

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3**

JULIANO BOEIRA ERCOLANI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AISI
304 UTILIZANDO FERRAMENTAL NITRETADO À PLASMA E COM
TRATAMENTOS DÚPLEX**

Porto Alegre

2018

JULIANO BOEIRA ERCOLANI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL
AISI 304 UTILIZANDO FERRAMENTAL NITRETADO À PLASMA E COM
TRATAMENTOS DÚPLEX**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

**Porto Alegre
2018**

JULIANO BOEIRA ERCOLANI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304
UTILIZANDO FERRAMENTAL NITRETADO À PLASMA E COM TRATAMENTOS
DÚPLEX**

Esta dissertação 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. Alexandre da Silva Rocha

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em: 05/06/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luis Fernando Folle – UNIRITTER/RS. _____

Prof. Dr. Giovanni Rocha dos Santos - SENAI/RS. _____

Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos - UFRGS/RS. _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha família, em especial aos meus pais, Francisco e Clara, e à minha irmã, Clarice.

Agradeço ao Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha pela orientação, parceria e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. M.Sc. Luciano Kempinski, pela ajuda na escolha do tema e na realização dos tratamentos realizados.

Aos colegas do Grupo de Conformação de Chapas: Camila, Renan e Camaro, pelo companheirismo e ajuda durante o mestrado.

Aos acadêmicos Gabriel Grazziotin e Lucas Kehl, pela ajuda na realização dos ensaios DST.

Ao LAPEC, em especial à M.Sc. Maria Rita Ortega Vega, pela ajuda na análise dos lubrificantes.

Ao LAFUN, pela realização das análises de composição química.

Aos colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM).

À CAPES, UFRGS e ao PPGE3M, pela oportunidade e pela bolsa de mestrado.

Dedico este trabalho ao meu pai,
Francisco Lucas Ecolani, maior
incentivador ao meu trabalho.

“A noite é mais escura pouco antes do amanhecer”
(Harvey Dent)

RESUMO

O atrito gerado no contato em movimento entre a chapa e a ferramenta nos processos de estampagem tem sido alvo de muitos estudos e tem muita importância em operações de estampagem de chapas, uma vez que esse é um dos principais causadores de falhas. Desta forma, este estudo tem como principal objetivo avaliar o desempenho tribológico dos tratamentos dúplex e da nitretação a plasma aplicados em matrizes de estampagem. Os revestimentos utilizados nesse estudo foram o carboneto de tungstênio (TiCN) e o *Diamond-like Carbon* (DLC). Para o cálculo do coeficiente de atrito foram realizados dois ensaios distintos, o ensaio de Dobramento Sob Tensão (DST) e o ensaio Swift. O substrato utilizado para receber os tratamentos foi aço DIN X100CrMoV8-1-1, comercialmente conhecido como Cryodur 2990. A chapa utilizada nos ensaios foi o aço inoxidável AISI 304, em razão da sua boa estampabilidade. Foram utilizados dois lubrificantes na realização dos ensaios: DesmoldMax 35 e DesmoldMax 35-S, ambos da marca Clarus. Os coeficientes de atrito medidos, tanto através do ensaio Swift, quanto pelo DST foram na média menores para as condições nitretadas a plasma e com tratamentos duplex em relação a condições não tratadas superficialmente. A rugosidade superficial medida no ferramental após a realização dos ensaios foi menor para todas as condições tratadas superficialmente. Da mesma forma, a avaliação qualitativa do desgaste mostrou que este foi muito mais brando nas condições tratadas que não tratadas. Através dos resultados obtidos, pôde-se observar que quando realizados os ensaios com lubrificação os benefícios obtidos pela realização dos tratamentos superficiais destacaram-se.

Palavras-chave: Coeficiente de Atrito, tratamento dúplex, estampagem de chapas, ensaio de Dobramento Sob Tensão, ensaio Swift

ABSTRACT

The friction generated in the moving contact between the sheet and the tool in the stamping processes has been the subject of many studies and is very important in sheet metal stamping operations since this is one of the main causes of failure. In this way, this study has as main objective to evaluate the tribological performance of the duplex treatments and the plasma nitriding applied in stamping dies. The coatings used in this study were Titanium Carbo-Nitride (TiCN) and *Diamond-like carbon* (DLC). Two different tests were used to calculate the friction coefficient, the Bending Under Tension Test (BUT) and the Swift test. The substrate used to receive the treatments was steel DIN X100CrMoV8-1-1, commercially known as Cryodur 2990. The sheet used in the tests was stainless steel AISI 304, because of its good stampability. Two lubricants were used in the tests: DesmoldMax 35 and DesmoldMax 35-S, both of the Clarus brand. The coefficients of friction measured by the Swift test and the DST were on average lower for plasma nitrided conditions and duplex treatments than for surface untreated conditions. The surface roughness measured in the tooling after the tests was smaller for all surface treated conditions. Likewise, the qualitative evaluation of wear showed that it was much milder in treated conditions than in untreated ones. By the results obtained, it was observed that when the lubrication tests were carried out the benefits obtained by the accomplishment of the superficial treatments stood out.

Key-words: Coefficient of friction, duplex treatment, sheet stamping, Bending Under Tension Test, Swift test

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do cálculo de deformações e do coeficiente de anisotropia (r)	22
Figura 2 - Partes de um equipamento utilizado para nitretação a plasma	27
Figura 3 - Desenho esquemático de uma câmara de deposição física de vapor	29
Figura 4 - Exemplificação das estruturas do grafite, do DLC e do diamante	30
Figura 5 - Figura esquemática do ensaio DST	31
Figura 6 - Representação em perspectiva do Ensaio Swift	33
Figura 7 - Aço DIN X100CrMoV8-1- 1 após tratamento térmico. Ataque: Nital 2%. Aumento: 1000x	35
Figura 8 - Máquina Universal de Ensaaios	36
Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de tração	37
Figura 10 - Corpo de Prova para o Ensaio Erichsen.....	38
Figura 11 - Equipamento utilizado no ensaio de Dobramento Sob Tensão	39
Figura 12 - Dimensões dos Pinos utilizados no ensaio DST (em mm)	39
Figura 13 - Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico.....	40
Figura 14 - Deslocamento máximo no ensaio Erichsen	48
Figura 15 - Força máxima no ensaio Erichsen.....	49
Figura 16 - FTIR dos lubrificantes	50
Figura 17 - Perda de massa dos lubrificantes	51
Figura 18 - Perda de volume dos lubrificantes	51
Figura 19 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino polido.....	52
Figura 20 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino nitretado	53
Figura 21 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino com TiCN.....	53
Figura 22 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino com DLC.....	54
Figura 23 - Curvas do coeficiente de atrito sem lubrificante	54
Figura 24 - Curvas do coeficiente de atrito com lubrificante DesmoldMax 35	55
Figura 25 - Curvas do coeficiente de atrito com lubrificante DesmoldMax 35-S	55
Figura 26 - Curvas do coeficiente de atrito de todos os ensaios	56
Figura 27 - Médias e desvio padrão dos coeficientes de atrito para o ensaio DST	56
Figura 28 - Punção danificado no ensaio Swift sem lubrificação	59
Figura 29 - Força Máxima e Desvio Padrão no ensaio Swift	59

Figura 30 - Coeficiente de atrito através do ensaio Swift	60
Figura 31 - Região de medição da rugosidade nos punções	61
Figura 32 - Rugosidade Ra dos punções do ensaio Swift (μm)	62
Figura 33 - Rugosidade Rz dos punções do ensaio Swift (μm)	63
Figura 34 - Região de análise do desgaste dos pinos	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável AISI 304 (Percentual em massa)	34
Tabela 2 - Composição química do aço DIN X100CrMoV8-1- 1	34
Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos processos de nitretação a plasma	45
Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos processos de deposição de TiCN	45
Tabela 5 - Parâmetros utilizados nos processos de deposição de DLC	46
Tabela 6 - C e n para p aço inoxidável 304	47
Tabela 7 - Anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δr) do aço inox AISI 304	47
Tabela 8 - Médias e desvio padrão do deslocamento máximo no ensaio Erichsen (mm) ..	48
Tabela 9 - Médias e desvio padrão da força máxima no ensaio Erichsen (N)	49
Tabela 10 - Parâmetros geométricos das ferramentas do ensaio Swift	57
Tabela 11 - Parâmetros Geométricos Calculados para o ensaio Swift.....	57
Tabela 12 - Parâmetros do Aço Inox 304.....	57
Tabela 13 - Cálculos das tensões e deformações obtidas pelas equações de Panknin	58
Tabela 14 - Médias e desvio padrão das forças máximas do ensaio Swift	58
Tabela 15 - Comparação dos coeficientes de atrito (μ)	60
Tabela 16 - Rugosidade Ra dos punções do ensaio Swift (μm)	62
Tabela 17 - Rugosidade Rz dos punções do ensaio Swift (μm)	63
Tabela 18 - Superfície dos punções após o Ensaio Swift. Aumento 10x	64
Tabela 19 - Superfície dos pinos após o Ensaio DST. Aumento 10x.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

C	<i>Coeficiente de Resistência [N/mm²]</i>
d	<i>diâmetro do punção [mm]</i>
D	<i>diâmetro da geratriz [mm]</i>
F	<i>força [N]</i>
h	<i>altura do copo [mm]</i>
kf	<i>tensão de escoamento [N/mm²]</i>
n	<i>índice de encruamento [-]</i>
r	<i>raio [mm]</i>
r_m	<i>coeficiente de anisotropia médio [-]</i>
s	<i>espessura da chapa [mm]</i>
s_o	<i>espessura inicial da chapa [mm]</i>
b	<i>largura da chapa [mm]</i>
b_o	<i>largura inicial da chapa [mm]</i>
Δ_r	<i>coeficiente de anisotropia planar [mm]</i>
ε_x	<i>deformação de engenharia [%]</i>
φ	<i>deformação verdadeira [-]</i>
φ₁	<i>deformação principal no comprimento [-]</i>
φ₂	<i>deformação principal na largura [-]</i>
φ₃	<i>deformação principal na espessura [-]</i>
β	<i>relação de estampagem [-]</i>
μ	<i>coeficiente de atrito [-]</i>
∅	<i>diâmetro [mm]</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

CP	Corpo de Prova
DLC	Diamond-Like Carbon
DST	Dobramento Sob Tensão
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformadas de Fourier
IE	Índice Erichsen
LAPEC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
PAPVD	Plasma Assisted Physical Vapor Deposition
PVD	Physical Vapor Deposition
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TGA	Análise Termogravimétrica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
SUMÁRIO	14
1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS.....	18
2.2 TRIBOLOGIA.....	18
2.2.1 <i>Atrito e desgaste</i>	18
2.2.2 <i>Rugosidade Superficial</i>	19
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	20
2.3.1 <i>Curva de escoamento</i>	20
2.3.2 <i>Índice de Anisotropia</i>	21
2.4 ANÁLISE DOS LUBRIFICANTES.....	23
2.4.1 <i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformadas de Fourier (FTIR)</i>	23
2.4.2 <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	24
2.4.3 <i>Índice Erichsen</i>	24
2.5 TRATAMENTO DÚPLEX.....	25
2.6 NITRETAÇÃO À PLASMA	26
2.7 REVESTIMENTOS PVD.....	27
2.7.1 <i>TiCN</i>	29
2.7.2 <i>DLC</i>	29
2.8 ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA MEDIÇÃO DE ATRITO.....	31
2.8.1 <i>Ensaio de Dobramento Sob Tensão</i>	31
2.8.2 <i>Ensaio Swift</i>	32
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
3.1 MATERIAIS.....	34
3.2 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304.....	36
3.2.1 <i>Ensaio de tração</i>	36
3.2.2 <i>Ensaio de anisotropia</i>	37
3.3 ANÁLISE DOS LUBRIFICANTES.....	37
3.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO.....	38
3.5 ENSAIO SWIFT.....	40
3.6 TRATAMENTOS REALIZADOS	44
3.6.1 <i>Nitretação a Plasma</i>	44
3.6.2 <i>Revestimentos</i>	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL.....	47
4.2 ANÁLISE DOS LUBRIFICANTES	48
4.3 COEFICIENTE DE ATRITO	52
4.4 RUGOSIDADE	61
4.5 DESGASTE.....	64

5	DISCUSSÃO GERAL	67
6	CONCLUSÕES	69
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

O processo de conformação de chapas está em constante evolução na busca de tecnologias avançadas para proporcionar diversas melhorias na qualidade e no tempo do processo.

O desgaste é um dos principais problemas industriais comumente encontrados, que levam à substituição de componentes e equipamentos em engenharia. As perdas econômicas consequentes de desgastes não envolvem somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, de competitividade e de oportunidades de negócios (DAVIS, 2004).

Um dos maiores causadores de desgaste em matrizes de estampagem é o atrito gerado entre ferramentas e peças. Tendo em vista isso, tem sido alvo de muitos estudos e tem muita importância em operações de estampagem de chapas, fornecendo importantes e necessários conhecimentos para a análise e projeto de novas ferramentas, assim como para eficiência dos produtos fabricados usando estes processos.

A condição superficial da ferramenta exerce grande influência sobre seu desempenho, podendo inclusive, ser o fator determinante da possibilidade de execução ou não de um determinado processo de conformação, por exemplo, em condições em que ocorre a aderência do material sendo conformado à ferramenta. A condição (ou estado) superficial é caracterizada pela topografia da superfície, microestrutura, dureza, composição química, composição de fases, tensões residuais e textura cristalográfica (SKONIESKI, 2013).

Uma das formas de diminuir o atrito é através da utilização de tratamentos dúplex, que compreende a utilização de um tratamento de nitretação a plasma seguido de revestimento.

O tratamento superficial de nitretação a plasma possui excelente controle de variáveis de processo e permite obter microestruturas-alvo previamente planejadas e com propriedades pertinentes ao processo de conformação em que a superfície atuará. Além de ser um método conhecido de incremento da resistência ao desgaste nos aços, ela também é utilizada como preparação de superfícies para deposição posterior de revestimentos, proporcionar uma superfície com melhor suporte mecânico e menor

gradiente de propriedades na interface, o que resulta em um melhor desempenho do sistema (Both, 2011).

Devido a isso, dois revestimentos que têm sido usados combinados com a nitretação são o TiCN e o DLC. Estudos mostram que há uma diminuição do desgaste quando esses revestimentos são utilizados em ferramentas se comparados sem nenhum tipo de tratamento (BOTH, 2011; SKONIESKI, 2013; KEMPSKI, 2013; SANTOS, 2015).

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento tribológico dos tratamentos de nitretação a plasma e dos tratamentos dúplex aplicados em ferramentas de estampagem.

Como objetivos específicos, busca-se a diminuição do atrito, da rugosidade e do desgaste gerados com a utilização dos tratamentos propostos, através dos ensaios de dobramento sob tensão (DST) e do ensaio Swift, assim como a influência da utilização de lubrificantes durante os ensaios.

Para a obtenção desses resultados, foram realizadas as seguintes etapas:

- Análise do atrito gerado através dos ensaios de dobramento sob tensão (DST) e do ensaio Swift.
- Medições de rugosidade superficial nas ferramentas de estampagem antes e depois dos ensaios.
- Análise do desgaste gerado nas ferramentas de estampagem nas diferentes condições de tratamento.
- Verificação da interação dos lubrificantes durante os ensaios combinados com os diferentes tratamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conformação de chapas

O processo de conformação de chapas pode ser dividido em dois diferentes grupos: o grupo dos processos de conformação e o grupo dos processos de separação. Ao grupo de conformação, pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem que haja separação ou adição de material, por exemplo, estampagem, embutimento profundo, dobra e repuxo. Ao grupo de separação, pertencem todos os processos de corte por cisalhamento, por exemplo, o corte convencional mais comumente usado por ser um processo simples e de baixo custo e o corte fino mais conhecido como “fineblanking” (Schaeffer, 1999).

2.2 Tribologia

Segundo Kajdas (1990), a tribologia é definida como a ciência e tecnologia de superfícies em interação em movimento relativo e das práticas relacionadas. Tribologia engloba a ciência e tecnologia de atrito, desgaste e lubrificação. Trata dos fenômenos que ocorrem entre superfícies que se interagem em movimento relativo relacionado à física, mecânica, metalurgia e química.

2.2.1 Atrito e desgaste

O atrito pode ser definido como a força que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies e é em geral associado ao desgaste em virtude de decorrerem frequentemente dos mesmos mecanismos e dependerem ambos da configuração e da cinemática do sistema. (LEITE, 2010; HALLIDAY,1994).

O desgaste pode mudar a rugosidade, a pressão nominal e a área de contato, e por transferência de material ou formação de um terceiro corpo pode-se mudar a composição e propriedades dos materiais na sua interface (BLAU, 2009).

A magnitude da força de atrito é descrita em termos de coeficiente de atrito, que é a razão entre a força de atrito e a força normal que pressiona os corpos entre si, sendo esta descrição amplamente utilizada como caracterizadora do atrito do sistema (ALTERA, 2009).

O coeficiente de atrito é considerado como sendo variável e dependente de parâmetros operacionais (por exemplo, umidade, temperatura, velocidade e pressão de contato), de lubrificantes, de propriedades do substrato e dos filmes superficiais.

A lubrificação no processo de conformação de metais é muito importante para controlar o desgaste e o atrito na interface entre as superfícies (NARUL, 2015).

2.2.2 Rugosidade Superficial

O tipo de topografia e o grau de rugosidade do revestimento são fatores importantes referentes a interpretação de resultados relativos à qualidade e a estabilidade dimensional (de SOUZA, 2017).

O estudo da rugosidade superficial tem uma grande importância no projeto de matrizes para estampagem, uma vez que afeta o desgaste das ferramentas, aumentando os custos. Souza (2016) estudou o efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio, mostrando que os punções de maior rugosidade falharam prematuramente quando comparados aos de menor rugosidade.

A rugosidade de uma superfície é caracterizada através da rugosidade superficial média (Ra), que é a média aritmética dos desvios de uma linha média, medidos dentro de um deslocamento (Equação 1). A rugosidade também pode ser caracterizada através da medição da rugosidade total (Rz) que é uma média entre os 5 maiores picos e os 5 vales mais profundos (Equação 2), o que impede que alguns riscos e irregularidades da superfície interfiram no resultado (MENEZES, 2013; BHUSAN, 2013).

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \bar{z}| \quad (1)$$

$$Rz = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_{picos} - \sum_{i=1}^n R_{vales} \right) \quad (2)$$

2.3 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais é uma importante ferramenta na conformação mecânica, fornecendo dados para avaliação do seu comportamento quando submetidos a um determinado esforço.

2.3.1 Curva de escoamento

A curva de escoamento é um elemento básico para a determinação das condições de trabalho na conformação mecânica. O escoamento de um material inicia quando as tensões atuantes atingirem um determinado valor, característica do mesmo: a resistência ao escoamento, k_f .

O ensaio de tração, que é o mais simples na obtenção da curva de escoamento, consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação da altura (h) em função da força (F) (GARCIA, 2000).

Devido à carga aplicada, o corpo de prova passa por um período de deformação elástica e posteriormente começa a se deformar, criando um alongamento chamado de pescoço. A partir desse ponto, a força não é mais uniaxial e o corpo de prova passa da deformação plástica homogênea para a formação da ruptura. Através dessas regiões é obtida uma curva tensão x deformação e é obtida a curva de escoamento do material (BRITO, 1998).

Para os gráficos de tensão verdadeira x deformação verdadeira, há a necessidade de se saber a área instantânea em cada ponto do ensaio. Isso pode ser calculado através da lei da constância de volume. Esta lei leva em conta o fato de que o material ensaiado não varia o seu volume durante o ensaio. Assim, pode-se calcular sua área instantânea (A_1) através da área inicial (A_0), altura inicial (h_0) e altura instantânea (h_1), através da equação 3.

$$A_1 = \frac{A_0 \times h_0}{h_1} \quad (3)$$

Calculada a área em cada momento do ensaio, pode-se plotar o gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira, através das seguintes equações:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \quad (4)$$

$$k_f = \frac{F}{A_1} \quad (5)$$

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma função matemática. Na deformação a frio essa função segue a equação de Hollomon, mostrada na equação 6.

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

Onde:

C [MPa]: Constante do material para $\varphi=1$

n: Índice de encruamento

φ : deformação verdadeira

O índice de encruamento n é um importante indicador das características de encruabilidade dos materiais. Quanto maior o índice de encruamento n, maior é a encruabilidade do material (Schaeffer, 2004).

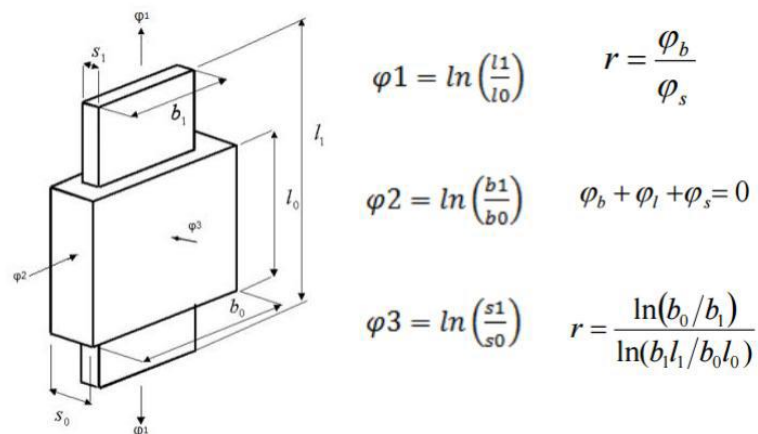
2.3.2 Índice de Anisotropia

A anisotropia caracteriza as propriedades de uma chapa metálica levando-se em conta os efeitos de sua heterogeneidade causada no processo de laminação. Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação provocando uma heterogeneidade nas propriedades das chapas, apresentando valores diferentes, que

dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção em que o material foi laminado, uma vez que a laminação modifica a orientação cristalina dos grãos que compõem o material (BOFF, 2012).

Os coeficientes de anisotropia são muito importantes na caracterização de uma chapa porque eles descrevem como são as deformações do material quando passar um processo de estampagem. O coeficiente de anisotropia (r) é calculado pela relação entre deformação na largura e deformação na espessura. A figura 1 mostra em um desenho esquemático o cálculo de deformações e o cálculo do coeficiente de anisotropia.

Figura 1 - Esquema do cálculo de deformações e do coeficiente de anisotropia (r)



Fonte: Schaeffer, 2016

O valor médio de anisotropia r_m estima a anisotropia de um material e pode ser determinado a partir da equação 7:

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (7)$$

Sabendo que “s” representa a espessura e “b” representa a largura, valores de r_m maiores que 1 significam que a deformação na espessura é menor que na largura. Já valores de r_m menores que 1, mostram que a espessura se deforma mais que a largura, ou seja, ela afina. Desta forma, entende-se que valores ideais para o coeficiente de anisotropia são valores maiores que 1 ou próximos de 1, que representam uma deformação homogênea entre largura e espessura.

A anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. O coeficiente de anisotropia planar Δ_r é dado pela equação 8.

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} - 2.r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (8)$$

Esse parâmetro tem relação com o orelhamento da chapa quando passa por um processo de estampagem profunda, ou embutimento. O orelhamento normalmente é um acúmulo de deformações causado por uma má regulagem do prensa-chapas. Para valores mais distantes de 0 (podem ser negativos), maior a tendência ao orelhamento (SCHAEFFER, 2016).

2.4 Análise dos lubrificantes

2.4.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformadas de Fourier (FTIR)

A técnica FTIR fornece evidências da presença de grupos funcionais presentes na estrutura de substâncias, podendo ser usada para identificar um composto ou investigar sua composição química. O termo espectroscopia de infravermelhos com transformadas de Fourier provém do facto de ser necessário recorrer-se às transformadas de Fourier (um processo matemático) para converter os dados recolhidos no espectro de radiação.

O objetivo de qualquer espectro de absorção (FTIR, espectrofotometria UV-Vis, etc.) é medir quão bem uma amostra consegue absorver radiação a um determinado comprimento de onda. São três componentes básicos de um espectrômetro: a fonte de radiação no infravermelho médio; um interferômetro de Michelson, formado por dois espelhos, sendo um fixo e outro móvel; e um divisor de feixe, composto de um cristal de KBr (CIENFUEGOS e VAITSMAN, 2000).

Um feixe de radiação é incidido no interferômetro de Michelson e ao passar pelo espelho semi-prateado (divisor de feixe) divide-se, percorrendo dois caminhos distintos e perpendiculares entre si, ou seja, 50% da radiação é transmitida e 50% é refletida. Ambos retornam ao divisor de feixes se recombinando com um perfil do batimento, formando

interferências construtivas e destrutivas. Conforme a posição do espelho móvel, se tem como máxima interferência construtiva uma determinada frequência, tal que no intervalo de espaço percorrido pelo espelho, as frequências entre 650 e 4000 cm^{-1} assumem o máximo de interferência pelo menos uma vez. Após o feixe incidir na amostra é direcionado a um detector fotossensível que irá captar o sinal luminoso, transformando-o em um interferograma, que por sua vez, passará pela Transformada de Fourier, convertendo o interferograma em um espectro de absorção óptica infravermelha, sendo do tipo intensidade de absorção (ou absorvância) em função do número de onda (relacionado à energia vibracional da molécula) (FIGUEIREDO, 2009; ZIDA, 2007).

2.4.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

No método TGA é realizada uma medição contínua das temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, enquanto ambos vão sendo submetidos a aquecimento ou resfriamento (IONASHIRO, 2004). A TGA é, então, restrita às transições que envolvam perda ou ganho de massa, e é mais comumente usada para estudos de processos de dessolvatação e decomposição (BRITAIN, 1999).

O equipamento da análise termogravimétrica é composto basicamente pela termobalança. O equipamento pode mudar de configuração de um fabricante para outro, mas os fundamentos de todos eles são os mesmos. A termobalança é um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura, ou seja, à medida que ela é aquecida ou resfriada. As medições realizadas por essa técnica são diferenciais, ou seja, registra a diferença entre a temperatura do material de referência e da amostra em função da temperatura ou do tempo (IONASHIRO, 2004). As curvas obtidas fornecem informações relativas à composição e estabilidade térmica da amostra, dos produtos intermediários e do resíduo formado.

2.4.3 Índice Erichsen

O ensaio Erichsen é um dos ensaios mais empregados na indústria para verificar as condições de ductilidade e estiramento de chapas, sendo característico ocorrer deformações bidirecionais trativas, podendo ser realizado em condições de lubrificações

controladas. Um dos fatores determinantes para seu uso é a sua simplicidade e baixo custo (FABRISIO, 2017).

Durante o ensaio o prensa-chapas fixa o corpo de prova na matriz, e este sofre deformação através da atuação de um punção esférico, sendo finalizado após a ruptura (SCHAEFFER, 2004). O Índice Erichsen (IE) é a altura do copo após a atuação do punção (SOUZA, 1982).

Um resultado elevado do Índice Erichsen de Embutimento (IE) representará uma boa estampabilidade do material, sendo que o IE possui uma relação positiva com o índice de encruamento (n) do material, assim, o aumento do IE resulta no aumento do índice de encruamento (n) e vice-versa (OLIVEIRA, 2010).

Como a utilização de lubrificantes diminui o atrito gerado entre o punção e a chapa durante o ensaio, há uma mudança do valor do IE durante o ensaio. Assim, o ensaio Erichsen é excelente para se analisar o comportamento do lubrificante em na estampagem de um determinado material.

2.5 Tratamento Dúplex

Como diz o nome, os tratamentos duplex correspondem à aplicação sequencial de duas ou mais tecnologias superficiais estabelecidas para a produção de um compósito, com propriedades inatingíveis quando da aplicação individual. Há duas principais classes: na primeira, dois processos individuais se complementam e o resultado final é função dos dois processos. A nitretação a plasma seguida da deposição de revestimentos é um exemplo típico. A segunda classe são processos onde um processo suplementa ou reforça o outro, e o resultado é relacionado majoritariamente a um deles (BELL, DONG, SUN, 1998).

Segundo Musil, Vleck e Ruzicka (2000), os tratamentos dúplex podem ser classificados em duas categorias:

- a) Direto: a deposição ocorre sobre uma superfície já nitretada ou sobre um substrato com superfície já modificada;
- b) Conversão: nitretação ou tratamento térmico a vácuo sobre o recobrimento ou superfície modificada.

A mudança da ordem dos processos resulta em dramáticas diferenças na alteração da superfície produzida pelas duas técnicas. A nitretação a plasma feita antes do

recobrimento melhora a superfície do substrato, mas também forma nitretos (camada branca), que dificultam a difusão de elementos do substrato para o recobrimento e vice-versa, o que é muito importante quando se quer uma boa adesão do filme no substrato. O mesmo já não ocorre quando se utiliza a técnica conversão, pois ocorre uma difusão eficiente entre substrato e recobrimento ocorrendo redistribuição dos elementos no recobrimento, e, pode ocorrer a formação de intermetálicos quando a temperatura for suficientemente alta (LEITE, 2012).

2.6 Nitretação à plasma

A nitretação é frequentemente utilizada para aumentar a dureza superficial do aço (CHIAVERINI, 1988; ASM INTERNATIONAL, 1998). A nitretação à plasma é um processo termoquímico e físico em que o nitrogênio, presente na forma de íons que constituem o plasma, é primeiro implantado no metal para depois se difundir, gerando uma camada superficial ou nitretada. É obtido através da aplicação de uma descarga elétrica nas peças, que estarão dispostas numa mistura de gases à baixa pressão, chamado de meio nitretante. A nitretação é um tratamento que eleva a dureza da superfície, a resistência à fadiga, a resistência ao desgaste e a resistência à corrosão dos aços.

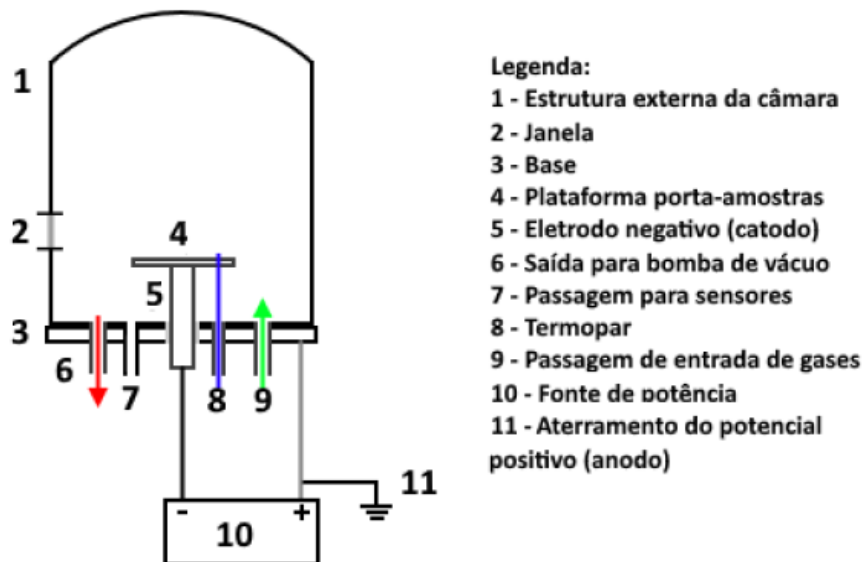
Conforme Kempski (2014), a nitretação submete o aço a uma temperatura entre 450 e 550°C em uma atmosfera rica em nitrogênio. A ferramenta deve ser submetida a um ambiente com vácuo onde é induzida uma diferença de potencial, ionizando o gás e gerando um bombardeamento iônico promovendo a difusão do nitrogênio.

Sob vácuo, ocorre a formação do plasma, no qual íons de nitrogênio são acelerados a partir de uma diferença de potencial gerada para chocar-se contra a peça de trabalho. Este bombardeamento iônico aquece a peça de trabalho, limpa a superfície e fornece nitrogênio ativo. A nitretação a plasma é capaz de proporcionar um melhor controle da composição química e uniformidade da camada e causar baixa distorção do material a ser nitretado quando comparada com a nitretação gasosa, por exemplo (ASM, 1991).

Um equipamento para realização de tratamentos de nitretação a plasma é constituído de uma câmara que durante o tratamento fica em baixa pressão com o auxílio de uma bomba de vácuo, esta câmara possui canais de entrada dos gases que serão utilizados durante o tratamento e canais para passagem de instrumentação utilizada na

realização dos controles dos parâmetros de processo, como sensores de pressão e temperatura. No interior da câmara existe uma estrutura para o posicionamento dos substratos a serem nitretados, esta estrutura fica conectada a um dos polos da fonte de potência, geralmente o polo negativo (cátodo), e é isolada da carcaça do equipamento que fica conectado ao outro polo da fonte (ânodo). Deve ser utilizado um elemento resistivo entre a fonte de potência e um dos eletrodos para que o tratamento se mantenha no regime de descarga anômala. Diferentes tipos de fontes de potência podem ser empregados, como fonte de corrente contínua DC, pulsada, semi-pulsada, retificada, entre outros (OLIVEIRA, 2017).

Figura 2 - Partes de um equipamento utilizado para nitretação a plasma



Fonte: Oliveira, 2017

2.7 Revestimentos PVD

A deposição física de vapor ou PVD (Physical Vapor Deposition) se baseia na formação de filmes pelo transporte dos elementos formadores na forma atômica, molecular ou iônica até a superfície em tratamento. A obtenção dos elementos ocorre a partir de fontes sólidas, líquidas ou gasosas (FROEHLICH, 2003). O material sólido - metais como cromo, alumínio e titânio de alta pureza - é evaporado termicamente ou por uso de processos de *sputtering*, e pode também ser utilizado um gás reativo (N_2 , CH_4 , O_2), que forma um composto com o vapor metálico que se deposita na superfície em tratamento na forma de um filme muito fino e altamente aderente (BOTH, 2011).

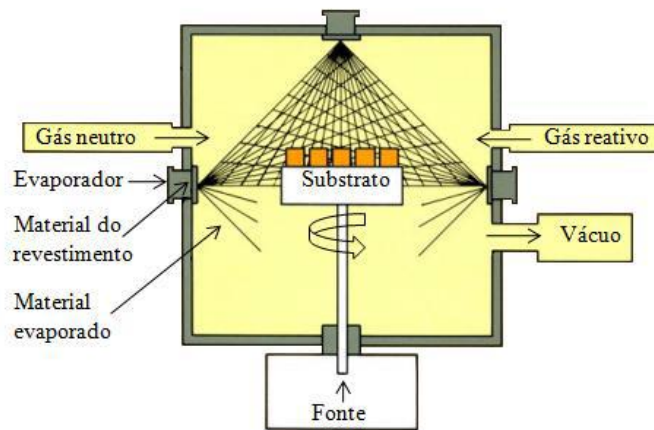
PAPVD é o termo genérico utilizado para descrever diversos processos PVD que utilizam a descarga incandescente para melhorar as propriedades dos revestimentos produzidos (RICKERBY,1991).

Algumas das vantagens dos revestimentos produzidos por PAPVD são as seguintes (SANTOS, 2015):

- Adesão melhorada, pelo fato de se fazer a limpeza por sputtering e pré-aquecimento do substrato por bombardeamento iônico da superfície do substrato;
- Possibilidade de evitar a realização de etapas posteriores à deposição para melhoria do acabamento final, pois em muitos casos, o revestimento replica a rugosidade original da superfície;
- Deposição de diversos tipos de revestimento em vários tipos de substratos (incluindo materiais que são isolantes elétricos), pela utilização de bias (tensão negativa aplicada ao substrato) via fontes de rádio frequência;
- Taxas de deposição controladas pelo uso de diversos tipos de fontes de evaporação (resistiva, feixe de elétrons, por indução, sputtering ou magnetron sputtering);
- Geralmente não há efluentes ou poluentes advindos dos processos PAPVD e, em muitos casos, não há produtos nocivos ou tóxicos para o ser humano;
- Alta pureza dos depósitos, pois são obtidos em um ambiente sob vácuo e com materiais puros sendo evaporados;
- Baixas temperaturas de deposição

O processo de PVD assistido por plasma possui características semelhantes ao processo de nitretação a plasma. Como mostra a figura 3, a configuração é parecida, com o substrato em tratamento atuando como cátodo e a carcaça da câmara como ânodo. A principal diferença é a atmosfera de plasma, de alto vácuo, obtida através da evaporação de um alvo sólido e introdução de um gás reativo (opcional). O uso do plasma traz uma série de vantagens, como a limpeza por sputtering antes do tratamento, pré-aquecimento, melhor uniformidade e controle do filme e baixas temperaturas de deposição (entre 50°C e 500°).

Figura 3 - Desenho esquemático de uma câmara de deposição física de vapor



Fonte: Both, 2011

2.7.1 TiCN

Segundo Filho (2015), o TiCN é descrito na literatura como uma solução sólida de TiC + TiN. Portanto esse filme incorpora as características das duas fases presentes. Quando comparados com estes dois compostos, o TiCN possui maior dureza, melhor resistência ao desgaste, menor coeficiente de atrito e alta adesão ao substrato onde ele é aplicado (HE, 2006; FANG, 2004).

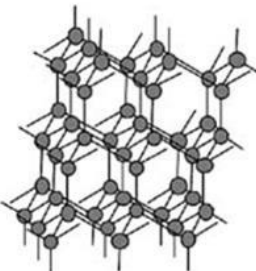
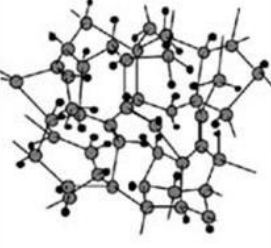
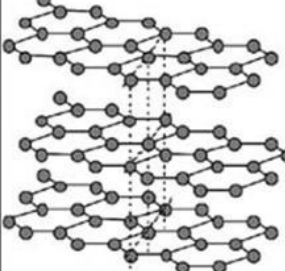
As principais propriedades dos revestimentos TiCN residem no fato destes possuírem alta dureza (aproximadamente 3000HV), o que lhes conferem boa resistência ao desgaste. Também possuem boa resistência à corrosão de uma forma geral, tensões residuais compressivas e são capazes de propiciar baixo coeficiente de atrito (SANTOS, 2015).

2.7.2 DLC

O revestimento DLC (Diamond-like carbon), segundo Short (2008), é um filme de carbono tipo diamante que possui alta dureza, alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito (μ). Ele apresenta o carbono em uma de suas formas moleculares com diferentes hibridizações, variando assim suas propriedades. DLC é um tipo de carbono amorfo (hidrogenado ou não) com uma considerável fração de ligações sp^3 entre

os carbonos (SKONIESKI, 2013). Uma exemplificação da estrutura do DLC é apresentada na figura 4.

Figura 4 - Exemplificação das estruturas do grafite, do DLC e do diamante

	Diamante	DLC (DiamondLikeCarbon)	Grafite
Estrutura	 Estrutura Cristalina (ligações sp^3)	 Estrutura Amorfa (ligações sp^2 e sp^3)	 Estrutura Cristalina (ligações sp^2)
Elemento Constituinte	C	C·H	C

Fonte: Skonieski, 2013

Para a realização do revestimento é necessário que o filme seja aderido à superfície do componente, onde diversos métodos de deposição física ou química são utilizados. O revestimento DLC pode ser depositado usando diferentes técnicas de PAPVD e CVD tais quais plasmas de rádio frequência e processos com utilização de magnetrons.

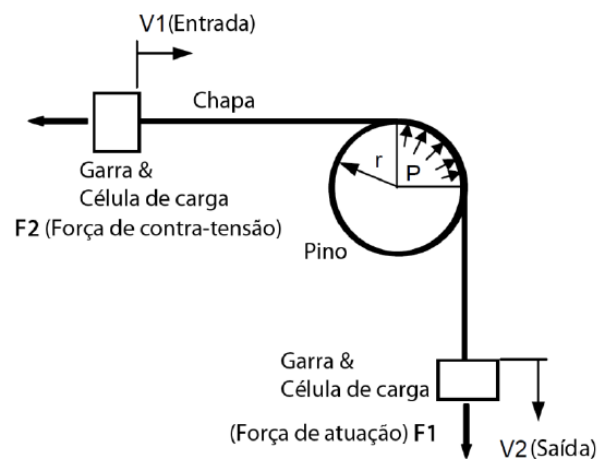
Alta dureza, alta estabilidade química e baixo atrito e desgaste os tornam bons candidatos para uma ampla variedade de aplicações tribológicas, como rolamentos, engrenagens, vedações, ferramentas de corte e conformação de metais, dispositivos de armazenamento magnético e assim por diante. (ÖZMENA, 2000). Os revestimentos DLC são bem conhecidos por possuírem propriedades auto lubrificantes mesmo sem lubrificação (ROBERTSON, 2002; HIRVONEN, 1996).

2.8 Ensaios tecnológicos para medição de atrito

2.8.1 Ensaio de Dobramento Sob Tensão

O ensaio de Dobramento sob Tensão consiste em dobrar uma tira de chapa através de um pino de raio pré-determinado e sobre esse pino fazer a chapa deslizar. Para isso, há a aplicação de uma força (F2) em uma das extremidades da chapa para que haja o movimento relativo entre a chapa e pino. Na outra extremidade é aplicada uma força (F1) contrária ao movimento com o objetivo de tencionar a chapa e poder-se variar a pressão de contato incidente sobre o pino (FOLLE, 2012). Um desenho esquemático pode ser visto na figura 5.

Figura 5 - Figura esquemática do ensaio DST



Fonte: KIM, et al., 2012

É possível determinar o coeficiente de atrito de diversas formas. O método escolhido deve se adaptar aos dados disponíveis e às condições de ensaio. Ao realizar o ensaio DST para obtenção do coeficiente de atrito, os dados fornecidos permitem calcular o coeficiente de atrito através das equações 9, 10 e 11 propostas por Andreasen (2006).

Inicialmente é determinada a tensão de atrito (τ) obtida através do torque (T) no pino, da largura da chapa ensaiada (W) e do raio do pino (R).

$$\tau = \frac{2T}{\pi WR^1} \quad (9)$$

Então, é encontrada a pressão de contato (p) através da equação 10 e a relação entre ambas as equações 9 e 10 fornece a equação final 11 para obtenção do coeficiente de atrito (μ).

$$p = \frac{F1+F2}{2WR} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{4T}{\pi R(F1+F2)} \quad (11)$$

Portanto, segundo Andreasen (2006) obtém-se o coeficiente de atrito utilizando o raio do pino (R), o torque (T) e as forças dos cilindros ($F1$ e $F2$).

Folle (2012) estudou coeficiente de atrito para o processo de estampagem de chapas metálicas através do ensaio DST e a influência do coeficiente de atrito na simulação numérica. Alguns estudos foram realizados na UFRGS com tratamentos superficiais nos pinos do ensaio DST para a diminuição do atrito (KEMPSKI, 2013; SANTOS, 2015). Neles, o ensaio se mostrou um ótimo método para a comparação dos coeficientes de atrito em diferentes condições superficiais do pino.

2.8.2 Ensaio Swift

O ensaio Swift simula o embutimento profundo, pois há tensão trativa no sentido radial e compressiva no sentido circunferencial do corpo de prova, ambas iguais em módulo. Basicamente, o conjunto de ferramenta utilizado para o ensaio Swift é composto por punção cilíndrico, prendedor de chapas e matriz (SILVEIRA NETTO, 2004; FOLLE, 2012).

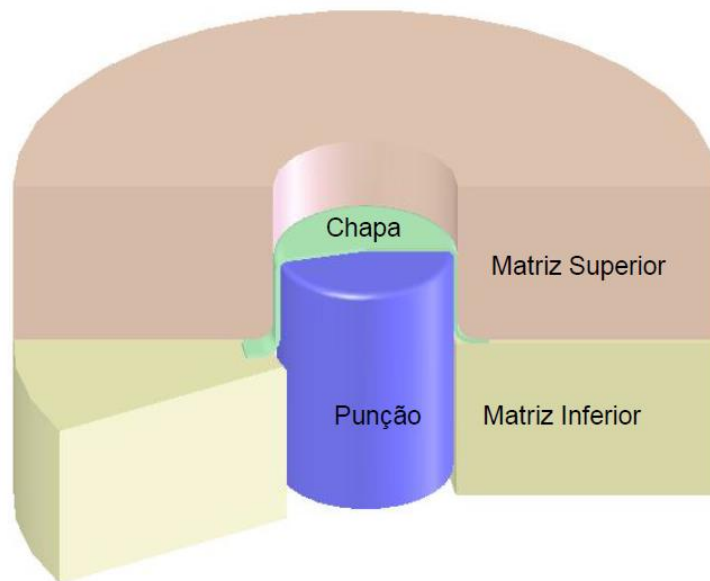
Utilizam-se corpos de prova circulares de vários diâmetros, que são presos em uma prensa de duplo efeito pelo prensa-chapas em forma de anel, o punção é forçado contra os corpos de prova provocando o embutimento, isto é, a chapa é forçada para

dentro da matriz até que ocorra fratura, pois o prensa-chapas não impede o movimento do material para o interior da matriz, sendo sua principal função diminuir o enrugamento.

O objetivo deste ensaio é determinar as relações geométricas entre o máximo diâmetro do disco e o mínimo diâmetro do punção possível para se conformar um copo cilíndrico sem que ocorra ruptura ou falhas superficiais

Na figura 6, pode-se observar uma representação em perspectiva do ensaio.

Figura 6 - Representação em perspectiva do Ensaio Swift



Fonte: Folle, 2012

Folle (2008) utilizou o ensaio Swift para analisar o coeficiente de atrito em diferentes condições superficiais. Neste estudo foram aplicadas três diferentes lixas nas matrizes e foram utilizados quatro tipos de lubrificantes para cada caso. Com essas condições, foram calculados os coeficientes de atrito através do ensaio Swift. Ainda foi feita a simulação dos ensaios, mostrando que o ensaio prático se aproxima do simulado. Quanto maior o coeficiente de atrito e, portanto, maior a força máxima, maior o distanciamento dos valores simulados com relação aos valores medidos. Isso sugere que quanto maior a atuação das forças de atrito na simulação, mais erro a simulação pode estar gerando.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

As chapas utilizadas para a realização dos ensaios foram de aço inoxidável AISI 304 de 1 mm de espessura. É indicada para a fabricação de peças que devem resistir ao ataque de um grande número de substâncias corrosivas, tais como o ácido nítrico, soluções alcalinas, soluções salinas, etc. Sua composição química é apresentada na tabela 1, medida por espectrômetro de emissão ótica, equipamento Bruker Q2 ION com o método de análise Fe100.

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável AISI 304 (Percentual em massa)

Elemento de Liga	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	N
Composição (% em massa)	0,055	1,647	0,046	0,016	0,474	8,01	16,8	0,1

As matrizes para os ensaios foram fabricadas com o aço DIN X100CrMoV8-1- 1, conhecido comercialmente como Cryodur 2990. Esse aço possui propriedades intermediárias entre os grupos A e D de aços ferramenta, com a combinação de alta dureza e alta tenacidade. O balanço destas propriedades também é obtido pelo controle preciso da microestrutura, ao se obter pequeno tamanho de carbonetos e de uma estrutura homogênea, sem bandeamento (SANTOS, 2015).

A composição química do aço DIN X100CrMoV8-1- 1 pode ser vista na tabela 2, também em equipamento espectrômetro de emissão ótica.

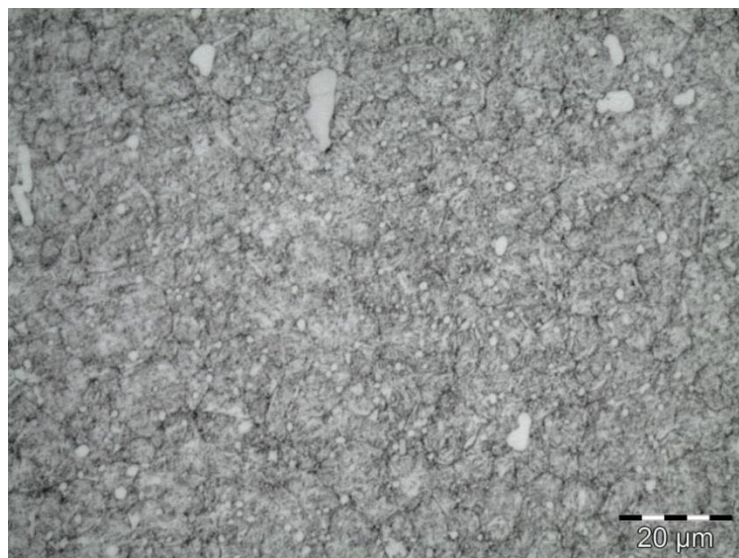
Tabela 2 - Composição química do aço DIN X100CrMoV8-1- 1

Elemento de liga	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Composição (% em massa)	1,00	0,95	0,40	0,01	0,001	7,90	0,96	0,17	1,55

Tanto as matrizes para o ensaio Swift quanto os pinos para o ensaio DST foram usinados partir do aço DIN X100CrMoV8-1- 1, passando em seguida pelo tratamento térmico de têmpera e triplo revenido a 525°C, obtendo-se um valor médio de dureza de 58HRC. Após foram lixadas com lixa mesh 600 e 1000 e depois polidas com pasta de diamante de 3µm e 1µm.

Foi realizada preparação metalográfica do material base para identificação da microestrutura resultante após tratamento térmico. A microestrutura encontrada (Figura 7) é típica de um aço ferramentas, onde pode-se visualizar em microscópio ótico a presença de martensita revenida, carbonetos primários e secundários (KEMPSKI, 2013).

Figura 7 - Aço DIN X100CrMoV8-1- 1 após tratamento térmico. Ataque: Nital 2%. Aumento: 1000x



Fonte: Kempski, 2013

Os lubrificantes utilizados nos ensaios foram os DesmoldMax DCP-35 e DesmoldMax DCP-35S, da marca Clarus. Ambos são lubrificantes a base de água substitutos aos óleos comumente utilizados na estampagem industrial.

Quimicamente, o DesmoldMax DCP-35 é constituído de compostos de cadeia vegetal, preservantes, emulgador RemoveGrax e sais amínicos. O DesmoldMax DCP-35S ainda possui siloxanos além dos outros componentes. Ambos os lubrificantes possuem densidade relativa entre 0,900 a 1,000 g/ml.

3.2 Ensaios para caracterização do aço inoxidável AISI 304

Para a caracterização da chapa, foram realizados os ensaios de tração, anisotropia e Erichsen. Todos os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC (figura 8), modelo DL 60.000, com capacidade de 600 KN.

Figura 8 - Máquina Universal de Ensaios

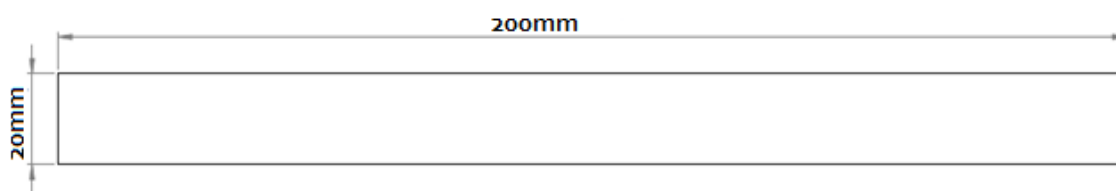


O material utilizado para os ensaios foram chapas do aço inoxidável AISI 304 de 1 mm de espessura.

3.2.1 Ensaio de tração

De modo a obter as curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 304, foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma NBR-6892-1:2013. Para realização do ensaio, foram utilizados corpos de prova de 1 mm de espessura, conforme a figura 9, de acordo a norma utilizada. Foram realizados três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.

Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de tração



Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (20 C°). Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram acoplados na máquina com o auxílio de garras pneumáticas, os corpos de prova foram tracionados com velocidade constante de 2 mm/s até o rompimento. Durante o ensaio foram coletadas as medições de força e deformação.

Como na aquisição de dados é obtida a força aplicada sobre o corpo de prova e a variação da altura do mesmo, houve a necessidade de se transformar o gráfico em tensão convencional x deformação relativa. Após, foi convertida para tensão verdadeira x deformação verdadeira.

3.2.2 Ensaio de anisotropia

Através da norma ABNT NBR 16282-2014, foi determinada a anisotropia normal e planar do aço inoxidável AISI 304 com três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa. As dimensões dos corpos de prova utilizados nesse ensaio foram as mesmas do ensaio de tração.

3.3 Análise dos lubrificantes

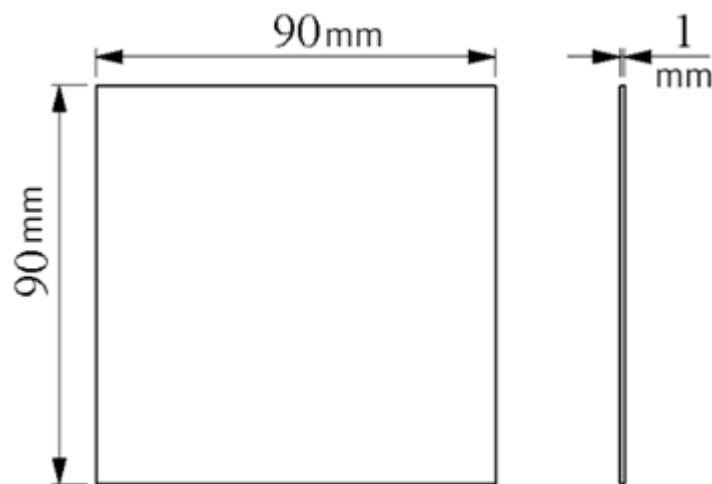
A análise de FTIR e TGA dos lubrificantes foi realizada no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC), da UFRGS.

No FTIR foi utilizado pastilha de Brometo de Potássio (KBr). Se posicionava o lubrificante na pastilha e se introduzia no espectrômetro. Foi utilizado feixe de HeNe (com diâmetro de 6mm), um divisor de feixe de Kbr e um detector de DTGS. O equipamento utilizado foi o espectrômetro Bruker Vertex 70v.

Para a análise TGA foi utilizado o equipamento TA Instrument Q50. A amostra foi colocada sob uma atmosfera de N_2 (10 mL/min), com uma taxa de aquecimento de $20^\circ\text{C}/\text{min}$ até 640°C .

Para a realização do ensaio Erichsen, utilizou-se uma velocidade de 5 mm/min. Os corpos de prova utilizados no ensaio seguem as orientações da NBR 16281-2014, onde foram ensaiados três corpos de prova e posteriormente realizado a verificação da média destes ensaios. As dimensões dos corpos de prova podem ser vistas na figura 10.

Figura 10 - Corpo de Prova para o Ensaio Erichsen



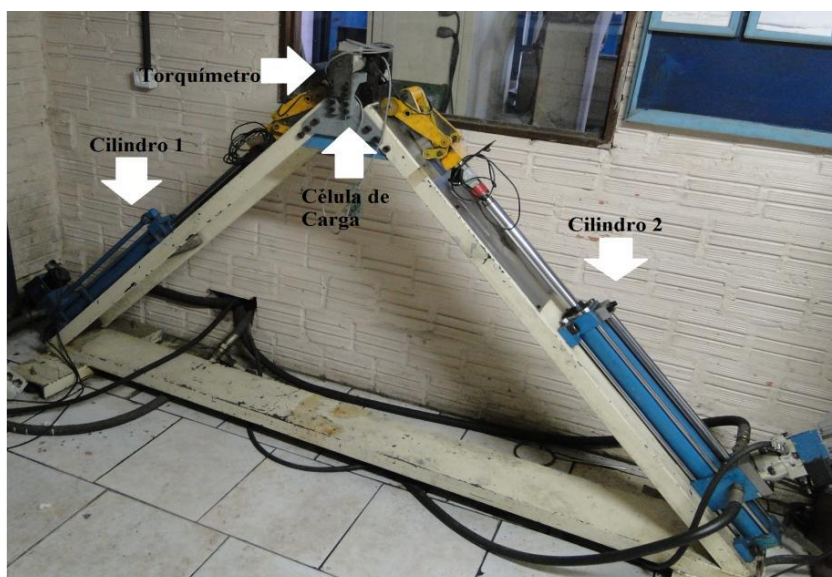
Os experimentos foram realizados em três condições: sem lubrificação e com os dois lubrificantes utilizados no trabalho (DesmoldMax 35 e DesmoldMax 35-S, da marca Clarus).

3.4 Ensaio de Dobramento sob Tensão

O ensaio foi realizado na máquina de atrito do LdTM da UFRGS (figura 11). Para a realização do ensaio foi utilizado o dispositivo de aquisição de dados Spider8 juntamente com o software Catman.

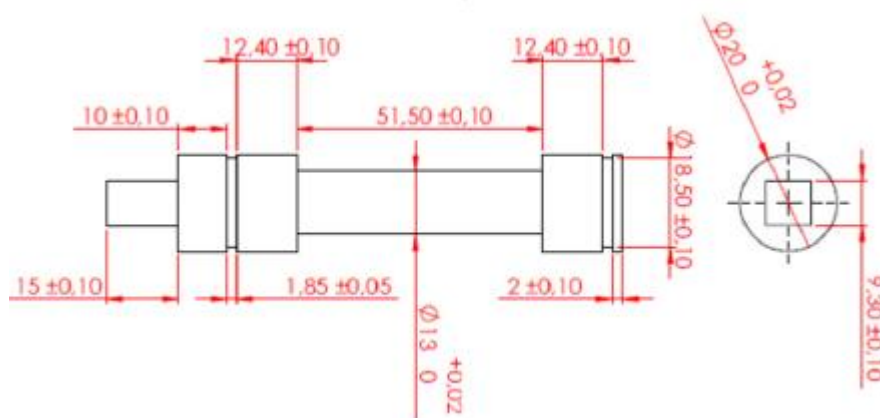
O equipamento possui dois cilindros hidráulicos posicionados a 90° , no qual um deles exerce uma força de atuação e o outro uma força de contra-tensão. Os corpos de prova são fixados em garras em forma de “tesoura” em ambos os cilindros, que fazem com que a chapa deslize sobre o pino.

Figura 11 - Equipamento utilizado no ensaio de Dobramento Sob Tensão



Foram usinados doze pinos a partir de barras do aço DIN X100CrMoV8-1- 1, três para cada condição de tratamento. A figura 12 mostra as suas dimensões.

Figura 12 - Dimensões dos Pinos utilizados no ensaio DST (em mm)



Fonte: Santos, 2015

Inicialmente toda a área útil da tira de aço foi lubrificada utilizando um pincel. Após a lubrificação foi posicionada no equipamento de forma que a parte lubrificada estivesse em contato com o pino. Assim que a chapa fica posicionada entre as garras, o cilindro de tensionamento é acionado sem realizar o arraste da chapa para deixá-la na posição para iniciar o ensaio. O software é iniciado e então o cilindro é acionado fazendo com que a tira de aço seja arrastada sobre o pino.

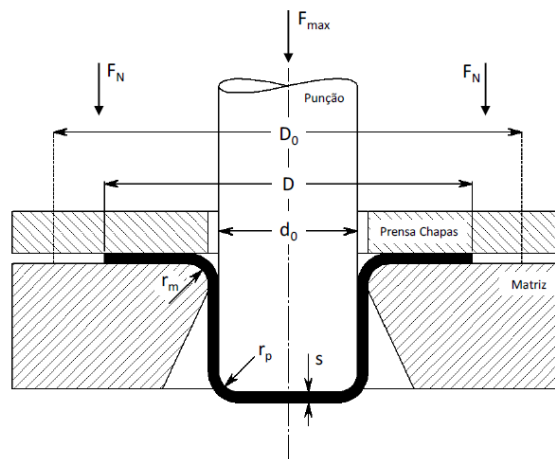
Foram realizados seis ensaios para cada condição proposta: nitretado, polido, nitretado + TiCN e nitretado + DLC. Para cada condição do pino também foram avaliadas três condições de lubrificação: sem lubrificante, com DesmoldMax DCP-35S e DesmoldMax DCP-35.

3.5 Ensaio Swift

Para a realização do ensaio Swift foram utilizados quatro conjuntos de matrizes do mesmo material dos pinos do ensaio DST nas quatro diferentes condições analisadas no trabalho. Também foram realizados ensaios nas três condições de lubrificação propostas: sem lubrificante e com os lubrificantes. A chapa utilizada foi o aço inoxidável AISI 304, de 1 mm de espessura, em formatura circular de 90 mm de diâmetro.

Como no ensaio Swift foram medidas as forças de estampagem juntamente com a força de prensa-chapas, essas forças foram usadas para se calcular o coeficiente de atrito através de um equacionamento que foi proposto por Siebel e Panknin (1956). Nesse cálculo a força máxima de estampagem foi medida e adicionada nas equações de Siebel e Panknin (1956) e o resultado foi o coeficiente de atrito. A força máxima de estampagem desenvolvida por Siebel e Panknin (1956) foi baseada na teoria da plasticidade e engloba quatro cálculos de força atuantes durante a conformação de uma peça de formato cilíndrico. A figura 13 ilustra esquematicamente os parâmetros envolvidos.

Figura 13 - Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico



Fonte: Folle, 2012

As expressões para cada força atuante são:

a) Força ideal de estampagem (F_{id})

É a força necessária para transformar, por exemplo, a geratriz (disco) num copo (SCHAEFFER, 2004).

$$F_{id} = A_0 \cdot k f_m \cdot \ln \frac{D}{d_0} \quad (11)$$

onde A_0 é a área de seção do copo ($A_0 = \pi \cdot d_0 \cdot s$), d_0 é o diâmetro do punção e D é o diâmetro do flange no momento da força máxima calculado por Siebel (1956) que é representado pela equação 12. D_0 representa o diâmetro do blank.

$$D = \left(0,77 \cdot \frac{D_0}{d_0} + 0,23 \right) \cdot d_0 \quad (12)$$

A força máxima, de acordo com Siebel (1956), ocorre em aproximadamente 30% do caminho total percorrido pelo punção na estampagem de uma geometria circular. A tensão de escoamento média $k f_m$ é calculada por:

$$k f_m = \frac{k f_1 + k f_2}{2} \quad (13)$$

onde $k f_1$ é a tensão de escoamento da chapa na saída do raio da matriz e $k f_2$ é a tensão de escoamento no diâmetro externo da região do flange. Como o cálculo dessas tensões de escoamento depende da região e de qual foi a deformação nela, é necessário saber como se calculam essas deformações. Assim, tem-se como deformação φ_1 após a passagem da chapa pelo raio da matriz:

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{\sqrt{D_0^2 + d_0^2 - D^2}}{d_0} \right) = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2} \quad (14)$$

Essa deformação pode ser calculada em função das relações de estampagem β_0 e β , onde tem-se que:

$$\beta_0 = \frac{D_0}{d_0} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{D}{d_0} \quad (16)$$

A deformação na região do diâmetro externo do flange φ_2 é calculada por:

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_0}{d_0} \quad (17)$$

Dessa forma, pode-se calcular as tensões de escoamento kf_1 e kf_2 através da equação 6 onde C e n devem ser conhecidos para o material da chapa. Assim, kf_m pode ser determinado.

b) Força de atrito entre a matriz e o prendedor da chapa (F_{APC})

$$F_{APC} = 2 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_0}{D} \quad (18)$$

onde F_N é a força normal do prensa chapas e μ é o coeficiente de atrito entre a chapa e as matrizes.

c) Força de atrito na passagem do raio da matriz (F_{AR})

$$F_{AR} = \left(e^{\mu \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_{id} + F_{APC}) \quad (19)$$

Para a equação 18, μ representa o coeficiente de atrito entre a chapa e a matriz inferior na passagem do raio. A rigor, o coeficiente de atrito da equação 19 deveria ser tomado como diferente da equação 18, porém, nesse estudo, considera-se que ambos são iguais durante todo o processo.

d) Força de retorno elástico (F_{RE})

Relacionado com as fibras externas que foram dobradas na passagem da chapa pelo raio da matriz (SCHAEFFER, 2004).

$$F_{RE} = \pi \cdot d_0 \cdot s \cdot kf_1 \cdot \frac{s}{4r_m} \quad (20)$$

onde r_m representa o raio da matriz inferior.

Por fim, para se obter a força máxima de estampagem pela equação de Panknin (1959), é necessário somar todos os efeitos das forças descritas acima, ou seja:

$$F_{max} = F_{id} + F_{APC} + F_{AR} + F_{RE} \quad (21)$$

Esse método de cálculo será usado no presente trabalho porque ele usa o coeficiente de atrito como parâmetro de entrada para a determinação da força máxima.

3.6 Tratamentos Realizados

Como foco do trabalho, foram realizados tratamentos superficiais nos pinos do ensaio DST e nas matrizes do ensaio Swift, com o objetivo de analisar o comportamento tribológico durante os ensaios realizados. O substrato utilizado para a realização dos tratamentos foi o aço DIN X100CrMoV8-1-1. Com essa finalidade, as ferramentas foram divididas em quatro condições de tratamentos.

1 – Material temperado e revenido + polido

2 – Material temperado e revenido + polido + nitretado por plasma.

3 – Material temperado e revenido + polido + nitretado por plasma + revestido com TiCN.

4 – Material temperado e revenido + polido + nitretado por plasma + revestido com DLC.

3.6.1 Nitretação a Plasma

O tratamento superficial de nitretação à plasma foi realizado nos pinos e matrizes polidos anteriormente. Após o posicionamento das amostras no forno, realizou-se, para cada uma das nitretações, vácuo na câmara até uma pressão base de 6×10^{-2} mbar. Então foi introduzido o gás hidrogênio até que a pressão alcançasse 2 mbar.

Executou-se um “sputtering” nas amostras durante 30 minutos com a finalidade de que qualquer impureza fosse eliminada. Sendo depois substituído o hidrogênio de forma gradual pelo gás argônio para o aquecimento das amostras até a temperatura de 450°C. Alcançada essa temperatura, é dado início à nitretação propriamente dita após a substituição do gás de aquecimento pela mistura de gases nitrogênio e hidrogênio na seguinte proporção: 5%N₂ e 95%H₂.

Após as nitretações, todas as amostras foram resfriadas lentamente dentro da câmara até a temperatura de 60°C para evitar que diferentes fases fossem formadas na zona de difusão com taxas de resfriamento elevadas.

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados para a realização do tratamento de nitretação com tempo de 5 horas, com espessura de 1 µm.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos processos de nitretação a plasma

Etapas	Bombeamento	Sputtering	Aquecimento	Nitretação	Resfriamento
Pressão	Até 0,05 mbar	1 mbar	4 mbar	4 mbar	0,05 mbar
Gás	Nenhum	Hidrogênio	Argônio	5% N + 95% H	Nenhum
Temperatura	Ambiente	Aprox. 200°C	450°C	450°C	Até temp. ambiente
Tempo	Até pressão de 0,05 mbar	30 min.	Até temp. de 450°C	5 h	Aprox. 3 h

3.6.2 Revestimentos

. A deposição dos revestimentos de DLC e TiCN foram realizadas pela empresa Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos Ltda. O processo utilizado é o de PAPVD (Plasma Assisted Vapor Deposition) e possui o método de arco catódico para evaporação dos alvos. Antes da deposição do revestimento, os substratos são limpos em banhos com controle de agitação, temperatura e concentração de detergentes alcalinos para desengraxe.

Os tratamentos dúplex foram realizados após o tratamento de nitretação a plasma, adicionando o revestimento, conforme os parâmetros citados na tabela 4 e 5. A espessura do revestimento TiCN foi de 1 μm .

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos processos de deposição de TiCN

Etapas	Bombeamento	Aquecimento e Pulverização	Deposição	Resfriamento
Pressão	Até 10 ⁻⁶ mbar	0,5 mbar	0,02 a 0,03 mbar	300 mbar
Gás	Nenhum	Ar + H	Acetileno + N + Ar	Nitrogênio
Temperatura	Ambiente	450°C	450°C	Até temperatura ambiente
Tempo	Até 10 ⁻⁶ mbar	60 min.	38 min	Aprox. 2 horas
Bias	-	-	-50 V a -250 V	-

Tabela 5 - Parâmetros utilizados nos processos de deposição de DLC

Material do revestimento	a-C:H:W (WC/C)
Cor do revestimento	antracite
Coeficiente de atrito* no aço (seco)	0,1 - 0,2
Micro-dureza* (HV 0.05)	1.500 / 1.000
Temperatura máxima de operação (°C)	300
Espessura de revestimento depositado (µm)	2
Tensões interna da camada (GPa)	-1.0
Temperatura do processo PVD (°C)	250
Tempo de deposição (min)	45
Estrutura do Revestimento	Lamelar

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades mecânicas do material

Os valores médios para a constante do material “C” e o índice de encruamento “n” obtidos através do ensaio de tração são mostrados na tabela 6. Esses valores serão utilizados para o cálculo do coeficiente de atrito através do ensaio Swift. Os valores encontrados ficam bem próximos a outros trabalhos (BOFF, 2012; FERRARINI, 2014; BAÚ, 2015).

Tabela 6 - C e n para p aço inoxidável 304

Direção de laminação	C	n
0°	1518	0,455
45°	1448	0,444
90°	1577	0,451
Média	1514,33	0,45
Boff	1426,0	0,50
Ferrarini	1198	0,357
Baú	1510	0,42

Os valores de anisotropia média e planar obtidas através das equações 7 e 8 estão expressas na Tabela 7.

Tabela 7 - Anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δ_r) do aço inox AISI 304

Material	r_{0°	r_{45°	r_{90°	r_m	Δ_r
Inox AISI 304	1,06	1,79	1,57	1,55	-0,48

Como o que se deseja para um aço de boa embutibilidade é que este tenha um elevado r_m e um Δ_r próximo de zero (CAVALER, 2010), pode-se considerar o aço inoxidável AISI 304 de boa estampabilidade, pois os resultados obtidos na chapa estudados apresentaram valores próximos aos desejados.

4.2 Análise dos Lubrificantes

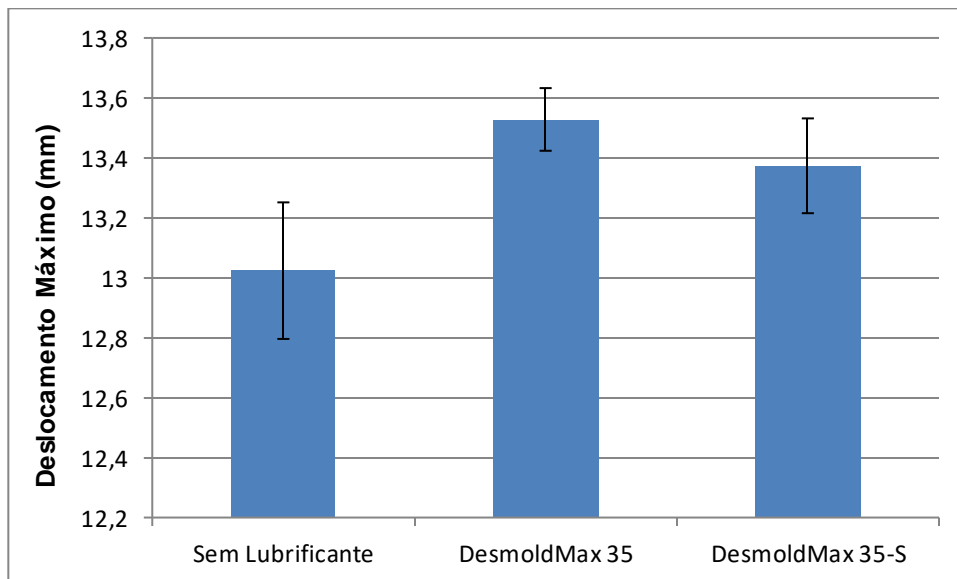
Quanto ao ensaio Erichsen, a tabela 8 mostra as médias e desvios padrões do deslocamento dos três ensaios realizados para cada condição: sem lubrificante, com lubrificante DesmoldMax 35 e DesmoldMax 35-S.

Tabela 8 - Médias e desvio padrão do deslocamento máximo no ensaio Erichsen (mm)

	Sem Lubrificante	DesmoldMax 35	DesmoldMax 35-S
Média	13,02	13,52	13,37
Desv. Pad	0,22	0,10	0,15

Pode-se observar pela figura 14 que a utilização dos lubrificantes aumentou o deslocamento máximo alcançado durante o ensaio.

Figura 14 - Deslocamento máximo no ensaio Erichsen



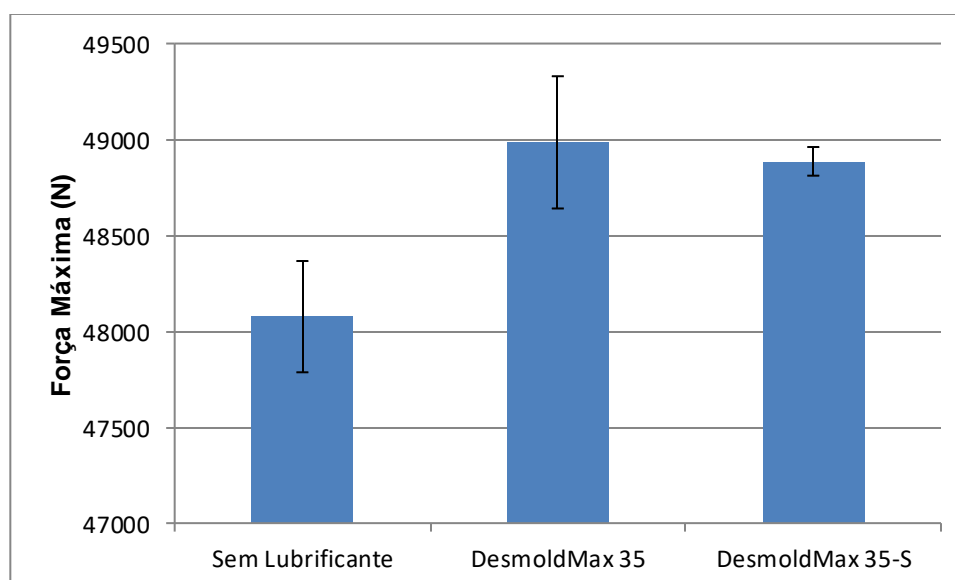
Assim como do deslocamento, foram medidas as médias das forças máximas alcançadas durante os ensaios. Essas médias podem ser analisadas pela tabela 9, assim como os desvios padrões.

Tabela 9 - Médias e desvio padrão da força máxima no ensaio Erichsen (N)

	Sem Lubrificante	DesmoldMax 35	DesmoldMax 35-S
Média	48076,33	48985	48886
Desv. Pad	290,05	344,67	74,74

As forças máximas também aumentaram com a utilização de lubrificantes. Esse aumento foi proporcional ao aumento do deslocamento máximo, em razão do maior tempo de estiramento. Isso pode ser observado na figura 15.

Figura 15 - Força máxima no ensaio Erichsen



Se comparado a outros materiais na literatura, o aço inoxidável 304 mostrou-se um de ótima estampabilidade ao se utilizar lubrificação. Materiais como o alumínio AA1050 com espessura de 1mm possuem IE variando de 11,2 a 11,6 (CONSERVA, 1992). Outros materiais utilizados para estampagem são os de aços de alta resistência DP780 e TRIP780. Esses materiais também apresentam valores de IE menores do que os do aço inoxidável AISI 304, sendo 10,8 para o DP 780 e 10,1 para o TRIP780 (CAETANO, 2015).

Ao analisar o FTIR, deve-se levar em conta que o gráfico gerado (figura 16) deve ser dividido em duas partes. Os valores de onda acima de 2000 cm^{-1} representam a família

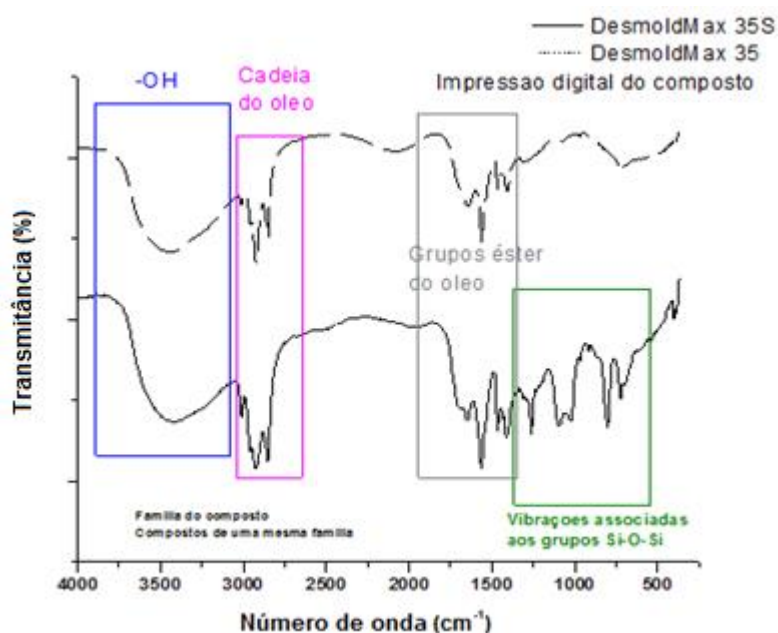
à que a molécula pertence, enquanto os valores abaixo são a impressão digital do composto.

Se comparados os dois lubrificantes quanto à família, pode-se observar que eles são iguais. A região de 3500 cm^{-1} demonstra que os lubrificantes pertencem a família OH (STUART, 2004), ou seja, são lubrificantes a base de água.

Quanto a impressão digital, os dois lubrificantes apresentam semelhança. Na região entre 2000 cm^{-1} e 1500 cm^{-1} os dois lubrificantes apresentam mesmo comportamento, que é a presença de grupos éster nos dois óleos (STUART, 2004). Isto mostra que os lubrificantes são óleos vegetais, os quais são ésteres de glicerol e de ácidos graxos.

Já na região entre 1250 cm^{-1} e 500 cm^{-1} os dois lubrificantes possuem diferenças. Vibrações nessa região indicam a presença de grupos Si-O-Si (STUART, 2004). O lubrificante DesmoldMax 35-S apresenta maiores vibrações na região, isso se explica pelo fato de que nele há uma adição de silicone, que não existe no DesmoldMax 35.

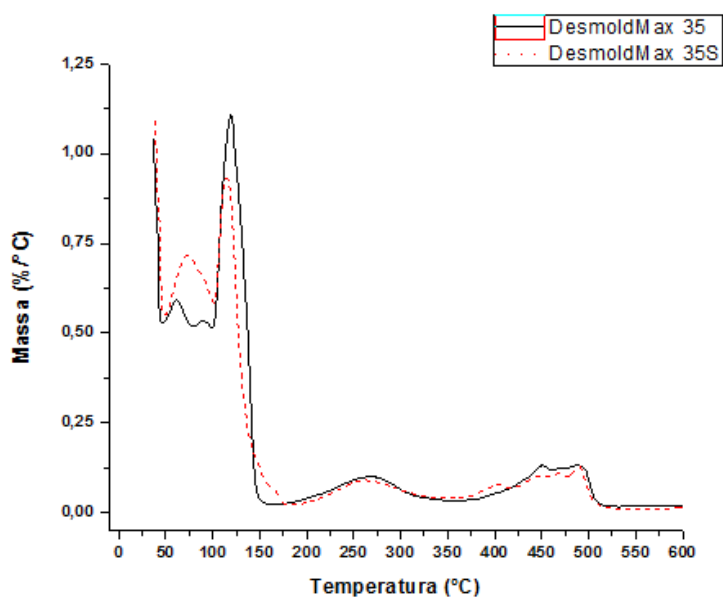
Figura 16 - FTIR dos lubrificantes



Pela análise do TGA, pode-se observar que ambos os lubrificantes apresentam comportamentos semelhantes. A figura 17 mostra que o lubrificante DesmoldMax 35 perde massa a partir dos 120°C enquanto DesmoldMax 35-S a partir dos 115°C , o que os torna

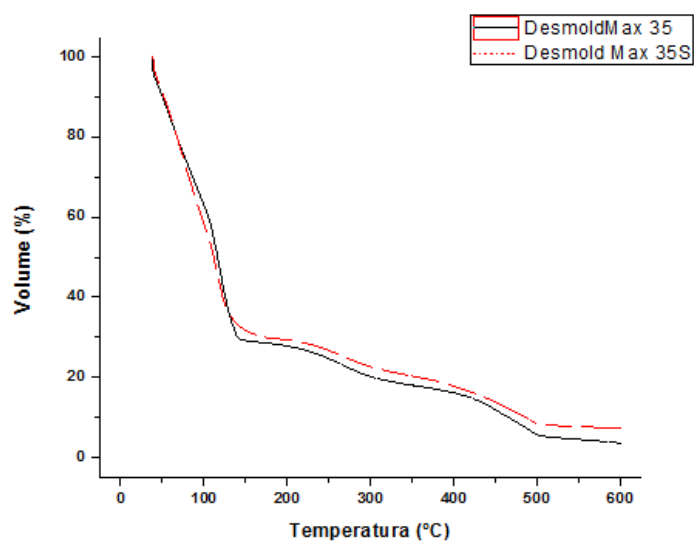
lubrificantes não aconselhados para trabalho a quente. Essa perda de massa a partir de 100°C é justificada uma vez que eles são óleos vegetais a base de água.

Figura 17 - Perda de massa dos lubrificantes



A figura 18 mostra a análise de TGA quanto à perda de volume dos lubrificantes. Ela mostra que os lubrificantes também perderam basicamente todo o volume a partir dos 100°C.

Figura 18 - Perda de volume dos lubrificantes

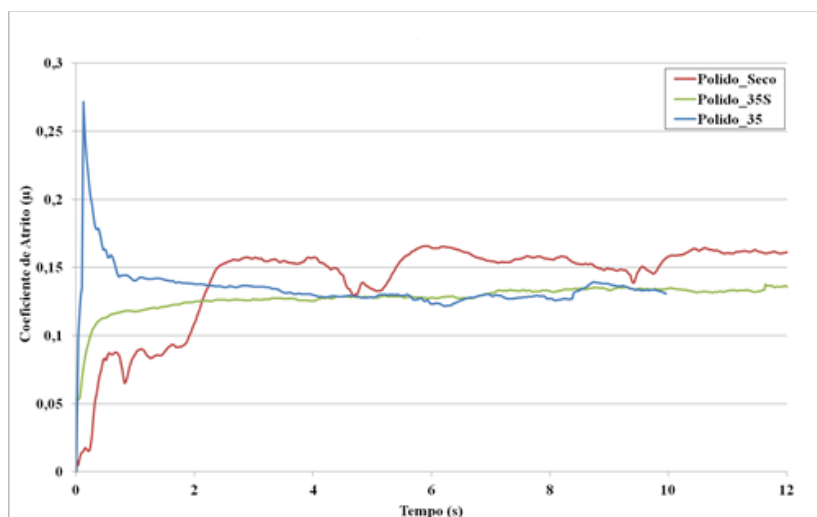


4.3 Coeficiente de atrito

Com os dados dos ensaios DST compilados em forma de gráficos pôde-se comparar os resultados encontrados. Primeiramente, analisaram-se separadamente os gráficos com as curvas de coeficiente de atrito dos pinos utilizados. Assim, pode-se concluir para cada tratamento qual o lubrificante que apresentará os menores coeficientes de atrito.

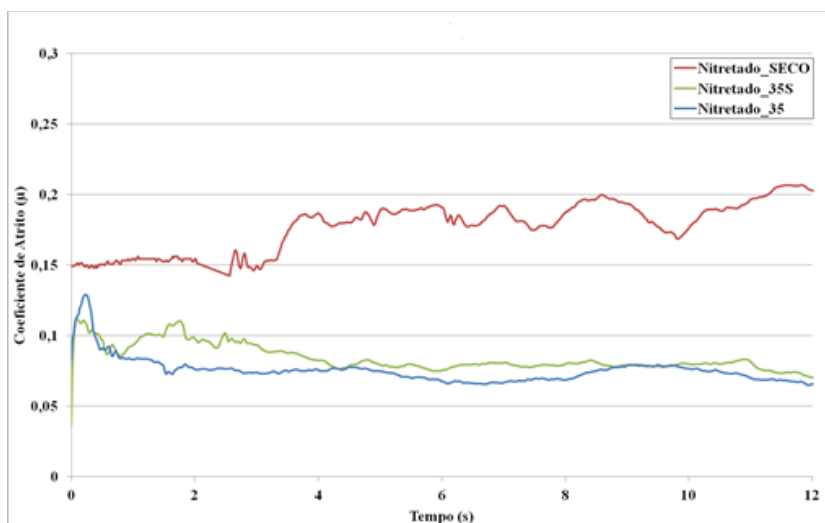
Para o pino polido (figura 19) nota-se que sem lubrificante (a seco), obtiveram-se coeficientes em torno de 0,15. Já para os ensaios com lubrificantes, houve uma diminuição dos coeficientes, em torno de 0,13 para ambos os lubrificantes.

Figura 19 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino polido



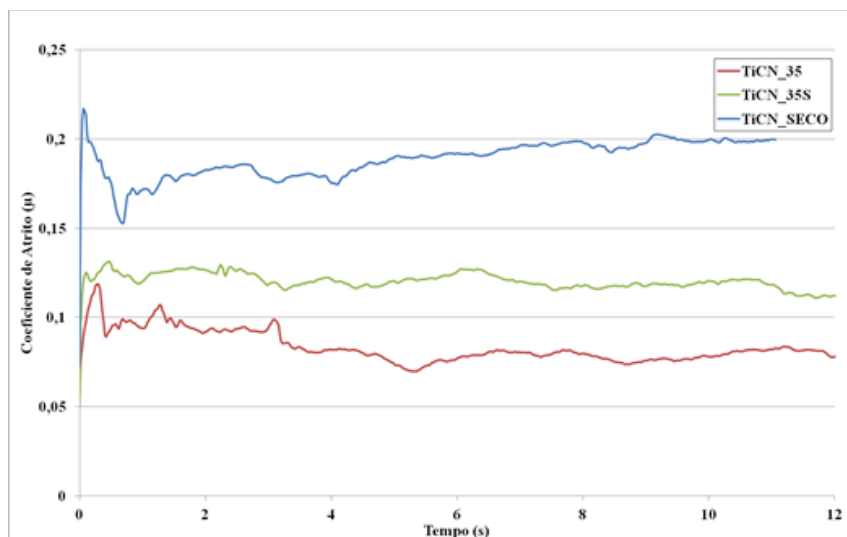
Quando analisados os ensaios para o pino nitretado (figura 20) também se percebe que o ensaio sem lubrificante apresentou maiores coeficientes de atrito (oscila entre 0,18 a 0,2). Já nos ensaios com o pino lubrificado, os resultados foram semelhantes, com os dois coeficientes de atrito em torno de 0,08, com o ensaio com pino lubrificado com DesmoldMax 35S com um valor levemente maior.

Figura 20 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino nitretado



Os dados obtidos para o pino nitretado + TiCN pode ser visto na figura 21. Assim, também se nota que o ensaio sem lubrificante apresentou um coeficiente mais elevado (em torno de 0,2). Já os ensaios com lubrificação apresentaram coeficientes bem menores. O ensaio com o DesmoldMax 35S alcançou valores em torno de 0,12, enquanto o DesmoldMax 35 foi de 0,08.

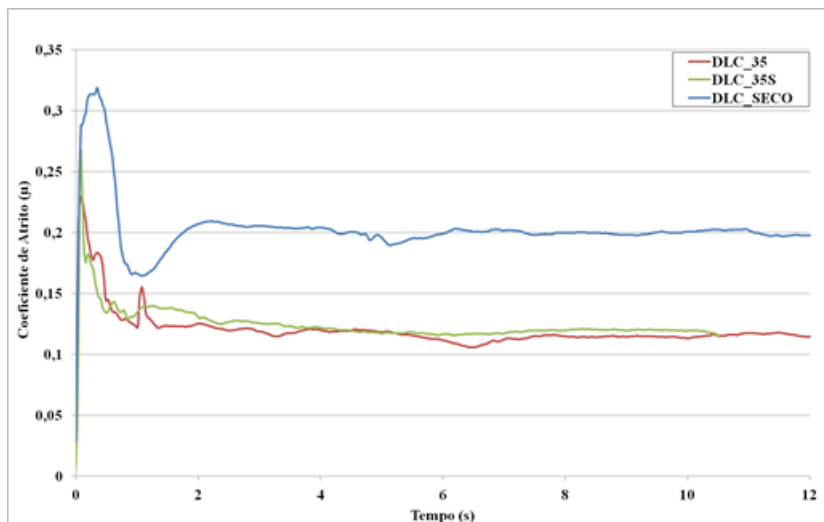
Figura 21 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino com TiCN



O pino com revestimento DLC (figura 22) mostrou uma diferença de aproximadamente 40% entre o ensaio sem lubrificação e os ensaios com lubrificação. O coeficiente de atrito

sem lubrificante ficou próximo de 0,2 sendo o mais alto entre todas as condições. Com os lubrificantes o coeficiente de atrito variou de 0,1 a 0,13.

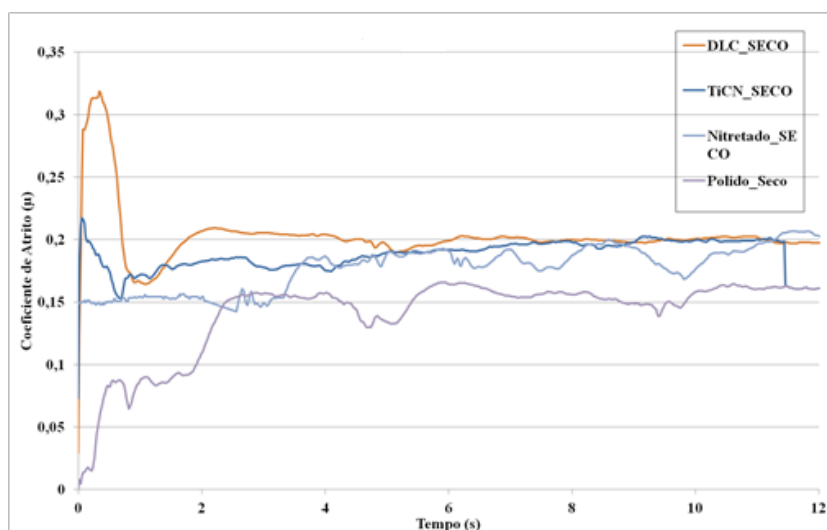
Figura 22 - Curvas do coeficiente de atrito com o pino com DLC



Também é possível separar os gráficos gerados em razão da condição de lubrificação empregada. Assim, pode-se observar o comportamento do tratamento para cada lubrificante.

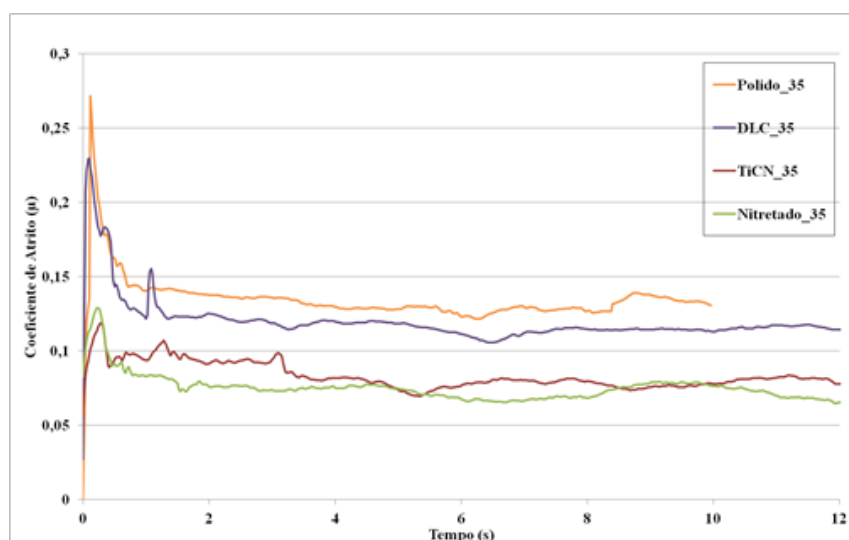
Nos ensaios sem lubrificação (figura 23) nota-se que o menor coeficiente de atrito apresentado foi o pino sem nenhum tratamento.

Figura 23 - Curvas do coeficiente de atrito sem lubrificante



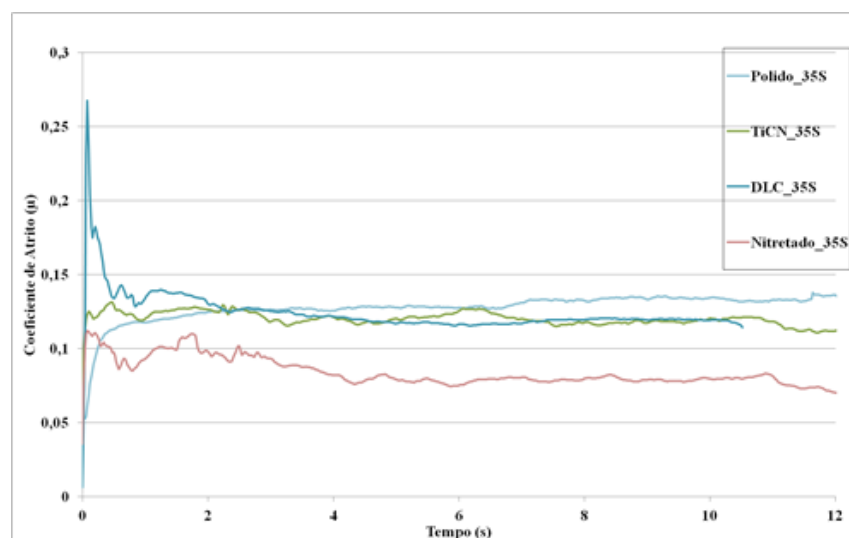
Para o DesmoldMax 35 (figura 24) nota-se que o pino nitretado apresentou melhores resultados quanto ao coeficiente de atrito, em torno de 0,07. O pino nitretado + TiCN apresentou resultados próximos, obtendo coeficientes em torno de 0,08. O pior entre todos foi o polido.

Figura 24 - Curvas do coeficiente de atrito com lubrificante DesmoldMax 35



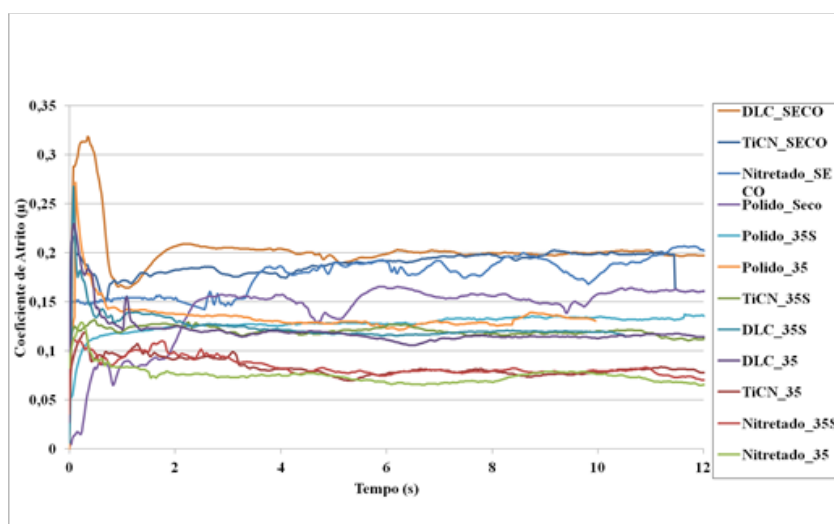
Na figura 25 vemos os resultados para o lubrificante DesmoldMax 35S. Novamente os ensaios com o pino polido apresentaram os piores resultados, com coeficiente de atrito no valor de 0,13.

Figura 25 - Curvas do coeficiente de atrito com lubrificante DesmoldMax 35-S



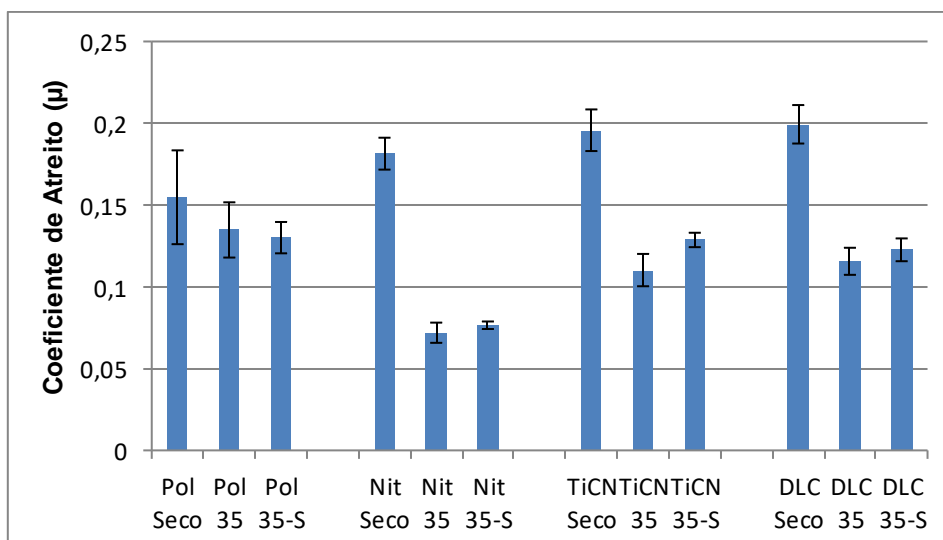
Por fim, podem ser analisadas na figura 26 as curvas de coeficiente e atrito de todos os ensaios realizados, onde observa-se que os ensaios que apresentaram os menores coeficientes de atrito entre todos foram os realizados com os pinos nitretados. Já os maiores coeficientes obtidos foram os realizados sem lubrificação.

Figura 26 - Curvas do coeficiente de atrito de todos os ensaios



Com todos os ensaios realizados, podem ser comparados os valores médios da parte em que o ensaio se mantém mais constante (entre 4 segundos e 10 segundos). Através das médias de todos os coeficientes de atrito encontrados elaborou-se um gráfico comparativo entre eles (figura 27).

Figura 27 - Médias e desvio padrão dos coeficientes de atrito para o ensaio DST



Para o cálculo do coeficiente de atrito através do ensaio Swift são necessários vários dados de entrada, como os parâmetros geométricos das ferramentas e da chapa utilizada. Esses valores são mostrados na tabela 9.

Tabela 10 - Parâmetros geométricos das ferramentas do ensaio Swift

Diâmetro do punção (d_0)	50 mm
Espessura da chapa (s_0)	1 mm
Diâmetro do blank (D_0)	90 mm
Raio da matriz (r_m)	6,5 mm

Com os parâmetros geométricos medidos, pode-se calcular os parâmetros mostrados na tabela 10 através das equações 12, 15 e 16.

Tabela 11 - Parâmetros Geométricos Calculados para o ensaio Swift

Diâmetro do flange (D)	80,8 mm
Secção do copo (A_0)	157,08 mm ²
Relação de estampagem (β)	1,8
Relação de estampagem (flange) (β_0)	1,616

A tabela 11 mostra os valores das constantes C e n do aço AISI inoxidável 304 calculados no ensaio de tração.

Tabela 12 - Parâmetros do Aço Inox 304

Coeficiente de resistência (C)	1514,33 N/mm ²
Índice de encruamento (n)	0,45

Para o cálculo de φ_1 e φ_2 , foram aplicadas as equações 14 e 17, respectivamente. Com essas deformações e utilizando a equação 6, as tensões kf_1 , kf_2 podem ser calculadas e a média delas kf_m é achada pela equação 13. Os resultados são mostrados na tabela 12.

Tabela 13 - Cálculos das tensões e deformações obtidas pelas equações de Panknin

Deformação verdadeira antes (φ_1)	0,2438
Deformação verdadeira depois (φ_2)	0,5877
Tensão de escoamento antes (kf_1)	905,00 N/mm ²
Tensão de escoamento depois (kf_2)	1732,74 N/mm ²
Tensão de escoamento média (kf_m)	1318,87 N/mm ²

Com todos esses dados, é possível calcular o coeficiente de atrito através das equações de Panknin. Assim, é possível reduzir as equações das forças F_{id} , F_{APC} , F_{AR} e F_{RE} em função do coeficiente de atrito μ , ficando a equação final da força máxima em função do coeficiente de atrito.

$$F_{\text{máx}} = 12400\mu + (e^{1.57\mu} - 1)(67790,3 + 12400\mu) + 72004,1 \quad (22)$$

Para isso, foi calculado no ensaio Swift as forças máximas de estampagem para todas as condições, como pode ser visto na tabela 14 e na figura 29.

Tabela 14 - Médias e desvio padrão das forças máximas do ensaio Swift

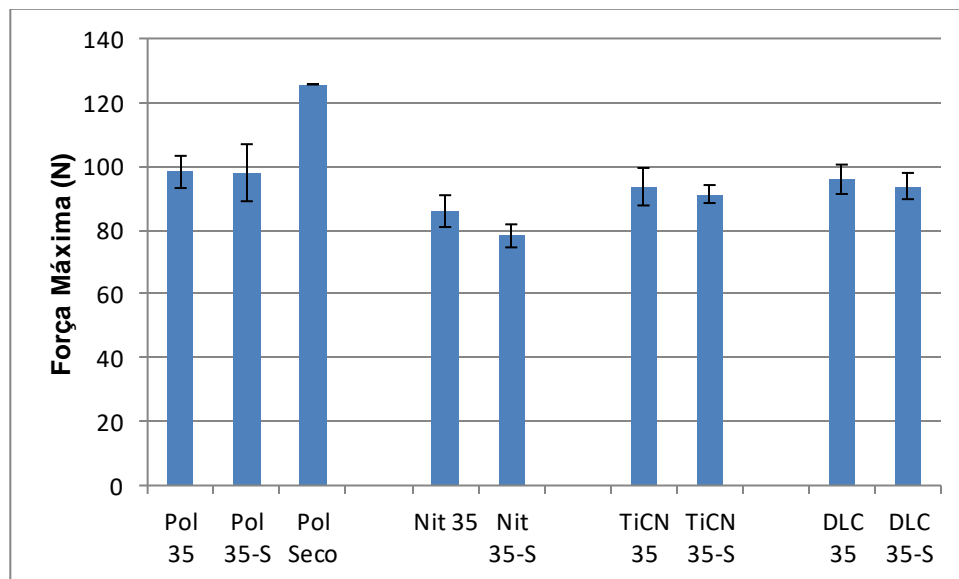
	Média (N)	Desvio Padrão
Polido 35	99	5
Polido 35-S	98	9
Polido Seco	126	-
Nitretado 35	86	5
Nitretado 35-S	78	3
TiCN 35	93	5
TiCN 35-S	91	2
DLC 35	95	4
DLC 35-S	93	4

Pode-se observar que o único ensaio que não possui desvio padrão é o ensaio polido a seco. Isso ocorre porque esse ensaio realizado danificou o punção do ensaio Swift (figura 28), demonstrando que esse ensaio não deve ser realizado sem a utilização de lubrificantes.

Figura 28 - Punção danificado no ensaio Swift sem lubrificação

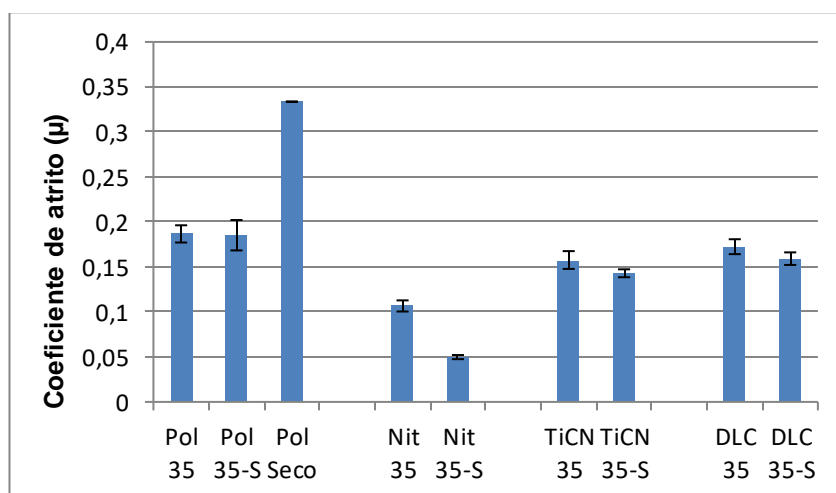


Figura 29 - Força Máxima e Desvio Padrão no ensaio Swift



Com as forças máximas medidas, é possível calcular o coeficiente de atrito máximo durante o ensaio através da equação final 22. Esses coeficientes são mostrados na figura 30. Nota-se que o ensaio Swift teve a mesma tendência os mesmos resultados do ensaio DST. Os ensaios com os menores coeficientes de atrito foram os com as matrizes nitretadas, seguidos pelas revestidas pelos tratamentos dúplex. As matrizes sem tratamentos tiveram os piores resultados.

Figura 30 - Coeficiente de atrito através do ensaio Swift



Porém quando analisados os lubrificantes nota-se um comportamento contrário. Enquanto no ensaio DST o lubrificante DesmoldMax 35 obteve os melhores resultados na média, no ensaio Swift o lubrificante DesmoldMax 35-S que apresentou os menores coeficientes de atrito em todas as condições de tratamento.

Na tabela 15 é mostrado uma comparação dos coeficientes de atrito nos dois ensaios realizados. Nota-se que os dois ensaios tiveram comportamentos semelhantes nos valores obtidos.

Tabela 15 - Comparação dos coeficientes de atrito (μ)

Condição	μ DST	μ Swift
Polido 35	0,14	0,19
Polido 35-S	0,13	0,18
Polido Seco	0,15	0,33
Nitretado 35	0,07	0,10
Nitretado 35-S	0,08	0,05
Nitretado Seco	0,18	-
TiCN 35	0,11	0,15
TiCN 35-S	0,13	0,14
TiCN Seco	0,20	-
DLC 35	0,11	0,17
DLC 35-S	0,12	0,15
DLC Seco	0,20	-

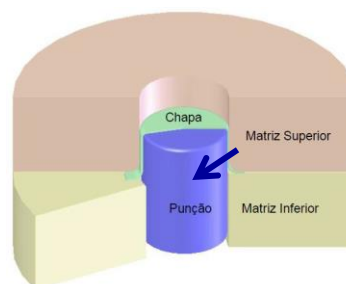
Estes resultados de coeficiente de atrito se mostraram coerentes se comparados com outros trabalhos que estudaram a influência dos tratamentos dúplex no coeficiente de atrito utilizando como substrato o aço DIN X100CrMoV8-1- 1. Utilizando outro ensaio para analisar o coeficiente de atrito (ensaio de esfera sobre disco), Skonieski (2013) mostrou que os tratamentos dúplex com revestimento de DLC reduzem o atrito se comparados aos apenas polidos.

Dos Santos (2015) utilizou o ensaio DST para analisar o torque gerado em pinos tratados por tratamentos duplex com revestimento TiCN, com a finalidade de analisar o efeito dos lubrificantes no ensaio DST. Como o coeficiente de atrito é diretamente proporcional ao torque do pino durante o ensaio, pode-se comparar os resultados. Neste estudo, os resultados foram iguais, sendo o pino apenas nitretado possuindo o menor torque gerado, seguido do tratamento duplex com revestimento TiCN.

4.4 Rugosidade

Foram medidas as rugosidades superficiais nos punções antes e depois do ensaio Swift com o objetivo de comparar a variação da rugosidade. Foram realizadas medições de Ra e Rz em quatro regiões distantes 90°, conforme a figura 31, fazendo-se a média entre eles. Foi utilizado para a realização das medições o rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

Figura 31 - Região de medição da rugosidade nos punções

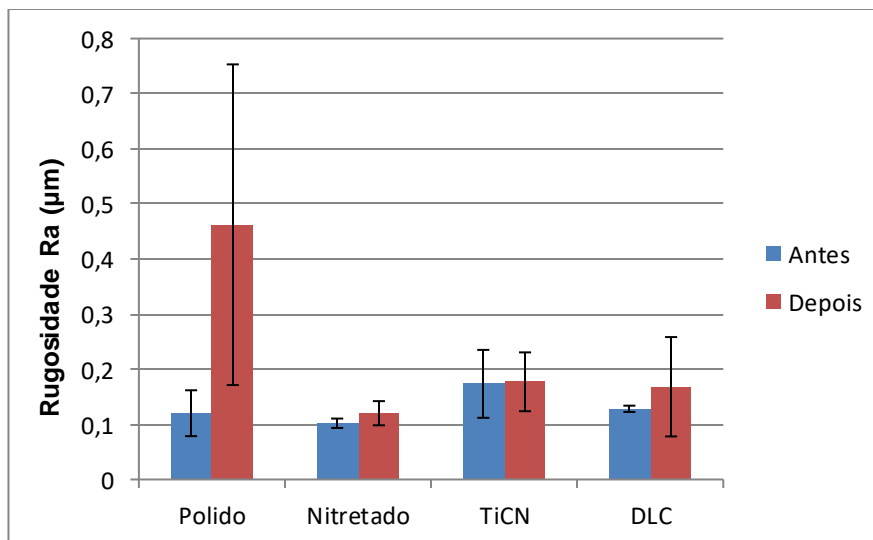


Como pode ser observado nas tabelas 16 e 17 e nas figuras 32 e 33, a nitretação realizada nas ferramentas foi capaz de diminuir as rugosidades Ra e Rz após o tratamento.

Tabela 16 - Rugosidade Ra dos punções do ensaio Swift (μm)

	Polido		Nitretado		TiCN		DLC	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Média	0,12	0,46	0,1	0,12	0,173	0,177	0,12	0,16
Desv. Pad	0,04	0,29	0,008	0,02	0,06	0,05	0,005	0,09

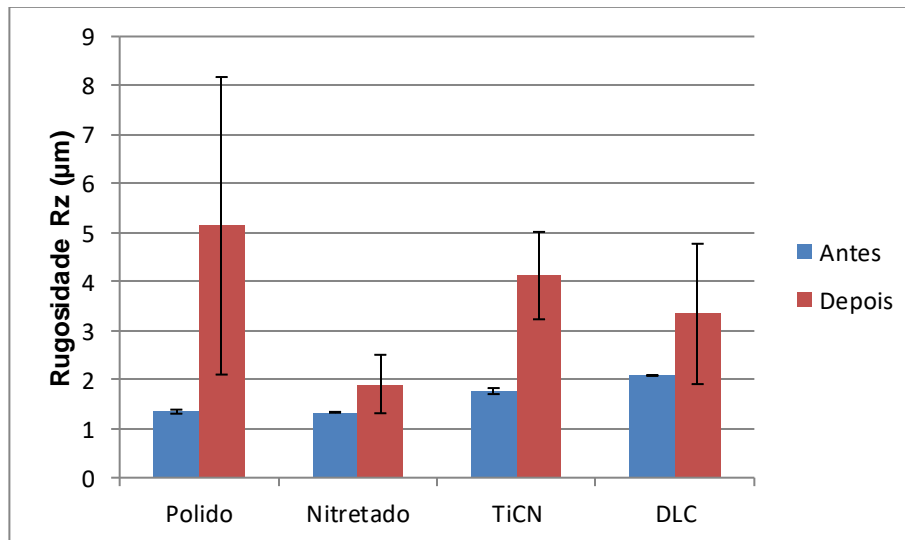
Para os tratamentos dúplex (nitretação seguida de revestimento), pode-se observar uma elevação da rugosidade se comparado com os punções apenas nitretados. Já se comparados com os apenas polidos, eles apresentam valores inferiores de rugosidade, tanto Ra quanto Rz, após os ensaios.

Figura 32 - Rugosidade Ra dos punções do ensaio Swift (μm)

Como pode ser observado, as medições de rugosidade (tanto Ra quanto Rz) após os ensaios mostraram comportamentos exatamente iguais aos de coeficiente de atrito, mostrando que a rugosidade nas matrizes de estampagem é diretamente relacionada ao atrito gerado entre ferramenta e chapa estampada. Figueiredo (2011) estudou a relação da rugosidade com o coeficiente de atrito em ensaios de estampagem. Utilizando chapas de DP600 e alumínio 1100 estampadas em matrizes de AISI D3 tratado termicamente, chegou à conclusão de que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da rugosidade devido ao atrito abrasivo.

Tabela 17 - Rugosidade Rz dos punções do ensaio Swift (μm)

	Polido		Nitretado		TiCN		DLC	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Média	1,34	5,13	1,33	1,91	1,76	4,12	2,08	3,34
Desv. Pad	0,5	3,03	0,301	0,59	0,17	0,89	0,19	1,43

Figura 33 - Rugosidade Rz dos punções do ensaio Swift (μm)

Quanto a variação de rugosidade superficial, observou-se que os punções polidos apresentaram os maiores aumentos de rugosidade. Apesar de até possuírem rugosidades menores que os com tratamentos dúplex antes dos ensaios, após os ensaios os valores se mostraram muito superiores.

Os tratamentos duplex antes dos ensaios apresentaram os maiores valores de rugosidade superficial, inclusive se comparados com os polidos, porém suas variações foram bem menores (principalmente na rugosidade Ra).

Se for analisado que o atrito gerado durante os ensaios se comportou semelhante às rugosidades superficiais medidas, uma variação menor de rugosidade pode representar uma menor variação de coeficiente de atrito durante a repetição de ensaios.

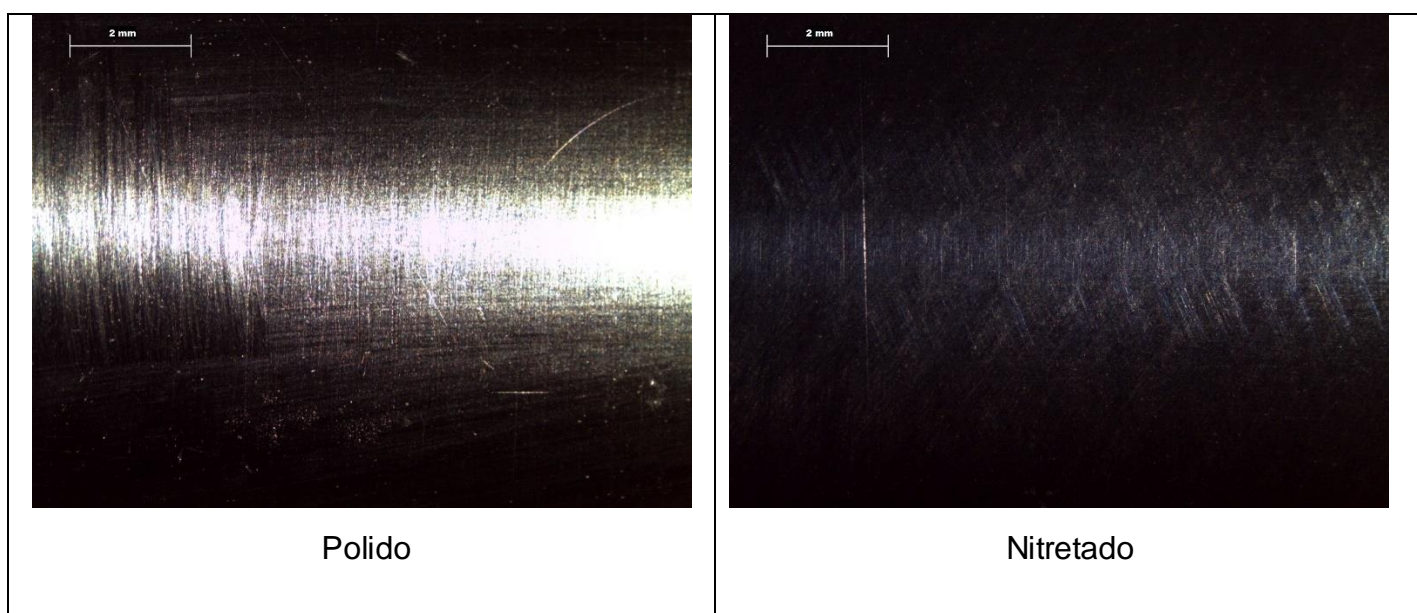
Isso mostra a necessidade de maiores repetições dos ensaios, com o objetivo de analisar se com uma maior repetibilidade dos ensaios esses resultados irão se manter, pois há a possibilidade de com a uma quantidade de ensaios maiores os valores médios de coeficiente de atrito nas condições com ferramentas com revestimentos apresentem melhores resultados que as apenas nitretradas.

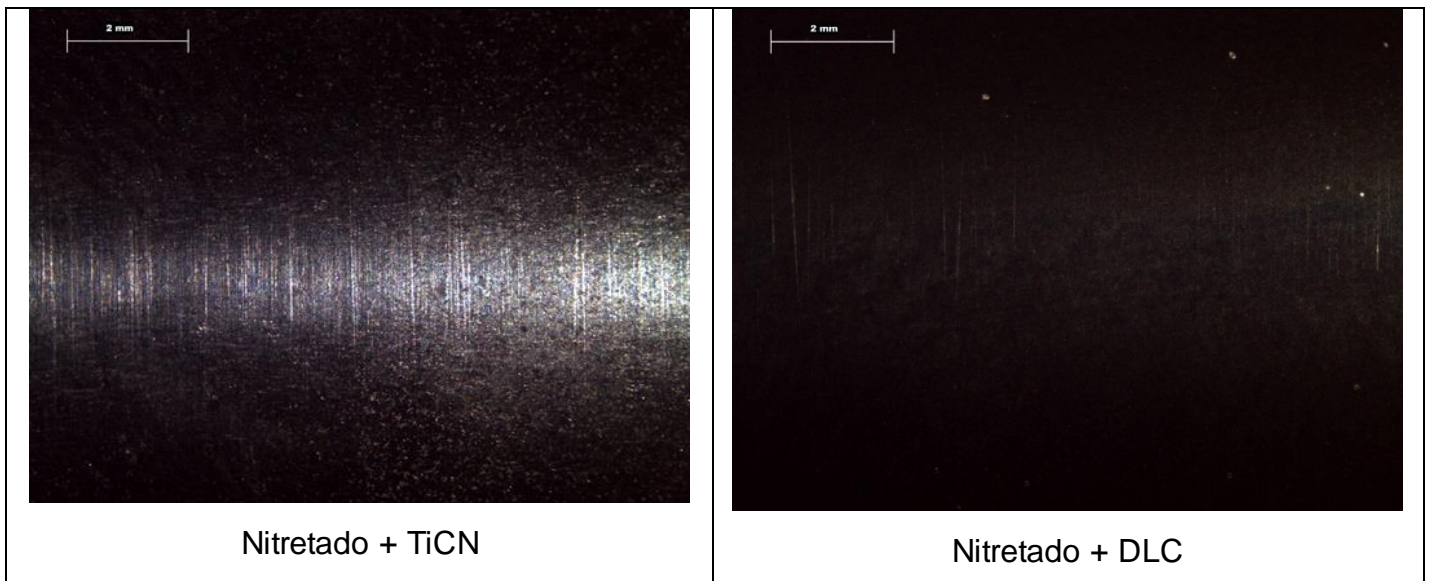
4.5 Desgaste

Com a finalidade de se realizar uma análise qualitativa do desgaste das ferramentas após a realização dos ensaios, são mostradas (tabela 18) imagens com aumento de 10 vezes das superfícies dos punções do ensaio Swift após a realização dos ensaios. As imagens foram tiradas na mesma região de medição das rugosidades Ra e Rz, conforme a figura 31.

Nos ensaios Swift pode-se observar que os tratamentos realizados diminuíram o desgaste nas ferramentas após a estampagem. Se comparados, nota-se que o desgaste abrasivo nos punções polidos foi maior no que nos demais. Os punções nitretado + DLC foram os que apresentaram menos riscos em sua superfície, seguido dos apenas nitretados. Já o nitretado + TiCN apresentou um desgaste maior se comparado aos outros tratamentos.

Tabela 18 - Superfície dos punções após o Ensaio Swift. Aumento 10x





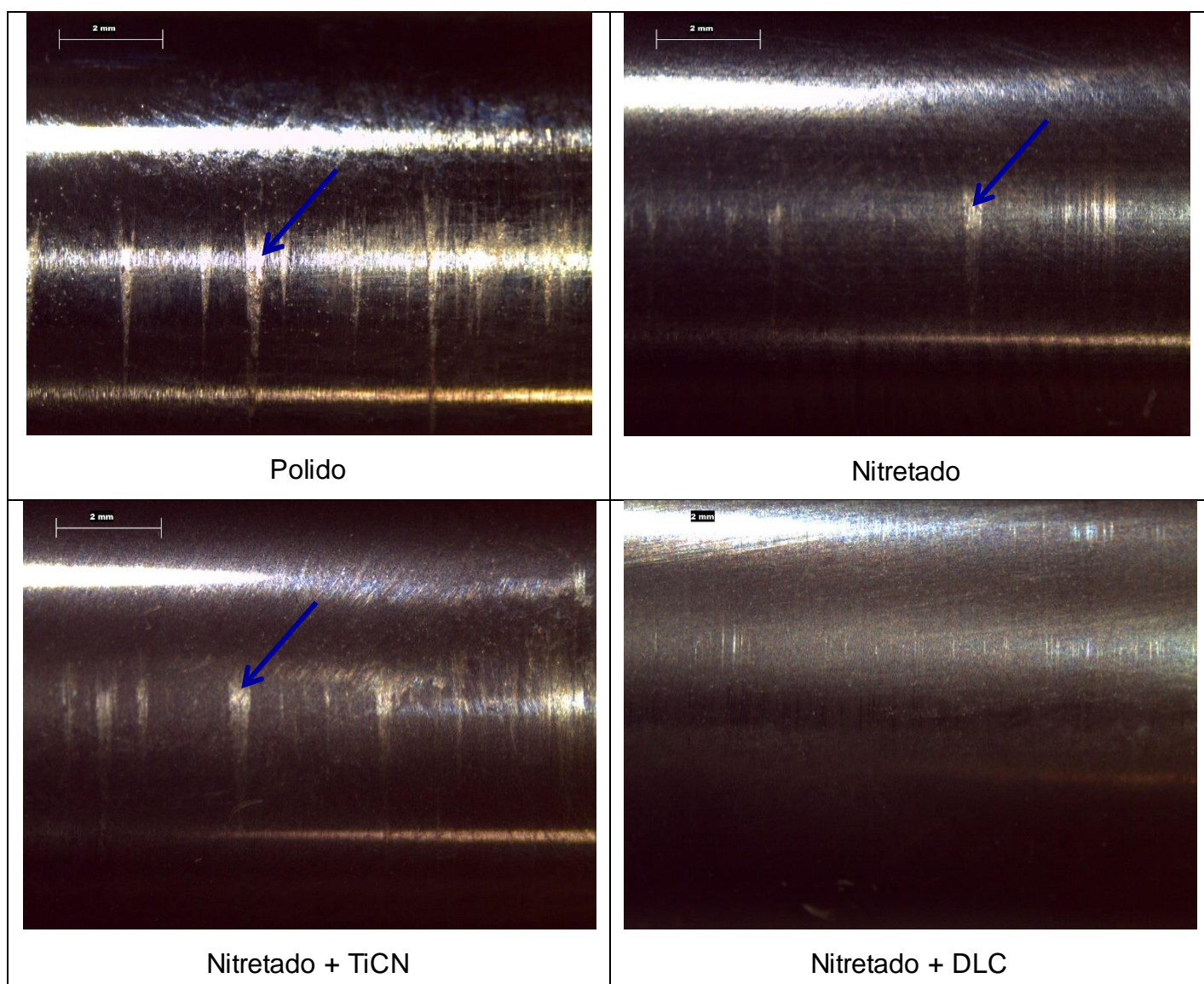
As imagens dos pinos dos ensaios DST (tabela 19) apresentaram resultados semelhantes aos punções dos ensaios Swift. As imagens são dos pinos ensaiados com o lubrificante DesmoldMax 35, que foi o que apresentou melhores resultados quanto ao coeficiente de atrito nesse ensaio. A figura 34 apresenta a região onde foi analisada as imagens no pino.

Figura 34 - Região de análise do desgaste dos pinos



O pino nitretado + DLC apresentou um menor desgaste abrasivo, sendo seguido pelo apenas nitretado. Nota-se nesse ensaio que, além do desgaste abrasivo, há a ocorrência de adesão do aço inoxidável no pino após os ensaios, em decorrência de um maior tempo de deslizamento entre chapa e ferramenta, se comparado com o ensaio Swift, como pode ser visto na tabela 19.

Tabela 19 - Superfície dos pinos após o Ensaio DST. Aumento 10x



Comparadas as imagens superficiais das ferramentas após os dois ensaios, nota-se que em ambos a condição que menos apresentou desgaste foi a condição nitretado + DLC, seguido do apenas nitretado. Como era esperado, a condição com os piores resultados foi com as matrizes apenas polidas.

5 DISCUSSÃO GERAL

Com os atritos calculados através dos ensaios DST e Swift, foi possível observar a melhora das ferramentas de estampagem quando estas recebem tratamentos superficiais adequados. Em ambos os ensaios, nota-se que quando as matrizes são tratadas por nitretação a plasma há uma diminuição do coeficiente de atrito se comparada com as sem tratamento. Quando analisados os tratamentos dúplex, há uma elevação do coeficiente de atrito se comparados ao apenas nitretado, mas ainda menores que o sem tratamento.

No ensaio DST sem a utilização de lubrificante, notou-se que o pino polido apresentou menores coeficientes de atrito do que quando realizados os ensaios com os pinos tratados. Porém quando foi aplicada lubrificação, os pinos tratados apresentaram resultados melhores. Isso mostra que a utilização de lubrificantes é essencial para a redução do coeficiente de atrito através de tratamentos em ferramentas de estampagem.

A rugosidade medida nos punções após os ensaios mostrou um comportamento igual ao dos coeficientes de atrito calculados, onde as matrizes apenas nitretadas apresentaram os menores valores de Ra e Rz, enquanto o sem tratamento apresentou rugosidades elevadas. Esse parâmetro demonstra que o coeficiente de atrito gerado entre ferramenta e chapa é diretamente relacionado a rugosidade na ferramenta. Isso ajuda a explicar o motivo de os tratamentos dúplex terem apresentado valores superiores ao do apenas nitretado, o que pode ter sido ocasionado em razão de um mal polimento após a aplicação do revestimento.

Quando analisadas as rugosidades superficiais antes e depois dos ensaios, nota-se que os tratamentos dúplex realizados diminuiram a variação de rugosidade durante os ensaios. As rugosidades superficiais das ferramentas polidas eram menores que das tratadas pelos processos dúplex, porém após a realização dos ensaios foram bem maiores, o que demonstra que os tratamentos superficiais ajudam na diminuição dessa variação.

Quanto as imagens superficiais das ferramentas utilizadas, observa-se um comportamento diferente. As ferramentas que apresentaram um menor desgaste superficial após os ensaios, tanto no Swift quanto no DST, foram as com tratamento dúplex com revestimento DLC, aonde apresentaram poucos riscos aparentes. Assim como no atrito e rugosidade, as matrizes com piores resultados foram as sem tratamentos, pois apresentaram elevado desgaste abrasivo.

Como era esperado, a utilização de lubrificantes diminuiu os coeficientes de atrito nos ensaios realizados. Em todas as condições superficiais, os ensaios sem lubrificação foram as que apresentaram maiores valores de coeficiente de atrito gerados, tanto no ensaio Swift como no ensaio DST.

Já se comparados os dois lubrificantes, não foi possível se chegar a uma conclusão de qual lubrificante é melhor para a estampagem, uma vez que cada ensaio apresentou um resultado distintos. Enquanto no ensaio DST o lubrificante que apresentou o melhor resultado foi o DesmoldMax 35, no ensaio Swift o lubrificante DesmoldMax 35-S obteve os menores coeficientes de atrito.

Analisando todos os resultados, fica nítida a relação entre o coeficiente de atrito e a rugosidade superficial. Isso demonstra que a diminuição da rugosidade superficial afetou diretamente o coeficiente de atrito medidos pelos ensaios. Isso é importante pois pode-se em trabalhos futuros tentar diminuir a rugosidade gerada após a aplicação dos revestimentos, gerando assim um menor atrito, tentando deixá-los menores que no apenas nitretado.

Quanto ao desgaste, essa relação não fica tão clara, pois o desgaste superficial não seguiu o coeficiente de atrito e a rugosidade. Apesar de não possuírem os menores coeficientes de atrito nos ensaios, os punções e pinos com tratamentos dúplex com revestimento de DLC apresentaram quase nenhum desgaste.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho, que foi analisar o comportamento tribológico em matrizes de estampagem modificadas pelos tratamentos de nitretação a plasma e tratamentos dúplex, foi atingido.

Como objetivos específicos, chegou-se as seguintes conclusões:

- Os coeficientes de atrito foram significativamente reduzidos através dos tratamentos realizados, com o tratamento de nitretação a plasma ficando com os menores valores.
- As rugosidades superficiais medidas após os ensaios também foram diminuídas com a aplicação dos tratamentos, com os resultados seguindo os coeficientes de atrito.
- Encontrou-se uma relação entre o coeficiente de atrito e a rugosidade, onde pôde ser visto que quando a rugosidade superficial medida nas matrizes após os ensaios aumentava, o coeficiente de atrito gerado também aumentava.
- O desgaste abrasivo nas superfícies das matrizes também foi diminuído com a realização dos tratamentos. Porém nesse caso, ele não seguiu o coeficiente de atrito e rugosidade, ficando o tratamento dúplex com revestimento de DLC com o menor desgaste aparente.
- A utilização de lubrificantes se mostrou importante na diminuição dos coeficientes de atrito em ambos os ensaios e em todas as condições superficiais das matrizes, tanto nas tratadas quanto nas sem tratamento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO

- Aplicar a metodologia desenvolvida para avaliação de novos revestimentos;
- Avaliar o desgaste do ferramental através ensaios com alto número de ciclos e em ambiente industrial;
- Avaliar diferentes materiais para a estampagem;
- Realizar novos tratamentos com diferentes parâmetros, com o objetivo de otimizar o comportamento tribológico durante os ensaios.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTERA, F. A. "Desgaste abrasivo de níquel e de liga binária níquel cobalto eletrodepositado sem substrato de cobre". Universidade Federal de Ouro Preto, 2009, 99p. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto.

AMEUR, H.; BOUZIT, M. "Mixing in shear thinning fluids". Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 29, No. 02, pp. 349 - 358, 2012.

ANDREASEN, J. L. "Bending under tension test with direct friction measurement", Institution of Mechanical Engineers Part B - Journal of Engineering Manufacture [S.I.], v.220, n.1, p. 73-80. 2006.

ASM Handbook - Volume 4: Heat Treating. Materials Park : ASMInternational, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16281: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16282: Folhas e chapas de aço de baixo carbono - Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento - Método de ensaio. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892-1:2013: Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de Ensaio a Temperatura Ambiente. ABNT, 2013.

ASM INTERNATIONAL. "Metals Handbook Desk Edition". 2ª. ed. [S.I.]: ASM International Handbook Committee, v. I, 1998.

BAÚ, A. R. "Estudo do Processo de Estampagem para Materiais Alternativos na Fabricação de um Componente para a Indústria de Máquinas Agrícolas". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015, 83p.

BELL, T., DONG, H., & SUN, Y. (1998). Realising the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 31, pp. 127-137.

BHUSAN, B. *Introduction to Tribology*. [S.l.]: Wiley, 2013.

BOFF, U. "Desenvolvimento do Processo de Estampagem para Miniaturas de Motores". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012, 81p.

BOTH, G. B. "Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 123p.

BRITO A.M.G.; PREDIGER, S.A. Aspectos do Levantamento de Curvas de Escoamento. In: 2ª Conferência Internacional de Forjamento - XVIII SENAFOR. Porto Alegre, 1998. p.189-210.

BRITAIN, H. G. *Polymorphism in pharmaceutical solids*. v. 95, New York, USA:Marcel Dekker Inc., 1999. 448 p.

CAETANO, R. A. "Avaliação da Conformabilidade do Aço Transformation Induced Plasticity (TRIP780) Eletro galvanizado e Dual Phase (DP780) Galvanizado Por Imersão a Quente". Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2015, 103p.

CHIAVERINI, V. "Aços e ferros fundidos". 6ª. ed. São Paulo: ABM, 1988.

CIENFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. *Análise Instrumental*. Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro – RJ, 2000.

CONSERVA, M.; DONZELLI, G. TRIPPODO, R. *Aluminium and its applications*. Italy, Edimet, p.221-223, 1992.

- COTTEL, C. M.; SPRAGUE, J. A. (1994). Surface Engineering (Vol. 5). ASM International.
- DAVIS, J. R. Handbook of Thermal Spray Technology. Russell Township: ASM International, 2004.
- FABRISIO, E. "Análise da Influência de Lubrificantes no Aço Hardox450® durante o Ensaio Erichsen". In: Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, 6., 2017, Anais, Sapucaia do Sul - RS.
- FANG, T.-H., JIAN, S.-H., CHUU, D.-R., Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scan probe microscopy and nanoindentation, Applied Surface Science, v. 228, p. 365-372, 2004.
- FERRARINI, J. L. "Caracterização de materiais para o processo de Estampagem". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004, 116p.
- FIGUEIREDO, L. et al. Experimental study of friction in sheet metal forming. Wear [S.I.], v. 271, n. 9–10, p. 1651-1657, 2011.
- FIGUEIREDO, M.S. Estudo das Propriedades Ópticas e Termo-Ópticas do Biodiesel e suas Misturas. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande - MS. 2009.
- FILHO, A.N., BRAZ, D.C., 2015. "Estudo da influência dos padrões de emissão das espécies do plasma de carbonitreção nas propriedades superficiais do TiCN", Revista Matéria, V.20 N.01.
- FOLLE, L.F. "Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem". Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012, 131p.
- FOLLE, L.F. "Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, 65p.

FROEHLICH, A. R. "Tratamento Superficial DUPLEX com TiN e CrN de Aços Ferramenta da Classe AISI H13 Para Matrizes de Injeção de Alumínio. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003, 165p.

GARCIA, A. SPIM, J.A. DOS SANTOS, C.A. Ensaio dos Materiais. 1ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2000.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; Física – Vol1. 4a ed. Livros Técnicos e Científicos S.A.,1994.

HE Y.; APACHITEI, I., ZHOU, J.; WALSTOCK, T.; DUSZCZYK, J. "Effect of prior plasma nitriding applied to a hot-work tool steel on the scratch-resistant properties of PACVD TiBN and TiCN coatings". Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2534–2539.

HIRVONEN, J.-P., KOSKINEN, J., JERVIS, J.R. AND NASTASI, M. (1996) Present Progress in the Development of Low Friction Coatings. Surface and Coatings Technology, 80, 139-150.

IONASHIRO, M. Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial / Calorimetria Exploratória Diferencial. Araraquara, Brasil:Giz Editorial, 2004.

IZIDA, T. Distinção de Espécies e Castas de Formigas com a Técnica FTIR-PAS. Monografia (Graduação de Licenciatura em Física) – Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. Dourados-MS. 2007.

KEMPSKI, L. A.; SANTOS, G. R.; BOFF, U.; ROCHA, A. S.; ROSA, G. C., 2014, "Ensaio tribológicos para obtenção do coeficiente de atrito de um aço ferramenta com tratamentos superficiais de nitretação a plasma e revestimento TiCN", São Paulo, Brazil, 69º Congresso Anual da ABM - International.

KEMPSKI, L. A.; SANTOS, G. R.; BOFF, U.; ROCHA, A. S.; ROSA, G. C. "Tratamentos superficiais de nitretação a plasma e revestimento TiCN para melhoria do coeficiente de

atrito na conformação de aço inoxidável austenítico AISI 304". In: Anais da 3ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre/RS, 2013.

KIM, Y. S., JAIN, M.K. e METZGER, D.R. 2012. Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing. *International Journal of Machine tools and Manufacture*. 2012, Vol. 56, pp. 69-78.

KRAUSS, G. "Steels: Processing, Structure and Performance". Materials Park, ASM Internacional, 2005. 427 p.

LEITE, A. L. "Comportamento tribológico do aço SAE 10B30 revestido com TiO₂ depositado por plasma". Dissertação de Mestrado. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2012. 75p.

LEITE, M. V. "Conformação Mecânica: Efeito da Topografia na Transferência de Material e no Atrito". Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. 148p.

MENEZES, P. L. *Tribology for Scientists and Engineers*. [S.l.]: Springer, 2013.

MUSIL, J.; VLCEK, J.; RUZICKA, M. Recent progress in plasma nitriding. *Vacuum*, n. 59, 2000. 940-951.

NARUL, M. A. SYAHRULLAIL, S. Lubricant viscosity: Evaluation between existing and alternative lubricant in metal forming process. *Procedia Manufacturing* 2 (2015) 470 – 475.

OLIVEIRA, A. F. de. "Estudo da nitretação a plasma com tela ativa e potencial flutuante para o aço rápido ASTM M2". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. 92p.

OLIVEIRA, L. F. "Caracterização de um Aço IF após Relaminação no Laminador de Encruamento". Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 153p.

ÖZMENA, Y; TANAKA, A.; SUMIYA; T. The effect of humidity on the tribological behavior of diamond-like carbon (DLC) film coated on WC-Co by physical vapor deposition method. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 133-134.

RICKERBY, D. S. e MATTHEWS, A. 1991. *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*. Glasgow and London: Springer, 1991.

HIRVONEN, J. P., KOSKINEN, J., JERVIS, J.R. NASTASI, M. (1996) Present Progress in the Development of Low Friction Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 80, 139-150.

SANTOS, G. R. Dos. "Caracterização e avaliação do comportamento tribológico do aço DIN X100CrMoV8-1-1 com tratamento dúplex". Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015, 169p.

SCHAEFFER, L. "Conformação Mecânica". Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre - RS, 1999.

SCHAEFFER, L. "Conformação de Chapas Metálicas". Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre – RS, 2004.

SCHAEFFER, L., "Manufatura por Conformação Mecânica", Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre - RS, 2016.

SHORT, K. T.; ZANG, Z.; FINNIE, K.; COLLINGS, G.A.; FIGUEROA. C.A.; 2008, "A new duplex process for corrosion protection by PI^3 ", Austrália e Caxias do Sul-RS; Australian Nuclear Science and Technology Organization e Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul; Science Direct.

SILVEIRA NETTO, S.E. "Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação". Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004, 90p.

SKONIESKI, A.F.O. "Desenvolvimento de superfícies com filmes de 'Diamond-Like Carbon' com adesão melhorada e baixo coeficiente de atrito aplicáveis em conformação

mecânica”. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013, 147p.

SOUZA, T. S. G. “Estudo da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio”. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016, 103p.

SOUZA, V. M. de. “Avaliação do atrito e do comportamento do desgaste de um aço ABNT H13 revestido com CR_3C_2-25 (NCr) e $WC-10Co-4Cr$ através do processo de aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF)”. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017, 81p.

STUART, B. Infrared Spectroscopy - Fundamentals And Applications. Ed: John Wiley Professo. 2004.