

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CRICILIANO LUIZ SAATH

**DEFINIÇÃO DE FOLGA ENTRE MATRIZ E PUNÇÃO A SER UTILIZADO NA
OPERAÇÃO DE CORTE POR CISALHAMENTO**

**CAXIAS DO SUL
2025**

CRICILIANO LUIZ SAATH

**DEFINIÇÃO DE FOLGA ENTRE MATRIZ E PUNÇÃO UTILIZADA NA OPERAÇÃO
DE CORTE POR CISALHAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito para a conclusão do curso de
Engenharia Mecânica na Universidade de
Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini
Michels

Banca examinadora: Prof. Dr. Alexandre Viecei
Prof. Dr. Giovani Dambros Telli

CAXIAS DO SUL
2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A meus pais Silvio e Degenira pelo apoio e incentivo que serviram de base para minhas realizações.

A minha esposa Aline e nossas duas filhas pela compreensão e paciência demonstrada em toda minha trajetória acadêmica.

Aos Professores do Curso de Engenharia Mecânica da UCS, em especial ao professor Alexandre Fassini Michels, que me orientou na elaboração desta monografia.

Aos colegas de trabalho, que me auxiliaram nas etapas de implementação da proposta de melhoria apresentada neste trabalho.

RESUMO

Este trabalho focou no desenvolvimento e na avaliação de uma ferramenta experimental projetada para o estudo aprofundado do processo de corte de chapas metálicas por cisalhamento. O objetivo principal foi identificar uma folga ideal entre punção e matriz que permitisse o corte de diferentes espessuras de aço (0,5 mm a 1 mm) sem a necessidade de trocas de matriz, otimizando o processo produtivo. A pesquisa utilizou uma matriz multifuncional em uma linha de processamento de bobinas com aço inoxidável 304, realizando experimentos com variação da folga radial (5% a 25%). Os resultados demonstraram que uma folga radial constante de 25% proporcionou cortes precisos e de alta qualidade para ambas as espessuras de material testadas. A superfície cortada apresentou acabamento adequado, com poucas rebarbas. Análises microscópicas confirmaram a ausência de deformações excessivas no material e um desgaste mínimo da ferramenta mesmo após múltiplos ciclos, validando a eficiência do design da matriz multifuncional. A conclusão do estudo é que a determinação de uma folga de corte ideal, que possibilite o processamento de diversas espessuras de material sem a necessidade de trocas de matriz, representa um avanço significativo para a indústria metalomecânica. Essa otimização não apenas resultará na redução dos tempos de setup, aumentando o volume de produção e a competitividade, mas também contribuirá para a melhoria da segurança dos operadores, minimizando a exposição a riscos durante ajustes de ferramentas. Em síntese, este estudo demonstra o potencial da otimização da folga de corte como um pilar fundamental para a eficiência, qualidade e segurança na manufatura de componentes por cisalhamento.

Palavras-chave: Cisalhamento, Corte de chapas, Folga de corte, Otimização de processo, Matriz multifuncional, Produtividade industrial.

Abstract

This study focused on the development and evaluation of an experimental tool designed for an in-depth investigation of the shear cutting process of metal sheets. The primary objective was to identify an ideal clearance between punch and die that would allow the cutting of different steel thicknesses (0.5 mm to 1 mm) without the need for die changes, thereby optimizing the production process. The research utilized a multifunctional die in a coil processing line with 304 stainless steel, conducting experiments by varying the radial clearance (5% to 25%). The results demonstrated that a constant radial clearance of 25% provided precise and high-quality cuts for both tested material thicknesses. The cut surface exhibited an adequate finish with minimal burrs. Microscopic analyses confirmed the absence of excessive material deformation and minimal tool wear even after multiple cycles, validating the efficiency of the multifunctional die design. The conclusion of this study is that determining an ideal cutting clearance, which enables the processing of various material thicknesses without the need for die changes, represents a significant advancement for the metalworking industry. This optimization will not only result in reduced setup times, increasing production volume and competitiveness, but also contribute to improved operator safety by minimizing exposure to risks during tool adjustments. In essence, this study demonstrates the potential of cutting clearance optimization as a fundamental pillar for efficiency, quality, and safety in the manufacturing of components by shearing.

Keywords: Shearing, Sheet cutting, Cutting clearance, Process optimization, Multifunctional die, Industrial productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de peças com requisitos de alta qualidade cortadas por cisalhamento	15
Figura 2: Etapas do corte por cisalhamento	16
Figura 3: Fases do processo de corte por cisalhamento	16
Figura 4: Representação da folga entre o punção e a matriz	18
Figura 5: Determinação do valor da folga para diferentes materiais e espessuras. ...	19
Figura 6: Representação da matriz a ser construída.....	22
Figura 7: Representação da ferramenta.....	23
Figura 8: Exemplo esquemático de uma linha de corte por cisalhamento	23
Figura 9: Desbobinador no início da linha de corte	24
Figura 10: Representação do desbobinador e os rolos aplainadores	25
Figura 11: Representação da estação com os rolos de tração	26
Figura 12: Representação do processo de corte de discos na chapa.....	27
Figura 13: Representação da região cisalhada dos discos cortados, com diferentes percentuais de folga radial	32
Figura 14: Percentual de ruptura.....	34
Figura 15: Representação do disco cortado juntamente do retalho, evidenciando o local onde foi retirado as amostras.....	36
Figura 16: Representação das amostras acondicionadas e prontas para fazer o Embutimento	36
Figura 17: Representação do dimensional de uma das amostras após feita a avaliação macroscópica	37
Figura 18: Representação de perfil da região cisalhada, evidenciando a manutenção do perfil cisalhado, em diferentes espessuras de aço	38
Figura 19: Representação da região cisalhada dos discos cortados com a mesma folga e espessuras diferentes.....	39
Figura 20: Percentual de ruptura x espessura.....	41
Figura 21: Percentual de deformação plástica x espessura	41

Figura 22: Altura da rebarba x folga de corte	42
Figura 23: Representação das amostras do material a ser utilizado (disco) e o material descartado (sucata).....	42
Figura 24: Representação do comportamento das fases do corte por cisalhamento	44
Figura 25: Representação do comportamento das fases do corte por cisalhamento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação de folga (espessura x resistência de corte)	20
Tabela 2: Exemplos de cálculo da máxima força de corte para um punção de 25mm de diâmetro e espessura da chapa 1mm	21
Tabela 3: Exemplo das folgas existentes nas ferramentas	28

LISTA DE SÍMBOLOS

Ac	Área de corte (mm ²)
Rc	Resistência ao corte (MPa)
Ce	Constante de corte
Tc	Tensão de cisalhamento (MPa)
s	Espessura da chapa (mm)
Pc	Perímetro de corte (mm)
Rm	Resistência a ruptura (MPa)
Fc	Força de corte (N)
J	Folga de corte (mm)

SUMÁRIO

Abstract	4
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 CORTE POR CISALHAMENTO	14
2.2 ELEMENTOS BÁSICOS E MECANISMOS DO PROCESSO	15
2.2.1 Afiação das ferramentas de corte	17
2.2.2 Folga de corte	17
2.3 CÁLCULO DA FORÇA DE CORTE.....	20
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
3.1 FERRAMENTAL DESENVOLVIDO.....	22
3.2 LINHA DE CORTES DE BOBINA.....	23
3.2.1 Desbobinamento.....	24
3.2.2 Nivelamento	25
3.2.3 Rolos de tração.....	25
3.2.4 Prensa tipo “H”	26
3.3 MÉTODO DE CORTE COM MATRIZ MULTIFUNCIONAL	28
3.3.1 CONDIÇÕES DO TESTE COM MATRIZ MULTIFUNCIONAL.....	29
3.4 TESTES COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE FOLGA RADIAL	29
4. RESULTADOS	31
4.1ANÁLISE MICROSCÓPICA	34
4.2 ANÁLISE COM LUPA DE AUMENTO DAS AMOSTRAS CORTADAS COM A MESMA FOLGA.....	37
4.3 REPRESENTAÇÃO VISUAL DAS FASES DO CORTE.....	42
4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46

5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia da formação do metal desempenha um papel fundamental no segmento metalomecânico, que vai além da fabricação de produtos semiacabados. A produção de componentes discretos utilizando chapas metálicas e técnicas de conformação sólida tem grande importância. As aplicações vão desde a engenharia automotiva até a construção de edifícios.

O processo de corte por cisalhamento é uma das tecnologias que permite a fabricação seriada de peças através de chapas metálicas. Para a transferência de força, precisão nas medidas e posições geralmente se utilizam prensas. A atuação da prensa é na entrega de força e inércia para as ferramentas de corte e o objetivo é o corte ou conformação da chapa. Seja através de meios mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos e em diferentes cargas e velocidades.

A demanda por qualidade tem aumentado diariamente, acompanhada pela necessidade de reduzir custos e acelerar a produção, o que torna essencial o aprimoramento contínuo dos processos. Com o objetivo de estudar as folgas de corte por cisalhamento, foi projetada e construída uma ferramenta que permite a variação controlada das folgas, possibilitando a análise de sua influência na qualidade do corte. Além disso, permite que sejam realizados experimentos orientados à supervisão do processo, como forma de acompanhar o desgaste das partes ativas da ferramenta e também detectar problemas como excesso de rebarba nas peças cortadas.

As prensas utilizadas neste estudo operam com uma série de etapas em linha para permitir alimentação precisa da chapa no corte e posterior processamento. Inicialmente, tem-se um desenrolador, seguido por um planificador, roletes de deslizamento, um espaço que funciona como pulmão para o processo, ajudando no alívio de tensões, e, por fim, o corte.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com as crescentes demandas de produção, necessitam-se mudanças nos processos produtivos para se extrair ao máximo dos equipamentos e ferramentas. “No mundo competitivo e globalizado, obtém sucesso quem alcançar o objetivo da maneira mais econômica” (MOTTA, CALÔBA, 2013). Dentro das indústrias metalomecânicas, a competitividade pode ser expressa de diversas maneiras, uma delas é a maior produção possível com o tempo de disponibilidade do equipamento. Processos de conformação a frio, tal como o corte por cisalhamento de chapas de aço, utilizam de punções e matrizes. “A qualidade da ferramenta tem direta influência sobre a qualidade do produto acabado” (LANGE *et al.*, 1992).

No processo de corte, existe uma determinada folga entre a matriz e punção para cortar diferentes espessuras de aço. A folga entre a lâmina superior e a lâmina inferior no corte de chapas metálicas é essencial para garantir um corte eficiente e de alta qualidade, sem danificar o material. Segundo Hambli (2001), a folga varia entre 2% e 10% dependendo também das propriedades do material e de sua espessura. No entanto, após uma certa quantidade de ciclos, ocorre um desgaste entre as duas partes, gerando defeitos na aresta de corte das duas partes. As imperfeições resultantes no conjunto de matriz e punção acabam sendo transmitidas para a peça cortada, o que compromete os requisitos de qualidade.

Para cortar diferentes espessuras de aço, e devido à complexidade da agulha, é mais fácil realizar o *setup* da matriz, ajustando a folga de corte conforme a necessidade.

Prolongar a vida útil da ferramenta é fundamental para viabilizar a manufatura. Lange *et. al* (1992) afirmam que, devido aos altos custos iniciais das ferramentas e do *setup*, as tecnologias de conformação de metais são mais viáveis para produção em larga escala. Para manter a competitividade no mercado, é necessário um volume elevado de produção. O presente trabalho justifica-se por estudar e definir uma folga de corte ideal entre punção e a matriz, visando minimizar o tempo de *setup* ao cortar diferentes espessuras de aço. Além disso, busca-se melhorar a qualidade da aresta cisalhada, e também garantir a saúde e segurança do trabalhador. Pois com a diminuição dos *setups*, os operadores ficam menos tempo expostos às adversidades.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e avaliar uma ferramenta experimental que permita identificar a folga ideal entre punção e matriz para o corte por cisalhamento de chapas metálicas de diferentes espessuras, visando a otimização do processo produtivo.

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar diferentes folgas entre matriz e punção, mantendo o mesmo punção, para determinar a folga ideal que atenda às especificações técnicas da peça, eliminando a necessidade de *setup* ao cortar diferentes espessuras de aço.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados a fim de obter sucesso na execução do objetivo geral:

- a) estudar a literatura em relação ao processo de corte por cisalhamento de chapas;
- b) definir uma folga de corte ideal entre punção e a matriz e testar o corte em distintas espessuras do material;
- c) avaliar as arestas dos discos cortados e a região cisalhada para validar a mudança no processo.
- d) avaliar o intervalo das espessuras de componentes que podem ser produzidos mantendo a qualidade da aresta de corte dos produtos, como também do equipamento, devido a diminuição de *setup*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O corte por cisalhamento é um processo essencial em diversas indústrias, onde uma força externa provoca a deformação e separação do material ao longo de um plano de cisalhamento. O referencial teórico sobre esse processo envolve a análise das tensões de cisalhamento, a influência de fatores como geometria da ferramenta e tipo de material, além da importância da resistência ao corte e do desgaste da ferramenta. Estudos teóricos e experimentais são realizados para entender o comportamento do material durante o corte, visando otimizar os parâmetros do processo e melhorar a eficiência, o acabamento superficial e reduzir custos operacionais.

2.1 CORTE POR CISALHAMENTO

O processo de corte que é objeto de estudo deste trabalho está classificado na norma DIN 8580. O processo de corte de chapas metálicas é uma das mais frequentes operações do processo de fabricação de componentes. A DIN 8580 classifica o tipo de processamento em três grupos principais: criação da forma, alteração da forma e alteração das propriedades do material. Anexados a estes grupos, estão distribuídos os processos de fabricação. No grupo 3 encontram-se classificados os processos de separação, entre estes, os processos de corte (descrito na DIN 8588), entre estes o corte por cisalhamento. A norma classifica as diversas maneiras de se efetuar o corte por cisalhamento, neste trabalho aplica-se o corte com uma única batida de prensa.

Durante a fabricação de um componente, diversos processos são utilizados, como corte, embutimento, flangeamento, dobramento, entre outros, de acordo com a complexidade da forma final desejada. O corte de chapas é a técnica de separação mais utilizada pela indústria, seja na preparação do blank para embutimento, em ferramentas progressivas ou após a estampagem para a retirada da rebarba. Entre as diversas técnicas existentes, o corte por cisalhamento ou corte convencional destina-se à obtenção de formas geométricas a partir de chapas submetidas à pressão exercida por um punção, tendo como característica importante um ferramental mais simples se comparado a outras técnicas, permitindo a produção de peças com qualidade para a maioria das aplicações.

A Figura 1 mostra alguns exemplos de peças cortadas por cisalhamento, em que se requer uma boa qualidade da região cortada.

Figura 1: Exemplos de peças com requisitos de alta qualidade cortadas por cisalhamento



Fonte: Shuler,1998.

Este método apresenta várias vantagens, como a capacidade de produzir peças com formas geométricas precisas e boa qualidade superficial, sendo eficiente em termos de custo, especialmente em grandes volumes de produção.

2.2 ELEMENTOS BÁSICOS E MECANISMOS DO PROCESSO

Nogueira (2015) define o corte por cisalhamento pela interação de dois elementos básicos, o punção e a matriz. Estes deformam o material até a sua separação total, dividindo estas etapas em: contato, deformação plástica, corte e formação de retalho, avanço do punção e extração. A Figura 02 detalha as etapas do corte por cisalhamento:

Figura 2: Etapas do corte por cisalhamento

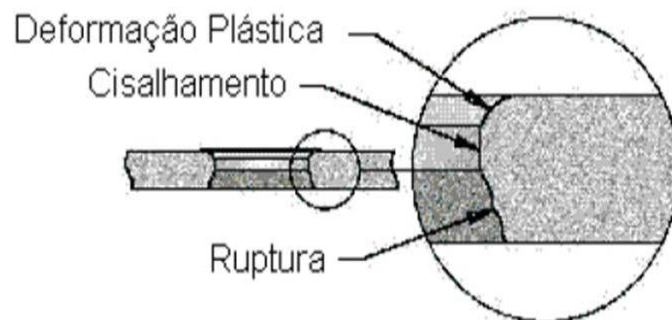


Fonte: Schuler Gmb, apud Nogueira (2015, p.22)

No contato inicial o punção pressiona o material a ser cortado contra a matriz, iniciando a deformação elástica do material.

Na deformação plástica inicia-se a deflexão da chapa, arqueando suas extremidades. Esse fenômeno, segundo Cordeiro (2016), é provocado pela folga de corte e ampliado pelo desgaste da ferramenta. Nesta etapa, ocorre o arredondamento permanente da área de contato entre a chapa e a fase de corte do punção, conforme representado na Figura 03.

Figura 3: Fases do processo de corte por cisalhamento



Fonte: Cordeiro, 2016.

A profundidade de penetração no corte por cisalhamento varia conforme a ductilidade e a espessura do material a ser cortado. Quanto mais dúctil o metal, maior será a penetração do punção. No entanto, metais dúcteis e muito macios, especialmente em chapas finas, tendem a se deformar durante o processo de cisalhamento, o que pode resultar em um maior volume de rebarbas.

2.2.1 Afição das ferramentas de corte

Segundo Bianco (2003), o arredondamento do fio de corte gerado pelo processo de corte por cisalhamento deve ser corrigido pelo processo retífica, onde a face da ferramenta deve ser retificada até a remoção completa do arredondamento ou de qualquer outra imperfeição da aresta de corte. A manutenção correta das matrizes e punções de corte previnem a fadiga gerada pelo aumento do esforço de corte. Segundo Schaefer, Nunes e Brito (2017), a definição do momento exato da afiação aumenta a vida útil da ferramenta, porque a partir de então o desgaste se torna mais acentuado. O processo de afiação deve ser realizado com a aplicação de refrigeração e avanços verticais na faixa de 0,01 mm até 0,03 mm. Nessas condições, o procedimento de afiação não gera superaquecimento e microtrincas na superfície da ferramenta (BIANCO, 2003). A manutenção do fio da aresta de corte e a perpendicularidade da ferramenta são garantidas quando a afiação é realizada em uma retífica plana. Porém, em casos especiais, podem ser utilizados gabaritos ou calços para auxiliar a confecção de inclinações nas ferramentas.

2.2.2 Folga de corte

Schaefer, Nunes e Brito (2017) afirmam que a folga de corte tem influência no acabamento das peças cortadas. Para uma folga muito grande, a zona de arredondamento é mais acentuada, já para folgas inferiores resulta em uma zona de cisalhamento maior. Nos estudos de Müller (2012) existem diversas formas para o cálculo da folga ideal de corte, devendo esta ser determinada considerando além da espessura do material, a resistência de cisalhamento do material.

De forma quantitativa, a folga de corte pode ser calculada para chapas com espessuras inferiores a 3 mm pela Equação 1 (MARCONDES, 2008).

$$W = C_e \cdot s \cdot \sqrt{T_c} \quad (1)$$

onde:

C_e = Constante de corte = 0,007

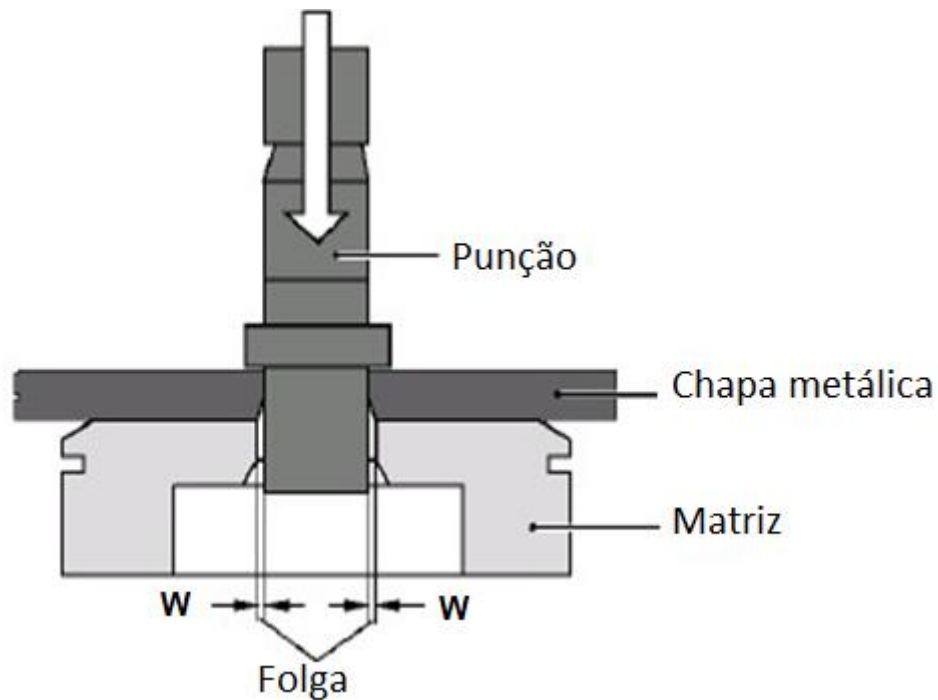
S = Espessura da chapa (mm)

T_c = Tensão de cisalhamento (N/mm²)

W = Folga de corte (mm)

O parâmetro que mais influencia a durabilidade das ferramentas, será a folga (Figura 04) entre a matriz e o punção. Folgas maiores prolongam a vida da ferramenta, enquanto que folgas reduzidas aceleram o processo de desgaste devido ao esforço e atrito sobre a aresta de corte.

Figura 4: Representação da folga entre o punção e a matriz

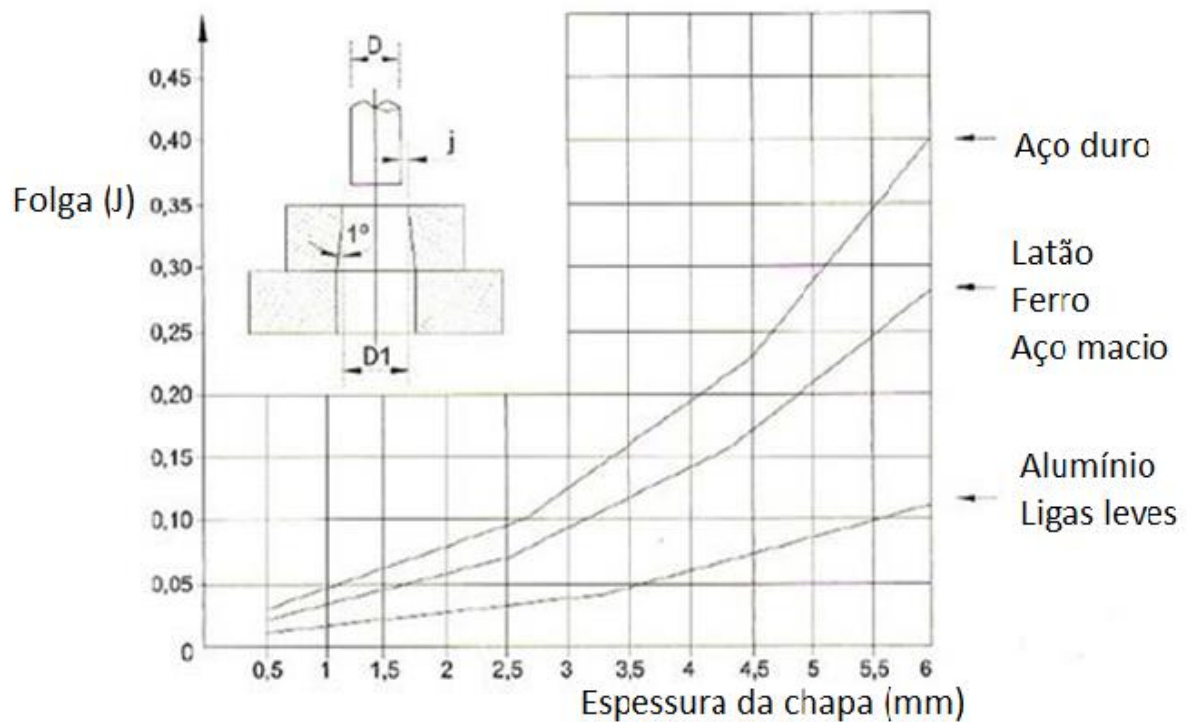


Fonte: Wilson Tool, 2000b, p.9

A folga radial “J” é a medida entre as paredes do punção e da matriz num ponto do contorno e, normalmente, é selecionada com uma percentagem da espessura da chapa. Segundo Rossi, esta folga pode variar entre 5% e 13% da espessura da chapa.

Na Figura 05 observa-se um diagrama que propõem um modelo para a determinação do valor da folga para diferentes materiais e espessuras.

Figura 5: Determinação do valor da folga para diferentes materiais e espessuras.

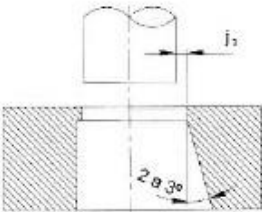
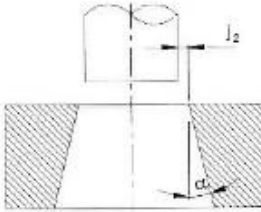


Fonte: Adaptado de Rossi.

Fernandes (2018) apresenta uma forma simplificada para cálculo de folga de corte, a partir da Tabela 01, que relaciona a espessura do material com a resistência de corte, podendo assim obter o resultado da folga de corte sem o auxílio da Equação.

Tabela 1: Especificação de folga (espessura x resistência de corte)

Espessura da chapa (mm)	Folga de corte (mm)							
	j_1				j_2			
	$R_c < 245$	$250 < R_c < 390$	$400 < R_c < 590$	$R_c < 590$	$R_c < 250$	$250 < R_c < 400$	$400 < R_c < 600$	$R_c < 600$
0,1	0,003	0,004	0,005	0,006	0,002	0,003	0,004	0,005
0,2	0,006	0,008	0,010	0,012	0,003	0,005	0,007	0,01
0,3	0,009	0,012	0,015	0,018	0,005	0,008	0,008	0,015
0,4								
0,5	0,015	0,02	0,025	0,03	0,01	0,015	0,015	0,025
0,5								
0,7								
0,8	0,025	0,03	0,04	0,05	0,015	0,02	0,02	0,04
0,9								
1	0,03	0,04	0,05	0,06	0,02	0,03	0,03	0,05
1,5		0,06	0,08	0,09	Rc - Resistência ao Corte (MPa)			
2	0,05	0,08	0,10	0,12				
2,5		0,10	0,13	0,15				
3	0,08	0,12	0,15	0,18				
3,5	0,10	0,14	0,18	0,21				
4	0,12	0,16	0,20	0,24				
4,5	0,14	0,18	0,22	0,27				
5	0,16	0,20	0,25	0,30				

Rc-Resistência ao corte (MPa)

Fonte: J. Duarte, A. Rocha e A. Santos (2003), apud, Adaptado de Fernandes (2018).

2.3 CÁLCULO DA FORÇA DE CORTE

O cálculo da força de corte é uma etapa importante para o projeto de uma ferramenta de estampo. Segundo Müller (2012), para o cálculo utiliza-se a Equação

2, que apresenta o resultado pela multiplicação da tensão de ruptura pela área de corte.

$$F_c = T_c \cdot A_c \quad (2)$$

Onde:

F_c = Força de corte (N)

T_c = Tensão de corte (N/mm²)

A_c = Área de corte (mm²)

Como os dados de tensão de corte normalmente não são tabelados, utiliza-se a Equação 3 para obter a tensão de corte.

$$T_c = 0,8 \cdot R_m \quad (3)$$

Onde:

T_c = Tensão de corte (N/mm²)

R_m = Resistência de ruptura (N/mm²)

Para calcular a área de corte utiliza-se a Equação 4, obtida a partir do produto do perímetro de corte pela espessura da chapa.

$$A_c = p_c \cdot s \quad (4)$$

Onde:

A_c = Área de corte (mm²)

p_c = Perímetro de corte (mm)

s = Espessura da chapa (mm)

Tabela 2: Exemplos de cálculo da máxima força de corte para um punção de 25mm de diâmetro e espessura da chapa 1mm

Tipo	Material	Força de corte	Resistência do material (Rm)
Aço Baixo Carbono	DC04 (EN, 10130)	20,0 KN	270.....350 N/mm ²
Aço Inoxidável	304 S 15 (BS, 1449-2)	40,0 KN	550.....750 N/mm ²

Fonte: o Autor (2025).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

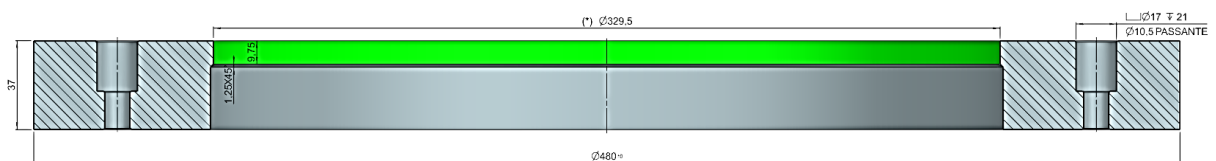
Neste capítulo serão apresentados os métodos para a realização do trabalho, o que inclui equipamentos desenvolvidos, matrizes confeccionadas e o projeto do experimento.

3.1 FERRAMENTAL DESENVOLVIDO

Um dos objetivos deste trabalho foi projetar e construir uma matriz de aço de corte e feito tratamento térmico para atingir a dureza de 60 HRC. Posteriormente, permitisse fazer alterações dimensionais para assim haver um desenvolvimento de pesquisas sobre o processo. Esta deveria possibilitar uma abordagem de engenharia ao processo de corte por cisalhamento permitindo a variação sistemática dos parâmetros mais importantes no fenômeno em questão.

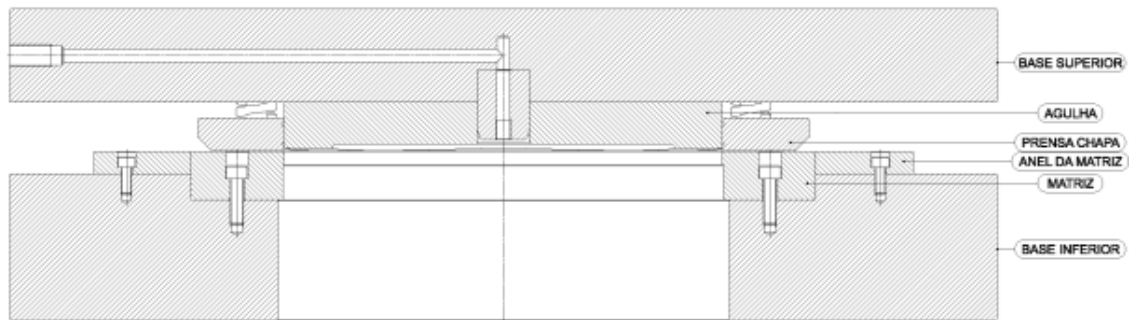
A Figura 06 mostra a matriz construída. Esta será montada em uma ferramenta que possui uma estrutura principal convencional com duas bases, duas colunas, e um prendedor de chapas, como podemos ver na Figura 07. As colunas servem para o transporte da ferramenta e para ajudar na centralização, quando inserida na máquina. Porém a ferramenta não trabalha com as colunas montadas no conjunto.

Figura 6: Representação da matriz construída



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 7: Representação da ferramenta

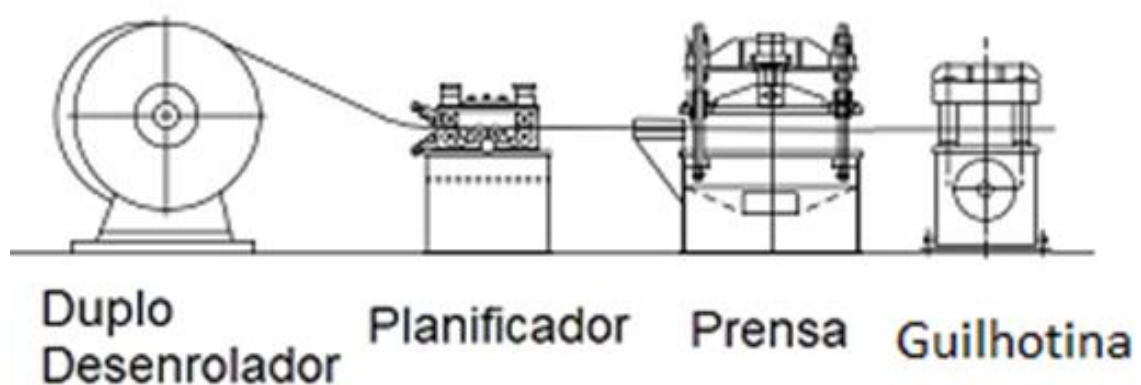


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 LINHA DE CORTES DE BOBINA

Uma linha de processamento de bobinas de aço, é um conjunto de equipamentos e processos integrados para transformar bobinas brutas de aço em produtos acabados ou semiacabados prontos para uso em indústrias como a automotiva, de construção, eletrodomésticos, entre outras. O processo envolve diversas etapas que são cuidadosamente controladas para garantir a qualidade, as propriedades mecânicas e a estética do material final. Na Figura 08 são ilustradas, as principais etapas típicas de uma linha de processamento de bobinas de aço.

Figura 8: Exemplo esquemático de uma linha de corte por cisalhamento

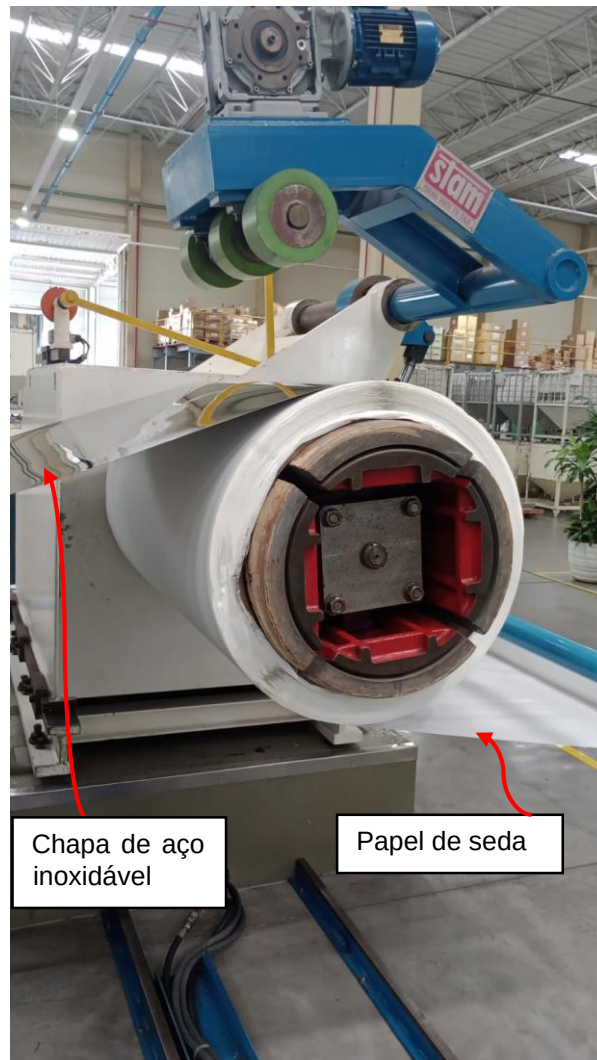


Fonte: Adaptado de Halmos (2006)

3.2.1 Desbobinamento

As bobinas de aço inox que estão embaladas por um plástico de proteção ao redor, tem entre as diversas camadas de aço, um filme de papel de seda que impede uma superfície da tocar na outra, uma vez que o acabamento no material é de extrema importância para o processo. Chegando à linha de processamento, são posicionadas em um desbobinador, que desenrola o aço para que ele possa ser tratado. Esse equipamento é responsável por alimentar a linha de maneira contínua e uniforme.

Figura 9: Desbobinador no início da linha de corte



Fonte: o Autor (2025).

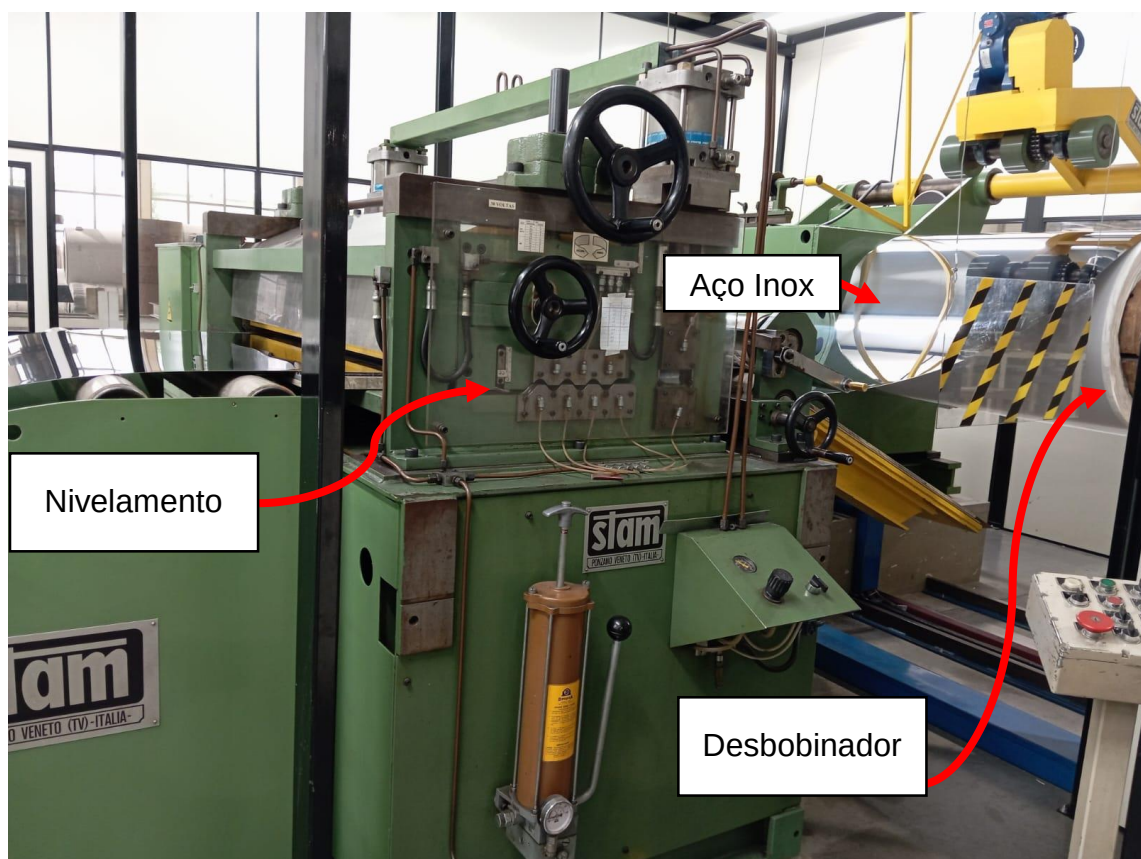
Na Figura 09 observa-se o desbobinador, já com a bobina de aço sendo desenrolada e o enrolamento do papel de seda que fica entre as chapas.

3.2.2 Nivelamento

O aço passa por uma etapa do processo onde deseja-se planificar a chapa que será cortada, a parte da máquina que faz este trabalho se chama nivelador, com uma quantidade de rolos superiores e outra inferior, o material que vai ser conformado, passa entre meio dos rolos para remover ondulações e deformações, garantindo uma superfície plana e uniforme. Conforme (Figura 10).

Esse processo é automatizado para garantir precisão, eficiência e segurança. Os parâmetros de, pressão e velocidade são continuamente monitorados e ajustados para manter a qualidade do produto final.

Figura 10: Representação do desbobinador e os rolos aplainadores



Fonte: o Autor (2025).

3.2.3 Rolos de tração

Após a bobina de aço ser desenrolada e passar pelo nivelamento, a chapa é tracionada por dois rolos que exercem uma força vertical, (Figura 11), movimentando-

a longitudinalmente para determinar o quanto deve avançar até a área de corte na máquina. Um *encoder*, posicionado junto aos rolos, mede o percurso da chapa longitudinalmente, garantindo a precisão da medida.

Figura 11: Representação da estação com os rolos de tração



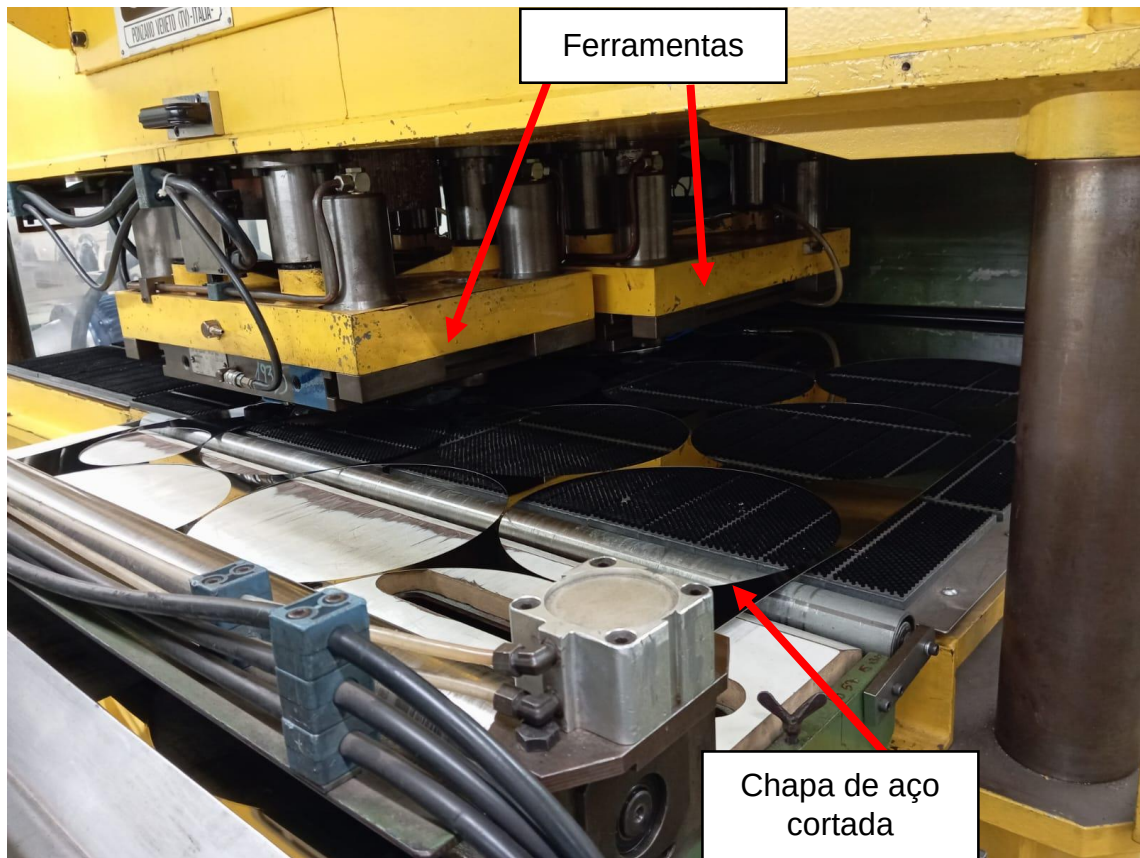
Fonte: o Autor (2025).

3.2.4 Prensa tipo “H”

A prensa em forma de 'H', (Figura 11), pode operar com duas ferramentas simultaneamente, o que agiliza o processo e aumenta a produtividade. Enquanto a chapa se move longitudinalmente, a máquina se movimenta no sentido transversal. Um *encoder*, fixado no fuso de movimento do eixo central da prensa, determina o passo necessário para cortar os discos conforme as ferramentas inseridas no equipamento. Os discos cortados caem em uma esteira e são transportados até a área onde o operador monitora a qualidade das peças produzidas. Vale destacar que, entre um corte e outro, o material residual permanece conectado ao restante da chapa

por cerca de 3 mm. Esse retalho é cortado na operação seguinte, utilizando uma guilhotina.

Figura 12: Representação do processo de corte de discos na chapa



Fonte: o Autor (2025).

3.3 MÉTODO DE CORTE COM MATRIZ MULTIFUNCIONAL

Para puncionar as chapas de aço com espessuras variando entre 0,5 mm e 1 mm, são empregadas duas matrizes distintas, enquanto o punção é mantido em ambas as operações.

Sempre que preciso, a ferramenta de corte é encaminhada à oficina para fazer a devida substituição da matriz. A Tabela 03 explica as diferentes folgas.

Tabela 3: Exemplo das folgas existentes nas ferramentas

Ø do disco a ser cortado	Ø329,5mm
Espessura do aço 0,5mm à 0,7mm	Medida da matriz Ø 329,55mm
Espessura do aço 0,8mm à 1,0mm	Medida da matriz Ø 329,59mm

Fonte: o Autor (2025).

O objetivo deste estudo foi analisar o desempenho da matriz multifuncional no corte de aço com espessuras variando entre 0,5 mm à 1 mm, com foco na manutenção de uma folga radial. A matriz multifuncional foi projetada para permitir o corte de materiais de diferentes espessuras sem a necessidade de troca frequente de componentes, otimizando o tempo de *setup* e aumentando a eficiência do processo.

O processo foi configurado em uma ferramenta de corte, onde a matriz multifuncional foi montada. A ferramenta foi ajustada de acordo com as especificações de projeto, garantindo que a folga radial estivesse dentro do intervalo desejado. Os parâmetros de corte foram ajustados, como a força de corte, a velocidade de avanço e a pressão aplicada, com o objetivo de manter a qualidade do corte em ambas as condições.

A matriz multifuncional foi utilizada para cortar discos de aço Inox 304 de diferentes espessuras, e os cortes foram realizados em série mantendo o sentido de laminação sempre igual, para garantir a repetibilidade dos resultados. Durante os testes, foram monitorados parâmetros como a força de cisalhamento, e a qualidade da superfície cortada. Para cada espessura, foram realizados cortes em pelo menos 5 amostras, de forma a garantir a representatividade dos resultados.

3.3.1 CONDIÇÕES DO TESTE COM MATRIZ MULTIFUNCIONAL

- a) **Material utilizado:** aço Inox 304, com espessuras de 0,5 mm à 1 mm.
- b) **Tipo de matriz:** matriz multifuncional, projetada para acomodar variações na espessura do material sem a necessidade de ajustes frequentes.
- c) **Parâmetros de corte:** a força de corte, força do prendedor de chapas e lubrificação do punção, foram mantidas constantes independente da espessura, visando otimizar o processo sem comprometer a integridade do material.
- d) **Equipamento utilizado:** prensa de corte do tipo “H” de alta precisão.

Após a realização dos cortes dos discos, foi realizada uma análise detalhada das amostras para verificar a qualidade do corte e avaliar os efeitos da matriz multifuncional. A análise foi feita em três frentes principais: inspeção visual, análise microscópica e análise com lupa que possibilita um aumento de até 6 vezes.

As amostras cortadas foram, inicialmente, inspecionadas visualmente para verificar a presença de defeitos superficiais, como rebarbas, trincas, ou irregularidades no perfil do corte. Foi avaliado se a matriz multifuncional foi capaz de manter a qualidade de corte dentro dos parâmetros esperados, garantindo um acabamento suave e preciso.

3.4 TESTES COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE FOLGA RADIAL.

Neste estudo experimental, investigou-se o impacto da variação da folga radial no processo de corte por cisalhamento utilizando uma ferramenta composta por punção e matriz. A folga radial, definida como a diferença entre o diâmetro da matriz e o diâmetro do punção, é um parâmetro que influencia significativamente a qualidade do corte, as forças envolvidas e o desgaste da ferramenta.

Para analisar sistematicamente essa influência, foram realizados testes de corte em um material específico, mantendo-se constantes outros parâmetros relevantes, como a velocidade de corte e a geometria das arestas de corte. A folga radial foi progressivamente aumentada em incrementos de 5%, partindo de uma folga inicial de 5% até atingir 25%. Este processo foi feito através do torneamento interno, é um

processo de usinagem que consiste na remoção de material da superfície interna de uma peça cilíndrica, utilizando uma ferramenta de corte geralmente montada em um suporte, a ferramenta é inserida no furo da peça e, à medida que a peça gira em alta velocidade no torno, a ferramenta avança radialmente, removendo cavacos e ampliando o diâmetro interno para as dimensões comentadas anteriormente. É um processo que garante tolerâncias apertadas e superfícies bem-acabadas.

Para cada configuração de folga, foram coletados dados referentes, à qualidade da superfície cortada (presença de rebarbas, fraturas, etc.) e à deformação plástica observada na zona de cisalhamento.

A variação da folga radial promove alterações significativas no mecanismo de corte. Uma folga muito pequena pode resultar em:

- a) **Aumento da força de corte:** devido ao maior contato e fricção entre o punção e o material.
- b) **Superfície de corte irregular:** com maior probabilidade de ocorrência de fraturas e rebarbas significativas.
- c) **Maior desgaste da ferramenta:** em função do atrito elevado.

Por outro lado, uma folga excessivamente grande pode levar a:

- a) **Corte incompleto ou com deformação excessiva:** O material pode ser repuxado em vez de cortado.
- b) **Superfície de corte angulada:** com menor precisão dimensional.
- c) **Ruído excessivo:** devido ao impacto entre o punção e a matriz.

Os resultados obtidos para cada valor de folga radial (5%, 10%, 15%, 20% e 25%) serão apresentados e analisados detalhadamente, buscando identificar a faixa de folga ideal para atender as metas estabelecidas. Através da análise, da qualidade da superfície e das características da zona de cisalhamento, foi possível correlacionar a folga radial com a eficiência e a qualidade do processo de corte por cisalhamento. Esta investigação visa fornecer informações valiosas para a otimização de processos de corte industrial, contribuindo para a seleção adequada de ferramentas e a obtenção de peças com as características desejadas.

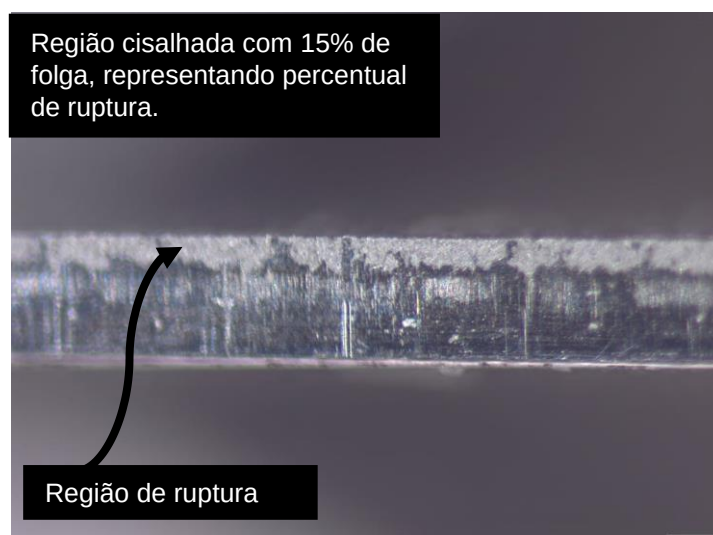
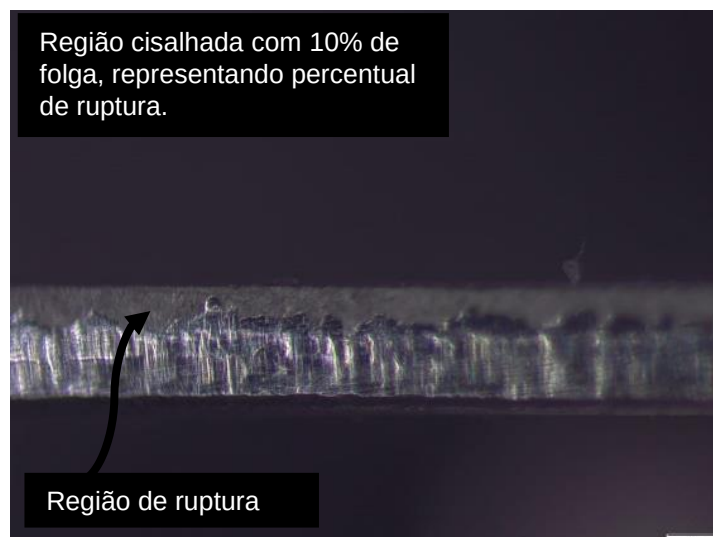
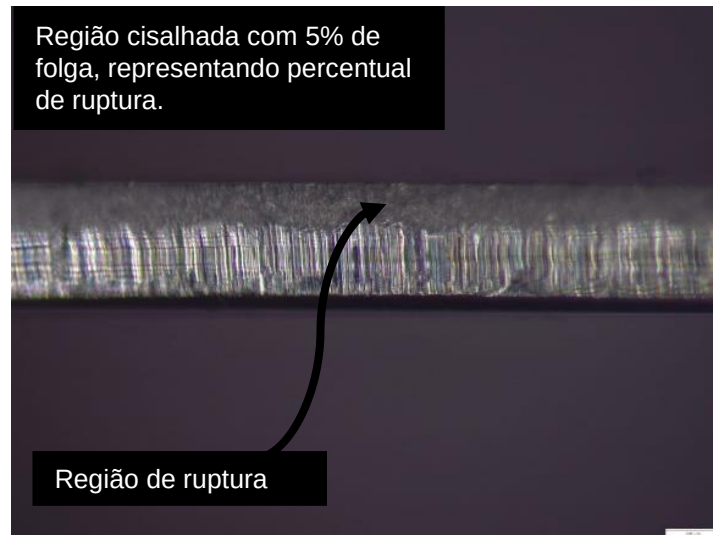
4. RESULTADOS

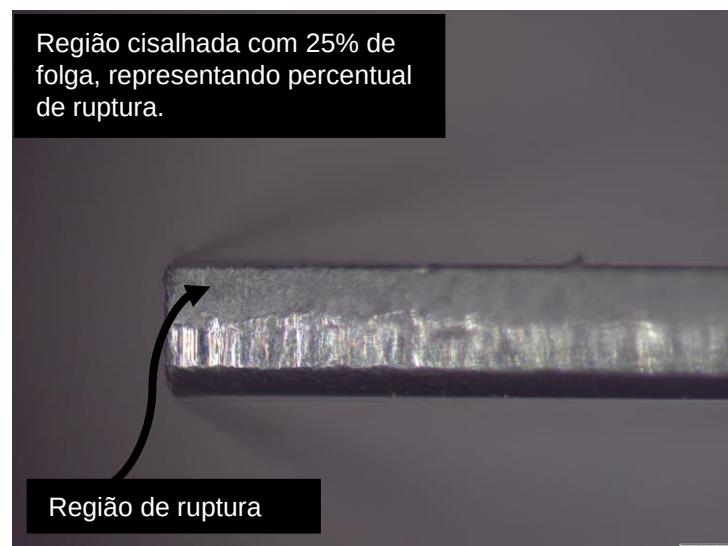
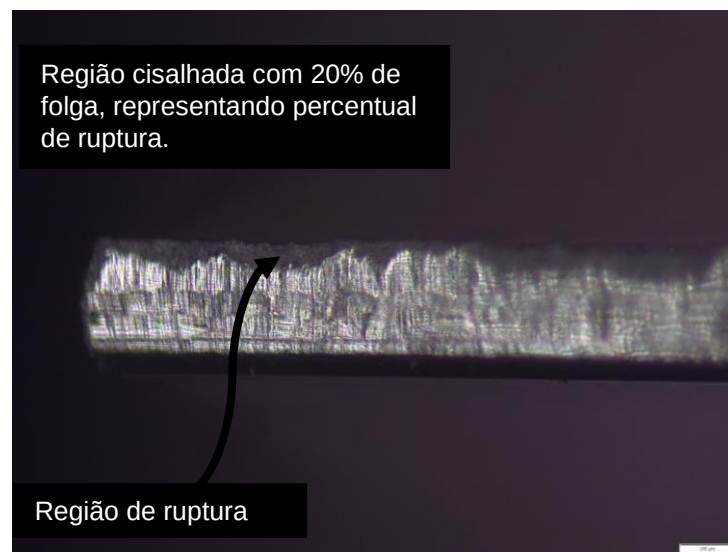
Através da lupa obteve-se visualização ampliada das características superficiais das bordas cortadas, oferecendo um panorama inicial e prático da qualidade do cisalhamento.

Embora não ofereça a profundidade de detalhe de uma análise microscópica, a lupa de aumento é valiosa para uma avaliação comparativa rápida e eficaz entre as diferentes amostras, auxiliando na triagem e na seleção das áreas mais relevantes para investigações futuras.

A partir das imagens (Figura 13), obtidas com a lupa, foi possível dar um passo além na avaliação qualitativa e realizar medições da quantidade de área cisalhada e da quantidade de ruptura. A área cisalhada refere-se à porção da superfície de corte que apresenta um acabamento liso e brilhante, resultado direto da ação de cisalhamento da ferramenta. Já fratura por tração, corresponde à parte final do corte, onde o material se rompe de forma mais irregular e áspera, formando a rebarba. A quantificação dessas duas áreas, por meio de *software* de análise de imagem acoplados à lupa ou diretamente das imagens capturadas, permitiu correlacionar a folga da matriz com a extensão da deformação plástica (área cisalhada) e a propagação da fratura (ruptura), fornecendo dados objetivos sobre a eficiência do processo e a qualidade da borda cortada para cada condição de teste. Essa análise permite compreender como a folga influencia diretamente o mecanismo de separação do material e, conseqüentemente, a qualidade da peça final.

Figura 13: Representação da região cisalhada dos discos cortados, com diferentes percentuais de folga radial

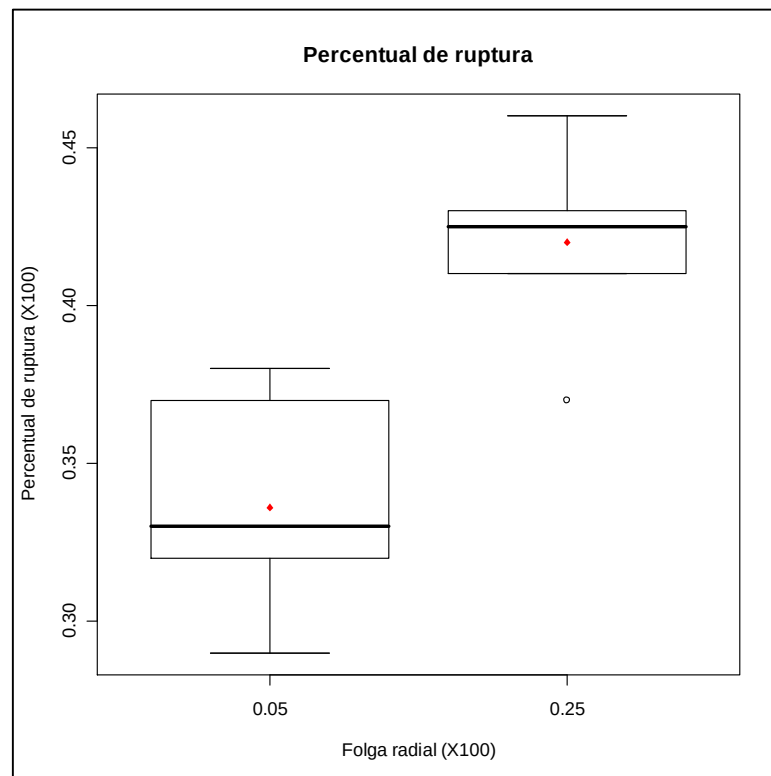




Fonte: o Autor (2025).

As imagens foram analisadas utilizando o software de código aberto ImageJ (versão 1.54g, National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA). Através deste programa, foram realizadas as seguintes etapas: feita a calibração dos pixels, correlacionando a medida real com a escala de medida, posteriormente foram geradas medições a cada 200 μm , da região de fratura no sentido longitudinal do cisalhamento. Os gráficos foram gerados a partir dos dados obtidos no ImageJ e exportados para o Excel.

Figura 14: Percentual de ruptura



Fonte: o Autor (2025).

Ao analisar os resultados obtidos, observou-se que a folga testada de 25% atende às necessidades do trabalho, indicando que as condições de corte estabelecidas foram satisfatórias para o propósito da pesquisa. Essa etapa experimental permitiu identificar o intervalo de folga que proporciona um corte eficaz, seja em termos de qualidade superficial, forças envolvidas ou integridade do material.

Com base no sucesso desses testes iniciais e na identificação de uma folga que se mostrou adequada, o próximo passo fundamental no nosso estudo será a realização de análises microscópicas detalhadas. Estas análises foram concentradas nas amostras resultantes dos testes que apresentaram o melhor desempenho, fornecendo uma visão aprofundada da microestrutura da região de corte.

4.1ANÁLISE MICROSCÓPICA

O objetivo das análises microscópicas é elucidar os mecanismos de deformação e fratura que ocorrem durante o cisalhamento. Será possível observar a

formação da zona de cisalhamento, a presença de trincas, o arredondamento da borda superior e a formação da rebarba. Essa investigação em nível microscópico é essencial para correlacionar os parâmetros do processo (como a folga) com a qualidade final do corte e para validar as observações macroscópicas. A compreensão dessas características permitirá uma otimização ainda maior do processo de corte por cisalhamento.

As amostras foram então preparadas, embutidas em resina fenol-formaldeído em uma embutidora (modelo Pre-30Mi, da Arotec, localizada no LCMM, na UCS) e lixadas e polidas em uma politriz automática (modelo Tegramin-20, da Struers localizada no LCMM, na UCS). O método de corte, lixamento e polimento foi baseado nas instruções da Struers, específicas para aço Inox e suas ligas (STRUERS, 2024). As amostras foram lixadas com lixas de carvão de silício de grão 220, 320, 500, 800, 1000 e 1200, sequencialmente. Para o polimento, foram utilizadas suspensão diamantada de 9 μm . As amostras foram protegidas com algodão e armazenadas para evitar riscos superficiais no manuseio e no desmonte da baquelite." para análise microscópica, utilizado um microscópio óptico para estudar com maior detalhe a estrutura da superfície cortada. As imagens obtidas permitiram observar características importantes, como:

- a) **Seção transversal do material cortado:** identificação de alterações no material devido ao processo de corte, como deformações nas arestas cisalhadas e altura da rebarba.
- b) **Qualidade da superfície de corte:** verificação de microdefeitos, como rugosidade excessiva, ou quanto tem-se de área cisalhada e quanto é fratura, que poderiam indicar problemas no processo de corte.

Foram registradas algumas imagens para demonstração do processamento das amostras.

Primeiramente, as amostras foram cortadas do disco e do retalho em uma máquina de Eletroerosão a Fio Charmilles, com dimensões de 10 mm x 10 mm como pode-se ver na (Figura 15) abaixo:

Figura 15: Representação do disco cortado juntamente do retalho, evidenciando o local onde foi retirado as amostras



Fonte: O autor (2025)

Na segunda etapa, foram posicionadas as amostras para que se conseguisse fazer o Embutimento e posteriormente as análises macroscópicas, como pode-se observar na (Figura 16) a seguir.

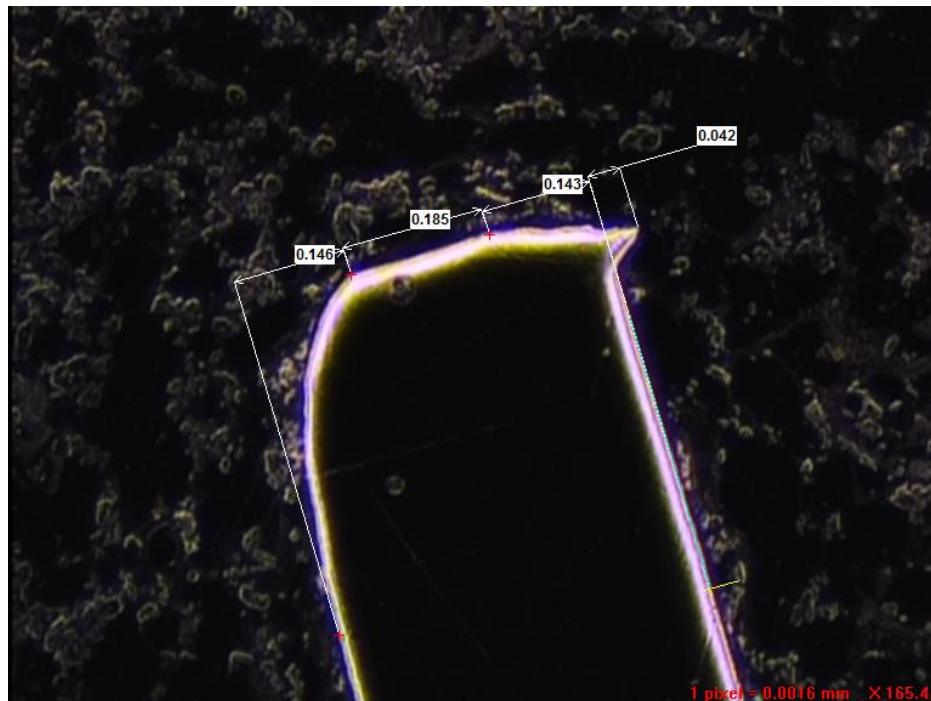
Figura 16: Representação das amostras acondicionadas e prontas para fazer o Embutimento



Fonte: O autor (2025)

Após a realização do Embutimento e acabamento das amostras, a próxima etapa permitiu analisar as amostras em termos de medidas das regiões de deformação plástica, cisalhamento, ruptura e rebarba. (Figura 17).

Figura 17: Representação do dimensional de uma das amostras após feita a avaliação macroscópica



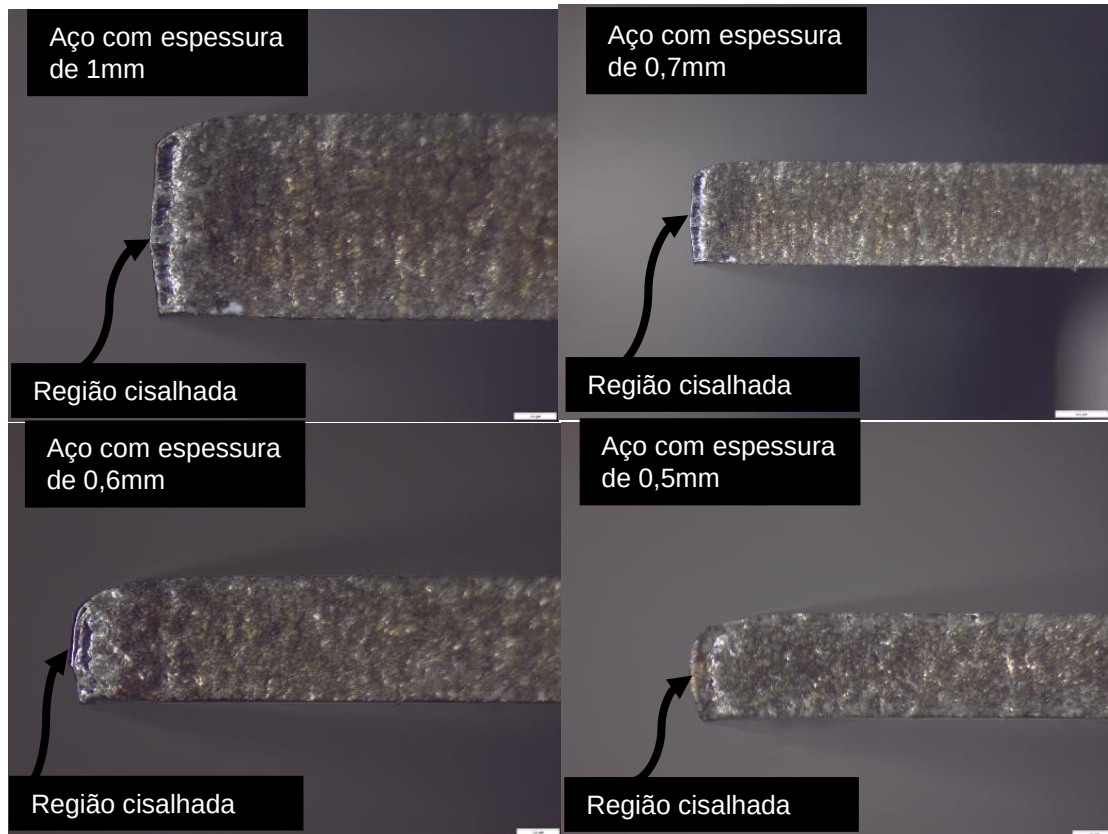
Fonte: o Autor (2025)

As imagens em alta resolução das áreas cortadas, foram comparadas com padrões de qualidade pré-estabelecidos para determinar a eficácia do método de corte.

4.2 ANÁLISE COM LUPA DE AUMENTO DAS AMOSTRAS CORTADAS COM A MESMA FOLGA

As Figura 18 abaixo foram confeccionadas a partir de um corte feito no equipamento (Agie Charmilles Série CUT F). Sendo este, feito transversalmente ao sentido de cisalhamento dos discos extraídos da ferramenta, e posteriormente colocados em uma lupa de aumento para poder observar possíveis deformações nas arestas ou rebarbas excessivas.

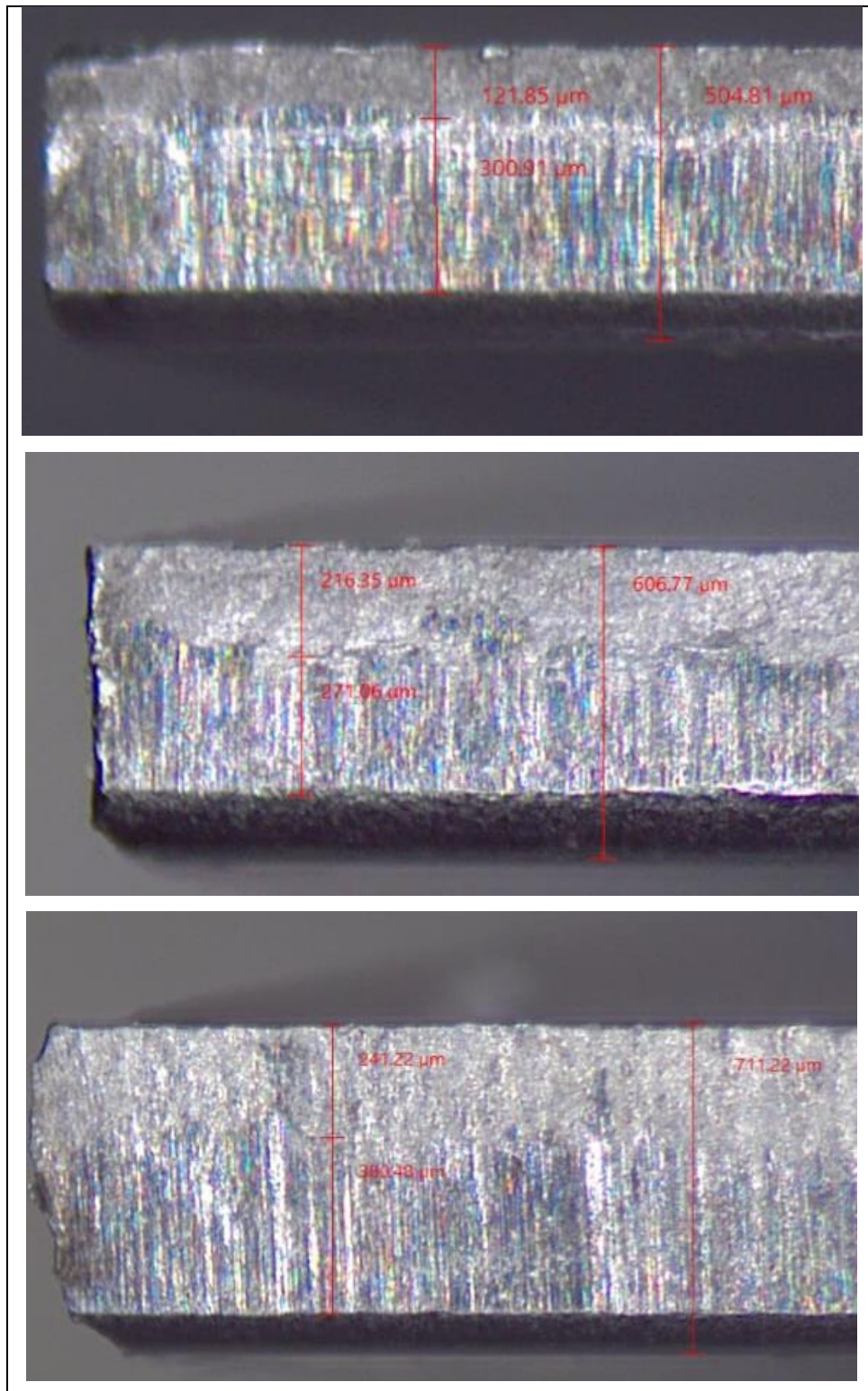
Figura 18: Representação de perfil da região cisalhada, evidenciando a manutenção do perfil cisalhado, em diferentes espessuras de aço

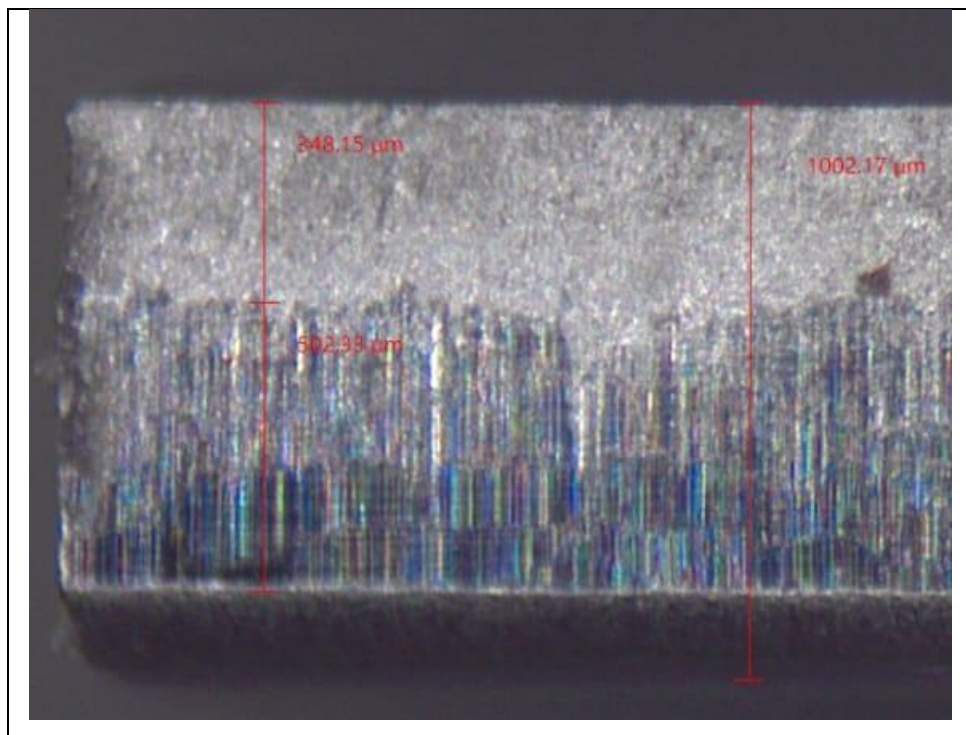


Fonte: o Autor (2025)

Na Figura 18 pode-se observar a seção transversal da região cisalhada, as imagens abaixo mostram a região cisalhada do disco, quando cortado diferentes espessuras (0,5 mm; 0,6 mm; 0,7 mm; 1 mm) com o mesmo percentual de folga radial (25%). Pode-se conferir a mudança existente no percentual de ruptura com relação a espessura e também o percentual de deformação plástica com relação a espessura.

Figura 19: Representação da região cisalhada dos discos cortados com a mesma folga e espessuras diferentes

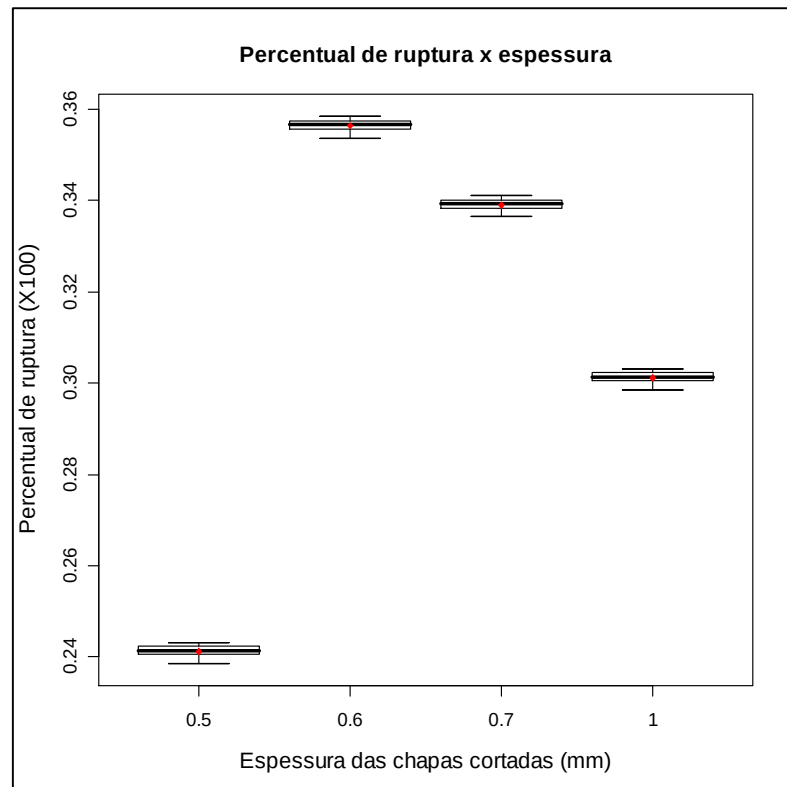




Fonte: o Autor (2025)

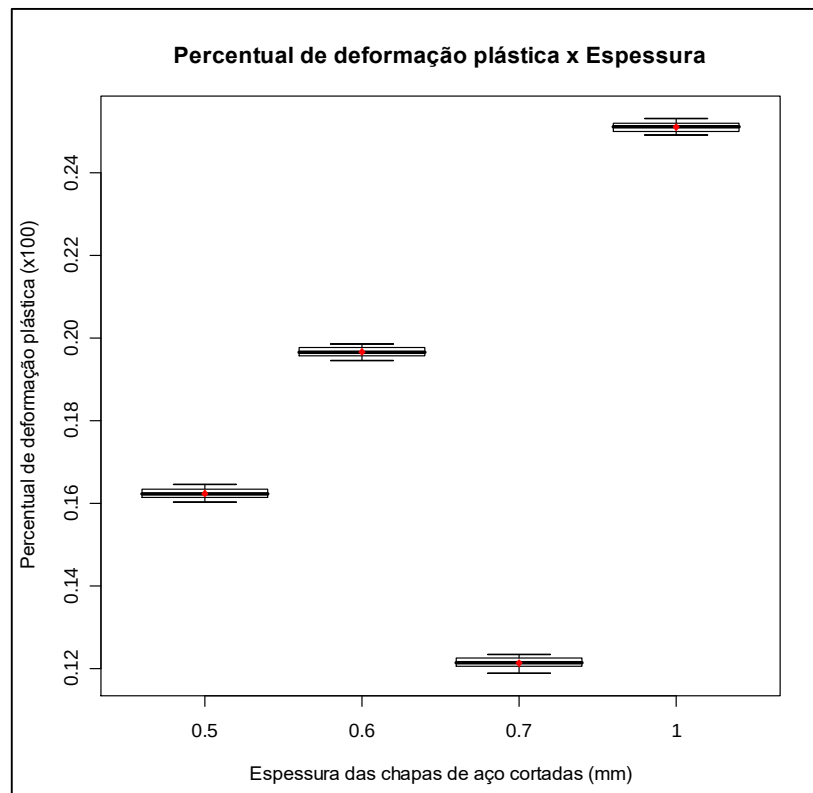
Através das imagens foram medidas, as espessuras dos materiais, a distância da fase final do corte até a intersecção da área cisalhada com a área de estouro e pôr fim a medida da intersecção até o final da deformação plástica. Os gráficos foram gerados a partir dos dados obtidos no ImageJ e exportados para o Excel. (Figuras 20, 21 e 22).

Figura 20: Percentual de ruptura x espessura



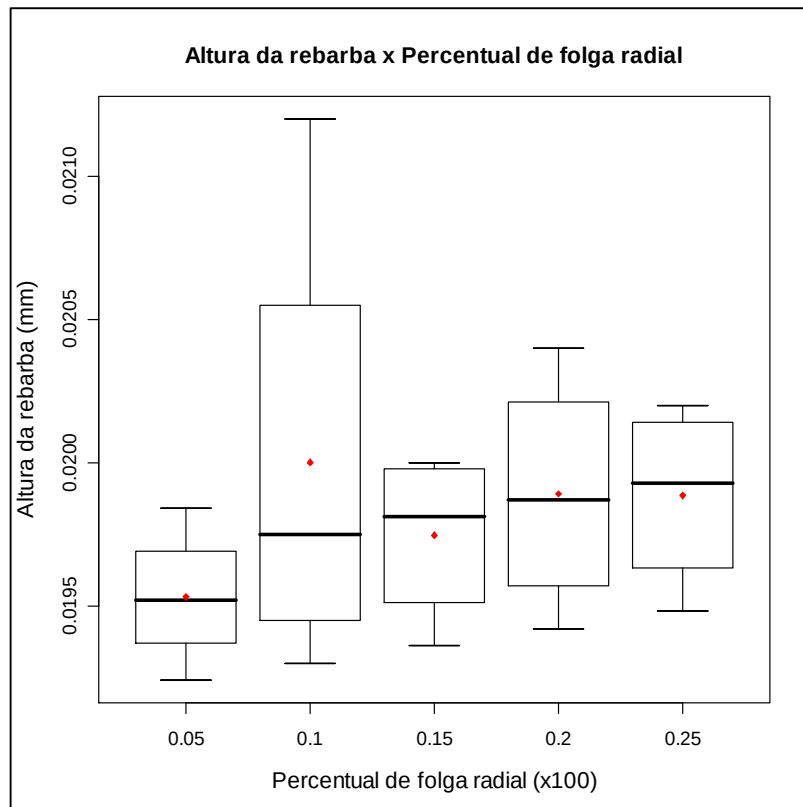
Fonte: o Autor (2025)

Figura 21: Percentual de deformação plástica x espessura



Fonte: o Autor (2025)

Figura 22: Altura da rebarba x folga de corte

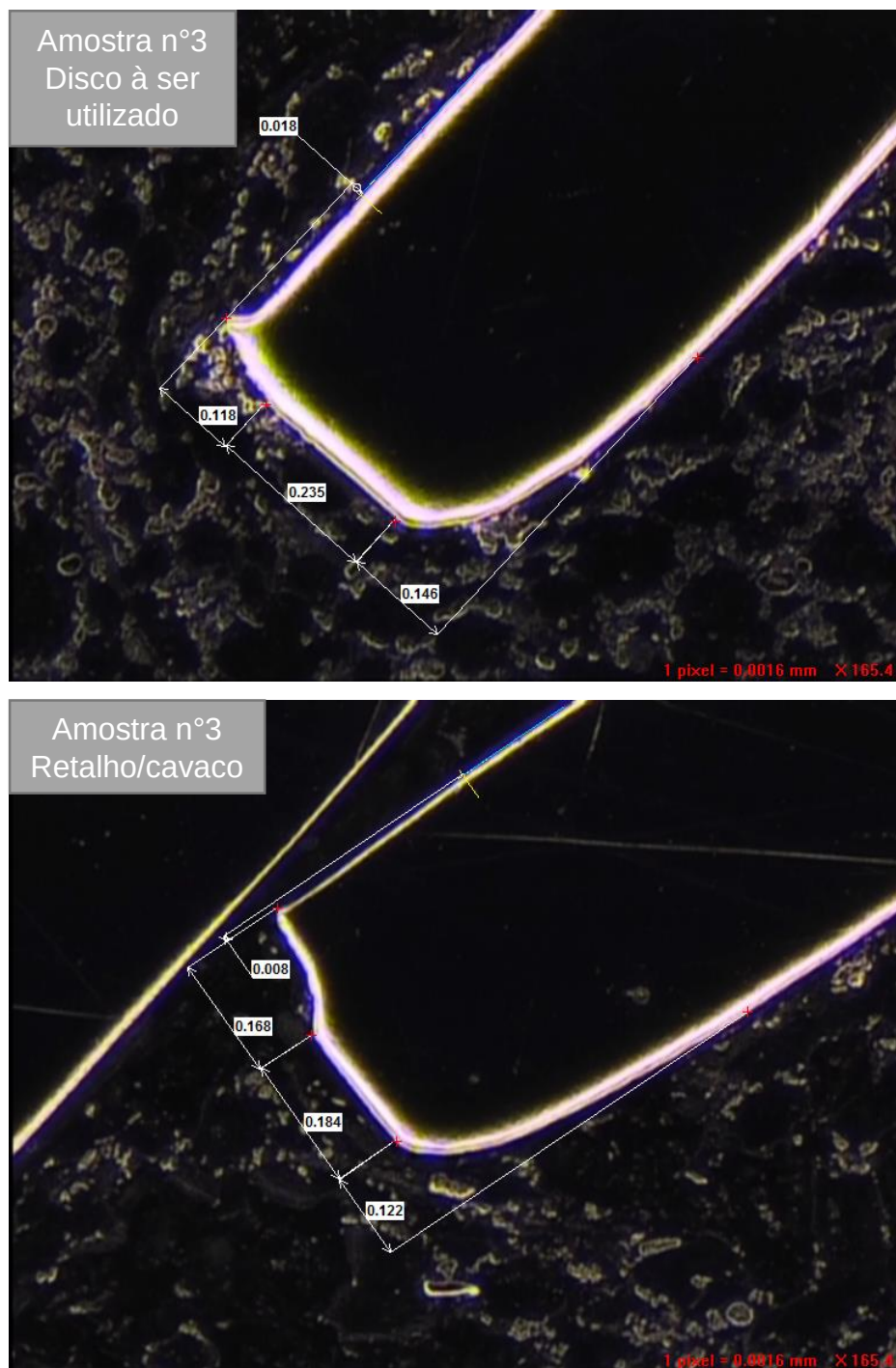


Fonte: o Autor (2025)

A seguir tem-se as figuras que dão um exemplo da peça cortada e da sobra de material, para assim fazer a interpretação do resultado do corte por cisalhamento atual.

4.3 REPRESENTAÇÃO VISUAL DAS FASES DO CORTE

Figura 23: Representação das amostras do material a ser utilizado (disco) e o material descartado (sucata)

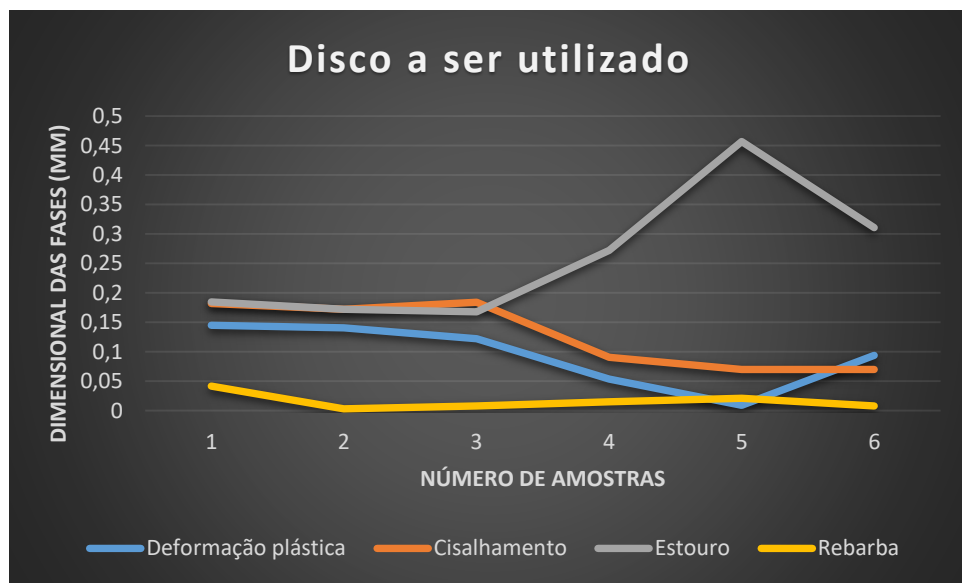


Fonte: o Autor (2025)

As análises macroscópicas das amostras (cf. Figura 23) revelaram que a utilização de uma folga radial de 25%, impactou significativamente na qualidade do disco a ser utilizado. Observou-se uma menor protuberância em comparação com o habitual e um maior rompimento (estouro). Tais observações provavelmente contribuíram para os resultados positivos dos testes, permitindo o corte de diferentes espessuras com essa folga radial.

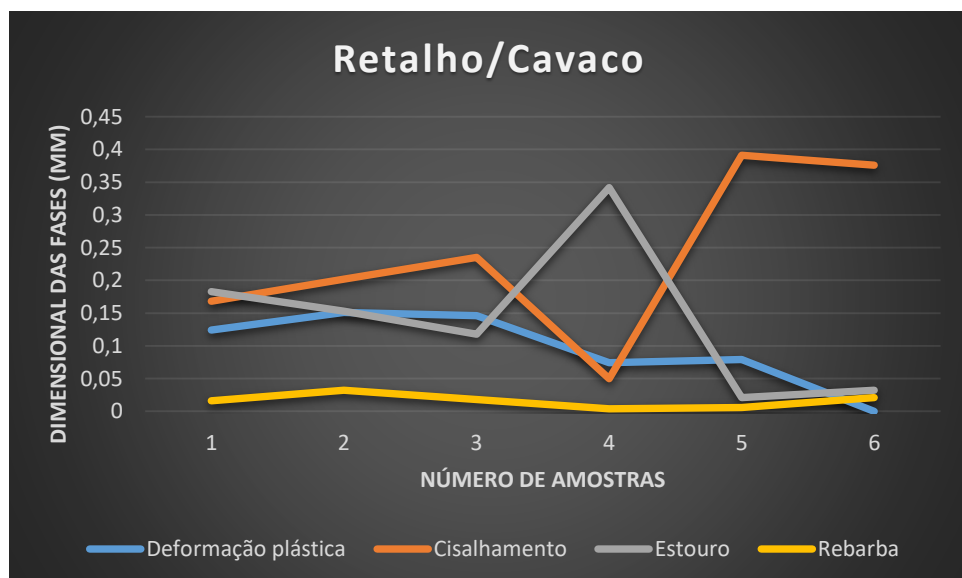
Os gráficos inseridos (Figuras 24 e 25) — um para o material a ser cortado e outro para o cavaco formado — são cruciais para a compreensão das quatro fases do corte por cisalhamento: deformação plástica, cisalhamento, estouro (fratura) e rebarba. Eles fornecem uma representação visual clara de como o processo se desenvolve e, mais importante, como a folga radial de 25% influenciou a dinâmica de corte.

Figura 24: Representação do comportamento das fases do corte por cisalhamento



Fonte: o Autor (2025)

Figura 25: Representação do comportamento das fases do corte por cisalhamento



Fonte: o Autor (2025)

O gráfico referente ao material (Figura 24) ilustra as alterações macroscópicas que o material sofre. Na fase de deformação plástica, é possível observar a região onde o material começa a ceder sob a pressão da ferramenta, sem que haja ainda uma separação completa. A transição para a fase de cisalhamento é marcada pela formação de uma zona de cisalhamento intensa, onde a maior parte da força é aplicada para iniciar a separação. No entanto, é na fase de estouro (fratura) que a influência da folga de 25% se torna mais evidente. As imagens revelam um ponto de ruptura mais acentuado e disseminado, indicando uma propagação de trincas mais rápida e um rompimento mais abrupto do que o usual. Isso contrasta com a fase de rebarba, que mostra a formação da borda final do material cortado.

Por sua vez, o gráfico do cavaco (Figura 25) complementa essa visão, detalhando a formação e a característica do material removido. Ele demonstra como o cavaco se forma a partir da deformação plástica inicial e como ele se desprende durante o cisalhamento. Em conjunto, esses gráficos não apenas elucidam as fases teóricas do cisalhamento, mas também servem como evidência visual direta de como a folga radial de 25% alterou o mecanismo de remoção do material, favorecendo um modo de fratura que, inesperadamente, otimizou os resultados de corte para diferentes espessuras.

Observou-se que um aumento de 25% na folga radial não resultou em alterações significativas na altura da rebarba. Conforme demonstrado pela comparação entre os gráficos (figura 22 e 24), a altura da rebarba permaneceu dentro dos padrões inspecionados pelo setor de qualidade, indicando que, para as condições ensaiadas, a variação na folga radial dentro do limite testado não é um fator preponderante na formação de rebarbas fora das especificações.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados mostraram que, para ambas as espessuras de material (0,5 mm à 1 mm), o corte foi realizado com precisão e qualidade, com uma folga radial constante de cerca de 25%. A superfície cortada apresentou um acabamento adequado, com poucas rebarbas.

As imagens macroscópicas revelaram que o material cortado não apresentou sinais significativos de deformações excessivas. O processo de cisalhamento foi eficiente, e a matriz multifuncional conseguiu manter a precisão do corte, mesmo após múltiplos ciclos.

Embora a matriz tenha apresentado um bom desempenho durante os testes, foi possível observar um pequeno desgaste nas bordas de corte após o uso repetido, especialmente nos cortes realizados com o aço de 1 mm. No entanto, esse desgaste não comprometeu a qualidade do corte e não exigiu a substituição da matriz, o que confirma a eficácia do método de corte em relação à durabilidade da ferramenta.

O método de corte com matriz multifuncional mostrou-se eficaz na manutenção da folga radial desejada e na garantia de cortes precisos em materiais com espessuras variadas. A análise microscópica e a inspeção visual confirmaram que a qualidade do corte foi mantida, e o desgaste da ferramenta ficou dentro dos limites aceitáveis. Esses resultados indicam que o uso de matrizes multifuncionais pode ser uma solução eficiente para otimizar o processo de corte, reduzindo a necessidade de troca constante de matrizes e aumentando a produtividade na indústria.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho focou em comparar diferentes folgas entre matriz e punção, utilizando o mesmo punção, para identificar a folga ideal que atendesse às especificações técnicas da peça e, de forma crucial, eliminasse a necessidade de *setup* ao cortar diversas espessuras de aço. Para isso, foi desenvolvida e construída uma ferramenta específica que permitiu a variação controlada da folga.

A experimentação foi conduzida em uma linha de processamento de bobinas com aço inoxidável 304 com espessuras entre 0,5 mm à 1 mm, o que permitiu aprofundar o entendimento sobre a influência desse parâmetro no processo de corte por cisalhamento.

Os testes práticos que empregaram a matriz multifuncional e analisaram as arestas de corte em diferentes percentagens de folga radial (5%, 10%, 15%, 20% e 25%), geraram dados para avaliar a qualidade do corte e a ocorrência de defeitos, como rebarbas e fraturas. A análise detalhada da superfície cortada, tanto visual quanto macroscopicamente, revelou a faixa de folga que otimizou o processo. Paralelamente, espera-se que essa otimização prolongue a vida útil da ferramenta e do equipamento.

A determinação de uma folga de corte ideal que possibilite o processamento de diferentes espessuras de material sem a necessidade de trocas de matriz representa um avanço significativo para a indústria metalomecânica. Essa otimização não só resultará na redução dos tempos de *setup* e, conseqüentemente, em maior volume de produção e competitividade, mas também contribuirá para a melhoria da segurança dos operadores, ao diminuir a exposição a riscos durante as intervenções para ajuste de ferramentas. Em síntese, este estudo demonstra o potencial da otimização da folga de corte como um pilar para a eficiência, qualidade e segurança na manufatura de componentes por cisalhamento.

REFERÊNCIAS

BIANCO, D. **Desgaste de Ferramentas de Puncionamento**, Porto Alegre (2003).

CORDEIRO, Ivo José Parreira. **Desgaste de ferramentas em operação de conformação plástica de chapas com aço de alta resistência**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2016.

DIN 8580 – “**Fertigungsverfahren**”, Beuth Verlag, Berlin, 1985.

DIN 8588 – “**Fertigungsverfahren – Zerteilen**”, Beuth Verlag, Berlin, 1987.

FERNANDES, Liliana Patrícia Bastos. **Melhoria do desempenho de ferramentas para estampagem de folhas de flandres**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.

HAMBLI, Ridha. Blanking tool wear modeling using the finite element method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1815-1829, set. 2001. Elsevier BV.

LANGE, K. et al. Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. **Cirp Annals**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 667-675, 1992. Elsevier BV.

MARCONDES, Paulo. **Projeto de ferramentas para conformação de chapas**. Curitiba: Demec/ufpr, 2008. 225 p.

MOTTA, Regis da Rocha; CALÔBA, Guilherme Marques. **Análise de Investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas, 2013. 392 p.

MÜLLER, Ricardo Guilherme. **Estudo do processo de corte por cisalhamento rotativo**. 2012. 126 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2012.

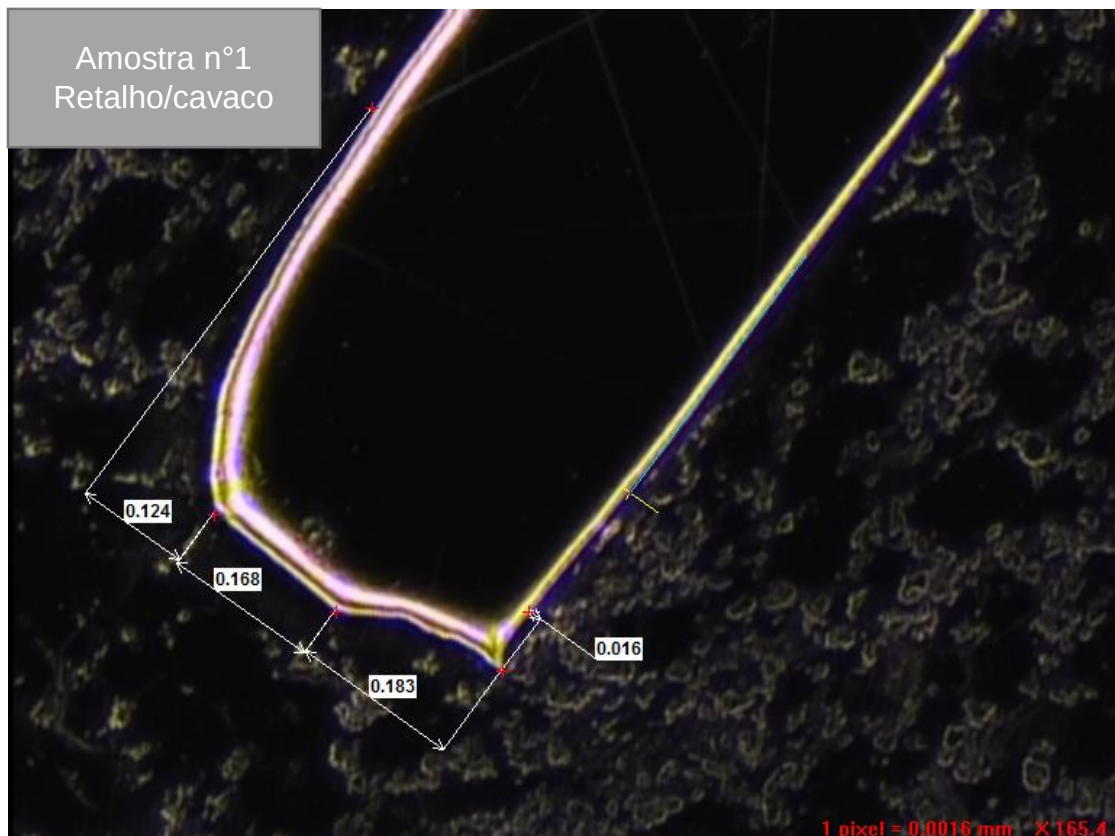
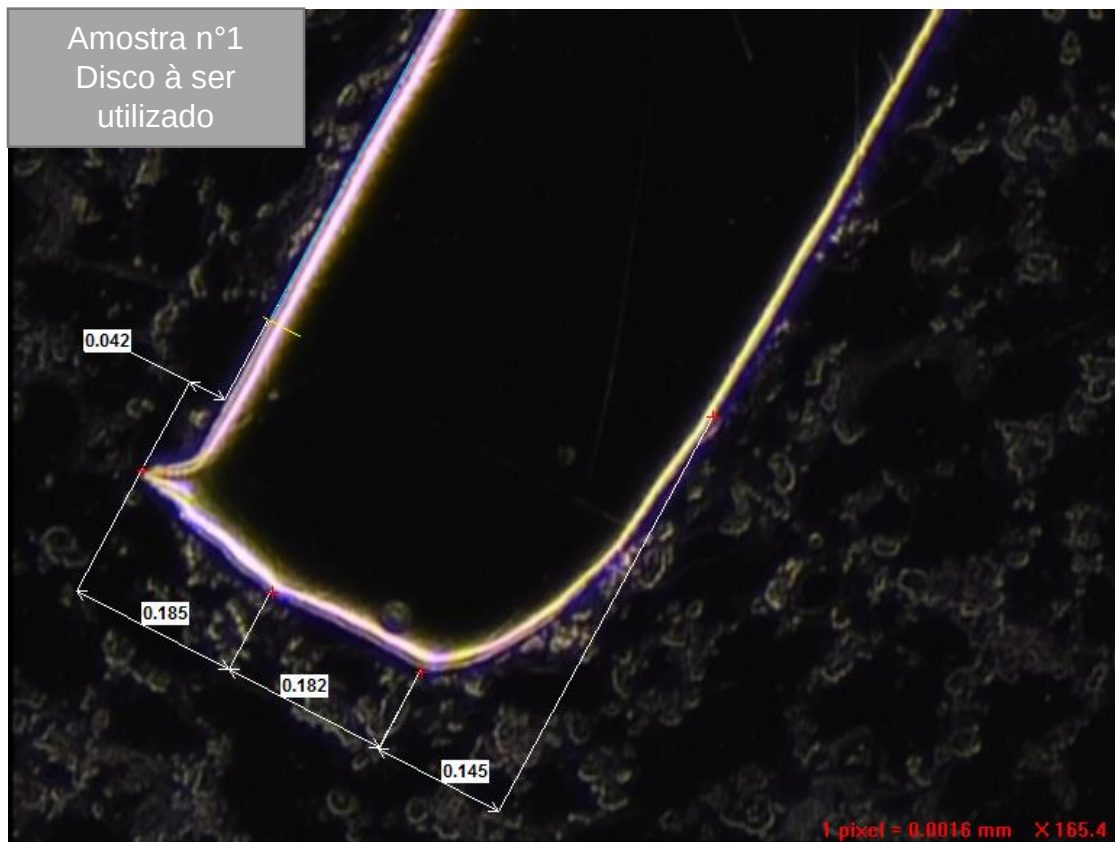
NOGUEIRA, Wilson Emanuel Mota. **Análise, caracterização e desenvolvimento de ferramentas de estampagem para a indústria automóvel**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2015.

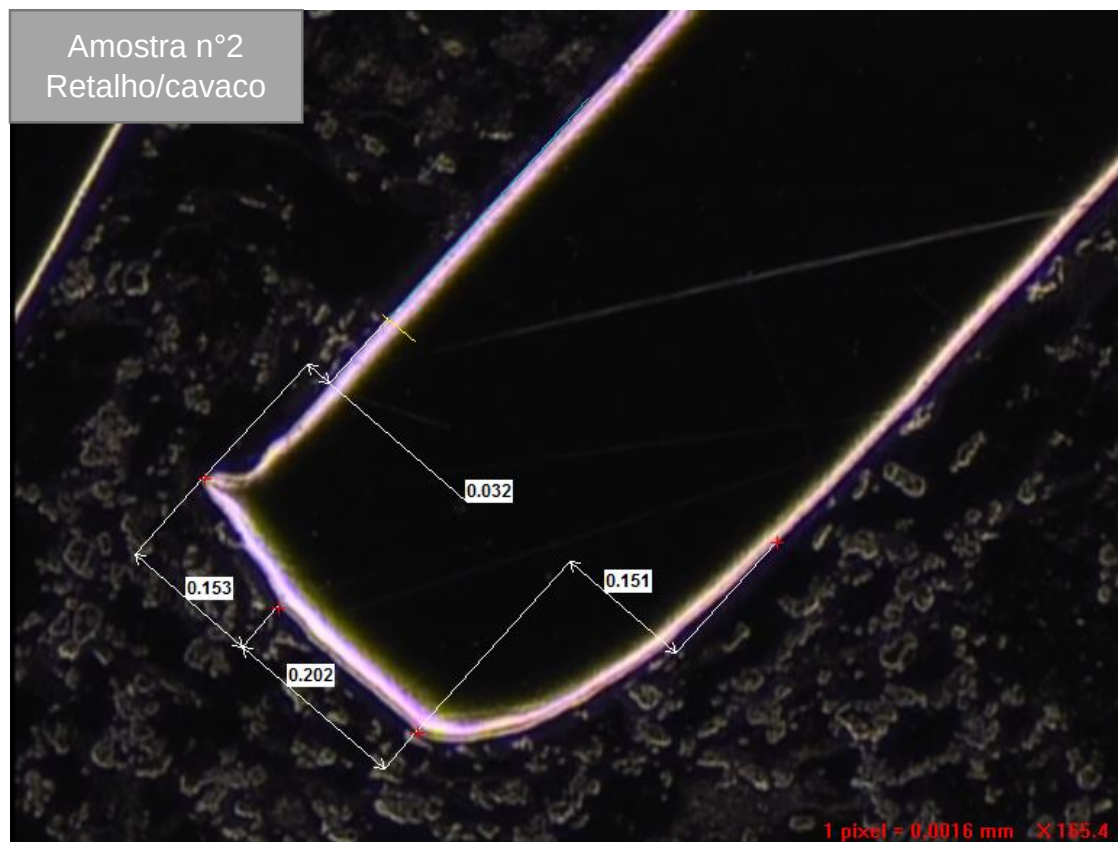
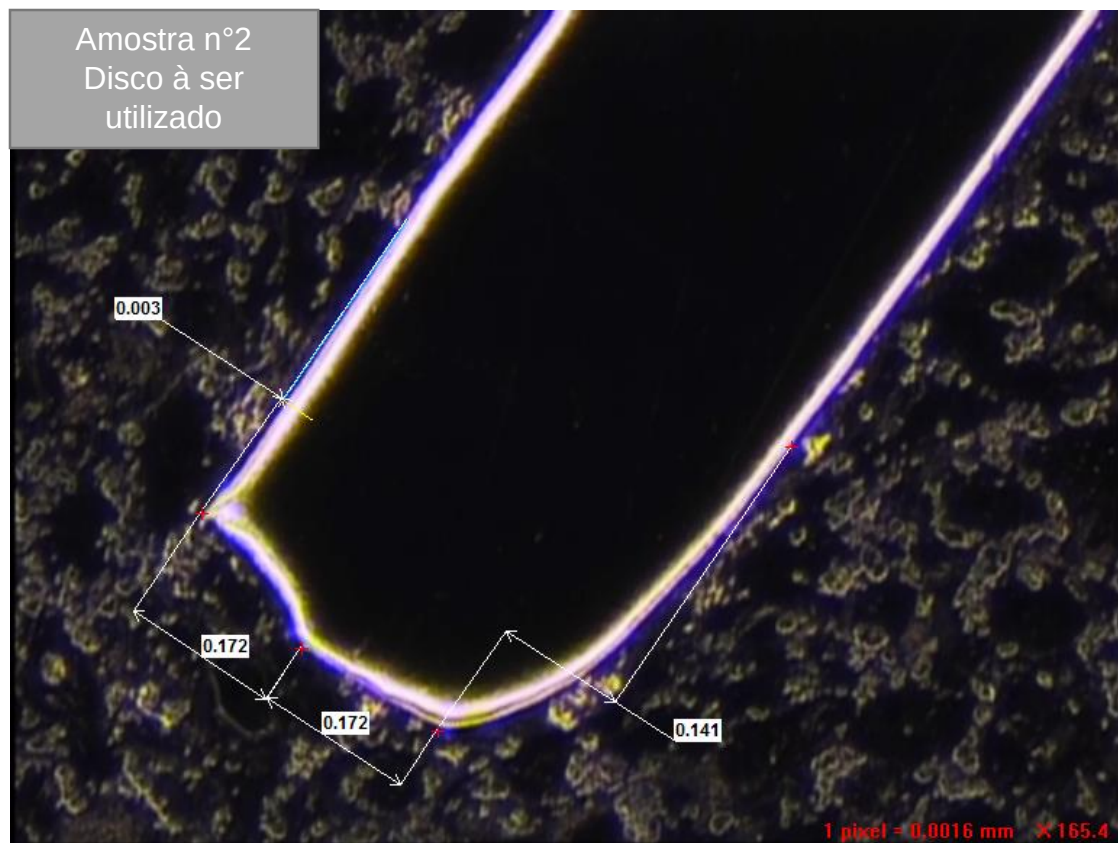
ROSSI, M., “**Estampado em Frio de la Chapa**”, Editora Científico-Médica, Barcelona, 1971.

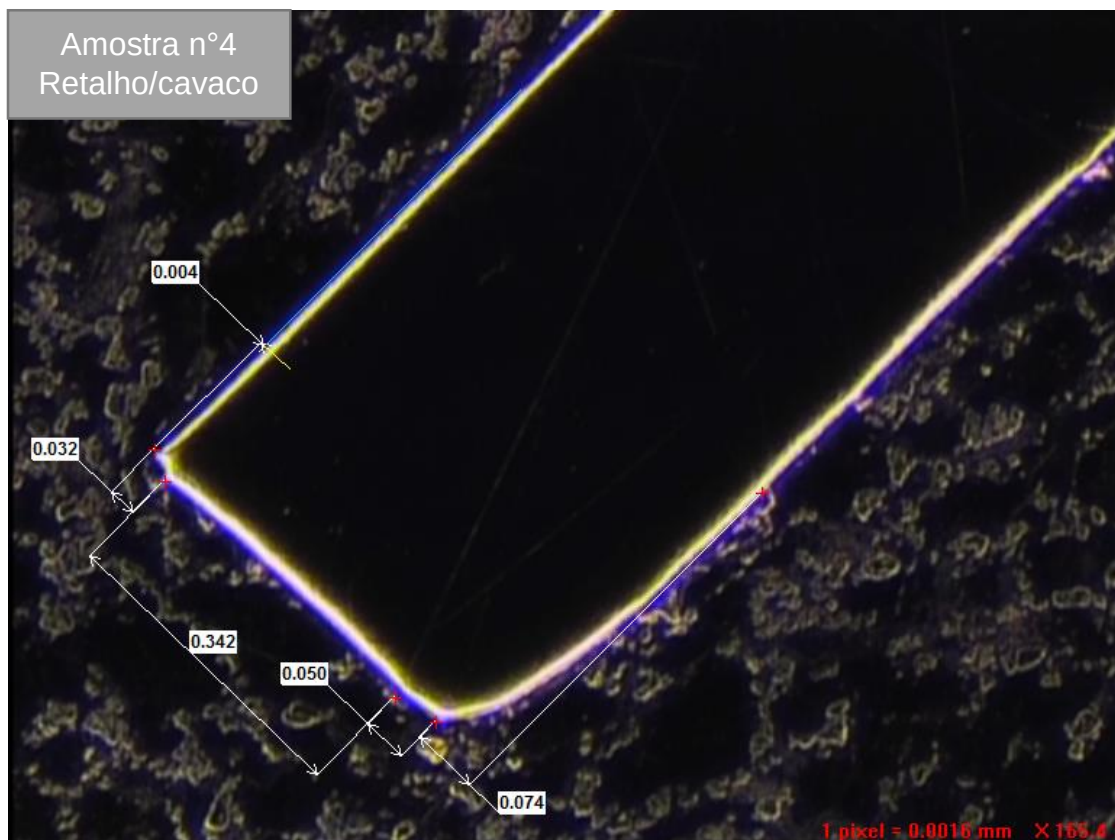
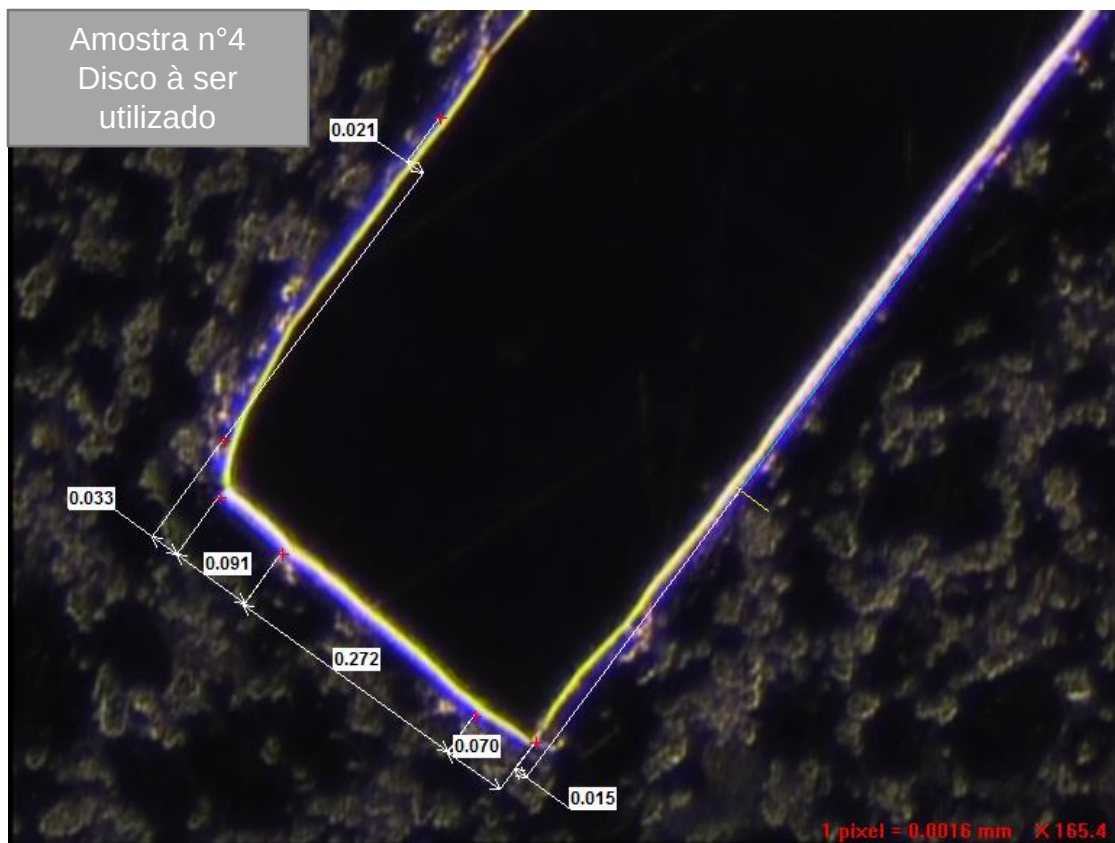
SCHAEFFER, Lirio; NUNES, Rafael Menezes; BRITO, Alberto Moreira Guerreiro. **Tecnologia da estampagem de chapas metálicas**. Porto Alegre: Gráfica da Ufrgs, 2017. 126 p.

SCHULER GmbH. **Metal Forming Handbook**. Göppingen: Springer, 1998. 563 p.

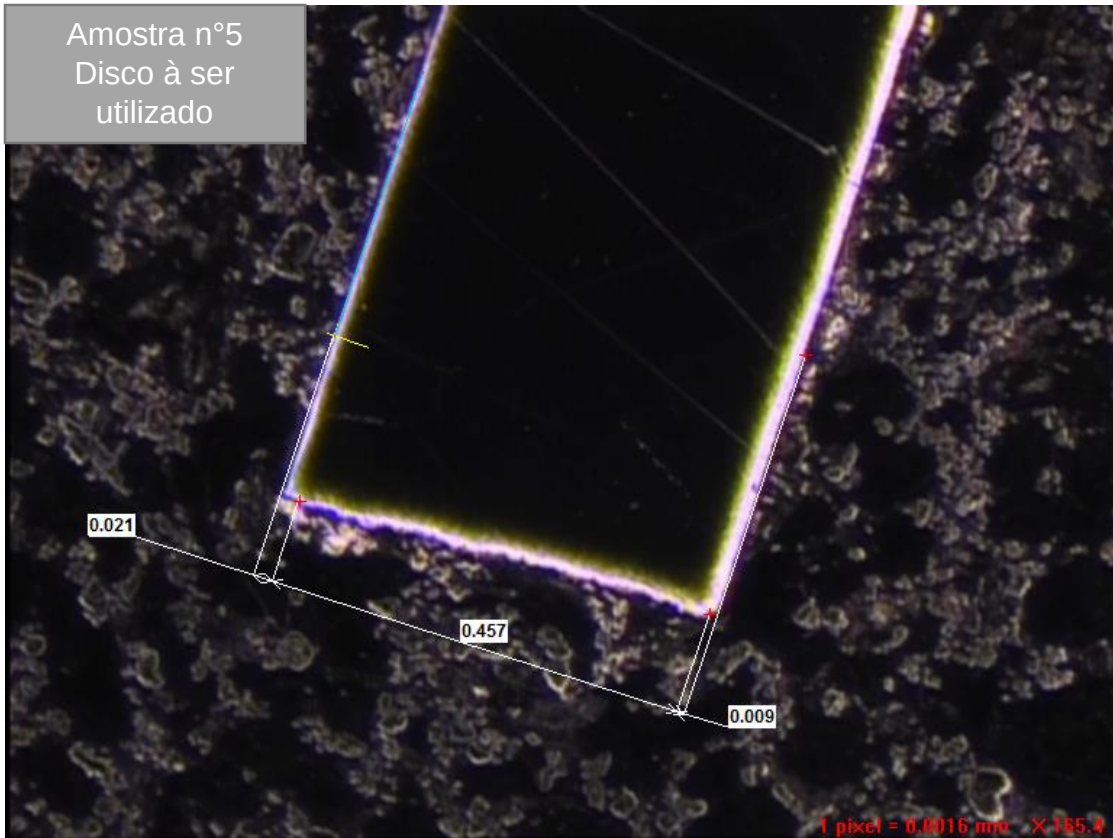
APÊNDICE 1 – ANÁLISES MACROSCÓPICA



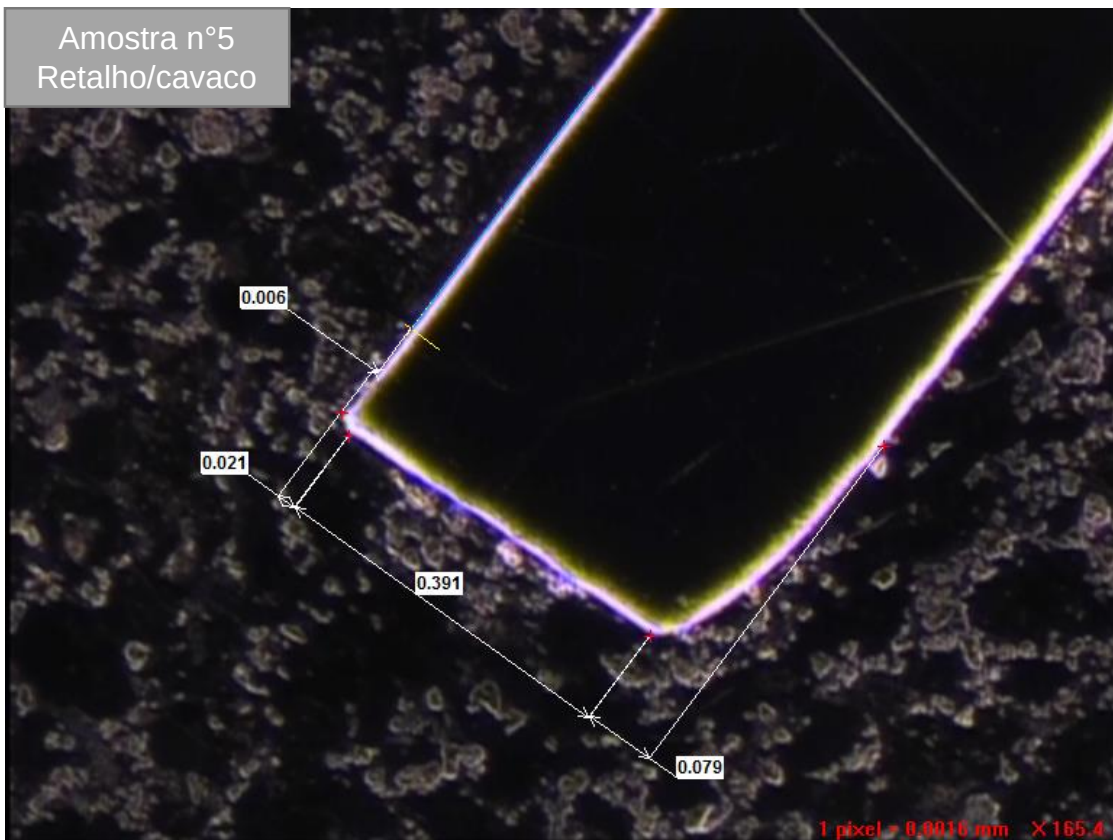




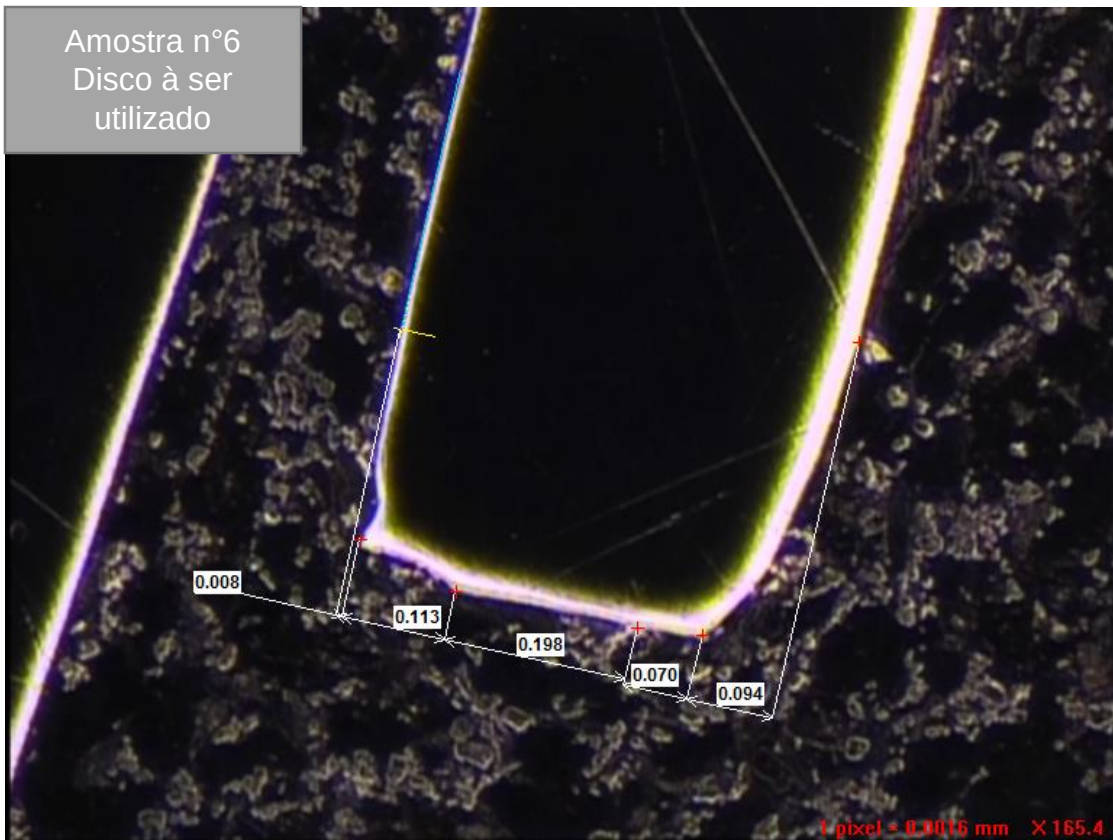
Amostra n°5
Disco à ser
utilizado



Amostra n°5
Retalho/cavaco



Amostra n°6
Disco à ser
utilizado



Amostra n°6
Retalho/cavaco

