, 320, 400, 600 e 1200. O polimento mecânico foi realizado com uma politriz metalográfica utilizando alumina como agente abrasivo.

Figura 35 – Amostras embutidas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Análise

Para a visualização da microestrutura e análise do plano de cisalhamento foi usado o microscópio óptico marca Olympus CX31 com ampliações de 40x, 100x e 400x. As imagens foram capturadas por meio de uma câmera marca Opticam instalada no microscópio, e processadas pelo software TSView versão 7.3.1.7. A figura 36 mostra o equipamento utilizado durante o ensaio.

Figura 36 – Equipamento óptico Olympus CX31



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 Ensaios metalográficos (avaliação da microestrutura)

Nos ensaios metalográficos executados, foi possível obter imagens com aspectos relevantes da formação dos cavacos. Avaliou-se a formação da raiz, a deformação das lamelas, a zona de fluxo, a formação de aresta postiça, a zona e o ângulo de cisalhamento, e a deformação na região das inclusões, através do software de medição por imagens Image J.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

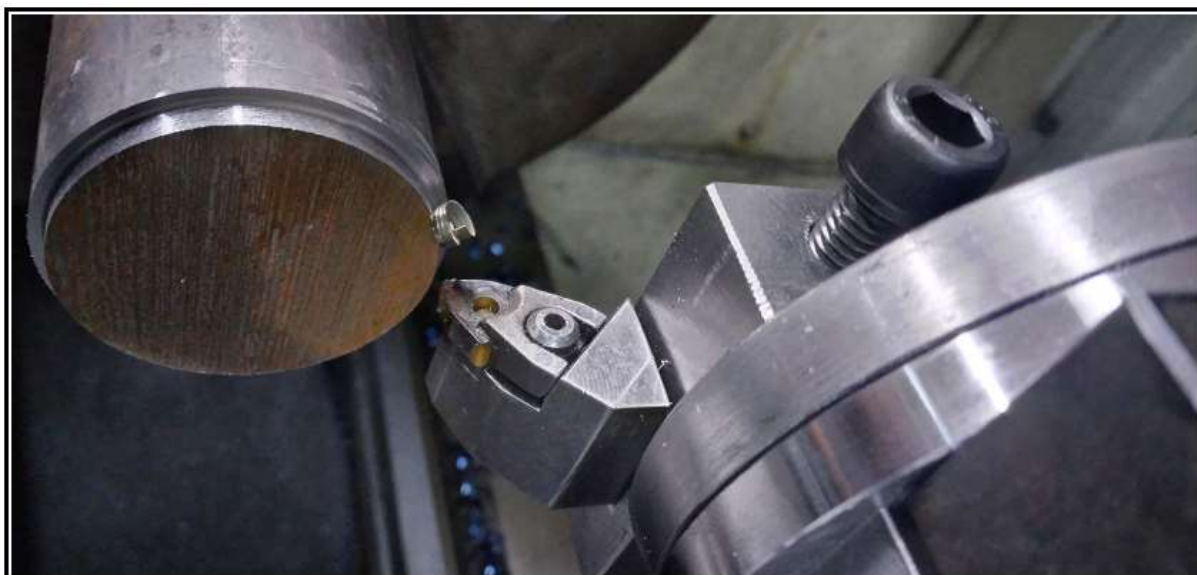
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do desenvolvimento do projeto sobre o dispositivo e das análises metalográficas adquiridas dos ensaios. Serão discursados também as medições dos ângulos de cisalhamento decorrentes das microscopias realizadas.

4.1 Sobre o dispositivo

O *quick stop device* desenvolvido atendeu os objetivos deste trabalho, cumpriu os requisitos do item 3.2.1, apresentou fácil aplicabilidade e repetibilidade, versatilidade quanto à capacidade de utilização de ferramentas, mostrou segurança na operação e ainda expressou um projeto compacto.

A imagem ilustrada na figura 37 exterioriza o resultado obtido pelo dispositivo nos ensaios realizados com seus respectivos parâmetros de usinagem.

Figura 37 – Ilustração com o dispositivo rearmado após teste



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram efetuados variando apenas duas geometrias de pastilhas. Contudo, a configuração do *quick stop device* desenvolvido neste trabalho possibilita executar testes com variadas ferramentas, geometrias, tipos de insertos, entre outros.

4.2 Resultados das metalografias

Como já mencionado anteriormente, os ensaios metalográficos realizados possibilitaram captar imagens com aspectos significativos da formação dos cavacos. Resultou em ilustrações reais das zonas de deformação, zonas de fluxo de perlita, da formação da raiz, da deformação das lamelas, da formação de aresta postiça, da zona e o ângulo de cisalhamento, e a deformação na região das inclusões.

A figura 38 é possível verificar o fluxo da perlita, pequena formação de aresta postiça pelo recalque do raio da ferramenta. Devido ao baixo avanço a forma deste cavaco era espiral, porém acabou desprendendo da amostra durante o embutimento.

Figura 38 – Amostra 1A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 39 é possível visualizar o cavaco ainda fixado à peça por continuidade da seção, porém com a região já cisalhada.

Figura 39 – Amostra 1B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É válido analisar na figura 40 o sentido do desprendimento do cavaco após seu cisalhamento. Se observa também o deslocamento de fluxo da perlita antes mesmo de adentrar na região de cisalhamento.

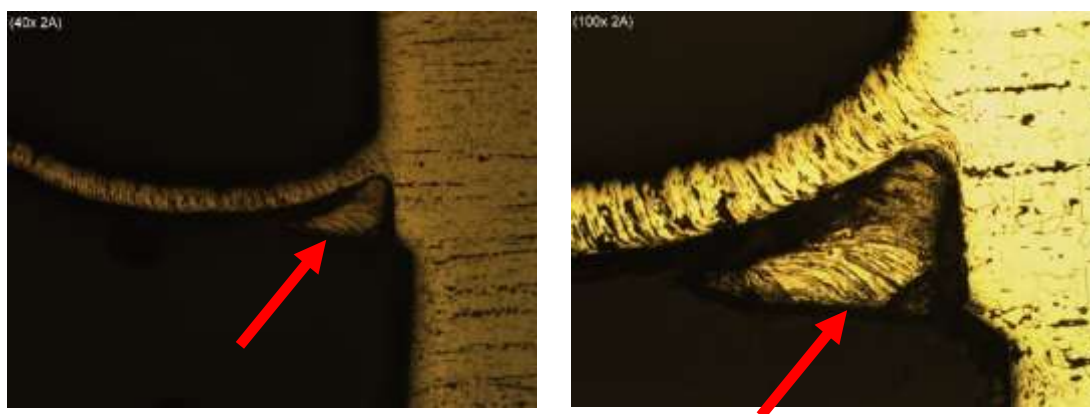
Figura 40 – Amostra 1C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A formação de aresta postiça de corte em materiais dúcteis com velocidades de corte baixas é praticamente inevitável. Nas figuras 41; 42; 43 é possível visualizar com clareza a formação de APC (indicada pelas setas).

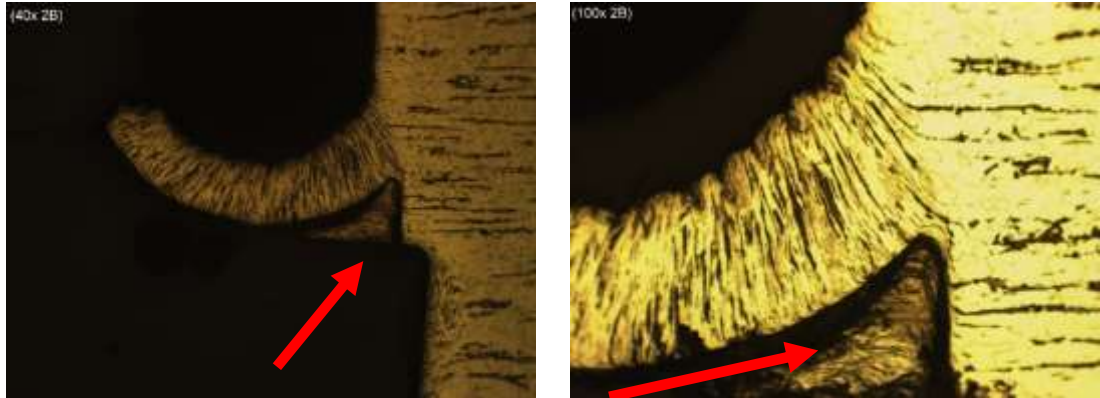
Figura 41 – Amostra 2A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Diniz *et al.* (2010), a presença da aresta postiça tende a diminuir o valor da pressão específica de corte devido ao efeito de aumento do ângulo efetivo da saída que a aresta postiça proporciona. Dessa forma a usinagem de materiais dúcteis utilizando velocidades de corte baixas os valores de K_s variam dependendo do tamanho e geometria da aresta postiça formada. Em analogia a isso faz-se entender o quão difícil é analisar o comportamento do cavaco na existência de APC.

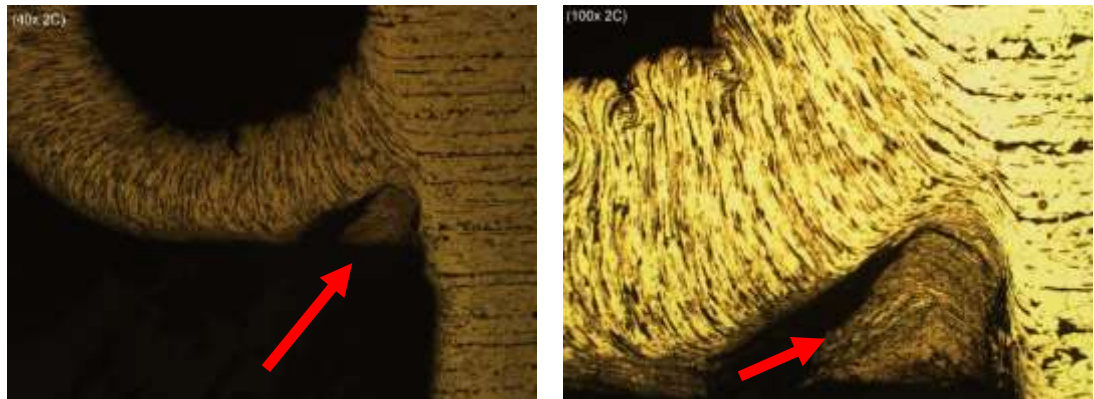
Figura 42 – Amostra 2B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em análise às deformações das imagens é possível verificar uma variação na zona de fluxo decorrentes da formação de APC.

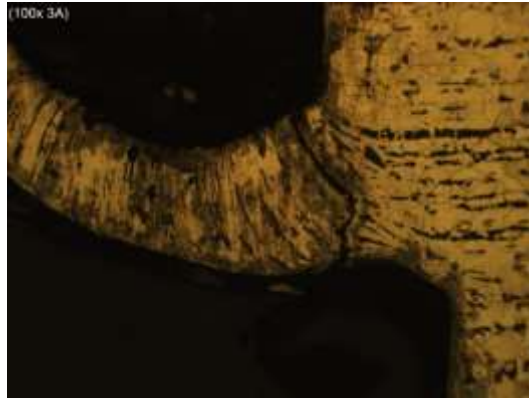
Figura 43 – Amostra 2C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=15\text{m/min}$, geometria PR, 40x; 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cavaco da amostra 3A mostrado na figura 44 tem a influência da geometria da pastilha PF na sua formação. Nota-se o sentido da perlita e sulfetos na direção da zona de cisalhamento. Em virtude do ataque químico elevado na preparação desta amostra é possível verificar regiões atingidas por corrosão.

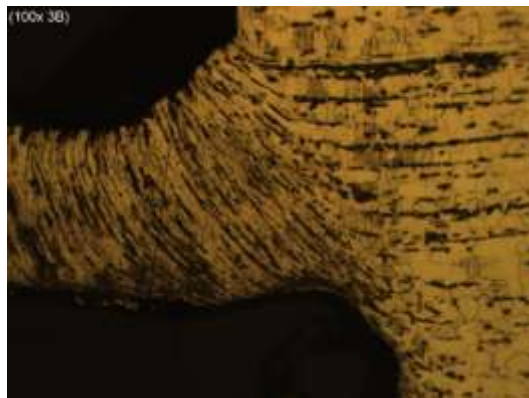
Figura 44 – Amostra 3A, Aço 1141, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As figuras 45 e 46 ilustram com exatidão a zona de cisalhamento.

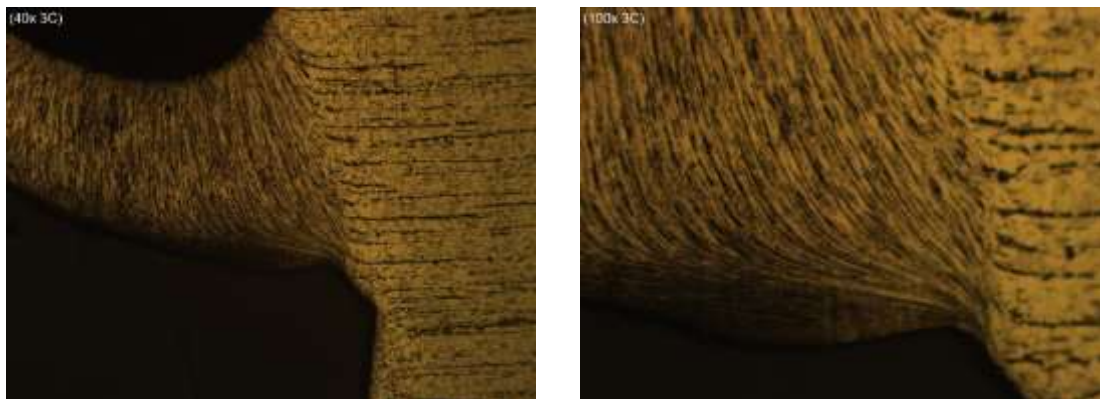
Figura 45 – Amostra 3B, Aço 1141, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os ensaios realizados, a mostra 3C representada na figura 46 é a que possui maior grau de recalque. Isso é esperado, pois as geometrias PF (ou seja, para acabamento de aços) possuem os menores ângulos de saída para permitir a quebra do cavaco em condições em que há elevada velocidade de corte (aumenta a ductilidade), baixo avanço (reduz a espessura do cavaco) e baixa profundidade de corte (também localmente reduz a espessura do cavaco, por operar próximo ou na zona de influência do raio de ponta). Como o ângulo de saída é menor, há maior deformação do cavaco.

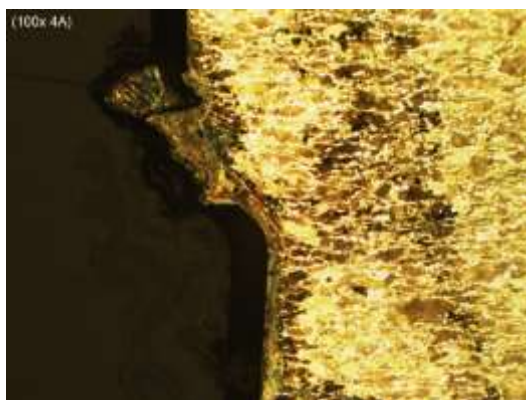
Figura 46 – Amostra 3C, Aço 1141, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PF, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cavaco gerado na obtenção da amostra 4A representada na figura 47 tinha formato de fita e despreendeu-se durante o processo de preparação. Em virtude do ataque químico elevado na preparação e o efeito da exsudação (saída de reativo na folga do embutimento) desta amostra é possível verificar pontos atingidos por corrosão.

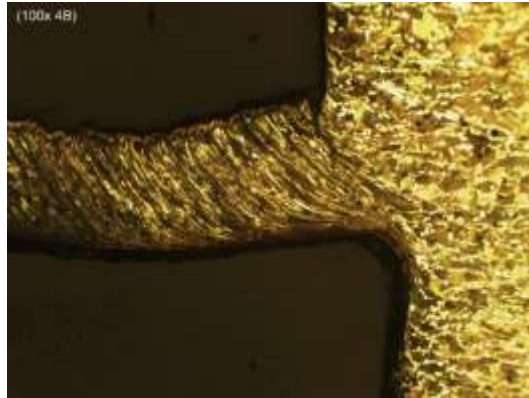
Figura 47 – Amostra 4A, Aço 1050, $f_n=0,05$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 48 da amostra 4B a raiz do cavaco está em processo de cisalhamento, onde apresenta o deslocamento do cavaco plano de cisalhamento. Também é possível verificar a formação das lamelas na seção do cavaco.

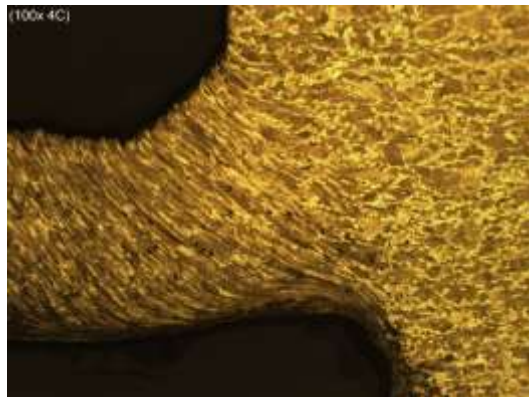
Figura 48 – Amostra 4B, Aço 1050, $f_n=0,10$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 49 pode-se observar que o plano de cisalhamento e a formação das lamelas se comportam de maneira uniforme.

Figura 49 – Amostra 4C, Aço 1050, $f_n=0,20$, $v_c=100\text{m/min}$, geometria PR, 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Medição do ângulo de cisalhamento

Com a análise metalográfica foi possível fazer medições das espessuras dos cavacos recalcados, do ângulo de cisalhamento, e da espessura de corte. Os valores de (h) e (h') foram utilizados para calcular o grau de recalque conforme a equação (1) e o ângulo de cisalhamento conforme a equação (3). A tabela 3 apresenta uma relação entre os valores medidos e os calculados.

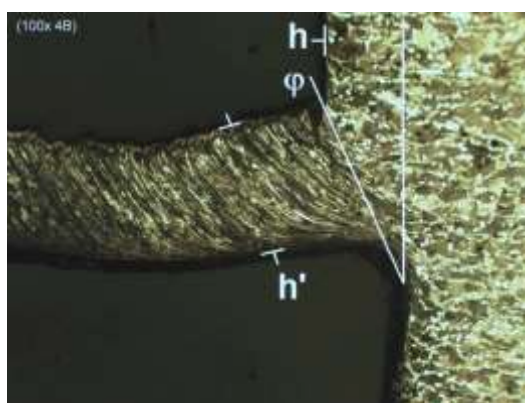
Tabela 3 – Ângulo de cisalhamento

Amostras	RC (por h medido)	h' (mm) (medido)	H (mm) (calculado)	h (mm) (medido)	Ângulo de Cisalhamento ϕ° (calculado)	Ângulo de Cisalhamento ϕ° (medido)
1A	2,86	0,20	0,0498	0,07	18,56	23,57
1B	1,64	0,18	0,0996	0,11	29,74	29,95
1C	1,21	0,17	0,1992	0,14	37,02	36,30
2A	1,67	0,10	0,0498	0,06	29,31	24,63
2B	2,55	0,28	0,0996	0,11	20,57	19,79
2C	2,61	0,47	0,1992	0,18	20,11	19,68
3A	2,50	0,20	0,0498	0,08	20,90	21,80
3B	2,62	0,34	0,0996	0,13	20,08	20,55
3C	3,63	0,69	0,1992	0,19	14,91	14,23
4A	2,29	0,16	0,0498	0,07	22,59	21,37
4B	1,67	0,20	0,0996	0,12	29,31	27,78
4C	1,60	0,32	0,1992	0,20	30,26	28,46

Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições do ângulo de cisalhamento (ϕ), da espessura (h) e (h') foram efetuadas conforme pode ser visualizado na figura 50 utilizando o software de processamento de imagens ImageJ.

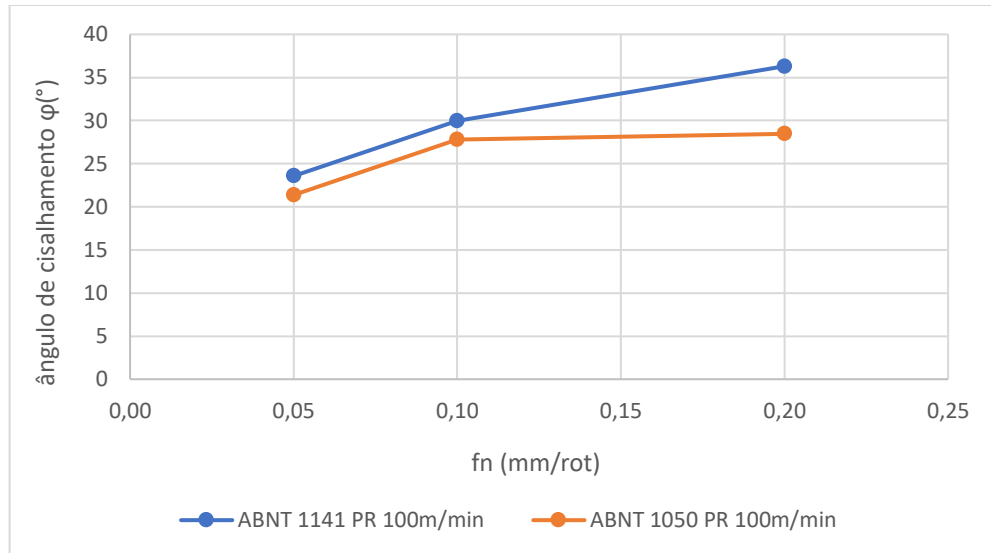
Figura 50 – Ângulo de cisalhamento (ϕ), espessuras do cavaco h e h'.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 3 é possível observar que o ângulo de cisalhamento das amostras de SAE 1141 é superior ao SAE 1050. Isso decorre do menor teor de carbono e da maior fração de inclusões de sulfetos, que favorecem a formação do cavaco, com menor recalque deste. Quanto menor o recalque, menores forças de usinagem.

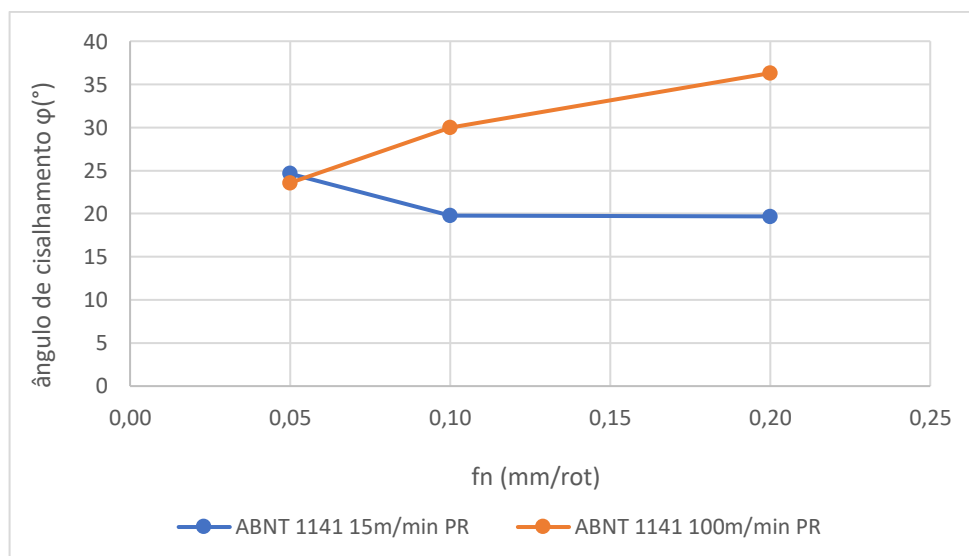
Gráfico 3 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função do material



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 4 é possível observar que com o aumento do avanço, para a velocidade de 100 m/min ocorre um aumento do ângulo de cisalhamento. Isso é decorrente do fato que maiores avanços reduzem o grau de recalque, em função da elevação da velocidade efetiva de corte. Já para a velocidade de 15 m/min o efeito é contrário, mas decorrente de outro fator: a aresta postiça de corte. Apesar de ter um efeito, que segundo Diniz (2015) promove a redução da deformação do cavaco, deve salientar, que, conforme mostra as imagens, a aresta postiça promove intensa deformação local, reduzindo o ângulo de cisalhamento.

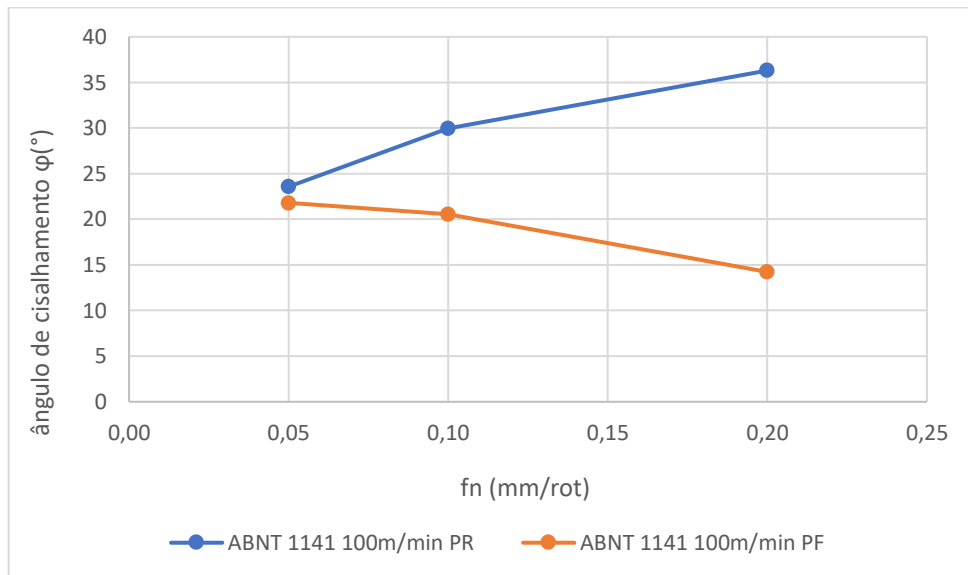
Gráfico 4 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função da velocidade de corte



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 5 é possível observar que os valores de ângulo de cisalhamento são maiores para a geometria PR (desbaste) do que para a PF (acabamento). Como as geometrias PR, em função dos parâmetros de usinagem favorecerem a quebra do cavaco, é possível empregar ângulos de saída maiores, que por sua vez aumentam o ângulo de cisalhamento. Já as geometrias PF ocorrem o contrário: são necessários menores ângulos de saída, já que nas condições de acabamento a quebra do cavaco é mais difícil. Isso se traduz em menores ângulos de cisalhamento.

Gráfico 5 – Ângulo de cisalhamento x avanço em função da geometria da pastilha



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Os objetivos deste trabalho eram projetar e fabricar um dispositivo de parada rápida, testar seu desempenho à partir de obtenção de amostras com variação de microestrutura, velocidade de corte, inserto, avanço e analisar a formação dos cavacos por ensaio metalográfico.

Quanto ao projeto do produto, o *quick stop device* obteve corpos de prova satisfatórios nos ensaios realizados com velocidade de corte até 100m/min. Apresentou boa rigidez e repetitividade nos testes executados, sendo capaz de produzir amostras com formação de cavaco como desejado.

Analisando as imagens metalográficas realizadas, foi possível observar aspectos significativos da formação dos cavacos. Foram verificadas as zonas de deformação, zonas de fluxo de perlita, a formação da raiz, a deformação das lamelas, a formação de aresta postiça, a zona e o ângulo de cisalhamento, e a deformação na região das inclusões de sulfetos. A velocidade de corte baixa, como já era esperado, produziu amostras com grande formação de aresta postiça podendo ser verificado a sua influência na zona de fluxo e na região de cisalhamento.

Em relação às análises efetuadas, o material SAE 1141 apresentou ângulo de cisalhamento superior ao SAE 1050 em todos os avanços ensaiados. Isso decorre do menor teor de carbono e da maior fração de inclusões de sulfetos, que favorecem a formação do cavaco, com menor recalque deste.

Quanto às velocidades de corte comparadas, para o avanço de 0,05mm a menor velocidade apresentou pequena superioridade no ângulo de cisalhamento. Porém, para os demais avanços a velocidade de corte de 15m/min exibiu menores ângulos de cisalhamento aumentando o grau de recalque e conseqüentemente as forças na usinagem. Estes resultados estão relacionados com a formação de aresta postiça de corte que alterna a zona de fluxo.

Na observação quanto a geometria, nos ensaios realizados com a pastilha de geometria PF, se verificou uma diminuição do ângulo de cisalhamento com o aumento do avanço, e apresentou maiores graus de recalque em comparação com a geometria PR.

Em consideração aos objetivos propostos, o trabalho atingiu os resultados almejados.

REFERÊNCIAS

AMINI, S.; LOTFI, M.; PAKTINAT, H.; KAZEMIYOUN, M. **Caracterização do torneamento vibratório na zona de corte usando um dispositivo pneumático de parada rápida** - Ciência e Tecnologia da Engenharia, um Jornal Internacional - Volume 20, edição 2, abril de 2017, páginas 403-410. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616311284>> Acessado em: 04/09/21

AUTODESK. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>> Acessado em: 21/08/2021.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 272p.

CHERN, G. **Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s.l.], v. 45, n. 7-8, p.789-794, jun. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695504002998>> Acessado em: 04/09/2021

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: característicos gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1990. 576 p.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, ArtLiber Editora, 7ed, São Paulo, 2010. 268p.

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, Volume 9, Issue 3, 1969, Pages 321-339, ISSN 0020-7357, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020735769900079>> Acessado em: 11/09/2021

FAVORIT. Disponível em: <<https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-ressulfurados/aco-sae-1141>> Acessado em: 03/11/2021

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1970. 754p.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres: Editora Springer, 2011. 517 p.

LUCAS, E.; *et all.* **Steel for Mechanical Applications: Machinability Evaluation of Three Similar Medium-Carbon Alloys** - 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering December 3-8, 2017, Curitiba, PR, Brazil. Disponível em: <<http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/9196>> Acessado em: 10/09/2021.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. rev. São Paulo: Blucher, 2012. 397p.

NASCIMENTO, C.G; *et al*, **Projeto de um dispositivo quick-stop com acionamento pneumático**. VII CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luis – Maranhão – Brasil, 2012. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0316.pdf>> Acessado em: 10/09/2021.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

PEREIRA, A.; BOERHS, L. **A influência das inclusões na usinabilidade** – 15º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia-MG, 2005. Disponível em: <<http://web.posfemec.org/posmec/15/pdf/POSMEC016.pdf>> Acessado em: 11/09/2021

ROZENFELD, H. *et al*. **Gestão de desenvolvimento de Produtos**: Uma Referência Para a Melhoria do Processo. São Paulo: Saraiva, 2006. 542p.

SANDVIK. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=mwlnl%202020k%2006>> Acessado em: 08/11/2021

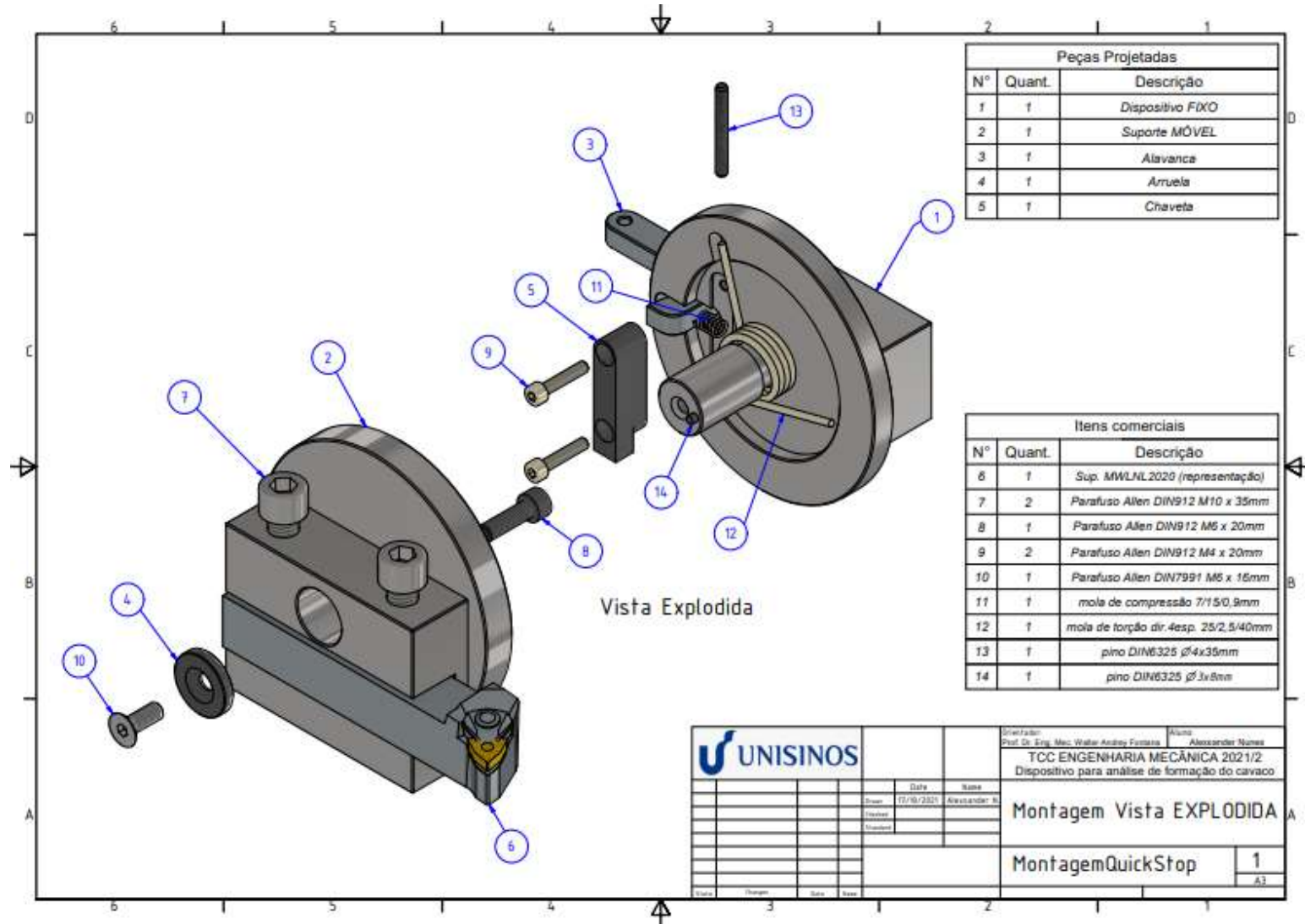
SANDVIK. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coroplus-toolpath/pages/primeturning.aspx>> Acessado em: 08/11/2021.

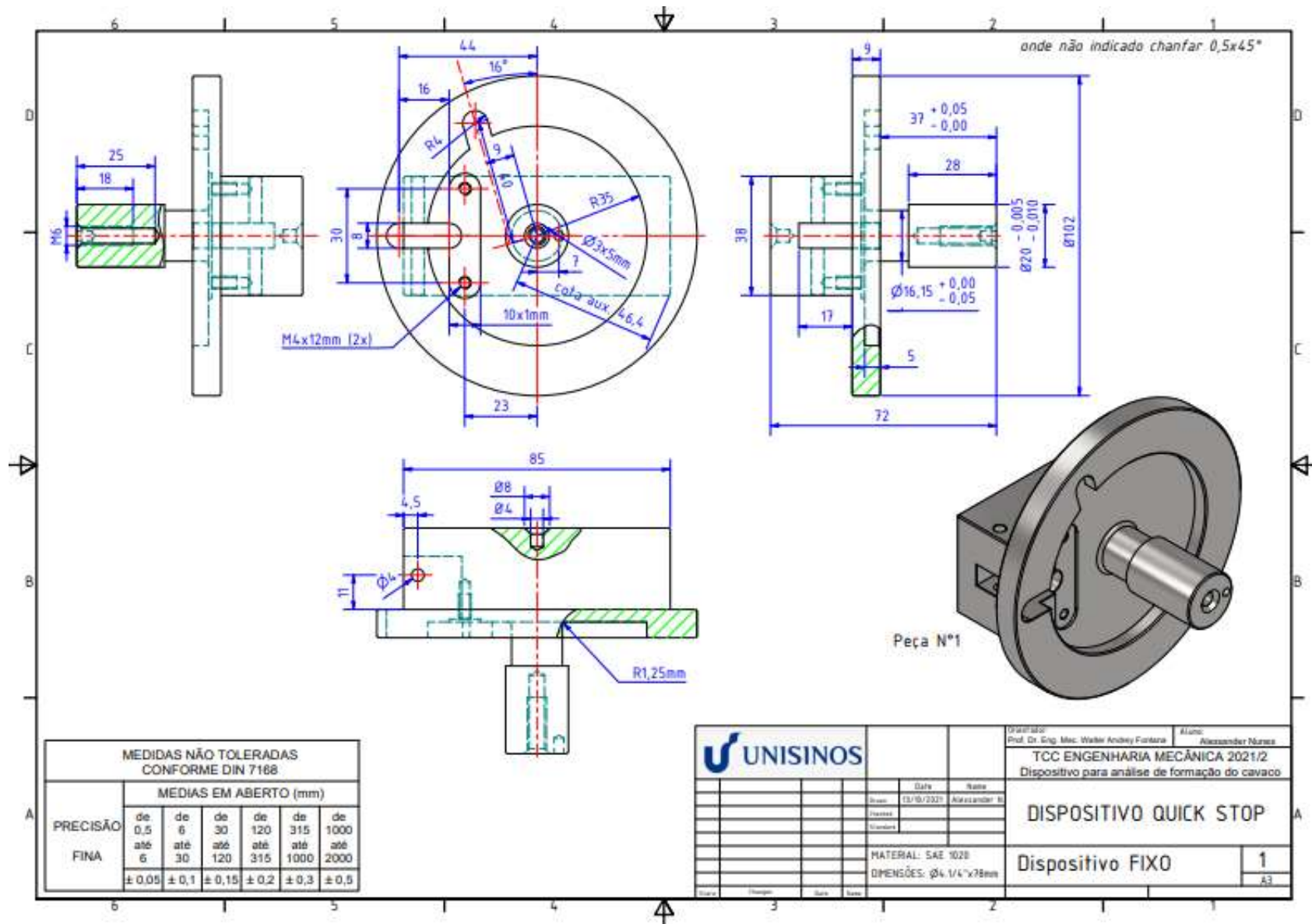
SHUNMUGAVEL, M.; *et al*. **Chip formation characteristics of selective laser melted Ti-6Al-4V**, Australian Journal of Mechanical Engineering, 2019 ;17:2, 109-126, Disponível em: <DOI: 10.1080/14484846.2017.1364833> Acessado em: 26/10/2021.

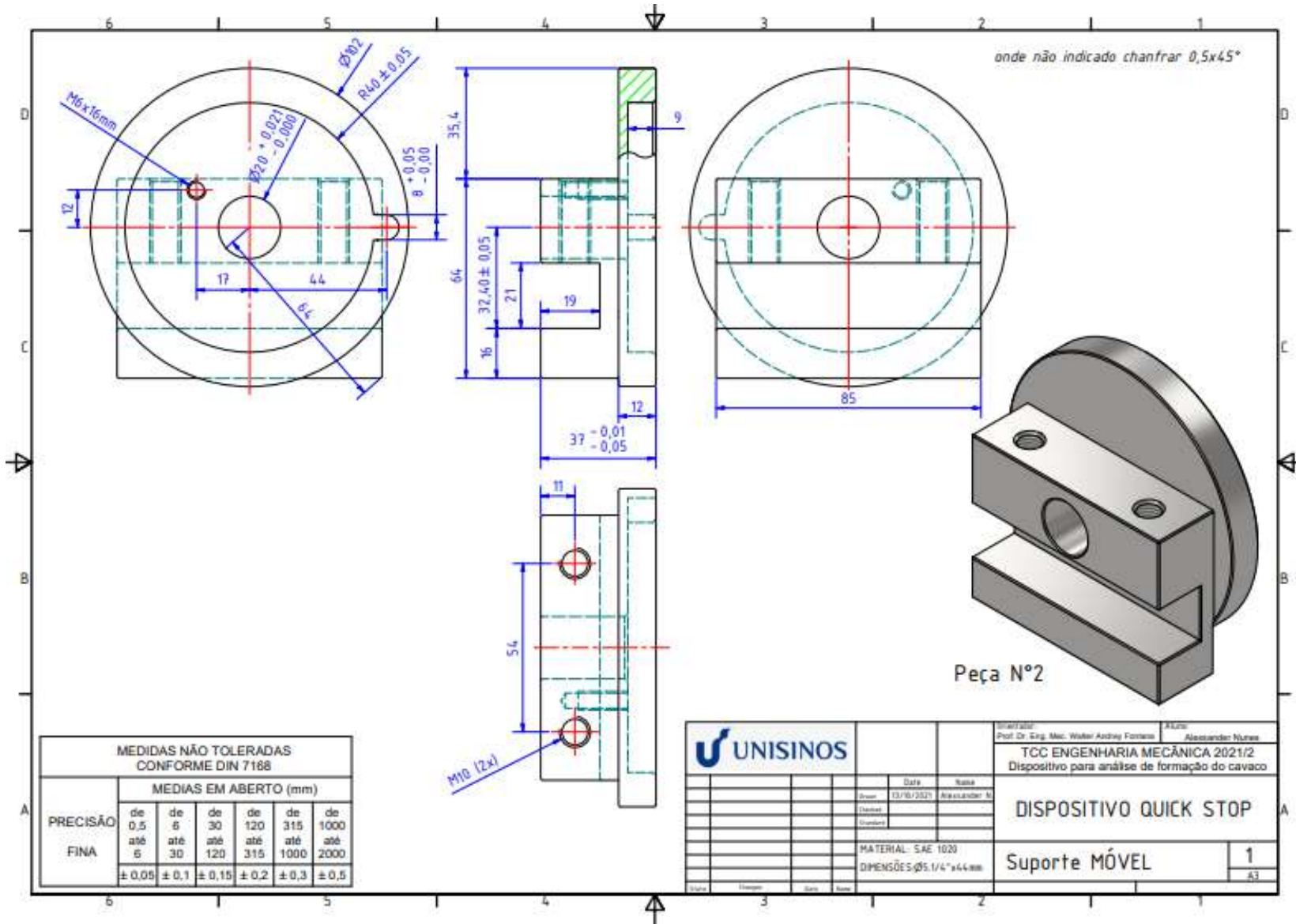
TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000, 464 p.

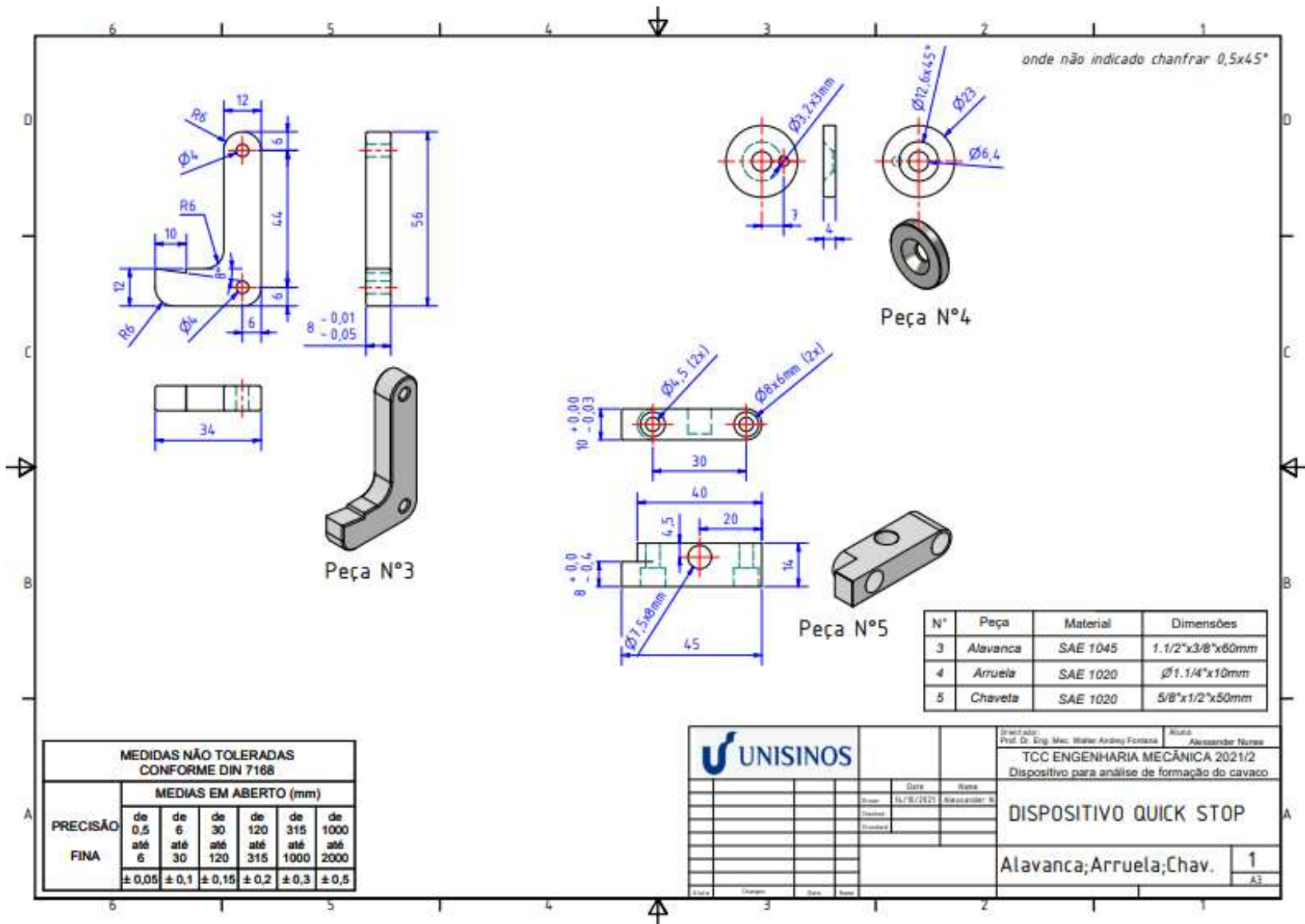
WERK-SCHOTT. **Cilindros Pneumáticos** - Edição: 0104 - Data: julho 2021. 254p. Disponível em: <<https://www.werk-schott.com.br/catalogos>> Acessado em: 16/10/2021.

APÊNDICE A – PROJETO DETALHADO DO DISPOSITIVO QUICK STOP



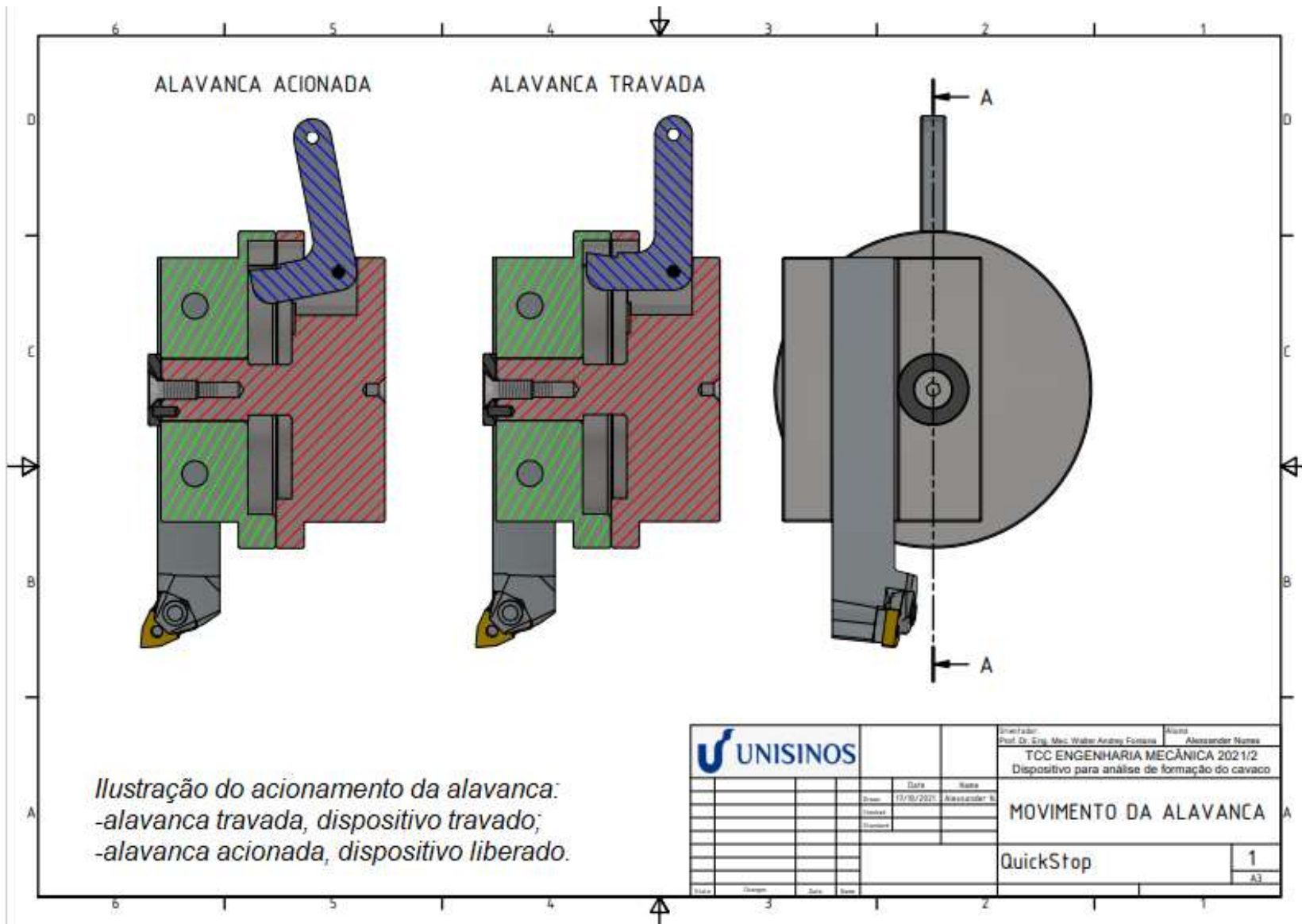






MEDIDAS NÃO TOLERADAS CONFORME DIN 7168						
MEDIDAS EM ABERTO (mm)						
PRECISÃO	de 0,5	de 6	de 30	de 120	de 315	de 1000
	FINA	até 6	até 30	até 120	até 315	até 1000
	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5

		Disciplina: Prof. Dr. Eng. Mec. Walter André Fontana Aluno: Alexander Nunes	
		TCC ENGENHARIA MECÂNICA 2021/2 Dispositivo para análise de formação do cavaco.	
		DISPOSITIVO QUICK STOP	
		Alavanca; Arruela; Chav.	
		1 / A3	



*Ilustração do acionamento da alavanca:
 -alavanca travada, dispositivo travado;
 -alavanca acionada, dispositivo liberado.*

		Professor: Prof. Dr. Eng. Mec. Walter André Fonseca	Aluno: Alexander Nunes
		TCC ENGENHARIA MECÂNICA 202 1/2 Dispositivo para análise de formação do cavaco	
Data: 13/08/2023	Nome: Alexander N.	MOVIMENTO DA ALAVANCA	
Control: Alexander	Assessor:		
QuickStop		1	A3

ANEXO A – VALORES DE $K_{s0,4}$ TABELADO

Apêndice A1

VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE KIENZLE PARA O TORNEAMENTO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS METÁLICOS (CATÁLOGO SANDVIK, 2002.8)

Material	Força de corte específica k_{m1} [N/mm ²]	Dureza (HB)
Aços Sem liga	C=0,1–0,25%	2.000
	C=0,25–0,55%	2.100
	C=0,55–0,80%	2.200
Baixa liga (elementos de liga \leq 5%)	Não endurecidos	2.150
	Aços P/ra rolamentos	2.300
	Endurecidos e Temperados	2.550
	Endurecidos e Temperados	2.850
Alta liga (elementos de liga >5%)	Recozidos	2.500
	Aços-ferramenta endurecidos	3.900
Fundidos	Sem liga	2.000
	Baixa liga (elementos de liga \leq 5%)	2.100
	Alta liga (elementos de liga >5%)	2.650
Aços inoxidáveis – Ferríticos/martensíticos	Não endurecidos	2.300
	PH-endurecidos	3.550
	Endurecidos	2.850
Aços inoxidáveis – Austeníticos	Não endurecidos	2.300
	PH-endurecidos	3.555
	Superausteníticos	2.950
Aços inoxidáveis – Austeníticos-ferríticos (Duplex)	Não soldáveis \geq 0,05%C	2.550
	Soldáveis <0,05%C	3.050
Aços inoxidáveis-Fundidos Ferríticos/martensíticos	Não endurecidos	2.100
	PH-endurecidos	3.150
	Endurecido	2.650

Fonte: Machado *et al.* (2012, p.289).

continuação			
Material		Força de corte específica k_{cut} [N/mm ²]	Dureza (HB)
Aços inoxidáveis-Fundidos			
	Autênticos	2.200	180
	PH-endurecidos	3.150	330
	Superausteníticos	2.700	200
Aços inoxidáveis-Fundidos (Duplex)			
	Não soldáveis $\geq 0,05\%C$	2.250	230
	Soldáveis $<0,05\%C$	2.750	260
Superliga resistente ao calor à base de ferro			
	Recozidas ou tratadas em solução	3.000	200
	Envelhecidas ou tratadas em solução e envelhecidas	3.050	280
À base de níquel			
	Recozidas ou tratadas em solução	3.300	250
	Envelhecidas ou tratadas em solução e envelhecidas	3.600	350
	Fundidas ou fundidas e envelhecidas	3.700	320
À base de cobalto			
	Recozidas ou tratadas em solução	3.300	200
	Tratadas em soluções e envelhecidas	3.700	300
	Fundidas ou fundidas e envelhecidas	3.800	320
Ligas de titânio			
	comercial puro (99,5% Ti)	1.550	Rm ² 400
	α , ligas próximo α e $\alpha+\beta$, recozidas	1.700	950
	ligas $\alpha+\beta$ em condições envelhecidas, ligas β recozidas ou envelhecidas	1.700	1050
Ferros fundidos maleáveis			
	Ferríticos (cavacos curtos)	940	130
	Perlíticos (cavacos longos)	1.100	230
Ferros fundidos cinzentos			
	Baixa resistência à tensão cinzentos	1.100	180
	Alta resistência à tensão	1.150	220
Ferros fundidos Nodulares SG			
	Ferríticos	1.050	160
	Perlíticos	1.750	250
	Martensíticos	2.700	380
Aços duros			
	Endurecidos e temperados	3.250	45 HRC
Aços extraduro			
	Endurecidos e temperados	5.550	60 HRC
Ferros fundidos coquilhados			
	Fundidos ou fundidos e envelhecidos	2.800	400

Fonte: Machado *et al.* (2012, p.390).

continuação			
Material		Força de corte específica k_{cut} [N/mm ²]	Dureza (HB)
Ligas de alumínio frio, não e envelhecidas	Forjadas ou forjadas e tratadas	500	60
	Forjadas ou forjadas e envelhecidas	800	100
Ligas de alumínio forjadas ou forjadas e trabalhadas a frio, não envelhecidas	Forjadas ou forjadas e envelhecidas	500	60
		800	100
Ligas de alumínio	Fundidas não envelhecidas	750	130
	Fundidas ou fundidas e envelhecidas	950	130
Ligas de alumínio	Fundidas 13–15% Si	950	130
	Fundidas 16–22% Si	950	130
Cobre e ligas de cobre	Ligas de corte livre $\geq 1\%Pb$	700	110
	Latão bronze, com chumbo, $\leq 1\%Pb$	700	90
	Bronze, e cobre sem chumbo Incluindo cobre eletrônico	1.750	100

Fonte: Machado *et al.* (2012, p.391).

ANEXO B – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

988

Apêndice A PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Tabela A-1 Propriedades físicas de alguns materiais de engenharia

Dados de várias fontes. * Estas propriedades são essencialmente similares para todas as ligas do material analisado

Material	Módulo de elasticidade E		Módulo de rigidez G		Coeficiente de Poisson ν	Densidade em peso γ	Densidade em massa ρ	Gravidade específica
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/in ³	Mg/m ³	
Ligas de alumínio	10,4	71,7	3,9	26,8	0,34	0,10	2,8	2,8
Cobre berílio	18,5	127,6	7,2	49,4	0,29	0,30	8,3	8,3
Latão, bronze	16,0	110,3	6,0	41,5	0,33	0,31	8,6	8,6
Cobre	17,5	120,7	6,5	44,7	0,35	0,32	8,9	8,6
Ferro, fundido, cinza	15,0	103,4	5,9	40,4	0,28	0,26	7,2	7,2
Ferro, fundido, dúctil	24,5	168,9	9,4	65,0	0,30	0,25	6,9	6,9
Ferro, fundido, maleável	25,0	172,4	9,6	66,3	0,30	0,26	7,3	7,3
Ligas de magnésio	6,5	44,8	2,4	16,8	0,33	0,07	1,8	1,8
Ligas de níquel	30,0	206,8	11,5	79,6	0,30	0,30	8,3	8,3
Aço, carbono	30,0	206,8	11,7	80,8	0,28	0,28	7,8	7,8
Aço, ligas	30,0	206,8	11,7	80,8	0,28	0,28	7,8	7,8
Aço, inoxidável	27,5	189,6	10,7	74,1	0,28	0,28	7,8	7,8
Ligas de titânio	16,5	113,8	6,2	42,4	0,34	0,16	4,4	4,4
Ligas de zinco	12,0	82,7	4,5	31,1	0,33	0,24	6,6	6,6

* Properties of Some Metals and Alloys, International Nickel Co., Inc., N. Y.; Metals Handbook, American Society for Metals, Materials Park, Ohio.

Tabela A-2 Propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio forjado

Dados de várias fontes. * Valores aproximados. Consulte fabricantes de materiais para informações mais precisas

Liga alumínio forjado	Condição	Resistência de escoamento em tração (0,2% deformação)		Resistência máxima em tração		Resistência de fadiga a 5E6 ciclos		Elongação no corpo de ensaio de 2 in	Dureza Brinell
		kpsi	MPa	kpsi	MPa	kpsi	MPa	%	-HB
1100	chapa recozida	5	34	13	90			35	23
	laminada a frio	22	152	24	165			5	44
2024	chapa recozida	11	76	26	179			20	-
	tratada termicamente	42	290	64	441	20	138	19	-
3003	chapa recozida	6	41	16	110			30	28
	laminada a quente	27	186	29	200			4	55
5052	chapa recozida	13	90	28	193			25	47
	laminada a quente	37	255	42	290			7	77
6061	chapa recozida	8	55	18	124			25	30
	tratada termicamente	40	276	45	310	14	97	12	95
7075	barra recozida	15	103	33	228			16	60
	tratada termicamente	73	503	83	572	14	97	11	150

* Properties of Some Metal and Alloys, International Nickel Co., Inc., N. Y.; Metals Handbook, American Society for Metals, Materials Park, Ohio.

Fonte: Norton (2013, p.988).

Tabela A-9 Propriedades mecânicas de alguns aços-carbono

Dados de várias fontes. * Valores aproximados. Consulte os fabricantes de materiais para informações mais precisas

Número SAE / AISI	Condição	Resistência de escoamento em tração (0,2% de deformação)		Resistência máxima em tração		Elongação do corpo de ensaio de 2 in (%)	Dureza Brinell -HB
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1010	laminado a quente	26	179	47	324	28	95
	laminado a frio	44	303	53	365	20	105
1020	laminado a quente	30	207	55	379	25	111
	laminado a frio	57	393	68	469	15	131
1030	laminado a quente	38	259	68	469	20	137
	normalizado a 1650°F	50	345	75	517	32	149
	laminado a frio	64	441	76	524	12	149
	temperado e revenido a 1000°F	75	517	97	669	28	255
	temperado e revenido a 800°F	84	579	106	731	23	302
	temperado e revenido a 400°F	94	648	123	848	17	495
1035	laminado a quente	40	276	72	496	18	143
	laminado a frio	67	462	80	552	12	163
1040	laminado a quente	42	290	76	524	18	149
	normalizado a 1650°F	54	372	86	593	28	170
	laminado a frio	71	490	85	586	12	170
	temperado e revenido a 1200°F	63	434	92	634	29	192
	temperado e revenido a 800°F	80	552	110	758	21	241
	temperado e revenido a 400°F	86	593	113	779	19	262
1045	laminado a quente	45	310	82	565	16	163
	laminado a frio	77	531	91	627	12	179
1050	laminado a quente	50	345	90	621	15	179
	normalizado a 1650°F	62	427	108	745	20	217
	laminado a frio	84	579	100	689	10	197
	temperado e revenido a 1200°F	78	538	104	717	28	235
	temperado e revenido a 800°F	115	793	158	1 089	13	444
	temperado e revenido a 400°F	117	807	163	1 124	9	514
1060	laminado a quente	54	372	98	676	12	200
	normalizado a 1650°F	61	421	112	772	18	229
	temperado e revenido a 1200°F	76	524	116	800	23	229
	temperado e revenido a 800°F	97	669	140	965	17	277
	temperado e revenido a 400°F	111	765	156	1 076	14	311
1095	laminado a quente	66	455	120	827	10	248
	normalizado a 1650°F	72	496	147	1 014	9	13
	temperado e revenido a 1200°F	80	552	130	896	21	269
	temperado e revenido a 800°F	112	772	176	1 213	12	363
	temperado e revenido a 400°F	118	814	183	1 262	10	375

*SAE Handbook, Society of Automotive Engineers, Warrendale Pa.; Metals Handbook, American Society for Metals, Materials Park, Ohio.

Fonte: Norton (2013, p.992).

ANEXO C – CATÁLOGO CILINDROS PNEUMÁTICOS

Catálogo 0103
Informações Técnicas

Cilindros Pneumáticos
Mini ISO - Norma ISO 6432 - Série CWM

Cilindros Mini ISO Norma ISO 6432 - Série CWM

Características Técnicas

Diâmetros	10, 12, 16, 20, 25, 32 e 40
Pressão de Trabalho	Até 10 bar
Temperatura Ambiente	-10°C a +80°C (Buna-N)
	-10°C a +90°C (PU)
	-10°C a +150°C (Viton)
Fluido	Air comprimido filtrado, lubrificado ou não



4

Materiais

Haste	Aço Inoxidável (AISI 304)
Cabeçotes	Alumínio
Vedações	PU ou Viton*
Camisa	Aço Inoxidável (AISI 316)
Êmbolo	10, 12, 16 (Latão) 20, 25, 32 e 40 (Alumínio)

* Pré Lubrificados

** Os cilindros pneumáticos da Série CWM diâmetros 10, 12, 16, 20 e 25 estão em conformidade com a norma ISO 6432.

*** A norma ISO não normaliza os diâmetros de 32 e 40 mm.

Versões Disponíveis

Simplex Aço com Amortecimento Fixo (Ø 10, 12, 16, 20 e 25 mm)
Dupla Aço com Amortecimento Fixo (Ø 10, 12, 16, 20 e 25 mm)
Dupla Aço com Amortecimento Ajustável (Ø 25, 32 e 40 mm)
Dupla Aço com Haste Passante e Amortecimento Ajustável (Ø 25, 32 e 40 mm)

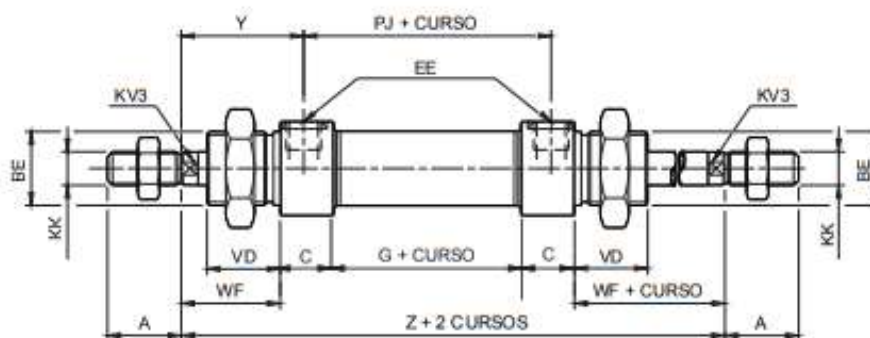
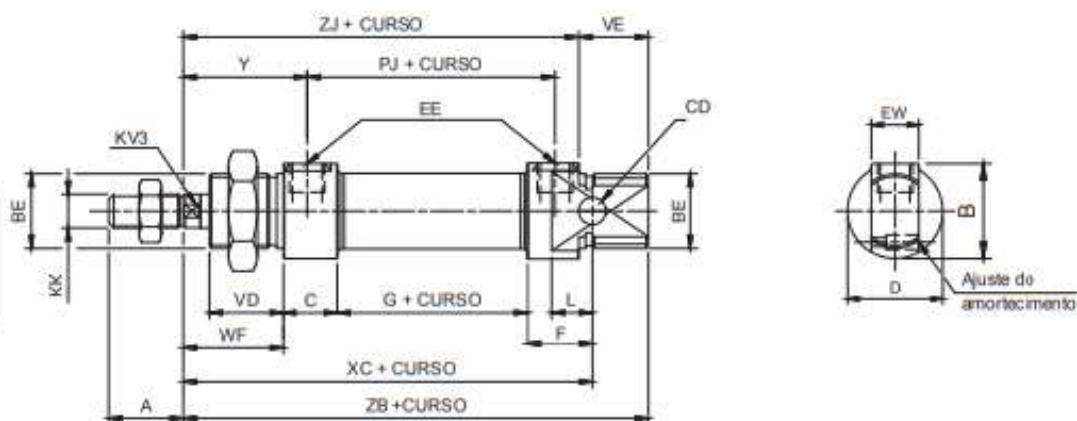
Acessórios

Cartoneira
Flange ISO
Munhão (Dianteiro ou Traseiro)
Articulação Traseira
Porca Pescoço
Ponteira Carlo
Ponteira Rotular
Porca da Haste
Sensores Magnéticos
Suporte para Sensores Magnéticos

Dimensões

Básico

4



BOLIMBO	PJ	JC	A	WF	VD	VE	BE	KK	EE	ZB	KV	L	Y	CD	ZJ	EW	D	Z	C	F	G	B	PESO	
																							CURSO ZERO	PCB/m
10	34	64	12	16	12	12	M12X1,25	M6x0,7	M6	77	-	8	20,5	4	85	8	95	81	11	11	24	15	42,6	1,13
12	38	70	16	22	17	17	M16X0,5	M6x1	M6	89	5	9	26,5	6	72	12	20	94	9	11	33	20	75	2,14
16	44	82	18	22	17	17	M16X0,5	M6x1	M6	96	5	9	28,25	6	79	12	20	101	9	13	38	20	96,6	2,27
20	51,6	95	20	24,5	20	20	M22X0,5	M6x1,25	G1/8"	108	7	12	32	8	86	18	27	110,5	14	18	39,5	27	118,5	3,78
25	53,1	104	22	28	22	22	M22X0,5	M10X0,25	G1/8"	115	9	12	35,5	8	83	18	27	121	13,5	17,5	45	28	164,9	5,22
32	43,5	117,5	22	34	26	26	M30X0,5	M10X0,25	G1/8"	129,5	10	13	34	10	103,5	18	38	137	19	32	32,5	38	339,07	3,68
40	54,6	139,5	24	38	30	30	M36X0,5	M12X0,25	G1/4"	153,5	13	15	39	12	121,5	18	46	162,5	25	40	35,5	46	421,84	1,352

Curso mínimo para 2 amortecedores variáveis 17 mm.