

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIAS DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M**

ALEXSANDRO SOARDI

**ANÁLISE DO CORTE POR CISALHAMENTO DE CHAPAS GROSSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Porto Alegre

2022

ALEXSANDRO SOARDI

**ANÁLISE DO CORTE POR CISALHAMENTO DE CHAPAS GROSSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Dr. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Dra. Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Dra. Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Dr. Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

Coordenador: Dr. Afonso Reguly

Vice-Coordenador: Dra. Andréa Moura Bernardes

Soardi, Alexsandro

ANÁLISE DO CORTE POR CISALHAMENTO DE CHAPAS
GROSSAS DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA / Alexsandro
Soardi. -- 2022.

167 f.

Orientador: Lirio Schaeffer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Corte por cisalhamento. 2. Folga de corte. 3.
Força de corte. 4. Ângulo de afiação do punção. 5. Aço
de alta resistência mecânica. I. Schaeffer, Lirio,
orient. II. Título.

ALEXSANDRO SOARDI

**ANÁLISE DO CORTE POR CISALHAMENTO DE CHAPAS GROSSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Esta Dissertação de Mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 06 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza – FURG

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels – UCS

Prof. Dr. Luis Fernando Folle – SENAI CIMATEC - BA

Dedico este trabalho a Dayane e Janete pelo amor incondicional que demonstram diariamente e por me mostrarem que a vida deve ser vivida intensamente independente do que aconteça.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me iluminar nessa jornada e em todas as fases da minha vida. Não sei o que seria de mim se eu não tivesse a crença em algo maior que me dá forças nos momentos difíceis.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos pelo apoio e suporte que me deram em todos os momentos da minha vida. Sem vocês eu não seria nada do que sou hoje.

Ao professor Lirio Schaeffer por ter acreditado em mim e ter me acolhido como seu orientando, dividindo comigo um pouco do seu vasto conhecimento.

Aos meus colegas de trabalho por acreditarem no meu potencial e participaram ativamente nos ensaios. À empresa Máquinas Sanmartin por ter me dado a oportunidade e os recursos necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço ao corpo técnico do LdTM da UFRGS por me auxiliarem nas análises e ensaios e também por compartilharem suas habilidades e conhecimentos em todas etapas deste estudo.

Você erra todo arremesso que não tenta.

Michael Jordan

RESUMO

Este trabalho analisa o processo de corte por cisalhamento convencional de uma chapa grossa de um aço HSLA com 6,3 mm de espessura que atende os requisitos da norma DIN EN 10149-2. Os ensaios constituem na realização de um furo com diâmetro nominal de 16 mm. Durante os testes foram analisadas as influências da folga de corte (w), do ângulo de afiação do punção (α) e da lubrificação no processo. Foram utilizadas folgas de corte de 3%, 6% e 10% em relação à espessura da chapa. Para cada variação de folga foram utilizados punções com α igual a 0°, 5°, 10°, 15°. Por fim, para cada configuração proposta, o processo foi realizado com e sem o uso de lubrificante. Para cada um dos experimentos foram avaliados a qualidade e a precisão dimensional da região de corte, bem como as forças de corte envolvidas no processo. Uma ferramenta equipada com uma célula de carga e um sistema de aquisição de dados desenvolvido especialmente para este estudo, foram utilizados para a obtenção dos objetivos. Ao final dos experimentos práticos, os resultados foram comparados e analisados. Com isso, concluiu-se que o uso de lubrificação durante o processo de corte não apresentou influência na alteração dos valores de força máxima e na alteração das medidas da região de corte. O uso de lubrificante apenas auxiliou minimamente na qualidade da zona de cisalhamento do corte, onde o aspecto visual desta região apresentou um brilho ligeiramente mais intenso em comparação com o processo realizado a seco. Os elementos de corte que apresentaram os menores valores de força máxima foram o punção com ângulo de afiação α de 10° e a matriz com folga de corte (w) equivalente a 10% da espessura da chapa. O uso do punção com α igual a 0° em conjunto com a matriz de corte com w igual a 3% foi o caso em que as maiores forças de corte máximas foram encontradas, resultando em uma diferença de 13,29% entre seus valores. Nenhum parâmetro de corte proposto neste estudo apresentou influência significativa no diâmetro da zona cisalhada e na altura de bojamento (deformação plástica). Com a alteração da folga de corte, observou-se que o diâmetro no final da zona fraturada ficou muito semelhante ao diâmetro do furo da matriz utilizada em cada teste. Os maiores valores da altura da zona cisalhada foram obtidos ao utilizar os punções com α igual a 0° e 5° em conjunto com a matriz com w igual a 10% com valores que superaram os 59% da espessura da chapa. Os demais elementos de corte apresentaram valores de altura da zona cisalhada representando em média 23,7% da espessura da chapa. Na maioria dos casos a aparição de rebarbas foi mínima (em média 0,026 mm), entretanto ao utilizar os punções com ângulos de afiação igual a 0° e 5° em conjunto com a matriz com folga de corte igual a 3%, as rebarbas se apresentaram com valores consideráveis (em média 0,268 mm).

Palavras-chave: Corte por Cisalhamento, Folga de Corte, Força de Corte, Aço de Alta Resistência Mecânica, Lubrificação no Corte de Chapas.

ABSTRACT

This work analyzes the conventional punching process of a 6.3 mm thickness HSLA steel plate that follow the requirements of the DIN EN 10149-2 standard. The tests consist of the achievement of a hole with a nominal diameter of 16 mm. In these tests, the influences of the clearance (w), the punch sharpening angle (α) and the lubrication in the process were analyzed. Clearances of 3%, 6% and 10% in relation to the sheet thickness were used. For each clearance variation, punches with α equal to 0° , 5° , 10° , 15° were used. Finally, for each proposed configuration, the process was carried out with and without the use of lubricant. For each experiment, the quality and dimensional accuracy of the cutting region were evaluated, as well as the cutting forces involved in the process. A tool equipped with a load cell and a data acquisition system developed especially for this study were used to achieve the objectives. After completing of the practical experiments, the results were compared and analyzed. Thus, it was concluded that the use of lubrication during the punching process had no influence on the changes of maximum force values and on the change of dimensions of the cutting region. The use of lubricant only minimally assisted in the quality of the shear zone of the hole, where the visual aspect on this region showed a slightly more intense shine compared to the dry process. The cutting elements that presented the lowest values of maximum force were the punch with a sharpening angle α of 10° and the die with a clearance (w) equivalent to 10% of the sheet thickness. Using the punch with α equal to 0° together with the die with 3% of clearance, was the case in which the highest maximum cutting forces were obtained, resulting in a difference of 13.8% between the values. Neither of cutting parameters proposed in this study had a significant influence on the diameter of the burnish zone and on the rollover height (plastic deformation). With the clearance change on the dies, was observed that the final diameter of the fractured zone was very similar to the diameter of the die hole used in each test. The highest values of the height of the burnish zone were obtained when using the punches with α equal to 0° and 5° combined with the die with w equal to 10% with values that surpassed the 59% of the thickness of the plate. The other cutting elements presented values of the height of the burnish zone representing an average of 23.7% of the thickness of the plate. In most cases, the appearance of burrs was minimal (on average 0.026 mm), however when using punches with sharpening angles equal to 0° and 5° combined with the die with clearance equal to 3%, the burrs become presented with considerable values (on average 0.268 mm).

Keywords: *Punching, Clearance, Shearing Force, High Strength Steel, Lubrification on punching.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Macro etapas do desenvolvimento deste estudo.	24
Figura 2 - Classificação segundo DIN 8580. Adaptado de DIN 8580 (1985).	25
Figura 3 - Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento. Schaeffer, Nunes e Brito (2017).	27
Figura 4 - Elementos de uma ferramenta de corte de precisão.....	28
Figura 5 - Estágios do corte; a) fase de impacto, b) penetração, c) ruptura inicial, d) fratura, e) retorno elástico e f) saída do punção. Adaptado de Marcondes (2009)....	30
Figura 6 - Regiões características do corte por cisalhamento; a) zona de arredondamento, b) zona cisalhada, c) zona fraturada, d) zona de rebarba e e) empenamento. Lange (1985).	31
Figura 7 - Diferença entre puncionamento e perfilamento. Adaptado de Suchy (1998).	34
Figura 8 - Diâmetros inicial e final do corte. Adaptado de Eto (2005).	36
Figura 9 - Evolução da Força de corte em função da espessura. Rodrigues e Martins (2005).	38
Figura 10 - Inclinação da ferramenta para reduzir a força de corte. Adaptado de Rodrigues e Martins (2005).	42
Figura 11 - Diferentes geometrias de afiação de punção. Adaptado de Brito (2004).	43
Figura 12 - Inclinação do punção para redução de força. Adaptado de Black; Kohser (2012).	44
Figura 13 - Tipos de alívios aplicados a matrizes. Adaptado de Brito (2004).	46
Figura 14 - Diagrama de determinação da espessura da matriz. Adaptado de Brito (2004).	47
Figura 15 - Diagrama de conformabilidade dos aços convencionais e AHSS. Adaptado de Keeler; Kimchi; Mooney (2017).	54
Figura 16 - Principais constituintes de um extensômetro. Hoffmann (2012a).	58
Figura 17 - Ponte de Wheatstone. Fonte: Hoffmann (2012a).....	61
Figura 18 - Configurações da Ponte de Wheatstone. Hoffmann (2012a).	63
Figura 19 - Diagrama de um sistema de medição com <i>Strain Gauges</i> . Hoffmann (2012a).	64

Figura 20 - Geometria dos corpos de prova dos ensaios.....	68
Figura 21 - Geometria dos corpos de prova para ensaio de tração.	71
Figura 22 - Máquina utilizada para realização dos ensaios práticos.	72
Figura 23 - Instrumentos de medição utilizados no estudo.	73
Figura 24 - Montagem esquemática da ferramenta de ensaios.	74
Figura 25 - Vista explodida ferramenta de ensaios.	75
Figura 26 - Geometria dos punções de corte.	77
Figura 27 - Equipamentos utilizados para a análise dimensional. a) Projetor de perfil e b) Estereoscópio trinocular utilizado com o <i>software</i> ScopePhoto.	80
Figura 28 - Geometria da célula de carga do punção.	86
Figura 29 - Sensor potenciométrico de posição.	88
Figura 30 - Montagem do Sistema para realização dos ensaios práticos	93
Figura 31 - Corte dos corpos de prova para análise dimensional.	95
Figura 32 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de força máxima em cada ensaio.....	99
Figura 33 - Erros padrão dos valores de força em função da lubrificação.	100
Figura 34 - Análise de Fisher dos valores de $F_{máx}$ com a variação da lubrificação.	100
Figura 35 – Gráficos de força x deslocamento do punção em função da lubrificação no processo.....	101
Figura 36 - Gráficos de força x deslocamento do punção em função da folga de corte (w) no processo.....	103
Figura 37 - Erros padrão dos valores de força em função da variação da folga de corte.	104
Figura 38 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de força máxima ao variar os elementos de corte.	105
Figura 39 - Análise de Fisher dos valores de $F_{máx}$ com a variação da folga de corte (w).	106
Figura 40 - Gráficos de força x deslocamento do punção em função do ângulo de afiação do punção.	107
Figura 41 - Erros padrão dos valores de força em função da geometria de afiação do punção.	108
Figura 42 - Análise de Fisher dos valores de $F_{máx}$ com a variação do ângulo de afiação do punção (α).	109
Figura 43 - Análise dimensional da região de corte.	111

Figura 44 – Erros padrão dos valores de D_C dos corpos de prova.....	112
Figura 45 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de D_C em todos os casos ensaiados.	113
Figura 46 - Erros padrão dos valores de D_F dos corpos de prova.....	114
Figura 47 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de D_F em todos os casos ensaiados.	115
Figura 48 - Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação da lubrificação....	116
Figura 49 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de D_F ao variar os elementos de corte.	117
Figura 50 - Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação do ângulo de afiação do punção.....	117
Figura 51 – Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação da folga de corte.	118
Figura 52 - Representatividade da altura de cada zona da região de corte.	121
Figura 53 - Gráfico <i>Boxplot</i> dos valores de H_C em todos os casos ensaiados.	124
Figura 54 - Detalhe da rebarba gerada no processo de corte.	126
Figura 55 - Região de análise da qualidade da parede do furo.....	127
Figura 56 - Influência da lubrificação na qualidade superficial do furo.	129
Figura 57 - Influência da folga de corte (w) e da geometria de afiação do punção (α) na qualidade superficial da parede do furo.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de chapas através da espessura (s).....	35
Tabela 2 - Classificação dos aços ferramenta segundo norma AISI.	49
Tabela 3 - Normas atendidas pelo aço STRENX® 700 MC	69
Tabela 4 - Composição química do STRENX® 700 MC.	70
Tabela 5 - Geometria das matrizes de corte.	78
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do material da célula de carga.	84
Tabela 7 - Resultados da calibração da célula de carga.	87
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do material de teste.	91
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de dureza do material de teste.	91
Tabela 10 - Organização dos ensaios práticos	94
Tabela 11 - Valores de $F_{máx}$ dos ensaios.	98
Tabela 12 - Medidas das alturas da região de corte.	120

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal	[mm ²]
A _C	Área de corte	[mm ²]
a	Área da seção transversal de um condutor elétrico	[m ²]
C _C	Constante na expressão de cálculo de folga de corte	[(mm ² /N) ^{0,5}]
D _C	Diâmetro na região de cisalhamento	[mm]
D _F	Diâmetro na região final da fratura	[mm]
D _P	Diâmetro do punção de corte	[mm]
D _M	Diâmetro da matriz de corte 1	[mm]
D _{M1}	Diâmetro da matriz de corte 2	[mm]
D _{M2}	Diâmetro da matriz de corte 3	[mm]
D _{M3}	Diâmetro da matriz de corte	[mm]
E	Módulo de Elasticidade do material	[GPa]
F _C	Força de corte	[N]
F _F	Força crítica para flambagem do punção	[N]
F ₁	Força de corte máxima no primeiro corpo de prova	[kN]
F ₂	Força de corte máxima no segundo corpo de prova	[kN]
F ₃	Força de corte máxima no terceiro corpo de prova	[kN]
F _{máx}	Força máxima de corte	[N]
h	Deslocamento do punção ao longo da espessura da chapa	[mm]
h'	Altura do chanfro do punção	[mm]
H _B	Altura da zona de deformação plástica - bojamento	[mm]
H _C	Altura da zona cisalhada	[mm]
H _F	Altura da zona de fratura	[mm]
H _R	Altura da rebarba gerada na operação de corte	[mm]
h _M	Espessura da matriz	[mm]
i	Raio de giro de um corpo a flambar	[mm]
J	Momento polar de inércia	[mm ⁴]
k	Fator K – Sensibilidade de um <i>Strain Gauge</i>	[-]
L	Comprimento do corpo a flambar	[mm]
M ₁	Matriz de corte 1 (w = 3%)	[-]
M ₂	Matriz de corte 2 (w = 6%)	[-]
M ₃	Matriz de corte 3 (w = 10%)	[-]
l	Comprimento do condutor elétrico	[m]
l _c	Comprimento ou perímetro da aresta de corte	[mm]
P ₁	Punção de corte 1 (α = 0°)	[-]
P ₂	Punção de corte 2 (α = 5°)	[-]
P ₃	Punção de corte 3 (α = 15°)	[-]
P ₄	Punção de corte 4 (α = 10°)	[-]
P _C	Potência de corte	[Watt]
R	Resistência elétrica de um condutor	[Ω]
R ₁	Resistor 1 da ponte de Wheatstone	[Ω]
R ₂	Resistor 2 da ponte de Wheatstone	[Ω]
R ₃	Resistor 3 da ponte de Wheatstone	[Ω]
R ₄	Resistor 4 da ponte de Wheatstone	[Ω]
R _e	Tensão de escoamento do material	[N/mm ²]

R_m	Tensão máxima do material	[N/mm ²]
S'	Sobremetal na espessura da matriz para afiação	[mm]
s	Espessura da chapa	[mm]
t	Tempo	[s]
V_S	Tensão elétrica de excitação da ponte de Wheatstone	[V]
V_O	Tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone	[mV]
v_P	Velocidade do punção	[m/s]
w	Folga de corte	[mm]
W	Trabalho de corte	[J]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α	Ângulo de afiação do punção	[°]
β	Ângulo de alívio de uma matriz	[°]
Δ_d	Varição do diâmetro no início e no final do corte por cisalhamento de chapas grossas	[mm]
Δ_l	Varição entre o comprimento final e inicial	[mm]
Δ_L	Alongamento percentual de um dado material	[%]
Δ_R	Varição da resistência elétrica de um condutor elétrico	[Ω]
ε	Deformação relativa	[mm/mm]
ε_1	Deformação relativa do <i>Strain Gauge</i> 1 da Ponte de Wheatstone	[mm/mm]
ε_2	Deformação relativa do <i>Strain Gauge</i> 2 da Ponte de Wheatstone	[mm/mm]
ε_3	Deformação relativa do <i>Strain Gauge</i> 3 da Ponte de Wheatstone	[mm/mm]
ε_4	Deformação relativa do <i>Strain Gauge</i> 4 da Ponte de Wheatstone	[mm/mm]
τ_C	Tensão de ruptura ao cisalhamento	[N/mm ²]
σ	Tensão normal aplicado a uma dada seção transversal	[N/mm ²]
Σ	Desvio padrão	[-]
σ_F	Tensão de flambagem do punção	[N/mm ²]
Ω	Unidade de resistência elétrica	[Ohm]
ρ	Resistividade ou resistência elétrica específica do material do condutor	[Ω.m]

LISTA DE ABREVIATURAS

AHSS	Aços avançados de alta resistência (<i>Advanced High Strength Steels</i>)
AISI	Instituto americano de ferro e aço (<i>American iron and steel institute</i>)
ASTM	Sociedade americana para testes e materiais (<i>American society for testing and materials</i>)
BH	Aços endurecidos a baixas temperaturas (<i>Bake Hardening</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CBM	Manutenção baseada em condições (<i>Condition Based Maintenance</i>)
CLP	Controlador lógico programável
CP	Aços de fases complexas (<i>Complex Phase Steels</i>)
DAQ	Sistema de aquisição de dados (<i>Data Acquisition System</i>)
DDP	Diferença de potencial elétrico
DP	Aços de dupla fase (<i>Dual Phase</i>)
DIN	Instituto alemão de normalização (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
FB	Aços ferrítico-bainíticos (<i>Ferritic – Bainitic Steels</i>)
FEM	Método de elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
HF	<i>Hot Formed Steels</i>
HRC	Dureza Rockwell – Escala C (<i>Hardness Rockwell – Scale C</i>)
HSLA	Aços baixa liga de alta resistência (<i>High Strength Low Alloy</i>)
HSS	Aços de alta resistência mecânica (<i>High Strength Steels</i>)
IF	Aços isentos de interstícios (<i>Interstitial Free</i>)
ISO	Organização internacional de padronização (<i>International organization for standardization</i>)
LAMEC	Laboratório de ensaios mecânicos
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light emitting diode</i>)
MS	Aços martensíticos (<i>Martensitic Steels</i>)
NBR	Norma brasileira
PWM	Modulação por tamanho de pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
SAE	Sociedade dos engenheiros automotivos (<i>Society of automotive enginners</i>)
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
TWIP	<i>Twinning Induced Plasticity</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
ULSAB	Carroceria automotiva ultraleve (<i>Ultraligth Steel Auto Body</i>)
USB	Porta serial universal (<i>Universal serial bus</i>)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
EPÍGRAFE	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VI
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	X
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 JUSTIFICATIVAS	21
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	22
1.3.3 Macro etapas do desenvolvimento deste estudo.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 CORTE POR CISALHAMENTO	25
2.1.1 Elementos básicos do Processo de Corte por Cisalhamento...26	26
2.1.2 Estágios do corte por cisalhamento	28
2.1.3 Regiões do corte por cisalhamento	30
2.2 FOLGA ENTRE PUNÇÃO E MATRIZ	32
2.3 ASPECTOS DO CORTE CONVENCIONAL EM CHAPAS GROSSAS	34
2.4 FORÇA DE CORTE.....	36
2.5 ENERGIA DE CORTE	39
2.6 PUNÇÕES DE CORTE	40
2.7 MATRIZ DE CORTE.....	45
2.8 AÇOS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE	48
2.9 CHAPAS DE ALTA RESITÊNCIA MECÂNICA.....	50
2.9.1 Definições e nomenclaturas dos AHSS	51
2.9.2 Subdivisões dos AHSS.....	53
2.10 EXTENSOMETRIA	54
2.10.1 Extensômetros	56
2.10.1.1 Composição dos Extensômetros	57
2.10.1.2 Tipos de Extensômetros	58
2.10.1.3 Seleção de Extensômetros	59
2.10.2 Sistemas de medição com extensômetros	60
2.10.3 Técnicas de Medição	62
2.10.4 Calibração do circuito.....	64
2.10.5 Transdutores	65
2.11 LUBRIFICAÇÃO NO PROCESSO DE CORTE POR CISALHAMENTO	66

3	MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1	MATÉRIA PRIMA DO ESTUDO	68
3.1.1	Geometria dos corpos de prova	68
3.1.2	Generalidades sobre o material de estudo	69
3.1.3	Composição e características químicas do material de estudo	70
3.1.4	Materiais e procedimentos para caracterização do material de estudo	71
3.2	MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS	71
3.3	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	72
3.4	FERRAMENTAL	73
3.4.1	Estrutura da ferramenta	74
3.4.2	Elementos de Corte	76
3.5	Lubrificante	79
3.6	INSTRUMENTOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES DIMENSIONAIS	79
4	CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS	81
4.1	Dados coletados	81
4.2	Medição das forças durante o processo de corte	82
4.2.1	Propriedades mecânicas do material da célula de carga	83
4.2.2	Geometria da célula de carga	84
4.2.3	Calibração da célula de carga	86
4.3	Transdutor de deslocamento linear	87
4.4	Sistema de aquisição de dados.....	88
5	ANÁLISE EXPERIMENTAL	90
5.1	Caracterização do material de estudo	90
5.1.1	Ensaio de tração do material de estudo	90
5.1.2	Ensaio de dureza do material de estudo	91
5.1.3	Análise metalográfica do material de estudo	92
5.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	92
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS ACERCA DOS RESULTADOS	96
6.2	ANÁLISE DAS FORÇAS	97
6.2.1	Influência da lubrificação no corte nos valores de força	99
6.2.2	Influência da folga de corte nos valores de força	102
6.2.3	Influência do ângulo de afiação do punção nos valores de força	106
6.3	ANÁLISE DIMENSIONAL.....	110
6.3.1	Análise dos diâmetros da região cisalhada e do final da zona de fratura	111
6.3.1.1	Diâmetro da zona de cisalhada D_c	111
6.3.1.2	Diâmetro no final da zona fraturada D_F	114
6.3.2	Análise das alturas das zonas de corte	118
6.3.2.1	Análise dimensional da altura de bojamento H_B	122
6.3.2.2	Análise dimensional da altura da zona cisalhada H_c	122
6.3.2.3	Análise dimensional da altura da zona de fratura H_F	124

6.3.2.4	Análise dimensional da altura da rebarba H_R	125
6.4	ANÁLISE DA QUALIDADE DA REGIÃO CISALHADA.....	127
6.4.1	Influência da lubrificação na qualidade da região do corte	128
6.4.2	Influência dos elementos de corte na qualidade superficial do furo	129
7	CONCLUSÕES.....	133
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	136
	ANEXO A – <i>DATASHEET</i> LINHA STRENX®	144
	ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO STRENX® 700MC	145
	ANEXO C – SISTEMA DE TROCA RÁPIDA DOS ELEMENTOS DE CORTE	146
	ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO LUBRIFICANTE UTILIZADO NOS ENSAIOS	147
	ANEXO E – RELATÓRIO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL DA CÉLULA DE CARGA	149
	ANEXO F – MICROGRAFIA STRENX® 700MC.....	150
	APÊNDICE A – VISTA DE CORTE DA FERRAMENTA DE ENSAIOS	152
	APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DA GEOMETRIA E DOS DETALHES DOS CORPOS DE PROVA DO MATERIAL DA CÉLULA DE CARGA	153
	APÊNDICE C – GRÁFICO DE ENGENHARIA DO AISI D6 TEMPERADO E REVENIDO	154
	APÊNDICE D – ESQUEMA DE LIGAÇÃO ELETRÔNICA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	155
	APÊNDICE E – GRÁFICO DE ENGENHARIA DO STRENX® 700MC	156
	APÊNDICE F – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE FORÇA MÁXIMA COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%	157
	APÊNDICE G – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE D_c COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%	159
	APÊNDICE H – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE D_f COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%	162
	APÊNDICE I – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE H_c COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

No cenário atual, os processos envolvendo chapas metálicas tem uma importância crescente em relação aos processos industriais (SLAVIC *et al.*, 2014). Um componente pode ser processado de diferentes formas, através dos mais variados processos de fabricação. O embutimento, o dobramento, o puncionamento e o corte por cisalhamento são alguns exemplos de processos aplicados em chapas metálicas.

A conformação de chapas assume cada vez mais espaço na indústria metal mecânica. Isso se dá pelo fato de que, com estes processos podem ser manufaturados componentes com alta resistência mecânica e com uma perda de material minimizada. Peças fabricadas a partir dos processos envolvendo chapas podem ser encontradas nas indústrias automotiva, naval, aeroespacial, eletrônica, de microcomputadores, utensílios domésticos e muitas outras (BOFF *et al.*, 2012).

O mercado de trabalho atual exige que as organizações fabriquem seus produtos com custos mais baixos e com o máximo de aproveitamento de recursos quanto possível. Segundo Schaeffer (2005), nos dias de hoje torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento e o aprimoramento de novas técnicas a serem aplicadas nos processos de fabricação de chapas.

Dentre todos os processos de conformação mecânica a frio em chapas metálicas, pode-se destacar o processo de corte por cisalhamento. Este processo de fabricação se dá pela aplicação de forças de corte sobre uma determinada lâmina metálica. O processo de corte da chapa metálica pode ainda ser subdividido em corte de furos (*punching*) ou em corte de perfis (*blanking*). A diferença entre eles se dá em qual das partes será aproveitada e qual será descartada (MARCONDES, 2009). Para que o corte aconteça são necessários dois componentes básicos: punção e matriz de corte. Existe também a necessidade de haver uma folga (w) entre esses dois elementos. A pressão de corte na chapa, exercida pelo punção, causa o aparecimento de micro trincas no material da peça de trabalho. A pressão vai aumentando até que a resistência mecânica do material à fratura seja alcançada. Neste momento ocorre a ruptura do material da peça e a separação das partes envolvidas (LAJARIN *et al.*, 2011).

Uma peça cisalhada apresenta basicamente cinco regiões. Zona de arredondamento, zona cisalhada, zona fraturada, rebarba e empenamento. A qualidade do componente é definida pelo controle dos parâmetros envolvidos no processo. Os principais parâmetros que devem ser analisados são: a folga de corte e o material da peça (SCHAEFFER, 2016). Segundo Marcondes (2009), não existe um critério preciso para a determinação dos valores da folga entre punção e matriz, pois diversos parâmetros influenciam no resultado final. A folga pode ser estabelecida a partir de critérios como: aspecto superficial, imprecisões, operações posteriores e aspectos funcionais da peça final.

Uma alternativa ao corte por cisalhamento convencional de chapas metálicas é o *fineblanking*. O corte fino, como também é chamado, tem como característica principal, o aumento considerável da qualidade do corte da chapa (ARAVIND; CHAKKINGAL; VENUGOPAL, 2020) e (ARAVIND; CHAKKINGAL; VENUGOPAL, 2019). Esta melhora é proveniente de folgas de corte (w) menores do que as utilizadas no processo convencional de corte. Boff *et al.* (2012) afirma que o uso de prensa chapas e de um contrapunção faz com que as tensões compressivas envolvidas no processo aumentem, retardando a ruptura do material. Este efeito faz com que a região cisalhada seja relativamente maior do que a mesma região encontrada no corte por cisalhamento usual.

A utilização de aços com maior resistência mecânica vem sendo empregado na fabricação de componentes metálicos com cada vez mais frequência. Os aços de alta e/ou ultra alta resistência mecânica se apresentam como excelentes alternativas para a utilização nas mais variadas peças da indústria metal mecânica moderna. Os AHSS (*Advanced High Strength Steels*) são desenvolvidos com a finalidade de diminuir as espessuras necessárias para a fabricação das peças. Peças com resistência mecânica maior necessitam de uma menor seção transversal para suportar determinados carregamentos. Com isso ocorre uma diminuição na quantidade de material e conseqüentemente nos custos com matéria-prima, processamento, descarte e energia (SAMEK; KRIZAN, 2012). Contudo, a operação de corte por cisalhamento ainda apresenta grandes desafios quando matérias-primas com altos valores de resistência mecânica são utilizadas (PU *et al.*, 2018).

Zeidi *et al.* (2020) afirma que os estudos relacionados com o processo de corte por cisalhamento estão amplamente localizados no uso de chapas finas. Em

contrapartida, o uso de chapas grossas na fabricação de diversos produtos das mais diferentes áreas também vem sendo empregadas a muito tempo. O processo de corte por cisalhamento envolvendo chapas grossas de alta resistência possui algumas particularidades em relação ao corte de chapas metálicas finas. As elevadas forças de trabalho e os defeitos encontrados na região do corte podem ser diferentes do corte por cisalhamento convencional de chapas metálicas. Segundo Lajarin *et al.* (2011) e Marcondes (2009), o contato das propagações das trincas nucleadas das arestas de corte do punção e da matriz promove o efeito de *blow-out* (estouro) em chapas grossas, acima de 6 mm de espessura.

O estado da arte deste estudo constitui na aplicação dos conhecimentos adquiridos pelo que vários autores das áreas afins estudam e mostram em seus trabalhos em um problema real. A aquisição metrológica de dados do processo permite que sistemas de monitoramento orientados por dados e sistemas de controle de processos sejam integrados no processo de corte por cisalhamento de uma chapa metálica (NIESSNER; LIEWALD, 2020). O uso de extensometria e a instrumentação de ferramentas permite que os valores de forças e deslocamentos da ferramenta sejam coletados, analisados e as tomadas de decisões sejam realizadas com base no que estes valores informam. O uso de algumas técnicas de instrumentação permite que a teoria seja confrontada com a prática para que os parâmetros do processo de corte por cisalhamento sejam comparados entre si facilitando a tomada de decisões no uso dos parâmetros que melhor se adaptam às necessidades do processo.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com ênfase no corte por cisalhamento aplicado em chapas de pequena espessura (menores que 3,76 mm). Este trabalho apresenta as características do corte realizado em uma chapa de grande espessura (6,3 mm) de um aço de alta resistência mecânica e baixa liga (HSLA), duas características intrínsecas ao material a ser cortado. Sendo assim, este estudo se justifica a partir do momento em que se deseja entender e aumentar a qualidade dimensional e funcional da região do corte com a finalidade de auxiliar na resolução de um problema existente em um produto específico. A qualidade do corte é de extrema importância para garantir as exigências de engenharia quanto a precisão

dimensional e a qualidade da zona cisalhada, que devem estar dentro de estreitas faixas de variação.

Outro fator que justifica a realização deste trabalho é no que se diz respeito às maneiras com que os dados são coletados para posterior análise. A criação de um sistema de aquisição de dados dedicado foi necessária para atingir este objetivo.

1.3 OBJETIVOS

Este tópico visa apresentar os objetivos relacionados ao presente trabalho. Os objetivos apresentam o que será medido e avaliado a partir dos ensaios práticos desenvolvidos no mesmo, baseado na revisão bibliográfica realizada neste estudo.

1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar os aspectos dimensionais, de qualidade superficial e as forças de trabalho na furação de um componente fabricado a partir de uma chapa de aço de HSLA denominada de STRENGTH® 700 MC (BS EN 10149-2) com 6,3 mm de espessura pelo processo de corte por cisalhamento convencional.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho possa ser alcançado foram determinados alguns objetivos específicos que serão avaliados ao final deste estudo. Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) caracterização da matéria prima utilizada nos testes práticos do estudo;
- b) seleção dos materiais para construção dos elementos de corte considerando os altos carregamentos que estes são submetidos durante a operação de corte por cisalhamento;
- c) desenvolvimento de uma ferramenta capaz de comportar os elementos de corte e os sensores necessários para levantamento dos dados de força e deslocamento;

- d) desenvolvimento de um sistema de sensores e dispositivos para aquisição dos dados de força e de deslocamento relativo dos elementos de corte;
- e) análise do aspecto dimensional, da força da operação e das regiões do corte em uma furação executada pelo processo de corte por cisalhamento utilizando folgas de corte (w) de 3%, 6% e 10% em relação a espessura do material;
- f) para cada folga de corte, foi avaliada a influência da geometria de afiação do punção, alterando a aresta de corte do mesmo com quatro ângulos de afiação (α) diferentes: 0°, 5°, 10° e 15°;
- g) para cada conjunto de elementos de corte, o processo de corte foi realizado com e sem o uso de lubrificação.

1.3.3 Macro etapas do desenvolvimento deste estudo

A fim de facilitar o entendimento cronológico do desenvolvimento deste trabalho, a Figura 1 apresenta o fluxograma das macro atividades que foram empregadas ao longo deste estudo e que estão sendo apresentadas detalhadamente nos capítulos seguintes. O trabalho teve início com uma revisão bibliográfica acerca dos temas abordados neste estudo. Foram pesquisadas fontes nacionais e internacionais a partir de artigos de revistas, *journals*, livros e em outras fontes que possuam a credibilidade necessária. Em seguida, foram selecionados os parâmetros envolvidos no processo. Nesta etapa foi definido o que foi feito ao longo do estudo para que os objetivos fossem atingidos.

Na sequência foram fabricadas os conjuntos de ferramentas necessárias para a realização dos ensaios práticos deste estudo. Depois, foram definidos e fabricados os corpos de prova para a caracterização do material ensaiado. Com o material desenvolvido, foi dado início aos ensaios práticos seguindo os objetivos deste trabalho. Nesta etapa foi feito o levantamento de informações e as análises necessárias para que a tomada de decisão a respeito do melhor processo seja feita.

Por fim todos os dados e resultados obtidos foram utilizados e apresentados de maneira comparativa com outras fontes de estudo sobre esse tema. Desta forma, é possível determinar qual é o processo de corte que melhor se adapta as solicitações propostas.

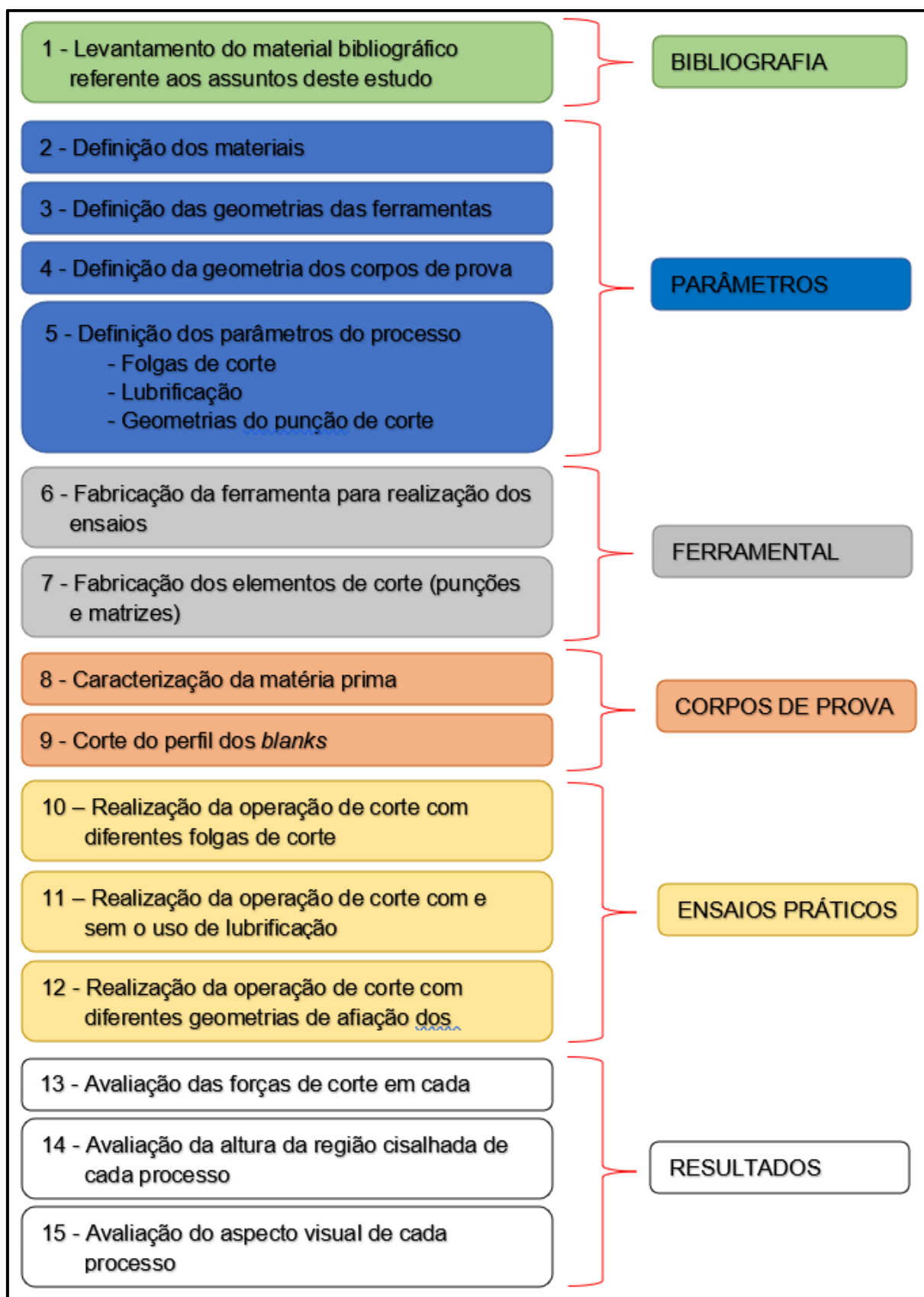


Figura 1 - Macro etapas do desenvolvimento deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo visa apresentar os principais aspectos acerca do tema abordado, contemplando um breve histórico e os aspectos relevantes sobre o processo de corte por cisalhamento. Embasado nas afirmações dos autores citados como referência, será desenvolvido o trabalho com um cunho teórico acadêmico e prático.

2.1 CORTE POR CISALHAMENTO

O corte por cisalhamento é classificado como um processo de fabricação segundo a norma alemã DIN 8580 – Processos de Fabricação. Esta norma classifica os processos em três grupos principais, segundo suas características de processamento: criação da forma, alteração da forma e alteração das propriedades do material. Nestes três grupos principais estão classificados os processos de fabricação, apresentados na Figura 2.

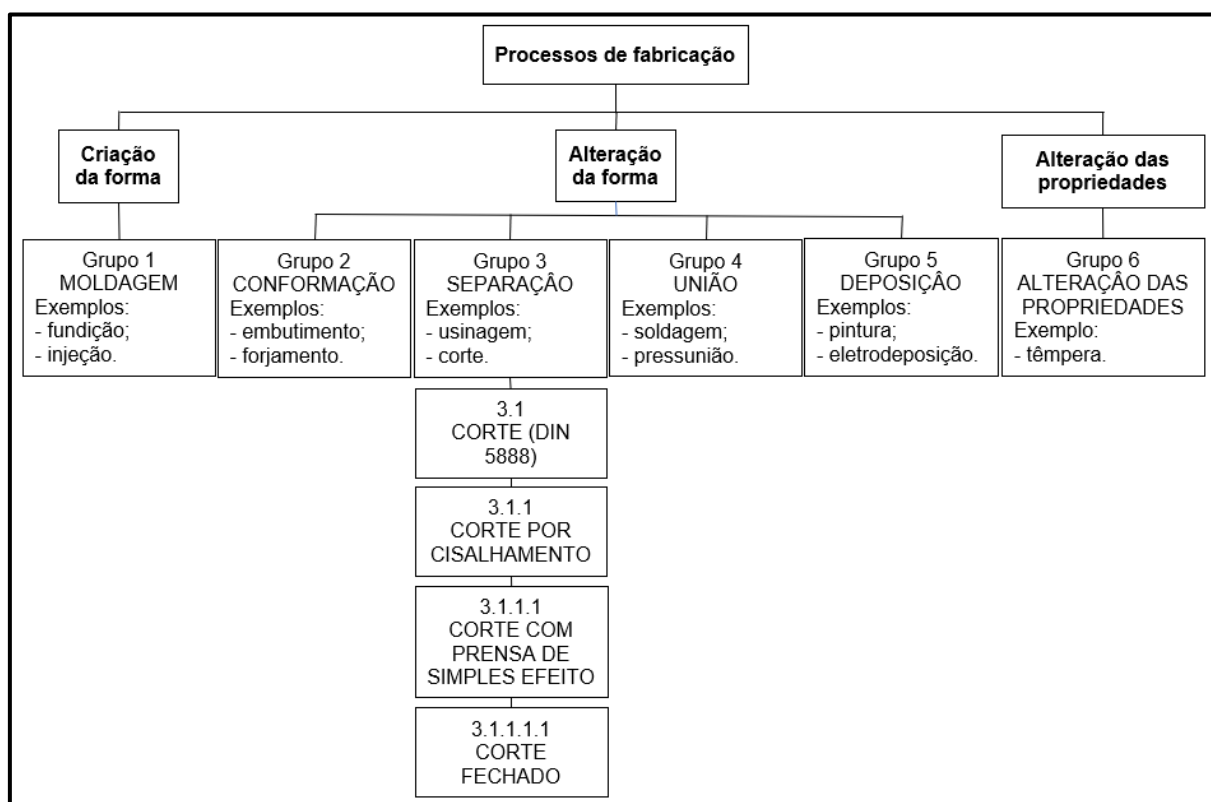


Figura 2 - Classificação segundo DIN 8580. Adaptado de DIN 8580 (1985).

Como pode ser visto na Figura 2, no grupo 3 são classificados os processos de separação e entre eles encontram-se os processos de corte (descritos pela norma DIN 8588), destacando em seguida o processo de corte por cisalhamento que é o processo que será utilizado neste estudo. Em seguida a norma classifica a maneira em que o corte pode ser efetuado e por fim o formato do corte, que no caso proposto neste estudo será um perfil fechado por se tratar de uma furação.

Segundo Hilditch e Hodgson (2005), o corte por cisalhamento é considerado uma operação que faz parte dos processos de estampagem. Pelo fato de as empresas desta área serem muito competitivas no quesito qualidade, muito vem sendo estudado sobre este assunto desde o início deste século. Na maioria das vezes são utilizadas técnicas experimentais, por se tratar de um processo inadequado ao uso da teoria de elementos finitos (FANG; ZENG; LOU, 2002). Fang, Zeng e Lou (2002) e Mucha (2010) ainda afirmam que, diferentes de outros processos de conformação, o corte por cisalhamento não tem o objetivo apenas de deformar os componentes nas formas desejadas, e sim, promover a ruptura do material das peças de trabalho.

O corte por cisalhamento caracteriza-se por ser um processo a frio, porém pode ser utilizado o corte a morno ou a quente quando a espessura da chapa é muito elevada e/ou quando o material da peça tem um comportamento mecânico frágil ou se tratar de um aço de alta resistência mecânica (MACKENSEN *et al.*, 2010). Entretanto a escolha do processo ideal se dá pela qualidade requerida da região do corte. Se esta característica for definida como fundamental para a utilização da peça, ou seja, quando é necessário que o corte seja funcional, alguns controles do processo se tornam necessários (BOFF *et al.*, 2012). Nishad *et al.* (2013) complementam que as otimizações dos parâmetros envolvidos no corte são necessárias quando se deseja uma diminuição do custo de fabricação, o aumento da qualidade e a redução do tempo de processo de um componente.

2.1.1 Elementos básicos do Processo de Corte por Cisalhamento

Os elementos básicos para que ocorra o Processo de Corte por Cisalhamento de uma chapa metálica são o punção e a matriz de corte. A Figura 3 apresenta esquematicamente os principais elementos envolvidos durante o corte por cisalhamento de uma chapa metálica, segundo Schaeffer, Nunes e Brito (2017). Na

imagem pode-se analisar a presença do punção de corte, da matriz de corte, da base da matriz e do componente a ser cortado. Também é possível observar que existe a presença de uma folga de corte (w) e de uma Força de corte (F_c) aplicada sobre o punção, que conseqüentemente comprime a chapa a ser cortada contra a matriz de corte, realizando o processo convencional de corte da mesma (ARAVIND; CHAKKINGAL; VENUGOPAL, 2020).

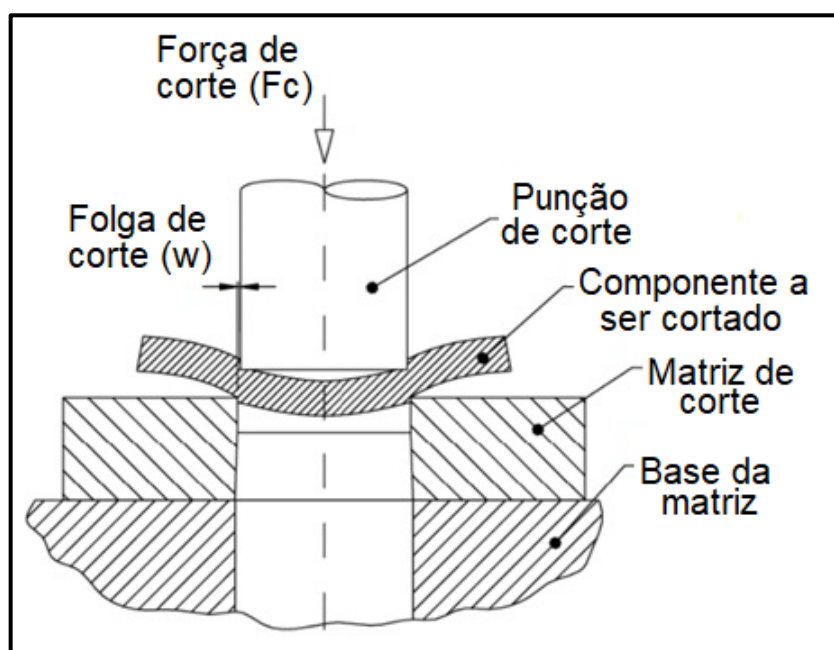


Figura 3 - Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento. Schaeffer, Nunes e Brito (2017).

Entretanto, uma ferramenta comumente possui diversos outros componentes que auxiliam e garantem o movimento relativo entre o punção e a matriz. Em geral, uma ferramenta de corte possui outros elementos como: bases, encostos, buchas e colunas guias para garantir a qualidade do corte durante o processo. Esses elementos podem ser classificados como comerciais, uma vez que possuem uma certa padronização em suas dimensões, porém, também podem ser manufaturados de acordo com as necessidades de cada projeto.

A Figura 4 apresenta um desenho esquemático de uma ferramenta de corte por cisalhamento de uma chapa metálica. Além dos componentes básicos, é possível analisar a presença de outros componentes que auxiliam no aumento da precisão e confiabilidade do processo de corte. Alguns componentes como as colunas guia (10),

buchas guia (2) e o guia do punção (9) tem o objetivo de manter o alinhamento do conjunto. Golovashchenko e Ilinich (2009) afirmam que um conjunto bem alinhado auxilia na redução do surgimento de rebarbas na zona de corte e diminui consideravelmente os níveis de desgaste no punção de corte.

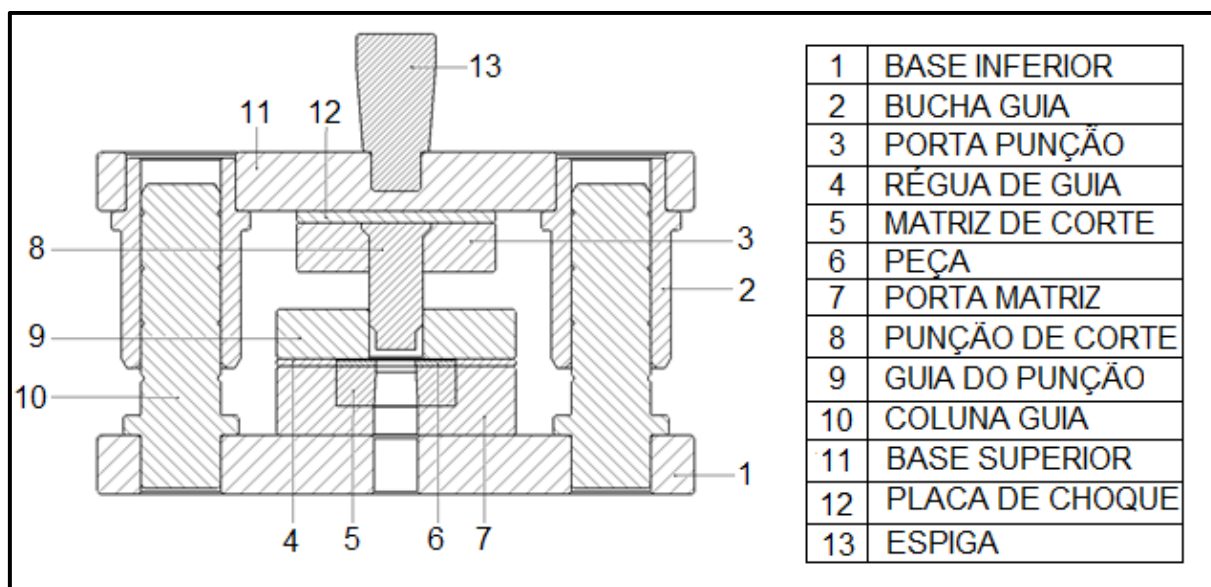


Figura 4 - Elementos de uma ferramenta de corte de precisão.

2.1.2 Estágios do corte por cisalhamento

Para Boff e Schaeffer (2011) a operação de corte por cisalhamento é um processo destinado a obtenção de formas geométricas a partir de uma chapa submetida a uma pressão exercida por um punção de corte. Ao penetrar na peça, essa pressão é convertida em um esforço cisalhante que provoca a ruptura abrupta de uma porção da chapa. Marcondes (2009) e Tarkany (2003) afirmam que existem seis etapas para que o processo de corte aconteça. Nestas etapas estão contemplados todos os elementos críticos do processo de corte de uma chapa metálica. O entendimento destes passos auxilia na construção e na escolha dos materiais das ferramentas e também na escolha correta dos parâmetros de operação. A seguir são apresentados os estágios mencionados:

- a) fase de impacto: onde há o primeiro contato do punção com a superfície da chapa. Um comportamento compressivo aparece e cria uma onda de choque que se propaga axialmente no corpo do punção;

- b) penetração: acontece quando o valor da tensão de escoamento do material é atingido. O punção começa adentrar no material da peça formando um efeito chamado de bojamento em torno da ponta do punção. Nesta etapa, tanto o punção quanto a matriz começam a cortar em seus respectivos lados. A alavanca formada graças a folga entre os elementos cortantes faz com que o material sofra uma flexão e cria-se então, um bolsão de vácuo no centro do corte;
- c) ruptura inicial: uma fração do material é deformada e estirada até o seu limite de resistência. A ruptura se dá a partir das arestas de corte da matriz e do punção.
- d) fratura ou estouro: acontece ao ser atingida a tensão de cisalhamento máxima do material. O material da peça separa-se bruscamente do restante do retalho. O descarregamento de pressão súbito, cria uma onda de choque inversa, que é liberada em forma de ruído. Essa onda de choque está diretamente relacionada com material cortado. Quanto maior for a dureza do material, maior será a onda de choque;
- e) retorno elástico e descarte: o retorno elástico fica concentrado na chapa, visto que o retalho se rompeu de forma livre. Considerando uma folga ideal, o furo contrai, apertando a ponta do punção. Geralmente o retalho se expande ficando preso à matriz de corte. Quando a ferramenta atinge o ponto morto inferior, o punção deve penetrar na matriz não mais do que 0,8 mm, afim de diminuir o desgaste dos elementos cortantes (MUCHA, 2010);
- f) saída do punção: pode gerar cerca de 2/3 do desgaste do punção e é a etapa responsável pela retenção do retalho. Ao ser utilizada uma folga ótima, o furo produzido na peça é menor do que o diâmetro da ponta do punção (devido ao retorno elástico do material). Com isso, a cada ciclo, cria-se uma tendência de agarre no punção, ocasionando desgastes abrasivos tanto no punção por parte da peça quanto na matriz pelo retalho.

A Figura 5 apresenta esquematicamente o que ocorre em cada uma das seis etapas descritas acima. O efeito de bojamento pode ser analisado na imagem (b) da Figura 5. É possível também analisar o comportamento das ondas de choque através

dos estágios. Onde nos estágios (a), (b) e (c) a direção das ondas tendem a uma dada direção e no momento em que ocorre a ruptura do material, a onda de choque sofre uma inversão de direção. Esta mudança brusca na direção da onda de choque pode causar grandes danos ao punção e geralmente é atribuído como o grande causador de quebras do mesmo.

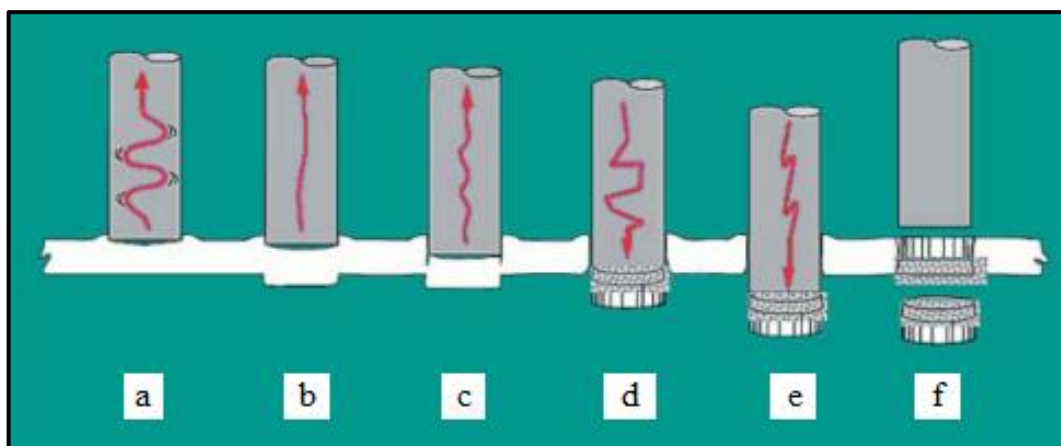


Figura 5 - Estágios do corte; a) fase de impacto, b) penetração, c) ruptura inicial, d) fratura, e) retorno elástico e f) saída do punção. Adaptado de Marcondes (2009).

O processo de corte por cisalhamento de chapas metálicas pode ainda ser subdividido em duas categorias. A primeira é o corte de furos (*punching*) e a segunda refere-se ao corte de perfis (*blanking*). O que diferencia estes dois processos é qual das partes será aproveitada e qual será rejeitada. O corte de furos acontece quando um punção remove uma porção de material da chapa e a parte usada é a própria lâmina metálica, descartando-se o retalho. O oposto ocorre no corte de perfis, onde o elemento cortado pelo punção é aproveitado e o restante da chapa é descartada.

2.1.3 Regiões do corte por cisalhamento

Segundo Schaeffer (2005), Boff *et al.* (2012) e Aravind, Chakkingal e Venugopal (2020), outra característica importante do processo é a região cortada. Um componente submetido a um corte por cisalhamento apresenta algumas regiões típicas do processo. Estas zonas são usualmente chamadas de:

- a) zona de arredondamento;

- b) zona cisalhada;
- c) zona fraturada;
- d) zona de rebarba;
- e) empenamento.

A Figura 6 apresenta as zonas apresentadas na região do corte de um componente submetido ao corte por cisalhamento convencional.

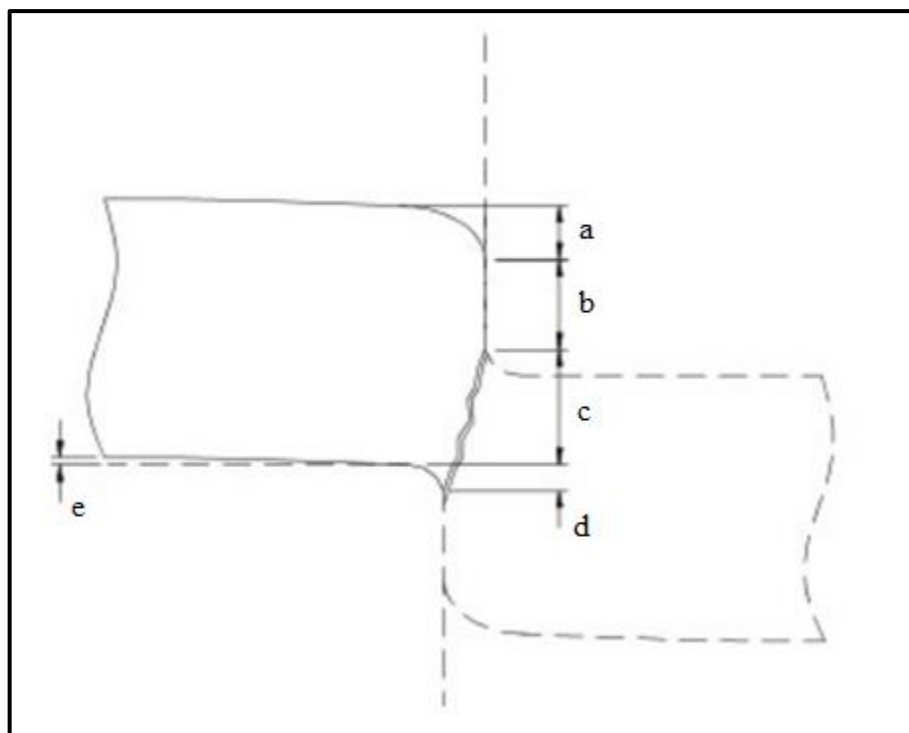


Figura 6 - Regiões características do corte por cisalhamento; a) zona de arredondamento, b) zona cisalhada, c) zona fraturada, d) zona de rebarba e e) empenamento. Lange (1985).

A zona (a) é a região da deformação elasto-plástica do material da peça. Conhecida como zona de arredondamento, surge devido ao escoamento do material ao ser submetido às pressões do punção de corte. O tamanho da região (a) está fortemente relacionado com a ductilidade do material cortado. Materiais mais dúcteis apresentam essa região maior do que em comparação com os materiais frágeis.

A zona (b) é a região que ocorre devido ao cisalhamento do material. O material escoou devido à pressão de corte realizada entre o punção e a matriz de corte. A zona (b) apresenta uma superfície lisa, vertical e com aparência de aço brilhante.

A zona (c) é a região de ruptura. Acontece quando o material atinge o limite máximo de deformação. Quando a deformação chega ao seu limite inicia-se uma

trinca que é nucleada a partir da aresta de corte da matriz na direção máxima da tensão de cisalhamento. Essa trinca se propaga rapidamente até que uma parcela do material (o retalho no caso de *punching*) se desprenda do restante da chapa. Essa região caracteriza-se por apresentar altos valores de rugosidade, por ter um aspecto visual fosco e por ter um formato oblíquo, com ângulo de inclinação dependente da folga de corte aplicada.

A zona (d) é a rebarba. Esta região está diretamente relacionada com a ductilidade do material, a força de corte aplicada, a folga entre os elementos cortantes (punção e matriz) e o desgaste dos mesmos. Quanto maior for a folga entre estes componentes, maior será o comprimento da rebarba. Da mesma forma, quanto maior for o desgaste apresentado nas arestas maior será o tamanho da rebarba.

A zona (e) é o empenamento que o componente produzido apresenta ao final do corte devido a flexão ocasionado pelo efeito de alavanca gerado pela folga entre punção e matriz.

2.2 FOLGA ENTRE PUNÇÃO E MATRIZ

A folga entre o punção e a matriz (w), ou folga de corte como também é conhecida é uma das características mais importantes na construção de uma ferramenta de corte (EARY; REED, 1974). Geralmente a folga é apresentada na forma de raio e não em diâmetro (ou na forma unidirecional quando a geometria não for cilíndrica), ou seja, para a fabricação do ferramental deve-se considerar o dobro da medida w . Segundo Hoffmann, Neugebauer e Spur (2012), grandes valores de folga entre os componentes cortantes, fazem com que as zonas de arredondamento, de fratura e o empenamento da chapa cortada sejam maiores. Outro inconveniente ocasionado por uma folga de corte grande é o aparecimento de rebarba na região do corte (MUCHA; JAWORSKI, 2017).

Já um valor reduzido dessa folga, faz com que a região cisalhada seja maior (o que é desejado em um processo de corte) devido ao aumento de tensões compressivas na região do corte, o que posterga o aparecimento de trincas (SCHAEFFER, 2016 e CHOI; KIM; KO, 2014). Entretanto utilizando-se de valores reduzidos de folga, a força de corte aumenta substancialmente em relação a um valor ideal da folga, além de aumentar os níveis de desgaste das arestas cortantes dos

componentes (RACHIK; ROELANDT; MAILLARD, 2002; EARLY; REED, 1974 e MUCHA; JAWORSKI, 2017). O desgaste excessivo ocorre devido as características elásticas do material da chapa cortada. Após a realização do corte, a superfície cisalhada tende a comprimir-se contra a aresta de corte e devido às altas forças, o desgaste por abrasão do componente cortante é acelerado (SHIVPURI *et al.*, 2011 e MUCHA, 2010). Assim, a correta determinação dos valores da folga de corte tem relação direta com o tempo de vida das ferramentas utilizadas no processo (AKYÜREK; YAMAN; TEKINER, 2017 e CHUMRUM; KOGA; PREMANOND, 2015).

Existem diferentes maneiras de especificar a folga de corte. Levy e Tyne (2011), por exemplo, apresentam como possibilidade o uso de um percentual da espessura do material cortado como folga. Geralmente para materiais macios usam-se folgas de corte menores em relação a materiais com maior resistência mecânica. Segundo Soares *et al.* (2013), é usual utilizar folgas que variam de 2% a 10% o valor da espessura, onde quão maior for a dureza do material puncionado, maior deve ser o percentual utilizado. Outra forma de calcular a folga de corte é dividindo a espessura da chapa por 20, 16 ou 14, para materiais macios (como aço doce, alumínio, e ligas de latão), aços com média dureza e materiais duros, respectivamente (PROVENZA, 1984). Para Schaeffer, Nunes e Brito (2017), a folga de corte também pode ser definida através de um cálculo empírico que leva em conta as características mecânicas do material cortado e a espessura do mesmo. A folga de corte (w) para chapas com até 3 mm de espessura pode ser calculada através da Equação 1.

$$w = C_c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_c} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: C_c é uma constante de corte = $0,007 [\sqrt{mm^2/N}]$;

s é a espessura da chapa [mm];

τ_c é a Tensão de ruptura ao cisalhamento [N/mm²].

Nishad *et al.* (2013) afirmam que, apesar de não ser capaz de simular o processo de corte com o grau de exatidão necessário, o método de elementos finitos (*Finite Element Method* - FEM) também pode ser utilizado para auxiliar na escolha das ferramentas e nos parâmetros do processo. Desta maneira, simulações

computacionais podem ser utilizadas na previsão de folgas de corte ótimas para um processo de corte (BOHDAL *et al.*, 2018).

Segundo Ghosh e Mallik (2010) e Black e Kohser (2012), o processo de corte por cisalhamento é a remoção de um volume finito do material de uma chapa metálica, sendo que a forma e a dimensão da porção removida irão determinar a geometria da matriz e do punção de corte. Se o produto final for a porção removida do material, então a operação é denominada de *blanking* ou perfilamento. Caso contrário, se o componente for a chapa metálica perfurada, no qual foi extraído o volume de material, a operação recebe o nome de *punching* ou puncionamento.

Quanto a questão da folga de corte, no processo de *blanking* a dimensão da peça a ser cortada é a mesma da matriz e a folga de corte é dada no punção. Em contrapartida em um processo de furação (*punching*), a folga de corte é dada na matriz e o punção apresenta a mesma dimensão nominal do furo a ser executado (BLACK; KOHSER, 2012) e (ARAVIND; CHAKKINGAL; VENUGOPAL, 2020). A Figura 7 apresenta de forma esquemática a diferença entre o corte por cisalhamento de (a) furos (*punching*) e o corte de (b) perfis (*blanking*).

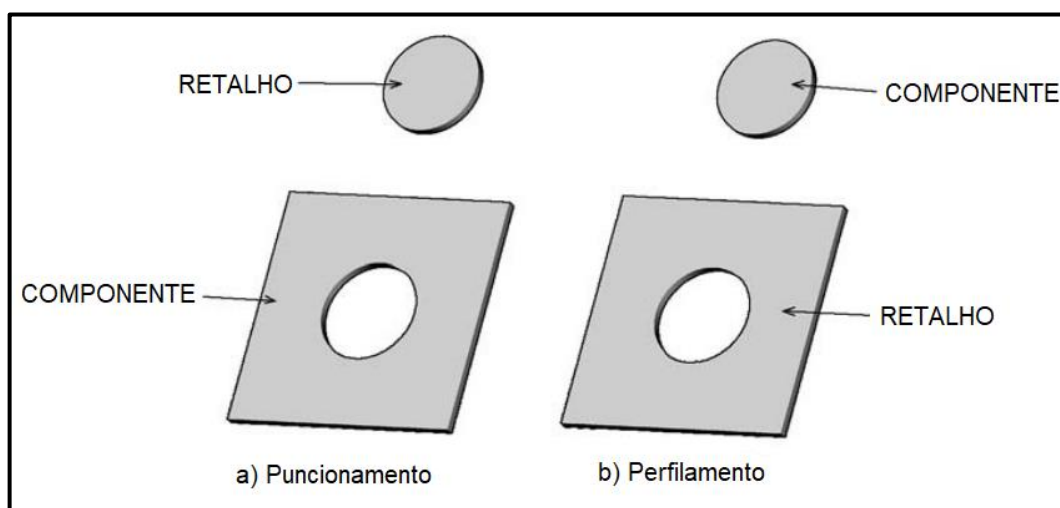


Figura 7 - Diferença entre puncionamento e perfilamento. Adaptado de Suchy (1998).

2.3 ASPECTOS DO CORTE CONVENCIONAL EM CHAPAS GROSSAS

O corte por cisalhamento em chapas metálicas ainda é amplamente utilizado na indústria metal mecânica devido a sua alta produtividade e baixo custo em relação a outros processos, como o corte a laser, por exemplo. A grande maioria dos

componentes fabricados pelos processos de corte são projetados a partir de chapas finas. Por isso, diversas fontes de pesquisa estão direcionadas para o corte aplicado em lâminas metálicas com espessuras menores. Brito (2004) afirma que uma chapa com espessura maior ou igual a 5,16 mm já é considerada uma chapa grossa. A Tabela 1 apresenta a classificação de chapas metálicas em relação a espessura descrita por Liebig (1993).

Tabela 1 – Classificação de chapas através da espessura (s)

Espessura	Denominação
$s < 3 \text{ mm}$	Chapa fina
$3 \text{ mm} \leq s \leq 4,76 \text{ mm}$	Chapa média
$4,76 \text{ mm} < s$	Chapa Grossa

Fonte: Adaptado de Liebig (1993).

Segundo Soares *et al.* (2013), as furações realizadas por um processo de cisalhamento apresentam características totalmente diferentes de processos como uma furação com broca (usinagem), por exemplo. É possível observar essa diferença analisando a região do corte em cada processo. O corte por cisalhamento, como foi comentado anteriormente, apresenta uma região que possui um aspecto brilhoso, que corresponde a região de cisalhamento e outra região com aspecto rugoso que é caracterizada pela ruptura abrupta do material (LUO, 1997). Para Marcondes (2009) essa região de aspecto rugoso que ocorre durante a furação no corte por cisalhamento de chapas grossas pode ser chamada de “estouro”.

Eto (2005) afirma que no processo de *punching* de chapas grossas e/ou de elevada resistência mecânica é possível avaliar a variação dos diâmetros de entrada e saída do punção de corte. Essa diferença pode ser descrita por Δ_d . Quanto maior for a folga de corte (w) entre o punção e a matriz maior será o valor dessa diferença de diâmetros. O efeito do “estouro” descrita por Marcondes (2009) é um dos principais responsáveis pela aparição do Δ_d no furo puncionado. Essa diferença nos diâmetros de entrada e saída da furação executado pelo processo de corte por cisalhamento pode ser observada na Figura 8.

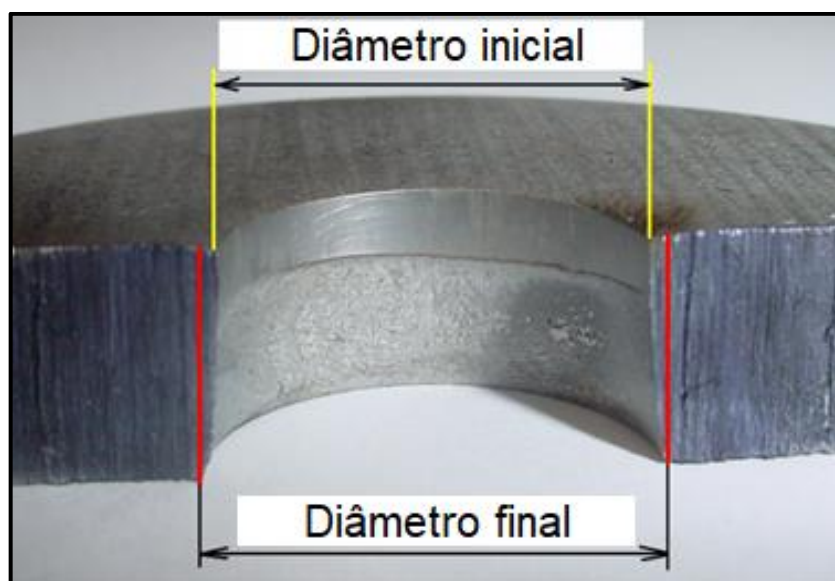


Figura 8 - Diâmetros inicial e final do corte. Adaptado de Eto (2005).

2.4 FORÇA DE CORTE

Segundo Niessner e Liewald (2020) um dos parâmetros mais importantes a ser analisado em um processo de corte por cisalhamento é a força de corte necessária para realizar a operação. Independentemente da espessura da chapa metálica que sofrerá o processo de corte por cisalhamento, as forças de operação são relativamente altas. Parte desse comportamento elevado de forças se dá pelo fato de o material sofrer encruamento durante a parcela de tempo em que ocorrem as deformações plásticas no processo. Esse encruamento faz com que os valores de força sejam aumentados a cada instante que esse tipo de deformação continuar acontecendo. Segundo Chumrum, Koga e Premanond (2015) e Pu *et. al* (2018), a força para realizar a operação de corte tem seu valor aumentado com o aumento da resistência mecânica do material da peça. Hu *et al.* (2015) e Gaudillière *et al.* (2013) comprovam em seu estudo que as elevadas temperaturas durante o momento do corte (que tendem a aumentar conforme a velocidade do punção aumenta) também é um fator que influencia nos valores de força de corte. Desta forma quão maior for a temperatura na região do corte menor será o valor da Força de Corte (F_C).

Segundo Balakrishnan e Issac (2014), a abordagem mais comumente utilizada para a determinação da Força de Corte (F_C) é multiplicar a tensão de ruptura ao cisalhamento do material da peça pela área a ser cisalhada. Utilizando a Equação

2 é possível encontrar variações entre a força real da operação e a força calculada de até 20% (LANGE, 1990).

$$F_C = \tau_c \cdot A_c \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: F_C é a Força de corte do processo [N];

τ_c é a Tensão de ruptura ao cisalhamento [N/mm²];

A_c é a Área de corte [mm²].

Por sua vez a A_c pode genericamente ser calculada através da multiplicação do perímetro do perfil a ser cortado pela espessura do material da chapa como pode ser observado na Equação 3.

$$A_c = l_c \cdot s \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: A_c é a área de corte [mm²];

l_c é o perímetro ou comprimento da geometria a ser cortada [mm];

s é a espessura da chapa a ser cortada [mm].

Lange (1990) afirma que a tensão de ruptura por cisalhamento corresponde a um percentual que está entre 50 e 80% da tensão máxima do material. Por convenção, para materiais onde a relação diâmetro do punção (D_P) e espessura da chapa (s) for maior ou igual a 2 pode-se utilizar a Equação 4, abaixo, para o cálculo aproximado da Tensão de cisalhamento.

$$\tau_c = 0,8 \cdot R_m \quad (\text{Eq. 4})$$

onde: R_m é a Tensão máxima do material da chapa [N/mm²].

Schaeffer (2005), afirma que a folga de corte é o parâmetro que mais tem influência nos valores da força do processo. Embora folgas menores apresentam uma qualidade melhorada da região de corte do componente, os valores de força tendem a um aumento significativo em relação a folgas maiores (CHOI; KIM; KO, 2014).

A Figura 9 apresenta os gráficos da evolução da força durante a espessura da chapa cortada. Sendo que no gráfico (a) está sendo apresentado o comportamento da força para valores de folga inferiores a ideal e em (b) para folgas superiores a ideal. Para ambos os casos é possível analisar que a força atinge seu máximo a aproximadamente 30% da espessura do material cortado.

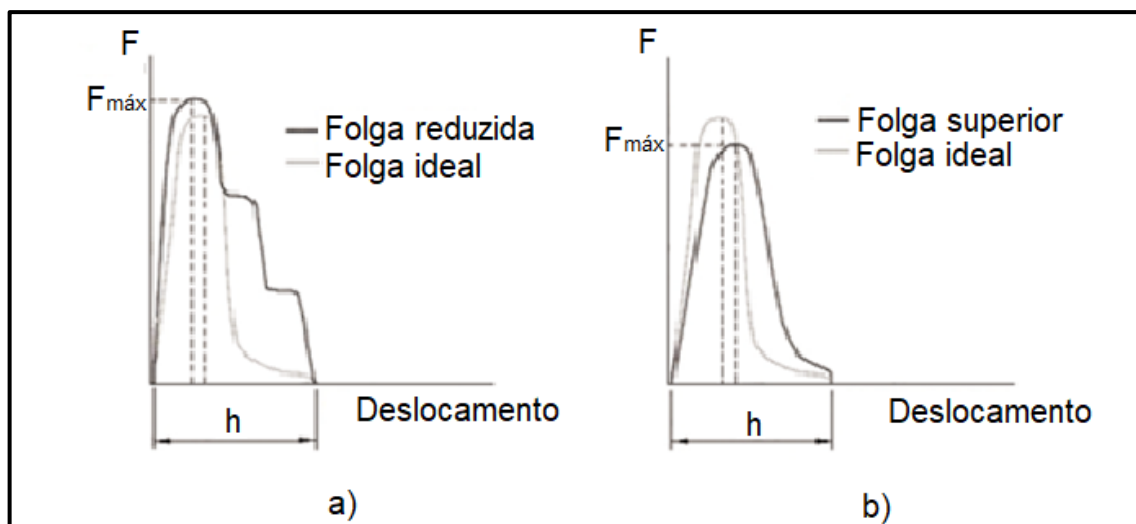


Figura 9 - Evolução da Força de corte em função da espessura. Rodrigues e Martins (2005).

Segundo Schaeffer (2016), após o cálculo da força de corte é fortemente recomendado que seja verificado o centro de aplicação da força. Este local, que geralmente é o centro geométrico do componente a ser cortado, pode ser encontrado com o auxílio de *softwares* CAD (*Computer Aided Design*).

A diferença percentual (de até 20%) entre os valores calculado e real apresentada por Lange (1990) se dá devido a tensão de ruptura do material não ser um valor constante. Brito (2004) afirma que os valores de F_c dependem de alguns fatores como:

- a) quantidade de folga entre o punção e a matriz;
- b) desgaste do ferramental de corte;
- c) geometria da linha de corte;
- d) espessura da chapa;
- e) condições de lubrificação.

2.5 ENERGIA DE CORTE

Segundo Schaeffer (2016), as forças no processo de corte por cisalhamento, mesmo em chapas finas, são consideravelmente altas. Quando o material a ser cortado é de alta resistência mecânica estas forças tendem a ser ainda maiores. Sabendo-se o valor estimado da força de corte para uma determinada situação e a velocidade de deslocamento do punção, é possível obter o valor da potência necessária para que a operação seja realizada. A Potência de Corte (P_C) pode ser calculada através da Equação 5.

$$P_C = F_C \cdot v_P \quad (\text{Eq. 5})$$

onde: P_C é a potência de corte [W];

F_C é a força de corte calculada [N];

v_P é a velocidade de deslocamento do punção [m/s].

Entretanto, devido à inexatidão do cálculo da força de corte, que pode chegar a uma diferença de até 20% da real segundo Schaeffer (2016) e Lange (1990), o cálculo da potência também pode se tornar um tanto quanto duvidoso. Portanto o levantamento real da força máxima (feito através da instrumentação da ferramenta de corte utilizando as técnicas de extensometria) e o uso deste valor na Equação 5 seriam o procedimento mais adequado a se adotar.

Desta maneira, com os valores reais da Força de Corte (F_C) e a espessura (s) da chapa metálica a ser cortada é possível calcular a quantidade de energia necessária para a realização do corte. O trabalho (W) necessário para realizar um processo de corte por cisalhamento pode ser calculado através da Equação 6. O valor de W é dado na unidade de Joule.

$$W = \frac{3}{4} \cdot F_C \cdot s \quad (\text{Eq. 6})$$

Chumrum, Koga e Premanond (2015) ainda afirmam que a energia de corte pode ser descrita com a área abaixo da curva de Força pelo deslocamento do punção ($F_C \times h$).

2.6 PUNÇÕES DE CORTE

Punção é o elemento de estampo que, ao ser pressionado contra uma matriz, efetua a operação de corte em um dado material (FRATESCHI; NEGRINI, 1983).

Em um processo de corte por cisalhamento convencional, diversos são os fatores que podem influenciar na geometria, na precisão e na qualidade de um furo. Com a crescente necessidade de tornar os processos produtivos mais ágeis e produtivos, surgiu a demanda da melhoria das ferramentas de corte (NETO, 2012).

O punção de corte é um dos elementos mais importantes no processo de cisalhamento de chapas (SHAHEEN *et al.*, 2019). O punção deve possuir o formato da geometria que se deseja produzir (BRITO, 2004). No caso da furação (ou *punching*) de um furo redondo, o punção terá exatamente a mesma medida e formato do diâmetro nominal deste furo, uma vez que neste caso a folga é dada na matriz de corte. Já no processo de *blanking* aplicado novamente em uma geometria circular (ou seja, no corte de um disco), a medida da folga de corte deverá ser descontada da medida do diâmetro nominal deste disco para se obter o valor do diâmetro do projeto do punção.

Pelo fato de que o processo de corte por cisalhamento acontecer na grande maioria das vezes a frio, as tensões no punção de corte são geralmente altas devido as altas forças de corte. Desta forma, geralmente os punções são fabricados com materiais mais nobres, os quais serão discutidos adiante. Durante a execução do projeto deve ser considerado o uso quando possível de raios suaves entre os diâmetros de corte e de guia (BRITO, 2004). Akyürek, Yaman e Tekiner (2017) ainda mostram em seu estudo que o desgaste de um punção tem relação direta com sua dureza, onde quanto maior for o valor da dureza, menor será o desgaste do mesmo.

É usual que no projeto de um punção a aresta de corte seja bastante aguda (canto vivo) e sem rebarbas. Qualquer arredondamento ou trincas ocasionadas pelo uso contínuo do punção tenderá a um aumento progressivo da força e conseqüentemente das tensões de trabalho. Quando estas tensões superarem a tensão máxima do material do punção, ocorrerá a quebra do mesmo. Pensando dessa maneira, o responsável pela ferramenta deve atentar-se para este detalhe e sempre que necessário realizar a afiação ou troca do punção (SOUZA, 2001). Mucha e Tutak

(2019) apresentam em seu estudo que o desgaste do punção ocasionou mudanças significativas na geometria do componente cortado.

Black e Kohser (2012) afirmam que o punção deve estar adequadamente alinhado com a matriz, a fim de produzir folgas uniformes em torno do perímetro de corte a ser executado. De maneira geral o punção é fixado a estrutura do martelo móvel superior de uma prensa, permitindo o movimento tanto fora quanto dentro da matriz a cada movimento da máquina. Quando um punção é montado em um conjunto porta punção que, por sua vez está preso a estrutura superior de uma ferramenta, os tempos de preparação e de troca de ferramentas são substancialmente reduzidos. Isso se dá pelo fato de que não é necessário fazer o alinhamento entre os elementos de corte uma vez que as bases inferior e superior da ferramenta estão sendo precisamente guiadas.

Segundo Brito (2004) existe um diâmetro mínimo de furo que pode ser realizado em um determinado material. Este diâmetro de referência tende a um aumento do seu valor quanto maior é a espessura e a tensão cisalhante do material cortado. Punções com diâmetros muito pequenos tendem a ser sensíveis a qualquer deslocamento da peça ou desalinhamento durante o processo.

Outro fator importante para o projeto de punções é o efeito de flambagem. Carregamento de flambagem ou carga crítica de flambagem é o valor de um carregamento axial para o qual uma geometria reta se torna instável (BRITO, 2004). Um corpo esbelto (comprimento substancialmente maior do que o raio de giro da seção) pode falhar com uma tensão de flambagem (σ_F) menor do que a tensão de escoamento (R_e) do material. Para o projeto do punção de corte é usual utilizar a Equação de Euler para determinar a força máxima para que o mesmo não flambe. A Equação 7 apresenta a Equação de Euler.

$$F_F = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{L^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde: F_F é a Força crítica para um corpo não flambar [N];

E é o Módulo de Elasticidade do material do punção [N/mm²];

J é o Momento Polar de Inércia da seção em análise [mm⁴];

L é o comprimento do corpo [mm].

Outras fontes ainda complementam esta questão do cuidado necessário com o efeito da flambagem do punção durante o corte. A *ASM International* (1993) afirma que para chapas acima de 3,18 mm de espessura (s), o diâmetro do punção (D_P) deve corresponder a, no mínimo 70% da espessura da chapa a ser cortada. Já Schaeffer (2005) afirma que para que um punção não flambe durante sua ação, o comprimento máximo em balanço do punção não pode exceder 8x o diâmetro do mesmo.

Muitas vezes é necessário realizar uma operação de corte em componentes onde a força de operação é maior do que a capacidade disponível do maquinário. Uma vez que não é permitido a alteração da geometria e de outros fatores de projeto da peça, são necessárias algumas alterações no processo de fabricação da mesma a fim de viabilizar a sua manufatura (BRITO, 2004). Segundo Boff e Schaeffer (2011), a força de operação de um processo de corte de uma chapa metálica pode ser reduzida com algumas técnicas e procedimentos especiais aplicados no ferramental utilizado no processo. Uma das técnicas mais utilizadas para a redução da força de corte é a alteração da geometria dos elementos cortantes (GÜRÜN; GÖKTAŞ; GÜLDAŞ, 2016 e LEVY; TYNE, 2011). Uma inclinação é feita na aresta de corte do punção (no caso de *punching*) ou da matriz de corte (para o processo de *blanking*) fazendo com que a força seja reduzida significativamente em relação a ferramenta plana (BOFF; SCHAEFFER, 2011; MACKENSEN *et al.*, 2010 e CHOI; KIM; KO, 2014). Gürün, Göktaş e Gültaş (2016) afirmam em seu estudo que ao utilizar um punção chanfrado a força de corte (F_C) teve um decréscimo de aproximadamente 80% em relação com o corte realizado com o punção sem nenhum tipo de afiação. A Figura 10 apresenta esquematicamente uma matriz (a) e um punção (b) inclinados.

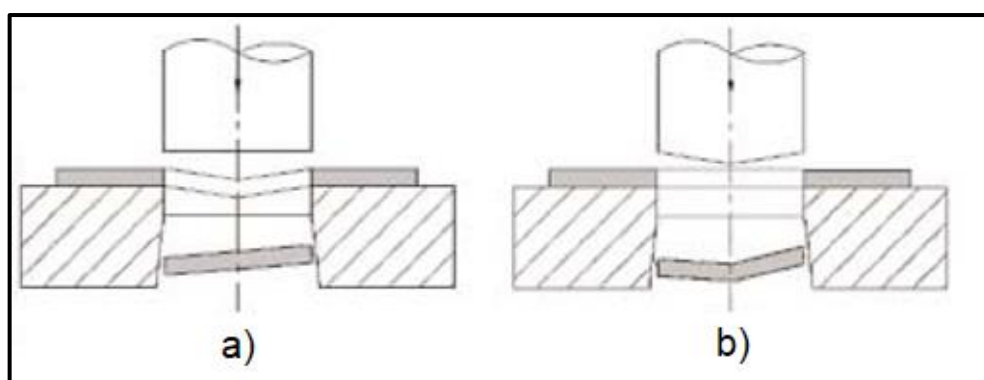


Figura 10 - Inclinação da ferramenta para reduzir a força de corte. Adaptado de Rodrigues e Martins (2005).

Segundo Brito (2004) ao utilizar-se de um punção escalonado, dificilmente o retalho poderá ser reutilizado devido a deformação generalizada do mesmo. Este efeito pode ser visto na imagem b) da Figura 10.

Em um estudo realizado por Totre, Nishad e Bodke (2013) foi analisada a influência da geometria da ponta do punção no processo de corte. Neste estudo, os autores concluem que o uso de punções parcialmente chanfrados reduzem significativamente os valores de força do processo de corte de chapas que variam sua espessura de 1 a 7 mm. Quando usado punções totalmente chanfrados, a redução dos valores de força foi ainda maior. Este efeito também foi comprovado no estudo de Mucha e Jaworski (2016). Totre, Nishad e Bodke (2013) em seu estudo, sugerem a fabricação de punções com ângulos (α) de $22,5^\circ$ nas pontas dos mesmos. Com essa configuração de ferramentas a força de corte foi reduzida em até 25%. Essa redução, muitas vezes é o suficiente para viabilizar o processo de corte. Outros autores como Brito (2004) apresentam outras maneiras no qual o punção de corte pode ser afiado a fim de reduzir a força de corte. A Figura 11 apresenta um desenho esquemático das geometrias propostas por Brito (2004) no qual h' é a altura do chanfro sugerido para cada caso.

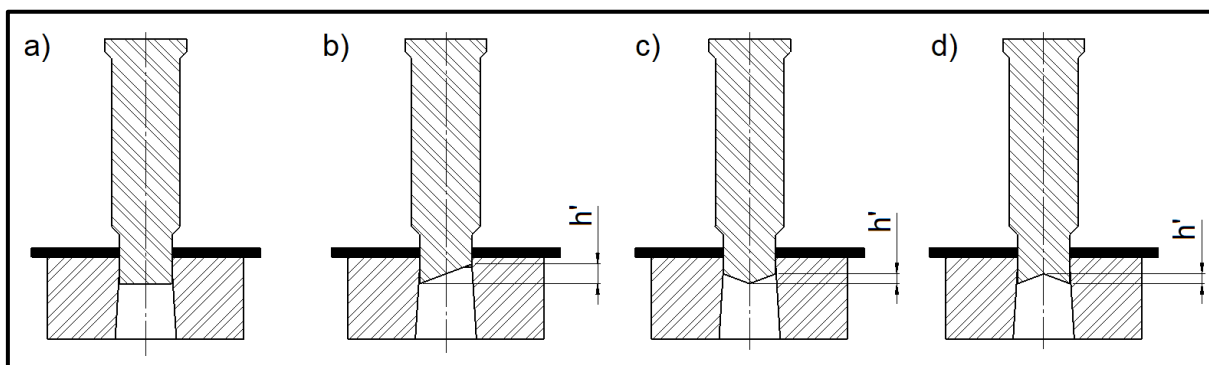


Figura 11 - Diferentes geometrias de afiação de punção. Adaptado de Brito (2004).

Mucha e Tutak (2019) afirmam que com um punção plano, a pressão da aresta de corte na chapa é uniforme. Quando um punção é afiado com um ângulo de corte α diferente de 90° em relação ao seu eixo, o corte é dado de maneira gradual. Ao ser aplicado ao punção algum tipo de inclinação, a força de corte pode ser reduzida substancialmente (MACKENSEN *et al.*, 2010; GÜRÜN; GÖKTAŞ; GÜLDAŞ, 2016). Conforme é apresentado esquematicamente na Figura 12, a operação de corte

utilizando esta técnica é feita de maneira progressiva e tem uma redução expressiva da força de corte. A variação do ângulo irá controlar a quantidade de cisalhamento momentâneo que a peça sofrerá bem como o curso total do punção. O emprego deste tipo de técnica, auxilia na redução das forças de corte, porém, faz com que o aumento do curso de trabalho do punção seja aumentado (GÜRÜN; GÖKTAŞ; GÜLDAŞ, 2016). Outro fator importante citado por Mucha e Tutak (2019) é que um punção inclinado sofre um desgaste irregular ao longo da aresta de corte, o que ocasiona um aumento no tamanho da rebarba gerada. Geralmente o uso de um punção inclinado é indicado para cortar chapas grossas e/ou com maior resistência mecânica (BLACK; KOHSER, 2012). Bratus, Kosel e Kovac (2010) e Choi, Kim e Ko (2014) afirmam que a otimização da forma do punção auxilia na melhora da qualidade geométrica do item cortado.

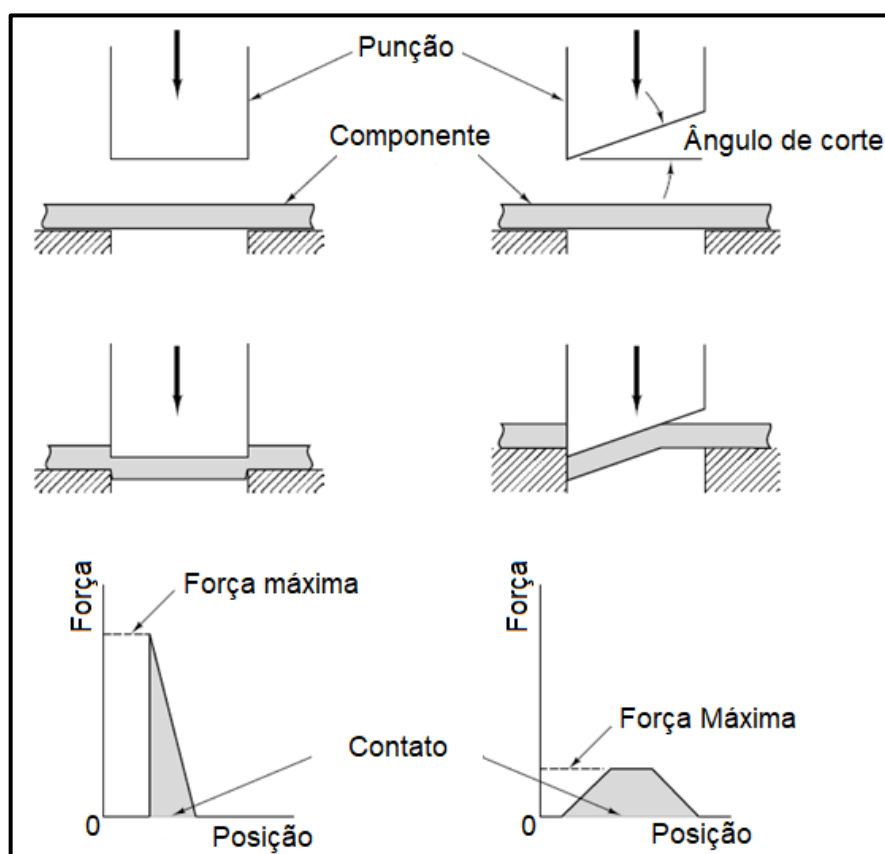


Figura 12 - Inclinação do punção para redução de força. Adaptado de Black; Kohser (2012).

Outra alternativa para minimizar os esforços de corte quando a operação exigir dois ou mais punções é alterar a altura dos mesmos a fim de fazer com que os punções não realizem a operação simultaneamente e sim em diferentes momentos.

2.7 MATRIZ DE CORTE

A matriz tem a geometria inversa do punção e é um dos elementos de estampo que mais sofre com carregamentos cisalhantes durante o processo de corte. Existem algumas dimensões que são ditas como as mais importantes no projeto e na manufatura de uma matriz como: o ângulo de escape, a espessura, o perfil a ser cortado e a folga de corte. Estes componentes são montados sobre bases que, geralmente são denominados de porta matrizes e são fixadas através do uso de parafusos podendo ou não ser localizados por pinos, encaixes ou chavetas (BRITO, 2004).

A aresta de corte de uma matriz, assim como nos punções, não deve apresentar rebarbas e/ou asperezas com a finalidade de otimizar a sua funcionalidade, melhorar a produtividade e a qualidade do processo de corte. Entretanto, devido as elevadas forças durante o processo de corte aplicadas a aresta de corte das matrizes, haverá um desgaste após a produção de um elevado número de peças. Visando a economia na fabricação da ferramenta, as matrizes devem ser projetadas a fim de que se permita o recondicionamento através de um processo de retificação da superfície de contato (BRITO, 2004).

Todavia, Brito (2004) afirma que a vida útil de uma matriz não está relacionada somente com a quantidade de peças que a mesma é capaz de produzir, mas também a defeitos como quebras, trincas e desgaste prematuro que podem ocorrer devido a fatores como:

- a) processos de fabricação da matriz defeituosos;
- b) montagem incorreta;
- c) grande variação na dureza da peça cortada;
- d) espessura mal dimensionada;
- e) folga entre punção e matriz inadequada;
- f) projeto errado do ângulo de alívio.

Segundo Brito (2004), uma das mais importantes características na construção de uma matriz é o ângulo de escape (ou alívio) β . Este ângulo tem como principais objetivos a facilitação da saída da peça/cavaco cortado, evitar o acúmulo

de retalhos e ou peças na matriz e evitar com que a peça se deforme durante o processo de corte por cisalhamento. Devido a recuperação elástica do material que está sendo cortado, o retalho fica retido no interior da matriz forçando as paredes laterais do furo da mesma. Após o corte da primeira peça, se não houvesse o ângulo de saída, os retalhos dos cortes seguintes também ficariam acumulados dentro do furo da matriz e as forças de compressão destes contra as paredes laterais se somariam. Se estes esforços superarem o limite de resistência da matriz haveria a quebra da mesma. Para resolver esta questão é acrescentado um pequeno alívio ou um ângulo de escape que possibilita a expulsão livre da peça/retalho sem afetar prejudicialmente a resistência da matriz.

A Figura 13 apresenta um quadro comparativo com os diferentes tipos de alívio que são aplicados a matrizes e quais são os ângulos indicados e a altura S' que corresponde ao acréscimo de espessura para posterior operação de retífica para recondicionamento (BALAKRISHNAN; ISSAC, 2014).

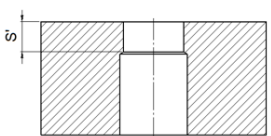
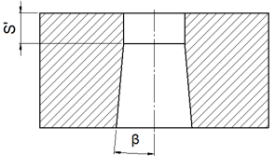
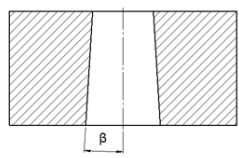
TIPO DE SAÍDA	ESPESSURA DA CHAPA "s"	ACRÉSCIMO S'	ÂNGULO β	APLICAÇÃO
	até 2 mm	$2 \times s$	$0^{\circ} 30'$	Corte de chapas laminadas macias onde se requer boa precisão
	acima de 2 mm	$1 \text{ a } 2 \times s$	1°	
	até 2 mm	$2 \text{ a } 3 \times s$	2°	Corte de chapas laminadas duras onde se requer boa precisão
	acima de 2 mm	$1 \text{ a } 2 \times s$	3°	
	até 2 mm	-	$0^{\circ} 30'$	Corte de chapas de Aluminio duro ou equivalente
	acima de 2 mm	-	1°	

Figura 13 - Tipos de alívios aplicados a matrizes. Adaptado de Brito (2004).

Analisando os dados contidos no quadro da figura acima é possível verificar que o ângulo de alívio da matriz aumenta com relação a espessura da chapa a ser cisalhada. Outra observação importante é de que para operação de corte em chapas mais macias, pode ser utilizado um alívio cilíndrico como apresentado em (A), devido as forças de corte mais baixas. Quando a força de operação tende a aumentar deve-

se utilizar um alívio em ângulo (β) como apresentado em (B) o que deixa a matriz mais resistente (BRITO, 2004).

Brito (2004) afirma que independentemente dos cálculos de espessura da matriz, esta dimensão nunca deve ser inferior a 14 mm. Para matrizes que possuam um perímetro de corte superior a 50 mm e que são tratadas termicamente a espessura nunca deve ser inferior a 18 mm para um dos casos citados acima. Para todos os casos, considera-se que a matriz está totalmente apoiada e que um suposto porta matriz e a base sejam rígidos e forneçam um apoio sólido para a mesma. Para dimensionar a espessura mínima da matriz pode-se fazer uso do diagrama apresentado na Figura 14. Este diagrama relaciona o perímetro de corte com a espessura da chapa a ser cortada. Este diagrama, entretanto, não considera a tensão de cisalhamento do material, sendo assim, apenas é possível o seu uso se o material a ser cisalhado possuir uma tensão de cisalhamento igual ou inferior a 600 MPa.

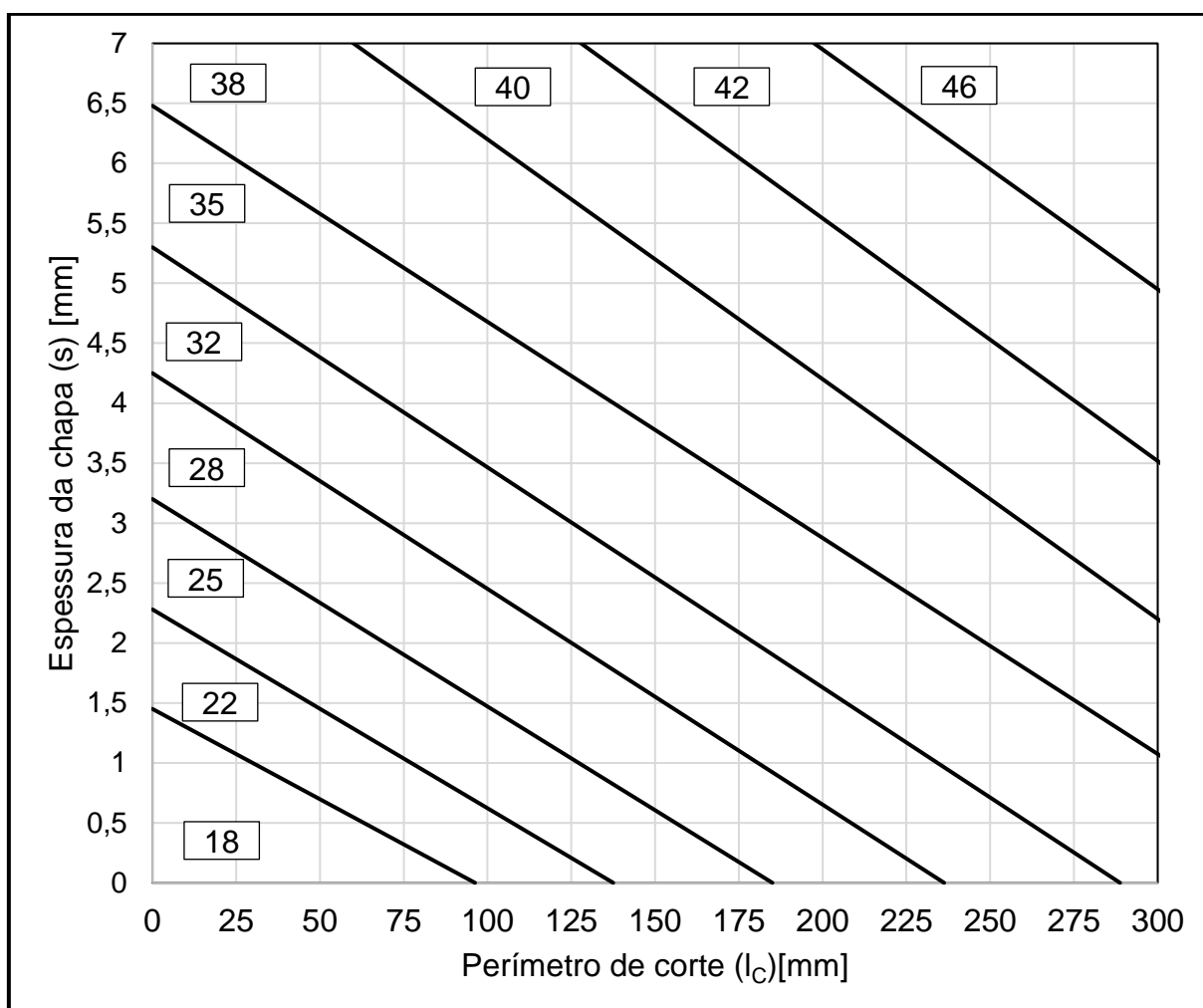


Figura 14 - Diagrama de determinação da espessura da matriz. Adaptado de Brito (2004).

O diagrama apresentado na Figura 14 apresenta os valores de referência de espessura da matriz (h_M) indicado por Brito (2004). É importante analisar que interpolando os valores descritos no gráfico é possível utilizar-se de outros valores de espessura da chapa e de perímetro de corte. O que é importante saber é que quanto maior for a força aplicada no processo de corte maior deverá ser a espessura da matriz, pois os esforços exigem que estes componentes sejam reforçados. Os cálculos para encontrar o valor da espessura da matriz de corte (h_M) estão disponíveis em Brito (2004) e Balakrishnan e Issac (2014).

2.8 AÇOS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE

Segundo Scheid (2010), os aços destinados à fabricação de ferramentas para manufatura geralmente são denominados aços ferramenta. Estes aços são caracterizados principalmente por apresentarem um elevado teor de elementos de liga em sua estrutura. Black e Kohser (2012) e Brito (2004), afirmam que os elementos de corte geralmente são fabricados através de aços ferramentas que apresentam alta temperabilidade, alto grau de indeformabilidade, tenacidade apreciável e alta resistência mecânica. Estes requisitos são muito importantes e podem ser afetados por diversos fatores, como a composição química do aço selecionado, os tipos de processos de fabricação utilizados na manufatura, o calor gerado durante o processo de corte e os tipos e qualidade dos lubrificantes utilizados.

Uma ferramenta de corte requer que o aço utilizado em sua fabricação tenha uma dureza mínima superior à do material da peça a ser processada. Essa dureza mais elevada garantirá que as ferramentas de corte não se deformem durante o processo. Devido a adição de elementos de liga nestes tipos de aços as durezas alcançadas após os devidos tratamentos térmicos são bastante elevadas, chegando facilmente na faixa entre 58 e 62 HRC.

Os aços ferramentas são identificados através de um código alfanumérico que normalmente contém uma letra maiúscula no seu início, indicando sua finalidade. A letra é precedida por números que mostram as distintas aplicações e as possíveis diferenças dentro da mesma classe de material. A Tabela 2, abaixo demonstra a descrição de uso e a letra de identificação utilizadas seguindo as normas SAE e AISI.

Neste estudo, os elementos de corte (punções e matrizes) propostas serão fabricadas utilizando-se de aços ferramenta para trabalho a frio da série D. Esta escolha foi dada porque estes aços têm como uma de suas características a indeformabilidade durante os tratamentos térmicos aplicados aos mesmos conforme recomendações feitas no estudo realizado por Zeidi *et al.* (2020). Isso se dá pelo fato de que estes materiais necessitam de taxas de resfriamento mais brandas na têmpera (em função dos elementos de liga), o que induz a menores deformações e distorções da sua geometria final.

Tabela 2 - Classificação dos aços ferramenta segundo norma AISI.

Descrição	Identificação	Exemplos
Aços temperáveis em água	W	W1, W4
Aços resistentes ao choque	S	S1, S7
Aços para trabalho a frio de têmpera ao ar	A	A2, A4
Aços para trabalho a frio com Cr e C altos	D	D2, D6
Aços para trabalho a frio de têmpera em óleo	O	O1, O6
Aços para trabalho a quente	H	H11, H13
Aços para moldes plásticos	P	P20
Aços rápidos ao Tungstênio	T	T1, T2
Aços rápidos ao Molibdênio	M	M1, M2, M6

Fonte: Adaptado de Scheid (2010).

Os aços da série D são conhecidos pela alta capacidade de têmpera. A letra D, de referência dos aços desta série, provém da palavra *Deep*, profundidade em inglês. São aços temperáveis ao ar ou ar soprado, apresentando baixíssimas distorções dimensionais e, por isso, comumente são chamados de aços “indeformáveis”. Os aços desta série apresentam uma altíssima resistência ao desgaste, característica esta, atribuída a elevada quantidade de Carbonetos de Cromo presentes na microestrutura dos mesmos. Entretanto, estes aços não são muito indicados em condições onde ocorrem choques mecânicos, o que limita o uso deste tipo de aço em ferramentas que sofrem este tipo de carregamento.

De maneira geral, os aços da série D apresentam teores de Carbono variando de 1,40% até 2,50% e Cromo de 11,00% a 13,50%, o que confere a alta quantidade de carboneto de Cromo, já mencionada. Além disso é possível conter outros elementos de liga como o Molibdênio, Vanádio, Tungstênio e Cobalto (SCHEID, 2010;

ASTM, 2008). No trabalho realizado por Zeidi *et al.* (2020), os pesquisadores estudam os problemas que causam as falhas em um elemento de corte fabricado a partir um aço da classe D aplicado em um processo de corte.

2.9 CHAPAS DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Com a preocupação crescente das indústrias (principalmente a automotiva) com as questões ambientais e de segurança, surge a necessidade do desenvolvimento de produtos cada vez mais leves e resistentes (TAKAHASHI, 2015); (QU; MICHAL; HEUER, 2013). Além da robustez e da alta vida de operação, outras características que muitas vezes são contraditórias, são exigidas nos componentes e estruturas modernas como: níveis de vibrações baixos e baixo peso visando a economia de energia consumida. Ainda no cenário automotivo, os veículos estão sendo submetidos a testes de colisão que provêm de regras cada vez mais rigorosas para a proteção dos ocupantes dos mesmos. Assim, a redução de massa dos veículos deve acompanhar o aumento de segurança, o que se torna conflitante quando os mesmos materiais de engenharia são utilizados na fabricação das peças. Desta forma, surge a necessidade do uso de materiais diferentes e mais resistentes.

Diante destes novos desafios, a indústria como um todo passou a utilizar materiais alternativos como as ligas de alumínio, fibra de carbono e alguns polímeros de engenharia (GALDOS *et al.*, 2019). Estes materiais são atrativos no que se diz respeito a leveza, segurança e preço, embora estas sejam características de difícil conciliação em muitos casos. A indústria dos aços por sua vez, temendo uma perda de mercado também investiu no desenvolvimento de novos materiais. Gürün, Göktaş e GÜldaş (2016) afirmam que chapas de aço com maior resistência mecânica vêm sendo, cada vez mais utilizadas nos processos de estampagem para a fabricação de produtos com maior qualidade e vida útil. Os aços de alta e ultra alta resistência mecânica (do inglês *Advanced High Strength Steels – AHSS*) foram criados com o intuito de provar que os aços ainda podem ser uma alternativa viável na aplicação de peças com os requisitos necessários para suas aplicações.

O programa *ULSAB – Ultralight Steel Auto Body* deu início no desenvolvimento de uma carroceria modelo, fabricada a partir de diferentes tipos de aço, principalmente AHSS com peso e custos competitivos. Atualmente os aços AHSS

correspondem a boa parte do material utilizado na fabricação dos componentes da carroceria de um automóvel moderno.

Entretanto os aços de alta resistência possuem certas desvantagens em relação aos aços comuns frente aos processos produtivos, principalmente no que se diz respeito aos processos de estampagem (CHOI; KIM; KO, 2014). A alta resistência mecânica destes materiais leva a dificuldades nos processos de conformação (CHUMRUM; KOGA; PREMANOND, 2015 e MORI; MAENO; FUZISAKA, 2012). Desta maneira, paralelamente ao avanço dos materiais devem ser aplicadas otimizações dos processos de fabricação, uma vez que grande parte destes materiais sofrem pelo menos alguma operação de estampagem em sua manufatura.

2.9.1 Definições e nomenclaturas dos AHSS

Segundo Keeler, Kimchi e Mooney (2017), os aços de alta resistência mecânica podem ser classificados em HSS (*High Strength Steels*) e em AHSS (*Advanced High Strength Steels*).

Os aços que comumente são denominados de aços doces apresentam uma microestrutura com uma matriz ferrítica relativamente simples e tipicamente apresentam baixos teores tanto de Carbono quanto de elementos de liga em sua composição. Os aços macios (*mild steels*) são amplamente utilizados na indústria e por isso servem de base para a comparação com outros materiais utilizados. Para Tamarelli (2011), os aços convencionais, tanto os de baixa quanto os de alta resistência mecânica, apresentam os valores de R_e inferiores a 550 MPa e a ductilidade dos mesmos é inversamente a resistência mecânica. Pode-se citar como exemplos os aços IF (*Interstitial Free*), os BH (*Bake Hardening*) e os HSLA (*High Strength Low Alloy*).

Já os AHSS apresentam uma microestrutura mais complexa, podendo apresentar mais de uma fase, permitindo uma gama considerável de combinações de resistência mecânica e ductilidade (LEVY; TYNE, 2011). Estas combinações de propriedades mecânicas dos materiais que se encaixam nesta classe são extremamente importantes para atender as exigências de utilização de alguns materiais sem prejudicar o desempenho nos processos de fabricação por conformação (MACKENSEN *et al.*, 2010). Além disso, estes materiais apresentam

outras propriedades vantajosas como um alto grau de encruamento, o que também viabiliza o uso dos mesmos em componentes conformados. A principal característica que diferencia os HSLA dos AHSS é o número de fases presentes na microestrutura do material. Os HSLA, como já foi mencionado, apresentam geralmente a sua matriz com apenas uma fase, enquanto os AHSS podem apresentar mais fases como ferrita, cementita, perlita e bainita. Os altos valores de resistência mecânica dos HSLA provêm principalmente dos processamentos termomecânicos especiais que estes aços são submetidos. Estes tratamentos conferem a esta classe de aço uma microestrutura refinada reforçada através de endurecimento por precipitação e por solução sólida (TRŁKO *et al.*, 2020).

Keeler, Kimchi e Mooney (2017) afirmam que pelo fato de os AHSS se tratarem de aços relativamente novos em comparação com os aços de alta resistência convencionais, a nomenclatura usada para eles é dada de forma diferente. A nomenclatura que geralmente é utilizada para estes aços avançados foi concebida pela ULSAB e adota as especificações tanto do limite ao escoamento quanto a tensão máxima. A estrutura do nome dado a esta classe de aços segue o seguinte padrão: *XX aaa/bbb*, onde *XX* é a sigla que corresponde ao tipo de aço, *aaa* é a mínima tensão de escoamento que o material pode apresentar (em MPa) e *bbb* é limite de resistência a tração (mínimo) que o material pode apresentar em MPa. Como exemplo, um aço da classe *Dual Phase* que apresenta os valores mínimos de resistência ao escoamento e a resistência a tração de 600 e 980 Mpa, respectivamente, recebe o nome, neste caso de DP 600/980.

De maneira geral, os termos utilizados como: “aços de alta resistência” e “aços avançados de alta resistência” estão relacionados a classes de aços que compartilham de um mesmo conjunto de comportamento. Os AHSS são diferentes dos HSS porque estes tiveram o seu desenvolvimento posterior, afim de proporcionar aos aços altos valores de resistência mecânica e ductilidade e com uma boa conformabilidade. Um critério típico de definição se um determinado aço se trata de um HSS ou de um AHSS é o valor mínimo do limite de resistência a tração do mesmo. Assim, se um aço possuir um limite mínimo de resistência a tração variando entre 210 e 550 MPa este será definido com um aço HSS. Para valores acima de 550 a denominação do aço passa a ser de um AHSS.

Além das características mecânicas como resistência ao escoamento e máxima, os aços de alta resistência e/ou ultra alta resistência mecânica ainda devem apresentar comportamentos adequados frente a processos de fabricação como conformação, soldagem e usinagem (KEELER; KIMCHI; MOONEY, 2017).

2.9.2 Subdivisões dos AHSS

Segundo Keeler, Kimchi e Mooney (2017), os aços avançados de alta ou ultra alta resistência mecânica (AHSS) podem se apresentar em diferentes classes, podendo-se destacar as seguintes como as principais e mais usuais na indústria:

- a) *Dual Phase* (DP);
- b) *Transformation Induced Plasticity* (TRIP);
- c) *Twinning – Induced Plasticity* (TWIP);
- d) *Complex Phase* (CP);
- e) *Martensitic* (MS);
- f) *Ferritic – Bainitic* (FB);
- g) *Hot Formed* (HF).

A Figura 15 apresenta os diferentes tipos de aços convencionais e AHSS em um diagrama que correlaciona o limite de resistência a tração com o alongamento. Neste diagrama é possível analisar que os aços AHSS possuem excelentes valores de resistência mecânica em comparação aos aços convencionais, entretanto possuem um alongamento com valores bastante restritos. Também é possível analisar o porquê de os aços representarem uma parcela tão grande de materiais utilizados na engenharia. Com combinações de propriedades, os aços podem abranger praticamente todas as solicitações que as indústrias modernas exigem. Todos os aços que estão contidos dentro da classe de AHSS são obtidos por rigorosos controles de composição química e taxa de resfriamento em todas as fases de manufatura. Testes de qualidade são aplicados desde a austenitização do aço (ou austenita + ferrita) até os processos de obtenção de forma e tratamentos térmicos finais como, por exemplo, na laminação e nos fornos de recozimento contínuo, respectivamente (NOVY *et al.*, 2020).

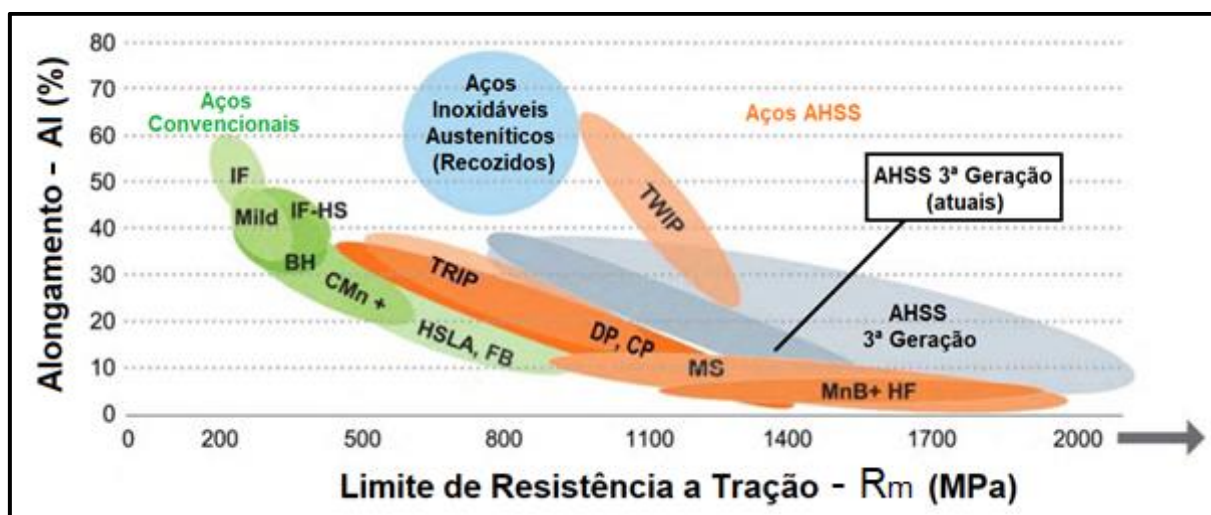


Figura 15 - Diagrama de conformabilidade dos aços convencionais e AHSS. Adaptado de Keeler; Kimchi; Mooney (2017).

2.10 EXTENSOMETRIA

A constante evolução do mercado e o aumento da competitividade exigem que os custos com os projetos sejam cada vez menores e a qualidade dos mesmos seja aumentada. Sendo assim, surge a necessidade de uma avaliação mais elaborada das reais condições de carregamento em que os componentes e estruturas estão submetidos (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Para Balbinot e Brusamarello (2011), a medição é a base de todo o processo experimental. Portanto, a medição e o controle das grandezas físicas são extremamente importantes, seja no controle de processos ou em uma linha de produção industrial.

A instrumentação e controle das grandezas são alternativas como processos de medição, aferição e testes nos processos industriais. A extensometria é uma área de instrumentação que tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento de deformações e tensões em estruturas tanto mecânicas como de alvenaria (FIALHO, 2005). Fialho (2005) ainda afirma que são utilizados métodos de cálculo para avaliação da resistência dos materiais em relação aos carregamentos aplicados. Estes carregamentos que muitas vezes são estimados, podem causar falhas por sobrecargas e/ou desgaste devido a determinações equivocadas nos parâmetros de projeto.

As avaliações dos esforços são baseadas nas descobertas de Robert Hooke (1635 - 1703), no qual as deformações relativas (ϵ) no regime elástico são

relacionadas com as tensões (σ) aplicadas através do módulo de elasticidade do material (E). A expressão conhecida comumente por Lei de Hooke é dada por $\sigma = E \cdot \epsilon$ (HOFFMANN, 2012a). Pinkaew e Asnachinda (2006) afirmam que quando ocorre uma deformação elástica em um determinado material, é possível medir a mesma através da quantidade de força aplicada no corpo sólido. Respeitando a Lei de Hooke, tanto em cargas trativas quanto em compressivas, o material mantém uma relação constante entre os valores de força e deformação.

Apesar de existirem muitos métodos de inspeção não destrutivos, a extensometria tem sido cada vez mais utilizada devido a sua ampla flexibilidade e aplicabilidade. Fialho (2005) afirma que os extensômetros se destacam por inúmeras características como:

- a) alta precisão de medição;
- b) tamanhos reduzidos e pequena massa dos sensores;
- c) apresenta excelentes respostas a fenômenos dinâmicos;
- d) possui excelente linearidade;
- e) é possível realizar as medições dentro de uma grande faixa de temperaturas;
- f) quando usados os tratamentos adequados, é possível a utilização em ambientes corrosivos e submersos em água;
- g) possibilidade de serem aplicados como elementos transdutores, afim de medir diversas grandezas físicas (força, pressão, torque, aceleração e deslocamento);
- h) possibilidade de aplicação em locais remotos;
- i) os sinais de saída podem ser utilizados na engenharia de controle.

No corte por cisalhamento, a obtenção das forças de corte através do uso da extensometria vem sendo cada vez mais utilizada. Segundo Klingenberg e Boer (2008), o uso de extensômetros auxilia no que eles denominam CBM (Manutenção Baseada em Condições). Esta técnica tem como conceito primário o uso de transdutores para verificar a evolução dos valores da força de corte em tempo real. Com isso, é possível analisar o nível de desgaste dos elementos de corte e prever o

momento certo em que os mesmos devem ser reparados ou substituídos para que não ocorra a quebra total destes elementos.

Outros autores como Zehetner *et al.* (2021) também utilizaram instrumentação em seu estudo. Os sensores e o sistema de aquisição de dados foram ligados ao comando da máquina utilizada em seu trabalho. Este sistema coleta, analisa, processa e então envia os dados digitais para o CLP da máquina para que a mesma faça as devidas alterações e compensações em tempo real a fim de garantir a qualidade do produto produzido.

2.10.1 Extensômetros

Extensômetro pode ser definido como um dispositivo de medição da deformação relativa resultante de uma tensão mecânica aplicada a um determinado material. Os extensômetros são utilizados tanto na medição das deformações em componentes como também em estruturas completas. Através da colagem de extensores nas estruturas, a deformação relativa da mesma é convertida em um sinal elétrico (tensão elétrica). A aplicação de extensores em estruturas permite o levantamento dos dados necessários sem a danificação ou destruição da mesma permitindo assim uma análise qualitativa e quantitativa das deformações sob condições reais de aplicação (DOEBELIN, 2003 e RIZAL *et al.*, 2014).

Segundo Hoffmann (2012b), o extensômetro de resistência elétrica é baseado na segunda lei de Ohm que afirma que um condutor, ao sofrer uma deformação, tem sua resistência elétrica alterada. De acordo com a segunda lei de Ohm, a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional com o comprimento do mesmo e inversamente proporcional a sua área da seção transversal, além de variar com o material com que ele é fabricado. A Equação 8 apresenta a expressão que representa a segunda Lei de Ohm (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{a} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde: R é a resistência elétrica do condutor [Ω];

ρ é a resistividade ou resistência específica do material do condutor [$\Omega \cdot \text{m}$];

l é o comprimento do condutor [m];

a é a área da seção transversal do condutor [m²].

Porém, o que mais interessa saber não é a diferença de resistência elétrica que um filamento apresenta quando está deformado ou em seu estado de repouso, mas sim, o valor de deformação relativa que o extensômetro sofreu. Para isso, utiliza-se um coeficiente de conversão denominado de fator K do *Strain Gauge*. O fator K ou fator de sensibilidade relativa (como também é conhecido) de um extensômetro correlaciona a variação relativa da resistência elétrica com o valor de deformação sofrida pelo filamento e pode ser descrito pela Equação 9.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (\text{Eq. 9})$$

2.10.1.1 Composição dos Extensômetros

Um extensômetro é composto por um material base e uma lâmina resistiva. A grade de medição de um extensômetro de lâmina resistiva por exemplo, geralmente é manufaturada pela técnica de circuito impresso desenvolvida por Paul Eisler em 1952 (British Patent, 1955).

A Figura 16 apresenta, de forma esquemática, um extensômetro uniaxial típico. Nesta figura pode ser analisado a presença do material base (a), da grade de medição (b) e dos conectores (c). *Strain Gauges* usualmente são construídos para que se obtenham uma resistência nominal de 120 Ω em uma pequena área. Entretanto com os avanços nas aplicações dos extensômetros é cada vez mais comum encontrar *Strain Gauges* com resistência elétrica equivalente a 350 Ω, 500 Ω, 700 Ω e 1000 Ω (SARANGI; MURTHY; CHAKRABORTY, 2012).

Outra característica importante na fabricação dos extensômetros é que nos dias atuais, os fabricantes destes sensores estão cada vez mais preocupados com os efeitos que a temperatura exerce na leitura dos resultados adquiridos. Para Haremza, Santiago e Silva (2013), *Strain Gauges*, por se tratarem de elementos extremamente sensíveis podem apresentar deformações devido a ação da temperatura nos mesmos. Para isso os dispositivos comercializados atualmente já são fabricados destinando-se ao uso em diferentes materiais. Nestes casos, os coeficientes de dilatação térmica de

cada material são conhecidos e auto-compensados pelo próprio extensômetro, sem alterações visuais e/ou de construção dos mesmos.

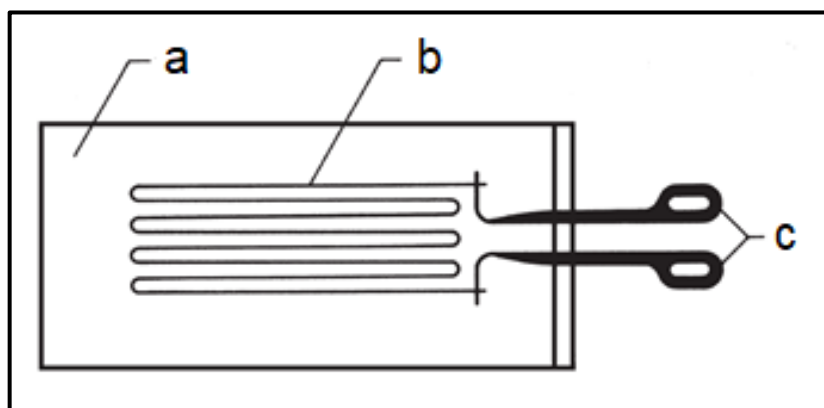


Figura 16 - Principais constituintes de um extensômetro. Hoffmann (2012a).

Os extensômetros para uso geral geralmente são fabricados a partir de ligas de Cu-Ni em bases poliméricas onde são gravadas as configurações desejadas e possuem base de *phester*, poliamida ou de papel.

2.10.1.2 Tipos de Extensômetros

Atualmente existem diversos modelos diferentes de extensômetros disponíveis no mercado. Hoffman (2012a), Zhang *et al.* (2015) e Ramos *et al.* (2015), afirmam que os extensômetros podem geralmente ser classificados de acordo com:

- a) o tipo de material resistivo: fios resistivos, lâmina, semicondutor, por deposição, capacitivos piezoelétricos, fotoelásticos e mecânicos;
- b) o tipo de material base: papel, baquelita, poliéster, poliamida, ou de algum outro material especial de acordo com a finalidade;
- c) a configuração: uniaxiais, biaxiais, multiaxiais ou rosetas ou algum outro padrão especial de acordo com a finalidade.

Quanto a configuração dos extensômetros, os mesmos podem se apresentar de diversos formatos. Cada formato é destinado a uma aplicação específica. Os extensômetros uniaxiais medem os valores de deformação relativa apenas em uma direção enquanto os biaxiais medem as deformações em duas direções

perpendiculares entre elas. Os *Strain Gauges* do tipo roseta são amplamente utilizados para a verificação das deformações em todos os sentidos ou quando as direções das deformações no componente ou estrutura de análise não são conhecidas.

2.10.1.3 Seleção de Extensômetros

Alguns cuidados precisam ser tomados durante a seleção dos extensômetros devido a ampla variedade de especificações para as mais variadas aplicações. De maneira geral, a seleção de um *Strain Gauge* se dá a partir de um código de letras e números no qual apresenta as principais informações a respeito do produto escolhido. Segundo Hoffmann (2012a), dados sobre as condições de medição, material no qual será feita a análise e o objetivo da análise são os que embasam a correta seleção de um extensômetro. Porém existem algumas outras informações que servem como filtros para uma escolha assertiva de um *Strain Gauge*, como por exemplo:

- a) faixa de temperaturas em que o extensômetro estará exposto durante as análises;
- b) limite de alongamento máximo suportado pelo extensômetro;
- c) corrente elétrica máxima suportada pelo extensômetro;
- d) resistência a umidade do extensômetro;
- e) durabilidade necessária do *Strain Gauge* e suas conexões.

A identificação por código, geralmente fornece as informações necessárias sobre o *Strain Gauge* e seu uso. Cada fabricante de extensômetros tem uma maneira diferente de codificar as características importantes dos seus produtos. Geralmente, uma identificação trás informações referentes ao material da base e do filme metálico, sobre a auto-compensação da temperatura, sobre o comprimento efetivo (dada em mm ou em milésimo de polegadas), do formato da grade, da resistência elétrica (em Ω) e algum outro opcional do *Strain Gauge* (como tipo de conectores, por exemplo).

Quando o extensômetro é exigido em uma condição estática, a seleção deve ser feita levando-se em consideração o material que será ensaiado. Em medições dinâmicas o *Strain Gauge* deve apresentar uma alta resistência a fadiga devido às

variações repetitivas e cíclicas das grandezas avaliadas. O alongamento usual dos extensômetros é de no máximo 2%, entretanto existem elementos que podem apresentar limites maiores do que este e que podem ser selecionados para o uso em alguns casos mais específicos (KORKMAZ *et al.*, 2014).

2.10.2 Sistemas de medição com extensômetros

Segundo Sarangi, Murthy e Chakraborty (2012), as deformações que ocorrem em um componente ou estrutura no qual está sendo feita análise extensiométrica, é medida pelo *Strain Gauge* em conjunto com um sistema de medição. Entretanto, as respostas entregues por estes equipamentos não são diretamente avaliáveis (em forma de gráficos, tabelas ou relatórios, por exemplo). É necessário um conjunto de aparelhos que transformarão as deformações sentidas pelo extensômetro em um sinal elétrico. As deformações que um *Strain Gauge* experimenta são geralmente pequenas, o que produz variações do sinal elétrico na mesma proporção, não podendo ser diretamente medida por um osciloscópio ou um voltímetro, por exemplo.

Sistemas de medição podem ser descritos como ferramentas que são capazes de quantificar fenômenos da natureza como: temperatura, força, escoamento de fluídos, composições químicas entre outros (PINKAEW; ASNACHINDA, 2006) e (KORKMAZ *et al.*, 2014).

Dentro da grande área da extensometria, para a análise de tensões e forças, o sistema de medição utilizado é dado basicamente pelos sensores de deformação, que são os extensômetros de resistência variável que convertem deformação mecânica em variação de resistência elétrica. Por se tratarem de variações extremamente pequenas usa-se um circuito especial chamado de ponte de Wheatstone.

Segundo Hoffmann (2012a), Sir Charles Wheatstone (1802-1875) foi um cientista inglês que apresentou ao mundo um circuito que era capaz de medir, com precisão, pequenas variações de resistência elétrica, além de ser capaz de determinar o valor absoluto de resistência em relação a uma resistência de valor já conhecida. Este circuito é conhecido até hoje como ponte de Wheatstone. Este é o circuito mais frequentemente utilizado por apresentar a precisão necessária na medição de

pequenas variações de resistência dos extensômetros (POUSSIER; RABAH; WEBER, 2004).

A Figura 17 apresenta de forma esquemática dois tipos diferentes de representação da Ponte de Wheatstone. Os quatro braços ou ramos da ponte são formados pelas resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . Os pontos de conexão 2 e 3 da ponte indicam as conexões para a tensão de excitação da ponte V_S , enquanto os conectores 1 e 4 são as conexões onde a tensão de saída é medida (V_O). A excitação da ponte geralmente é dada por uma tensão aplicada que é por sua vez estabilizada podendo ser direta ou alternada.

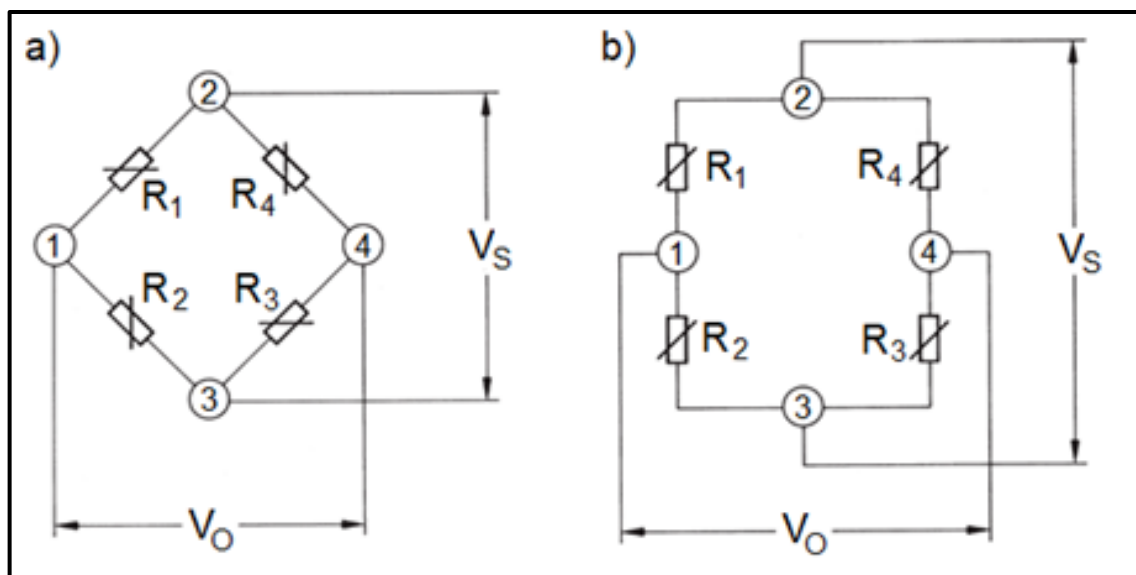


Figura 17 - Ponte de Wheatstone. Fonte: Hoffmann (2012a).

Se entre os conectores 2 e 3 for aplicado uma diferença de potencial (DDP) esta tensão será fracionada entre a metade esquerda da ponte (representada pelos resistores R_1 e R_2) e a metade direita da ponte (resistores R_3 e R_4), com uma relação direta com os valores de cada resistor. Diz-se que a ponte está em equilíbrio quando a metade esquerda e direita da mesma representam valores iguais de resistência elétrica equivalente, como pode ser descrito pela Equação 10. Nesta condição o valor da tensão de saída V_O será zero.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{Eq. 10})$$

Diferenças nos valores de resistência elétrica entre o lado esquerdo e direito da ponte causará o desbalanceamento da mesma e como consequência haverá uma diferença de tensão de saída (V_O) que pode ser calculada através da Equação 11.

$$V_O = V_S \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

Depois de algumas deduções e simplificações matemáticas de alguns termos que possuem valores insignificantes para este tipo de análise e deixando as incógnitas de tensão para o lado esquerdo da fórmula matemática, é possível expressar a equação que define o valor de da tensão de saída da ponte de Wheatstone (V_O) como sendo igual ao que é apresentado na Equação 12.

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

A Equação 13 apresenta a correlação que a diferença das tensões elétricas de entrada e de saída da Ponte de Wheatstone em função do Fator K do *Strain Gauge* e das deformações sofridas por cada um dos extensômetros presentes no circuito.

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{Eq. 13})$$

2.10.3 Técnicas de Medição

A Equação 13, apresentada na seção anterior, assume que na ponte de Wheatstone todos os resistores sofrem uma dada deformação relativa (ε) e por consequência disso, variam sua resistência elétrica em ΔR . Isso geralmente acontece em transdutores ou em alguns objetos de testes e ensaios que tenham uma função semelhante. Entretanto, em testes experimentais isso não acontece com tanta frequência, onde somente alguns dos braços da ponte estão equipados com *Strain Gauges* ativos. Em um circuito do tipo ponte de Wheatstone os resistores que não participam de forma ativa medindo as deformações são chamados de resistores de complemento da ponte. Para estes casos é comum o uso de termos como ponte de um quarto, meia ponte, quarto duplo (ou ponte diagonal) e ponte completa. Estas

configurações estão sendo apresentadas de forma esquemática pela Figura 18 onde em a) está sendo representado a configuração de um quarto de ponte, em b) a meia ponte, em c) a ponte diagonal e em d) a ponte completa.

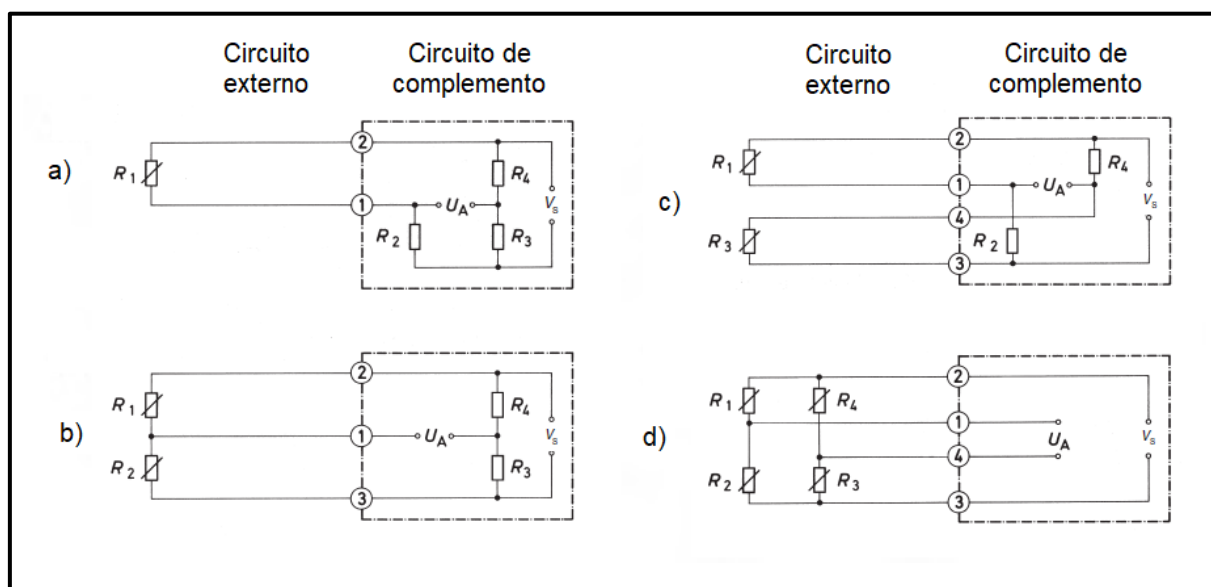


Figura 18 - Configurações da Ponte de Wheatstone. Hoffmann (2012a).

Os resistores fixos, ou seja, aqueles que não estão fazendo as medições das deformações no componente de análise, fazem parte de um sistema de *hardware* denominado de sistema de aquisição de dados ou DAQ (*Data Acquisition System*). Diversos fabricantes comercializam sistemas de aquisição de dados, que além de possuir toda a parte de controle de resistências, também são responsáveis por transformar os sinais de medição das grandezas físicas em sinais digitais para que assim, possam ser manipulados por sistemas computacionais. Desta forma, os DAQ's atuam como uma interface entre o mundo físico e o digital (HOFFMANN, 2012a).

Certamente, os sistemas de aquisição de dados podem ser utilizados em conjunto com diversos tipos de sensores. Quando utilizados na extensometria, estes dispositivos fazem a leitura da tensão (em mV) causada pelo desbalanceamento da ponte de Wheatstone no qual estão inseridos os *Strain Gauges* e processam estas informações. Os dados de saída, que serão sinais digitais podem ser utilizados para transformação em grandezas como deformação, tensão, torque, força, entre outras. A Figura 19 apresenta de maneira esquemática um diagrama de um sistema de medição de deformação que utiliza *Strain Gauges*.

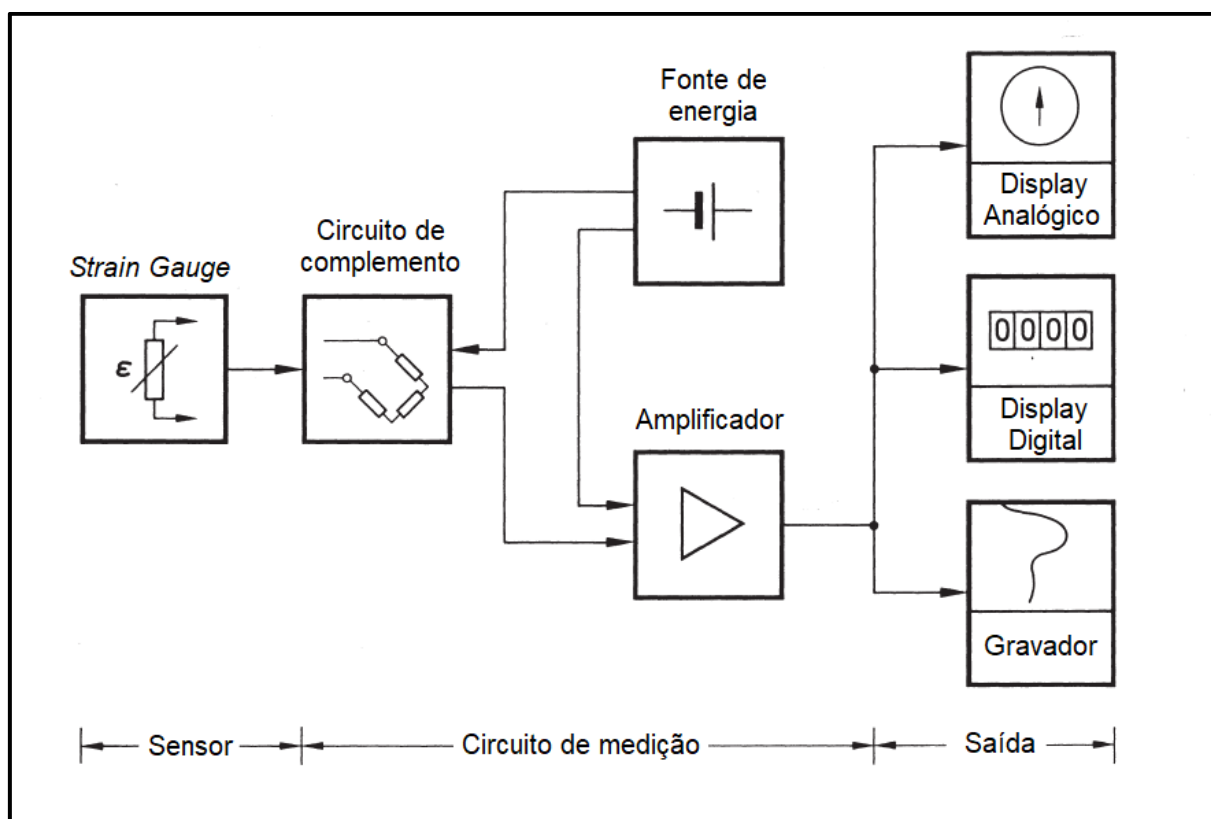


Figura 19 - Diagrama de um sistema de medição com *Strain Gauges*. Hoffmann (2012a).

2.10.4 Calibração do circuito

Segundo a ISO 376, a calibração nada mais é do que a aplicação precisa de uma carga conhecida em um transdutor de força no qual os dados mensurados são registrados, onde o mesmo é parte integrante do instrumento que está sendo medido. Segundo Hoffmann (2012a), a precisão da calibração de um equipamento está diretamente relacionada com a precisão das cargas usadas na calibração.

A calibração visa uma faixa de medidas que seja capaz de mensurar o que se pretende medir, além de indicar o valor real da carga em todas as condições de seu uso. O objetivo de um sistema de calibração não é medir as cargas normalizadas e sim mensurar a capacidade de medição a partir destas cargas. Segundo Miller (2002), sempre haverá incertezas ou uma quantidade desconhecida de erros relativos de calibração.

Para que seja possível atribuir estas incertezas, deve-se atentar para o equipamento e para o processo de medição que está sendo utilizado. Miller (2002)

ainda afirma que possuem algumas fontes de incertezas que devem ser consideradas em um processo de calibração, como:

- a) a incerteza ou a tolerância da carga que está sendo aplicada;
- b) a repetibilidade que o sistema apresenta como um todo;
- c) o nível de legibilidade do sistema;
- d) a capacidade que o sistema de medição tem em ser reproduzidos em outros sistemas;
- e) desvios devido a alterações de temperatura;
- f) erro no posicionamento da carga ;
- g) ruídos e interferências elétricas;
- h) vibrações mecânicas.

2.10.5 Transdutores

Segundo Hoffmann (2012a), não é necessário um número alto de tipos diferentes de transdutores, entretanto os projetos destes dispositivos devem estar voltados a atender os elevados graus de precisão dimensional dos mesmos.

Dentre os mais variados tipos de transdutores pode-se destacar os medidores de peso e/ou força que também são conhecidos como células de carga. O conceito de célula de carga nada mais é do que um elemento (geralmente fabricado em aço pelo fato de ser resistente porém apresentando uma elasticidade adequada) de medição onde são fixados *Strain Gauges*. Os extensômetros colados a este elemento elástico estão dispostos e ligados seguindo o conceito da ponte completa de Wheatstone.

Devido a simetria e o formato simples de ser manufaturado com precisão, toma-se como base uma geometria cilíndrica de aço que é alongada ou contraída devido a ação direta de uma força externa. Quando submetido a um esforço trativo, esse corpo cilíndrico de aço tende a um aumento de seu comprimento e uma redução do seu diâmetro (Lei de Poisson). O volume de material de um transdutor é diretamente proporcional com a capacidade de suportar as forças impostas a ele, ou seja, para forças nominais altas, as células de cargas são maiores em comparação com a fabricação de transdutores para medição de cargas nominais mais baixas

(HBM, 2019). Um transdutor de força com estas características foi utilizado no estudo de Niessner e Liewald (2020) e será utilizado com base para a fabricação da célula de carga proposta para a medição das forças de corte deste trabalho.

2.11 LUBRIFICAÇÃO NO PROCESSO DE CORTE POR CISALHAMENTO

Os processos de corte por cisalhamento são caracterizados por apresentarem características tribológicas bastante severas. Isso se dá pelo fato de que neste tipo de processo de fabricação existe a criação de novas superfícies. Estas novas superfícies de contato, aliadas as altas forças do processo, possuem alta propensão de se aderirem ao material do punção de corte, ocasionando o desgaste do mesmo. Desta forma, alguns meios lubrificantes são empregados aos processos de corte com a finalidade de diminuir ou eliminar os desvios de processo ocasionados por estes desgastes (MOGHADAM *et al.*, 2020).

Os lubrificantes utilizados em processos de corte, além de suportar as altas pressões e temperaturas geradas durante o processo, devem ser ecologicamente corretos. Lind *et al.* (2010) afirmam em seu estudo que os três principais mecanismos de desgaste presentes nos processos de corte são o desgaste abrasivo, adesivo e o crescimento das junções de fricção. Moghadam *et al.* (2020) ainda afirmam que a falta ou a ineficiência de lubrificação ocasiona problemas na qualidade superficial e dimensional da superfície cortada.

Além de reduzir o desgaste do ferramental de corte, alguns estudos correlacionam o uso de lubrificantes com a alteração das forças de corte e de extração (retorno do punção). No estudo de Kitamura *et al.* (2016) a eficiência dos lubrificantes utilizados foi testada medindo-se a força de retorno do punção. Ao final do estudo, os autores concluíram que o uso de lubrificação no processo auxiliou na diminuição dos valores da força depois de um longo período de testes. De maneira geral, a alteração dos valores da força ocorre muito mais pela influência que os lubrificantes têm na prevenção do desgaste do que no processo em si. Olsson, Bay e Andreasen (2002) afirmam que a adesão do material da chapa metálica cortada tende a aumentar proporcionalmente com o número de ciclos. Neste estudo, os autores afirmam que a nova superfície gerada pela operação de corte é altamente reativa com o material da superfície do punção. Esta reação faz com que o material da peça se agarre ao

material do punção progressivamente. Este efeito causa um desgaste no punção que, conseqüentemente, resulta em um aumento nos valores de força. Com o uso de chapas mais espessas Aravind, Chakkingal e Venugopal (2020) indicam o uso de lubrificantes com maior viscosidade. Isso se dá pelo fato de que as forças de corte envolvidas no processo são relativamente mais elevadas em comparação com o uso de uma chapa de maior espessura, conseqüentemente aumentando as tensões de contato. O uso de um lubrificante de maior densidade evita que o mesmo seja expelido para fora da interface de contato ferramenta x peça.

Muitos estudos foram realizados avaliando o uso de lubrificação em relação às forças de extração do punção. Este trabalho visa apresentar o resultado do uso de um lubrificante no processo quanto aos valores da força de corte. Desta forma os resultados obtidos são de extrema importância para verificação deste parâmetro frente ao processo proposto.

Através de ensaios de força, Olsson, Bay e Andreasen (2002) afirmam que o uso de um lubrificante clorado tem maior eficiência quanto a redução do nível de adesão no punção em comparação com óleos minerais conseqüentemente reduzindo a força de extração do punção.

Além de representarem uma fração considerável no custo de fabricação, a maioria dos autores que abordam este tema sugerem o não uso de lubrificação no processo de corte por cisalhamento. Segundo Moghadam (2019) as questões ambientais envolvendo lubrificantes nos processos de estampagem se dividem em três grupos principais:

- a) saúde e segurança das pessoas;
- b) influências em equipamentos e construções;
- c) descarte dos resíduos.

Desta maneira, deve ser considerado todos os prós e contras do uso de lubrificação para a tomada de decisão de seu uso nos processos de corte (MOGHADAM, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento dos testes de corte por cisalhamento propostos neste estudo. As seções deste capítulo abordarão o ferramental utilizado para os testes, as geometrias dos corpos de prova, a geometria dos elementos de corte, os instrumentos e equipamentos de medição e a máquina utilizadas nos ensaios práticos.

3.1 MATÉRIA PRIMA DO ESTUDO

Este tópico apresenta as principais características do material de estudo escolhido. Desta forma, nesta seção, serão apresentadas as características gerais da matéria prima selecionada para realização dos testes. Para uma maior exatidão dos valores das propriedades mecânicas, optou-se por realizar a caracterização do material escolhido. Os resultados desta caracterização serão apresentados em uma seção específica no próximo capítulo, que tratará das análises experimentais do ensaio.

3.1.1 Geometria dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios propostos neste estudo têm geometria externa quadrada com medida de 50 mm como apresentado na Figura 20.

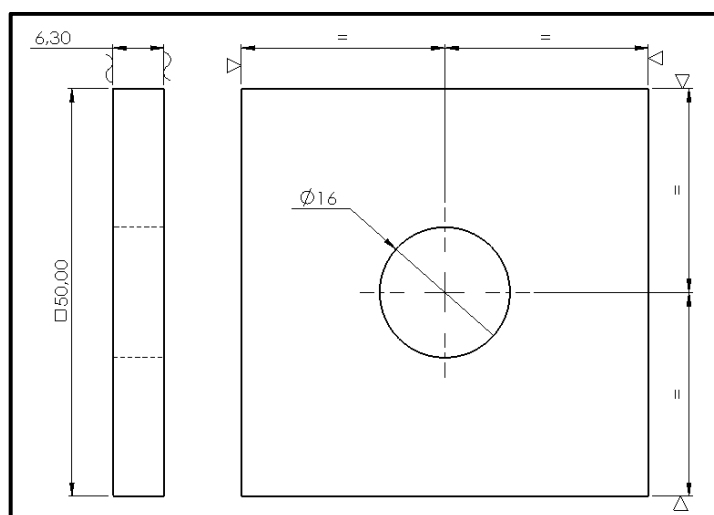


Figura 20 - Geometria dos corpos de prova dos ensaios.

Como comentado anteriormente, a chapa tem espessura de 6,3 mm e a operação de corte por cisalhamento irá realizar uma furação de diâmetro de 16 mm no centro da peça. Para maior precisão das análises posteriores e também a fim de garantir o encaixe justo dos corpos de prova nos assentamentos da ferramenta, os corpos de prova tiveram as medidas de comprimento e largura externas usinadas antes da realização dos ensaios.

3.1.2 Generalidades sobre o material de estudo

O material selecionado para a realização dos testes recebe o nome comercial STRENGTH® 700MC. A linha STRENGTH® é uma classe de aço fabricada pela empresa siderúrgica sueca SSAB. A SSAB tem sua sede em Estocolmo desde 1978 e atua com um portfólio de produtos em aço de alta resistência sendo líder mundial em seu campo de atuação. A linha STRENGTH®, trata-se de aços estruturais geralmente fornecidos a partir do processo de laminação a quente para espessuras de 2 até 12 mm e laminação a frio para espessuras variando de 0,7 a 2,1 mm. Os aços da linha STRENGTH® podem atingir até 1100 MPa de tensão de escoamento mínimo.

O STRENGTH® 700MC é um aço HSLA estrutural laminado a quente para conformação a frio, que possui um limite de escoamento mínimo de 700 MPa que pode ser fornecido em forma de bobinas e chapas. Este aço supera os requisitos do grau S700MC da norma inglesa BS EN 10149-2 (BS, 2013). A SSAB fornece este aço, em específico, com espessuras podendo variar de 2 até 10 mm (SSAB, 2017). O STRENGTH® 700MC atende ou supera algumas normas de qualidade sendo as principais, estando descritas na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 - Normas atendidas pelo aço STRENGTH® 700 MC

STRENGTH® 700 MC	Espessura	EN 10 051
	Comprimento e largura	
	Formato	
	Planicidade	
	Propriedade de superfície	EN 10 163-2, Classe A, Subclasse 3

Fonte: Adaptado de SSAB (2017).

Devido aos seus valores significativos de limite de escoamento (R_e) e do Limite de Resistência à Tração (R_m), o STRENGTH[®] 700 MC se enquadra na classe dos aços de alta resistência mecânica. Pela composição química, pode-se concluir que este material se trata de um HSLA pois os teores de elementos de liga são relativamente baixos (GORITSKII; SHNEIDEROV; GUSEVA, 2018).

O material selecionado possui um valor de tensão de escoamento mínima (R_e) de 700 MPa e por conta da espessura (6,3 mm para o material escolhido) trata-se de um aço laminado a quente. No *Datasheet* deste material (ANEXO A) é possível ver que existe ainda uma faixa de valores em que a tensão máxima (R_m) pode variar. Para o material selecionado esta faixa varia de 750 a 950 MPa além de possuir um alongamento mínimo de 12%.

3.1.3 Composição e características químicas do material de estudo

As faixas aceitáveis de elementos de liga presentes na composição química do STRENGTH[®] 700 MC podem ser extraídas diretamente do *Datasheet* do material no *site* da SSAB. A Tabela 4 apresenta os teores de elementos químicos que formam este aço. A análise apresentada abaixo é feita ainda no cadinho e o fornecedor ainda afirma que o somatório de outros elementos de liga como Cromo, Níquel, Molibdênio e Vanádio não devem ultrapassar 0,22%.

Tabela 4 - Composição química do STRENGTH[®] 700 MC.

C (máx %)	Si (máx %)	Mn (máx %)	P (máx %)	S (máx %)	Al (máx %)	Nb (máx %)	V (máx %)	Ti (máx %)
0,12	0,21	2,10	0,020	0,010	0,1	0,09	0,20	0,15

Fonte: SSAB (2017).

O ANEXO B apresenta o certificado de qualidade da chapa (disponibilizado pelo fornecedor SSAB[®]) que foi utilizada na caracterização do material. A mesma chapa foi utilizada para corte dos corpos de prova utilizados nos procedimentos práticos propostos neste trabalho.

Análises metalográficas foram realizadas com o intuito de verificar a microestrutura do material. Estas análises foram realizadas utilizando um estereoscópio trinocular Observer D1-m da marca Zeiss. O procedimento adotado

para a preparação e execução da análise metalográfica estão sendo apresentadas no capítulo seguinte, na seção de caracterização da matéria prima de ensaios.

3.1.4 Materiais e procedimentos para caracterização do material de estudo

Como comentado anteriormente, foram realizados ensaios de tração para levantamento do comportamento mecânico do material de teste. Estes ensaios foram realizados segundo norma ASTM E8/E8M em uma máquina universal de ensaios EMIC® DL-20000. As dimensões dos corpos de prova estão descritas na Figura 21.

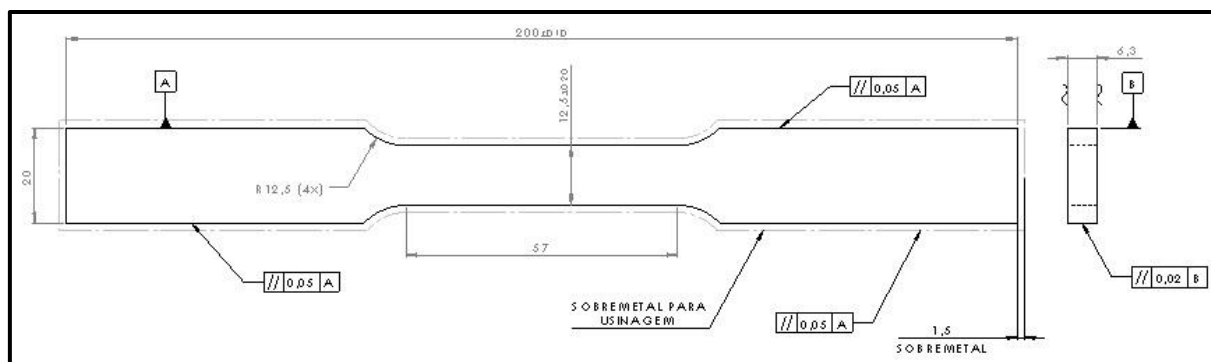


Figura 21 - Geometria dos corpos de prova para ensaio de tração.

Como complemento aos ensaios de tração realizados para caracterização mecânica do material de estudo, também foram realizados ensaios de dureza do mesmo. As medições foram realizadas utilizando-se de um Durômetro Rockwell da marca TESTOR modelo TS. Os procedimentos para realização das medições atenderam os requisitos da norma NBR NM ISO 6508-1:2008.

3.2 MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS

Para a realização dos testes práticos foi utilizado uma prensa hidráulica com capacidade máxima de força de 1200 kN. A máquina é do modelo HDH da marca Hidrodinâmica® e tem uma estrutura em “H” com um cilindro central aplicando a força hidráulica no cabeçote superior da máquina, que por sua vez, é guiado por quatro colunas nos cantos. A bomba hidráulica utilizada nesta máquina possui uma potência de 18,4 kW e pode chegar a uma pressão de 20000 kPa. O curso máximo do cilindro

hidráulico da máquina é de 500 mm. A velocidade da máquina varia de forma inversamente proporcional aos valores de força aplicados e para este estudo foi fixada em 8 mm/s. A prensa utilizada na realização dos testes é uma máquina de produção e encontra-se instalada no campo fabril da empresa Máquinas Sanmartin Ltda. A Figura 22 mostra uma fotografia da máquina utilizada nos testes práticos.



Figura 22 - Máquina utilizada para realização dos ensaios práticos.

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a avaliação do aspecto dimensional dos furos cortados em cada situação foi utilizado um micrômetro analógico interno de três pontas com faixa de medição de 16 mm até 20 mm da marca MITUTOYO®. Este instrumento de medição tem uma resolução de medição de 0,005 mm. Para auxiliar na medição dos corpos de prova

também foi utilizado um paquímetro digital modelo Absolute AOS Digimatic também da marca MITUTOYO®. O paquímetro possui um visor digital e tem resolução de 0,01 mm. A fotografia dos instrumentos utilizados neste estudo está sendo apresentada na Figura 23.



Figura 23 - Instrumentos de medição utilizados no estudo.

3.4 FERRAMENTAL

Para realização dos testes propostos neste estudo, foi criada uma ferramenta instrumentada para coletar os dados necessários para as análises. Para a concepção desta ferramenta, foi levado em consideração o que diversos autores indicam. Balakrishnan e Issac (2014) e SUCHY (1998) apresentam em suas literaturas diversos parâmetros a serem considerados no projeto dos componentes essenciais que uma ferramenta de corte por cisalhamento deve possuir.

A ferramenta possui uma célula de carga que foi instalada imediatamente acima do punção para levantamento dos valores de força que este elemento cortante é submetido durante o processo. Na lateral da ferramenta foi instalado um transdutor linear de posição com o intuito de coletar os valores de deslocamento vertical da ferramenta ao longo do processo de corte.

A ferramenta foi fabricada com diferentes materiais para que os requisitos de projeto quanto ao dimensional do corte e a durabilidade da ferramenta fossem garantidos. Os componentes fabricados em aço foram submetidos ao processo de oxidação negra para auxiliar na proteção contra a corrosão. As peças móveis (buchas

e colunas guia) foram lubrificadas com um óleo vegetal específico para barramentos de máquinas. Este lubrificante possui um grau de viscosidade 68 e possui aditivos de alta pressão, anti-desgaste e agentes anti-adesivos.

A Figura 24 apresenta o modelo tridimensional do projeto da ferramenta. Nesta imagem é possível visualizar as vistas frontal, lateral direita e isométrica da ferramenta. O APÊNDICE A apresenta uma vista de corte da ferramenta, onde pode ser analisado com mais detalhes os componentes da ferramenta.

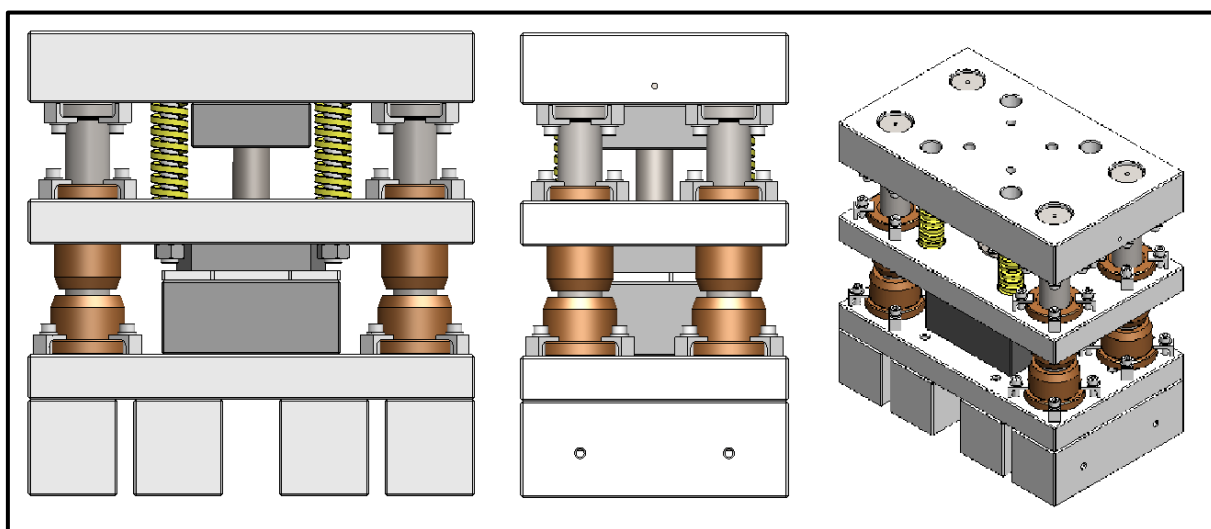


Figura 24 - Montagem esquemática da ferramenta de ensaios.

3.4.1 Estrutura da ferramenta

A montagem final da ferramenta construída para a realização dos testes propostos neste estudo, pode ser subdividida em três sub montagens. Estes três conjuntos serão denominados a partir daqui como: montagem inferior, intermediária e superior, como apresentado na Figura 25.

No conjunto inferior, encontram-se os calços que têm como função principal a de elevar a base inferior e proporcionar com que os retalhos tenham a saída facilitada. A base inferior da ferramenta tem como objetivo o de unir as buchas guias inferiores e também de distribuir a pressão ocasionada pela força de corte nos calços da ferramenta. As buchas guias inferiores servem como guia das colunas uma vez que a montagem destas peças é feita com ajuste deslizante. Ainda na montagem inferior, encontra-se todo o conjunto porta matriz que sustenta as matrizes de corte, além de

garantir o alinhamento do corpo de prova e a concentricidade entre o punção e a matriz.

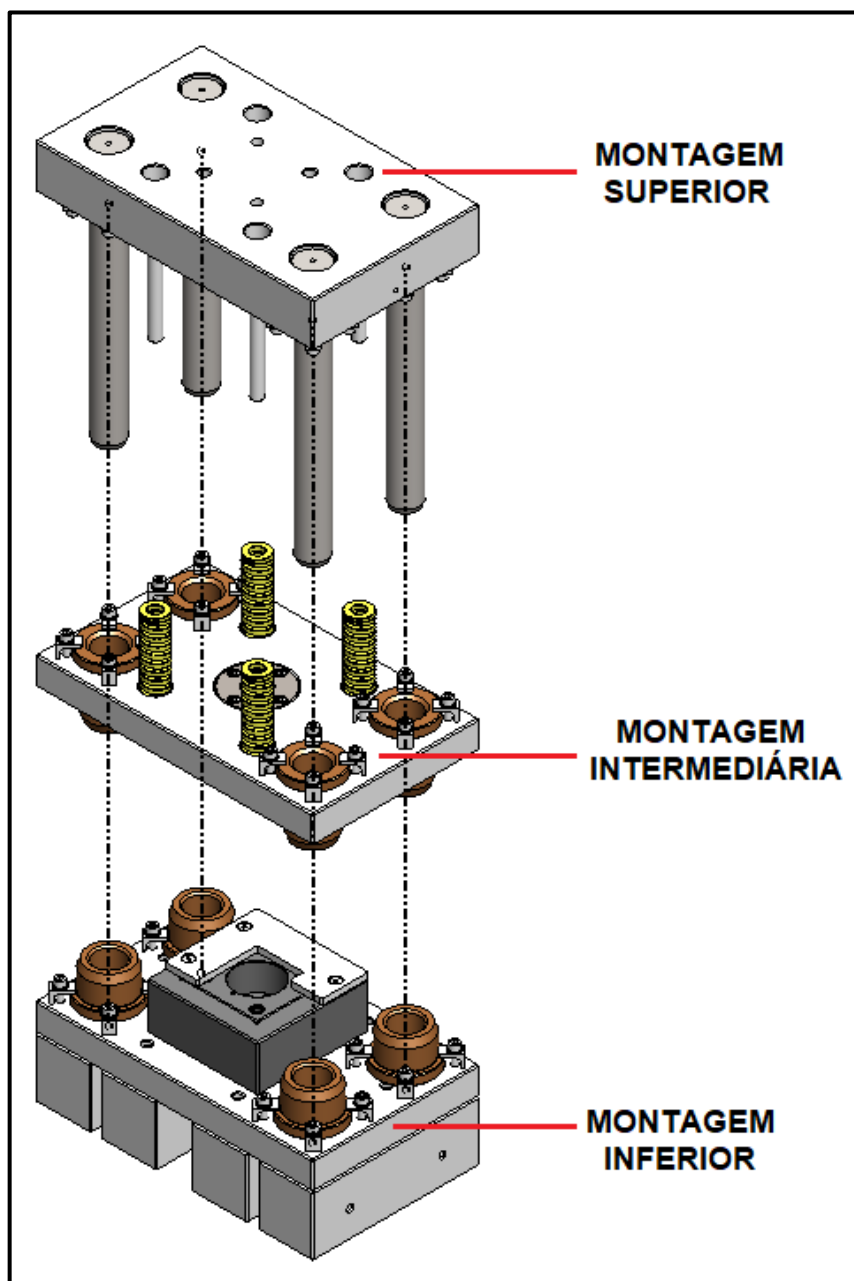


Figura 25 - Vista explodida ferramenta de ensaios.

Na montagem intermediária encontram-se a base intermediária que une as buchas guias intermediárias. Estas, por sua vez, servem para guiar a montagem intermediária com as colunas guia. No centro da base intermediária existe um guia para o punção que garante que o punção fique centralizado com a matriz no momento do corte. Na parte inferior desta montagem, encontra-se o prensa chapas que é o

componente que entra em contato com o corpo de prova e que pressiona o mesmo com o auxílio das molas de compressão, que também fazem parte da montagem intermediária.

Na montagem superior, a base superior é o que sustenta todos os componentes desta parte da ferramenta. As colunas estão fixadas a esta base superior e deslizam dentro das buchas intermediárias e inferiores, garantindo o alinhamento da ferramenta e o movimento relativo puramente vertical. Na parte inferior da montagem superior encontra-se o porta punção, que tem como objetivo suportar e alinhar o punção para que o mesmo fique concêntrico com a matriz no momento do corte.

3.4.2 Elementos de Corte

O presente tópico visa apresentar as características dos elementos de corte utilizados para a realização dos ensaios práticos propostos neste estudo. Como a operação proposta trata-se de um corte por cisalhamento de um furo (*punching*), o diâmetro de todos os punções é igual ao diâmetro nominal do furo, ou seja, $D_P = 16$ mm (com tolerância de $\pm 0,01$ mm). Desta forma, as folgas de corte serão acrescidas ao diâmetro das matrizes (D_M).

A matéria prima utilizada para a fabricação dos elementos de corte foi o AISI D6. Este material foi escolhido principalmente pela sua característica de indeformabilidade pós têmpera e por ser um material que apresenta alta resistência ao desgaste quando submetidos a trabalhos à frio. Um material da mesma classe foi utilizado na fabricação dos elementos de corte no estudo realizado por Zeidi *et al.* (2020).

Alguns cuidados foram tomados na fabricação dos punções e das matrizes de corte. Após todos os punções e matrizes de corte serem usinados, os mesmos foram submetidos a tratamentos térmicos de têmpera e posteriormente foram revenidos para alívio das tensões. Após os tratamentos térmicos, todos os elementos de corte foram retificados nas medidas e tolerâncias estipuladas nos projetos das ferramentas.

Para o projeto e detalhamento dos punções de corte foram utilizadas algumas indicações bibliográficas de referência como Gürün, Göktaş e Göltaş (2016). Em seu estudo, os autores apresentam detalhes do que deve ser considerado para que os

elementos de corte funcionem de maneira correta e também para otimizar suas aplicações. Para facilitar a troca dos elementos de corte durante os testes práticos foi utilizado um sistema de troca rápida, tanto nos punções quanto nas matrizes de corte. Este sistema permite realizar a troca dos elementos de corte de maneira rápida e dinâmica e sem a necessidade de desmontagem de qualquer parte da ferramenta. O mecanismo basicamente se baseia em uma mola que empurra uma esfera de aço contra os elementos cortantes, mantendo os mesmos presos à estrutura da ferramenta. Um desenho esquemático da construção do sistema de troca rápida dos elementos de corte está sendo apresentado no ANEXO C.

O que muda entre os punções é a afiação. Com o intuito de verificar as características da região do corte e principalmente a influência da alteração nos valores da força de corte, serão utilizados punções com algumas configurações de afiação conforme o que Gürün, Göktaş e Güldaş (2016) indicam em seu estudo. A Figura 26 apresenta as geometrias de afiação que os punções utilizados neste trabalho possuem. O punção P₁ tem o plano de corte perpendicular ao eixo longitudinal do punção. Os punções P₂ e P₃ possuem afiação em um ângulo α unilateral que correspondem a 5° e 15°, respectivamente. Já P₄ possui afiação em dois planos inclinados a 10° do plano transversal do punção.

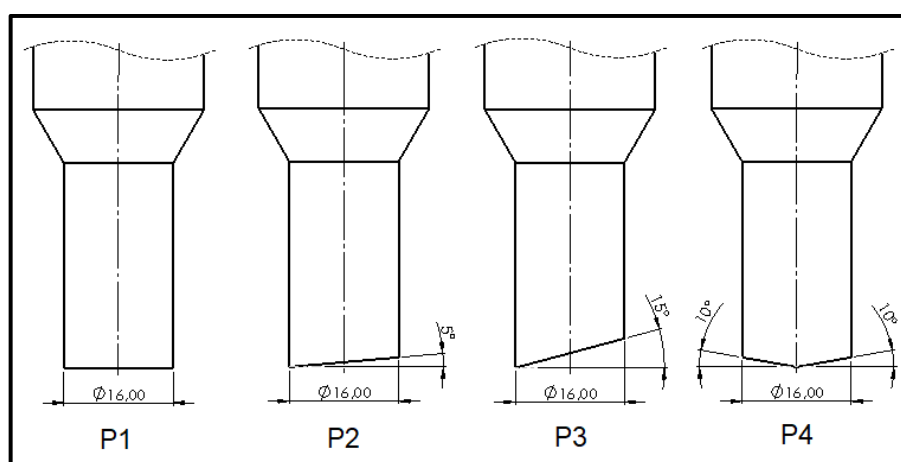
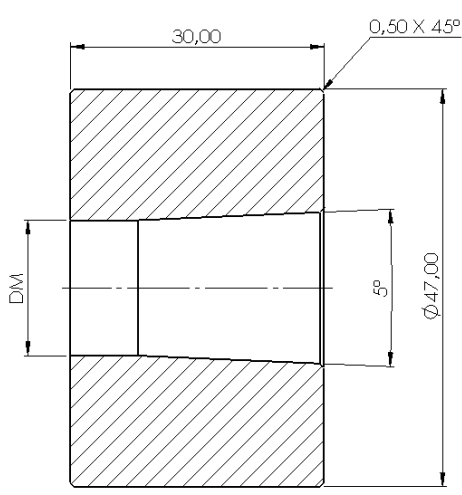


Figura 26 - Geometria dos punções de corte.

Já as matrizes de corte, conforme foi comentado anteriormente, tem suas variações dadas no diâmetro de seus furos, uma vez que, para a operação de *punching* a folga de corte é dada neste elemento de corte. O intuito das variações da folga de corte é analisar se há influência deste parâmetro na região de corte e nos

valores de força de corte (F_c). Substituindo a espessura e a τ_c do material utilizado na Equação 1 pelos valores de 6,3 mm e 834,3 MPa respectivamente, o valor da folga de corte é de 18,1%. Este valor representa um percentual muito além do que se pretende avaliar neste estudo, por isso, foi desconsiderado das análises. A literatura de referência sobre este tema afirma que valores elevados de folga de corte tendem a uma imprecisão dimensional. O estudo de SOARES, J. A. *et al.* (2013) foi utilizado como principal referência para escolha das folgas que serão utilizadas nos testes práticos propostos neste estudo. Desta forma, foi decidido pela utilização de folgas de corte menores a fim de maximizar a qualidade dimensional e da região do corte. Sendo assim, foram utilizadas folgas de corte que correspondem a, 3%, 6% e 10% da espessura (s) da chapa (que neste estudo é de 6,3 mm) e que a partir daqui serão denominadas de M_1 , M_2 e M_3 , respectivamente. A Tabela 5 apresenta os valores de folga utilizados neste trabalho.

Tabela 5 - Geometria das matrizes de corte.

Representação esquemática	Nome da Matriz	Folga de corte em relação à espessura (%)	Diâmetro do furo da matriz (mm)
 <p>SEÇÃO A-A</p>	M_1	3%	$D_{M1} = 16,38$
	M_2	6%	$D_{M2} = 16,76$
	M_3	10%	$D_{M3} = 17,26$

3.5 LUBRIFICANTE

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi avaliado os efeitos causados pelo uso de lubrificação no processo de corte por cisalhamento. Foram avaliados os aspectos dimensionais e de qualidade da região de corte, assim como os valores de força com e sem a utilização de um agente lubrificante no processo.

Foi utilizado o lubrificante Coat Lube ES/40 da QUIMINORT®. Este lubrificante possui base mineral e contém aditivos em sua composição que garantem uma alta lubricidade e resistência à alta pressão, características importantes para realização do processo de corte por cisalhamento. O lubrificante possui consistência pastosa, é solúvel em água, não é tóxico e nem inflamável. A Ficha Técnica com as principais informações do produto é apresentada no ANEXO D.

3.6 INSTRUMENTOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES DIMENSIONAIS

Para a realização das análises dimensionais dos corpos de prova após a realização dos ensaios práticos do processo de corte por cisalhamento propostos neste estudo foi utilizado um Projetor de Perfil Optiv Lite DCC 3020 da marca Hexagon Metrology®. Este equipamento possui a capacidade de realizar medições em um volume de trabalho de até 300 x 200 x 200 mm (comprimento, largura e altura) e possui uma resolução de medidas de 0,05 μm . Foi utilizado um aumento de 29x para a realização das medições do diâmetro da zona de cisalhamento e do diâmetro no final da zona de fratura. O *software* utilizado para a realização das medidas é o PC-DMIS Vision.

Também foi utilizado um estereoscópio trinocular modelo TNE-10B da marca Entex®. Este equipamento tem capacidade de ampliação de 7 a 45x e é utilizado em conjunto com o *software* para coleta das imagens o ScopePhoto 2.0.4. Foi utilizado um aumento de 7x para a realização das medições das alturas na zona de corte.

A Figura 27 apresenta uma imagem dos equipamentos utilizados para a realização das análises dimensionais dos corpos de prova ensaiados. Os equipamentos mencionados fazem parte do laboratório de ensaios mecânicos (LAMAEC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

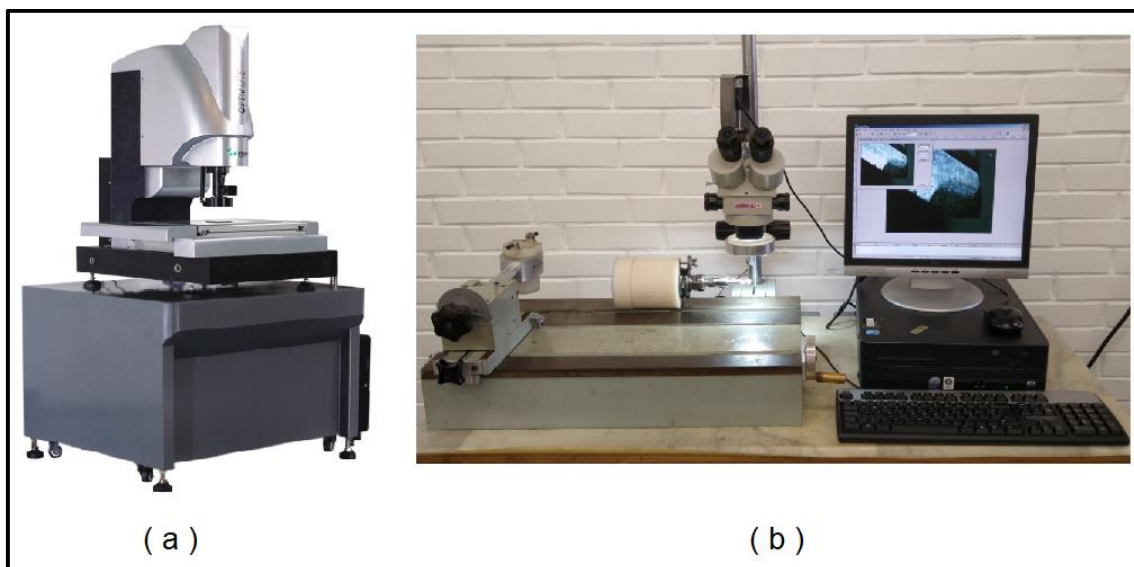


Figura 27 - Equipamentos utilizados para a análise dimensional. a) Projetor de perfil e b) Estereoscópio trinocular utilizado com o *software* ScopePhoto.

4 CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS

O presente tópico tem como objetivo apresentar os materiais utilizados para instrumentar a ferramenta de ensaios. A instrumentação da ferramenta pode ser dividida em duas características principais: a medição das forças durante o processo de corte e a medição do posicionamento vertical da ferramenta. Para isto, foram utilizados alguns métodos para transformar os fenômenos físicos em sinais elétricos capazes de serem avaliados e tratados computacionalmente através de um sistema de aquisição de dados. Este sistema de aquisição de dados recebe os sinais elétricos e os transformam em dados numéricos, que são utilizados para a análise e a criação de gráficos e tabelas que possibilitam a comparação entre os resultados obtidos em cada ensaio.

4.1 DADOS COLETADOS

Os dados coletados através dos sensores instalados na ferramenta desenvolvida para realização dos ensaios práticos propostos neste estudo, basicamente são o de força de corte e o de deslocamento vertical da ferramenta. Outra possibilidade é a de fazer o levantamento do tempo instantâneo de cada coleta destes valores. Desta forma, alguns comportamentos do processo podem ser obtidos facilmente.

Slavic *et al.* (2014) afirmam que o diagrama Força x Deslocamento é muito usado na investigação e na apresentação dos resultados de cortes por cisalhamento com diversas alterações de parâmetros. Esta análise pode ser feita diretamente ao combinar os dados obtidos da célula de carga e do transdutor linear de posição. Outras análises que podem ser facilmente feitas são de Força x Tempo e o de Deslocamento x Tempo, bem como a velocidade do processo, uma vez que as variações dos valores de deslocamento, força e tempo são conhecidos.

Klingenberg e Boer (2008) falam sobre a manutenção baseada em condições (CBM) que, nada mais é do que utilizar os dados extraídos a partir de uma análise dos parâmetros chaves do processo de corte, para tomar decisões para trocas de ferramenta. Em um lote grande de peças, existe uma tendência natural de desgaste dos elementos de corte e com isso, conseqüentemente o aumento da força de corte

do processo. Desta forma, o aumento da força de corte (medido por extensometria) devido ao desgaste do punção e/ou da matriz, até um valor limite pré-estabelecido (este valor pode ser obtido experimentalmente ou estimado através de simulações numéricas - FEM), pode ser um critério para substituição ou reparo dos elementos de corte.

4.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS DURANTE O PROCESSO DE CORTE

Para a medição da força de corte foi utilizado um transdutor de força uniaxial. Esta célula de carga, como um transdutor de força também é conhecido, foi inserida logo abaixo do punção de corte para que a força exercida por este elemento fosse diretamente transferida para o elemento sensor.

Para a confecção da célula de carga foi utilizado como matéria prima o aço AISI D6. Também foi optado por fazer a realização da caracterização deste material para se obterem os valores reais das propriedades mecânicas. Os detalhes desta caracterização bem como o procedimento utilizado para cálculo do projeto da célula de carga estão sendo apresentados nas seções seguintes.

Os extensômetros utilizados para fabricação da célula de carga são da marca HBM® e tem como referência o número de série 1-LY41-1.5/120. Estes elementos sensores são ditos como uniaxiais ou lineares, pois medem a deformação de um corpo apenas em um sentido. Estes extensômetros possuem integrados a eles uma base de soldagem acoplados e tem dimensões externas de comprimento e largura de 7 mm e 5 mm, respectivamente. A grade de medição possui 1,5 mm de comprimento e largura igual a 1,2 mm. A resistência nominal deste modelo de *Strain Gauge* é de 120Ω. O Fator K deste *Strain Gauge* é de 1,97 ($\pm 1,5\%$ de erro) e pode ser utilizado em temperaturas variando de -10°C até 45°C. O extensômetro 1-LY41-1.5/120 já compensa a variação de temperatura do aço (material de fabricação da célula de carga).

Para realizar a colagem dos *Strain Gauges* no corpo da célula de carga foi utilizado a supercola Z70, também da HBM. Esta cola trata-se de um adesivo específico para esta aplicação, onde o tempo de cura do mesmo ocorre em temperatura ambiente e por um tempo que pode variar de 1 a 10 minutos dependendo da temperatura ambiente do local de aplicação. A pressão do polegar já é suficiente

para realização da união do sensor ao corpo da célula de carga, o que torna o Z70 bastante prático para a aplicação proposta neste estudo.

4.2.1 Propriedades mecânicas do material da célula de carga

Para a fabricação da célula de carga, primeiramente foi feita a seleção da matéria prima. O material escolhido para a confecção do transdutor foi o AISI D6. Para a correta determinação das propriedades mecânicas deste material, optou-se por fazer a caracterização mecânica do mesmo. Foram fabricados dois corpos de prova para ensaio de tração, o primeiro sem nenhum tratamento térmico e outro tratado termicamente por têmpera e posteriormente revenido. O intuito de fazer estas duas análises é a de verificar se, a resistência mecânica do material sem tratamento térmico seria suficiente e também para verificar se o material tratado termicamente iria apresentar um alongamento aceitável antes da fratura. O APÊNDICE B apresenta o desenho técnico da geometria dos corpos de prova utilizados para a realização dos testes mecânicos do AISI D6.

Os corpos de prova para tração que sofreram tratamento térmico foram temperados com uma dureza que poderia variar de 40 a 42 HRC. Com esta dureza o material tende a apresentar os seus valores de resistência mecânica elevados, entretanto sem ser frágil o suficiente para não suportar deformações quando for submetido a um carregamento. O ANEXO E apresenta o certificado de qualidade disponibilizado pelo prestador de serviço de tratamento térmico. Neste relatório é possível ver que as amostras tratadas termicamente ficaram com os valores de dureza final dentro dos limites estipulados no projeto (entre 41 e 42 HRC).

Após os testes serem feitos, os resultados dos ensaios foram analisados e foram comparados entre si. Optou-se, então, pelo uso do material tratado termicamente, pois este apresentou um valor consideravelmente maior de tensão de escoamento em comparação com o material não tratado. Os corpos de prova temperados também apresentaram os valores de deformação aceitáveis para a aplicação em uma célula de carga. A partir dos dados fornecidos pelo laboratório que executou os testes de tração foi gerado o gráfico de $\sigma \times \epsilon$ do AISI D6 temperado. Este gráfico está sendo apresentado no APÊNDICE C.

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos no ensaio de tração do corpo de prova temperado para caracterização do material da célula de carga.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do material da célula de carga.

Material	E [GPa]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	Δ _L [%]
AISI D6 – Temperado e revenido	233,3	991,0	1088,2	2,9

4.2.2 Geometria da célula de carga

Para o dimensionamento do diâmetro do corpo da célula de carga, partiu-se pelo cálculo da força teórica máxima necessária para realização da operação de corte. Para isso foi utilizado a Equação 2 apresentada nas seções anteriores. Considerando que o diâmetro do furo a ser cortado é de 16 mm e a espessura da chapa é de 6,3 mm, pela Equação 3 tem-se que a área de corte (A_c) é igual a 316,67 mm². A Tabela 8 (apresentada no próximo capítulo) mostra que o valor de R_m do material de estudo é igual a 834,3 MPa. Desta maneira, substituindo esse valor na Equação 4 tem-se que o valor da Tensão de cisalhamento máxima (τ_c) para o material proposto é de 667,4 MPa. Substituindo os valores das Equações 3 e 4 na Equação 2, tem-se que o valor da força de corte (F_c) estimada para o processo de corte proposto é de aproximadamente 211346 N. Como coeficiente de segurança, foi utilizado um valor 30% maior do calculado. O valor que servirá para a análise e para os cálculos será de $F_c = 274750$ N.

Com a média dos valores das propriedades mecânicas do aço AISI D6 temperado partiu-se para a determinação e projeto da geometria da célula de carga. Pela simplicidade de construção, optou-se por fabricar uma célula de carga de geometria circular. Os dados obtidos através dos ensaios mecânicos para caracterização do AISI D6 foram bastante úteis nesta etapa. O primeiro passo foi definir um diâmetro capaz de suportar as cargas compressivas que ocorrem durante o momento de corte. Para isso, foi utilizado a Equação 18, que nada mais é do que uma forma deduzida da Equação básica de tensão normal: $\sigma = F / A$.

$$d_{CC} = \sqrt{\frac{4.F_C}{\pi.R_{e(D6)}}} \quad (\text{Eq. 18})$$

onde: d_{cc} é o diâmetro calculado do corpo da célula de carga [mm];

$R_{e(D6)}$ é a Tensão de escoamento máxima do AISI D6 [MPa];

F_C é a força de corte calculada para a operação [N].

Substituindo os valores de Força de corte (F_C) de 274750 N (calculado anteriormente) e o valor de tensão de escoamento máxima para o AISI D6 ($R_{e(D6)}$) de 991 MPa (da Tabela 6) na Equação 18, tem-se que o valor nominal do diâmetro do corpo da célula de carga é de 18,79 mm. Optou-se por utilizar o diâmetro nominal de 22 mm como uma margem de segurança, uma vez que o valor calculado é o mínimo contra a falha da célula de carga.

Outra análise feita foi levando em consideração a deformação elástica máxima que a célula de carga poderá suportar. Para isso, foi utilizada a Lei de Hooke para determinar qual é o valor de força máxima que a célula de carga pode suportar. Com o valor de Módulo de Elasticidade (E) do AISI D6 de 233,3 GPa (da Tabela 6) e com o valor de deformação relativa de 0,626% (valor de deformação relativa (ϵ) na Tensão de Escoamento (σ) do AISI D6 – ver APÊNDICE C) tem-se que o valor de força máxima que a célula de carga de AISI D6 temperado com um diâmetro de 22mm pode suportar é de 555168 N. Como este valor é superior ao estimado para a força do processo de corte proposto, conclui-se que a célula de carga com o material e a geometria propostos atendem as exigências de carregamento.

A célula de carga será montada imediatamente acima do punção para que a força do processo de corte seja medida de maneira mais precisa, uma vez que este elemento de corte experimenta uma força axial igual a força de corte do processo.

Foram utilizados quatro *Strain Gauges* para a confecção da célula de carga. Destes, dois deles foram colados com suas grades de medição alinhadas longitudinalmente com o corpo da célula de carga e os outros dois foram colados no sentido radial. Com esta configuração de montagem, tem-se uma ponte de *Wheatstone* completa onde, os extensômetros axiais medem uma deformação negativa e os radiais medem as deformações positivas, respeitando a lei de Poisson para um corpo em compressão.

Outro detalhe de construção da geometria da célula de carga são as abas deixadas nas duas extremidades. Estas abas foram projetadas para proteger os

elementos sensores e os cabos que fazem a ligação entre eles. Também foi inserido um raio para suavizar a transição entre os dois diâmetros a fim de evitar cantos vivos (potencial concentrador de tensões). A Figura 28 apresenta o desenho esquemático da montagem da célula de carga que será utilizada para coleta dos valores de força nos ensaios propostos.

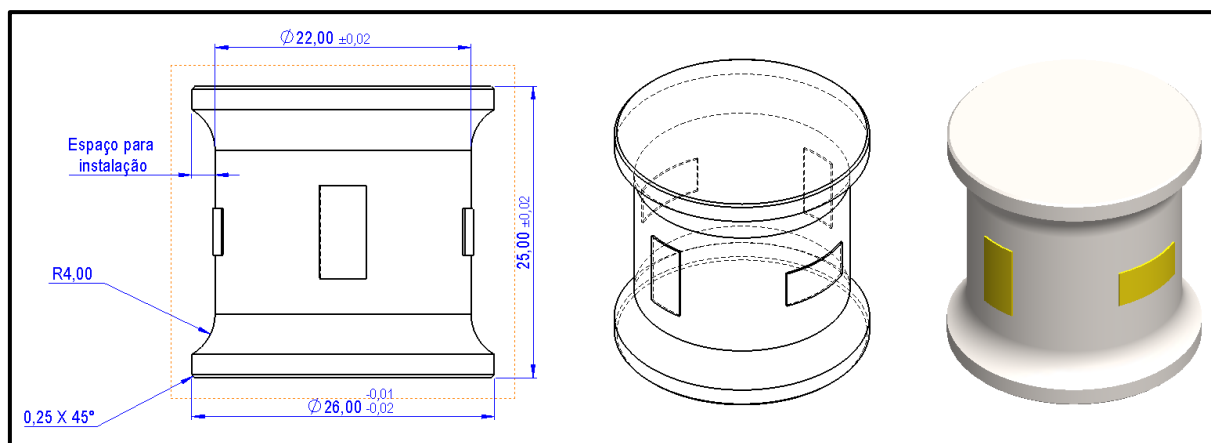


Figura 28 - Geometria da célula de carga do punção.

4.2.3 Calibração da célula de carga

Para minimizar ao máximo os erros mencionados na seção 2.10.4, foi realizada a calibração do sistema como um todo. A calibração foi realizada utilizando a mesma célula de carga e o sistema de aquisição de dados utilizados nos testes práticos. Isso é feito para que os erros e incertezas do sistema completo sejam diminuídos e os valores coletados durante os ensaios sejam os mais precisos possíveis. Para a realização desta etapa, foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca EMIC® modelo DL-20000. A máquina universal de ensaios foi calibrada previamente e, desta forma, os valores de força e deslocamento fornecidos em seus relatórios possuem alta confiabilidade.

O procedimento de calibração do sistema de medição de força define um valor que serve como um multiplicador do valor de força. Este valor é denominado de fator de calibração. Este valor é inserido no *sketch* utilizado no sistema de aquisição de dados e o mesmo compensa os valores de saída da força em cada ensaio prático.

A célula de carga foi inserida entre os cabeçotes inferior e superior da máquina universal de ensaios e então foram aplicadas forças conhecidas de maneira lenta (5

mm/min) até um valor de força pré-determinado. Quando a força chega em seu máximo definido é mantida durante 10 segundos e então o valor do fator de calibração é coletado pelo DAQ. O relatório de força x deslocamento da máquina então é gerado para que o valor exato da força seja conhecido. Este procedimento é realizado utilizando vários valores de força teóricos conhecidos. Ao todo foram realizados 16 testes com forças diferentes. A Tabela 7 mostra os valores de força teóricos (inseridos como parâmetros da máquina) e real (analisado no relatório fornecido pela máquina) relacionados com o valor de calibração obtido em cada ponto de calibração.

Tabela 7 - Resultados da calibração da célula de carga.

F Teórica	F Real	Fator de Correção
5000	5121,39	178155
10000	10054,18	204090
15000	15010,71	218823
20000	20036,5	230938
25000	24965,77	239337
30000	29975,77	246740
35000	35130,04	253541
40000	40025,125	258873
45000	45066,08	264360
50000	50094,91	268299
55000	54957,68	271792
60000	59911,15	274783
100000	100340,52	291803
150000	149693,45	302189
200000	199827,72	313945
250000	249845,96	265171

Depois de coletados todos os valores de fator de correção para as cargas denominadas, estes valores foram inseridos no *sketch* e então foi feita a contraprova comparando os valores de forças gerados nos relatórios da máquina com o valor medida pelo sistema de aquisição de dados. O erro médio entre os valores da máquina e os valores coletados pelo DAQ foi de 0,514%, que é satisfatório para a aplicação neste estudo.

4.3 TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO LINEAR

Para coletar as informações sobre o posicionamento vertical da ferramenta utilizada nos testes propostos por este estudo foi utilizado um transdutor de deslocamento linear da marca GEFRAN®. O modelo escolhido foi o PY2-C0500000X000E000. Este sensor possui um curso elétrico de 50 mm e pode ser utilizado com uma velocidade máxima de 10 m/s. Este dispositivo tem seu funcionamento muito semelhante à de um potenciômetro, onde os valores de resistência elétrica variam conforme a haste do dispositivo se movimenta ao longo de seu eixo. A ponteira deste transdutor linear é do tipo esférica e tem o retorno para a posição inicial realizado através de uma mola fixada a estrutura da haste de acionamento. A tensão elétrica máxima que pode ser aplicada a este dispositivo é de 60 Volts. A Figura 29 mostra o transdutor linear de posição utilizado na instrumentação da ferramenta utilizada nos ensaios práticos.

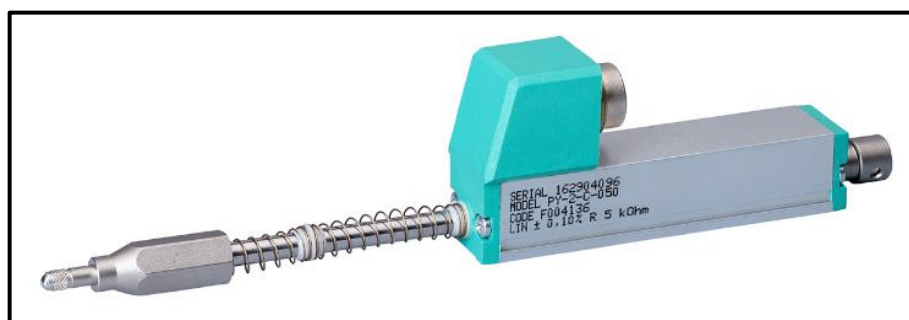


Figura 29 - Sensor potenciométrico de posição.

4.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados foi desenvolvido pelo autor e usa uma placa Arduino® LEONARDO como sistema de processamento dos dados coletados. Esta placa utiliza o microcontrolador ATmega32u4, que é capaz de emular um teclado e/ou um mouse de computador. Esta placa possui 6 pinos de *input* e/ou *output* (I/O) analógicos e mais 14 pinos I/O digitais (sendo 7 deles, pinos PWM - *Pulse-Width Modulation*). A placa opera com tensão elétrica de entrada de 7 a 12 Volts e as portas I/O operam com tensão elétrica de 5 ou 3,3 Volts, dependendo do nível lógico do projeto eletrônico.

Outro componente eletrônico muito importante utilizado neste sistema de coleta de dados é o módulo HX711. Este módulo serve para converter o sinal

analógico que chega da ponte de *Wheatstone* em um sinal digital para ser lido pelo sistema eletrônico. Além de converter o sinal, este módulo amplifica o sinal recebido em um ganho selecionável de 32, 64 ou 128 vezes, conforme necessidade do projeto eletrônico.

De maneira geral, o módulo HX711 recebe o sinal elétrico analógico em mV/V vindo da célula de carga e faz a conversão analógico-digital amplificando este sinal em 128 vezes. O transdutor linear de posição entrega como dado de saída uma resistência elétrica que varia conforme a posição da haste em relação a sua referência inicial. Com o sinal elétrico digital e amplificado vindo da célula de carga e com o valor instantâneo de resistência elétrica vindo do transdutor linear de posição, a placa Arduino® já é capaz de receber em suas portas de I/O os dados de entrada necessários. Em outras palavras os sensores medem as grandezas físicas (força e deslocamento vertical) e transformam estas em sinais elétricos que são lidos pela placa Arduino®. Esta, por sua vez, executando um programa específico para esta aplicação, retorna os valores numéricos na tela do usuário.

Todo este processo acontece com uma frequência de cerca de 11 vezes por segundos (valor este, obtido através de testes práticos) o que para o caso proposto é dado como suficiente. Como o processo de corte será realizado em uma prensa hidráulica, a velocidade para a realização do processo de corte se dá em alguns segundos, diferentemente se fosse realizado em uma prensa excêntrica, por exemplo. Desta forma, um número considerável de leituras pôde ser feito durante o processo.

Outros componentes eletrônicos como botoeiras, LED's, resistores e capacitores também foram utilizados para completar o circuito eletrônico do sistema de aquisição de dados construído pelo autor. Estes elementos não serão comentados neste estudo, pois tratam-se de elementos básicos e que podem ser encontrados facilmente em literaturas mais específicas. O APÊNDICE D mostra, de forma esquemática, como foi feita a ligação dos componentes para a construção do sistema de aquisição de dados construído pelo autor.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo tratará de como este trabalho foi conduzido desde a parte da caracterização do material de estudo e da construção e instrumentação da ferramenta utilizada nos ensaios até os procedimentos adotados para a realização dos testes práticos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO

Afim de se obter os valores das propriedades mecânicas com maior exatidão, optou-se por realizar a caracterização mecânica no material utilizado no desenvolvimento deste estudo. Ao decorrer desta seção, encontram-se as informações coletadas após a realização dos testes mecânicos pertinentes. Entende-se que os dados podem ser facilmente extraídos do *Datasheet* do material disponibilizado virtualmente pela SSAB®, entretanto para fins acadêmicos e para uma maior assertividade nos cálculos e nos procedimentos realizados preferiu-se por realizar a caracterização que será apresentada durante esta seção.

5.1.1 Ensaio de tração do material de estudo

As principais propriedades mecânicas do material utilizado nos testes deste estudo foram obtidas através de ensaio de tração. O corpo de prova utilizado para o ensaio foi retirado da mesma chapa utilizada para extração dos *blanks* utilizados nos testes do processo de corte por cisalhamento proposto neste estudo. O ensaio de tração foi realizado com o uso de um extensômetro fixado na geometria de análise do corpo de prova. Desta maneira, o comportamento da curva de escoamento do material é obtido de maneira mais correta, pois não leva em conta as deformações dos elementos de fixação e da estrutura da máquina universal de ensaios.

O corpo de prova foi extraído da chapa pelo processo de corte a laser e o mesmo foi usinado posteriormente para garantir um acabamento superficial desejável. O teste foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS) e os dados de deformação linear (Δl) e força (F) ao longo do tempo de duração do ensaio foram disponibilizados e tratados. O gráfico de

engenharia (tensão x deformação) obtido através do tratamento dos dados disponibilizados estão sendo apresentados no APÊNDICE E. Para facilitar a compreensão dos resultados foi gerada a Tabela 8 abaixo, que apresenta os valores das propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração realizado.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do material de teste.

Material	E [GPa]	Re [MPa]	Rm [MPa]	Δ_L [%]
SAAB STREX® 700 MC	182,7	762,5	834,3	17,1

5.1.2 Ensaio de dureza do material de estudo

Como complemento aos ensaios realizados para realizar a caracterização do material de estudo foram realizadas as medidas de dureza do mesmo. As medições foram feitas na superfície laminada da chapa e foram coletados dois corpos de prova de regiões diferentes da chapa para realização do ensaio de dureza do material.

O objetivo deste teste é de verificar a homogeneidade da dureza na chapa. As medições de dureza foram realizadas em duas posições diferentes da chapa. O primeiro corpo de prova foi extraído da região central da chapa e o segundo mais próximo a borda. Para cada corpo de prova foram coletados os resultados de cinco pontos de dureza na superfície superior e mais cinco pontos na superfície inferior.

Os resultados de cada ensaio de dureza estão sendo apresentados na Tabela 9, assim como a média dos valores dos cinco pontos de leitura de cada corpo de prova. A média geral dos valores de dureza é de 22 HRC.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de dureza do material de teste.

POSIÇÃO DO CORPO DE PROVA	LADO	LEITURA 1 [HRC]	LEITURA 2 [HRC]	LEITURA 3 [HRC]	LEITURA 4 [HRC]	LEITURA 5 [HRC]	MÉDIA DAS LEITURAS [HRC]
BORDA DA CHAPA	SUPERIOR	21,0	20,0	22,0	21,0	21,0	21,0
	INFERIOR	22,0	23,0	23,0	23,0	23,0	22,8
CENTRO DA CHAPA	SUPERIOR	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	23,0
	INFERIOR	21,0	24,0	23,0	21,0	22,0	22,2

5.1.3 Análise metalográfica do material de estudo

Como parte da caracterização do STRENGTH[®] 700 MC foi solicitado a um laboratório certificado pela ISO 9001 a micrografia do material. O relatório que certifica e apresenta os resultados das análises metalográficas estão sendo apresentados no ANEXO F.

As normas que conduziram o ensaio foram a NBR13284:95 para preparação dos corpos de prova e a ASTM E 407 – 07(2015) para o sequenciamento das ações necessárias para realização do mesmo. Foi utilizado Nital 2% como agente de ataque e foram coletadas as imagens de ampliação de 100x e 500x.

A análise metalográfica apresenta uma microestrutura com base ferrítica com a detecção de traços de cementita esferoidal e perlita. Também foi constatado a possível presença de martensita revenida na matriz ferrítica e também algumas inclusões de óxidos. Foi constatado que o tamanho do grão austenítico é de 10 μ m.

5.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

A ferramenta utilizada nos ensaios foi inserida exatamente no centro da mesa da prensa. Foram utilizados grampos e tirantes para fazer a fixação da ferramenta na mesa da máquina. Em seguida, foi feita a fixação da parte superior da ferramenta no cabeçote da prensa, utilizando o mesmo tipo de fixação. Os cabos elétricos da célula de carga e do transdutor linear de posição foram conectados ao sistema de aquisição de dados que, por sua vez, estava conectado a um computador via conexão USB. A Figura 30 mostra, esquematicamente, a montagem dos equipamentos utilizados nos testes práticos propostos neste estudo.

A fim de organizar os ensaios práticos deste estudo foi criada a Tabela 10 para facilitar o entendimento da execução dos mesmos. Ao todo foram realizados 24 testes onde serão combinados os punções e as matrizes de corte apresentados nas seções anteriores, bem como a utilização ou não de lubrificantes. Os valores de força em cada teste foram medidos pela célula de carga instalada logo acima do punção e posteriormente à execução do corte por cisalhamento, as regiões de corte em cada corpo de prova foram analisadas.

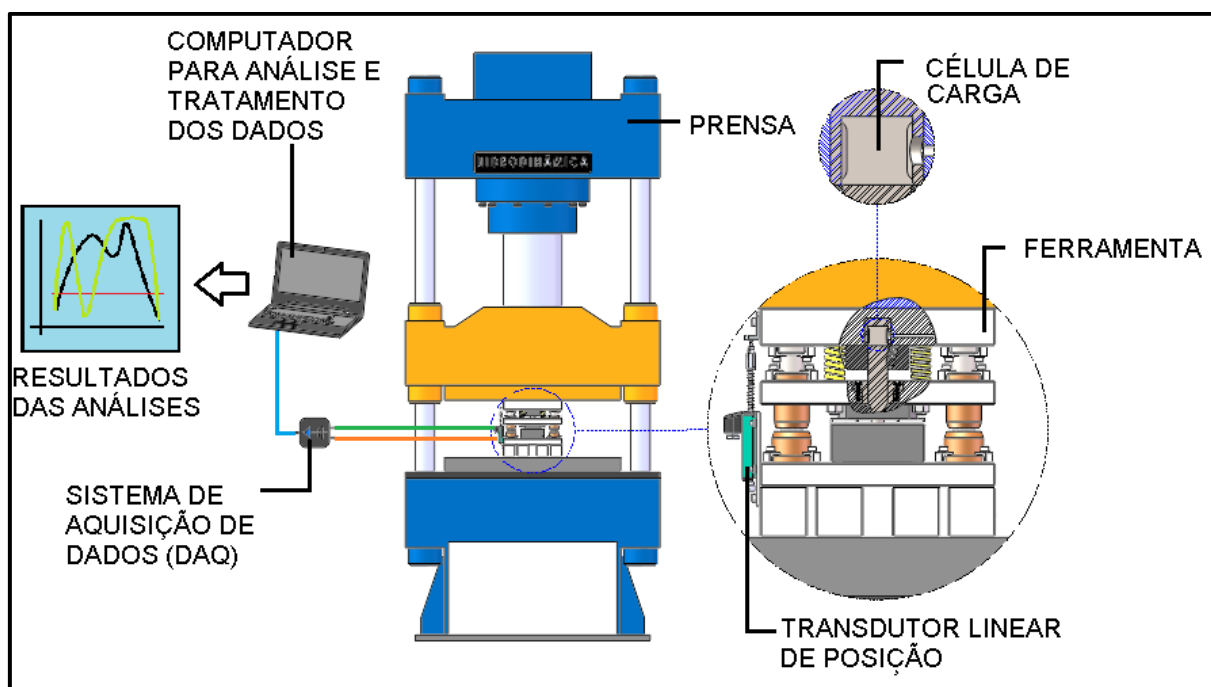


Figura 30 - Montagem do Sistema para realização dos ensaios práticos

Para efetuar a troca dos elementos dos elementos de corte, foi utilizado o sistema de troca rápida de ferramentas. Este sistema permitiu realizar de maneira rápida a troca tanto dos punções quanto das matrizes de corte em cada caso apresentado na Tabela 10. Primeiramente, foram realizados os testes com a matriz M_1 , utilizando os punções P_1 , P_2 , P_3 e P_4 com e sem lubrificação. O mesmo procedimento foi realizado utilizando a matriz de corte M_2 e por fim com a M_3 .

Para cada caso proposto neste trabalho foi realizada a operação de corte por cisalhamento em três corpos de prova. O objetivo é validar se o comportamento em cada situação se repete e não é um resultado isolado. Os testes foram realizados a temperatura ambiente com velocidade do punção de em 8 mm/segundo (limitação da máquina utilizada). Entre um teste e outro, foi tomado o cuidado de efetuar a limpeza do resíduo de lubrificante proveniente do teste anterior para que os resultados não sofressem nenhuma interferência e os valores medidos fossem os mais corretos possíveis. Esta limpeza foi realizada com o uso de um solvente industrial. Todos os dados adquiridos do sistema de aquisição de dados foram armazenados em forma de planilha e posteriormente foram analisados e tratados. Com estes dados, foram gerados os gráficos que serão apresentados no capítulo seguinte deste estudo que tratará sobre todos os resultados obtidos nos testes realizados.

Tabela 10 - Organização dos ensaios práticos

Matriz de Corte	Punção de Corte	Lubrificação	Corpo de prova
M ₁ w = 3%	P ₁ ($\alpha = 0^\circ$)	Com lubrificação	CP 01
		Sem lubrificação	CP 02
	P ₂ ($\alpha = 5^\circ$)	Com lubrificação	CP 03
		Sem lubrificação	CP 04
	P ₃ ($\alpha = 15^\circ$)	Com lubrificação	CP 05
		Sem lubrificação	CP 06
	P ₄ ($\alpha = 10^\circ$)	Com lubrificação	CP 07
		Sem lubrificação	CP 08
M ₂ w = 6%	P ₁ ($\alpha = 0^\circ$)	Com lubrificação	CP 09
		Sem lubrificação	CP 10
	P ₂ ($\alpha = 5^\circ$)	Com lubrificação	CP 11
		Sem lubrificação	CP 12
	P ₃ ($\alpha = 15^\circ$)	Com lubrificação	CP 13
		Sem lubrificação	CP 14
	P ₄ ($\alpha = 10^\circ$)	Com lubrificação	CP 15
		Sem lubrificação	CP 16
M ₃ w = 10%	P ₁ ($\alpha = 0^\circ$)	Com lubrificação	CP 17
		Sem lubrificação	CP 18
	P ₂ ($\alpha = 5^\circ$)	Com lubrificação	CP 19
		Sem lubrificação	CP 20
	P ₃ ($\alpha = 15^\circ$)	Com lubrificação	CP 21
		Sem lubrificação	CP 22
	P ₄ ($\alpha = 10^\circ$)	Com lubrificação	CP 23
		Sem lubrificação	CP 24

Após a realização de todos os testes, os corpos de prova foram usinados até exatamente a metade do furo gerado pela operação de corte conforme apresentado na Figura 31. Isso foi feito para que as análises dimensionais e visuais fossem possíveis de serem realizadas.

Os corpos de prova foram analisados por um projetor de perfil (apresentado na seção 3.6) que mediu os diâmetros da zona cisalhada e o diâmetro final na região de fratura. Além disso uma média da altura da zona cisalhada também foi medida por um estereoscópio trinocular (também mostrado na seção 3.6) e os resultados destas medições serão apresentados no próximo capítulo deste estudo.

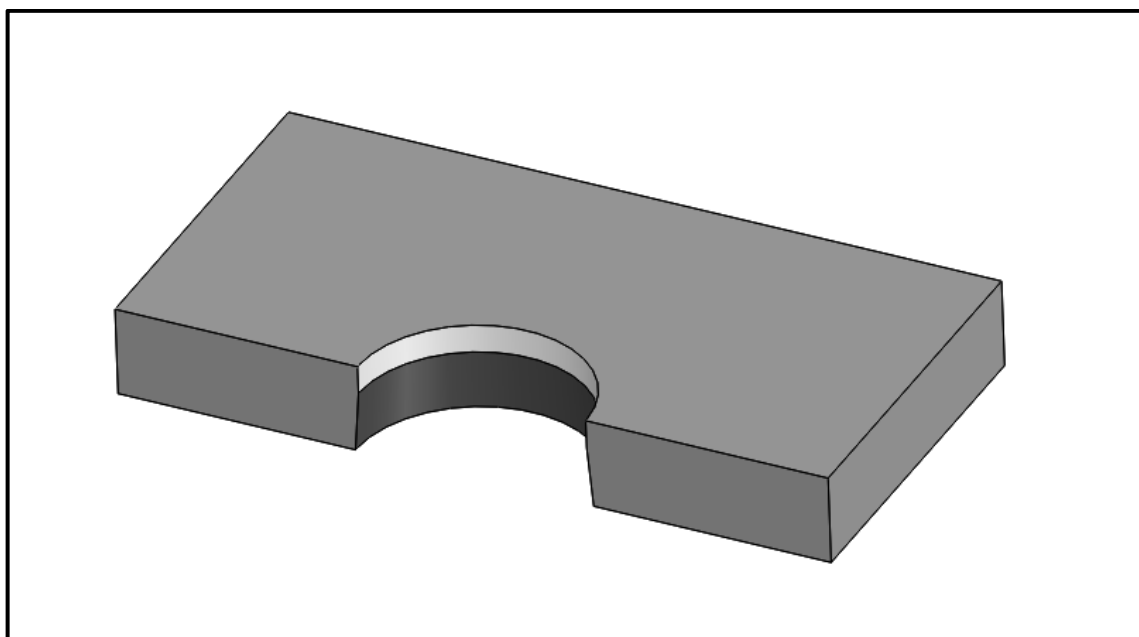


Figura 31 - Corte dos corpos de prova para análise dimensional.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar, em forma de gráficos, tabelas e imagens, os resultados obtidos nos ensaios práticos propostos neste estudo. Primeiramente, serão apresentados os resultados relacionados à medição das forças durante o processo de corte em cada caso. Em seguida será abordado o aspecto dimensional dos corpos de prova e por fim, o aspecto visual qualitativo da região de corte para cada corpo de prova ensaiado.

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS ACERCA DOS RESULTADOS

Antes de dar início a apresentação dos resultados é importante salientar um ponto em específico que ocorreu durante os ensaios. Como mencionado nos capítulos anteriores, a estratégia era de utilizar algumas afiações de punção e avaliar os seus comportamentos combinados com a alteração das folgas de corte e ao uso de lubrificação no corte. Entretanto, ao ensaiar o punção P_3 , cuja afiação era em um ângulo unilateral de 15° houve a quebra do mesmo. Esta quebra ocorreu ainda na execução do primeiro furo utilizando este elemento de corte. Então, o mesmo foi substituído por um punção semelhante (*backup*) com a mesma geometria do primeiro. Porém, novamente o punção P_3 falhou e quebrou durante o processo de corte por cisalhamento deste segundo furo.

Observou-se, nesta segunda oportunidade, que todo o conjunto da ferramenta (e do cabeçote superior da máquina também) não realizou um movimento puramente vertical. Ao que tudo indica, como o centro de aplicação de força e o ponto de contato do punção com o material a ser cortado são diferentes, surgiu uma força descentralizada durante o processo. Esta assimetria de forças fez com que um momento fletor surgisse e tivesse seu valor aumentado à medida que o punção adentrava o material do corpo de prova. Neste caso, o lado em que houve o primeiro contato do punção com a superfície do corpo de prova, experimentou uma força maior que o lado oposto da ferramenta, criando uma força de natureza cisalhante na geometria do punção. Como os punções não foram projetados para serem submetidos a altas cargas laterais, estima-se que o punção falhou devido à alta tensão de cisalhamento causada por este momento fletor gerado. Este problema também foi

observado no estudo realizado por Pu *et. al* (2018), onde estas forças ortogonais geradas por ferramentas assimétricas induziram a deflexão lateral e à danos severos na ferramenta.

Desta forma, os resultados referentes ao uso do punção P₃ não foram obtidos e concluiu-se que o uso de um ângulo de afiação muito grande (em relação as demais geometrias testadas) não pode ser utilizado neste caso devido à grande assimetria de forças geradas durante o processo de corte por cisalhamento.

6.2 ANÁLISE DAS FORÇAS

Este tópico apresentará os resultados referentes a força de corte obtidos em cada ensaio proposto nos objetivos específicos deste estudo. Os resultados serão apresentados em forma de gráficos e tabelas e serão posteriormente comparados entre si para que os parâmetros de análise possam ser avaliados.

Como comentado na seção anterior, a operação de corte foi realizada em três corpos de prova para cada configuração de ferramentas e lubrificação propostas neste estudo. Como referência para comparação dos resultados, foi optado por utilizar a força de corte máxima em cada caso. Por este motivo, uma análise estatística dos valores de força foi realizada entre os valores obtidos nos ensaios dos três corpos de prova. A Tabela 11 apresenta os valores de força máxima obtidos nos três corpos de prova e que foram denominados de F₁, F₂ e F₃. A média entre estes três valores de força bem como o desvio padrão e o erro padrão para cada situação também estão sendo apresentados na Tabela 11.

Um gráfico do tipo *Boxplot* foi gerado para correlacionar os valores de força de corte máxima com os parâmetros variados neste estudo. Este gráfico está sendo apresentado na Figura 32. Como complemento foi feito um teste de Fisher de múltiplas comparações utilizando um grau de significância de 0,05 (confiabilidade de 95%). Os valores extraídos desta análise estão sendo apresentados no APÊNDICE F.

A partir da análise detalhada do gráfico da Figura 32 e dos valores apresentados no APÊNDICE F, é possível realizar uma avaliação completa dos valores das forças de corte em cada situação. Ao longo desta seção, estas duas ferramentas (Teste de Fisher e o gráfico *Boxplot*) servirão de base na comparação de como os valores de força máxima variam ao ter os parâmetros de corte variados.

Tabela 11 - Valores de $F_{\text{máx}}$ dos ensaios.

Corpo de prova	F1 [kN]	F2 [kN]	F3 [kN]	TAMANHO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	ERRO PADRÃO
P1/M1/lubrificante	199,587	201,219	198,975	3	199,927	1,160	0,670
P1/M1/seco	203,369	203,741	204,087	3	203,732	0,359	0,207
P2/M1/lubrificante	197,579	196,256	197,236	3	197,024	0,687	0,396
P2/M1/seco	197,726	195,861	197,367	3	196,985	0,990	0,571
P4/M1/lubrificante	199,257	195,551	197,963	3	197,590	1,881	1,086
P4/M1/seco	196,448	199,729	198,093	3	198,090	1,641	0,947
P1/M2/lubrificante	194,337	196,688	194,254	3	195,093	1,382	0,798
P1/M2/seco	194,362	196,918	193,175	3	194,818	1,913	1,104
P2/M2/lubrificante	169,899	175,981	173,555	3	173,145	3,062	1,768
P2/M2/seco	177,485	175,286	173,578	3	175,450	1,959	1,131
P4/M2/lubrificante	175,629	180,113	176,228	3	177,323	2,434	1,406
P4/M2/seco	176,131	174,969	174,338	3	175,146	0,910	0,525
P1/M3/lubrificante	189,755	191,344	191,585	3	190,895	0,994	0,574
P1/M3/seco	195,374	192,612	191,321	3	193,102	2,071	1,195
P2/M3/lubrificante	176,778	173,691	170,761	3	173,743	3,009	1,737
P2/M3/seco	173,646	173,950	174,549	3	174,048	0,459	0,265
P4/M3/lubrificante	176,875	176,567	179,498	3	177,647	1,611	0,930
P4/M3/seco	180,865	178,169	177,876	3	178,970	1,648	0,951

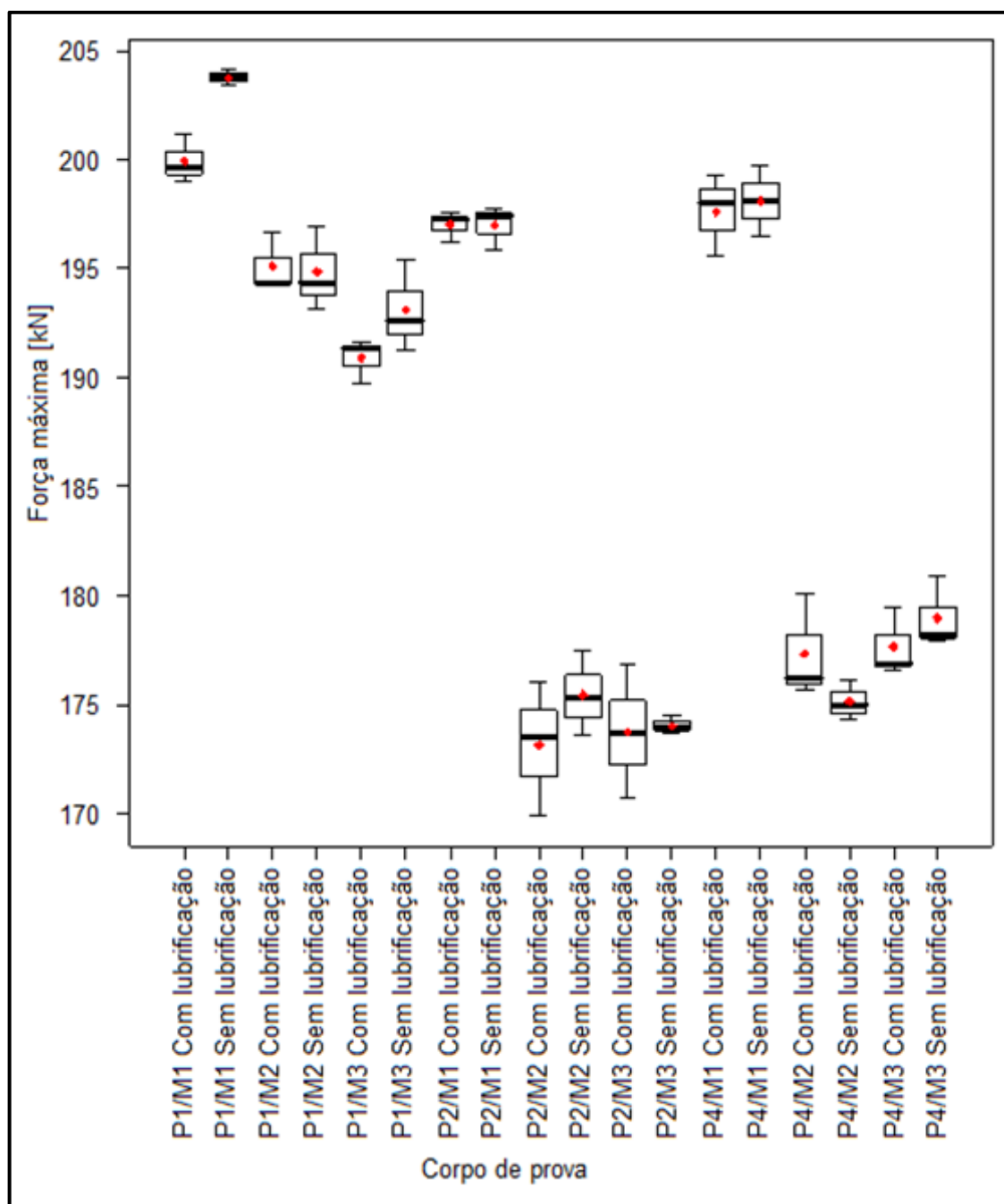


Figura 32 - Gráfico *Boxplot* dos valores de força máxima em cada ensaio.

6.2.1 Influência da lubrificação no corte nos valores de força

Esta seção visa apresentar qual é a influência que a lubrificação possui nos valores de força máxima. O gráfico apresentado na Figura 33 apresenta os valores de força máxima e seus erros padrão para cada conjunto de ferramentas ao variar a lubrificação durante o processo de corte. Este gráfico auxilia no entendimento de como as forças de corte máximas são influenciadas pelo uso de lubrificação.

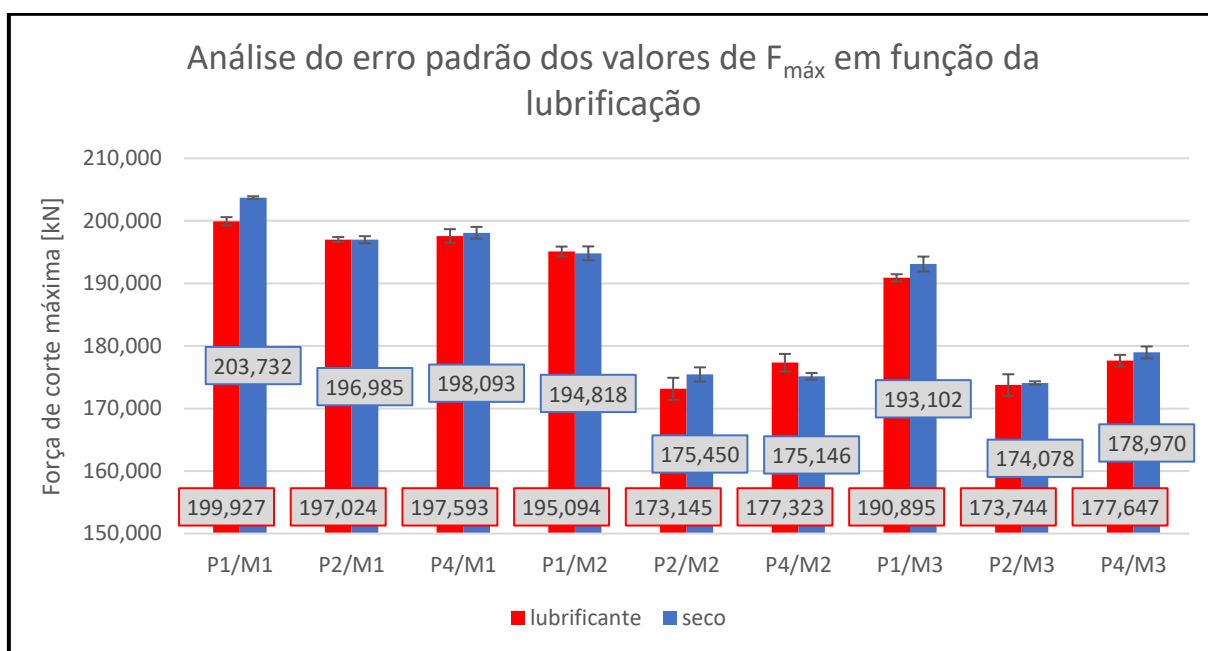


Figura 33 - Erros padrão dos valores de força em função da lubrificação.

A Figura 34 mostra um trecho da análise de comparações múltiplas de Fisher quando os mesmos elementos de corte são utilizados no processo de corte. Ao avaliar os valores do parâmetro de P-Valor é possível verificar que na grande maioria dos casos este valor é maior do que 0,05 (5% de significância), com exceção do uso do punção com ângulo de afiação (α) em conjunto com a matriz com folga w de 3%.

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	-3,805	-6,690	-0,920	0,011	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	0,039	-2,840	2,920	0,848	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-0,500	-3,380	2,380	0,129	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	0,275	-2,610	3,160	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-2,305	-5,190	0,580	0,114	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	2,177	-0,710	5,060	0,831	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	-2,208	-5,090	0,670	0,727	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	-0,305	-3,190	2,580	0,134	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	-1,323	-4,210	1,560	0,358	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Figura 34 - Análise de Fisher dos valores de $F_{m\acute{a}x}$ com a variação da lubrificação.

A Figura 35 mostra os gráficos que correlacionam a força de corte e o deslocamento do punção com e sem o uso de lubrificação no processo de corte proposto neste estudo. Os elementos de corte foram agrupados a fim de facilitar a visualização do comportamento dos valores de força conforme o punção avança contra o corpo de prova.

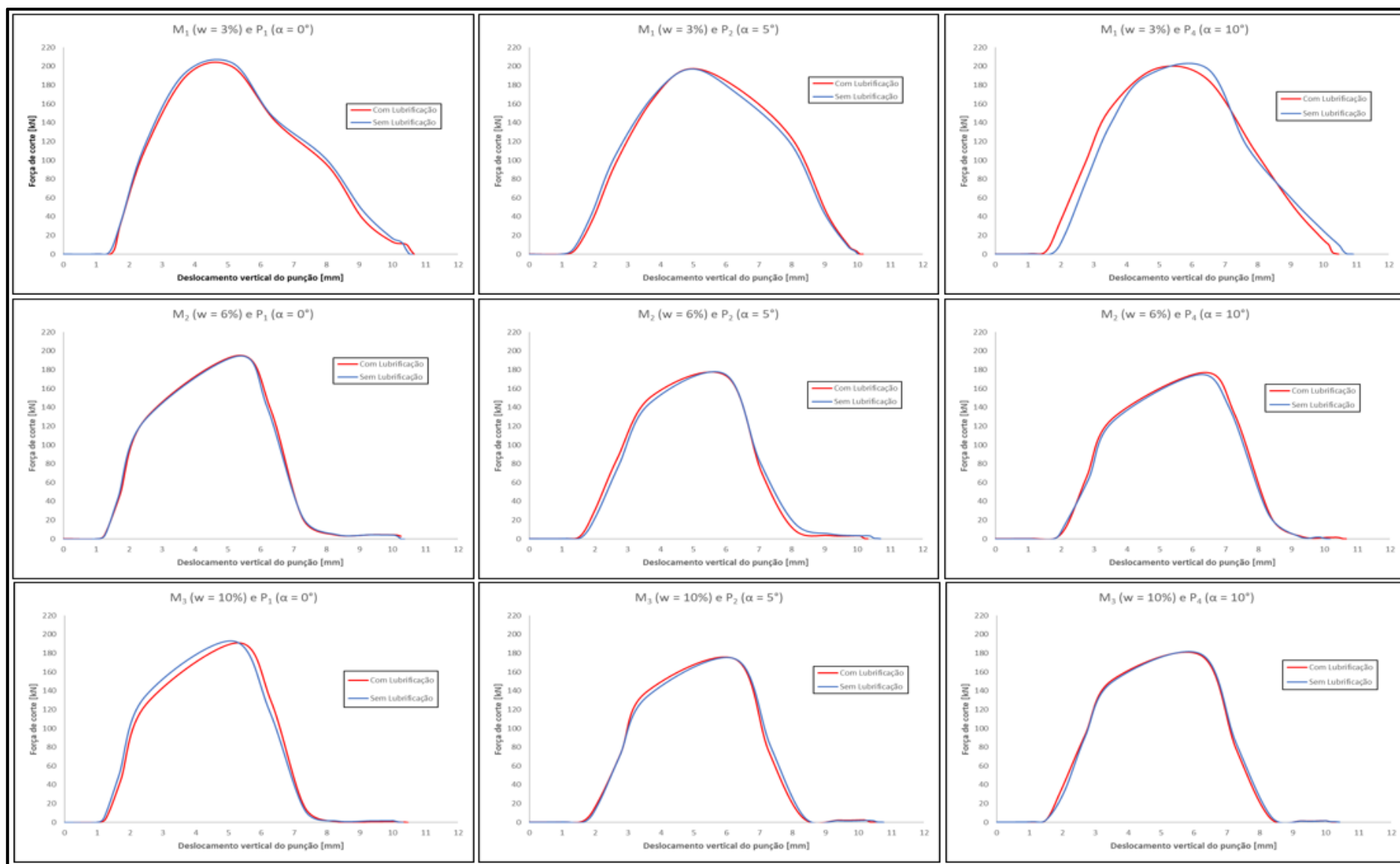


Figura 35 – Gráficos de força x deslocamento do punção em função da lubrificação no processo.

Ao analisar o *Boxplot* apresentado na Figura 32 em conjunto com o gráfico de colunas mostrado na Figura 33 e a análise de comparação múltipla de Fisher da Figura 34, é possível verificar que o uso de lubrificação não possui influência significativa nos valores de força máxima nas situações testadas. Outro aspecto que pode ser verificado é a aleatoriedade dos valores de força máxima ao variar a lubrificação onde, em alguns casos o uso de lubrificante tendeu a uma diminuição dos valores de força e em outros, o uso de lubrificante apresentou forças de corte maiores do que em comparação com o processo realizado a seco. A variação média dos valores de força entre os processos de corte realizados com lubrificação e a seco foi de 0,77%.

6.2.2 Influência da folga de corte nos valores de força

O presente tópico apresentará os resultados obtidos nos ensaios práticos que correlacionam a força de corte com a folga (w) dada nas matrizes. Os resultados serão apresentados em forma de gráficos e tabelas que estão separados pelo punção de corte utilizado. Desta forma, para cada ângulo (α) de afiação do punção, os resultados da força em relação com as folgas de corte utilizadas serão dispostos no mesmo gráfico a fim de demonstrar a influência deste parâmetro no processo de corte.

A Figura 36 apresenta os gráficos que relacionam a força de corte com o deslocamento do punção em função da folga de corte (w) utilizada. Os gráficos agrupam os resultados obtidos pela alteração da folga ao utilizar os punções P_1 , P_2 e P_4 . O objetivo deste gráfico é apresentar o comportamento das forças com o movimento vertical dos punções para cada situação ensaiada.

Como foi visto na seção anterior, a influência da lubrificação nos processos de corte propostos neste estudo não apresentou uma influência significativa nos valores de força máxima. Desta forma, optou-se por remover esta variável do restante das análises para facilitar a compreensão dos resultados frente a alteração das folgas de corte. Entretanto, vale ressaltar que os valores nas duas situações foram mantidos para as análises estatísticas. A Figura 37 apresenta os valores médios da força máxima para cada matriz utilizada. Para facilitar o entendimento os punções foram agrupados para verificar a influência da folga para cada caso proposto. As barras de erros padrão para cada situação, também estão sendo apresentadas neste gráfico para a verificação da qualidade dos resultados apresentados.

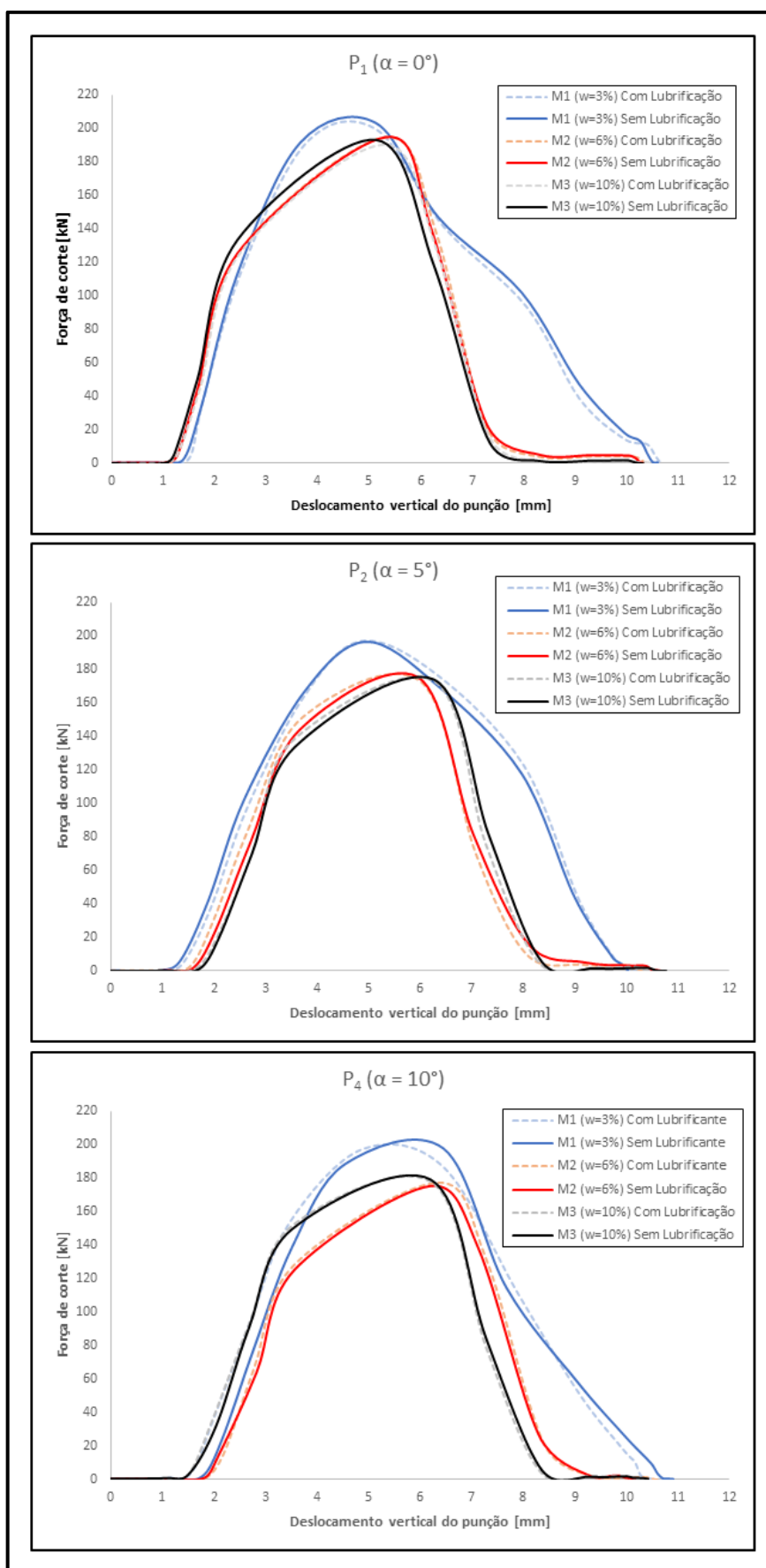


Figura 36 - Gráficos de força x deslocamento do punção em função da folga de corte (w) no processo.

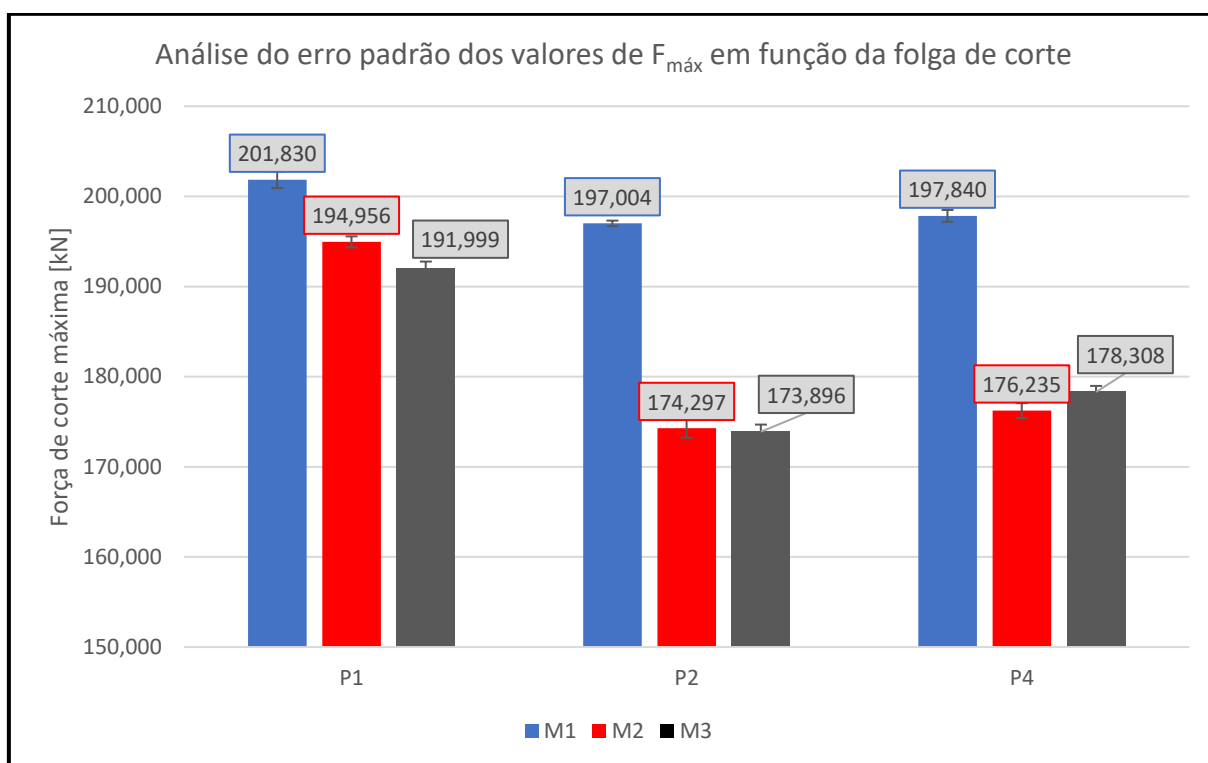


Figura 37 - Erros padrão dos valores de força em função da variação da folga de corte.

A Figura 38 mostra o gráfico do tipo *Boxplot* apresentando os resultados da análise estatística dos valores de força máxima em cada situação ensaiada. Com este gráfico é possível analisar a influência que os elementos de corte possuem nos valores de força máxima nos testes realizados, analisando os erros padrões que cada situação apresenta. Como complemento do comportamento estatístico, foi utilizado o método de Fisher como teste de múltiplas comparações. Os resultados deste teste estão sendo apresentados na Figura 39 onde foi utilizado um grau de significância de 5% (ou seja, a confiabilidade dos resultados é de 95%). Desta forma, ao analisar os resultados da coluna de P-Valor da Figura 39 é possível verificar que os valores que superam o 0,05 tendem a ser estatisticamente semelhantes enquanto os valores que estão abaixo dos 5% de significância tendem a ser diferentes quando comparados.

Analisando as informações apresentadas nesta seção é possível verificar que a variação da folga de corte se mostrou efetiva para a redução das forças de corte. É possível verificar que existe uma relação inversamente proporcional dos valores de força de corte máxima com o aumento das folgas utilizadas. De maneira geral, o uso de folgas de corte maiores auxilia na redução dos valores de força máxima nos testes realizados.

Os resultados mostram que, ao utilizar os punções de corte com ângulo de afiação α de 5° (unilateral) e 10° (bilateral), as matrizes de corte M_2 e M_3 ($w = 6\%$ e 10% , respectivamente) não apresentaram diferenças significativas entre elas. Entretanto ao comparar estas duas matrizes com M_1 ($w = 3\%$) ambas auxiliaram em uma redução significativa dos valores de força máxima.

Quando utilizada o punção P_4 , cujo ângulo de afiação (α) é de 10° bilateral, a folga de corte que mais auxiliou na redução dos valores de força foi a de 6% em relação a espessura da chapa ensaiada.

Em valores médios, a matriz de corte M_3 ($w = 10\%$) em comparação com a matriz com folga de 3% , quando utilizadas em conjunto com o punção P_2 ($\alpha = 5^\circ$), foi onde a maior variação dos valores de força foi encontrada. A matriz com folga de 10% em relação com a espessura do material, auxiliou na redução do valor de $F_{\text{máx}}$ em $13,29\%$ em comparação com a M_1 .

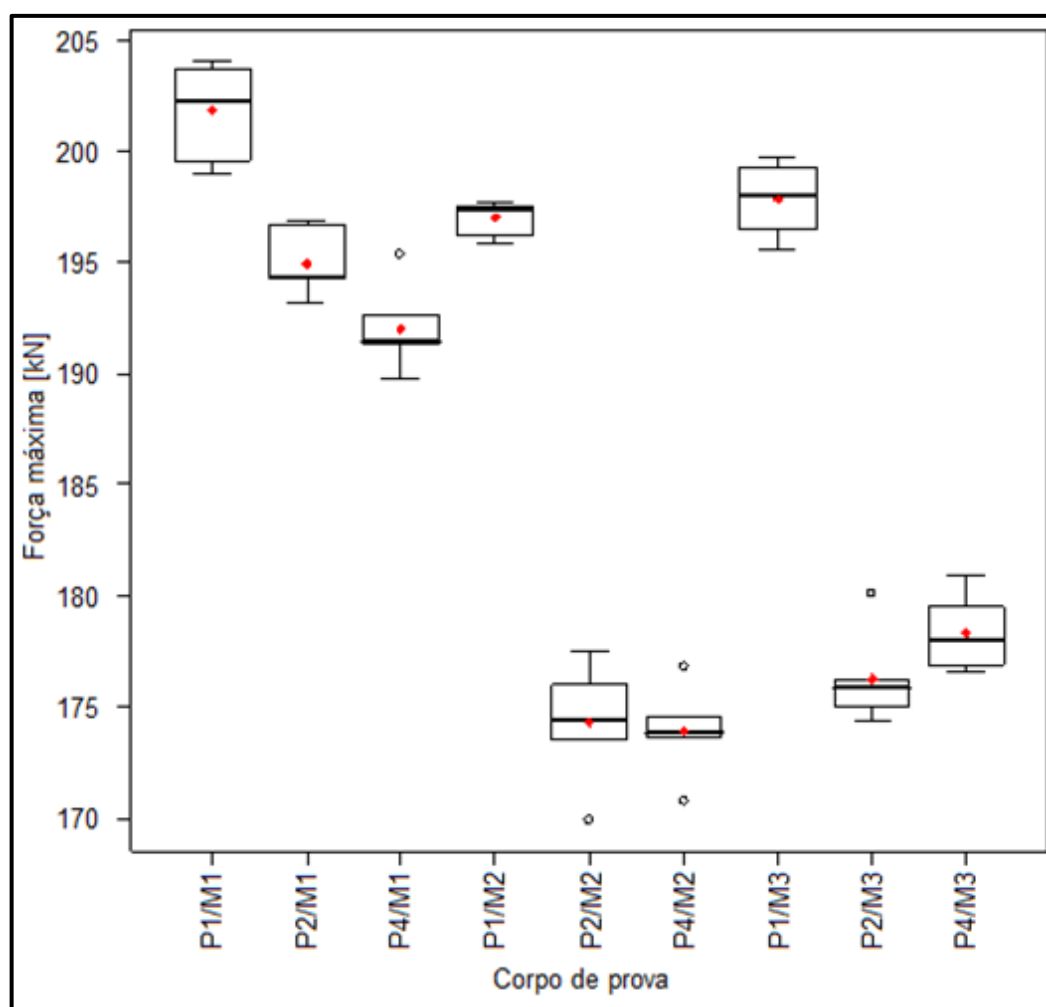


Figura 38 - Gráfico *Boxplot* dos valores de força máxima ao variar os elementos de corte.

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1-P1/M2	6,874	4,710	9,040	0,000	DIFERENTES
P1/M1-P1/M3	9,831	7,660	12,000	0,001	DIFERENTES
P1/M2-P1/M3	2,957	0,790	5,130	0,441	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1-P2/M2	22,707	20,540	24,870	0,000	DIFERENTES
P2/M1-P2/M3	23,108	20,940	25,280	0,000	DIFERENTES
P2/M2-P2/M3	0,402	-1,770	2,570	0,079	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1-P4/M2	21,606	19,440	23,770	0,000	DIFERENTES
P4/M1-P4/M3	19,532	17,360	21,700	0,000	DIFERENTES
P4/M2-P4/M3	-2,074	-4,240	0,090	0,000	DIFERENTES

Figura 39 - Análise de Fisher dos valores de $F_{\text{máx}}$ com a variação da folga de corte (w).

Os resultados que correlacionam a folga de corte com o valor de força máxima são semelhantes aos encontrados no estudo realizado por Fang, Zang e Lou (2002). Resultados semelhantes foram obtidos por Gürün, Göktaş e Güldaş (2016) e Mackensen *et. al.* (2010) onde, com o aumento dos valores das folgas de corte, o valor da força máxima na operação foi reduzido.

Outras fontes de pesquisa como Chumrum, Koga e Premanond (2015) afirmam que a folga de corte só foi capaz de reduzir o valor de força máxima em níveis consideráveis, quando foi utilizado uma matriz com w igual a 15%. Neste último estudo, os autores variaram folgas de corte de 2%, 5%, 10% e 15% em relação a espessura da chapa utilizada e analisaram o comportamento das forças em diversos aços de alta e de ultra alta resistência mecânica. Para os demais valores de w , os autores indicam um decréscimo mínimo dos valores da força de corte no processo (em relação ao pior caso verificado pelos autores). Resultados semelhantes foram obtidos no trabalho realizado por Soares *et. al.* (2012).

6.2.3 Influência do ângulo de afiação do punção nos valores de força

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios práticos que correlacionam a força de corte e o ângulo de afiação (α) do punção. Os resultados serão apresentados no formato de gráficos e tabelas que estão separados pelas matrizes de corte utilizadas. A Figura 40 apresenta os gráficos que relacionam a força de corte com o deslocamento do punção em função dos ângulos de afiação do punção utilizados. Os gráficos agrupam os resultados obtidos pela alteração de α ao utilizar as matrizes M_1 , M_2 e M_3 . O objetivo deste gráfico é apresentar o comportamento das forças com o movimento vertical dos punções para cada situação ensaiada.

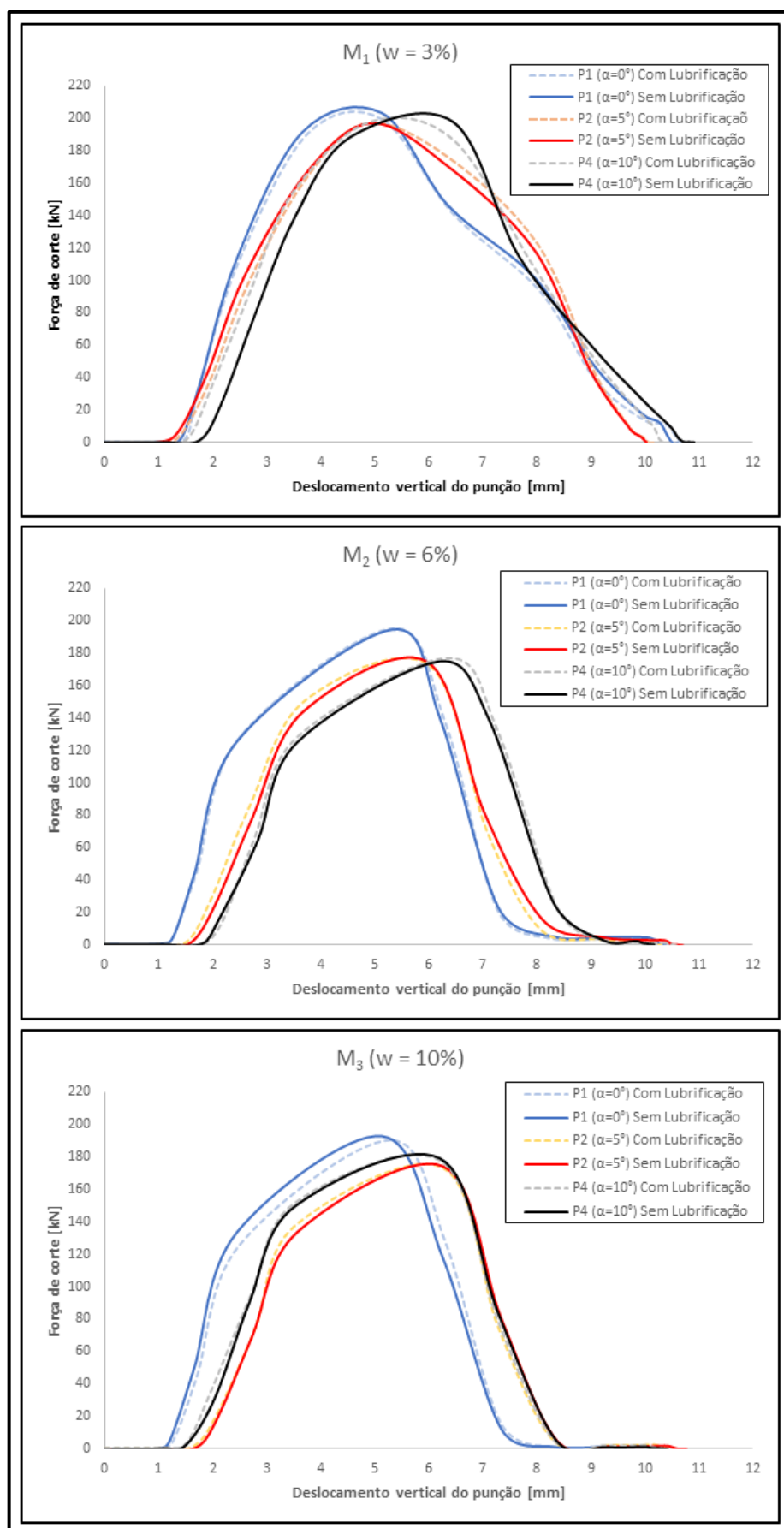


Figura 40 - Gráficos de força x deslocamento do punção em função do ângulo de afiação do punção.

A Figura 41 apresenta os valores médios da força máxima para cada punção de corte utilizado. Com o objetivo de simplificar o entendimento dos resultados, as matrizes de corte foram agrupadas para que seja possível verificar a influência que o ângulo de afiação (α) apresenta em cada caso proposto neste trabalho. As barras de erros padrão para cada situação, também estão sendo apresentadas neste gráfico para a verificação da qualidade dos resultados apresentados.

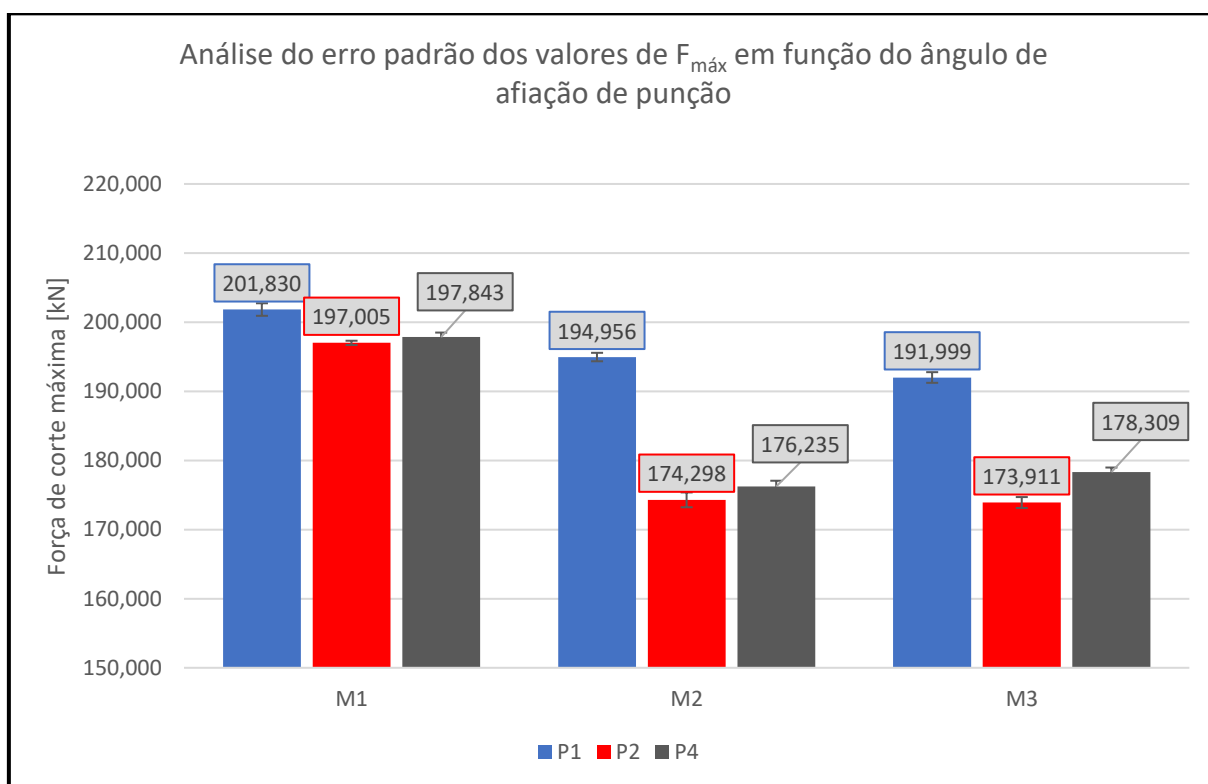


Figura 41 - Erros padrão dos valores de força em função da geometria de afiação do punção.

Mais uma vez, foi utilizada uma análise estatística para realizar a verificação dos valores e dos resultados. O gráfico do tipo *Boxplot* apresentado na Figura 38 da seção anterior, servirá para avaliação do comportamento dos valores de força de corte máxima quando a geometria de afiação do punção é alterada. A análise de Fisher foi feita para a realização do teste de múltiplas comparações e também foi utilizado um grau de significância de 0,05. Os resultados deste teste estão sendo apresentados na Figura 42.

Analisando a coluna de P-Valor da Figura 42, é possível verificar que os valores que superam o 0,05 tendem a ser estatisticamente semelhantes enquanto os

valores que estão abaixo dos 5% de significância tendem a ser diferentes quando são comparados.

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1-P2/M1	4,826	2,660	6,990	0,000	DIFERENTES
P1/M1-P4/M1	3,989	1,820	6,160	0,000	DIFERENTES
P2/M1-P4/M1	-0,836	-3,000	1,330	0,009	DIFERENTES
P1/M2-P2/M2	20,658	18,490	22,830	0,000	DIFERENTES
P1/M2-P4/M2	18,721	16,550	20,890	0,000	DIFERENTES
P2/M2-P4/M2	-1,937	-4,110	0,230	0,711	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3-P2/M3	18,103	15,930	20,270	0,000	DIFERENTES
P1/M3-P4/M3	13,690	11,520	15,860	0,000	DIFERENTES
P2/M3-P4/M3	-4,413	-6,580	-2,240	0,060	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Figura 42 - Análise de Fisher dos valores de F_{\max} com a variação do ângulo de afiação do punção (α).

Ao analisar as informações apresentadas no gráfico da Figura 38 e na tabela da Figura 42, é possível concluir que ângulos de afiação (α) diferentes de 0° são consideravelmente eficazes na redução dos valores de força. De maneira geral, nos processos de corte onde foi utilizado um punção com algum ângulo de afiação (punções com α igual a 5° unilateral e 10° bilateral), a força de corte máxima tendeu a uma diminuição considerável de seus valores.

Os resultados apresentados mostram que, quando é utilizado uma folga de corte maior, como é o caso de M_2 e M_3 , os punções P2 e P4 não possuem uma diferença significativa na redução da força de corte quando comparados entre si. Entretanto, quando estes dois punções são comparados com P1, existe uma clara diminuição dos valores da força máxima.

Em valores médios, o punção com ângulo α de 5° (unilateral) em comparação com o punção plano (P_1), quando utilizados em conjunto com a matriz de corte com folga de 6%, foi onde a maior variação dos valores de força foi encontrada. O punção P_2 auxiliou na redução do valor de F_{\max} em 11,85% em comparação com o punção com α igual a 0° .

Os resultados obtidos neste estudo referente ao uso de afiação nos punções estão de acordo com o estudo realizado por Pu *et. al* (2018) e Slavic *et. al.* (2014). Em Pu *et. al* (2018), os autores afirmam que a afiação do punção é mais eficiente do que o aumento da folga de corte para reduzir as forças de corte. Neste estudo, os pesquisadores ensaiaram quatro diferentes aços de alta e ultra alta resistência

mecânica utilizando folgas de corte (w) de 6%, 12% e 20% em relação a espessura das chapas utilizadas. Pu *et. al.* (2018) concluíram que o uso de um punção com inclinação bilateral, semelhante ao punção P₄ utilizado neste trabalho, foi a geometria mais eficiente para a redução das forças de corte.

Outra fonte que confirma os resultados alcançados neste estudo quanto ao uso de um ângulo de afiação do punção é o de Choi, Kim e Ko (2014). Neste estudo, os autores demonstram que, quão maior for o ângulo de afiação do punção, menores serão os valores da força de corte máxima do processo. Neste estudo, os autores utilizaram um AHSS com 1,2, 1,6 e 2,0 mm de espessura. O mesmo comportamento foi encontrado no trabalho realizado por Gürün, Göktaş e Güldaş (2016) realizando a operação de corte em uma chapa fina. No trabalho realizado por Totre, Nishad e Bodke (2013) os autores também afirmam que o punção com um ângulo de afiação reduz consideravelmente os valores de força durante o processo de corte, principalmente quando um punção com ângulo bilateral (como P₄) é utilizado.

6.3 ANÁLISE DIMENSIONAL

A presente seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos referente a parte dimensional de todos dos corpos de prova utilizados durante os ensaios práticos. Foi verificado a influência dos parâmetros ensaiados (lubrificação, folga de corte e geometria de afiação do punção) em relação aos diâmetros da região cisalhada e de fratura bem como nas alturas da região do corte. Os resultados serão apresentados em forma de tabelas e gráficos, correlacionando o percentual em relação a espessura (s) que cada zona de cisalhamento representa.

A fim de simplificar as análises dimensionais realizadas, serão utilizadas algumas nomenclaturas para designação de cada região da zona de corte.

- a) D_C – Diâmetro da região cisalhada;
- b) D_F – Diâmetro da região de fratura;
- c) H_B – Altura da região de deformação plástica, ou como também é conhecida, região de bojamento;
- d) H_C – Altura da região cisalhada;
- e) H_F – Altura da região de fratura;

f) H_R – Altura da rebarba gerada no processo de corte;

A Figura 43 apresenta, de forma esquemática, uma vista de corte com todas as dimensões analisadas neste estudo. Cada uma das coordenadas de diâmetros e alturas verificadas serão apresentadas com mais detalhes nas seções seguintes.

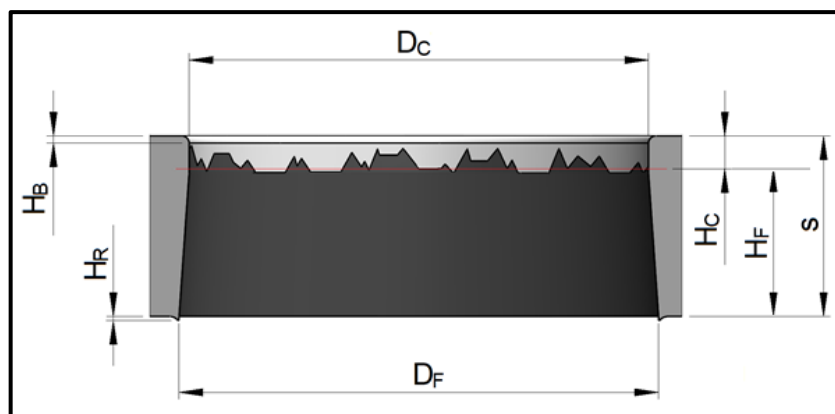


Figura 43 - Análise dimensional da região de corte.

6.3.1 Análise dos diâmetros da região cisalhada e do final da zona de fratura

Nesta seção, serão apresentadas as diferenças dos diâmetros da região cisalhada e no final da fratura para todos os corpos de prova ensaiados. O objetivo principal desta análise é de verificar se os diâmetros dos furos realizados tiveram alguma influência com a alteração dos parâmetros de corte. Uma análise estatística foi realizada onde, os erros padrão e as médias serão apresentadas com o objetivo de demonstrar a qualidade das medições realizadas.

6.3.1.1 Diâmetro da zona de cisalhada D_c

Primeiramente, foi realizada a análise do diâmetro da região cisalhada (D_c) com o intuito de verificar se os parâmetros ensaiados oferecem alguma alteração significativa nos valores desta medida. Como mencionado na seção 3.4.2, os punções de corte foram fabricados com uma medida nominal de $\varnothing 16$ mm. Uma tolerância simétrica (tanto positiva quanto negativa) de 0,01 mm foi dada como especificação de projeto para a fabricação dos mesmos. Após a manufatura dos punções de corte, os

diâmetros (D_P) foram medidos e o valor médio entre todos os punções foi de $\varnothing 16,01$ mm (com desvio padrão $\Sigma = 0,002357$). Desta forma, este valor servirá como base para verificação do diâmetro D_C realizado pelas operações de corte por cisalhamento nos corpos de prova utilizados nos ensaios práticos.

Após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram encaminhados para análise dimensional em um projetor de perfil. Este equipamento realizou as medidas dos diâmetros D_C e D_F . Os valores médios de D_C para todos os corpos de prova ensaiados estão sendo apresentados no gráfico de barras da Figura 44. Esse gráfico também mostra os erros padrão das medições para cada situação ensaiada.

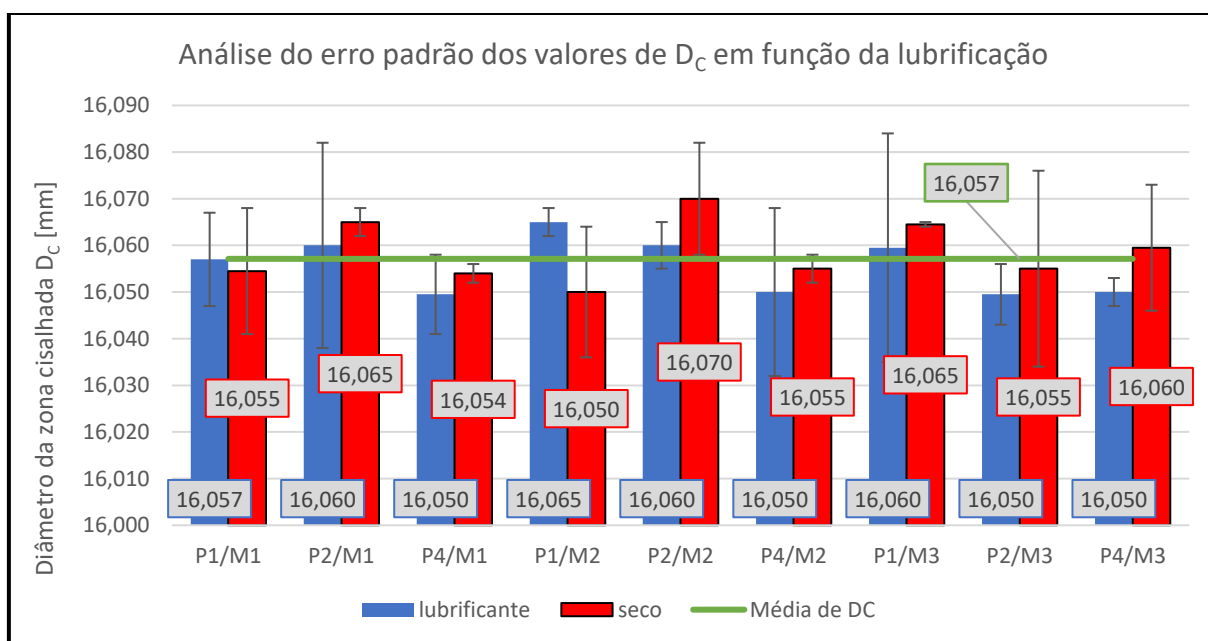


Figura 44 – Erros padrão dos valores de D_C dos corpos de prova.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 44, é possível verificar que o valor médio do diâmetro D_C de todos os ensaios foi de 16,057 mm. A partir dos dados fornecidos nesta figura é possível verificar que a variação máxima entre os diâmetros D_C foi de 0,02 mm. Isso representa uma variação simétrica de 0,01 mm em relação à média. Isso significa que os ensaios tiveram uma boa repetibilidade por se tratar de um processo convencional de corte por cisalhamento. Entretanto, é importante ressaltar que o diâmetro da furação ficou em média 0,04 mm maior do que o diâmetro real do punção. Esta diferença pode ser explicada pela própria imprecisão do processo de corte convencional, além do fato de que, as forças de corte envolvidas

no processo (realizado em uma chapa de alta resistência mecânica de grande espessura) podem gerar uma alta tensão nas paredes da furação, fazendo com que o diâmetro na região de cisalhamento fique ligeiramente maior do que o diâmetro real do punção de corte utilizado. Segundo Aravind, Chakkingal e Venugopal (2020), certa imprecisão do processo de corte se deve principalmente aos efeitos tribológicos da zona de contato entre o punção de corte e a peça cortada. Estes efeitos são consideravelmente minimizados ao se utilizar a técnica de *fine-blanking*.

Outra análise possível de ser realizada a partir do gráfico apresentado na Figura 44, é na aleatoriedade dos valores de D_c ao variar a folga de corte, a geometria de afiação dos punções e o uso de lubrificação durante o processo. Desta forma, não foi detectada nenhuma influência das alterações propostas neste estudo quanto a variação de D_c . Esta conclusão pode ser verificada analisando o gráfico do tipo *Boxplot* dos valores de D_c da Figura 45 e com o auxílio da tabela apresentada no APÊNDICE G que mostra o teste de múltiplas comparações usando o método de Fisher. O teste de comparações foi feito com grau de significância de 5% e desta forma, todos os resultados se mostraram semelhantes entre si.

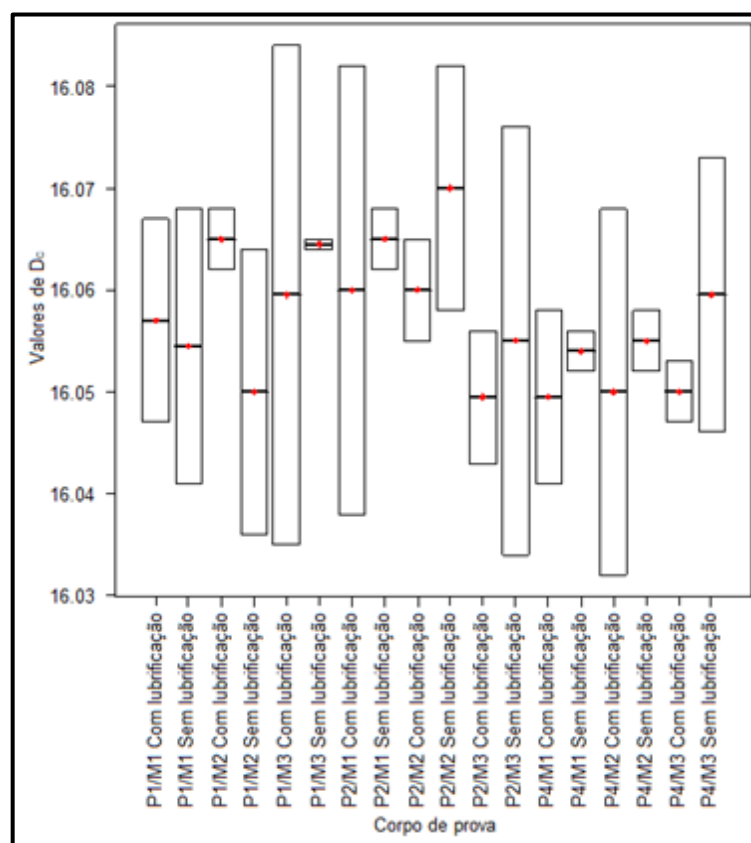


Figura 45 - Gráfico *Boxplot* dos valores de D_c em todos os casos ensaiados.

6.3.1.2 Diâmetro no final da zona fraturada D_F

A análise dimensional de D_F se torna importante principalmente para a verificação da usabilidade dos componentes que sofrem uma operação de corte por cisalhamento convencional. A zona fraturada deve ser prevista quando este processo é utilizado em um componente fabricado a partir de uma chapa metálica. Entretanto, uma análise deve ser feita para verificar se esta característica do corte irá ou não afetar a usabilidade do furo realizado pelo processo de corte convencional. De maneira geral, a fratura ocorre quando o limite de resistência a ruptura (R_m) do material é superado pela tensão causada pela aplicação da força de corte realizada pelo punção. Como característica dimensional, a zona de ruptura ou de fratura apresenta um diâmetro maior (no caso de *blanking*) em relação a D_C . Na maioria dos casos esta região possui paredes inclinadas e por isso a análise de D_F é realizada no final da fratura, conforme apresentado na Figura 43.

A Figura 46 mostra as médias dos valores obtidos das medições do diâmetro no final da zona de fratura com seus respectivos erros padrão. O gráfico abaixo agrupa os elementos de corte utilizados em cada ensaio e separa os resultados obtidos do corte realizado com o uso de lubrificação e seco.

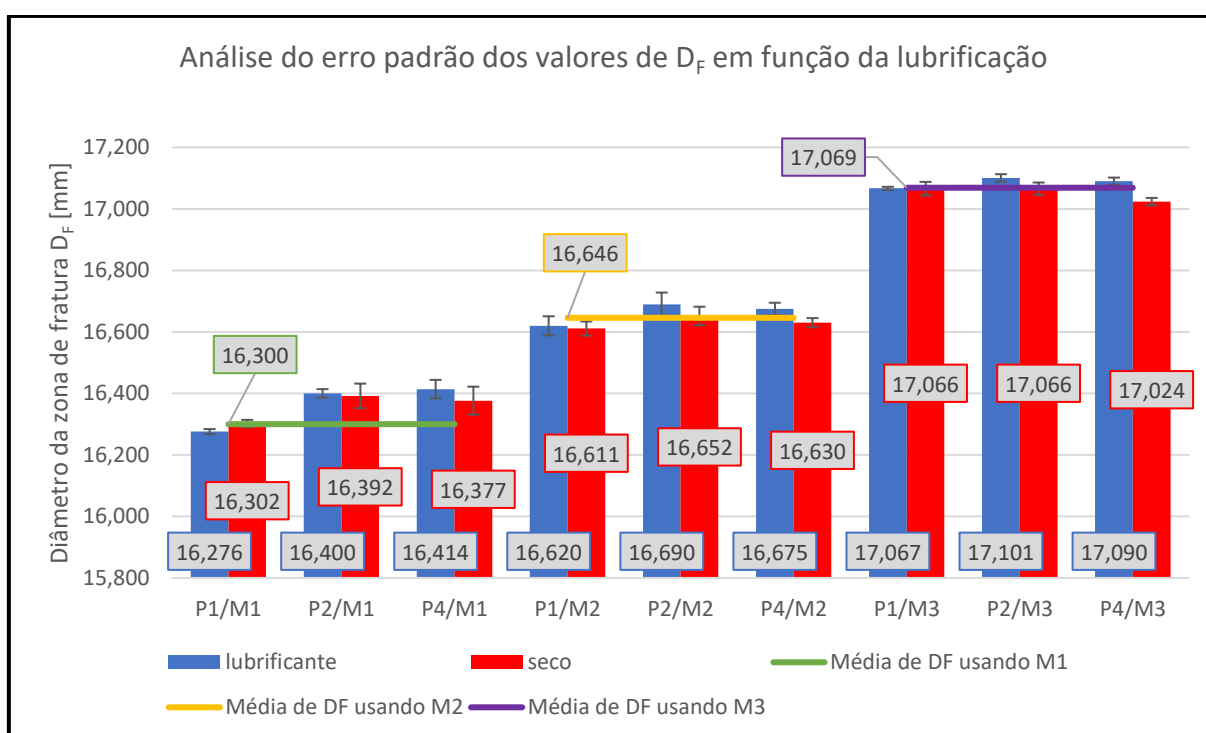


Figura 46 - Erros padrão dos valores de D_F dos corpos de prova.

Como complemento ao gráfico apresentado na Figura 46, foi gerado um gráfico *Boxplot* que correlaciona todos os valores de D_F com todos os parâmetros do processo ensaiados. Este gráfico é apresentado na Figura 47.

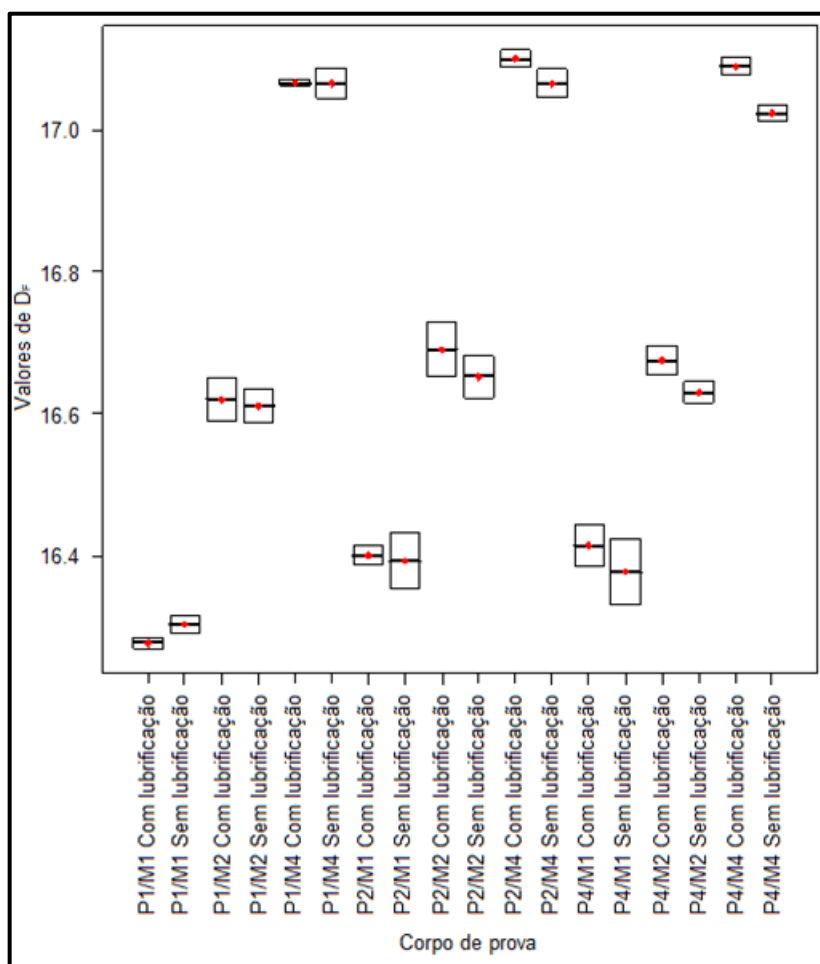


Figura 47 - Gráfico *Boxplot* dos valores de D_F em todos os casos ensaiados.

Ao analisar os gráficos apresentados nas Figura 46 e na Figura 47, é possível verificar que o uso de lubrificação no processo de corte não apresenta influência na alteração de D_F . Esta conclusão pode ser obtida ao analisar a baixa variação dos valores de D_F (variação máxima de 0,39%) ao utilizar o mesmo punção e a mesma matriz no teste. Outra característica que comprova que o uso de lubrificante não exerce influência significativa nos valores de D_F é que, em alguns casos, o uso de lubrificação faz com que o diâmetro da zona de fratura seja maior e em outros casos esta medida é menor, mostrando que os resultados são aleatórios.

A análise de Fisher (com significância de 5%) para o teste de múltiplas combinações, apresentado no APÊNDICE H, também reforça que o uso de lubrificação no processo não altera os valores do diâmetro no final da zona cisalhada. A parcela de dados que compara o uso de lubrificação no processo está sendo apresentado na Figura 48.

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>	<i>Conclusão</i>
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	-0,026	-0,100	0,050	0,462	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	0,008	-0,060	0,080	0,798	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	0,038	-0,040	0,110	0,977	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	0,009	-0,060	0,080	0,820	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	0,038	-0,030	0,110	0,287	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,045	-0,030	0,120	0,325	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	0,001	-0,070	0,070	0,293	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	0,035	-0,040	0,110	0,210	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,066	-0,010	0,140	0,073	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Figura 48 - Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação da lubrificação.

Uma vez que o uso de lubrificação não apresentou influência nos valores de D_F no processo de corte realizado neste estudo, optou-se por remover este parâmetro do restante das análises. Desta forma, as médias dos valores de D_F para os processos realizados com e sem o uso de lubrificação foram utilizados para a verificação da influência dos elementos de corte nos valores do diâmetro da zona cisalhada. Por conta disso, o gráfico apresentado na Figura 49 mostra os valores das médias dos valores de D_F desconsiderando a lubrificação das análises.

Ao verificar o gráfico apresentado na Figura 49, é possível verificar a influência que as alterações dos elementos de corte apresentam nos valores de D_F . Com isso é possível concluir que a variação na geometria de afiação do punção (α) não teve influência significativa na alteração desta coordenada. Para comprovar esta conclusão, ainda pode ser visto que, da mesma forma que no gráfico que analisa a influência da lubrificação frente a alteração de D_F , existe uma certa aleatoriedade nos valores de D_F quando o punção é alterado.

A Figura 50 apresenta o teste de comparação múltiplas usando uma significância de 5%. Ao analisar os valores de P-valor desta tabela, observa-se que em todos os casos o valor é igual a zero o que significa que os processos comparados se diferem ao ser analisados entre si.

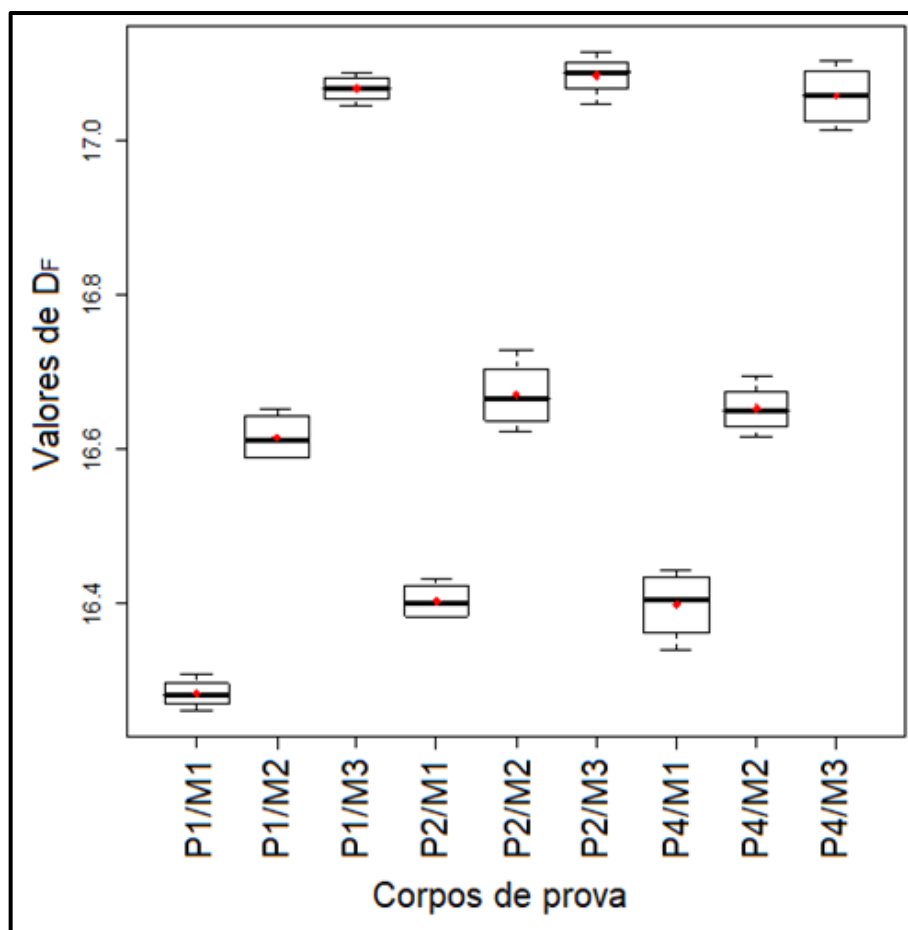


Figura 49 - Gráfico *Boxplot* dos valores de D_F ao variar os elementos de corte.

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1-P2/M1	-0,120	-0,170	-0,070	0,000	DIFERENTES
P1/M1-P4/M1	-0,115	-0,160	-0,070	0,000	DIFERENTES
P2/M1-P4/M1	0,005	-0,040	0,050	0,000	DIFERENTES
P1/M2-P2/M2	-0,055	-0,100	-0,010	0,000	DIFERENTES
P1/M2-P4/M2	-0,037	-0,090	0,010	0,000	DIFERENTES
P2/M2-P4/M2	0,018	-0,030	0,070	0,000	DIFERENTES
P1/M3-P2/M3	-0,017	-0,070	0,030	0,000	DIFERENTES
P1/M3-P4/M3	0,009	-0,040	0,060	0,000	DIFERENTES
P2/M3-P4/M3	0,026	-0,020	0,070	0,000	DIFERENTES

Figura 50 - Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação do ângulo de afiação do punção.

Por fim, a Figura 49 também mostra a influência que as folgas de corte apresentam nos valores médios de D_F . Analisando este gráfico, fica evidente que existe uma correlação direta da medida de D_F com a variação da folga de corte dada nas matrizes utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. A variação da folga é

diretamente proporcional ao valor encontrado nesta coordenada, o que significa que, quanto maior for a folga de corte (w) maior será a medida encontrada no final da zona fraturada (D_F). A Figura 51 mostra o teste de Fisher de múltiplas comparações com grau de significância de 5% mostrando como os valores de D_F variam com as folgas de corte ensaiadas.

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>	<i>Conclusão</i>
P1/M1-P1/M2	-0,332	-0,380	-0,280	0,000	DIFERENTES
P1/M1-P1/M3	-0,783	-0,830	-0,730	0,000	DIFERENTES
P1/M2-P1/M3	-0,451	-0,500	-0,400	0,850	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1-P2/M2	-0,267	-0,320	-0,220	0,026	DIFERENTES
P2/M1-P2/M3	-0,680	-0,730	-0,630	0,127	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2-P2/M3	-0,413	-0,460	-0,360	0,438	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1-P4/M2	-0,253	-0,300	-0,210	0,476	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1-P4/M3	-0,658	-0,710	-0,610	0,690	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2-P4/M3	-0,405	-0,450	-0,360	0,270	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Figura 51 – Análise de Fisher dos valores de D_F com a variação da folga de corte.

Analisando a coluna de P-valor da Figura 51, é possível verificar que na maioria dos casos, os valores da média de D_F são semelhantes entre as matrizes utilizadas. Quando utilizada a matriz de corte com folga (w) de 3% foi a exceção.

Outra análise importante, é que D_F apresentou valores muito próximos dos valores de D_M para cada matriz utilizada. Conforme a Tabela 5, os diâmetros de M_1 , M_2 e M_3 são 16,38 mm, 16,76 mm e 17,26 mm, respectivamente. Ao comparar estes valores com a média dos valores de D_F apresentadas no gráfico da Figura 46, é possível verificar que a variação máxima entre eles é de apenas 1,10% e ocorreu quando foi utilizado uma folga de corte igual a 10%.

Com isso, pode-se concluir que a variação da folga de corte (w) foi o único parâmetro de corte que teve influência significativa na alteração do diâmetro no final da zona de fratura (D_F). Esse comportamento condiz com o que Boff *et al.* (2012) e Fang, Zang e Lou (2002) comentam em seus estudos.

6.3.2 Análise das alturas das zonas de corte

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas medições realizadas nas alturas das regiões encontradas na zona de corte. Primeiramente,

serão apresentados os resultados da análise dimensionais da altura resultante do efeito de bojamento (deformação plástica do material do corpo de prova, logo antes do início do cisalhamento do mesmo) (H_B). Em seguida será apresentado o resultado das medições da altura da zona cisalhada (H_C). Como complemento, foi analisada a altura da zona de fratura (H_F) ocasionada quando o limite de resistência a ruptura do material é superado. Por fim, a medida da altura da rebarba (H_R) para cada caso proposto também foi verificada e analisada.

Para facilitar o entendimento e compreensão dos dados obtidos, foram criadas a Tabela 12 e a Figura 52. Os dados apresentados na Tabela 12 mostram os valores médios medidos pelo estereoscópio mencionado anteriormente na seção 3.6 com os seus valores sendo apresentados em milímetros e em percentual que este valor representa quando comparado com a espessura (s) do material utilizado para a realização dos testes práticos. O percentual de H_R é apresentado com valores negativos pois a rebarba é uma porção de material que se soma ao valor da espessura (s).

Tabela 12 - Medidas das alturas da região de corte.

Corpo de prova	H _C [mm]	% H _C em relação à espessura	H _F [mm]	% H _F em relação à espessura	H _B [mm]	% H _B em relação à espessura	H _R [mm]	% H _R em relação à espessura
M1 (w = 3%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Com lubrificação	3,565	56,677%	2,725	43,323%	0,060	0,954%	0,030	-0,477%
M1 (w = 3%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Sem lubrificação	3,828	60,947%	2,453	39,053%	0,030	0,478%	0,020	-0,318%
M1 (w = 3%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Com lubrificação	4,440	70,701%	1,840	29,299%	0,050	0,796%	0,230	-3,662%
M1 (w = 3%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Sem lubrificação	3,300	52,381%	3,000	47,619%	0,060	0,952%	0,290	-4,603%
M1 (w = 3%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Com lubrificação	1,493	23,779%	4,787	76,221%	0,060	0,955%	0,320	-5,096%
M1 (w = 3%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Sem lubrificação	1,933	30,835%	4,337	69,165%	0,060	0,957%	0,230	-3,668%
M2 (w = 6%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Com lubrificação	1,640	26,156%	4,630	73,844%	0,060	0,957%	0,010	-0,159%
M2 (w = 6%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Sem lubrificação	1,863	29,766%	4,397	70,234%	0,030	0,479%	0,020	-0,319%
M2 (w = 6%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Com lubrificação	1,457	23,232%	4,813	76,768%	0,050	0,797%	0,030	-0,478%
M2 (w = 6%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Sem lubrificação	1,803	28,807%	4,457	71,193%	0,070	1,118%	0,030	-0,479%
M2 (w = 6%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Com lubrificação	1,583	25,293%	4,677	74,707%	0,080	1,278%	0,020	-0,319%
M2 (w = 6%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Sem lubrificação	1,450	23,126%	4,820	76,874%	0,060	0,957%	0,030	-0,478%
M3 (w = 10%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Com lubrificação	1,493	23,779%	4,787	76,221%	0,080	1,274%	0,020	-0,318%
M3 (w = 10%) e P1 ($\alpha = 0^\circ$) Sem lubrificação	1,500	23,885%	4,780	76,115%	0,070	1,115%	0,020	-0,318%
M3 (w = 10%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Com lubrificação	1,200	19,169%	5,060	80,831%	0,010	0,160%	0,040	-0,639%
M3 (w = 10%) e P2 ($\alpha = 5^\circ$) Sem lubrificação	1,588	25,279%	4,693	74,721%	0,070	1,115%	0,020	-0,318%
M3 (w = 10%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Com lubrificação	1,470	23,482%	4,790	76,518%	0,040	0,639%	0,040	-0,639%
M3 (w = 10%) e P4 ($\alpha = 10^\circ$) Sem lubrificação	1,193	19,032%	5,077	80,968%	0,060	0,957%	0,040	-0,638%

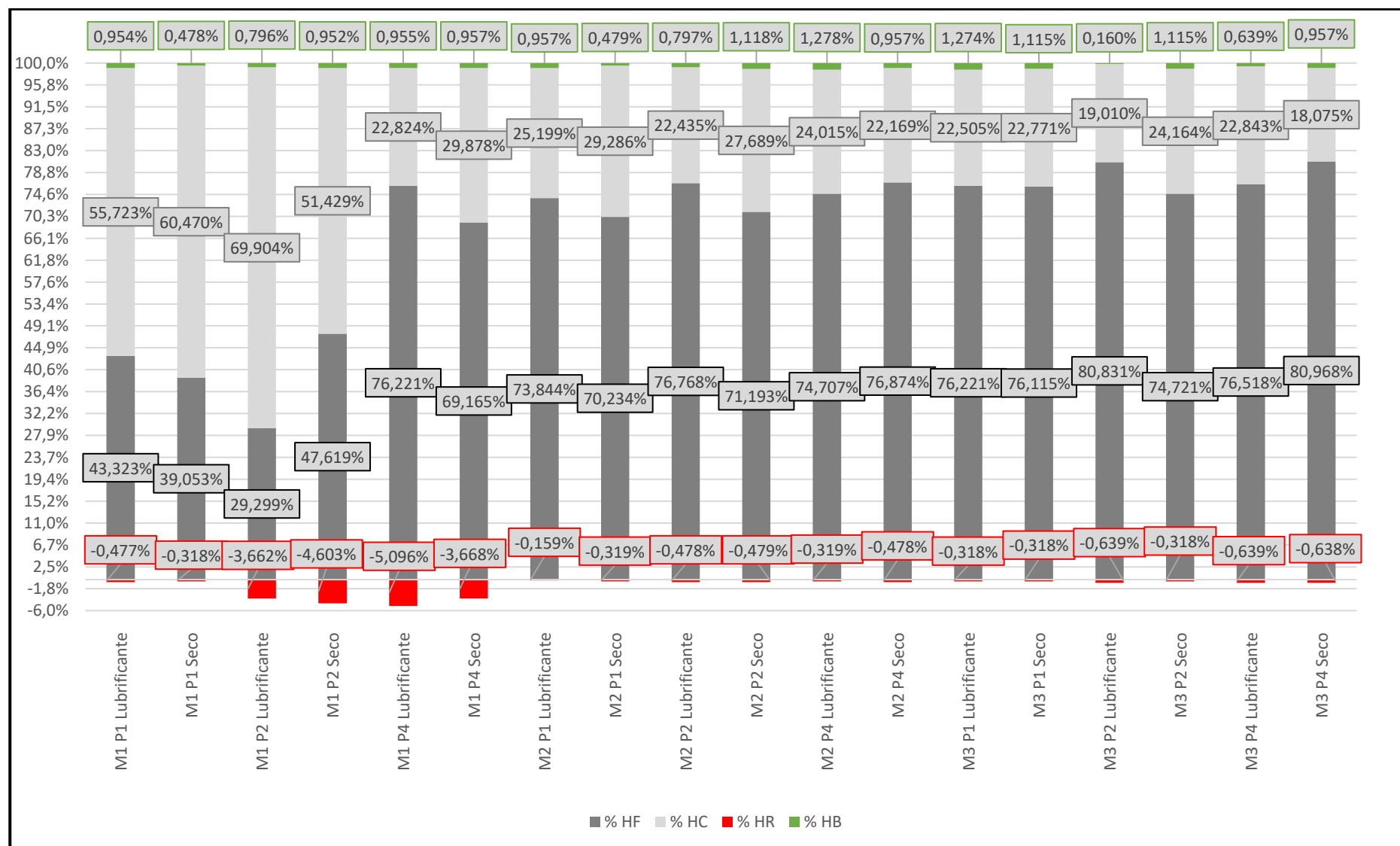


Figura 52 - Representatividade da altura de cada zona da região de corte.

6.3.2.1 Análise dimensional da altura de bojamento H_B

O efeito de bojamento acontece devido a deformação plástica do material até que o limite de resistência ao cisalhamento do material seja superado pelas tensões ocasionadas pela força de corte (F_c). Esta região tende a ser menor conforme a resistência mecânica aumenta. Pelo gráfico apresentado na Figura 52 é possível verificar que em todos os corpos de prova ensaiados, a altura H_B teve uma representatividade muito baixa em relação à espessura (s) do material usado nos testes, apresentando um valor médio de 0,89%. Isso se deve pelo comportamento mecânico do material ensaiado. Por se tratar de aço com alto valor de resistência mecânica, o mesmo não permite grandes deformações plásticas antes de iniciar a fratura. Outra característica mecânica que explica este comportamento é a proximidade dos valores de R_e e R_m do aço utilizado (verificar APÊNDICE E). Desta forma, o material apresenta apenas uma pequena deformação plástica antes de iniciar a fratura. Assim, conclui-se que a altura da zona de bojamento (H_B) não teve influência significativa em nenhuma variação proposta neste trabalho.

Hilditch e Hodgson (2005) apenas encontraram variações significativas nos valores H_B utilizando folgas maiores do que 15%. Neste estudo, os autores realizaram a operação de corte por cisalhamento com folgas que correspondem a até 50% do valor da espessura da chapa.

6.3.2.2 Análise dimensional da altura da zona cisalhada H_c

A altura da zona cisalhada (H_c) pode ser dita como a mais importante em comparação com as demais zonas da região do corte. Os valores de H_c apresentados na Tabela 12 representam uma média dos valores obtidos dos picos e vales medidos pelo Estereoscópio mencionado no Capítulo 3. Analisando o gráfico apresentado na Figura 52, tem-se que o valor médio da zona cisalhada é de 1,99 mm representando 31,59% da espessura da chapa ensaiada. Outras análises mais detalhadas podem ser realizadas verificando o gráfico apresentado acima.

O uso de lubrificação não apresentou influência significativa na alteração dos valores de H_c . Os valores desta coordenada com a utilização de lubrificante e no corte

realizado à seco se mostraram aleatórios onde o valor de H_c tendeu a um aumento em alguns casos e a diminuição em outras ocasiões.

Os valores de H_c mais significativos foram encontrados quando foram utilizados o punção P_1 ($\alpha = 0^\circ$) e P_2 ($\alpha = 5^\circ$) em conjunto com a matriz M_1 ($w = 3\%$) onde a média nestes casos foi de 3,73 mm (59,20%). Isso pode ser explicado devido às altas forças de corte envolvidas no processo utilizando estes elementos de corte. Estas forças de operação elevadas fazem com que a região de corte seja submetida a forças de compressão mais altas, o que auxilia no retardo do início da fratura do material. Outras análises e comentários referente ao aumento de H_c utilizando estes elementos de corte serão feitas nos capítulos seguintes. Entretanto, como será verificado nas seções futuras deste estudo, a qualidade da região cisalhada nestes casos se mostrou bastante prejudicada. Os altos valores de H_c encontrados nos processos usando M_1 em conjunto com os punções P_1 e P_2 são ocasionados principalmente pelo escoamento de partículas do material da chapa, conformadas mecanicamente à parede interna do furo. Estas partículas foram arrancadas do material ensaiado na zona de fratura e foram prensadas contra a parede do furo pelo movimento de avanço e retorno do punção de corte.

Para confirmar estas conclusões, o gráfico do tipo *Boxplot* apresentado na Figura 53 mostra os valores médios e os erros padrão dos valores coletados da medida de HC. Um teste de Fisher de múltiplas comparações foi realizado e os valores das análises estão sendo apresentados no APÊNDICE I. Avaliando o gráfico apresentado na Figura 53, é possível verificar os altos valores encontrados na coordenada de H_c ao utilizar a matriz M_1 em conjunto com os punções P_1 e P_2 com ângulo de afiação do punção de 0° e 5° unilateral, respectivamente.

Ao utilizar chapas com espessuras de 1,2, 1,6 e 2,0 mm de um AHSS DP980, Choi, Kim e Ko (2014) afirmam que o uso de um ângulo de afiação no punção fez com que os valores de H_c diminuíssem quão maior for o ângulo α . Ao aumentar o percentual de w dado nas matrizes de corte, os autores constataram que não houve um aumento significativo nos valores de H_c . Entretanto vale ressaltar que este comportamento foi encontrado no processo de corte realizado em chapas finas. Por isso, a não concordância entre os estudos explica a importância de avaliar o processo de corte realizado em chapas grossas e suas particularidades.

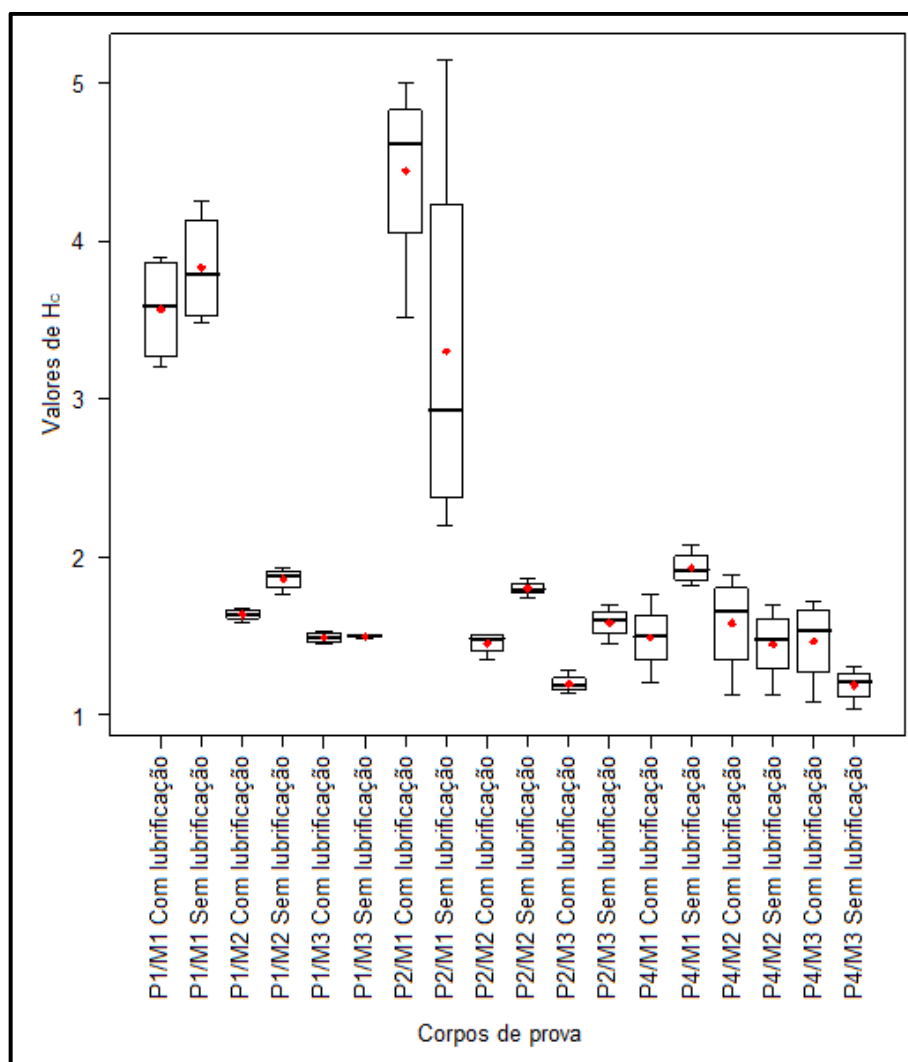


Figura 53 - Gráfico *Boxplot* dos valores de H_c em todos os casos ensaiados.

6.3.2.3 Análise dimensional da altura da zona de fratura H_f

A zona de fratura é uma região indesejada no processo de corte, entretanto, sempre que for utilizado o processo de corte por cisalhamento convencional esta região deve ser prevista e em geral, a sua altura (H_f) representa a maior fração da espessura da chapa. Os valores apresentados na Tabela 12 foram calculados descontando H_B e H_c da espessura (s) da chapa do material ensaiado. Como visto anteriormente os valores de H_B não foram consideravelmente altos. Desta forma o valor de H_f é quase que inteiramente relacionado aos valores de H_c .

Assim como nos valores de H_c , analisando o gráfico apresentado na Figura 52, é possível verificar que o uso de lubrificação não apresentou significativa influência nos valores de H_f . Com exceção do uso dos punções P_1 e P_2 quando utilizada a matriz

de corte M_2 , os demais testes mantiveram um valor médio de H_F de 4,72 mm, o que representa 75,31% da espessura da chapa. Ao utilizar os elementos de corte descritos, este valor diminuiu consideravelmente para 2,50 mm (39,82% da espessura). Os motivos são os mesmos mencionados na seção anterior.

6.3.2.4 Análise dimensional da altura da rebarba H_R

A rebarba também é uma característica indesejada no processo de corte por cisalhamento. Quando uma operação de corte gera rebarbas, o componente fabricado deve passar por processos subsequentes para remoção das mesmas.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 52 é possível verificar que na maior parte dos casos propostos a rebarba gerada foi mínima com uma média de H_R de 0,025 mm representando 0,42% da espessura da chapa. Entretanto ao utilizar M_1 ($w = 3\%$) com os punções P_2 ($\alpha = 5^\circ$) e P_4 ($\alpha = 10^\circ$), o surgimento de rebarbas se mostrou bastante significativo em relação aos demais testes. Com o uso destes elementos de corte, a média dos valores de H_R sobe para 0,268 mm o que corresponde a 4,26% da espessura da chapa.

De maneira geral, os resultados encontrados em relação a H_R são concomitantes com o estudo realizado por Choi, Kim e Ko (2014). Neste estudo os autores utilizam um material de alta resistência mecânica e afirmam que as rebarbas apenas começaram a ser mais perceptíveis com folgas de corte acima de 13% em relação a espessura da chapa.

A combinação do uso de punções chanfrados (com α igual a 5° e 10° , neste caso) em conjunto com uma baixa folga de corte (3% para a M_1) parece ter afetado significativamente o mecanismo de formação de rebarbas. Na seção seguinte será tratado com maiores detalhes o aspecto das superfícies geradas em cada corte realizado, entretanto, para complementar o motivo do aumento significativo nos valores de H_R é válido uma análise isolada destes casos. A Figura 54 mostra uma fotografia da superfície de corte do corpo de prova no qual foi utilizado o punção com $\alpha = 10^\circ$ (bilateral) e a matriz com folga de corte de 3%, o que pela Tabela 12 é o caso mais crítico quanto aos valores de H_R .

Como pode ser analisado na Figura 54, grande parte da altura da rebarba se deu por conta do arraste do material da parede do furo ao longo da espessura da

chapa. Este material que, provavelmente foi arrancado da parede do furo durante a operação, foi pressionado contra a parede do furo e a superfície do punção de corte em questão. Devido a resistência mecânica e dureza do material de fabricação do punção ser substancialmente mais elevada em comparação com o material da chapa ensaiada, o defeito foi dado inteiramente na parede do furo. Isso fez com que uma deformação plástica localizada na parte inferior da chapa contribuísse com o aumento significativo de H_R . Este fenômeno também foi encontrado por Akyürek, Yaman e Tekiner (2017) e Mucha e Jaworski (2017). Em seus estudos, os autores correlacionam este aumento de H_R principalmente ao uso de folgas de corte reduzidas.

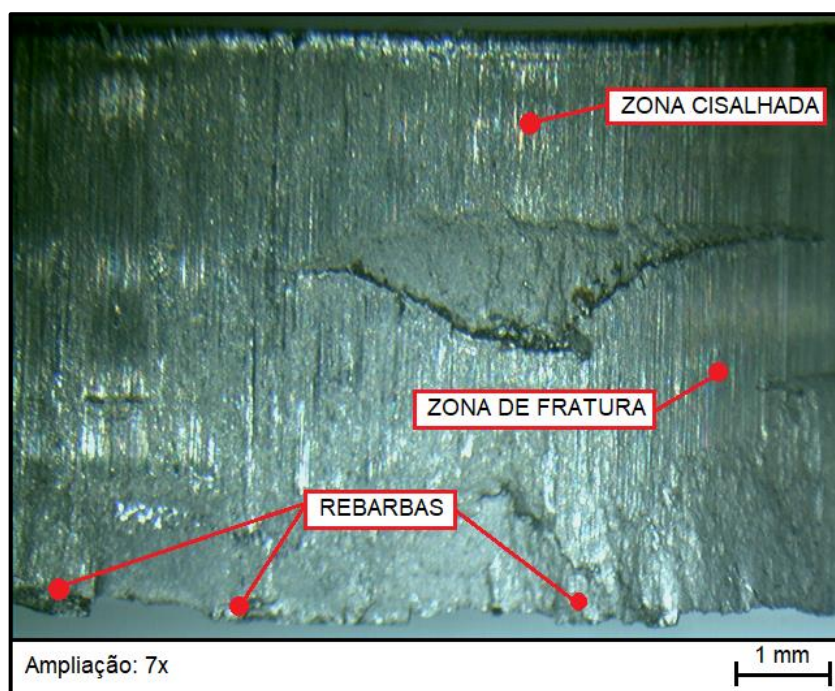


Figura 54 - Detalhe da rebarba gerada no processo de corte.

Pu *et. al.* (2018), em seu estudo concluiu que, o uso de uma a matriz de corte com folga reduzida produziu o que os autores chamaram de duplo cisalhamento, que nada mais é do que o material aderido à superfície da peça ser cortado pelo punção aumentando assim a superfície da zona cisalhada na parede interna do furo. Soares *et. al.* (2012) complementa que valores muito pequenos de folga de corte acabam por restringir o fluxo do material cortado para fora da furação.

De maneira geral, a medida H_R encontrada na maioria dos ensaios realizados condizem com que os estudos de outros autores concluíram. Shaheen *et al.* (2019) afirmam que as alturas de rebarbas do produto final são mínimas quando as chapas são mais espessas e maiores quando as chapas são mais finas. Os autores também concluem que o uso de punções chanfrados forneceram alturas mínimas de rebarbas que são menores que 0,034 mm para uma chapa metálica. Golovaschenko, Shneiderov e Guseva (2009) também concluem em seus estudos que a geração de rebarba é quase nula ao utilizar-se matrizes de corte com folgas (w) de 5% a 15% ao realizar a operação de corte convencional em um AHSS DP 500.

6.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DA REGIÃO CISALHADA

Como complemento das análises realizadas nos corpos de prova após a realização dos testes práticos propostos neste estudo, foi feita a análise qualitativa da superfície da parede de cada furo realizado. O objetivo principal desta análise é o de demonstrar, para cada caso, as particularidades frente a qualidade do corte realizado. Para isso, foram realizadas algumas fotografias da parede do furo realizado em todos os corpos de prova. Estas fotografias foram feitas após a usinagem dos blanks como mencionado na seção 5.2. As imagens mostram a região central de toda a espessura da chapa metálica utilizada nos testes conforme apresentado na Figura 55.

Esta seção irá apresentar os resultados separadamente da influência da lubrificação no corte, do uso das diferentes geometrias de afiação do punção (α) e por fim, da influência da folga de corte (w) dada nas matrizes utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

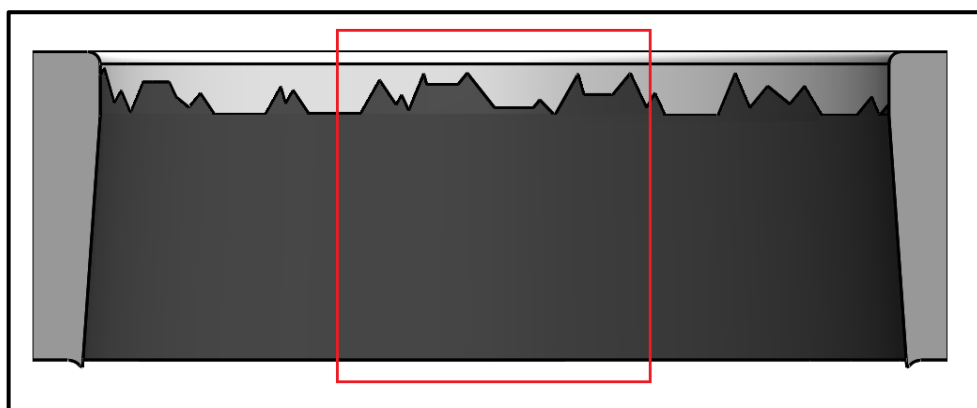


Figura 55 - Região de análise da qualidade da parede do furo.

6.4.1 Influência da lubrificação na qualidade da região do corte

Esta seção irá apresentar em forma de imagens, os resultados obtidos em cada teste realizado. Isso irá facilitar a comparação entre o uso de lubrificante na operação e no corte realizado à seco em cada combinação de elementos de corte proposta neste trabalho.

A Figura 56 mostra as fotografias da parede interna do furo realizado em cada teste prático. Estas imagens estão agrupadas pelos elementos de corte utilizados em cada ensaio. Desta forma, é possível verificar as imagens com foco na análise do uso de lubrificação durante os ensaios. As imagens das colunas à esquerda mostram os resultados do corte realizado com o uso de lubrificação enquanto na coluna da direita são apresentadas as imagens das paredes dos furos realizados na operação à seco. Uma legenda foi inserida junto à imagem demonstrada na Figura 56 para facilitar o entendimento dos elementos de corte utilizados em cada situação, assim como a escala das fotografias. As imagens foram feitas por um estereoscópio trinocular, conforme apresentado na seção 3.6 e foi utilizado uma ampliação de 7x para a realização das fotografias.

Ao analisar as imagens disponibilizadas na Figura 56, é possível verificar que o uso de lubrificação durante os processos de corte propostos neste estudo não apresentou grande influência no resultado final do furo realizado. Ao observar as fotografias com e sem o uso de lubrificante, tem-se um comportamento bastante semelhante nos dois casos. Algumas particularidades podem ser destacadas, entretanto outros fatores parecem ter mais efeito do que a lubrificação em si.

Uma característica que pode ser destacada nos processos no qual foi utilizado lubrificação, é o aspecto da zona de cisalhamento. Em alguns casos utilizando lubrificante, pode-se observar que o brilho desta região é ligeiramente mais intenso no que no processo realizado à seco.

Um fator de destaque mencionado por Aravind, Chakkingal e Venugopal (2020) em relação a lubrificação, é que ao utilizar folgas de corte (w) muito baixas, a tensão de corte tem seu valor consideravelmente aumentado durante a execução da operação e por conta disso, o lubrificante não é capaz de agir com eficácia pois é expelido da interface de contato entre o punção e a peça a ser cortada. Este fator

pode ter influenciado na ineficiência do lubrificante nos ensaios realizados neste estudo.

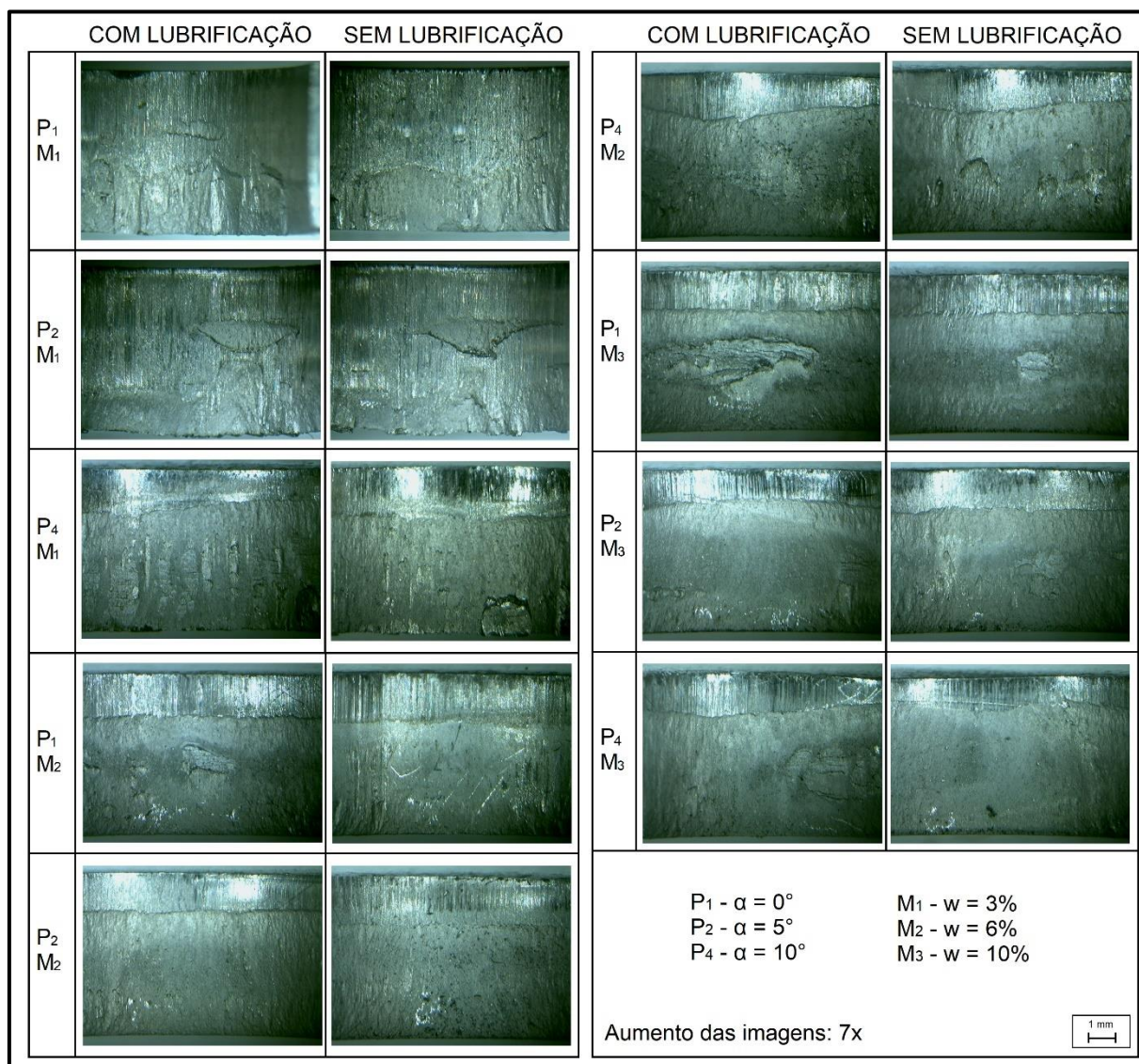


Figura 56 - Influência da lubrificação na qualidade superficial do furo.

6.4.2 Influência dos elementos de corte na qualidade superficial do furo

Nesta seção será avaliada a influência da folga de corte (w) dadas nas matrizes e da geometria de afiação do punção de corte (α) na qualidade superficial das paredes dos furos realizadas pelas operações de corte propostas neste estudo. Os resultados serão apresentados em forma de fotografias que foram agrupadas pelo

uso dos punções e matrizes utilizados nos ensaios. Desta forma, é possível realizar a comparação dos resultados para cada folga de corte (w) e para cada ângulo de afiação do punção utilizados nos testes práticos.

A Figura 57 apresenta os resultados da qualidade superficial da parede dos furos realizados com o uso dos punções em relação com as folgas de corte dadas nas matrizes utilizadas no decorrer do desenvolvimento prático proposto neste estudo. Com estas imagens é possível verificar o efeito do uso de cada punção de corte bem como a influência das folgas de corte das matrizes utilizadas.

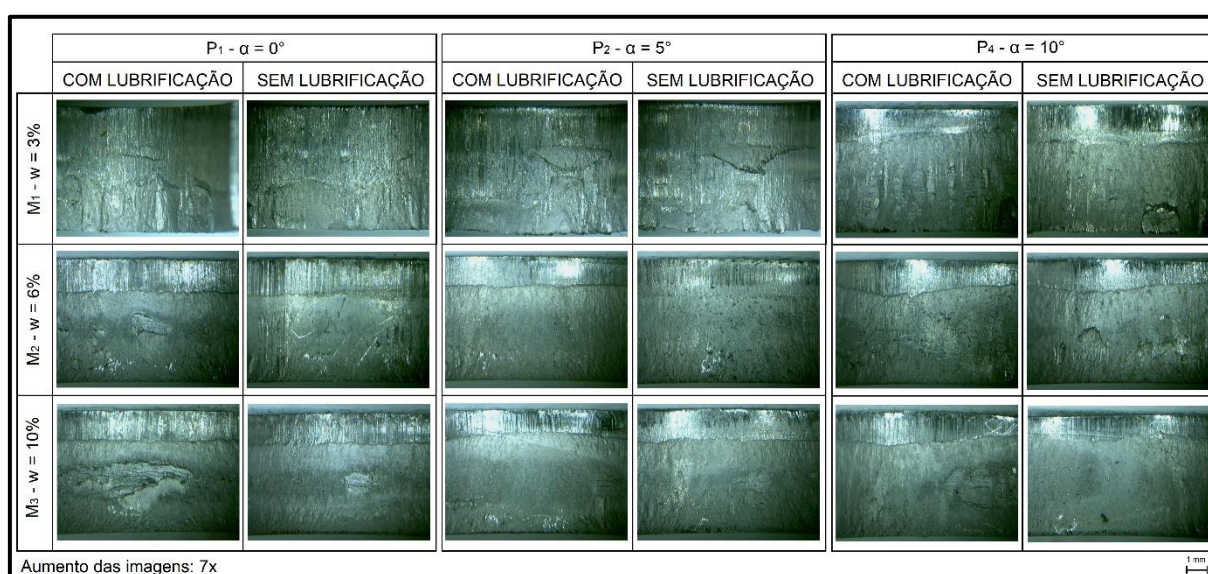


Figura 57 - Influência da folga de corte (w) e da geometria de afiação do punção (α) na qualidade superficial da parede do furo.

Ao analisar as imagens apresentadas na Figura 57 é possível verificar que, ao variar a geometria de afiação dos punções, a qualidade superficial da parede do furo também é alterada. Da mesma maneira, ao utilizar as diferentes folgas de corte o resultado da qualidade superficial do corte também é modificado. Também pode ser analisado que existe uma correlação direta entre a combinação de elementos de corte. Isso significa que a combinação de alguns elementos de corte em específico trazem resultados mais positivos em relação a outros quando a qualidade do furo é analisada.

De maneira geral, ao se utilizar folgas de corte muito baixas como é o caso de M₁ ($w = 3\%$) em conjunto com o punção de corte sem nenhuma geometria de afiação, como P₁ ($\alpha = 0^\circ$), o resultado estético da parede do furo foi o mais insatisfatório entre todos os casos. Nesta condição, quase não fica perceptível aonde

o material deixou de cisalhar para entrar na zona de fratura. O aspecto da parede do furo parece muito semelhante no início e no final da espessura da chapa. Isso pode ser explicado pelo fato de que a combinação destes dois elementos de corte (P_1 e M_1) foram os que apresentaram maiores valores de força de corte em comparação com os demais testes realizados. Ao que parece, o corte não foi realizado com uma característica puramente cisalhante e sim, com uma combinação de cisalhamento e fratura. Outra possibilidade que complementa esta teoria é de que, algumas partículas arrancadas da parede do furo (fratura) podem ter sido pressionadas entre as paredes interna do furo e externa do punção e que posteriormente estas partículas foram empurradas para baixo pelo movimento de avanço do punção. Um resultado semelhante foi obtido no estudo realizado por Akyürek, Yaman e Tekiner (2017) no qual também foi utilizada uma matriz de corte com folga de 3% em relação a espessura da chapa. Os autores explicam que este efeito é causado principalmente por conta do alto atrito gerado pela folga de corte reduzida onde o punção tende a laminar o material ao invés de cisalhar.

Ainda com a matriz M_1 com folga de corte de 3%, ao utilizar o punção com afiação α de 5° (P_2), os resultados referentes a qualidade do furo parecem ser mais satisfatórios. Desta vez, já é possível observar com maior nitidez as regiões de cisalhamento e de fratura, embora ainda pareçam estar um pouco homogeneizadas entre si. O mesmo mecanismo de cisalhamento e fratura mencionado acima parece ter ocorrido neste caso. A diferença parece que desta vez o cisalhamento foi mais predominante.

Quando o punção com ângulo de afiação bilateral (α) de 10° foi utilizado em conjunto com a matriz de corte M_1 , a qualidade do furo foi consideravelmente aumentada bem como comentado no estudo de Akyürek, Yaman e Tekiner (2017). Desta vez, é possível verificar com clareza as regiões de cisalhamento e de fratura do material.

Ao utilizar a matriz M_2 com folga de corte (w) de 6% em relação a espessura da chapa, a qualidade do corte também apresentou um aumento significativo na qualidade do corte em comparação ao uso do mesmo punção com a matriz M_1 . As zonas de cisalhamento e de fratura apresentam uma divisão nítida e são bem definidas. A altura cisalhada (H_c) neste caso é bastante constante, o que indica que o corte foi realizado da maneira esperada e com certa facilidade.

Ao combinar o uso de M_2 com os punções com um ângulo de afiação (α) diferente de 0° , como é o caso de P_2 e P_4 , o aspecto da região de corte se mostrou ainda mais satisfatório do que em comparação ao uso de P_1 . Novamente tem-se as zonas de cisalhamento e fratura bem definidas, entretanto, nestes casos o valor de H_c tem uma certa variação, principalmente quando o punção com ângulo α bilateral de 10° foi utilizado. Este comportamento é bastante coerente pois os pontos de contato do punção ao longo do perímetro de corte do material ensaiado acontecem em momentos diferentes o que modifica a distribuição da força de corte ao longo da área de corte (A_c) retardando em alguns pontos o início da fratura do material.

Da mesma forma que foi verificado com o uso de M_2 , o uso dos punções com α de 5° e 10° com M_3 também obtiveram um resultado satisfatório quanto a qualidade da parede do furo realizado. Porém, a mesma questão da altura da zona cisalhada (H_c) ocorreu. A qualidade do corte parece ter sido aumentada devido aos menores esforços de corte necessários para a realização da operação de corte utilizando estes elementos de corte em conjunto.

De maneira geral, o uso de uma folga de corte (w) muito pequena, como é o caso de M_1 (com $w = 3\%$), foi o que apresentou os resultados mais insatisfatórios quanto a qualidade da parede do furo cisalhada. O uso do punção P_1 com α igual a 0° , apesar de apresentar uma altura da zona de cisalhamento (H_c) mais estável, também fez com que defeitos localizados significativos aparecessem na superfície interna do furo. Desta forma, o uso das matrizes de corte com folgas de 6% e 10% em conjunto com os punções com ângulos de afiação de 5° e 10° foram os que apresentaram os resultados mais satisfatórios em relação a qualidade da parede interna dos furos realizados nos ensaios práticos deste estudo.

Os resultados obtidos neste trabalho quanto a qualidade da região de corte em relação a combinação do uso de ferramentas vai de acordo com o estudo realizado por Mucha e Jaworski (2017) e Mucha e Jaworski (2016). Em seus estudos, os autores afirmam que a folga de corte dada entra a matriz e o punção tem influência significativa na qualidade da região do corte realizado.

7 CONCLUSÕES

Ao final do desenvolvimento deste trabalho conclui-se que a ferramenta instrumentada construída para a realização dos ensaios práticos atendeu perfeitamente às solicitações das demandas dos objetivos deste trabalho. O uso da instrumentação no processo proposto abre portas para o acompanhamento em tempo real dos processos, introduzindo o processo de corte realizado neste estudo nos conceitos da indústria 4.0 e também a manutenção baseada em condições (CBM) mencionada por Klinberg, e Boer (2008) que usa inteligência artificial em um processo de corte para o controle e na tomada de decisões.

Quanto a medição dos valores da força em cada caso proposto neste estudo, concluiu-se que o uso de lubrificação nos processos de corte realizados em uma chapa de aço HSLA com 6,3 mm de espessura não tiveram nenhuma influência nos valores da força máxima atingida nos testes.

O uso de um ângulo de afiação (α) unilateral de 5° foi a situação em que os valores de força de corte máxima foram os mais baixos, seguido do uso de um punção com ângulo α bilateral de 10° e por fim, o punção sem nenhum ângulo de afiação ($\alpha = 0^\circ$) foi o punção no qual os maiores valores de força foram encontrados. Estatisticamente, o uso de P_2 e P_4 se mostraram semelhantes quanto a redução dos valores de força.

O uso da matriz com folga de corte (w) igual a 3% da espessura do material foi o caso em que os maiores valores de força máxima foram atingidos. Já com a utilização das matrizes de corte com 6% e 10% de folga, a redução nos valores da força máxima foram semelhantes.

Como conclusão das análises da força de corte máxima, a combinação do uso do punção com ângulo de afiação bilateral de 10° em conjunto com a matriz de corte com folga (w) de 10% foi o que obteve os menores valores de força máxima, correspondendo ao valor de 173,9 kN. Em contrapartida, o uso do punção com α igual a 0° juntamente com a matriz com w igual a 3% apresentou um valor de força máxima de 201,8 kN, uma diferença de 13,84%.

Ao realizar a análise dimensional da região do corte nos corpos de prova utilizados na realização dos ensaios, pode-se concluir que o uso de lubrificação durante o processo não influenciou em nenhuma alteração das medidas de diâmetro

e alturas nem no surgimento de rebarbas. Os valores do diâmetro da zona cisalhada (D_C) não sofreram nenhuma alteração significativa com a alteração dos elementos de corte usados nos ensaiados. Entretanto percebeu-se que a folga de corte (w) influencia significativamente no diâmetro no final da zona de fratura (D_F). Os diâmetros encontrados da zona de fratura dos corpos de prova ensaiados, tendem a ser bastante semelhantes ao diâmetro das matrizes (D_M) utilizadas para a realização dos furos.

Os valores da altura de bojamento (H_B) podem ser ditos como insignificantes em todos os casos propostos tendo um valor máximo de 0,08 mm ao utilizar o punção com ângulo (α) de 0° e matriz com folga de corte de 10%. Quando o valor da altura da zona de cisalhamento (H_C) foi analisado, foi concluído que os seus valores foram mais elevados ao utilizar a matriz de corte com w igual a 3% em conjunto com os punções com ângulos de afiação α de 0° e 5° (unilateral). A média desta coordenada utilizando estes elementos de corte foi de 3,73 mm o que representa 59,2% da espessura da chapa. Com a combinação dos demais elementos de corte a média de H_C foi bastante semelhante com um valor médio de 1,49 mm (23,7% da espessura da chapa)

A aparição de rebarbas foi mínima na maioria dos ensaios tendo como um valor médio de H_R 0,025 mm. Entretanto, ao utilizar os punções com α diferente de 0° em conjunto com a matriz de corte com w de 3% da espessura da chapa, a rebarba gerada superou os 0,3 mm.

Por fim, com a análise qualitativa da zona de corte, concluiu-se que o uso de lubrificação apresentou uma influência mínima na qualidade da zona de corte, onde a alteração mais perceptível foi a intensidade do brilho da zona cisalhada que é ligeiramente maior do que nos processos realizados a seco. O uso das folgas de corte de 6% e 10% em relação a espessura do material em conjunto com os punções de corte com ângulos de afiação α de 5° e 10° apresentaram os resultados mais satisfatórios quanto a qualidade da região de corte do furo.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo deixa como uma possível lacuna para a realização de trabalhos futuros, a realização das mesmas análises feitas neste trabalho em caráter de produção. Os testes realizados neste trabalho não levaram em consideração a realização em grande escala de produção. Desta forma, como sugestão para trabalhos futuros, a ferramenta e o *DAQ* desenvolvidos podem ser utilizados para verificar a influência da lubrificação, da geometria de afiação dos punções de corte e das folgas de corte frente a força para realização da operação, do dimensional e à qualidade da região de corte, quando os testes forem realizados em produção em larga escala.

Outra análise possível de ser realizada é nos elementos de corte, principalmente no que se diz respeito ao desgaste. A verificação da influência que estes desgastes podem representar em cada uma das análises descritas anteriormente (força de corte, dimensões e qualidade da região do corte). Um estudo semelhante foi realizado por Akyürek, Yaman e Tekiner (2017) porém, os autores utilizaram uma chapa com espessura bastante inferior e em um aço com resistência mecânica significativamente mais baixa em relação ao usado neste trabalho. Isso abre uma possibilidade para ampliar os estudos realizados com um material espesso de um aço de alta resistência mecânica. Uma texturização superficial no punção de corte, como a indicada no trabalho de Kitamura *et al.* (2016), também seria uma alternativa de modificação do punção com a finalidade de auxiliar a lubrificação na região de corte.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AKYÜREK, F.; YAMAN, K.; TEKINER, Z.: An experimental work on tool wear affected by die clearance and punch hardness. **Arabian Journal For Science And Engineering**, Ankara, v. 42, p.4683-4692, maio 2017.

ALBERTAZZI, A. R.; SOUZA, A.: **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.

ARAVIND, U.; CHAKKINGAL, U.; VENUGOPAL, P.: A Review of fine blanking: Influence of die design and process parameters on edge quality. **Journal Of Materials Engineering And Performance**. Madras, v. 30, p. 1 - 32. nov. 2020.

ARAVIND, U.; CHAKKINGAL, U.; VENUGOPAL, P.: Investigation of a modified fine piercing process on extra deep drawing grade steel. **Journal Of Materials Engineering And Performance**. Madras, v. 28, p. 7789-7803. dez. 2019.

ASTM. **A 681**: Standard specification for tool steels alloy. 08 ed. West Conshohocken. 2008. 14 p.

BALAKRISHNAN, M.; ISSAC, J. C.: Design of the multi-stage progressive tool for blanking a sheet metal component. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing**, Kottayam, v. 15, p.875-881, maio 2014.

BALBINOT, A; BRUSAMARELLO, V. J.: **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. v. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A.: **DeGarmo's: Materials and process in manufacturing**. 11. ed. Danvers: Wiley, 2012. 1251 p.

BOFF, U; SCHAEFFER, L.: Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de corte. **Corte e Conformação de Metais**, Porto Alegre, v. 78, p.82-92, out. 2011.

BOFF, U. *et al.*: Uma revisão dos processos de corte convencional e *fineblanking*. **Corte e conformação de metais**, v.84, n. 7, p.24 – 33, abr. 2012.

BOHDAL, L. *et al.*: 3D Finite element modelling of sheet metal blanking process. *In: 21st International ESAFORM Conference on Material Forming*. Koszalin: AIP Conference Proceedings, v. 1960, p. 070006-1 -070006-6. abr. 2018.

BRATUS, V.; KOSEL, F.; KOVAC, M.: Determination of optimal cutting edge geometry on a stamped orthotropic circular electrical steel sheet. **Journal Of Materials Processing Technology**. Ljubljana, v. 210, p. 396-407. mar. 2010.

BRITISH STANDARD: **BS EN 10149-2**: Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming - Part2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels. Bruxelas: CEN, 2013. 17 p.

BRITISH PATENT: **Electric Resistance Devices**. UK nº 728,606, 28 ago. 1952, 20 abr. 1955.

BRITO, O.: **Estampos de Corte**: Técnicas e aplicações. São Paulo: Hemus, 2004. 192 p.

CHOI, H.; KIM, B.; KO, D.: Effect of clearance and inclined angle on sheared edge and tool failure in trimming of DP980 sheet. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, Busan, v. 28, p.2319-2328, jun. 2014.

CHUMRUM, P; KOGA, N; PREMANOND, V.: Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, Saitama, v. 79, p.1035-1042, 24 fev. 2015.

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

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

DIN. **EN 10149-2**: Hot Rolled Flat Products Made of High Yield Strength Steels for Cold Forming. Berlin, 2013. 15p.

DOEBELIN, E. O.: **Measurement Systems**: Application and design. Ohio: Mcgraw-Hill, 2003.

EARY, D. F.; REED, E. A.: **Techniques of Pressworking Sheet Metal**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1974. 596 p.

ETO, A. M.: **Otimização da precisão em furos estampados por ferramenta combinada de puncionamento e brochamento**. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, UTPR, Curitiba, 2005.

FANG, G.; ZENG, P.; LOU, L.: Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in the blanking process. **Journal of Materials Processing Technology**. Beijing, v.122, p. 249-254. fev. 2002.

FIALHO, A. B.: **Instrumentação Industrial**: Conceitos, aplicações e análises. São Paulo: Erica, 2005.

FRATESCHI, C; NEGRINI, L. G.: **Estampos de corte: Elementos**. São Carlos: Edusp, 1983. 64 p.

GALDOS, L. *et al.*: Experimental and numerical investigation of the cutting force during the angle shearing of several steels. *In: 21st International ESAFORM Conference on Material Forming*. Mondragón: AIP Conference Proceedings, 2019. v. 2113, p. 080024-1 – 080024-6.

GAUDILLIÈRE, C. *et al.*: High speed blanking: An experimental method to measure induced cutting forces. **Experimental Mechanics**, Paris, v. 53, p.1117-1126, mar. 2013.

GHOSH, A; MALLIK, A. K.: **Manufacturing Science**. 2. ed. Mumbai: Pearson India, 2010. 406 p.

GOLOVASHCHENKO, S. F.; ILINICH, A. M.: Analysis of trimming processes for advanced high strength steels. **SAE International Journal Of Materials And Manufacturing**. Beirut, v. 1, p. 818-823. jul. 2009.

GORITSKII, V. M.; SHNEIDEROV, G. R.; GUSEVA, I. A.: Study of impact toughness anisotropy and tendency towards lamination of Strenx 650 MC and 700 MC steels after thermomechanical rolling. **Metallurgist**. Moscow, v. 62, p. 753-765. nov. 2018.

GÜRÜN, H; GÖKTAŞ, M; GÜLDAŞ, A.: Experimental examination of effects of punch angle and clearance on shearing force and estimation of shearing force using fuzzy logic. **Transactions Of Famena**, Ankara, v. 40, p.19-28, 22 nov. 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.: **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HAREMZA, C.; SANTIAGO, A.; SILVA, L. S.: Experimental behaviour of heated composite steel–concrete joints subject to variable bending moments and axial forces. **Engineering Structures**. Coimbra, v. 51, p. 150-165. fev. 2013.

HBM: **Hottinger Baldwin Messtechnik**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

HILDITCH, T. B.; HODGSON, P. D.: Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet: Part 1—Experimental observations. **Journal of Materials Processing Technology**. Geelong, v. 169, p. 184-191. jan. 2005.

HOFFMANN, K.: **An introduction to measurements using strain gauges**. Darmstadt: HBM GmbH, 2012a. 257 p.

HOFFMANN, K.: **An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges**. Darmstadt: HBM GmbH, 2012b.

HOFFMANN, H.; NEUGEBAUER, R.; SPUR, G.: **Handbuch umformen**. München: Hanser, 753 p. 2012.

HU, D. *et al.*: Finite element analysis of the thermal effect in high-speed blanking of thick sheet metal. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, Nanjing, v. 80, p.1481-1487, abr. 2015.

ISO-376: Metallic Materials - Calibration of force-proving instruments used for verification of uniaxial testing machines. 4 ed. Geneva, 2011. 11 p.

KEELER, S.; KIMCHI, M.; MOONEY, P. J.: **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0**. World Auto Steel, 2017. 314 p.

KITAMURA, K. *et al.*: Tribological effects of punch with micro-dimples in blanking under high hydrostatic pressure. **Cirp Annals: Manufacturing Technology**. Nagoya, v. 65, p. 249-252. abr. 2016.

KLINGENBERG, W.; BOER, T.W.: Condition-based maintenance in punching/blanking of sheet metal. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, Groningen, v. 48, p.589-598, abr. 2008.

KORKMAZ, E. *et al.*: Dynamic characterization of multi-axis dynamometers. **Precision Engineering**. Pittsburgh, v. 38, p. 148-161. fev. 2014.

LAJARIN, S. F. *et al.*: A novel punch design approach with progressive clearance variation for the punching-broaching process. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, p. 1 – 9, 2011.

LANGE, K.: **Handbook of metal forming**. Michigan: Mc Graw Hill, 1985. 1204 p.

LANGE, K.: **Umformtechnik – Handbuch für Industrie and Wissenschaft – Band3: Blechbearbeitung**. Berlim, Colônia: Springer Verlag, 1990.

LEVY, B. S.; TYNE, C. J. V.: Review of the shearing process for sheet steels and its effect on sheared-edge stretching. **Journal of Materials Engineering And Performance**, Chicago, v. 21, p.1205-1213, jul. 2011.

LIEBIG, H. P.: **Fertigungstechnik: Umformen**. Universidade Técnica de Hamburg. (Apostila). Hamburg. 1993.

LIND, L. *et al.*: Description of punch wear mechanism during fine blanking process. *In: 7th International DAAM Baltic Conference - Industrial Engineering*, 2010, Tallinn. p. 504-509.

LUO, S. Y.: Effect of the geometry and the surface treatment of punching tools on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate. **Journal Of Materials Processing Technology**. Taipei, v. 88, p. 122-133, 1997.

MACKENSEN, A. *et al.*: Experimental investigation of the cutting force reduction during the blanking operation of AHSS sheet materials. **Cirp Annals**, Munich, v. 59, p.283-286, 2010.

MARCONDES, P. V. P.: Manufatura de chapas metálicas – Puncionamento. **Ferramental**. Curitiba, n. 22, p. 25 – 28. mar./abr. 2009.

MILLER, V.: **Recommended guide for determining and reporting uncertainties for balances and scales**. USA: Nistir 6919, 2002. 82 p.

MOGHADAM, M. *et al.*: Analysis of lubricant performance in punching and blanking. **Tribology International**. Kongens Lyngby, v. 141, p. 1-8. jan. 2020.

MOGHADAM, M.: **Limits of lubrication in severe stamping operations**. 2019. 160 f. Tese (PhD) - Curso de Engenharia Mecânica, Technical University Of Denmark, Kongens Lyngby, 2019.

MORI, K.; MAENO, T.; FUZISAKA, S.: Punching of ultra-high strength steel sheets using local resistance heating of shearing zone. **Journal Of Materials Processing Technology**, Toyohashi, v. 212, p.534-540, fev. 2012.

MUCHA, J.: An experimental analysis of effects of various material tool's wear on burr during generator sheets blanking. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, Rzeszow, v. 50, p.495-507, fev. 2010.

MUCHA, J; JAWORSKI, J.: The quality issue of the parts blanked from thin silicon sheets. **Journal of materials engineering and performance**, Rzeszow, v. 26, p.1865-1877, mar. 2017.

MUCHA, J; JAWORSKI, J.: The tool surface wear during the silicon steel sheets blanking process. **Eksploatacja I Niezawodnosc - Maintenance And Reliability**, Rzeszow, v. 18, p.332-342, jun. 2016.

MUCHA, J.; TUTAK, J.: Analysis of the influence of blanking clearance on the wear of the punch, the change of the burr size and the geometry of the Hook blanked in the hardened steel sheet. **Materials**, Rzeszów, v. 12, p.1261-1276, abr. 2019.

NETO, R. C. B.: **Estudo da simulação computacional de processo combinado de puncionamento e brochamento com diferentes geometrias de punção**. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba, 2012.

NIESSNER, S.; LIEWALD, M. Identification of methods for the in-situ measurement of cutting forces in a tool-bound punching machine. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. v. 967, p. 012025-1 - 012025-9.

NISHAD, R. *et al.*: An overview of the methodologies used in the optimization process in sheet metal blanking. **International journal of Mechanical Engineering and Robotic Research**. Mumbai, v. 2, p. 307-314. abr. 2013.

NOVY, F. *et al.*: Fatigue properties of welded Strenx 700 MC HSLA steel after ultrasonic impact treatment application. **Materials Today**. Zilina, v. 32, p. 174-178. abr. 2020.

OLSSON, D.D.; BAY, N.; ANDREASEN, J. L.: Analysis of pick-up development in punching. **Cirp Annals**. Lyngby, v. 51, p. 185-190. out. 2002.

PINKAEW, T.; ASNACHINDA, P.: Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicles from the bending moments of bridges. **Engineering Structures**. Bangkok, v. 29, p. 2282-2293. dez. 2006.

POUSSIÉ, S.; RABAH, H.; WEBER, S.: Smart adaptable strain gage conditioner: Hardware/Software implementation. **IEEE Sensors Journal**. Nancy, v. 4, p. 262-267. abr. 2004.

PROVENZA, F.: **Estampos II**. São Paulo: F. Provenza, 1984.

PU, C. *et al.*: A Comprehensive study of hole punching force for AHSS. **SAE Technical Paper**. California, v. 0802, p. 1 - 6, abr. 2018.

QU, H.; MICHAL, G. M.; HEUER, A. H.: A 3rd generation advanced high-strength steel (AHSS) produced by dual stabilization heat treatment (DSHT). **Metallurgical and materials transactions A**. Cleveland, v. 44, p. 4450-4453. jul. 2013.

RIZAL, M. *et al.*: Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process. **Mechanical systems and signal processing**. Syiah Kuala, v. 52, p. 559-576. jul. 2014.

RAMOS, T. *et al.*: Comparison between finite element method simulation, digital image correlation and strain gauges measurements in a 3-Point Bending Flexural Test. **Procedia Engineering**. Porto, v. 114, p. 232-239. ago. 2015.

RACHIK, M.; ROELANDT, J. M.; MAILLARD, A.: Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation. **Journal of materials processing technology**. Compiègne, v. 128, p. 256-265. jun. 2002.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P.: **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação plástica**. Lisboa: Escolar Editora, 2005.

SAMEK, L; KRIZAN, D.: Steel – Material of choice for automotive lightweight applications. **Metal Review**. Brno, v. 23, p. 1-6. maio 2012.

SARANGI, H.; MURTHY, K. S. R. K.; CHAKRABORTY, D.: Optimum strain gauge locations for accurate determination of the mixed mode stress intensity factors. **Engineering Fracture Mechanics**. Guwahati, v. 88, p. 63-78. abr. 2012.

SCHAEFFER, L.: **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2005. 194 p.

SCHAEFFER, L.: **Manufatura por conformação mecânica**. Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, 2016.

SCHAEFFER, L; NUNES, R. M.; BRITO, A. M.: **Tecnologia da estampagem de chapas metálicas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2017. 126 p.

SCHEID, A.: **Curso básico de aços: Aços - Fabricação, transformação e Usos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010.

SHAHEEN, W. *et al.* Optimization of compound die piercing punches and double cutting process parameters using finite element analysis. **Journal of Engineering Manufacture**. Sydney, v. 234, p. 3-13. maio 2019.

SHIVPURI, R. *et al.*: Energy release rate-based approach for the wear of punches in precision blanking of high strength steel. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**. Columbus, v. 60, p. 307-310. jun. 2011.

SOARES, J. A. *et al.*: Study of the punch–die clearance influence on the sheared edge quality of thick sheets. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, Paraná, v. 65, p.451-457, 10 maio 2012.

SOUZA, J. H. C.: **Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento**. 2001. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

SSAB: **Data sheet 2008br Strenx 700MC D/E**. 2017. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=961589BF607D44A6869FCC20CDC8D0D2&language=pt-BR>>. Acesso em: 31 jan. 2020.

SLAVIC, J. *et al.*: A novel laboratory blanking apparatus for the experimental identification of the blanking parameters. **Journal Of Materials Processing Technology**. Ljubljana, v. 214, p. 507-513. abr. 2014.

SUCHY, I.: **Handbook of die design**. 2. ed. New York: Mc Graw Hill, 1998.

TAKAHSHI, M.: Sheet steel technology for the last 100 years: Progress in sheet steels in hand with the automotive industry. **ISIJ International**. Futtsu, v. 55, p. 79-88. ago. 2015.

TAMARELLI, C. M.: AHSS 101: The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications. **SMDI - Steel Market Development Institute**. Michigan: AISI, 2011. 45p. Disponível em: <https://www.autosteel.org>. Acesso em: 27 jan. 2020.

TARKANY, N.: Improving perforating die performance: The effects of stress, clearance and material. **Stamping Journal**. Dayton, v. 15, p. 29-31. mar. 2003.

TOTRE, A.; NISHAD, R.; BODKE, S.: An overview of factors affecting in blanking processes. **International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering**. New Delhi, v. 3, p. 390-395. mar. 2013.

TRĽKO, L. *et al.* Microstructure and residual stress analysis of Strenx 700 MC welded joint. **Production Engineering Archives**. Žilina, V. 26, p. 41-44. jun. 2020.

ZEHETNER, C. *et al.* High-quality sheet metal production using a model-based adaptive approach. **Procedia Computer Science**. Telzhamerstraße, v. 180, p. 249-258. jan. 2021.

ZEIDI, A. *et al.* On the failure of punching process. **Engineering Failure Analysis**. Sfax, v. 120, p. 105035-1 -105035-34. out. 2020.

ZHANG, J. *et al.*: Structural identification and damage detection through long-gauge strain measurements. **Engineering Structures**. Nanjing, v. 99, p. 173-183. abr. 2015.

ANEXO A – DATASHEET LINHA STRENX®

STRENX® PERFORMANCE STEEL SHEET							
Steel grade	Yield strength ¹ MPa	Tensile strength ¹ MPa		Elongation A ₅ (%)	Bending radius R/t for 90° bend t=6 mm	CEV/CET ² typical for 6 mm	Thickness mm
	min	min	max	min	min		
Strenx® MC – High-strength structural steel enabling stronger and lighter structures.							
Strenx® 600MC	600	650	820	16	1.1	0.33/0.21	2.0–10.0 mm
Strenx® 650MC	650	700	850	14	1.2	0.34/0.22	2.0–10.0 mm
Strenx® 700MC	700 ⁴	750	950	12	1.2	0.39/0.25	2.0–10.0 mm
Strenx® 700MC Plus	700 ⁴	750	950	13	1.0	0.38/0.24	3.0–12.0 mm
Strenx® 900MC	900	930	1200	8	3.0	0.50/0.25	3.0–10.0 mm
Strenx® 900 Plus	900	940	1100	11	3.0	0.50/0.34	2.0–8.0 mm
Strenx® 960MC	960	980	1250	7	3.5	0.51/0.28	3.0–10.0 mm
Strenx® 960 Plus	960	980	1150	10	3.5	0.50/0.34	2.0–8.0 mm
Strenx® 1100MC	1100	1250	1450	7	4.0	0.56/0.33	3.0–8.0 mm
Strenx® 1100 Plus	1100	1130	1350	10	3.5	0.45/0.85	4.0–6.0 mm
Strenx® 1100 Plus	1100	1130	1350	10	4.0	0.45/0.85	6.1–8.0 mm
Strenx® cold rolled – High-strength structural steel enabling stronger and lighter structures.							
Strenx® 700CR	700	1000	1200	7 ²	2.0	0.40/0.29	0.70–2.10 mm
Strenx® 960CR	960	1200	1400	3 ²	3.5	0.39/0.28	0.70–2.10 mm
Strenx® 1100CR	1100	1300	1500	3 ²	3.5	0.41/0.30	0.70–2.10 mm

All sheet products are produced according to Strenx® Guarantees or closer.

1. Mechanical properties of Strenx® MC, MC Plus and Plus grades are tested in longitudinal direction.

2. Elongation A₅₀ Min.

3. EV=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15, CET=C+(Mn+Mo)/10+(Cr+Cu)/20+Ni/40.

4. Values for thickness 2–8 mm.

STRENX® PERFORMANCE STEEL PLATE

Steel grade	Yield strength ¹ MPa	Impact toughness CVL typical 20 mm J @ -40°C	Bending properties transverse (R/t) t<8 mm	Tensile strength ¹ MPa		CEV/CET ² typical for 20 mm	Thickness range ⁴ mm
	min			min	max		
Strenx® – High-strength, high-performance steel, enabling lighter and more innovative structures.							
Strenx® 700	700 ⁵	165 J	1.5	780	930	0.43/0.29	4–160 mm
Strenx® 900	900 ⁵	88 J	2.5	940	1100	0.55/0.36	4–100 mm
Strenx® 960	960 ⁵	84 J	2.5	980	1150	0.55/0.36	4–100 mm
Strenx® 1100	1100	67 J	3.0	1250	1550	0.55/0.36	4–40 mm
Strenx® 1300	1300	32 J ³	3.5	1400	1700	0.65/0.42	4–10 mm

All plates are produced according to Strenx® Guarantees or closer.

1. For transverse test piece.

2. CEV=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15; CET=C+(Mn+Mo)/10+(Cr+Cu)/20+Ni/40.

For Strenx® 1300, typical values are for 8 mm.


3. For 6 mm and half size test specimen.

4. Thicker materials are available upon request.

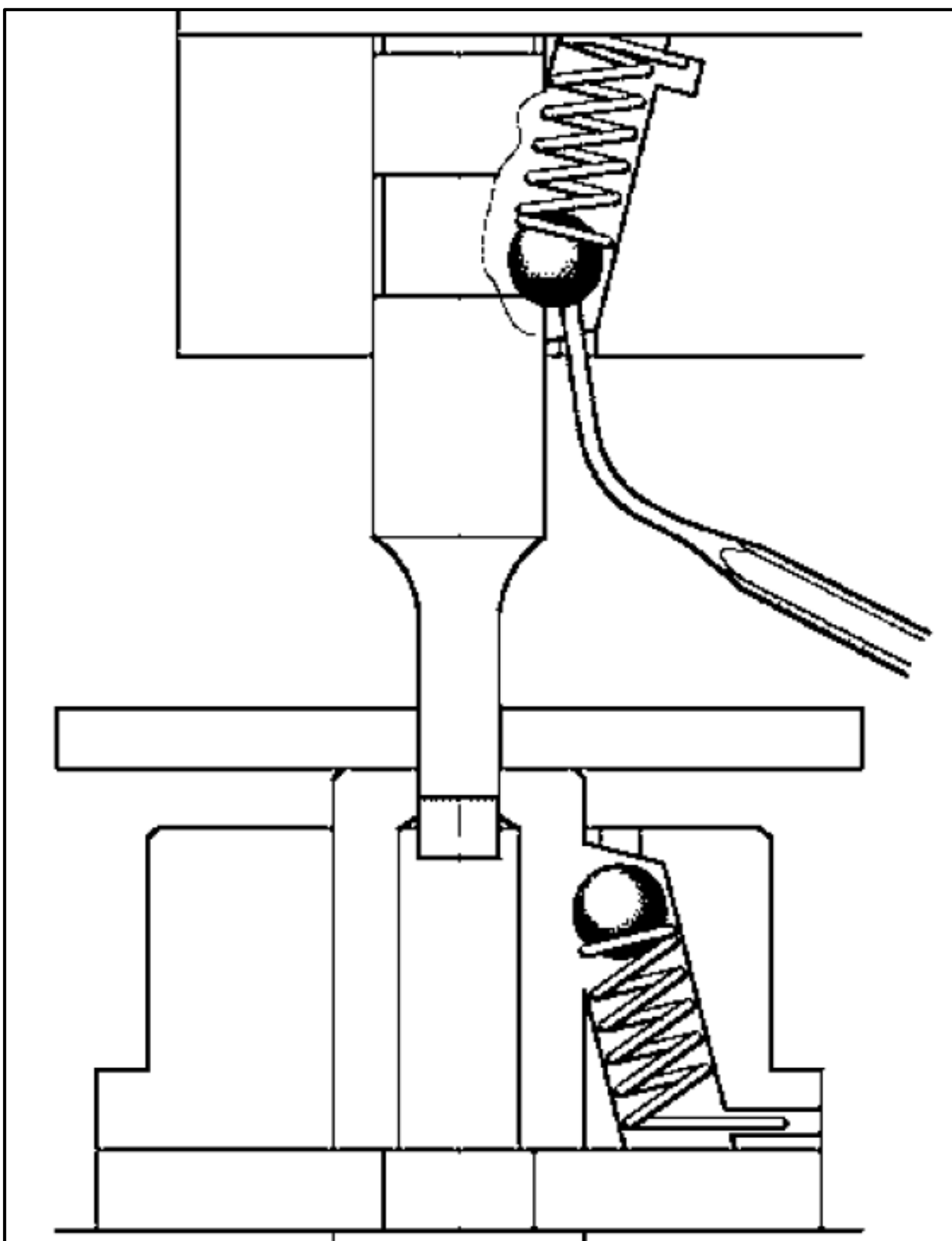
5. Values for thickness 4–53 mm.

Fonte: SSAB (2017).

ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO STRENX® 700MC


SSAB										Page 1 (1)																															
										SSAB EMEA AB, SE-781 84 BORLÄNGE, Sweden A01																															
Inspection certificate EN 10 204 - 3.1 A02			Issuing department Quality inspection A05			Purchaser order no 1852 A07			Our order no 139027-2 A08			Invoice no 2914438 A19			Certificate no and date 16846029 2017-10-04 A03																										
Purchaser A11 11408 SSAB SWEDISH STEEL COMERCIO DE ACO			Product Hot rolled sheets B01				Marking Manufacturer, MATERIAL ID B06				Customer marks B15																														
RODOVIA BR 280 KM33 ARAQUARI BRASILIEIN 89245-000			Quantity B08 89		Dimensions [mm] B09-B11 T 6.3 W 1500 L 3000			Weight [kg] B12 25135		Deliv. Cond. B04		Internal code B16																													
Consignee SSAB SWEDISH STEEL COMERCIO DE ACO RODOVIA BR 280 KM33 ARAQUARI BRASILIEIN 89245-000 A06						Standard/rules SSAB Steel grade STRENX 700 MC D*) B02																																			
MATERIAL ID 59-9026-194545-01 , 59-9026-194545-02 , 59-9026-194545-03 , 59-9026-194545-04 , 59-9026-194545-05 , 59-9026-194545-06 , 59-9026-194545-07 , 59-9026-194545-08 , 59-9026-194545-09 B07																																									
Chemical composition										C71-C92		Carbon equivalent etc		C93-C99																											
Heat no 59-9026										C		Si		Mn		P		S		Cr		Ni		Mo		V		Ti		Cu		Al		Nb		B		N		Cekv	
										.062		.02		1.87		.014		.002		.03		.04		.10		.02		.10		.01		.043		.065		.0001		.006		.41	
Testtype C04		Millcode C00		Specimen position C01		Direc-tion C02		Treat-ment B05		Specimen type C10		Temp [degr C] C03		Test results																											
Tensile test		DKY467		Top end		Longitudinal		Delivery condition		Rectangular 380x40				C11 Reh [MPa] 755		C12 Rm [MPa] 813		C13 A5 [%] 22.5																							
Impact test		DKY468		Top end		Longitudinal		Delivery condition		Charpy-V 10x7.5		-20		C42 E [J] 53		C42 E [J] 53		C42 E [J] 55		C43 Ave [J] 53																					
Bend test		DKY469		Top end		Transvers		Delivery condition		Rectangular 300x25				C50 The test is satisfactory																											
*) S700MC EN 10149-2																																									
Production time: 2017-09-01																																									
Customer article no: ITM60200																																									
This certificate is produced with EDP and valid without signature					Z02					It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.					Z01					A22					A04																
Material Testing/ H Leu / M Eriksson / V Esbelani																									 STRENX PERFORMANCE STEEL www.strenx.com																

Fonte: SSAB (2017).

ANEXO C – SISTEMA DE TROCA RÁPIDA DOS ELEMENTOS DE CORTE

Fonte: <https://www.steinell.com>

ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO LUBRIFICANTE UTILIZADO NOS ENSAIOS

	Ficha Técnica		
	Nome da substância ou mistura: COAT LUBE ES/40		
	Data: 01/06/2020	Revisão: 02	FT nº 30

1. Identificação

Nome comercial: COAT LUBE ES/40

Principais usos recomendados: uso industrial para repuxe, corte e estampagem de metais.

Nome da Empresa: Quiminort Indústria e Comercio Ltda.

Endereço: Rua Irmão Gildo Schiavo, nº23.

Complemento: Caxias do Sul – RS

Telefone para contato: (54) 3536-7885

E-mail: quiminort@quiminort.com.br

2. Composição e informações sobre os ingredientes

Composto químico derivado de oleatos solubilizados e neutralizados em associação com petrolatos.

- Ácido oleico animal;
- Ácido oleico vegetal;
- Oleatos;
- Petrolatos;
- Conservantes;
- Sabão Anidro.


3. Finalidade

Corte, repuxe, estampagem e deformação de chapas de aço carbono, aço inox, latão, cobre e bronze.

Produto de alta performance nos trabalhos que exijam eficiência quanto a lubricidade e proteção contra oxidação.

QUIMINORT INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
 Rua Irmão Gildo Schiavo, 23 – Bairro São Cristóvão – Cep: 95058-510 – Caxias do Sul – RS
 E-mail: quiminort@quiminort.com.br – (54) 3536-7885

ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO LUBRIFICANTE UTILIZADO NOS ENSAIOS

	Ficha Técnica		
	Nome da substância ou mistura: COAT LUBE ES/40		
	Data: 01/06/2020	Revisão: 02	FT nº 30

Sua grande vantagem é de não contaminar o objeto pronto facilitando sua limpeza sem a contaminação dos banhos de desengraxe e fostatização.

4. Utilização

Aplicar puro ou diluído em água conforme a necessidade, tipo de metais, pressão do equipamento e profundidade. Cada cliente deverá chegar ao ponto de diluição conforme necessidade

5. Dados Físico-Químicos

- **Estado físico:** massa pastosa
- **Cor:** amarelada
- **Odor:** característicos
- **Limite de odor:** não disponível
- **pH:** 9,0
- **Ponto de fulgor:** 140°C
- **Ponto de fusão:** não disponível
- **Inflamabilidade:** não aplicável
- **Limite superior/inferior de inflamabilidade ou explosividade:** não aplicável
- **Pressão de vapor:** não disponível
- **Densidade de vapor:** não disponível
- **Temperatura de auto ignição:** não aplicável.
- **Temperatura de decomposição:** não disponível.
- **Ponto de ebulição:** 309°C
- **Densidade:** 800g/l
- **Solubilidade:** total em água

QUIMINORT INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
 Rua Irmão Gildo Schiavo, 23 – Bairro São Cristóvão – Cep: 95058-510 – Caxias do Sul – RS
 E-mail: quiminort@quiminort.com.br – (54) 3536-7885

ANEXO E – RELATÓRIO DE TRAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL DA CÉLULA DE CARGA



CERTIFICADO DE QUALIDADE

EMPRESA
CERTIFICADA



CONTROLE INTERNO	
Número Ordem de Produção:	134014
Data da Baixa:	11/08/2020

INFORMAÇÕES	
Nome do Cliente:	MÁQUINAS SANMARTIN LTDA
Nota Fiscal de Entrada:	58477
Nota Fiscal de Saída:	48839
Descrição Produto:	CORPO DE PROVA DE TRACAO VC 131 Ø20X145MM
Quantidade:	3,00 PC
Peso Total:	0,78 KG
Referência:	421473

ESPECIFICAÇÕES	
Material:	VC131
Dureza Superficial:	40 a 42 HRC


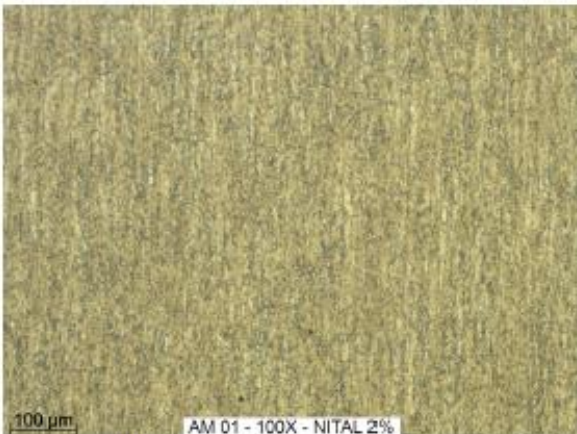
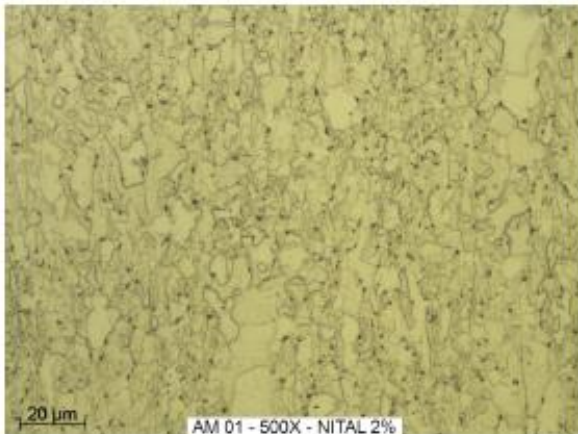
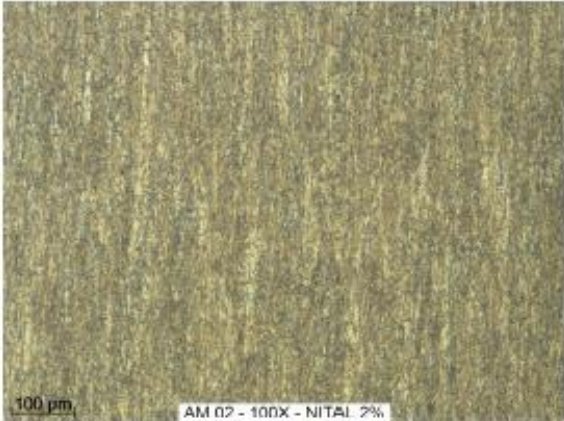
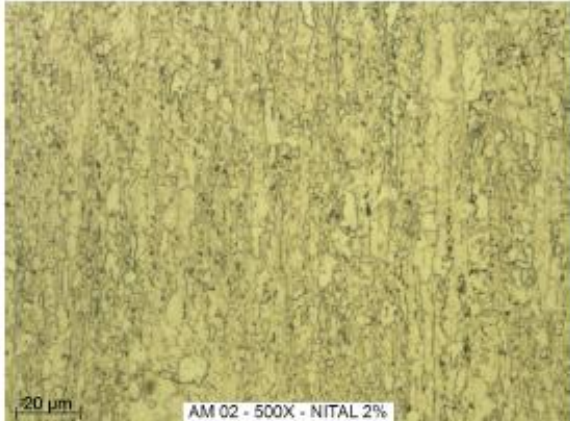
RESULTADOS	
Dureza Superficial:	41 a 42 HRC

CONCLUSÃO:	Aprovado
------------	----------

ENSAIOS REALIZADOS CONFORME NORMA: ABNT NBR NM ISO 6508-1

Ms. Eng. Gilmar Tonietto

ANEXO F – MICROGRAFIA STRENGTH® 700MC

 UCS UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL	<h2>Relatório de Ensaio</h2>
LAMET – FG 203 rev 05 Laboratório de Metalografia	
Cliente: Máquinas Sanmartin Ltda. Endereço: Rod. RS 122Km 72, s/nº - Industrial Cidade: Caxias do Sul - RS	Nº: 00903/19
Natureza do trabalho:	Análise Metalográfica
Identificação da amostra: 03 amostras de chapa, centro; identificadas por: Am 01, Am 02 e Am 03.	
RESULTADOS: MICROGRAFIA	
Amostra 01	
Inclusões: Tipo globular de óxidos, série fina, nível 1. Microestrutura: A amostra apresenta microestrutura grãos de ferrita, traços de cementita esferoidal, perlita e probabilidade de martensita revenida. Tamanho de grão (austenítico): 10.	
	
Amostra 02	
Inclusões: Tipo globular de óxidos, série fina, nível 1; Tipo sulfureto, série fina, nível 1. Microestrutura: A amostra apresenta microestrutura grãos de ferrita, traços de cementita esferoidal, perlita e probabilidade de martensita revenida. Tamanho de grão (austenítico): 10.	
	
UCS Serviços Tecnológicos Universidade de Caxias do Sul Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 CEP: 95070-560 Caxias do Sul-RS Bloco D Sala 101 Telefone: (54) 3218.2100 ou (54) 3218.2168 email: lamed@ucs.br http://www.ucs.br/site/servicos-tecnologicos/lamed	

ANEXO F – MICROGRAFIA STRENX® 700MC



Relatório de Ensaio

LAMET – FG 203 rev 05
Laboratório de Metalografia

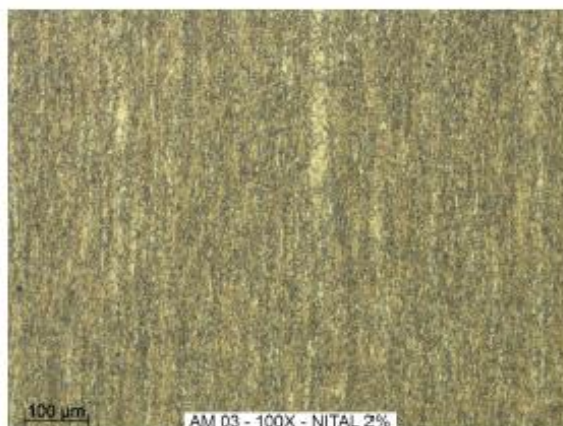
Cliente: Máquinas Sanmartín Ltda.	Nº: 00903/19
Endereço: Rod. RS 122Km 72, s/nº- Industrial	
Cidade: Caxias do Sul - RS	
Natureza do trabalho:	Data: 21-08-19
Análise Metalográfica	Folha: 2 / 2

Amostra 03

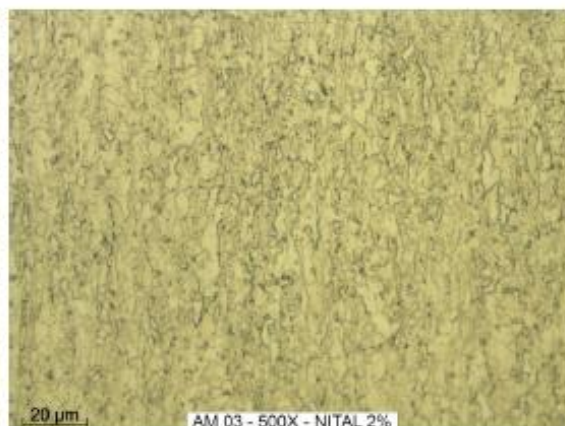
Inclusões: Tipo globular de óxidos, série fina, nível 1; Tipo sulfureto, série fina, nível 1.

Microestrutura: A amostra apresenta microestrutura grãos de ferrita, traços de cementita esferoidal, perlita e probabilidade de martensita revenida.

Tamanho de grão (austenítico): 10.



AM 03 - 100X - NITAL 2%



AM 03 - 500X - NITAL 2%

Equipamento utilizado:

Microscópio ocular (Observer.D1m – Zeiss).

Normas de referência:

NBR 13284:95 – Preparação de corpos de prova para análises metalográficas.

ASTM E 407 – 07(2015) – Standard practice for microetching metals and alloys.

Observação: Os resultados foram obtidos a partir da análise com ampliações ópticas de 100x e 500x das seções das amostras devidamente polidas e atacadas com Nital 2%.

Os resultados têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo autorizado reprodução parcial deste documento.

José Adair de O. Giubel
Eng. Materiais CREA RS215725
Signatário Autorizado



Documento assinado digitalmente no sistema QualiLIMS Químico.

Data e horário da assinatura: 21/08/2019 16:57:36

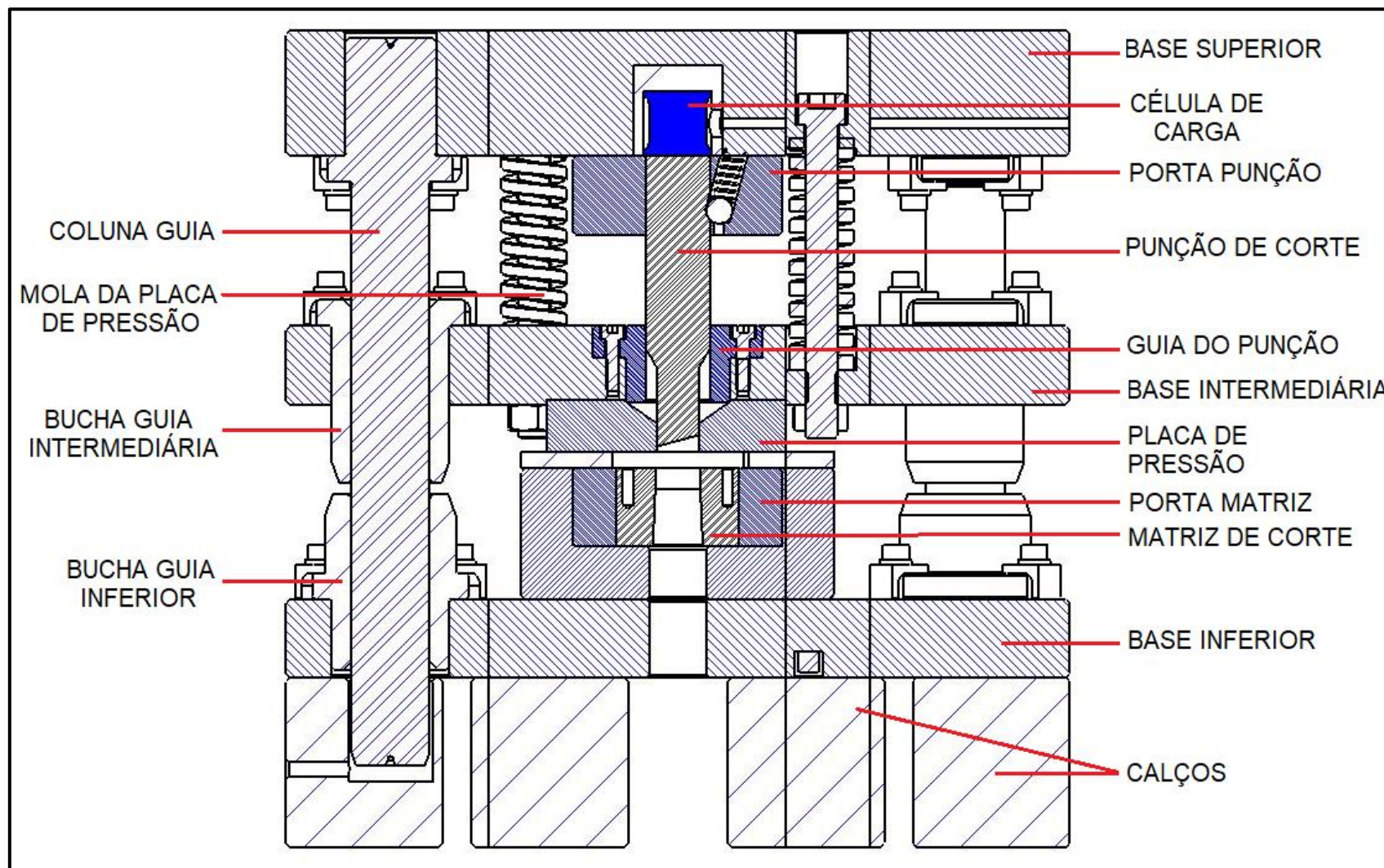
Informações do signatário:

JOSE ADAIR DE OLIVEIRA GIUBEL:00359554067 <JAOGIUBE@UCS.BR>

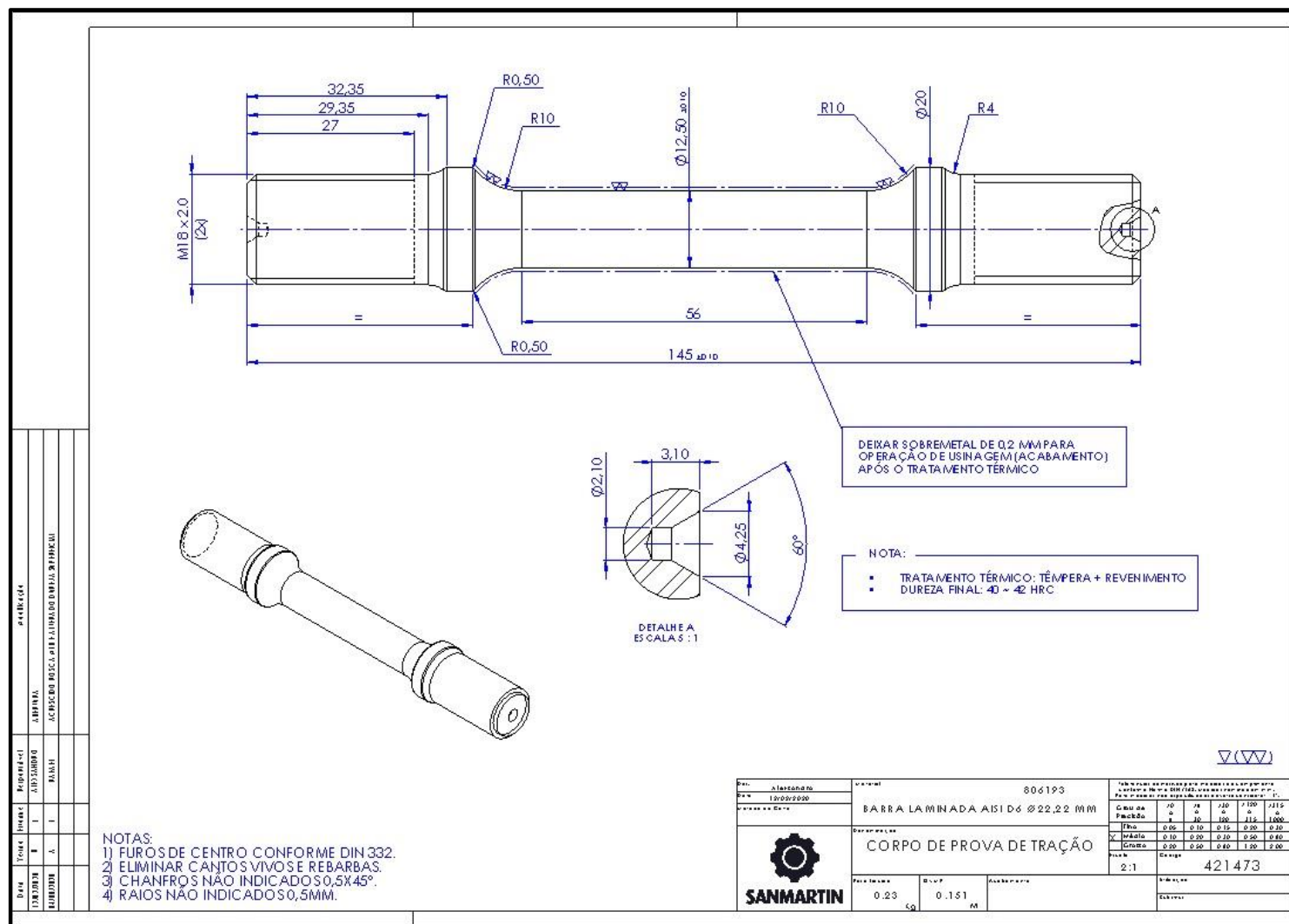
Certificado emitido por AC CNDL RFB (ICP-Brasil), válido de 08/09/2017 14:00:00 a 08/09/2020 14:00:00

UCS Serviços Tecnológicos | Universidade de Caxias do Sul | Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 | CEP: 95070-560 |
Caxias do Sul-RS | Bloco D | Sala 101
Telefone: (54) 3218.2100 ou (54) 3218.2168 | email: ilamec@ucs.br | http://www.ucs.br/site/servicos-tecnologicos/lamec

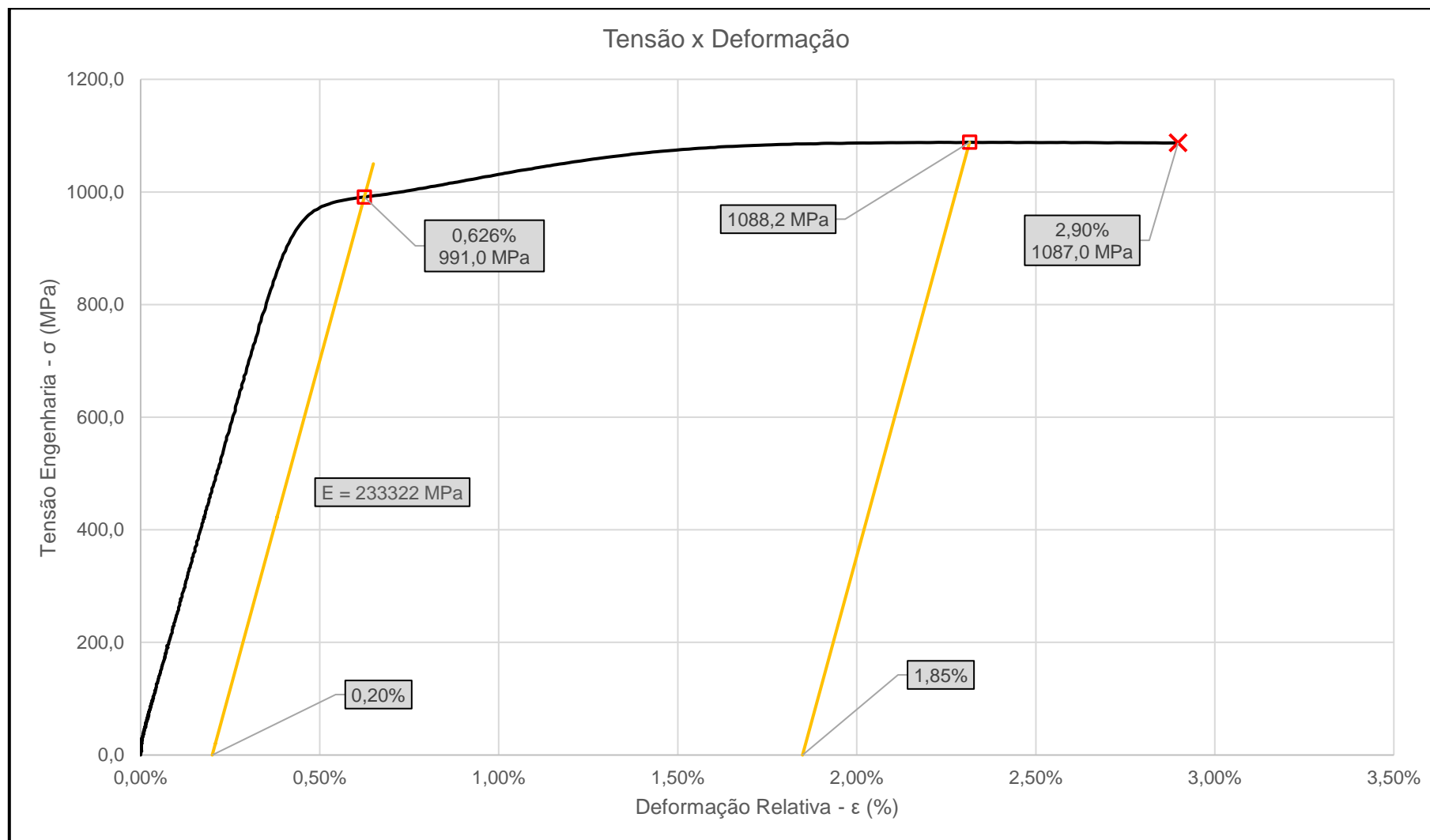
APÊNDICE A – VISTA DE CORTE DA FERRAMENTA DE ENSAIOS

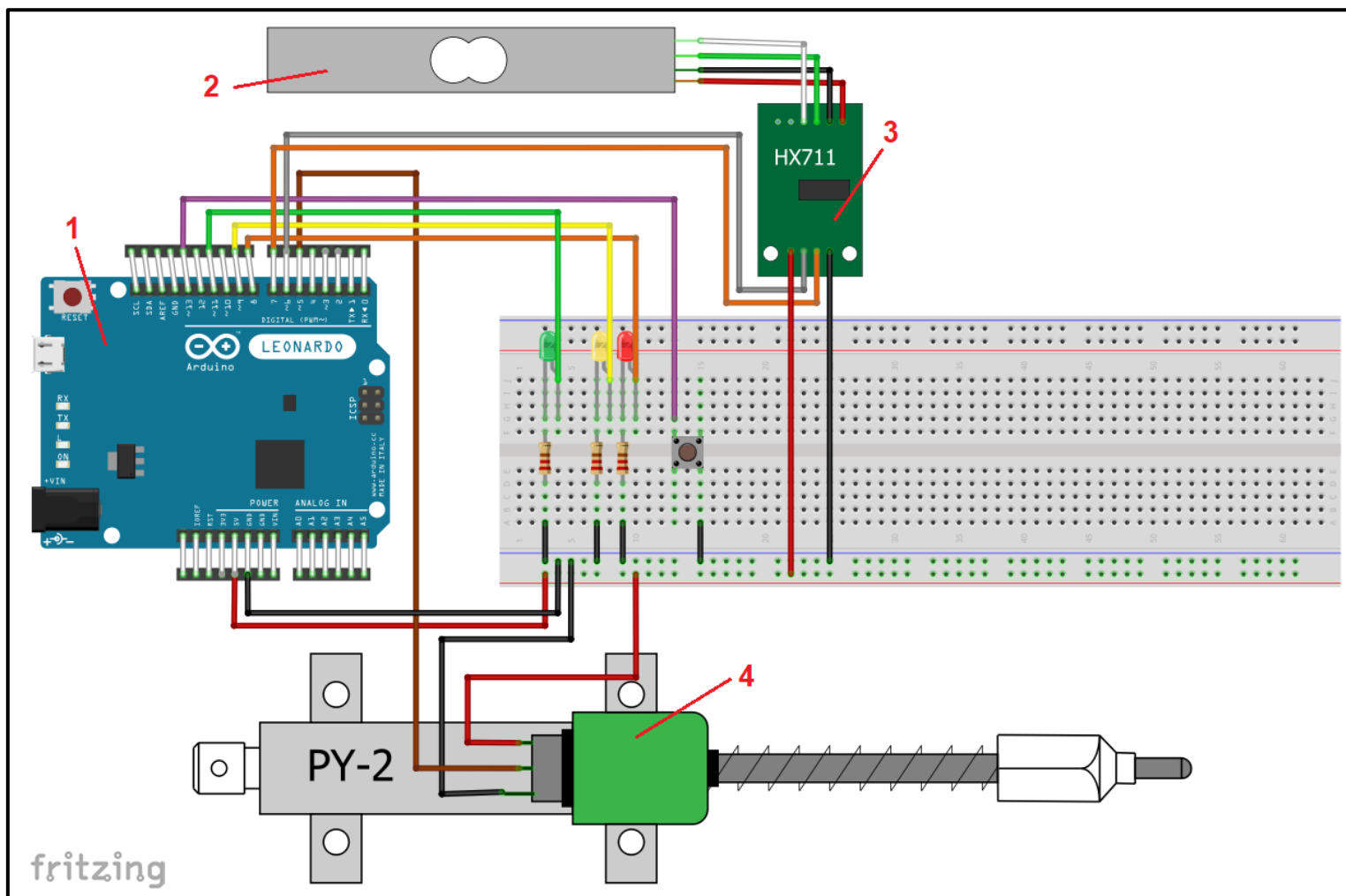


APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DA GEOMETRIA E DOS DETALHES DOS CORPOS DE PROVA DO MATERIAL DA CÉLULA DE CARGA



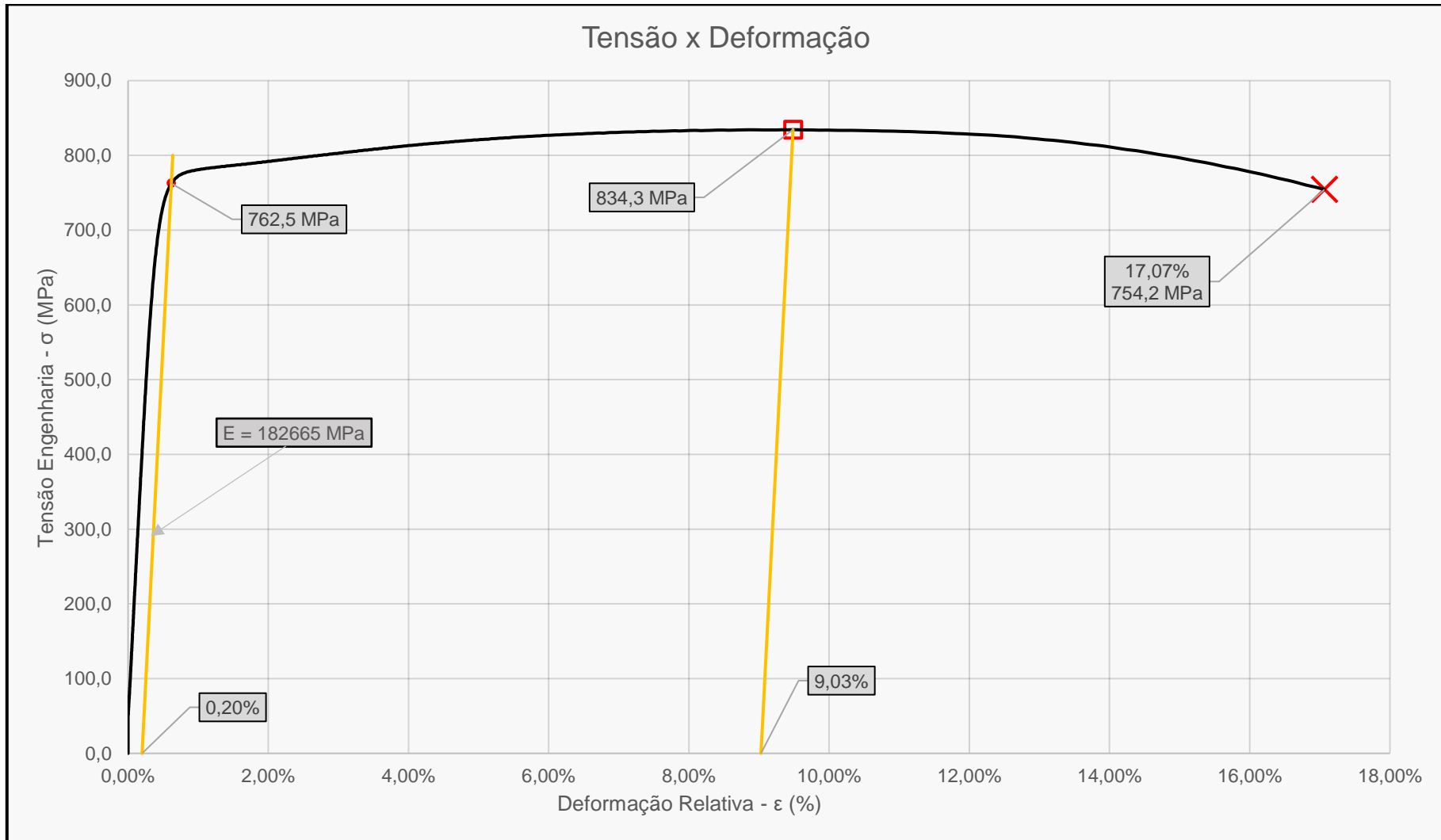
APÊNDICE C – GRÁFICO DE ENGENHARIA DO AISI D6 TEMPERADO E REVENIDO



APÊNDICE D - ESQUEMA DE LIGAÇÃO ELETRÔNICA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

1) Arduino® LEONARDO, 2) Representação da célula de carga, 3) Amplificador e conversor A-D HX711 e 4) Transdutor linear de posição PY-2 da Gefran®.

APÊNDICE E – GRÁFICO DE ENGENHARIA DO STRENX® 700MC



APÊNDICE F – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE FORÇA MÁXIMA COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	-3,805	-6,690	-0,920	0,011	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/lubrificante	2,903	0,020	5,790	0,002	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/seco	2,942	0,060	5,820	0,001	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	2,337	-0,550	5,220	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/seco	1,837	-1,050	4,720	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	4,834	1,950	7,720	0,048	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/seco	5,109	2,230	7,990	0,046	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	26,782	23,900	29,660	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/seco	24,477	21,590	27,360	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	22,604	19,720	25,490	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/seco	24,781	21,900	27,660	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	9,032	6,150	11,910	0,109	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/seco	6,825	3,940	9,710	0,204	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	26,184	23,300	29,070	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/seco	25,879	23,000	28,760	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	22,280	19,400	25,160	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/seco	20,957	18,070	23,840	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/lubrificante	6,709	3,830	9,590	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/seco	6,748	3,870	9,630	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/lubrificante	6,142	3,260	9,020	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/seco	5,642	2,760	8,520	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/lubrificante	8,639	5,760	11,520	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/seco	8,914	6,030	11,800	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M2/lubrificante	30,587	27,700	33,470	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M2/seco	28,283	25,400	31,170	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/lubrificante	26,409	23,530	29,290	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/seco	28,586	25,700	31,470	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/lubrificante	12,838	9,960	15,720	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/seco	10,630	7,750	13,510	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/lubrificante	29,989	27,110	32,870	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/seco	29,684	26,800	32,570	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/lubrificante	26,086	23,200	28,970	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/seco	24,762	21,880	27,640	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	0,039	-2,840	2,920	0,848	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	-0,567	-3,450	2,320	0,006	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-1,066	-3,950	1,820	0,170	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	1,931	-0,950	4,810	0,183	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/seco	2,205	-0,680	5,090	0,192	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	23,879	21,000	26,760	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/seco	21,574	18,690	24,460	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	19,700	16,820	22,580	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/seco	21,878	19,000	24,760	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	6,129	3,250	9,010	0,087	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/seco	3,921	1,040	6,800	0,042	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	23,280	20,400	26,160	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/seco	22,975	20,090	25,860	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	19,377	16,490	22,260	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/seco	18,054	15,170	20,940	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M1/lubrificante	-0,606	-3,490	2,280	0,009	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M1/seco	-1,105	-3,990	1,780	0,235	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M2/lubrificante	1,892	-0,990	4,770	0,130	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M2/seco	2,166	-0,720	5,050	0,136	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M2/lubrificante	23,840	20,960	26,720	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M2/seco	21,535	18,650	24,420	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M2/lubrificante	19,661	16,780	22,540	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M2/seco	21,839	18,960	24,720	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M3/lubrificante	6,090	3,210	8,970	0,059	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M3/seco	3,882	1,000	6,760	0,027	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M3/lubrificante	23,241	20,360	26,120	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M3/seco	22,936	20,050	25,820	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M3/lubrificante	19,338	16,460	22,220	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M3/seco	18,015	15,130	20,900	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-0,500	-3,380	2,380	0,129	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	2,497	-0,390	5,380	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/seco	2,772	-0,110	5,650	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	24,445	21,560	27,330	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/seco	22,141	19,260	25,020	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	20,267	17,380	23,150	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/seco	22,444	19,560	25,330	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	6,696	3,810	9,580	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/seco	4,488	1,610	7,370	0,000	DIFERENTES

Conclusão

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P4/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	23,847	20,960	26,730	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M3/seco	23,542	20,660	26,420	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	19,944	17,060	22,830	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/seco	18,620	15,740	21,500	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M2/lubrificante	2,997	0,110	5,880	0,009	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M2/seco	3,272	0,390	6,150	0,010	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M2/lubrificante	24,945	22,060	27,830	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M2/seco	22,640	19,760	25,520	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M2/lubrificante	20,767	17,880	23,650	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M2/seco	22,944	20,060	25,830	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M3/lubrificante	7,195	4,310	10,080	0,003	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M3/seco	4,988	2,110	7,870	0,001	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M3/lubrificante	24,347	21,460	27,230	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M3/seco	24,042	21,160	26,920	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M3/lubrificante	20,443	17,560	23,330	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M3/seco	19,120	16,240	22,000	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	0,275	-2,610	3,160	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/lubrificante	21,948	19,070	24,830	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/seco	19,643	16,760	22,530	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	17,770	14,890	20,650	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/seco	19,947	17,060	22,830	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	4,198	1,320	7,080	0,693	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/seco	1,991	-0,890	4,870	0,458	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	21,350	18,470	24,230	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/seco	21,045	18,160	23,930	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	17,446	14,560	20,330	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/seco	16,123	13,240	19,010	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/lubrificante	21,673	18,790	24,560	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/seco	19,369	16,490	22,250	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/lubrificante	17,495	14,610	20,380	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/seco	19,672	16,790	22,550	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P1/M3/lubrificante	3,924	1,040	6,810	0,673	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P1/M3/seco	1,716	-1,170	4,600	0,442	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M3/lubrificante	21,075	18,190	23,960	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M3/seco	20,770	17,890	23,650	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/lubrificante	17,172	14,290	20,050	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/seco	15,848	12,970	18,730	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-2,305	-5,190	0,580	0,114	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-4,178	-7,060	-1,300	0,676	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/seco	-2,001	-4,880	0,880	0,529	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-17,750	-20,630	-14,870	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-19,957	-22,840	-17,070	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,598	-3,480	2,280	0,006	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,903	-3,790	1,980	0,168	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-4,502	-7,380	-1,620	0,003	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/seco	-5,825	-8,710	-2,940	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P4/M2/lubrificante	-1,874	-4,760	1,010	0,238	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M2/seco	0,304	-2,580	3,190	0,331	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-15,445	-18,330	-12,560	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P1/M3/seco	-17,653	-20,540	-14,770	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P2/M3/lubrificante	1,706	-1,180	4,590	0,196	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/seco	1,401	-1,480	4,280	0,832	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-2,197	-5,080	0,690	0,131	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/seco	-3,520	-6,400	-0,640	0,018	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	2,177	-0,710	5,060	0,831	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-13,571	-16,450	-10,690	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-15,779	-18,660	-12,900	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	3,580	0,700	6,460	0,016	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,323	-3,210	2,560	0,009	DIFERENTES
P4/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-15,749	-18,630	-12,870	0,000	DIFERENTES
P4/M2/seco-P2/M3/lubrificante	1,403	-1,480	4,290	0,027	DIFERENTES
P4/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-2,501	-5,380	0,380	0,016	DIFERENTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	-2,208	-5,090	0,670	0,727	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/seco	16,846	13,960	19,730	0,000	DIFERENTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/seco	11,925	9,040	14,810	0,000	DIFERENTES
P1/M3/seco-P2/M3/seco	19,054	16,170	21,940	0,000	DIFERENTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	-0,305	-3,190	2,580	0,134	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-3,903	-6,790	-1,020	0,821	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/seco	-5,227	-8,110	-2,340	0,254	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/lubrificante	-3,598	-6,480	-0,720	0,087	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/seco	-4,922	-7,800	-2,040	0,011	DIFERENTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	-1,323	-4,210	1,560	0,358	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

APÊNDICE G – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE D_c COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	0,003	-0,030	0,040	0,890	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/lubrificante	-0,003	-0,040	0,030	0,658	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/seco	-0,008	-0,050	0,030	0,698	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	0,008	-0,030	0,040	0,890	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/seco	0,003	-0,030	0,040	0,678	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,008	-0,050	0,030	0,868	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/seco	0,007	-0,030	0,040	0,658	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,003	-0,040	0,030	0,868	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,013	-0,050	0,020	0,473	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,007	-0,030	0,040	0,678	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/seco	0,002	-0,040	0,040	0,912	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,002	-0,040	0,030	0,678	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,008	-0,040	0,030	0,868	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,008	-0,030	0,040	0,698	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/seco	0,002	-0,040	0,040	0,912	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,007	-0,030	0,040	0,698	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/seco	-0,002	-0,040	0,030	0,890	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M1/lubrificante	-0,006	-0,040	0,030	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M1/seco	-0,011	-0,050	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M1/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M1/seco	0,000	-0,040	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P1/M2/lubrificante	-0,011	-0,050	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P1/M2/seco	0,005	-0,030	0,040	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M2/lubrificante	-0,006	-0,040	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M2/seco	-0,015	-0,050	0,020	0,394	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M2/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M2/seco	0,000	-0,040	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P1/M3/lubrificante	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P1/M3/seco	-0,010	-0,050	0,030	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M3/seco	0,000	-0,040	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P4/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	0,011	-0,030	0,050	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/seco	0,006	-0,030	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/seco	0,010	-0,030	0,050	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,010	-0,050	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,010	-0,030	0,050	0,394	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/seco	0,005	-0,030	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,001	-0,040	0,040	0,394	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,543	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,011	-0,030	0,050	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/seco	0,005	-0,030	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,010	-0,030	0,050	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/seco	0,001	-0,040	0,040	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M1/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M1/seco	0,011	-0,030	0,050	0,425	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M2/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M2/seco	0,015	-0,020	0,050	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M2/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M2/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,275	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M2/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M2/seco	0,010	-0,030	0,050	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M3/lubrificante	0,006	-0,030	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M3/seco	0,000	-0,040	0,040	0,824	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M3/seco	0,010	-0,030	0,050	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M3/seco	0,006	-0,030	0,040	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,015	-0,050	0,020	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/seco	0,000	-0,040	0,040	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,011	-0,050	0,030	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,020	-0,060	0,020	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,010	-0,050	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,015	-0,050	0,020	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P4/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P2/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/seco	-0,010	-0,050	0,030	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M2/lubrificante	-0,011	-0,050	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M2/seco	0,004	-0,030	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M2/lubrificante	-0,006	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M2/seco	-0,016	-0,050	0,020	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M2/lubrificante	0,004	-0,030	0,040	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M2/seco	-0,001	-0,040	0,040	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M3/lubrificante	-0,005	-0,040	0,030	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M3/seco	-0,011	-0,050	0,030	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,425	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M3/seco	-0,001	-0,040	0,040	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M3/lubrificante	0,004	-0,030	0,040	0,425	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	0,015	-0,020	0,050	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,010	-0,030	0,050	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,006	-0,030	0,040	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/seco	0,000	-0,040	0,040	0,739	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/seco	0,010	-0,030	0,050	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/seco	0,006	-0,030	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M2/lubrificante	-0,010	-0,050	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M2/seco	-0,020	-0,060	0,020	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P4/M2/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,394	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P4/M2/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,009	-0,050	0,030	0,394	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P1/M3/seco	-0,015	-0,050	0,020	0,543	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P4/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P4/M3/seco	-0,009	-0,050	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-0,010	-0,050	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,010	-0,030	0,050	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,001	-0,040	0,040	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,739	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,011	-0,030	0,050	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/seco	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,010	-0,030	0,050	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/seco	0,001	-0,040	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M2/lubrificante	0,020	-0,020	0,060	0,263	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M2/seco	0,015	-0,020	0,050	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P1/M3/lubrificante	0,011	-0,030	0,050	0,263	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P1/M3/seco	0,005	-0,030	0,040	0,379	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,020	-0,020	0,060	0,275	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/seco	0,015	-0,020	0,050	0,409	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/lubrificante	0,020	-0,020	0,060	0,275	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/seco	0,011	-0,030	0,050	0,561	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,009	-0,050	0,030	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,015	-0,050	0,020	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/seco	-0,009	-0,050	0,030	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,005	-0,040	0,030	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P1/M3/seco	-0,010	-0,050	0,030	0,956	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P2/M3/seco	0,000	-0,040	0,040	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P4/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P4/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,010	-0,030	0,050	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/seco	0,005	-0,030	0,040	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,009	-0,030	0,050	0,978	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,000	-0,040	0,040	0,580	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P2/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,824	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P2/M3/seco	0,010	-0,030	0,050	0,956	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P4/M3/lubrificante	0,015	-0,020	0,050	0,824	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P4/M3/seco	0,005	-0,030	0,040	0,760	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Conclusão

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P2/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,000	-0,040	0,040	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/seco	-0,010	-0,050	0,030	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/lubrificante	0,005	-0,030	0,040	0,781	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/seco	-0,005	-0,040	0,030	0,803	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	-0,009	-0,050	0,030	0,599	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

APÊNDICE H – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE D_F COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	-0,026	-0,100	0,050	0,462	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/lubrificante	-0,124	-0,200	-0,050	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/seco	-0,116	-0,190	-0,040	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	-0,138	-0,210	-0,070	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-0,101	-0,170	-0,030	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,344	-0,420	-0,270	0,002	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/seco	-0,335	-0,410	-0,260	0,004	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,414	-0,490	-0,340	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,376	-0,450	-0,300	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,399	-0,470	-0,330	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/seco	-0,354	-0,430	-0,280	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,791	-0,860	-0,720	0,001	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,790	-0,860	-0,720	0,009	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,825	-0,900	-0,750	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/seco	-0,790	-0,860	-0,720	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,814	-0,890	-0,740	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/seco	-0,748	-0,820	-0,680	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/lubrificante	-0,098	-0,170	-0,030	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/seco	-0,090	-0,160	-0,020	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/lubrificante	-0,112	-0,180	-0,040	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/seco	-0,075	-0,150	0,000	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/lubrificante	-0,318	-0,390	-0,250	0,011	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/seco	-0,309	-0,380	-0,240	0,018	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M2/lubrificante	-0,388	-0,460	-0,320	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M2/seco	-0,350	-0,420	-0,280	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/lubrificante	-0,373	-0,450	-0,300	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/seco	-0,328	-0,400	-0,260	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/lubrificante	-0,765	-0,840	-0,690	0,005	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/seco	-0,764	-0,840	-0,690	0,045	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/lubrificante	-0,799	-0,870	-0,730	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/seco	-0,764	-0,840	-0,690	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/lubrificante	-0,788	-0,860	-0,720	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/seco	-0,722	-0,790	-0,650	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	0,008	-0,060	0,080	0,798	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	-0,014	-0,090	0,060	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/seco	0,023	-0,050	0,100	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,220	-0,290	-0,150	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/seco	-0,211	-0,280	-0,140	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,290	-0,360	-0,220	0,058	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,252	-0,320	-0,180	0,367	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,275	-0,350	-0,200	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/seco	-0,230	-0,300	-0,160	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,667	-0,740	-0,590	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,666	-0,740	-0,590	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,701	-0,770	-0,630	0,129	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/seco	-0,666	-0,740	-0,590	0,776	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,690	-0,760	-0,620	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/seco	-0,624	-0,700	-0,550	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M1/lubrificante	-0,022	-0,090	0,050	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M1/seco	0,015	-0,060	0,090	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M2/lubrificante	-0,228	-0,300	-0,160	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M2/seco	-0,219	-0,290	-0,150	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M2/lubrificante	-0,298	-0,370	-0,230	0,035	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M2/seco	-0,260	-0,330	-0,190	0,251	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M2/lubrificante	-0,283	-0,360	-0,210	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M2/seco	-0,238	-0,310	-0,170	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M3/lubrificante	-0,675	-0,750	-0,600	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M3/seco	-0,674	-0,750	-0,600	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M3/lubrificante	-0,709	-0,780	-0,640	0,081	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M3/seco	-0,674	-0,750	-0,600	0,590	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M3/lubrificante	-0,698	-0,770	-0,630	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M3/seco	-0,632	-0,700	-0,560	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	0,038	-0,040	0,110	0,977	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,206	-0,280	-0,130	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/seco	-0,197	-0,270	-0,120	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,276	-0,350	-0,200	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,238	-0,310	-0,170	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,261	-0,330	-0,190	0,339	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/seco	-0,216	-0,290	-0,140	0,977	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,653	-0,730	-0,580	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,652	-0,720	-0,580	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,687	-0,760	-0,610	0,000	DIFERENTES

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P4/M1/lubrificante-P2/M3/seco	-0,652	-0,720	-0,580	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,676	-0,750	-0,600	0,515	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/seco	-0,610	-0,680	-0,540	0,230	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M2/lubrificante	-0,244	-0,320	-0,170	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M2/seco	-0,235	-0,310	-0,160	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M2/lubrificante	-0,314	-0,390	-0,240	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M2/seco	-0,276	-0,350	-0,200	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M2/lubrificante	-0,299	-0,370	-0,230	0,325	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M2/seco	-0,253	-0,330	-0,180	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M3/lubrificante	-0,691	-0,760	-0,620	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M3/seco	-0,689	-0,760	-0,620	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M3/lubrificante	-0,724	-0,800	-0,650	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M3/seco	-0,689	-0,760	-0,620	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P4/M3/lubrificante	-0,714	-0,790	-0,640	0,497	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M3/seco	-0,648	-0,720	-0,570	0,241	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	0,009	-0,060	0,080	0,820	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/lubrificante	-0,070	-0,140	0,000	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-0,032	-0,100	0,040	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,055	-0,130	0,020	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/seco	-0,010	-0,080	0,060	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,447	-0,520	-0,370	0,691	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,446	-0,520	-0,370	0,506	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,481	-0,550	-0,410	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,446	-0,520	-0,370	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,470	-0,540	-0,400	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/seco	-0,404	-0,480	-0,330	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/lubrificante	-0,079	-0,150	-0,010	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/seco	-0,041	-0,110	0,030	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/lubrificante	-0,064	-0,140	0,010	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/seco	-0,019	-0,090	0,050	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,456	-0,530	-0,380	0,533	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P1/M3/seco	-0,455	-0,530	-0,380	0,660	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/seco-P2/M3/lubrificante	-0,490	-0,560	-0,420	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M3/seco	-0,455	-0,530	-0,380	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-0,479	-0,550	-0,410	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/seco	-0,413	-0,490	-0,340	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	0,038	-0,030	0,110	0,287	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,015	-0,060	0,090	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,060	-0,010	0,130	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,377	-0,450	-0,300	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,376	-0,450	-0,300	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,411	-0,480	-0,340	0,670	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,376	-0,450	-0,300	0,100	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,400	-0,470	-0,330	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/seco	-0,334	-0,410	-0,260	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P4/M2/lubrificante	-0,023	-0,100	0,050	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P4/M2/seco	0,022	-0,050	0,090	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,415	-0,490	-0,340	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P1/M3/seco	-0,414	-0,490	-0,340	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P2/M3/lubrificante	-0,449	-0,520	-0,380	0,515	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/seco	-0,414	-0,490	-0,340	0,533	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-0,438	-0,510	-0,370	0,000	DIFERENTES
P2/M2/seco-P4/M3/seco	-0,372	-0,440	-0,300	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,045	-0,030	0,120	0,325	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,392	-0,460	-0,320	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,391	-0,460	-0,320	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,426	-0,500	-0,350	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,391	-0,460	-0,320	0,000	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,415	-0,490	-0,340	0,754	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/seco	-0,349	-0,420	-0,280	0,039	DIFERENTES
P4/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,437	-0,510	-0,360	0,000	DIFERENTES
P4/M2/seco-P1/M3/seco	-0,436	-0,510	-0,360	0,000	DIFERENTES
P4/M2/seco-P2/M3/lubrificante	-0,471	-0,540	-0,400	0,000	DIFERENTES
P4/M2/seco-P2/M3/seco	-0,436	-0,510	-0,360	0,000	DIFERENTES
P4/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-0,460	-0,530	-0,390	0,497	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P4/M3/seco	-0,394	-0,470	-0,320	0,241	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	0,001	-0,070	0,070	0,293	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/lubrificante	-0,034	-0,110	0,040	0,000	DIFERENTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/seco	0,001	-0,070	0,070	0,000	DIFERENTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,023	-0,100	0,050	0,000	DIFERENTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,043	-0,030	0,120	0,000	DIFERENTES
P1/M3/seco-P2/M3/lubrificante	-0,035	-0,110	0,040	0,000	DIFERENTES
P1/M3/seco-P2/M3/seco	0,000	-0,070	0,070	0,000	DIFERENTES
P1/M3/seco-P4/M3/lubrificante	-0,024	-0,100	0,050	0,000	DIFERENTES
P1/M3/seco-P4/M3/seco	0,042	-0,030	0,110	0,000	DIFERENTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	0,035	-0,040	0,110	0,210	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,011	-0,060	0,080	0,000	DIFERENTES

Conclusão

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P2/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,077	0,000	0,150	0,000	DIFERENTES
P2/M3/seco-P4/M3/lubrificante	-0,024	-0,100	0,050	0,000	DIFERENTES
P2/M3/seco-P4/M3/seco	0,042	-0,030	0,110	0,000	DIFERENTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,066	-0,010	0,140	0,073	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

APÊNDICE I – ANÁLISE DE FISHER DOS VALORES DE H_c COM GRAU DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M1/lubrificante-P1/M1/seco	-0,263	-0,810	0,290	0,344	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/lubrificante	-0,875	-1,430	-0,320	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M1/seco	0,265	-0,290	0,820	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	2,072	1,520	2,620	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M1/seco	1,632	1,080	2,180	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	1,925	1,370	2,480	0,002	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M2/seco	1,702	1,150	2,250	0,340	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	2,108	1,560	2,660	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M2/seco	1,762	1,210	2,310	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	1,982	1,430	2,530	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M2/seco	2,115	1,560	2,670	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	2,072	1,520	2,620	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P1/M3/seco	2,065	1,510	2,620	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	2,365	1,810	2,920	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P2/M3/seco	1,978	1,430	2,530	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	2,095	1,540	2,650	0,000	DIFERENTES
P1/M1/lubrificante-P4/M3/seco	2,372	1,820	2,920	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/lubrificante	-0,613	-1,160	-0,060	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M1/seco	0,528	-0,020	1,080	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/lubrificante	2,334	1,780	2,890	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M1/seco	1,894	1,340	2,450	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/lubrificante	2,188	1,640	2,740	0,030	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M2/seco	1,964	1,410	2,520	0,060	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M1/seco-P2/M2/lubrificante	2,371	1,820	2,920	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M2/seco	2,024	1,470	2,580	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/lubrificante	2,244	1,690	2,800	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M2/seco	2,378	1,830	2,930	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/lubrificante	2,334	1,780	2,890	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P1/M3/seco	2,328	1,780	2,880	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/lubrificante	2,628	2,080	3,180	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P2/M3/seco	2,240	1,690	2,790	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/lubrificante	2,358	1,810	2,910	0,000	DIFERENTES
P1/M1/seco-P4/M3/seco	2,634	2,080	3,190	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M1/seco	1,140	0,590	1,690	0,421	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/lubrificante	2,947	2,400	3,500	0,596	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M1/seco	2,507	1,960	3,060	0,613	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	2,800	2,250	3,350	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P1/M2/seco	2,577	2,030	3,130	0,000	DIFERENTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	2,983	2,430	3,530	0,508	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M2/seco	2,637	2,090	3,190	0,555	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	2,857	2,310	3,410	0,116	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M2/seco	2,990	2,440	3,540	0,849	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	2,947	2,400	3,500	0,596	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P1/M3/seco	2,940	2,390	3,490	0,291	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	3,240	2,690	3,790	0,837	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P2/M3/seco	2,853	2,300	3,400	0,493	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	2,970	2,420	3,520	0,539	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/lubrificante-P4/M3/seco	3,247	2,700	3,800	0,110	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M1/lubrificante	1,807	1,260	2,360	0,184	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M1/seco	1,367	0,820	1,920	0,192	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M2/lubrificante	1,660	1,110	2,210	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P1/M2/seco	1,437	0,890	1,990	0,000	DIFERENTES
P2/M1/seco-P2/M2/lubrificante	1,843	1,290	2,390	0,145	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M2/seco	1,497	0,950	2,050	0,828	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M2/lubrificante	1,717	1,170	2,270	0,019	DIFERENTES
P2/M1/seco-P4/M2/seco	1,850	1,300	2,400	0,321	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M3/lubrificante	1,807	1,260	2,360	0,184	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P1/M3/seco	1,800	1,250	2,350	0,800	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M3/lubrificante	2,100	1,550	2,650	0,313	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P2/M3/seco	1,713	1,160	2,260	0,139	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M3/lubrificante	1,830	1,280	2,380	0,159	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M1/seco-P4/M3/seco	2,107	1,560	2,660	0,018	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P4/M1/seco	-0,440	-0,990	0,110	0,981	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/lubrificante	-0,147	-0,700	0,400	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P1/M2/seco	-0,370	-0,920	0,180	0,000	DIFERENTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/lubrificante	0,037	-0,510	0,590	0,895	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P2/M2/seco	-0,310	-0,860	0,240	0,265	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,090	-0,640	0,460	0,291	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M2/seco	0,043	-0,510	0,590	0,733	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,000	-0,550	0,550	1,000	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P1/M3/seco	-0,007	-0,560	0,540	0,116	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

Continuação

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P4/M1/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,293	-0,260	0,840	0,745	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P2/M3/seco	-0,094	-0,650	0,460	0,876	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,023	-0,530	0,570	0,933	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/lubrificante-P4/M3/seco	0,300	-0,250	0,850	0,280	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M2/lubrificante	0,293	-0,260	0,840	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P1/M2/seco	0,070	-0,480	0,620	0,000	DIFERENTES
P4/M1/seco-P2/M2/lubrificante	0,477	-0,070	1,030	0,876	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M2/seco	0,130	-0,420	0,680	0,275	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M2/lubrificante	0,350	-0,200	0,900	0,280	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M2/seco	0,483	-0,070	1,030	0,752	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M3/lubrificante	0,440	-0,110	0,990	0,981	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P1/M3/seco	0,433	-0,120	0,980	0,121	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M3/lubrificante	0,733	0,180	1,280	0,763	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P2/M3/seco	0,346	-0,210	0,900	0,856	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M3/lubrificante	0,463	-0,090	1,010	0,914	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M1/seco-P4/M3/seco	0,740	0,190	1,290	0,270	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M2/lubrificante-P1/M2/seco	-0,223	-0,770	0,330	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/lubrificante	0,183	-0,370	0,730	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-0,163	-0,710	0,390	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	0,057	-0,490	0,610	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,190	-0,360	0,740	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,147	-0,400	0,700	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P1/M3/seco	0,140	-0,410	0,690	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,440	-0,110	0,990	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P2/M3/seco	0,053	-0,500	0,600	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,170	-0,380	0,720	0,000	DIFERENTES
P1/M2/lubrificante-P4/M3/seco	0,447	-0,100	1,000	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/lubrificante	0,407	-0,140	0,960	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M2/seco	0,060	-0,490	0,610	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/lubrificante	0,280	-0,270	0,830	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M2/seco	0,413	-0,140	0,960	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P1/M3/lubrificante	0,370	-0,180	0,920	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P1/M3/seco	0,363	-0,190	0,910	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,663	0,110	1,210	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P2/M3/seco	0,276	-0,280	0,830	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/lubrificante	0,393	-0,160	0,940	0,000	DIFERENTES
P1/M2/seco-P4/M3/seco	0,670	0,120	1,220	0,000	DIFERENTES
P2/M2/lubrificante-P2/M2/seco	-0,347	-0,900	0,200	0,213	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/lubrificante	-0,127	-0,680	0,420	0,355	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,007	-0,540	0,560	0,636	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	-0,037	-0,590	0,510	0,895	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P1/M3/seco	-0,043	-0,590	0,510	0,089	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,257	-0,290	0,810	0,647	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,131	-0,680	0,420	0,981	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,013	-0,560	0,540	0,962	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/lubrificante-P4/M3/seco	0,264	-0,290	0,810	0,342	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M2/lubrificante	0,220	-0,330	0,770	0,033	DIFERENTES
P2/M2/seco-P4/M2/seco	0,353	-0,200	0,900	0,436	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P1/M3/lubrificante	0,310	-0,240	0,860	0,265	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P1/M3/seco	0,303	-0,250	0,850	0,638	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,603	0,050	1,150	0,427	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P2/M3/seco	0,216	-0,340	0,770	0,205	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/lubrificante	0,333	-0,220	0,880	0,231	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M2/seco-P4/M3/seco	0,610	0,060	1,160	0,031	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P4/M2/seco	0,133	-0,420	0,680	0,165	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/lubrificante	0,090	-0,460	0,640	0,291	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P1/M3/seco	0,083	-0,470	0,630	0,010	DIFERENTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,383	-0,170	0,930	0,169	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P2/M3/seco	-0,004	-0,560	0,550	0,367	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,113	-0,440	0,660	0,331	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/lubrificante-P4/M3/seco	0,390	-0,160	0,940	0,981	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P1/M3/lubrificante	-0,043	-0,590	0,510	0,733	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P1/M3/seco	-0,050	-0,600	0,500	0,214	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P2/M3/lubrificante	0,250	-0,300	0,800	0,988	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P2/M3/seco	-0,138	-0,690	0,410	0,619	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P4/M3/lubrificante	-0,020	-0,570	0,530	0,671	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M2/seco-P4/M3/seco	0,257	-0,290	0,810	0,158	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P1/M3/seco	-0,007	-0,560	0,540	0,116	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/lubrificante	0,293	-0,260	0,840	0,745	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P2/M3/seco	-0,094	-0,650	0,460	0,876	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	0,023	-0,530	0,570	0,933	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,300	-0,250	0,850	0,280	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P2/M3/lubrificante	0,300	-0,250	0,850	0,209	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P2/M3/seco	-0,087	-0,640	0,460	0,085	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES
P1/M3/seco-P4/M3/lubrificante	0,030	-0,520	0,580	0,098	ESTATÍSTICAMENTE SEMELHANTES

Conclusão

Diferença entre Níveis	Média	LI	LS	P-Valor	Conclusão
P1/M3/seco-P4/M3/seco	0,307	-0,240	0,860	0,010	DIFERENTES
P2/M3/lubrificante-P2/M3/seco	-0,388	-0,940	0,160	0,630	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/lubrificante	-0,270	-0,820	0,280	0,682	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,007	-0,540	0,560	0,162	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/lubrificante	0,118	-0,430	0,670	0,942	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P2/M3/seco-P4/M3/seco	0,394	-0,160	0,950	0,355	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES
P4/M3/lubrificante-P4/M3/seco	0,277	-0,270	0,830	0,319	ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES