

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

FERNANDO SANTOS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MACHOS TRATADOS COM UM
CONDICIONADOR METÁLICO NO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO INTERNO**

**SÃO PAULO
2015**

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

FERNANDO SANTOS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MACHOS TRATADOS COM UM
CONDICIONADOR METÁLICO NO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO INTERNO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Elesandro Antonio Baptista, Dr. – Orientador

**SÃO PAULO
2015**

De Oliveira, Fernando Santos.

Avaliação do desempenho de machos tratados com um condicionador metálico no processo de rosqueamento interno. / Fernando Santos de Oliveira. 2015.

109 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Elesandro Antonio Baptista.

1. Rosqueamento. 2. Avaliação de desempenho. 3. Redução de custos.

I. Baptista, Elesandro Antonio.

II. Título

CDU 658.5

FERNANDO SANTOS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MACHOS TRATADOS COM UM
CONDICIONADOR METÁLICO NO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO INTERNO**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Nove de Julho - UNINOVE, como
requisito parcial para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Elesandro Antonio Baptista, Dr. -
Orientador

São Paulo, 07 de abril de 2015.

Presidente: Prof. Dr. Elesandro Antonio Baptista (PPGEP / UNINOVE)

Membro: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho (EESC / USP)

Membro: Prof. Dr. Milton Vieira Junior (PPGEP / UNINOVE)

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

DE

FERNANDO SANTOS DE OLIVEIRA

Título da Dissertação: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MACHOS TRATADOS COM UM CONDICIONADOR METÁLICO NO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO INTERNO.

A COMISSÃO EXAMINADORA, COMPOSTA PELOS PROFESSORES ABAIXO, CONSIDERA O CANDIDATO FERNANDO SANTOS DE OLIVEIRA APROVADO.

São Paulo, 07 de abril de 2015.

Presidente: PROF. DR. ELESANDRO ANTONIO BAPTISTA

Membro: PROF. DR. REGINALDO TEIXEIRA COELHO

Membro: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR

*Dedico este trabalho a minha esposa
Luciana e a nossa amada filha Maria
Luiza por toda compreensão e apoio.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha família e pela vida que tenho, além de todas as oportunidades que tem me concedido, em especial, por ter me dado condições e força para completar mais esta etapa importante da minha vida.

A realização deste trabalho só foi possível graças à ajuda de diversas pessoas, que em momentos decisivos, deram a sua colaboração de forma direta ou indireta, as quais dedico agora meus agradecimentos:

Aos meus Pais, Ismael e Maria Amélia e meus irmãos, Fabrício e Ana Amélia.

À minha esposa Luciana e nossa amada filha Maria Luiza, maior presente de Deus, pelo incentivo, compreensão e abnegação dos bons momentos juntos em prol deste trabalho.

Em especial ao Prof. Dr. Elesandro Antonio Baptista, pelas orientações, profissionalismo, conselhos e importantes discussões e sugestões sobre o trabalho. Acredito que esta pesquisa teve um precioso salto em termos de qualidade ao incluir as valiosas sugestões e recomendações do Prof. Dr. Milton Vieira Junior e do Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho. A todos, meus sinceros agradecimentos por aceitarem fazer parte da banca de defesa e por poder contar com seus conhecimentos e experiências.

Ao Prof. Dr. Fábio Henrique Pereira e Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto por toda a contribuição, apoio, incentivo e disponibilidade fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos demais professores e pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho, principalmente pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os amigos da Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho, em especial, Alceu, Silvio, Dario, Ellen, Arthur, Fellipe Martins, Filipe Marafon, Bruno, Francisco, Edson, Elpídio, Carlos, Cláudio, Washington, Roberto, Flávio, Cristina, Jaqueline, Márcio, Elizangela, Fabinho, entre outros, pelas dicas e excelente companhia neste período.

À Profa. Me. Maiaty Saraiva Ferraz por toda a colaboração e ajuda primordial na revisão desta dissertação, meus sinceros agradecimento.

À Secretaria da Pós-Graduação, em especial à Ana Carolina e à Paloma pela atenção dispensada ao meu atendimento como aluno.

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LSI-EPUSP) por todo o apoio e colaboração, em especial, do Prof. Dr. Acácio Luiz Siarkowski e dos amigos Adir Moreira e Valtemar Cardoso.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMT-EPUSP), pela colaboração, em especial, do Prof. Dr. Douglas Moraes.

À empresa PROXYON – Tecnoperfil Taurus Ltda., pela decisão de apoiar este trabalho desde o início, assim como toda a colaboração para realização dos ensaios que levaram a resultados tão consistentes.

Em especial, ao Eng. Antônio Carlos Mantovani pela solicitude e atenção dispensada nas minhas visitas para o acompanhamento dos ensaios experimentais.

A todos os amigos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, que contribuíram muito para mais este passo importante em minha vida.

A todos os alunos e amigos que me incentivaram e estiveram presentes nos momentos em que mais precisava.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e, por causa do curto espaço disponível não puderam figurar nesta lista, fica aqui o *Meu Muito Obrigado a todos!*

“Quando teus dias forem cobertos por nuvens baixas, e as tuas noites forem mais longas do que mil noites, lembre-se: há no universo Um Grande e Benigno Poder, que pode abrir caminhos onde não há caminhos, e transformar o ontem sombrio num luminoso amanhã”.

(Martinho Lutero)

RESUMO

É importante que os processos de usinagem sejam continuamente melhorados, de forma a oferecer vantagens competitivas e condições econômicas para as indústrias manufatureiras. Um processo de fabricação muito empregado, principalmente por ser um dos poucos a permitir a obtenção de roscas internas de pequeno diâmetro, é o processo de rosqueamento interno com machos. Tal processo, normalmente é um dos últimos a ser realizado e qualquer falha pode influenciar os custos de produção. Uma forma de minimizar os custos no processo de rosqueamento interno é a utilização de abordagens que visam otimizar a vida útil do macho de roscar por meio do uso de tratamentos superficiais, revestimentos ou fluidos de corte. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho da aplicação de um condicionador de metais na superfície de machos, com foco na melhoria do referido processo em relação à vida útil da ferramenta e, consequentemente, na redução de custos. Para tanto, ensaios foram realizados utilizando-se de machos de aço rápido em duas condições: tratados ou não com condicionador metálico. Os dados coletados foram analisados com apoio de recursos estatísticos para se verificar o nível de confiança das amostras. Os resultados obtidos permitem concluir que o procedimento utilizado foi adequado, pois aumentou a vida útil do macho, reduziu o nível de desgaste das ferramentas, mantendo-se a qualidade das rosas e, consequentemente, promoveu uma redução nos custos de fabricação.

Palavras-chave: rosqueamento, macho de corte, avaliação de desempenho, redução de custos.

ABSTRACT

It is important that the machining processes are continually improved in order to provide competitive advantages and economic conditions for manufacturing companies. A very used manufacturing process, mainly because it is one of the few that allow obtaining small diameter internal thread, is the thread tapping with thread cutting taps. As such, thread tapping is one of the last process to be carried out and any failure can influence in production costs. One way to reduce costs is by increasing the useful life of the thread tap through the use of surface treatments, coatings or cutting fluids. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the performance of the application of a dry impregnated lubrication on the surface of thread taps, with a focus on conventional tapping process improvement concerning tool useful life and, consequently, costs reduction. For this purpose, tests in the tapping process were performed using high speed steel taps in two conditions, i.e., treated or not with a dry impregnated lubrication. The results obtained allow to conclude that the procedure employed was appropriate, because it increased the tool useful life, reduced the tool wear, and maintained the thread quality, promoting a reduction in manufacturing costs.

Keywords: tapping, tap, performance measurement, reduction of costs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Estrutura metodológica da pesquisa	7
Figura 2.1 - Geometria de um macho utilizado no processo de rosqueamento interno	10
Figura 2.2 - Número de canais utilizados em machos.....	12
Figura 2.3 - Evolução das velocidades de corte ao longo do tempo	13
Figura 2.4 - Principais tipos de desgaste e avarias em machos.....	24
Figura 2.5 - Cotas críticas de desgaste em machos de corte.....	25
Figura 2.6 - Periódicos que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	28
Figura 2.7 - Principais Autores que mais publicaram entre 2000 e 2013 sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	29
Figura 2.8 - Evolução das publicações entre 2000 e 2013 sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	30
Figura 2.9 - Diferentes abordagens pesquisadas sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento entre 2000 e 2013	34
Figura 2.10 - Área investigada e imagens das arestas de corte dos revestimentos: (a) CrC, (b) CrN, (c) TiAlN e (d) TiCN	38
Figura 2.11 - Desgaste na superfície de folga de machos de canal reto (a), de ponta helicoidal (b) e canal helicoidal (c), sem revestimento (1) e com revestimento TiAlN (2).....	39
Figura 2.12 - Área investigada e fotos das superfícies de folga do macho novo (a/b), 2º filete (a2/b2) e 3º filete (a3/b3) em aço AISI D2 e H13	40
Figura 2.13 - Imagens do mac0ho sem PFPE (a) após 194 roscas e com PFPE (b) após 380 roscas, (c) detalhe da imagem “a” e (d) detalhe da imagem “b”	41
Figura 2.14 - Eficiência do Torque no Rosqueamento para Óleos integrais, emulsões e fluidos de corte à base de scCO ₂	45
Figura 2.15 - Imagens de MEV da adesão de alumínio na superfície de machos HSS (a) e DLC (b) no rosqueamento à seco, (c) MQL e (d) MO com machos HSS.....	46
Figura 2.16 - Efeito das condições lubri-refrigerante e da dimensão do macho de roscar no torque	47

Figura 2.17 - Efeito das condições lubri-refrigerante e da dimensão do macho de roscar no torque	48
Figura 2.18 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste bilateral	54
Figura 2.19 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste unilateral à direita	54
Figura 2.20 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste unilateral à esquerda	55
Figura 3.1 - Peça da linha de produção utilizada como corpo de prova	58
Figura 4.1 - Normalidade dos dados obtidos na condição 1	67
Figura 4.2 - Normalidade dos dados obtidos na condição 2	70
Figura 4.3 - Teste F para determinação da equivalência de variância dos dados.....	72
Figura 4.4 - Teste t para as duas condições presumindo variâncias equivalentes....	73
Figura 4.5 - Efeito do condicionador metálico na vida das ferramentas	74
Figura 4.6 - Variação dos custos para cada condição da ferramenta	76
Figura 4.7 - Medidas do desgaste médio de flanco dos machos.....	78
Figura 4.8 – Comparação do desgaste médio dos filetes da primeira carreira	79
Figura 4.9 – Comparação do desgaste médio dos filetes da segunda carreira.....	80
Figura 4.10 – Comparação do desgaste médio dos filetes da terceira carreira	81
Figura 4.11 – Comparação do desgaste médio para as três carreiras.....	81
Figura 4.12 - Imagens feita em MEV de um macho sem condicionador	82
Figura 4.13 – EDS para análise dos principais elementos químicos presentes na linha demarcada para o macho nº 08 (condição 1)	83
Figura 4.14 - EDS para análise dos principais elementos químicos presentes na linha demarcada para o macho nº 12 (condição 2).....	84
Figura 4.15 - Espectro da análise química da área 2 (a) e da área 3 (b) para o macho nº 08 (sem condicionador metálico)	85
Figura 4.16 - Espectro da análise química da área 1 (a) e da área 2 (b) para o macho de nº 12 (com condicionador metálico).	86
Figura 4.17 - Imagens da região intermediaria de uma rosca produzida na condição 1 (após 6183 roscas) e na condição 2 (após 8952 roscas).....	88
Figura 4.18 - Imagens de uma rosca usinada (região de entrada) no sentido de avanço do macho máquina nas condições 1 e 2.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais características das ferramentas de roscar empregadas nos artigos pesquisados entre 2000 e 2013	31
Tabela 2.2 – Principais características das ferramentas de roscar empregadas nos artigos pesquisados entre 2000 e 2013	32
Tabela 2.3 – Vida útil de macho sem e com revestimento TiAlN	36
Tabela 2.4 - Vida útil de macho sem e com filme de PFPE	37
Tabela 3.1 - Composição química do aço LNE 380 de acordo com o certificado de matéria-prima	58
Tabela 3.2 - Resumo das condições utilizadas nos ensaios de rosqueamento	61
Tabela 4.1 - Número de roscas produzidas por macho para cada condição	65
Tabela 4.2 - Vida dos machos testados na condição 1	66
Tabela 4.3 - Intervalo de confiança para o número médio de roscas produzidas na condição 1	68
Tabela 4.4 - Número de ensaios para um determinado nível de confiança	68
Tabela 4.5 - Vida dos machos testados na condição 2	69
Tabela 4.6 - Intervalo de confiança para a média de roscas produzidas na condição 2	71
Tabela 4.7 - Número de ensaios para um determinado nível de confiança	71
Tabela 4.8 - Aumento médio na vida útil do macho de roscar	75
Tabela 4.9 - Redução média dos custos de produção	76
Tabela 4.10 - Níveis de desgaste médio de flanco dos machos	78

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI.....	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Aço ARBL.....	Aço de Alta Resistência e Baixa Liga
C.....	Carbono
C1.....	Carreira 1
Co.....	Cobalto
CO ₂	Dióxido de Carbono
CrC.....	Carboneto de Cromo
CrN.....	Nitreto de Cromo
CVD.....	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DLC.....	<i>Diamond Like Carbon</i>
EDS.....	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EPUSP.....	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
F1.....	Filete 1
GGG.....	<i>Globularer Grauguss</i>
GL.....	Graus de Liberdade
<i>h</i>	precisão da estimativa obtida com a amostra
<i>h</i> [*]	erro amostral (precisão desejada)
HB.....	Dureza Brinell
HRC.....	Dureza Rockwell C
HSS.....	aço rápido convencional (<i>High Speed Steel</i>)
HSS-E.....	aço rápido especial com alto teor de vanádio
HSS-PM.....	aço rápido fabricado pelo processo da metalurgia do pó
HV.....	Dureza Vickers
IC.....	Intervalo de Confiança
ISO.....	<i>International Organization for Standardization</i>
LSI.....	Laboratório de Sistemas Integráveis
M01.....	Macho 1
M8x1,25.....	Rosca métrica com 8 mm de diâmetro e passo igual a 1,25 mm
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
min.....	minutos

Mn.....	Manganês
Mo.....	Molibdênio
MoS ₂	Dissulfeto de Molibdênio
MQL.....	Mínima Quantidade de Lubrificante
<i>n</i>	número de amostras coletadas
<i>n</i> *.....	número de réplicas
NaCNO.....	Sal Cianídrico
OSG.....	<i>Osawa Screw Grinding</i>
PFPE.....	Perfluoropolíéter
P/NP.....	passa-não-passa
PVD.....	<i>Physical Vapour Deposition</i>
rpm.....	rotações por minuto
<i>s</i>	desvio padrão da amostra
SAE.....	<i>Society of Automotive Engineers</i>
scCO ₂	Dióxido de Carbono Supercrítico
<i>t</i>	percentil da distribuição <i>t</i> de <i>student</i>
TiAIN.....	Nitreto de Titânio Alumínio
TiC.....	Carboneto de Titânio
TiCN.....	Carbonitreto de Titânio
TiN.....	Nitreto de Titânio
UNEF.....	<i>Unified Extra Fine Thread</i>
UNF.....	<i>Unified National Fine Thread</i>
V.....	Vanádio
VB _B	desgaste de flanco médio
VB _{Bmax}	desgaste de flanco máximo
Vc.....	velocidade de corte
W.....	Tungstênio
WC.....	Carboneto de Tungstênio
WC/C.....	Carboneto de Tungstênio de Carbono
μ_1	média populacional da condição 1
μ_2	média populacional da condição 2
α	nível de significância do teste estatístico
$\alpha/2$	metade do intervalo de confiança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa para o estudo.....	3
1.2 Problema de pesquisa	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo geral.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Metodologia da pesquisa	5
1.5 Estrutura do trabalho.....	8
2 REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 Processo de rosqueamento	9
2.2 Materiais para machos	12
2.2.1 Machos de aço rápido.....	14
2.2.2 Machos de metal duro	15
2.3 Tratamentos superficiais e revestimentos em machos	15
2.3.1 Lubrificantes sólidos	17
2.3.2 Condicionador de metais	18
2.4 Fluidos de corte no processo de rosqueamento	19
2.5 Desgaste e vida de machos	22
2.5.1 Avarias e mecanismos de desgaste em macho.....	23
2.5.2 Forma de medir o desgaste em machos.....	24
2.5.3 Critério de fim de vida de machos.....	26
2.6 Bibliometria sobre avaliação de desempenho no rosqueamento	27
2.6.1 Periódicos que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	28
2.6.2 Autores que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	29
2.6.3 Evolução dos artigos sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento	30
2.6.4 Características dos machos utilizados nos artigos pesquisados	31
2.6.5 Condições lubri-refrigerantes utilizadas nos artigos pesquisados	32
2.7 Abordagens sobre avaliação de desempenho no rosqueamento	33
2.7.1 Desempenho em relação à vida útil de machos	35
2.7.2 Desempenho em relação ao desgaste de machos	38
2.7.3 Desempenho em relação à qualidade das roscas produzidas.....	42
2.7.4 Desempenho em relação aos efeitos do fluido de corte no torque	44

2.7.5 Quanto aos efeitos de fluidos de corte na temperatura de usinagem	49
2.8 Teoria estatística	51
2.8.1 Testes de hipóteses	51
2.8.2 Comparação de dois tratamentos	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 Equipamentos	56
3.1.1 Máquina-ferramenta	56
3.1.2 Calibrador de rosca	56
3.1.3 Microscópio eletrônico de varredura	57
3.1.4 Espectrometria por energia dispersiva	57
3.2 Materiais	57
3.2.1 Corpos de prova	58
3.2.2 Machos para roscar	59
3.2.3 Condições de usinagem	59
3.3 Método	59
3.3.1 Análise estatística dos dados coletados	61
3.3.2 Análise das condições econômicas	62
3.3.3 Medição do nível de desgaste dos machos na superfície de folga	63
3.3.4 Avaliação da qualidade das rosca produzidas	63
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Análise estatística do número de rosca produzidas	66
4.4.1 Resultados das ferramentas na condição 1	66
4.4.2 Resultados das ferramentas na condição 2	69
4.4.3 Determinação da equivalência das variâncias	72
4.2 Efeito do condicionador metálico na vida útil dos machos	73
4.3 Análise das condições econômicas de usinagem	75
4.4 Desgaste de flanco apresentado nos machos	77
4.5 Mecanismo de desgaste apresentado nos machos	82
4.6 Avaliação da qualidade das rosca produzidas	87
5. CONCLUSÕES	91
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	92
REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de se ajustar rapidamente aos novos cenários competitivos e a necessidade de gerar respostas mais eficientes tornaram-se fatores primordiais para a indústria repensar seus processos de fabricação e, assim, direcionar novos esforços para melhorias com foco na redução de custos, sem, no entanto, comprometer a qualidade do produto final (SOUZA *et al.*, 2012).

Os processos de fabricação tem sido sistematicamente desenvolvidos e analisados, buscando-se alcançar o máximo desempenho em conjunto com as melhores condições econômicas de produção (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

O rosqueamento interno é desafiador para usinagem moderna (VELDHUIS *et al.*, 2007), muito devido aos problemas ocasionados pela dificuldade de remoção dos cavacos e lubrificação adequada ao grande número de arestas de corte envolvidas nesse processo.

Além disso, é necessária uma correta sincronização entre a rotação e o movimento de avanço definido pelo passo do macho, tarefa difícil, principalmente em máquinas convencionais de rosqueamento (ARMAREGO; CHEN, 2002; AHN *et al.*, 2003). Estes são alguns dos motivos pelos quais as características como material da ferramenta, geometria, tratamento superficial e revestimentos sejam incorporadas no próprio macho.

Para Benga e Ciupitu (2009), alterações adequadas nestas características podem proporcionar melhorias em relação à vida útil do macho. Por outro lado, é fato que após o surgimento de máquinas-ferramentas modernas, muitas das operações manuais de rosqueamento foram substituídas pela utilização de máquinas automáticas ou semi-automáticas, o que de certa forma favoreceu à melhoria da produção de roscas (PATEL *et al.*, 2012).

Entretanto, muitas indústrias ainda se utilizam de métodos convencionais no processo de rosqueamento interno, o que estimula um crescente interesse por melhores resultados nesta operação (DEL VAL *et al.*, 2013). Isso pode ser explicado pela segurança na união e fixação de estruturas mecânicas, na qual rosqueamento interno permanece como o processo favorito para fabricação de roscas internas, voltadas principalmente para aplicações nas indústrias automotivas, aeroespaciais e químicas (KLOCKE *et al.*, 2013; TSAO; KUO, 2012).

Geralmente o processo de rosqueamento interno é um dos últimos a ser realizado. Logo, se um macho falhar, a peça, que já tem um alto valor agregado, pode resultar em retrabalho ou até mesmo sucateamento (VELDHUIS *et al.*, 2007; BHOWMICK *et al.*, 2010). O que pode ser considerado um entrave para o referido processo, causando inclusive a interrupção da linha produtiva (ZHANG, 2003).

Sabe-se também que o tempo total gasto para o processo de rosqueamento interno em indústrias manufatureiras é cerca de 22% do tempo total de processamento do produto final (UZUN; KORKUT, 2013).

Assim, diante desses fatos expostos anteriormente, torna-se importante a utilização de técnicas de otimização no processo de rosqueamento (ARMAREGO; CHEN, 2002), seja por meio de abordagens ou procedimentos que visam proporcionar o aumento da vida útil da ferramenta e a redução dos custos de fabricação, mantendo-se, a qualidade das rosas produzidas (DE CARVALHO *et al.*, 2012).

Segundo Baptista (2004), Baptista e Coppini (2006), otimizar processos de usinagem com foco na avaliação de desempenho pode ser uma opção com vantagens técnicas e econômicas para a empresa, sem a necessidade de muitos investimentos adicionais. De acordo com Tanaka *et al.* (2013), o uso de lubrificantes na forma sólida em processos de usinagem pode criar uma camada protetora na ferramenta de corte, promovendo uma redução significativa no atrito e, consequentemente, maximizando sua vida útil.

Portanto, uma abordagem para melhorar o desempenho de machos é tratá-los por meio da aplicação de um produto lubrificante (chamado neste trabalho de condicionador metálico, por ser o nome utilizado pelo fabricante do produto), o qual pode ser melhor adaptado as necessidades específicas do processo de rosqueamento interno.

Para avaliar o desempenho, testes foram realizados em uma empresa do segmento metalmecânico, comparando-se os resultados obtidos em duas condições. A primeira utiliza-se dos tradicionais machos de aço rápido em sua condição normal de uso e, a segunda condição, tem-se os mesmas ferramentas de corte, porém tratadas termicamente com o condicionador metálico.

Os resultados obtidos permitem concluir que o procedimento foi adequado, promovendo o aumento da vida útil dos machos e, consequentemente, a redução dos custos de fabricação.

1.1 Justificativa para o estudo

Muitas das investigações realizadas no processo de rosqueamento focaram na avaliação de desempenho de novos tipos de machos e nas alterações de suas características geométricas (CAO; SUTHERLAND, 2002; BUGLIOSI *et al.*, 2005; DA MOTA *et al.*, 2011; DE CARVALHO *et al.*, 2012; UZUN; KORKUT, 2013). Além dessas, outras pesquisas realizaram também estudos referentes as questões tribológicas, ao atrito e as forças de corte existentes no rosqueamento sob diversas condições lubri-refrigerantes, como métodos de mínima quantidade lubrificante, óleos de corte integral e fluidos à base de óleo mineral ou vegetal (BRANDAO *et al.*, 2010; SOKOVIC; MIJANOVIS, 2001; FANG *et al.*, 2010; SUPEKAR *et al.*, 2012).

No entanto, um desafio para as operações de rosqueamento é o emprego de lubrificantes na forma sólida em ferramentas de corte, com intuito de avaliar adequadamente a melhoria do desempenho e as condições econômicas envolvidas no processo (DA SILVA *et al.*, 2013). Algumas investigações procuraram preencher esta lacuna e obtiveram sucesso no desempenho de operações de usinagem como furação (COPPINI *et al.*, 2014) e alargamento (ALVES, 2014). Na mesma linha destas recentes pesquisas, acredita-se que a adição de um condicionador metálico em machos pode potencializar a vida útil da ferramenta e contribuir para melhorias no desempenho do processo de rosqueamento interno.

Atualmente, existem diferentes tipos de machos e revestimentos, com a finalidade de proporcionar um aumento na sua vida útil. Entretanto, esses revestimentos são eliminados durante a realização do processo de afiação, aumentando-se, assim, os custos totais de produção.

Com o intuito de contribuir para a melhoria do desempenho e das condições econômicas da operação de rosqueamento interno, este trabalho avaliou a aplicação de um condicionador metálico em machos máquina, visando aumentar sua vida útil e, consequentemente, contribuir para a redução de custos envolvidos neste processo em específico.

1.2 Problema de pesquisa

Este trabalho visa responder a seguinte questão de pesquisa:

- A aplicação de um condicionador metálico na superfície de machos máquina utilizados no processo de rosqueamento interno pode resultar na melhoria do desempenho do referido processo, de modo a impactar positivamente nas condições econômicas de usinagem?

Para a resposta da questão de pesquisa deste trabalho, foi adotada a seguinte hipótese:

- Os machos tratados com condicionador metálico resultam em um melhor desempenho quando comparado com os mesmos machos sem tratamento.

1.3 Objetivos

Para poder responder à questão de pesquisa proposta por este trabalho e testar a hipótese estabelecida, foram definidos a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho de machos quando submetidos a um tratamento por meio da aplicação de condicionador metálico.

É importante destacar aqui, que o termo desempenho neste trabalho, incorpora os aspectos relativos a vida útil e desgaste da ferramenta, além da qualidade das roscas produzidas e análise das condições econômicas de usinagem.

1.3.2 Objetivos específicos

De forma a explicitar os detalhes e os desdobramentos do objetivo geral, esta pesquisa tem como objetivos específicos:

- adotar um procedimento para aplicação do condicionador metálico e identificação das ferramentas de corte utilizadas neste trabalho;
- realizar ensaios de rosqueamento em chão de fábrica, utilizando as mesmas condições de usinagem para os machos tratados e não tratados com um condicionador metálico;
- avaliar o desempenho em relação a vida útil e condições econômicas de usinagem para os machos com condicionador metálico em comparação aos mesmos machos sem condicionador;
- analisar os níveis e mecanismos de desgaste desenvolvidos nos machos utilizados durante os ensaios de rosqueamento;
- avaliar de forma comparativa a qualidade das roscas produzidas por meio do acabamento superficial apresentado pelas ferramentas com e sem aplicação do condicionador metálico.

1.4 Metodologia da pesquisa

O método utilizado para a realização deste trabalho foi a pesquisa experimental. Segundo Creswell (2009), um experimento é um método de pesquisa científica que visa testar o impacto da variação de determinado aspecto sobre um fenômeno, controlando-se as demais variáveis que atuam sobre ele.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de identificar possíveis lacunas de pesquisa existentes sobre avaliação de processos de rosqueamento. Segundo Gil (2010), é importante identificar estudos já realizados para conhecer melhor o tema em estudo.

O procedimento para seleção dos artigos científicos foi composto por duas fases. A primeira fase é composta de duas etapas, sendo que a primeira etapa foi identificar as áreas de conhecimento vinculadas à pesquisa e a segunda etapa foi buscar sobre o tema nas bases de dados disponíveis, a saber: Portal CAPES, ProQuest, Science Direct, Scopus, Compendex, Emerald e Web of Science.

A segunda fase, por sua vez, é composta de quatro etapas. A seguir, são apresentados os detalhes de cada uma delas:

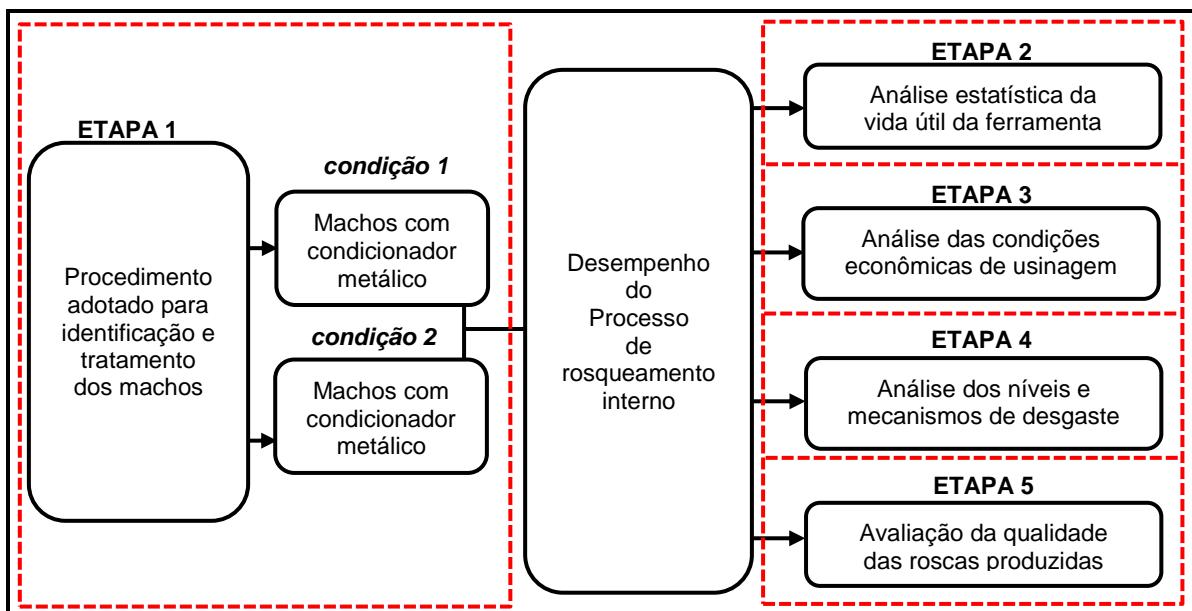
- etapa 1: definição das palavras-chave. Para realização desta pesquisa, realizou-se um levantamento das palavras-chave mais empregadas nos artigos com maior número de citações, contidos nas bases de dados supracitadas. Após uma análise dessa seleção, pode-se chegar as seguintes palavras-chave: *tapping AND performance AND evaluation; tapping AND performance AND assessment; tapping AND performance AND measurement; tapping AND performance AND appraisal; thread AND performance AND evaluation; thread AND performance AND assessment; thread AND performance AND measurement; thread AND performance AND appraisal;*
- etapa 2: análise das publicações com foco na abordagem da pesquisa no período de 2000 a 2013. Esta etapa foi constituída pela análise do título, seguindo pela exclusão das publicações repetidas e exclusão dos artigos que não tinham foco com a área pesquisada. Foram identificados muitos artigos voltados à área médica, elétrica, ambiental, dentre outras que não estavam alinhados ao tema central desta pesquisa. Restando 98 de 517 artigos encontrados;
- etapa 3: exclusão pela leitura dos resumos. Foi realizada a leitura do resumo de 98 artigos, sendo excluídos aqueles que não estavam alinhados com o tema “avaliação de desempenho sobre o processo de rosqueamento”. Após esta leitura, mais 37 artigos foram excluídos, permanecendo 61 para a próxima etapa;

- etapa 4: relação dos artigos selecionados para a análise sistêmica. O conjunto de etapas anteriores proporcionou a composição de 61 artigos, os quais, de forma fundamentada, passaram a compor parte do referencial teórico.

Vale ressaltar que além destes artigos, outros trabalhos sobre o processo de rosqueamento, que não abordaram avaliação de desempenho, porém não menos importante, também foram analisados nesta dissertação.

Todos os testes de rosqueamento interno foram realizados em uma empresa do segmento metalmecânico, pela disponibilidade, acessibilidade e interesse da mesma em contribuir com esta pesquisa. Os ensaios foram realizados em uma peça da linha de produção. Após a realização de um pré-teste, ficou determinado que no mínimo seis ensaios deveriam ser realizados para cada condição. O critério de fim de vida foi obtido em função do emprego de calibrador passa-não-passa ou da falha catastrófica da ferramenta, como lascamento ou quebra do macho. Também foram realizados estudos complementares com a finalidade de analisar os níveis e mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas, assim como avaliar a qualidade das roscas produzidas. A fim de esclarecer melhor as etapas envolvidas na avaliação do desempenho do processo de rosqueamento interno, a Figura 1.1 apresenta a estrutura metodológica adotada neste trabalho.

Figura 1.1 - Estrutura metodológica da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo estes:

Capítulo 1 – Introdução, justificativa do estudo, problema de pesquisa, objetivos, metodologia da pesquisa e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta uma revisão bibliográfica do processo de rosqueamento interno, seguido pelos materiais, tratamentos superficiais e revestimentos utilizados em machos, além de conceitos sobre lubrificantes sólidos. Na sequência, as características dos fluidos de corte aplicados no processo de rosqueamento interno, os principais mecanismos de desgaste e critérios de fim de vida de machos também são apresentados. Por fim, uma bibliometria e avaliação sistemática de artigos publicados sobre desempenho no processo de rosqueamento também é apresentada.

Capítulo 3 – Materiais e métodos: traz a descrição da metodologia empregada para a realização dos ensaios e procedimentos de análise dos resultados, bem como os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho.

Capítulo 4 – Resultados e discussão: apresenta os resultados relativos ao desempenho no processo de rosqueamento com os machos tratados e não tratados com condicionador metálico, especificamente em relação à vida útil e desgaste da ferramenta, além da qualidade das roscas produzidas e redução de custos.

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões obtidas mediante a análise dos resultados e sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, são apresentadas às referências bibliográficas que foram utilizadas para a elaboração desta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre o processo de rosqueamento, os materiais, tipos de tratamentos e revestimentos utilizados em machos, a influência de fluidos de corte no processo de rosqueamento, os lubrificantes sólidos, assim como os tipos de avarias e mecanismos de desgaste que normalmente ocorrem neste tipo de processo.

2.1 Processo de rosqueamento

Rosqueamento é considerada uma das operações mais difíceis na remoção de materiais (SUPEKAR *et al.*, 2012; DEL VAL *et al.*, 2013). O processo de rosqueamento pode ser externo ou interno, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução (ABNT, 2010; FERRARESI, 1995).

Há muitas maneiras de se realizar o rosqueamento interno, utilizando-se principalmente ferramentas de perfil único ou múltiplo, fresas e machos. Dentre os tipos de rosqueamento citados anteriormente, sem dúvida, os machos são os mais utilizados na indústria (DA MOTA, 2009; DE CARVALHO *et al.*, 2012; UZUN; KORKUT, 2013).

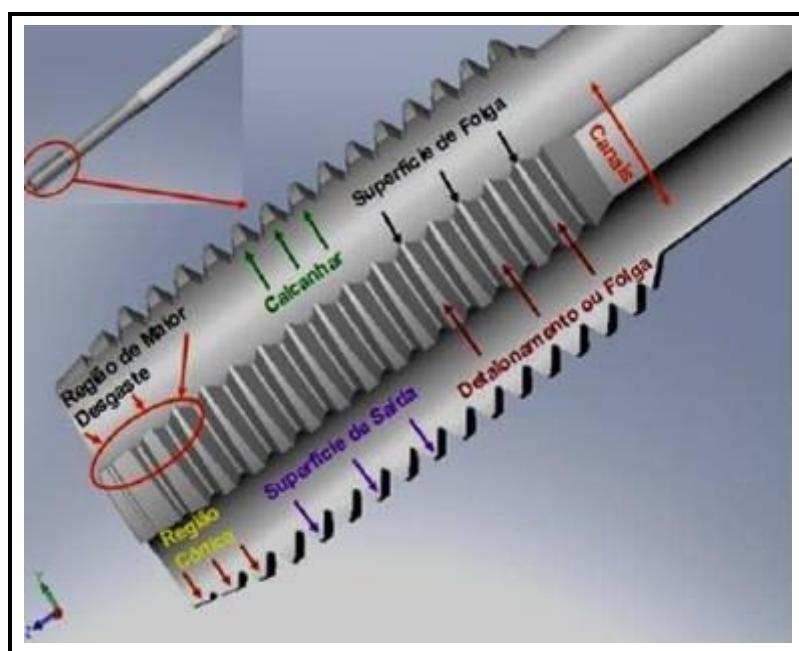
A escolha correta do macho é muito importante e, quando combinado com parâmetros de corte adequados (velocidade de corte, geometria de corte, lubrificação, etc.), pode resultar em melhorias na qualidade das rosas e no desempenho do processo de rosqueamento interno (UZUN; KORKUT, 2013).

O processo de rosqueamento com machos tem sido muito eficiente para a produção de rosas internas (STEMMER, 1992; ADACHI, *et al.*, 2004; BHOWMICK *et al.*, 2010). Contudo, é um processo muito exigente, levando-se em conta a possibilidade de danificar tanto a ferramenta quanto a peça. Além disso, como é geralmente realizado nas fases finais do processo de fabricação, um grande investimento no custo de mão-de-obra, tempo, energia e material já foi envolvido no processo, acarretando em altos custos de fabricação (BENGA; CIUPITU, 2009).

Do ponto de vista econômico, o custo do rosqueamento com machos normalmente se eleva quando a dureza do material da peça é superior a 25 HRC (COELHO *et al.*, 2006). A velocidade de corte no rosqueamento também é baseada no mínimo custo por rosca produzida, que normalmente está associada à vida útil do macho (JOHNSON, 1989; CARVALHO, 2011).

A Figura 2.1 apresenta as características da geometria de um macho para roscar, que varia de acordo com o tipo de material a ser usinado, o tipo de pré-furo, o meio lubri-refrigerante, dentre outras características. Sendo que uma combinação adequada quanto a escolha da ferramenta de roscar, do fluido de corte e dos parâmetros de corte é importante para a melhoria do desempenho no processo de rosqueamento interno (BHOWMICK *et al.*, 2010).

Figura 2.1 - Geometria de um macho utilizado no processo de rosqueamento interno



Fonte: Adaptado de DA MOTA (2009)

O macho apresenta na sua parte inicial um formato cônico, o qual permite as arestas de corte, dessa região, realizar a operação removendo pequenas áreas do material no início, que aumentam progressivamente durante o avanço realizado no processo de rosqueamento interno. Assim, a ação de corte é executada principalmente pelas arestas de corte da região chanfrada, mais o primeiro filete completo da região cilíndrica (KOMURA *et al.*, 1990).

A geometria da Figura 2.1 é aplicada tanto para machos manuais, como para os machos-máquina. A diferença é que nos machos manuais o volume de material removido é dividido pelo conjunto de ferramentas de roscar, pois eles são geralmente comercializados em caixas contendo três machos (DA MOTA, 2009).

Os machos para máquina, na maioria das aplicações, são usados individualmente, ou seja, a rosca é fabricada com uma única passada em dois estágios, no qual o primeiro a ferramenta avança removendo material da peça e no segundo inverte sua rotação e retorna à posição original.

Desta forma, a escolha correta do tipo de macho-máquina é determinante no resultado final do corte no processo de rosqueamento interno, pois implica diretamente na qualidade superficial do perfil roscado (TSAO; KUO, 2012).

A resistência e o tipo de material a ser processado determinam características importantes na fabricação dos machos, como o ângulo de saída, o comprimento total, o diâmetro e o reforço da haste, além do detalonamento, que é o alívio na superfície de folga dos filetes do macho, utilizado principalmente para reduzir o torque e o atrito da ferramenta com a peça (DA MOTA, 2009).

Outra importante característica é o número de canais do macho, tanto os machos manuais quanto os machos máquina são produzidos com canais retos, canais em hélice, ou com uma combinação desses dois canais. Os machos possuem canais por três principais razões: formar arestas de corte, a fim de proporcionar folga para saída dos cavacos e conduzir o fluido para região de corte (JOHNSON, 1989).

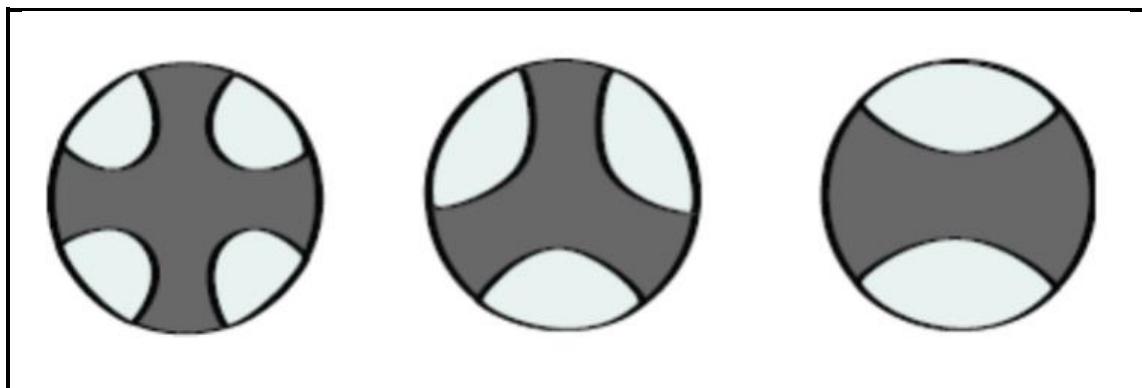
Para facilitar a remoção de cavaco no rosqueamento de furos profundos, três ou até dois canais podem ser usados, pois com a diminuição do número de canais, o espaço para remoção do cavaco aumenta, além de reforçar a haste do macho devido ao aumento da largura dos mesmos (KENNAMETAL, 2013; OSG, 2011).

Alguns tipos de machos possuem quatro canais quando empregados no rosqueamento de materiais dúcteis, os quais apresentam como característica um cavaco longo durante seu processo de corte.

Rosqueamento interno é um processo que possui uma ordem sequencial de corte radial na remoção do material, apresentando dois estágios bem definidos: avanço e retorno. A operação é realizada por meio de um macho que ao entrar em um pré-furo vai até que a profundidade da rosca desejada seja alcançada e, então, o macho é revertido para ser removido da peça roscada (BENGA *et al.*, 2009).

A Figura 2.2 a seguir apresenta o número de canais utilizados em machos para roscar.

Figura 2.2 - Número de canais utilizados em machos



Fonte: KENNAMETAL (2013)

Em comparação ao processo de rosqueamento interno com machos, as operações como torneamento, fresamento e furação sofreram avanços consideráveis ao longo dos últimos anos (DA MOTA, 2006).

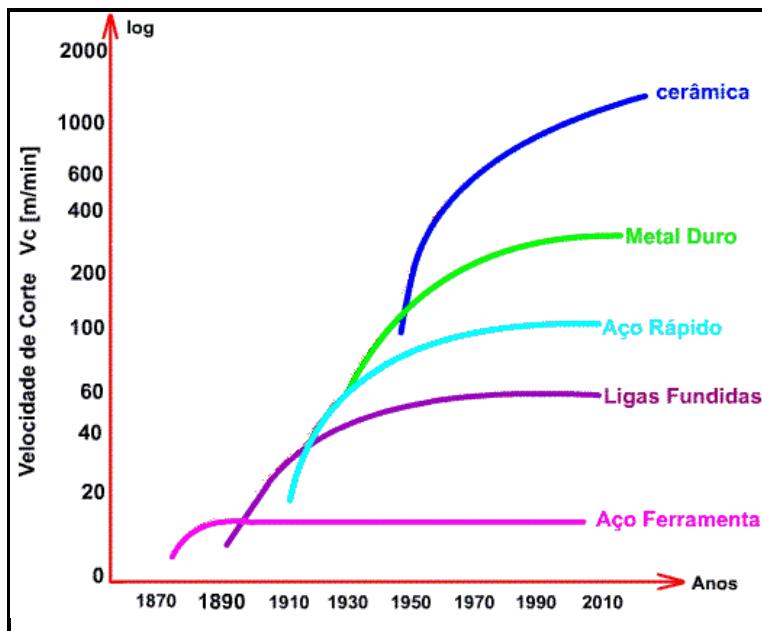
Contudo, existe ainda uma lacuna para novas pesquisas no processo de rosqueamento interno, tanto no desenvolvimento de novas ferramentas de corte e revestimentos, como para métodos e procedimentos utilizados em avaliação de desempenho sob diferentes condições lubri-refrigerantes, incluindo o uso de filmes auto lubrificantes, como os chamados lubrificantes sólidos (BELLUCO; DE CHIFFRE, 2002; KISHAWY *et al.*, 2005; TANAKA *et al.*, 2013, LIU *et al.*, 2013, COPPINI *et al.*, 2014).

2.2 Materiais para machos

As primeiras ferramentas de corte utilizadas na usinagem eram fabricadas com aço ao carbono e surgiram no início do século XIX, em seguida apareceram ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmicas (DA MOTA 2006, STEPHAN *et al.*, 2011). A evolução dos principais materiais de ferramentas foi em função da velocidade de corte, a qual é ilustrada na Figura 2.3.

Desde a década de 1980, quando praticamente se aboliu a utilização do aço carbono comum como material da ferramenta de roscar, que o aço rápido tornou-se a principal matéria prima para fabricação de machos, sendo ainda muito utilizado no mercado de ferramentas de corte (KLOCKE *et al.*, 2013; KUO, 2007).

Figura 2.3 - Evolução das velocidades de corte ao longo do tempo



Fonte: Adaptado de DA MOTA (2006)

Todavia, a escolha do macho é muito importante, pois sabe-se que em função do material da ferramenta de roscar e do material da peça a ser usinada, existem diferentes recomendações em relação aos parâmetros de corte a serem utilizados no processo de rosqueamento interno.

Conforme Sandvik (2013), as velocidades de corte recomendadas para machos utilizados em materiais de aço carbono podem variar de 9 m/min a 25 m/min para ferramentas de aço rápido e de 17 m/min a 55 m/min para ferramentas de metal duro.

De acordo com Linss (2002), as operações de rosqueamento interno que utilizam-se de velocidades de corte acima de 50 m/min podem ser consideradas relativamente altas.

2.2.1 Machos de aço rápido

Os machos fabricados em aço rápido apresentaram uma evolução ao longo do tempo, o que contribuiu para sua permanência como material para o fabrico de machos (KOELSH, 2002; KLOCKE *et al.*, 2013). A qualidade do aço rápido é considerada surpreendente, pois a mais de um século ainda sobrevive no meio de outras excelentes ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

Há diversas aplicações do aço rápido na fabricação de ferramentas de corte, tais como: brocas, alargadores, brochas, fresas, escareadores, machos, cossinetes de rosas, dentre outras (PINNOW; STASKO, 1990).

A combinação dos principais elementos de liga que compõe as ferramentas de aço rápido passaram por diversas mudanças, o que melhorou consideravelmente suas propriedades, chegando à uma adequada combinação de elementos de liga por meio do domínio de processos de fabricação e tratamento térmico (BACHNER *et al.*, 1999; MACHADO *et al.*, 2009).

Além do carbono como formador de carbonetos complexos, machos de aço rápido são constituídos principalmente por elementos como o Tungstênio (W), Molibdênio (Mo), Cobalto (Co) e o Vanádio (V). Os aços rápidos possuem uma dureza entre 60 a 67 HRC e resistência à temperatura na faixa de 520°C a 600°C (DINIZ *et al.*, 2013). A composição química do aço rápido e a forma com que são fabricados influenciam diretamente no desempenho do macho (SANTOS, 1999).

Os machos de aço rápido, normalmente, são fundidos e possuem uma microestrutura que confere alto nível de tenacidade combinado com boa resistência ao desgaste por abrasão. No entanto, existem diversas formas de se melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas dessas ferramentas de corte. Os tratamentos térmicos como têmpera e revenimento são os mais comuns nos machos de aço rápido, porém, outros meios e formas de tratamento superficial também podem ser utilizados, tais como, a nitretação e a carbonitretação (DA MOTA, 2006).

2.2.2 Machos de metal duro

Os machos de metal duro são comumente empregados na indústria em processos de rosqueamento, no entanto, em menor número em relação aos machos de aço rápido (PEREIRA, 2010). A partir da década de 1990, tanto o metal duro quanto o aço rápido com adição de cobalto (HSS-E) e sinterizado (HSS-PM), passaram a ser utilizados na fabricação de machos (REIS, 2004).

O macho de metal duro é produzido por meio do processo de metalurgia do pó, compostos basicamente de carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co) (DINIZ *et al.*, 2013). A elevada dureza à temperatura ambiente e a quente, além de excelente combinação de resistência ao desgaste são algumas das características que podem ser obtidas por estas ferramentas, variando-se a composição dos principais elementos constituintes da liga metálica utilizada na fabricação (MACHADO *et al.*, 2009).

Contudo, a utilização de metal duro em ferramentas de roscar exige alguns cuidados, já que apesar da maior resistência ao desgaste e maior dureza, estas ferramentas são menos tenazes do que as ferramentas de aço rápido. Desta forma, machos de corte de metal duro exigem máquinas com bom sincronismo no rosqueamento ou para as que não possuem tal função, sistemas de rosqueamento com cabeçotes auto reversíveis, pois as ferramentas de metal duro tem uma tendência a avarias como lascamento e quebra (DA MOTA, 2009).

A introdução de machos de metal duro impulsionou o processo de rosqueamento, possibilitando o aumento da velocidade de corte em relação aos machos de aço rápido, porém requer máquinas-ferramenta com elevados valores de rotação, além de uma boa rigidez estática e dinâmica (PATEL *et al.*, 2012).

2.3 Tratamentos superficiais e revestimentos em machos

O processo de nitretação é usado normalmente para o tratamento de superfícies de machos, no qual se aumenta a dureza, melhorando a resistência à corrosão e diminuindo o desgaste. Além disso, diminui o atrito devido à incorporação

de átomos de nitrogênio na estrutura do material. A nitretação pode ser realizada por meio de um banho de sal cianídrico (NaCNO) a uma temperatura de 500°C a 550°C, com duração entre 30 a 90 minutos (OSG, 2011; FRANCO JR., 2003) ou por meio de técnicas de controle por plasma (SAKAMOTO *et al.*, 2001).

Outro processo de tratamento superficial utilizado em machos de corte é a carbonitretação. Este processo envolve a difusão do carbono e de nitrogênio contidos na superfície metálica. Normalmente é conduzido em fornos de atmosfera controlada utilizando-se de gás propano (ou metano) misturado com amônia. As durezas obtidas neste processo são inferiores àquelas obtidas por nitretação, entretanto, uma das vantagens é que pode ser aplicado em aços rápidos com significante profundidade de endurecimento (JAREO; BRADBURY, 1999).

Os diferentes tipos de revestimentos utilizados em machos tem o intuito de proporcionar uma união de características que somente o substrato não conseguiria. A utilização de machos revestidos é uma alternativa para melhorar as propriedades mecânicas e químicas. Os revestimentos atuam de duas importantes formas. A primeira consiste na atuação do revestimento como uma barreira térmica entre o material processado (peça) e o material de corte (ferramenta), reduzindo a temperatura para o substrato e, assim, mantendo a tenacidade do núcleo da ferramenta. A segunda é como uma camada lubrificante, a qual promove uma redução no coeficiente de atrito entre sistema cavaco-ferramenta-peça (KONIG; KLOCKE, 1997; KUSTAS *et al.*, 1997).

A aplicação de revestimentos em machos é realizada pela precipitação de materiais endurecedores ou lubrificantes. A deposição da camada de revestimento ocorre por dois processos: o PVD (*Physical Vapour Deposition*) e o CVD (*Chemical Vapour Deposition*). Sabe-se que essas camadas, além de reduzir os mecanismos de desgaste como abrasão e adesão, proporcionam também um baixo coeficiente de atrito, melhorando os níveis das forças de corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

Normalmente, a espessura destes revestimentos encontra-se na faixa de 2 a 12 μm , o que não é relevante dimensionalmente em algumas ferramentas de corte, no entanto, pode aumentar o atrito em operações de baixa velocidade de corte (JIN *et al.*, 2000; SCHULZ *et al.*, 2000).

Segundo Coelho *et al.* (2006), os principais tipos de revestimentos utilizados em machos são: Nitreto de Titânio (TiN), Carboneto de Titânio (TiC), Carbonitreto de Titânio (TiCN) e Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN). Revestimentos baseados em

titânio são usados extensivamente em machos de corte porque eles apresentam alto grau de dureza, baixo coeficiente de atrito, alta resistência à corrosão e adesão (LI; ZENG; CHEN, 2006; DA MOTA, 2009).

Além destes revestimentos, os chamados lubrificantes sólidos tem despertado o interesse crescente para diversas aplicações, em virtude do seu baixo coeficiente de atrito e considerada propriedade lubrificante. Dentre os mais utilizados estão o DLC (*Diamond Like Carbon*), MoS₂ (Disulfeto de Molibdênio) e o WC/C (Carboneto de Tungstênio Carbono) (VIANA, 2004; DA MOTA, 2009; TSAO; KUO, 2012). Em algumas aplicações, para se aumentar a estabilidade e confiabilidade do processo de usinagem, camadas de lubrificante sólidas como WC/C, são colocadas sobre revestimentos duro, como o TiAlN (DERFLINGER *et al.*, 1999; REITER *et al.*, 2006).

2.3.1 Lubrificantes sólidos

Um lubrificante sólido pode ser definido como um material que promove a lubrificação entre duas superfícies em movimento e sua eficiência pode variar consideravelmente conforme as condições da operação (LUDEMA, 1996).

A dinâmica dos lubrificantes sólidos tem mostrado que o deslizamento nos filmes lubrificantes é acompanhado por um severo cisalhamento dúctil, favorecendo um baixo coeficiente de atrito. Desta forma, uma das mais importantes características dos lubrificantes sólidos é a capacidade de formar um filme que adere fortemente a superfície de contato, reduzindo o atrito e o desgaste (WENLONG *et al.*, 2011).

Assim, um material metálico, como uma ferramenta de corte de aço rápido, pode ser revestidas por um lubrificante sólido, de forma a produzir um sistema “auto lubrificante”, não necessitando de uma fonte externa de lubrificação durante seu tempo de vida (REDDY *et al.*, 2010).

Dentre os lubrificantes sólidos mais utilizados, destacam-se o MoS₂, que é considerado atrativo por apresentar um coeficiente de atrito extremamente baixo em diferentes materiais, temperaturas e pressões (KALIN *et al.*, 2012). No entanto, seu desempenho diminui na presença de umidade. Os lubrificantes sólidos podem ser

divididos nas seguintes classes: i) lubrificantes sólidos estruturais; ii) lubrificantes sólidos mecânicos e iii) lubrificantes quimicamente ativos (JUSTE, 2012).

Os lubrificantes sólidos podem ser particularmente vantajosos sob condições de baixas velocidades de corte, como é o caso do processo de rosqueamento, pois além de reduzir o atrito, ajuda a prevenir a adesão de partículas na interface ferramenta-peça (JIANXIN *et al.*, 2012). Ao contrário dos fluidos de corte, lubrificantes sólidos não podem refrigerar ou transportar o calor excessivo gerado durante a operação de corte.

A seguir apresenta-se os tipos de fluidos de corte utilizados no processo de rosqueamento

2.3.2 Condicionador de metais

Na literatura, alguns autores citam que com a diminuição do atrito e do torque no rosqueamento, pode-se aumentar a vida útil do macho (DEL VAL *et al.*, 2013; BHOWMICK *et al.*, 2010; BEZERRA; COELHO, 2008; VELDHUIS *et al.*, 2007).

De acordo com Demetrio (2012) uma maneira de se diminuir o desgaste entre duas superfícies é a inserção de uma camada lubrificante líquida ou sólida. Contudo, dependendo da aplicação, a lubrificação sólida é a forma que pode apresentar as maiores vantagens em relação à diminuição do atrito entre as partes em contato. Uma outra vantagem do lubrificante sólido em relação ao lubrificante líquido é em relação à temperatura de operação, que pode alcançar a faixa de 1000°C, mantendo o coeficiente de atrito relativamente baixo (DA CUNHA, 2012, SALES *et al.*, 2011).

Embora na maioria das aplicações tribológicas são utilizados lubrificantes líquidos e ou graxas para diminuir o atrito e o desgastes da superfícies em contato, pode-se também utilizar lubrificantes na forma sólida em aplicações de baixas temperaturas e pressões extremas de contatos (SILVERIO, 2010).

Os produtos químicos que são propositadamente adicionados a um óleo para melhorar suas propriedades são chamados aditivos, que por sua vez, podem mudar as propriedades de um lubrificante e são essenciais para o seu desempenho global. Eles também auxiliam nas características específicas do lubrificante como a

tendência à corrosão, formação de espuma, oxidação, coagulação, desgaste, atrito e outras propriedades (SANTANA *et al.*, 2010).

Já os condicionadores metálicos podem ser empregados quando se deseja diminuir o atrito, proteger a peça contra intempéries, servir de metal base para outro material de maior resistência ou melhores propriedades e, em alguns casos, auxiliam na diminuição da fadiga de alguns metais (DOS ANJOS, 2012; KRIONI, 2012).

Há um condicionador de metais no mercado, o qual foi utilizado nesta dissertação, que ao ser empregado em ferramentas de corte pode ser classificado como uma lubrificação sólida (COPPINI *et al.*, 2014). É um produto similar aos lubrificantes sintéticos em termo de viscosidade, mas não contém parafinas cloradas, melhoradores de viscosidade, solventes, metais pesados, etc.

De acordo com o fabricante pode ser aplicado puro ou adicionado a outro tipo de óleo ou graxa de origem mineral ou sintética, podendo ainda ser aplicado em diversos equipamentos e em aplicações de usinagem, como o rosqueamento interno (DA SILVA *et al.*, 2013), furação (COPPINI *et al.*, 2014) e alargamento (ALVES, 2014). O condicionador metálico utiliza-se dos demais lubrificantes como meio para chegar as superfícies metálicas em atrito e aos pontos críticos de calor.

O condicionador de metais pode ser considerado uma ferramenta líquida moderna para lubrificação em sistemas que tem o atrito como fator dominante. Acredita-se que o condicionador metálico forma uma espécie de “barreira” antiatrito na superfície da ferramenta de roscar por meio de um processo chamado adsorção, que segundo o próprio fabricante, nada mais é do que uma reação química para fixação das moléculas de óleo na superfície metálica da ferramenta (DE OLIVEIRA *et al.*, 2014).

No próximo item é apresentado os principais meios lubri-refrigerantes utilizados para se verificar o desempenho no processo de rosqueamento interno.

2.4 Fluidos de corte no processo de rosqueamento

Os fluidos de corte têm funções lubri-refrigerantes e são utilizados em processos de remoção de materiais, melhorando o desempenho dos processos de

fabricação e, consequentemente, a vida útil das ferramentas de corte (SOKOVIC; MIJANIVIC, 2001; FROMENTIN *et al.*, 2010).

O rosqueamento interno necessita mais da ação de um fluido de corte com poder lubrificante do que refrigerante, visando facilitar a remoção dos cavacos da região de corte para minimizar os efeitos do desgaste e melhorar a vida útil do macho (SUPEKAR *et al.*, 2012). A operação de rosqueamento interno é fortemente dominada pelo atrito e não pode ser realizada sem uma lubrificação adequada nas arestas de corte da ferramenta de roscar, e isso, muitas vezes, é fornecida por meio de óleos integrais (BRANDAO; COELHO, 2009; BRANDAO *et al.*, 2010).

Segundo Fromentin (2004), uma aplicação adequada de lubrificantes em operações de rosqueamento pode resultar em inúmeras vantagens, dentre as quais, estão o aumento da vida útil do macho, o melhor controle dimensional das rosas produzidas, além de menor reafiação da ferramenta e remoção eficiente dos cavacos gerados.

De acordo com a literatura existem três tipos de fluidos de corte: lubrificantes a base de óleo (WAKABAYASHI *et al.*, 2007; BELLUCO; DE CHIFFRE, 2002), lubrificantes a base de água (CHINAS-CASTILLO *et al.*, 2007; LIAN *et al.*, 1996) e emulsão (mistura de água e óleo lubrificante) (CAMBIELLA *et al.*, 2007; BATALLER *et al.*, 2004; RAKIC; RAKIC, 2002).

A utilização de fluidos com boas propriedades lubrificantes promove uma redução no atrito da interface ferramenta-peça e ajuda a produzir um bom acabamento superficial. Além disso, a força de corte também é reduzida, levando a um menor consumo de energia para todo o processo de usinagem, que é uma das principais razões para a utilização de fluidos de corte com maior capacidade de lubrificação (BELLUCO; DE CHIFRE, 2001).

No rosqueamento utiliza-se de fluidos de corte acreditando beneficiar o processo de várias maneiras, tais como a redução do atrito, a diminuição da temperatura e do torque, além de melhorias em relação a qualidade das rosas produzidas. Segundo Sokovic e Mijanovic (2001), os critérios para avaliação de desempenho de fluidos de corte normalmente são: os resultados da usinagem quanto a qualidade geométrica e o acabamento superficial das peças produzidas, o melhor consumo de energia em relação as forças de corte e o mínimo desgaste da ferramenta.

A evolução de novos fluidos de corte, características de desempenho de diferentes fluidos de corte têm sido desenvolvido por meio de ensaios de rosqueamento (WU *et al.*, 2001; BELLUCO; DE CHIFFRE, 2002; CLARENS *et al.*, 2004).

Wu *et al.* (2001) investigaram o desempenho de machos de HSS (M10) no rosqueamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, utilizando-se de lubrificante a base de água com aditivos orgânicos de fosfato de cobre. Eles descobriram que uma reação ativada sob aspectos mecânicos e tribológicos formou um composto ativo contendo cobre na superfície da peça, o qual desempenhou um papel fundamental para melhorar o acabamento das roscas.

De acordo com Cheng *et al.* (2005), fluido de corte está presente em diversas indústrias, com estimativa de consumo mundial na casa de bilhões de litros por ano. No entanto, fluidos para usinagem tem altos custos de ciclo de vida com aquisição, manutenção e eliminação (KLOCKE; EISENBLATTER, 1997). Soma-se a isso as constantes preocupações com questões trabalhistas e ambientais (CLARENS *et al.*, 2006), além da saúde e segurança dos operadores, que submetidos a longa exposição aos fluidos de corte podem desenvolver doenças de pele, irritação dos olhos e até câncer (TAWAKOLI *et al.*, 2010; SUPEKAR *et al.*, 2012).

Portanto, minimizar o uso de fluido de corte se tornou uma questão primordial e estratégica. Assim, os fabricantes tem-se preocupado, cada vez mais, em desenvolver fluidos ecologicamente corretos com elevado nível de desempenho, permitindo a sustentabilidade em processos de fabricação, sem comprometer a qualidade do produto e a vida das ferramentas de corte.

Alguns substitutos para os fluidos de corte começaram a surgir e foram investigados ao longo das últimas duas décadas. A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) é uma das alternativas mais eminentes aos fluidos de corte convencionais. Desenvolvido na década de 1990, MQL tem sido pesquisado como uma forma viável para proporcionar lubrificação a uma variedade de operações de usinagem em uma série de materiais de engenharia (BRAGA *et al.*, 2002; WEINERT *et al.*, 2004).

Frequentemente, o agente utilizado em MQL é o óleo integral de base mineral, porém alguns aplicativos também se utilizam de emulsão à base de água (Bhowmick *et al.*, 2010). Em termos de vida útil da ferramenta, bons resultados foram obtidos com a utilização desta técnica (SALES; DINIZ; MACHADO, 2001).

No entanto, Klauberg (2009) utilizou-se de machos M8x1,25 em condições de MQL no rosqueamento interno do aço ABNT 1045 (163-210 HB), e não conseguiu comprovar estatisticamente resultados satisfatórios quando em comparação com o método tradicional de utilização abundante de fluido de corte.

Apesar dos esforços e interesses sobre a técnica MQL, alguns pontos ainda não estão totalmente solucionados ou esclarecidos, como por exemplo, a pulverização de partículas (névoas) de óleo no ambiente fabril e as formas de controle de emissões dessas partículas (DINIZ *et al.*, 2013; NAND; DAVIM, 2009).

Logo, visando contribuir para a diminuição do uso de fluidos de corte e consequentemente uma maior redução de resíduos líquidos em processo de manufatura, faz-se necessário o emprego de novos métodos e tecnologias que forneçam um melhor desempenho em relação ao custo-benefício. Neste sentido, uma técnica que pode ser considerado promissora é a utilização adequada de lubrificantes sólidos em ferramentas de corte.

No próximo item é apresentado os tipos de avarias e mecanismos de desgaste em machos.

2.5 Desgaste e vida de machos

Machado *et al.* (2009) define desgaste em ferramentas de corte como sendo a deterioração de uma ou mais superfícies que compõem um sistema de usinagem, normalmente, envolvendo perda progressiva de material.

Segundo a Norma ISO 3685 (1993), o desgaste é definido como o resultado de mudanças na forma da ferramenta a partir do seu estado original, que acontece durante o processo de corte, provocada pela perda gradual de material ou deformação.

No geral, o degaste é um fenômeno negativo que ocorre nas ferramentas de corte durante a usinagem, principalmente naquelas que trabalham em condições mais críticas e que são fortemente dependentes da combinação adequada dos materiais da peça e da ferramenta. Os parâmetros de corte, como velocidades de corte, avanços e profundidades de usinagem, assim como o sistema de lubri-

refrigeração da interface cavaco-ferramenta, determinam a forma predominante do tipo de desgaste (DA MOTA, 2006; LAWAL *et al.*, 2013).

2.5.1 Avarias e mecanismos de desgaste em macho

Geralmente, os principais mecanismos de desgaste apresentados nos machos são abrasão e adesão. Estes mecanismos ocorrem em quase todos os tipos de materiais, independente das velocidades de corte, que são relativamente baixas, quando comparadas com os demais processos de usinagem, como o torneamento e fresamento (CAO; SUTHERLAND, 2002; BEZERRA, 2003; REIS, 2004; REITER *et al.*, 2006; DA MOTA, 2009; BHOWMICK *et al.*, 2010; UZUN; KORKUT, 2013). Desta forma, dificilmente acontece difusão e oxidação, pois as temperaturas atingidas na interface cavaco-ferramenta são predominantemente baixas.

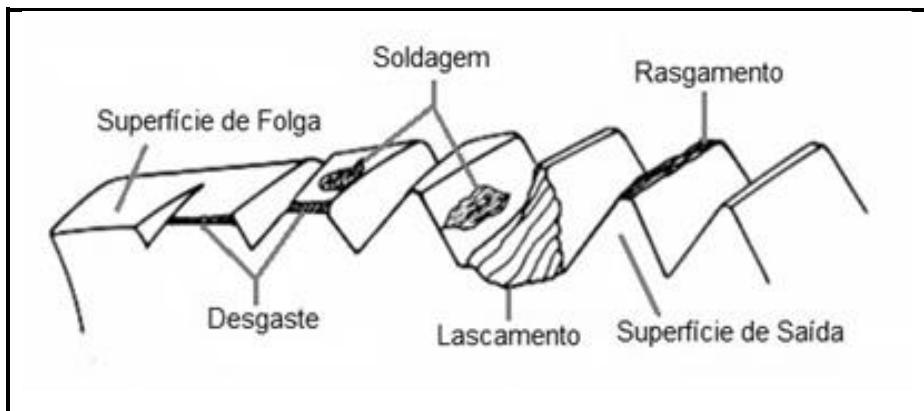
A Figura 2.4 apresenta os quatro tipos principais de avarias e desgastes que ocorrem nos machos, de acordo com os principais fabricantes de ferramentas (OSG, 2011):

- o lascamento: que ocorre devido às baixas velocidades de corte ou ferramentas de metal duro com baixa tenacidade;
- o desgaste propriamente dito (abrasão, adesão, difusão, oxidação), que ocorre tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta;
- o rasgamento que é o arrancamento da camada superior da crista de um ou mais filetes do macho, geralmente ocorre em furos com dimensões fora do especificado;
- a soldagem que é na realidade a adesão de materiais da peça sobre as superfícies dos filetes do macho, acompanhada ou não de arrancamento de material da ferramenta, é o desgaste mais encontrado no processo de rosqueamento.

Estes tipos de desgaste foram verificados por vários pesquisadores (REIS, 2004; REITER *et al.*, 2006, COELHO *et al.*, 2006; VELDHUIS *et al.*, 2007; DA

MOTA, 2009; BENGA; CIUPITU, 2009; UZUN; KORKUT, 2013) e estudiosos do processo de rosqueamento interno com machos de corte.

Figura 2.4 - Principais tipos de desgaste e avarias em machos



Fonte: Adaptado de DA MOTA (2009)

No próximo item são apresentados as principais formas e técnicas, existentes na literatura, de medir o nível de desgaste em ferramentas de roscar utilizadas nos processos de rosqueamento interno.

2.5.2 Forma de medir o desgaste em machos

O desgaste das ferramentas de corte em usinagem está direto ou indiretamente ligado a grandezas físicas, relacionadas com o material da peça, os tipos de ferramentas e as condições do processo de corte. A análise e a caracterização dessas grandezas em tempo real tornam-se possível somente com a implementação de sistemas de monitoramento direto ou indireto (DA MOTA, 2009).

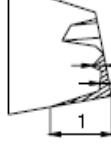
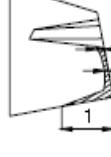
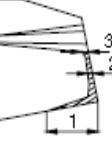
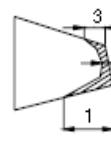
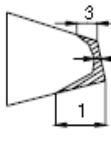
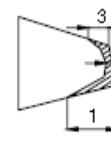
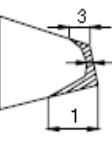
A técnica de monitoramento indireto supervisiona um sinal indireto mensurável em tempo real, correlacionando um ou mais fenômenos físicos com o estado de desgaste da ferramenta. A medição direta envolve máquinas e equipamentos, como microscópio ótico, microscópio eletrônico de varredura, interferômetro a laser, entre outros. Porém, neste caso normalmente há a interrupção do processo, originando tempos ociosos (DE SOUZA, 2004).

Apesar de tudo, algumas dessas técnicas não podem ser utilizadas em todas as ferramentas de corte devido à geometria. Na literatura falta um parâmetro que seja comumente aceito e utilizado para se medir de maneira direta os desgastes que ocorrem em machos (SHA; NI; WU, 1990; REIS, 2004; DA MOTA, 2009).

É comum encontrar dados relativos às medições de desgaste de flanco, não existindo, contudo, um parâmetro definido para isso, já que as definições de parâmetros como VB_B (desgaste de flanco médio) e $VB_{B\max}$ (desgaste de flanco máximo) frequentemente utilizados para ferramentas planas (como as ferramentas de tornear e fresar) não são diretas para as ferramentas de rosquear que possuem uma geometria complexa. Desta forma, os critérios para avaliação direta do desgaste dos machos podem ser totalmente diferentes para dois ou mais usuários distintos, para cada pesquisador ou fabricante (BEZERRA; COELHO, 2008).

Reis (2004) desenvolveu uma metodologia para medir e acompanhar a evolução do desgaste na superfície de folga de machos durante o rosqueamento interno, usando como ferramentas de teste, machos M6 com quatro canais retos. Esta técnica baseia-se na medição das cotas apresentadas na Figura 2.5 a seguir, as quais foram denominadas pelo próprio pesquisador, como cotas críticas de desgaste.

Figura 2.5 - Cotas críticas de desgaste em machos de corte

	CARREIRA	1º	2º	3º	4º
	1º DENTE				
	2º DENTE				
	3º DENTE				

Fonte: REIS (2004)

As cotas críticas, apresentadas na Figura 2.5, concentram-se nos primeiros filetes do macho de corte, pois é nesta parte das ferramentas que se realizam as primeiras ações de corte, sendo assim as primeiras a se desgastar (SHA; NI; WU, 1990, KOMURA *et al.*, 1990).

Segundo Da Mota (2009), as maiores dificuldades para medir os desgastes nos flancos e nas superfícies de saída dos machos estão relacionadas com a geometria destas ferramentas e principalmente devido às dificuldades encontradas na operação de visualização das superfícies, quando se utiliza um microscópio ótico. É muito difícil haver o controle do foco (imagem refletida pela luz do microscópio) das superfícies do macho. Além disso, o perfil do filete é complexo, devido aos diversos ângulos que compõem este tipo de ferramenta.

2.5.3 Critério de fim de vida de machos

Existem vários critérios que podem ser adotados para se decretar o conceito de vida da ferramenta de machos. Ferraresi (1995) define a vida de ferramenta como sendo “o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido”.

Normalmente, um critério adotado busca manter a ferramenta em uso somente enquanto sua utilização é economicamente vantajosa. Desta forma, quando níveis de desgaste atingem valores exagerados, o critério é usado para controlar o fim de vida da ferramenta e manter o processo dentro de condições seguras e econômicas (MACHADO *et al.*, 2009).

A vida da ferramenta de roscar pode ser determinada pelo receio da quebra da aresta de corte, pelo máximo desgaste admitido, por uma falha catastrófica, podendo ainda ser expressa pelo intervalo de tempo durante o qual a ferramenta executa o corte sob determinadas condições de usinagem, como o volume de material removido, o número de peças ou rosas fabricadas, níveis de forças de corte, temperatura de usinagem, entre outros.

No entanto, critérios de fim de vida baseados em calibradores de rosca passa-não-passa é a alternativa mais econômica adotada pelas indústrias que

utilizam machos em operações de rosqueamento interno (DA MOTA, 2006; ZEDAN *et al.*, 2010).

Para Del Val *et al.* (2013), os principais fatores que influenciam na vida da ferramenta de roscar são: o material da ferramenta e da peça, a máquina-ferramenta, o fluido de corte, e as condições de usinagem.

2.6 Bibliometria sobre avaliação de desempenho no rosqueamento

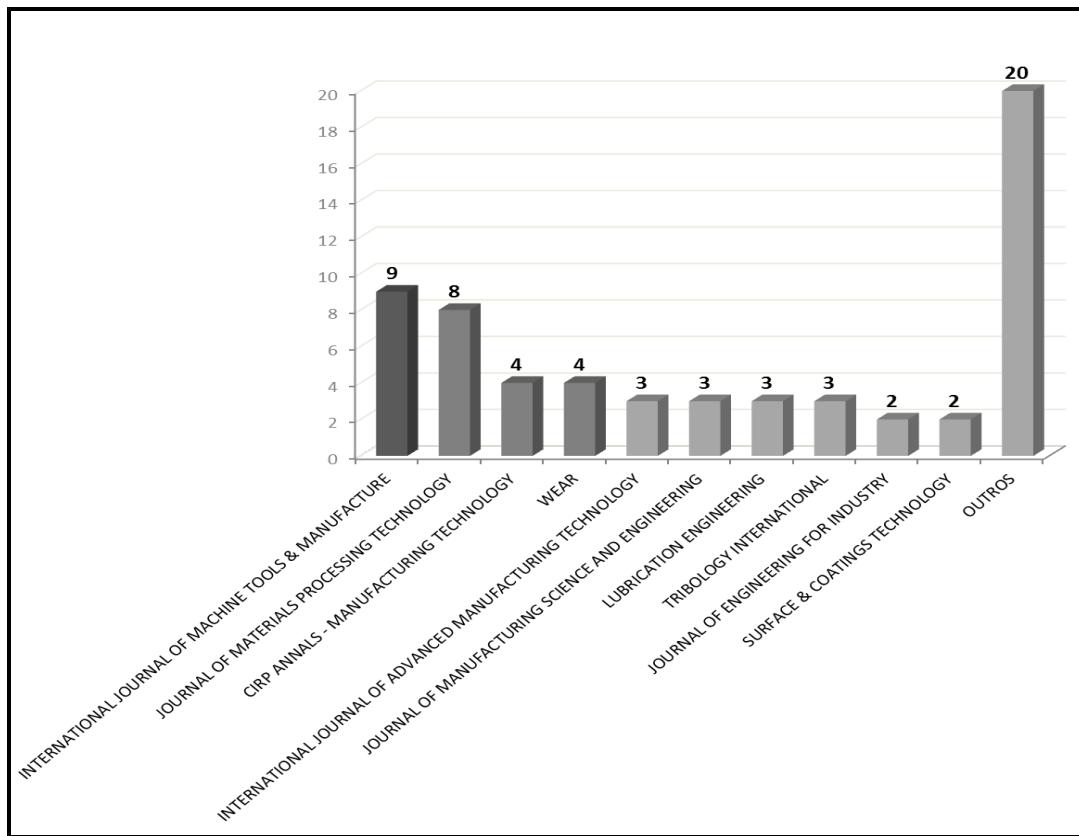
Este tópico tem o propósito de apresentar a produção científica sobre avaliação de desempenho (AD) aplicado no processo de rosqueamento interno, entre 2000 e 2013, de forma a permitir uma análise das principais abordagens que estão sendo utilizadas e assim identificar possíveis lacunas de pesquisa. Para isso, foram definidas algumas etapas específicas, tais como:

- identificar os periódicos que mais publicaram sobre avaliação de desempenho aplicado especificamente nos processos de rosqueamento interno;
- apresentar a evolução das publicações sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento interno;
- identificar os principais autores que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento interno;
- apresentar as principais características dos machos utilizados nos artigos pesquisados;
- apresentar as condições lubri-refrigerantes utilizadas nos trabalhos publicados no período.

2.6.1 Periódicos que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento

A avaliação de desempenho aplicado especificamente nos processos de rosqueamento vem sendo pesquisada por diversos periódicos, conforme representado pela Figura 2.6.

Figura 2.6 - Periódicos que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento



Fonte: Elaborado pelo autor

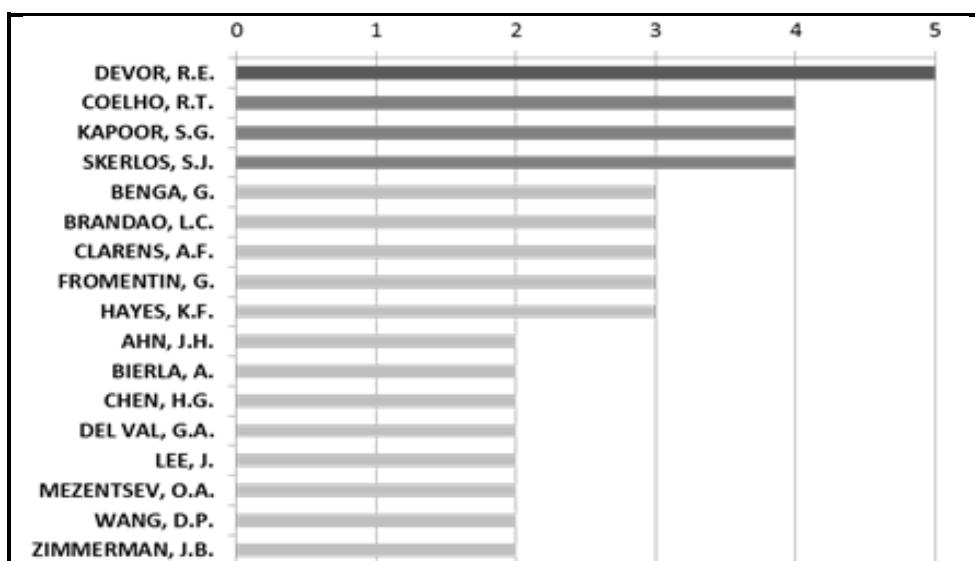
Como pode-se observar, o periódico que mais publicou sobre o tema é o *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, ou seja, foram nove artigos publicados no período de 2000 a 2013 em uma amostra de 61 artigos avaliados neste estudo, o que equivale a 15% da produção científica pesquisada. Em seguida, aparece o *Journal of Materials Processing Technology* com oito artigos publicados, representando 13% da amostra. Em terceiro lugar, com quatro artigos publicados, equivalente a 7% das publicações, está o *CIRP Annals – Manufacturing Technology*.

Verifica-se também a relevância dos quatro primeiros periódicos, pois juntos representam 41% do total da amostra dos artigos pesquisados.

2.6.2 Autores que mais publicaram sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento

Nesta etapa, pode-se verificar que a avaliação de desempenho vem sendo pesquisadas por diversos autores em todo o mundo. A Figura 2.7 apresenta os principais autores que mais publicaram no período entre 2000 e 2013, utilizando-se também como critério o número de citações dos mesmos. Assim além dos listados, outros 137 autores aparecem de forma fragmentada nos 61 artigos pesquisados.

Figura 2.7 - Principais Autores que mais publicaram entre 2000 e 2013 sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento



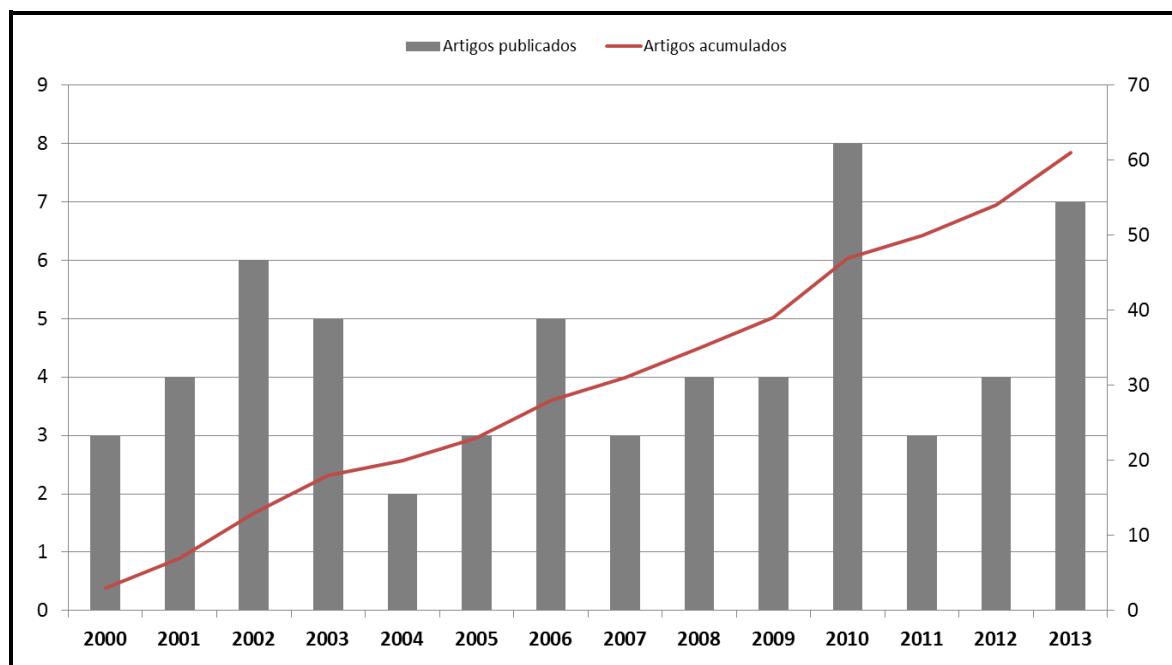
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a publicação dos artigos do período, percebeu-se que a pesquisa referente ao tema “avaliação de desempenho no processo de rosqueamento” é explorada por diversos autores. Entretanto, merecem destaque autores como Devor, R.E. (EUA), o único com cinco artigos publicados na amostra, seguido por Coelho, R.T. (BRASIL), Kapoor, S.G. (EUA) e Skerlos, S.J. (EUA), ambos com quatro publicações cada.

2.6.3 Evolução dos artigos sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento

O número de publicações sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento apresenta uma oscilação ao longo dos anos. Mantendo uma média de quatro publicações por ano. No entanto, conforme pode-se observar na Figura 2.8, ocorreu um aumento significativo a partir do ano de 2010, com a publicação de oito artigos, sendo que três foram publicados pelo *Journal of Materials Processing Technology*.

Figura 2.8 - Evolução das publicações entre 2000 e 2013 sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, com base nesta evolução, pode-se afirmar que as investigações sobre o processo de rosqueamento interno está ganhando cada vez mais importância no meio científico.

Com base nos dados do período analisado, referente aos 14 anos, 42,6% (26 artigos) são referentes aos últimos cinco anos, apontando que as publicações sobre o tema vem ganhando importância nos periódicos consultados.

2.6.4 Características dos machos utilizados nos artigos pesquisados

Conforme apresentado na Tabela 2.1. Pode-se verificar que muitas são as ferramentas empregadas para se realizar a avaliação de desempenho no processo de rosqueamento. No entanto, de todos os machos encontrados nos trabalhos pesquisados, os com dimensão M10x1,5 e M8x1,25 representam 47,5% do total, sendo que o primeiro está presente em 20 artigos e o segundo em apenas 9 artigos.

Tabela 2.1 - Principais características das ferramentas de roscar empregadas nos artigos pesquisados entre 2000 e 2013

Dimensão	Nº. de Trabalhos	Tipo de Macho	Nº. de Trabalhos	Material do Substrato	Nº. de Trabalhos
M10x1,5	20	Canais Retos	32	Aço rápido	47
M8x1,25	9	Ponta Helicoidal	21	Metal duro	14
M3x0,5	6	Canal Helicoidal	15		
M6x1,0	4	Laminador	7		
M12x1,5	3				
3/8-16 UNC	3				
1/4-20 UNC	3				
Outras	13				

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao tipo de macho, notavelmente os machos de canais retos são os mais utilizados, presentes em 32 trabalhos, seguido pelos machos de ponta helicoidal e canal helicoidal, respectivamente, com 21 e 15 dos artigos publicados no período analisado.

A amostra de 61 artigos publicados entre 2000 e 2013, mostrou a superioridade dos machos de aço rápido sobre os machos de metal duro. O aço rápido está presente em 77% dos artigos pesquisados, enquanto o metal duro

aparece em apenas 14 trabalhos. Corroborando com autores que afirmam a ampla utilização do macho de aço rápido (KLOCKE *et al.*, 2013, UZUN; KORKUT, 2013).

2.6.5 Condições lubri-refrigerantes utilizadas nos artigos pesquisados

As publicações dos artigos analisados, utilizaram-se para avaliação de desempenho diversas condições lubri-refrigerantes, apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais características das ferramentas de roscar empregadas nos artigos pesquisados entre 2000 e 2013

Condições Lubri-refrigerante	Nº. de Trabalhos
Rosqueamento à seco	23
Óleo mineral integral	18
Emulsão à base de óleo mineral	12
Mínima quantidade lubrificante (MQL)	10
Emulsão à base de óleo vegetal	8
Óleo semi-sintético	3
Outras	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se constatar que a usinagem sem fluido de corte, ou seja, o rosqueamento à seco está presente em 37,7% dos trabalhos publicados no período. Na sequência aparecem os tradicionais óleos integrais em 30% dos artigos publicados.

Na sequência encontram-se as emulsões à base de óleo mineral e sistemas de MQL, com respectivamente, 12 e 10 trabalhos publicados no período de 2000 a 2013.

O rosqueamento à seco encontra-se em primeiro lugar e isso pode estar associado, cada vez mais, as novas tendências que os pesquisadores tem de pensar em formas de diminuir a utilização de fluidos de corte no referido processo.

O emprego irracional de fluidos de usinagem pode impactar significativamente o meio ambiente, além de ir na contramão dos princípios de sustentabilidade.

Desta forma, torna-se útil e oportuno as pesquisas que faz uso de novas tecnologias, na tentativa de viabilizar meios de reduzir ou eliminar a utilização de fluidos de corte em processos de fabricação.

2.7 Abordagens sobre avaliação de desempenho no rosqueamento

Conforme apresentado na Figura 2.9, constata-se que a avaliação de desempenho utilizando-se de diferentes fluidos de corte em relação ao torque no rosqueamento é a mais pesquisada, com 29,5% dos artigos publicados entre 2000 e 2013.

Na sequência aparece, com 22%, a avaliação da qualidade das roscas produzidas e a análise de desgaste do macho com 16% dos artigos.

Observa-se ainda que existem pesquisas que abordaram mais de uma dimensão em específico, como por exemplo, o efeito do revestimento/tratamento em machos no torque, no desgaste e na vida útil da ferramenta.

Vale ressaltar a preocupação contante dos trabalhos quando o efeito de quebra do macho, nos quais merecem destaque os estudos que avaliaram a utilização de sistemas vibratórios em relação ao torque e a temperatura no processo de rosqueamento interno.

Com base nos resultados apresentados, nota-se que vem sendo comum as pesquisas com mais de uma abordagem, ou seja, avaliar simultaneamente diferentes aspectos que tem influência diretamente ou indiretamente sobre os resultados avaliados nos diferentes desempenhos investigados no processo de rosqueamento.

Figura 2.9 - Diferentes abordagens pesquisadas sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento entre 2000 e 2013



Fonte: Elaborado pelo autor

No próximo tópico, realizou-se uma revisão sistemática dos artigos publicados entre 2000 e 2013 sobre as principais abordagens aplicadas para avaliação de desempenho no processo de rosqueamento interno. Assim, tem-se nos itens a seguir um aprofundamento das abordagens sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento, especificamente nas investigações com foco na vida útil e no desgaste do macho, assim como, as relacionadas a qualidade das rosas produzidas e os efeitos causados pelo uso de fluidos de corte no torque e na temperatura de usinagem. Ao final, foi possível identificar certas carências de pesquisa sobre avaliação de desempenho no processo de rosqueamento, dentre as quais, algumas são investigadas nesta dissertação.

2.7.1 Desempenho em relação à vida útil de machos

Klocke *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de uma nova ferramenta de HSS revestidos com DLC em comparação a mesma ferramenta com TiCN, durante o rosqueamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. Com velocidade de corte de 8 m/min e condições inundada sob emulsão à base de óleo mineral, machos M10x1,5 com DLC produziram mais de 80 rosas sem esgotar seu potencial, ou seja, sendo todas aprovadas pelo calibrador passa-não-passa. Em contraste, as ferramentas revestidas de TiCN, apresentaram um desgaste evidente, seguido por aumento do torque conforme o número de rosas usinadas aumentava, resultando no fim da vida útil da ferramenta com menos de 30 rosas. O resultado do novo revestimento DLC mais que duplicou a vida útil do macho e, isso, foi atribuído às propriedades de redução do atrito e adesão do revestimento na superfície dos machos, proporcionando níveis de torque estáveis durante o processo (KLOCKE *et al.*, 2013).

Uma investigação sobre o processo de rosqueamento interno em uma liga de titânio do tipo beta (Ti-15V-3Cr-3Mo-3Al), Jin *et al.* (2000), avaliaram a melhoria no desempenho da produção com machos revestidos de CBN em comparação a vários machos disponíveis comercialmente, tais como, os revestidos de DLC, machos de aço rápido oxidado e outro de metal duro. Ambos machos M3x0,5 de ponta helicoidal, foram submetidos a ensaios de rosqueamento. Verificou-se o desempenho em relação número de rosas produzidas antes da ruptura de cada macho, sob condições recomendadas pelo próprio fabricante das ferramentas. A velocidade de corte foi de 1m/min e utilizou-se óleo integral mineral em condições abundante em todos os testes. Os autores concluíram que o desempenho de machos revestidos de CBN pode efetivamente evitar a aderência da liga de titânio durante o rosqueamento interno, levando a maior vida útil das ferramentas (45 orifícios roscados) em comparação aos machos de aço rápido oxidado (11 furos roscados) e os machos de metal duro (com apenas 1 furo roscado).

Machos revestidos de TiN e não revestidos foram utilizados para investigar o desempenho, no que diz respeito à vida útil da ferramenta de machos (ADACHI *et al.*, 2004). Os testes foram realizados três vezes com cada tipo de macho. A avaliação das rosas foi verificada com um calibrador de rosca passa-não-passa. O material da peça foi à liga de alumínio 2618, a velocidade de corte foi de 7 m/min em

condições abundante de óleo integral mineral. Os resultados indicaram que em média a vida útil dos machos revestidos de TiN foi 3,8 vezes maior ($\bar{X} = 49$ roscas) do que a vida dos machos sem revestimento ($\bar{X} = 13$ roscas).

Em Benga e Ciupitu (2009), machos de HSS revestidos com TiAlN e não revestidos foram selecionados para teste de vida, medido por meio do número de roscas produzidas. O critério estabelecido foi o desgaste de flanco médio (VB_B) igual a 0,3 mm. O material da peça utilizada foi placa de aço AISI P20 com dureza de 35 ± 2 HRC. As condições de corte utilizada foram velocidade de corte de 8 m/min e avanço de 1,58 mm/rev, respectivamente. Três diferentes tipos de macho foram utilizados para roscar um comprimento de 10 mm (furos cegos), sendo machos de canais reto, machos de ponta helicoidal e de canal helicoidal. Os resultados são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Vida útil de macho sem e com revestimento TiAlN

Tipo de Macho	Roscas (sem revestimento)	VB_B (mm)	Roscas (com revestimento)	VB_B (mm)
Canal Reto	20	0,38	20	0,35
Ponta Helicoidal	15	0,30	32	0,31
Canal Helicoidal	194	0,27	380	0,28

Fonte: Adaptado de BENGA; CIUPITU (2009).

Comparando somente o desempenho dos machos revestidos com TiAlN, o macho helicoidal foi 14 vezes maior que o macho de canal reto e quase 12 vezes maior do que o macho de ponta helicoidal. Os autores concluíram que a vida da ferramenta pode ser atribuída, por um lado à melhoria da evacuação de cavacos e, por outro lado, no bom comportamento tribológico oferecido pelo revestimento de TiAlN (BENGA; CIUPITU 2009). No entanto, vale ressaltar que machos de canais helicoidais são projetados especialmente para rosqueamento de máquina em furos cegos. Para explorar o desempenho de filmes ultrafinos de perfluoropolímero (PFPE) aplicados na superfície de machos de aço rápido, Veldhuis *et al.* (2007), realizaram testes no processo de rosqueamento. A vida útil da ferramenta foi investigada utilizando-se machos para máquina de ponta helicoidal, com e sem filmes de PFPE.

O critério estabelecido foi o desgaste de flanco médio (VB_B) igual a 0,3 mm. O material da peça utilizada foi placa de aço AISI P20 e as condições de corte utilizada foram rotação de 260 rpm e avanço de 1,58 mm/rev, respectivamente. Foram utilizados machos de canais retos, machos de ponta helicoidal e de canal helicoidal. Os resultados são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Vida útil de macho sem e com filme de PFPE

Tipo de Macho	Roscas (sem revestimento)	VB_{Bmax}	Roscas (com revestimento)	VB_{Bmax} (mm)
Canal Reto	23	0,50	51	0,48
Ponta Helicoidal	18	0,30	30	0,23
Canal Helicoidal	194	0,20	380	0,18

Fonte: Adaptado de VELDHUIS *et al.* (2007).

Realizaram-se testes de rosqueamento não inferior a cinco para cada tipo de macho e técnica. Sendo que a dispersão nas medições de vida da ferramenta foi cerca de 10% (VELDHUIS *et al.*, 2007). Pode-se verificar que o desempenho dos machos com filme PFPE foi duas vezes melhor que os machos sem filme PFPE.

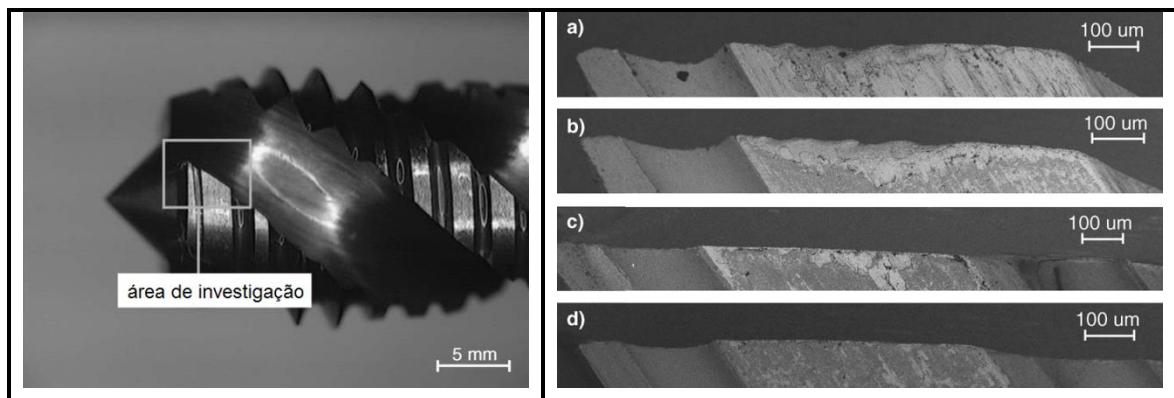
Outro trabalho interessante, realizado por Culbertson *et al.* (1991), buscou avaliar o desempenho relativo de machos máquina tratados superficialmente com íons de nitrogênio em um ambiente fabril. O desempenho relativo considerou o número médio de peças aprovadas dentro das especificações (verificada por calibrador passa-não-passa) de machos tratados em relação aos machos não tratados. Os testes consistiram no rosqueamento com machos de HSS (9/16"-18 UNF) em aço SAE 4130 (29 ± 2 HRC). Foram usados cinco machos em cada condição (tratado ou não com íons de nitrogênio). Sendo que o número de orifícios roscados com os machos sem tratamento variou de 8 a 86 rosas, com uma média de 49 e um desvio padrão de 26,8. Os machos tratados produziram entre 86 e 304 rosas, com uma média de 216 e um desvio padrão de 90,3. Assim, os machos tratados tiveram um desempenho relativo de 4,4 vezes sobre os machos sem tratamento (CULBERTSON *et al.*, 1991). Com base nas publicações sobre abordagens em relação à vida útil do macho de roscar em operações de

rosqueamento, pode-se constatar que a avaliação de desempenho normalmente é relacionada por meio da quantidade ou número de roscas produzidas dentro das especificações desejadas. No entanto, não foi possível identificar estudos que apontem qual o número mínimo de ensaios adequado a ser realizado durante os testes de rosqueamento, ou até mesmo qual é o erro admissível considerado adequado, a fim de se obter valores dentro de um nível de confiança desejado para este complexo processo.

2.7.2 Desempenho em relação ao desgaste de machos

A Figura 2.10 apresenta a investigação de Reiter *et al.* (2006) sobre o processo de rosqueamento em aço inoxidável austenítico usando machos de aço rápido (M8x1,25) com revestimentos rígidos como nitreto de cromo (CrN) e carbonetos de cromo (CrC), além dos tradicionais revestimentos de TiCN e TiAlN.

Figura 2.10 - Área investigada e imagens das arestas de corte dos revestimentos: (a) CrC, (b) CrN, (c) TiAlN e (d) TiCN



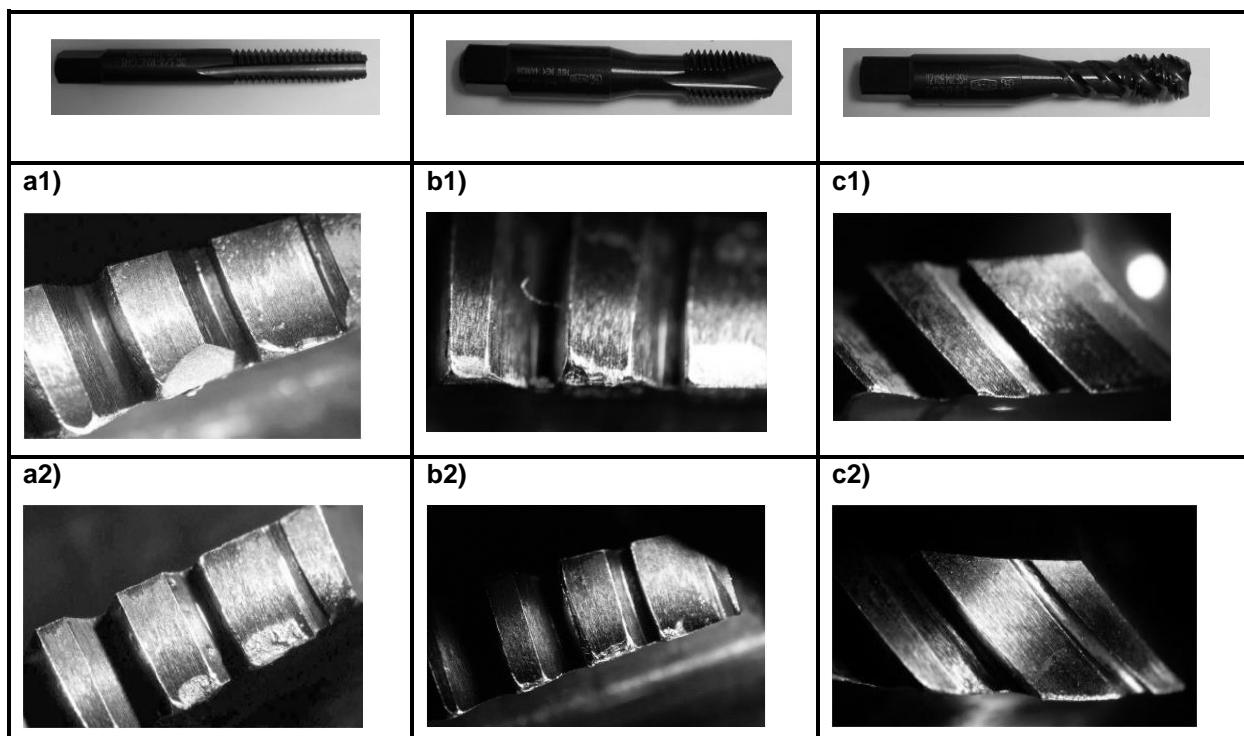
Fonte: Adaptado de REITER *et al.* (2006).

Por meio de imagens feitas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi possível verificar que o macho revestido com TiCN (d) apresenta o menor nível de desgaste, enquanto a ferramenta revestida com CrC obteve o pior desempenho. Os autores atribuíram esse desgaste acentuado ao maior coeficiente de atrito (0,49) e a menor dureza (2200 HV) do revestimento CrC em comparação ao revestimento TiCN, com coeficiente de atrito de (0,29) e dureza de (3100 HV).

Os machos revestidos com CrN (b) e TiAlN (c) tiveram desempenhos intermediários.

Benga e Ciupitu (2009) analisaram o desgaste em diferentes tipos de machos de aço rápido (3/8"-16 UNC) com e sem revestimento TiAlN. Os diferentes tipos de machos e seus desgastes são apresentados na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Desgaste na superfície de folga de machos de canal reto (a), de ponta helicoidal (b) e canal helicoidal (c), sem revestimento (1) e com revestimento TiAlN (2)



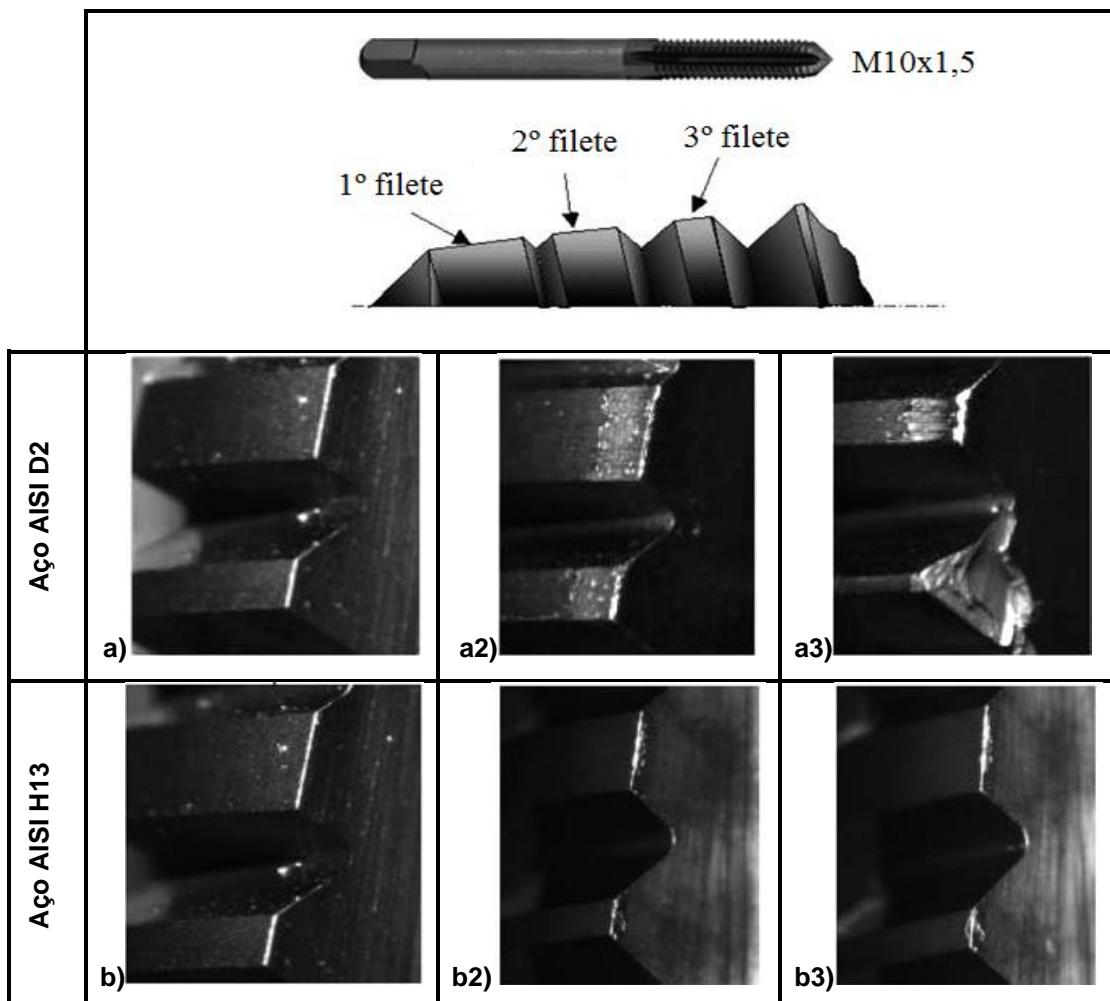
Fonte: Adaptado de BENGA e CIUPITU (2009)

Os ensaios de rosqueamento foram realizados em aço AISI P20, com velocidade de corte de 8 m/min, revelaram o menor desgaste de folga médio para o macho de canal helicoidal revestido com TiAlN (0,18 mm) e o maior para o macho de canal reto sem revestimento (0,50 mm).

Coelho *et al.* (2006), investigaram alguns aspectos de desgaste e desempenho, quando machos de metal duro (M10x1,5) foram utilizados no corte do aço temperado AISI H13 e aço AISI D2. Os desgastes dos machos foram medidos e plotados em intervalos pré-definidos pela quantidade de roscas produzidas. O

segundo e a terceiro filete sofreram maior desgaste e, portanto, foram selecionados para representar o desgaste da superfície de folga conforme a Figura 2.12.

Figura 2.12 - Área investigada e fotos das superfícies de folga do macho novo (a/b), 2º filete (a2/b2) e 3º filete (a3/b3) em aço AISI D2 e H13



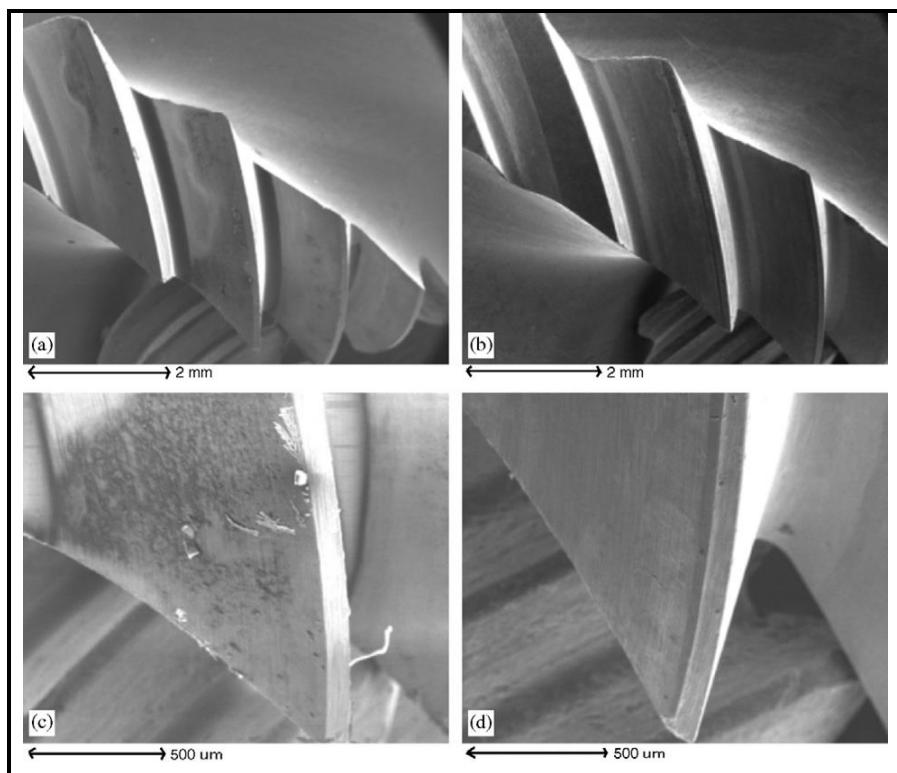
Fonte: Adaptado de COELHO *et al.* (2006)

Todas as ferramentas tiveram suas superfícies desgastadas fotografadas após serem utilizadas na velocidade de corte recomendada pelo fabricante, ou seja, 3 m/min para aço AISI D2 e 8 m/min para aço AISI H13. Nestas velocidades e sob condições abundantes de óleo integral os machos apresentaram o melhor desempenho e qualidade das roscas produzidas, sendo que o desgaste de flanco médio plotado para as ferramentas utilizadas no rosqueamento do aço AISI D2 e H13, foi cerca de 0,6 e 0,1 mm, respectivamente.

Veldhuis *et al.* (2007) examinaram a aplicação de filmes lubrificantes ultrafinos contendo flúor para reduzir a interação adesiva ferramenta-peça na operação de

rosqueamento. Os filmes de perfluoropolíéter (PFPE) foram aplicados na superfície de machos de aço rápido. Os efeitos do desgaste sobre machos com e sem filmes PFPE durante o processo de rosqueamento é apresentado na Figura 2.13. Foram empregadas ferramentas com canal helicoidal e foram utilizadas no rosqueamento do aço AISI P20, com velocidade de corte de 8 m/min (260 rpm). O desgaste foi plotado a cada cinco roscas produzidas. Os testes utilizaram óleo de corte integral próprio para rosqueamento sob condição abundante.

Figura 2.13 - Imagens do macho sem PFPE (a) após 194 roscas e com PFPE (b) após 380 roscas, (c) detalhe da imagem “a” e (d) detalhe da imagem “b”



Fonte: Adaptado de VELDHUIS *et al.* (2007)

Os machos sem PFPE apresentaram desgaste máximo de 0,2 mm contra 0,1 mm para machos com PFPE, após ambas as condições atingirem o número de 200 roscas produzidas.

De fato, como pode-se constatar nestes artigos pesquisados, não existe na literatura científica um parâmetro que seja comumente aceito e utilizado para se medir de maneira direta os desgastes que ocorrem nas ferramentas de roscar.

Neste sentido, os critérios para avaliação direta do desgaste das superfícies de flanco ou saída dos machos podem ser totalmente diferentes para diversos pesquisadores.

2.7.3 Desempenho em relação à qualidade das roscas produzidas

Tsao e Kuo (2012), a fim de determinar a qualidade da rosca para o processo de rosqueamento interno, investigaram o desempenho de machos de aço rápido com diferentes tipos de revestimento durante o processo de rosqueamento por vibração. Os resultados mostraram que este processo pode melhorar substancialmente a qualidade da rosca usinada e, das condições ensaiadas, os machos revestidos com TiAlN produziram os melhores padrões de qualidade da rosca em comparação aos outros revestimentos utilizados (TiN, TiAlN + WC/C).

Pode-se verificar que muitos trabalhos utilizaram-se do consagrado método de inspeção por meio do calibrador de rosca passa-não-passa para avaliar a qualidade da rosca, seguido ou não por MEV para análise de imagens (COELHO *et al.*, 2006; DEL VAL *et al.*, 2013; YIN; HAN, 2006).

Os autores Coelho *et al.* (2006) investigaram alguns aspectos de desempenho, entre eles a qualidade dos orifícios roscados e o desgaste de machos de metal duro utilizados no rosqueamento de aços endurecidos AISI D12 e H13. Os autores relataram que foi possível produzir roscas no aço AISI D2 (58-60 HRC), embora o número de rosas de boa qualidade tenha sido essencialmente baixo. Enquanto no aço AISI H13 (50-52 HRC), utilizando velocidade de corte de 8 m/min, alcançou incríveis 97 rosas usinadas sem atingir o limite de desgaste da ferramenta, porém o teste teve que ser interrompido porque o material do corpo de prova utilizado chegou ao fim.

Recentemente, pesquisas tem abordado novos métodos de diagnóstico e sistemas para avaliar a qualidade das rosas usinadas. Del Val *et al.* (2013) pesquisaram um processo de rosqueamento com objetivo de monitorar e classificar desempenho de ferramentas de roscar com base em informações prévias, contidas em um banco de dados, sobre a qualidade correspondente do perfil roscado. O sistema pode ser aplicado a diferentes tipos de rosas e materiais com diferentes

diâmetros, velocidades de corte e geometrias roscadas, minimizando, assim, a árdua tarefa de controle realizada normalmente pelo operador ou inspetores da produção.

Os autores afirmam que foi possível assegurar com 95% de confiança a qualidade das rosca produzidas dentro das especificações desejadas. Os resultados não apresentaram qualquer falso negativo, ou seja, a não detecção de rosca verdadeiramente inaceitáveis, mas dá uma média de 10% de falsos positivos (indicação de uma rosca inaceitável, quando na verdade ela está aceitável).

De certa forma, isso acaba aumentando os custos com aquisição de novas ferramentas. Entretanto, eles justificam que os custos poderiam ser assumidos, já que o novo sistema de monitoramento pode proporcionar uma atraente redução nos custos operacionais. Em outra investigação, Del Val *et al.* (2013) desenvolveram um monitoramento online para garantir a qualidade das rosca usinadas com machos de aço rápido utilizados no corte do ferro fundido GGG50 em altas velocidades de corte. Os parâmetros de entrada, obtidos de sinais de corrente da própria máquina, foram identificados e correlacionados por meio de Análise de Componentes Principais (PCA), que é um procedimento matemático baseado na variância generalizada de cada ferramenta, o qual permite a diminuição do número de variáveis originárias. Os resultados desta vez apresentaram uma porcentagem ainda menor de falsos positivos (7%) e zero falso negativos.

O emprego de PCA foi utilizado também por Li *et al.* (2002), cujo propósito foi à detecção de três tipos de falhas no processo de rosqueamento: 1) desgaste do macho, desalinhamento entre eixos do macho e pré-furo e 3) diâmetro de pré-furo fora das tolerâncias geométricas. Os resultados relatados concordaram razoavelmente bem com experimentos. Isso, na época, representou um avanço referente aos trabalhos anteriores, porém, os sensores utilizados envolveram um custo adicional significativo. No mesmo período surgiram diversos modelos mecanicistas para o rosqueamento Armarego (2002), Tengyun *et al.* (2002), porém com baixa confiabilidade devido às dificuldades inerentes deste complexo processo.

Neste mesmo período, Mezentsev *et al.* (2002) propôs um modelo em que falhas resultaram do desalinhamento do macho em relação ao centro do pré-furo. E os autores alegaram que este modelo seria capaz de predizer as dimensões da rosca e o passo do perfil roscado com uma precisão de até 2% dos atuais valores

medidos nas rosas das peças acabadas, o que foi considerado um avanço para a época.

A partir destes dados pode-se verificar que a preocupação com a qualidade das rosas produzidas é frequente e assim, torna-se primordial realizar a avaliação dos orifícios roscados em conjunto com outras abordagens de desempenho no processo de rosqueamento. Entretanto, não foi possível identificar critérios satisfatórios, de forma direta, para se avaliar a qualidade de rosas produzidas, tais como parâmetros de rugosidade. Muito estudos, mantém a análise comparativa ou como citado anteriormente, indiretamente por meio de calibrador passa-não-passa.

2.7.4 Desempenho em relação aos efeitos do fluido de corte no torque

Veldhuis *et al.* (2007) estudaram o efeito que a uma película lubrificante à base de perfluoropolíéster (PFPE) sobre a superfície de machos de aço rápido tinham nas respostas do torque durante o rosqueamento do aço AISI P20 em condições abundante de óleo mineral integral. Foi utilizado uma rotação de 260 rpm e avanço de 1,58 mm/rev. A presença da película (filme) de PFPE na superfície dos machos reduziu ligeiramente o torque de 25 N.m para 21 N.m, em comparação aos machos sem o filme.

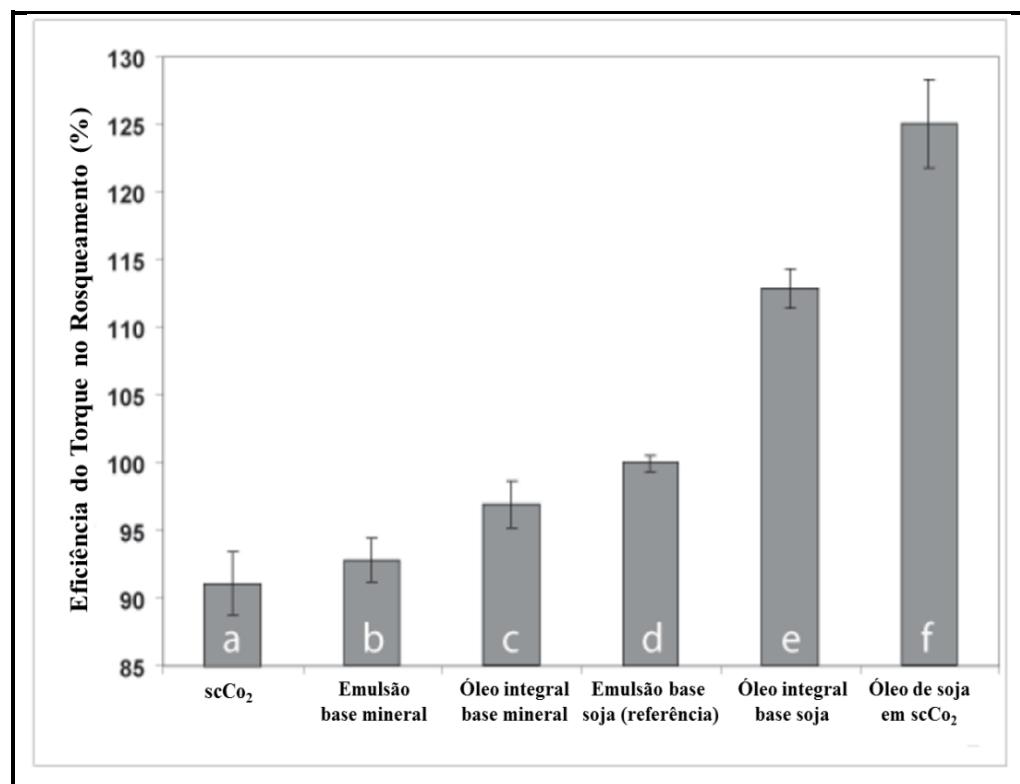
Reiter *et al.* (2006) avaliaram o desempenho do rosqueamento sob emulsão inundada em aço inoxidável 316 usando revestimentos rígidos, incluindo nitreto de cromo (CrN), carbonetos de cromo (CrC), os tradicionais TiCN e TiAlN, comparando-os com revestimentos lubrificantes como DLC e WC/C. Revestimentos DLC e WC/C apresentaram o menor torque médio (5,25 e 5,97 N.m), seguido pelas ferramentas de HSS revestidas com CrC (6,55 N.m), TiCN (6,85 N.m), CrN (7,19 N.m) e TiAlN (7,43 N.m). No entanto, arestas postiças foram observadas durante o rosqueamento com machos DLC, diferentemente dos revestimentos convencionais TiCN ou TiAlN, que aresta postiça não foi significativa.

Pesquisas com o teste de torque no rosqueamento mostraram que o óleo de soja dissolvido em dióxido de carbono supercrítico (scCO₂) realizou melhor desempenho do que o óleo integral de soja (CLARENS *et al.*, 2006). Os testes foram realizados em uma rosqueadeira MicroTap Mega G8 utilizando machos de aço

rápido sem revestimento (M6x1,0), a uma velocidade de corte de 1000 rpm em aço SAE 1018. O comportamento do torque apresentado na Figura 2.14 é calculado pela divisão do torque médio experimental observado para cada fluido pela média do torque de rosqueamento observada para o fluido de referência sob as mesmas condições experimentais (Zimmerman *et al.* 2003b).

Óleo de soja em scCO₂ (f) apresentou o melhor desempenho do que óleos integrais (c)(e) e emulsões (b)(d) utilizando-se de base de óleo mineral e soja. Acredita-se que a rápida expansão do CO₂ leva ao resfriamento em temperaturas criogênicas, e a combinação de pressão alta e baixa tensão superficial fornece acesso aos espaços intersticiais que são inacessíveis aos fluidos de corte convencionais. Além disso, os dados corroboram com o fato bem conhecido que óleos integrais fornecem uma vantagem significativa de lubrificidade em relação às emulsões (CHILDERS, 1994).

Figura 2.14 - Eficiência do Torque no Rosqueamento para Óleos Integrais, emulsões e fluidos de corte à base de scCO₂

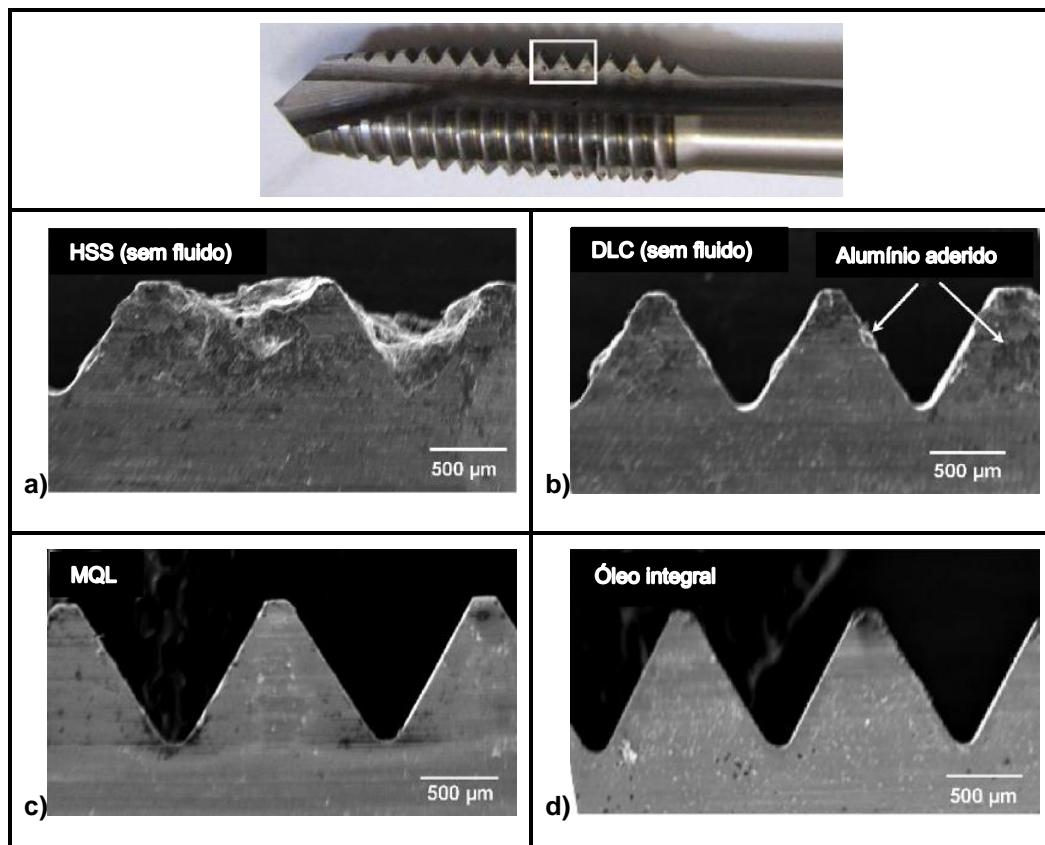


Fonte: Adaptado de CLARENS *et al.* (2006)

Bhowmick *et al.* (2010) investigaram a técnica MQL e o rosqueamento à seco da liga de alumínio 319 como alternativas ao tradicional rosqueamento inundado. No

rosqueamento usando machos de aço rápido revestidos com DLC, o torque médio no avanço aumentou de 0,64 N.m no 1º orifício roscado para apenas 1,01 N.m no orifício 100, o que corresponde a um aumento médio de 56%, comparável favoravelmente ao rosqueamento com machos de HSS não revestidos que obtiveram um aumento de cerca de 300%. A Figura 2.15, mostra imagens realizadas em MEV das superfícies dos machos (M8x1,25) de HSS e DLC usados durante o rosqueamento à seco, e em condições MQL e inundada por óleo integral, a fim de verificar a adesão de alumínio.

Figura 2.15 - Imagens de MEV da adesão de alumínio na superfície de machos HSS (a) e DLC (b) no rosqueamento à seco, (c) MQL e (d) MO com machos HSS



Fonte: Adaptado de BHOWMICK *et al.* (2010)

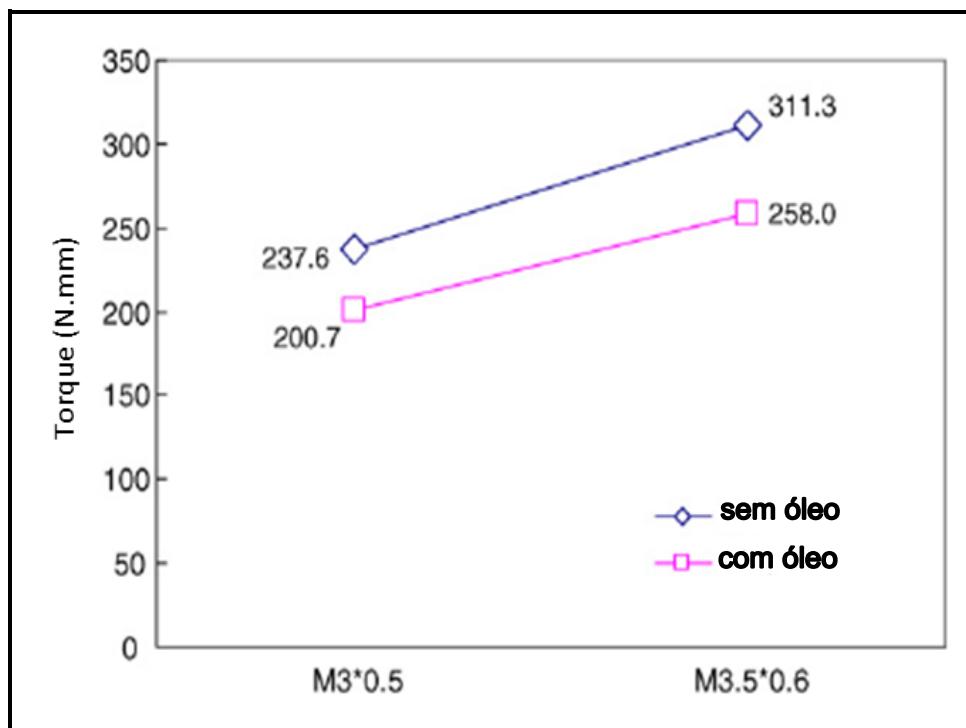
Conforme 2.14(a) demonstra, o material da peça foi transferido para os filetes do macho de HSS durante o rosqueamento a seco, causado por formação da aresta postiça de corte, seguido de arrancamento do material da ferramenta. Adesão de alumínio ocorreu na superfície de machos revestidos com DLC (b), mas em menor medida em comparação com os produzidos pelos machos de HSS durante

rosqueamento à seco (a). Formação da aresta postiça de corte e adesão do alumínio não foi observado no rosqueamento com MQL (c), nem no convencional rosqueamento inundado (d), utilizando-se macho de aço rápido sem revestimento.

Kuo (2007) investigou o efeito da dimensão de machos de aço rápido e o papel desempenhado pelo óleo de corte no processo de rosqueamento induzido por vibração-assistida.

A Figura 2.16 apresenta os estágios definidos pelos torque máximo identificado para cada ferramentas nas condições à seco e com óleo integral de base mineral.

Figura 2.16 - Efeito das condições lubri-refrigerante e da dimensão do macho de roscar no torque



Fonte: Adaptado de KUO (2007).

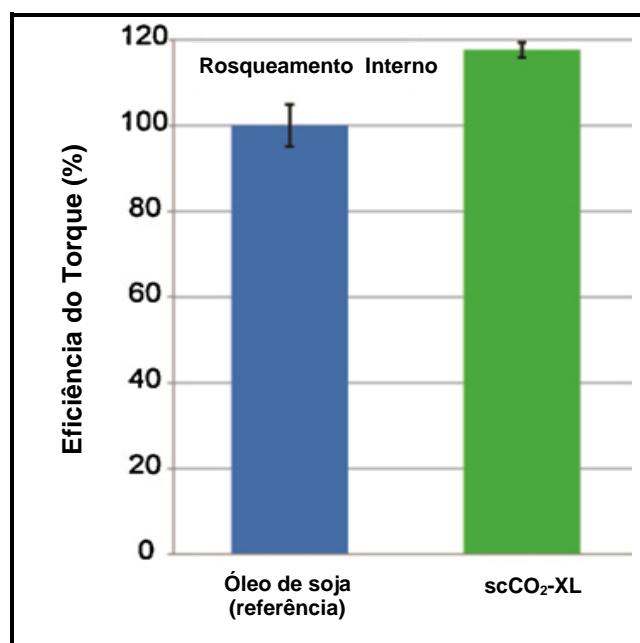
A Introdução de fluido de corte durante o processo de rosqueamento interno resultou numa redução do torque de aproximadamente 16% e sua influencia foi benéfica, pois o grau de redução foi menor do que o rosqueamento realizado à seco. Os autores perceberam que quanto menor o tamanho do macho, maior pode ser o grau de redução em relação ao torque de rosqueamento.

Supekar *et al.* (2012) também realizaram experimentos no rosqueamento interno por corte e conformação com scCO₂ e outros fluidos de corte para avaliar

seu desempenho comparativo em relação ao desgaste da ferramenta e ao torque. No rosqueamento interno a melhor fase do agente foi quando scCO₂ é dissolvido em lubrificante (scCO₂-XL).

A Figura 2.17 mostra o desempenho de scCO₂-XL na operação de rosqueamento expressadas pela eficiência do torque em comparação ao fluido de corte de referência.

Figura 2.17 - Efeito das condições lubri-refrigerante e da dimensão do macho de roscar no torque



Fonte: Adaptado de SUPERKAR *et al.* (2012).

O scCO₂-XL apresentou uma eficiência do torque no rosqueamento de 117% quando comparado com óleo integral de soja, como o fluido de referência em corte de roscas. Com base nestas investigações e conforme identificado nos artigos publicados, no período de 2000 e 2013, a avaliação comparativa de desempenho de fluidos de corte por meio de testes de rosqueamento é um procedimento experimental comumente encontrado na literatura e padronizado por norma específica. Porém, nota-se uma tendência as preocupações com diminuição da utilização de fluidos de corte nos estudos sobre o processo de rosqueamento.

2.7.5 Quanto aos efeitos de fluidos de corte na temperatura de usinagem

Ensaios para definir valores de temperatura e fluxo de calor em processo de rosqueamento foram realizados utilizando-se diferentes metodologias, dentre as quais, uma técnica simples é o uso de termopares que com o apoio de modelos matemáticos analíticos permitem bons resultados (KOMANDURI; HOU, 2000).

Para esclarecer a questão referente a influência do revestimento DLC na redução do atrito e na temperatura de corte desenvolvida durante a produção de rosca, Klocke *et al.* (2013) realizaram medições de temperatura na liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando-se de termopares. Eles forneceram a evolução da temperatura na peça, registrada por três termopares quando realizado experimentos com machos revestidos com TiCN em comparação com machos revestidos com DLC, a velocidade de corte de 4 m/min.

Os resultados de medição mostraram que as temperaturas mais elevadas se desenvolveram com o macho revestido de TiCN, quando ele retorna do furo roscado, com picos acima de 75°C. Este resultado demonstrou claramente o elevado nível de atrito que ocorre entre os flancos do macho e o corte de rosca durante à retirada da ferramenta do orifício. No caso da ferramenta revestida com DLC, em contraste, as temperaturas no retorno do macho são inferiores às temperaturas de corte, ou seja, no avanço da ferramenta, cerca de 50°C.

Além do mais, os sistemas de aplicação de fluidos de corte também podem afetar significativamente a temperatura na zona de corte, removendo calor gerado pelo atrito ou desgaste da ferramenta (BRANDAO; COELHO, 2009).

Rosqueamento com MQL pode reduzir não só os custos associados à eliminação dos resíduos de óleos, mas também o consumo de energia relacionado com sistemas de fluido de corte, embora MQL possa mostrar algumas dificuldades em lubrificar a ferramenta de roscar e a peça, levando os cavacos para longe da zona de corte (BELLUCO; DE CHIFFRE, 2001).

Experimentos realizados por Branda *et al.* (2010) estudaram a temperatura do aço AISI H13 (50 ± 2 HRC) durante a operação de rosqueamento utilizando dois sistemas diferentes para aplicação do fluido de corte de base mineral (MQL e inundado), comparados na mesma operação com condições de teste a seco.

Um modelo de fluxo de calor (Q) teórico foi utilizado para avaliar a energia do calor durante os testes e três termopares foram implantados na peça para medir a temperatura em distâncias próximas do maior diâmetro da rosca.

Os resultados demonstraram uma diminuição dos valores encontrados para “Q” do teste a seco (25 J) para o teste em condições inundado (15 J), e pode-se considerar que o sistema MQL a 20 mL/h apresentou valores intermediários, embora mais para o teste a seco (25 J). Assim, pode-se demonstrar que o sistema MQL não apresenta resultados satisfatórios para condições específicas de rosqueamento em alguns aços endurecidos. Corroborando com Heisel *et al.* (1998), que alegam que MQL nem sempre é eficaz para determinadas operações, principalmente aquelas em que o corte do material da peça é de difícil usinagem, sendo notável a presença de altos valores nas medições das forças de corte.

Em outro estudo, Bhowmick *et al.* (2010) mediram a temperatura do alumínio 319 durante o rosqueamento das primeiras 50 roscas. As medições foram realizadas com um medidor de temperatura infravermelho a três milímetros dos furos a serem roscados. O uso de termômetros infravermelho é uma técnica prática e eficaz para medição de temperatura em movimento, ou para condições de difícil acesso (SULLIVAN; O'COTTERELL, 2001).

Coincidemente, os autores relataram que a temperatura não ultrapassou 48°C durante o rosqueamento inundado, o que sugere que a decomposição do óleo recomendado para a operação de rosqueamento é improvável.

No entanto, durante o rosqueamento por MQL à base de ácido graxos (FA-MQL) a temperatura gerada foi de 55°C e pior para condições com MQL à base de óleo mineral (MO-MQL), o qual a temperatura excedeu 120°C , atingindo uma temperatura próxima à de decomposição do óleo recomendado para rosqueamento (BHOWMICK; LUKITSCH; ALPAS, 2010).

Com base nestes estudos, é notória a superioridade dos óleos com maior poder lubrificante no processo de rosqueamento interno ou sistemas de fluidos baseados em condições inundadas, os quais são utilizados principalmente para afastar e reduzir o calor gerado na interface ferramenta-peça.

Desta forma, a técnica MQL e condições inundadas por emulsão ou óleos integrais são as mais utilizadas atualmente. Entretanto, a tendência é que novas tecnologias e formas de lubrificação tornem a usinagem mais consciente e sustentável. Isso só poderá ser possível quando este novo meio for comparado aos atuais meios lubri-refrigerantes, nas mesmas condições de usinagem, e não acarretar em prejuízos significativos na qualidade final do produto, na vida da ferramenta e nas condições econômicas de fabricação.

2.8 Teoria estatística

Neste tópico, são abordadas as ferramentas estatística utilizadas neste trabalho: o teste de hipóteses e a comparação entre dois tratamentos, neste caso, são compreendidas pela condição 1 os machos sem condicionador metálico e condição 2 os machos com condicionador metálico.

2.8.1 Testes de hipóteses

Segundo Button (2010), uma hipótese científica é qualquer afirmação que possa ser refutada. Dessa forma, qualquer pessoa que duvide, ou queira comprová-la, pode montar um experimento e averiguar sua veracidade.

Uma determinada hipótese é considerada como verdadeira, se, em sua avaliação, não forem encontrados indícios que a rejeitem, permanecendo assim até que se prove o contrário. Para que uma hipótese científica seja testada, ela deve ser convertida em uma hipótese estatística, que nada mais é que inferir hipóteses sobre um parâmetro populacional (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Um teste de hipótese fundamenta-se em um conjunto de regras que permite, a partir dos resultados experimentais (amostrais), rejeitar ou não tal hipótese, associando a esta decisão um determinado nível de confiança (NETO *et al.*, 1995).

Ao testar hipóteses, inicia-se por criar uma hipótese experimental a respeito de um parâmetro da população. Essa hipótese experimental, a respeito de um parâmetro, é chamada de hipótese nula, denotada por H_0 .

Define-se, então, outra hipótese, denominada de hipótese alternativa, a qual é o oposto do que é formulado na hipótese nula. A hipótese alternativa é denotada por H_1 . O procedimento de teste de hipóteses usa dados de uma amostra para testar as duas afirmações divergentes, indicadas por H_0 e H_1 (ALLEN, 2006).

2.8.2 Comparação de dois tratamentos

Na comparação de dois tratamentos com amostra grandes ($n > 30$), deve-se ter as seguintes suposições (ALLEN, 2006):

- i. Seja x_1, x_2, \dots, x_{n+1} uma amostra aleatória de tamanho n_1 da população 1 com média populacional μ_1 e desvio-padrão populacional σ_1 ;
- ii. Seja y_1, y_2, \dots, y_{n+1} uma amostra aleatória de tamanho n_2 da população 2 com média populacional μ_2 e desvio-padrão populacional σ_2 ;
- iii. As amostras são independentes. Em outras palavras, as medidas dos dois tratamentos, não são relacionados entre si.

Na comparação de dois tratamentos utiliza-se o teste de hipótese supracitado, pode-se avançar para as seguintes observações (ALLEN, 2006):

- i. Identificar a hipótese de nulidade (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) em termos de parâmetros populacionais;
- ii. Escolher o teste estatístico;
- iii. Estabelecendo um nível de significância “ α ”, determinar a região de rejeição;
- iv. Calcular o valor observado do teste estatístico a partir dos dados da amostra.

O teste estatístico utilizado para determinar a diferença entre dois tratamentos deve seguir uma distribuição aproximadamente normal, definido pelo teorema do limite central para amostras grandes ($n > 30$). No entanto, para comparação de dois tratamentos com amostras pequenas (n_1 e n_2), além de considerar as observações anteriores, devem-se também admitir as seguintes suposições adicionais:

- i. Ambas populações são normais;
- ii. Os desvios padrões das populações 1 e 2 são iguais, isto é, $\sigma_1 = \sigma_2$;
- iii. x_1, x_2, \dots, x_{n+1} é uma amostra aleatória de distribuição N (μ_1, σ^2);
- iv. y_1, y_2, \dots, y_{n+1} é uma amostra aleatória de distribuição N (μ_2, σ^2);
- v. x_1, x_2, \dots, x_{n+1} e y_1, y_2, \dots, y_{n+1} , são duas amostras independentes.

Depois de confirmadas as suposições mencionadas anteriormente, utiliza-se o teste estatístico “t” de *student* para amostras pequenas, com “ $n_1 + n_2 - 2$ ” graus de liberdade, definido pela Equação 2.1 a seguir:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \text{ onde } s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2.1)$$

Depois de calcular o valor de “t”, estipula-se um nível “ α ” de significância para verificar se rejeita ou não a hipótese nula, por meio de testes bilateral ou unilateral apresentados a seguir (ALLEN, 2006).

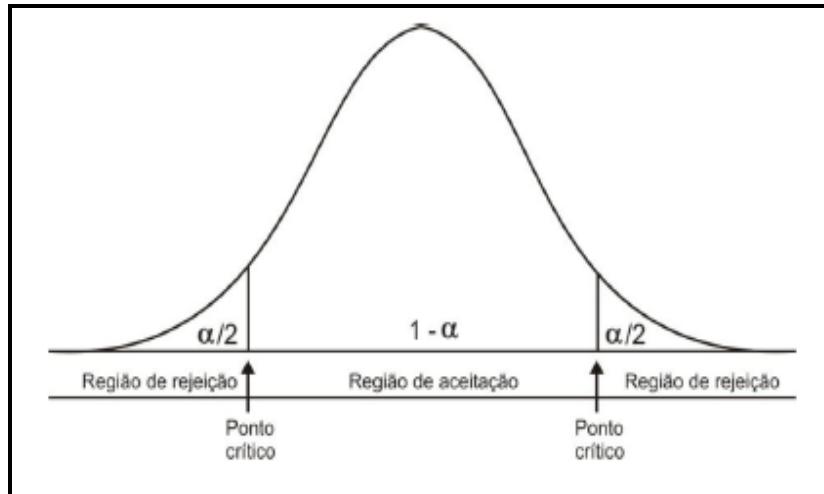
Teste bilateral - apresenta duas regiões de rejeição da hipótese nula (H_0), situadas nos extremos da distribuição amostral, é utilizado para testar hipótese do tipo:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

A Figura 2.18 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância “ α ” em um teste bilateral.

Figura 2.18 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste bilateral



Fonte: Elaborado pelo autor

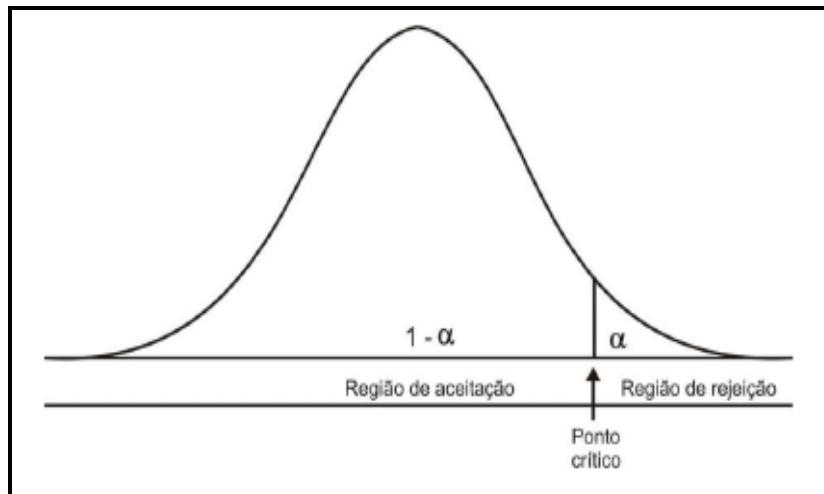
Teste unilateral à direita – apresenta uma única região de rejeição da hipótese nula H_0 , sendo utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$$

A Figura 2.19 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância “ α ” em um teste unilateral à direita.

Figura 2.19 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste unilateral à direita



Fonte: Elaborado pelo autor

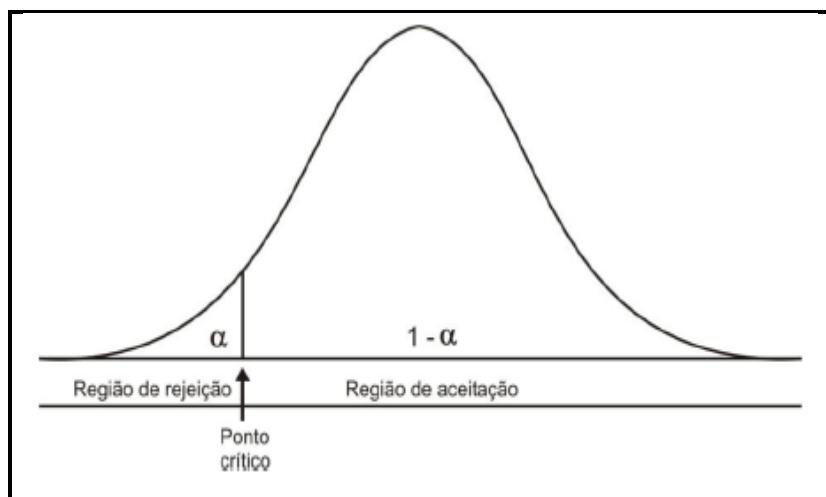
Teste unilateral à esquerda – apresenta uma região de rejeição da hipótese nula H_0 , situada no extremo inferior da distribuição amostral, é utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$$

A Figura 2.20 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância “ α ” em um teste unilateral à esquerda.

Figura 2.20 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste unilateral à esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor

O motivo de se utilizar a estatística neste trabalho é poder contar com dados consistentes e confiáveis para se definir intervalos de confiança que, com um nível de confiança estabelecido *a priori*, contém a média populacional μ . Neste contexto as técnicas experimentais constituem em alternativas importantes para se definir um número mínimo de ensaios a ser realizado. A probabilidade de erro pode ser maior ou menor conforme a eficiência do processo ou método adotado e, que depende de variáveis como, o tipo de máquina-ferramenta, os materiais utilizados, ferramentas, operadores, etc. Nesta pesquisa trabalhou-se com amostras pequenas, portanto será utilizado o teste “t” de *student* bilateral conforme apresentado anteriormente na Figura 2.17.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os equipamentos, os instrumentos e os materiais utilizados, assim como os procedimentos adotados ao longo do trabalho.

3.1 Equipamentos

Neste item, são explicitados, além da máquina-ferramenta, os instrumentos utilizados para verificação e medição das variáveis de desempenho estudadas neste trabalho.

3.1.1 Máquina-ferramenta

Todos os ensaios de rosqueamento foram realizados em uma rosqueadeira articulada pertencente à uma empresa de médio porte do segmento metalmecânico. A escolha da empresa foi motivada pelo emprego do processo de rosqueamento interno, acessibilidade e decisão dos gestores em colaborar e apoiar este trabalho desde o início. A máquina-ferramenta é uma ROSCAMAT® da série 200, equipada com cabeçote vertical e porta macho de troca rápida com sistema catraca. O motor principal é pneumático e tem rotação máxima de 350 rpm.

3.1.2 Calibrador de rosca

Durante os ensaios foi utilizado um calibrador tampão de rosca M8x1,25-6H, da marca GTC, código CRT-23, devidamente calibrado pela Norma DIN 13. Este calibrador foi considerado aprovado para o uso conforme análise do setor metrológico da empresa.

3.1.3 Microscópio eletrônico de varredura

Neste trabalho, utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com objetivo de analisar as superfícies dos machos testados e das roscas produzidas, nas diferentes condições ensaiadas, com o intuito de medir os níveis de desgaste, bem como as características das superfícies roscadas. As análises foram feitas no equipamento Nova NanoSEM 400 da FEI Company, localizado no Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LSI-EPUSP).

3.1.4 Espectrometria por energia dispersiva

A microanálise por Energia Dispersiva (EDS) é um importante instrumento para análise química de materiais orgânicos e inorgânicos, o qual se utiliza de feixes eletrônicos para identificação do raio-x emitido pela amostra. Por meio dessa técnica não destrutiva, pode-se determinar a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro e quantidades de até 1 a 2% dos elementos presentes na amostra. Para análise de EDS foi utilizado um MEV-FEG de alta resolução, modelo FEI *Inspect F50*. Este equipamento pertence ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMT-EPUSP).

A principal finalidade desta análise é a obtenção dos fenômenos causadores do desgaste nos machos utilizados nas diferentes condições testadas, ou seja, em ferramenta com e sem o tratamento do condicionador metálico.

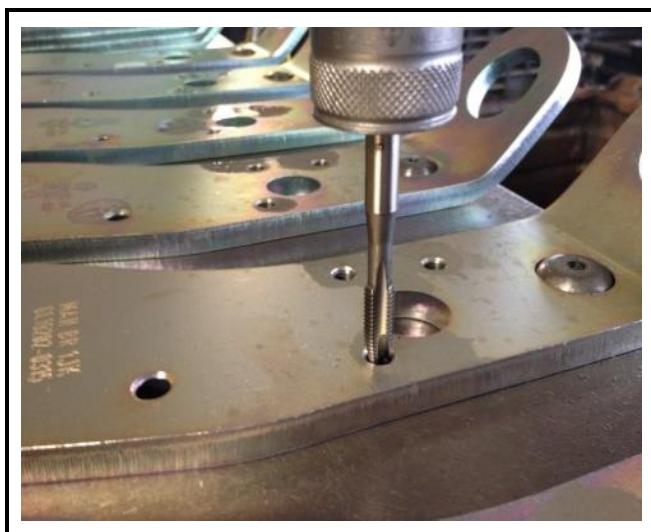
3.2 Materiais

Este tópico contém informações a respeito dos corpos de provas utilizados nos ensaios, das ferramentas e do fluido de corte empregado no processo de rosqueamento.

3.2.1 Corpos de prova

A realização dos experimentos de rosqueamento teve como corpo de prova uma peça da linha de produção disponibilizada pela empresa. O material da peça é o aço de alta resistência e baixa liga (LNE 380). Este material é muito empregado em peças estruturais de motores de caminhões e ônibus. Conforme a Figura 3.5, a peça conta com três rosas M8x1,25 com o mesmo comprimento de perfil roscado, definido pela espessura da chapa que é de 10 mm.

Figura 3.1 - Peça da linha de produção utilizada como corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3.1 apresenta a composição química do material utilizado nos ensaios, os valores foram extraídos do certificado de matéria-prima do fornecedor, conforme informado pela empresa. A dureza do material é de 90 ± 2 HRB.

Tabela 3.1 - Composição química do aço LNE 380 de acordo com o certificado de matéria-prima

Composição Química (%) – ABNT NBR 6656:2008									
Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Alumínio (Al)	Nióbio (Nb)	Vanádio (V)	Titânio (Ti)	
0,091	1,000	0,019	0,020	0,007	0,028	0,035	0,001	0,001	

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Machos para roscar

Os machos de aço rápido, com ponta helicoidal, três canais retos, comercializados como M8x1,25-6H e fabricados pela OSG, é a ferramenta empregada para avaliação de desempenho neste trabalho. Essa ferramenta já é utilizada pela empresa e foi mantida pela facilidade em adquirir as mesmas junto ao mesmo fabricante. O referido macho possui um passo de 1,25 mm, ângulo de ponta de 90º e ângulo de rosca de 60º (métrica).

3.2.3 Condições de usinagem

Assim como na maioria dos processos de rosqueamento interno em baixas velocidades de corte, foi empregado durante os ensaios óleo integral (MAX-TAP 10), fabricado pela OSG, o qual foi aplicado por imersão na ferramenta antes de cada rosca, sendo este um procedimento padrão adotado pela empresa.

3.3 Método

O procedimento metodológico utilizado é o experimental, pois se tem uma variável a ser controlada (ferramenta com ou sem tratamento do condicionador metálico) e também é especificada a forma de controle (vida da ferramenta), por meio do número de roscas produzidas (MONTGOMERY, 2012).

Todos os ensaios experimentais foram realizados em chão de fábrica, empregando-se peça, máquina e demais condições em uso pela empresa.

Para a realização dos ensaios foram utilizados os procedimentos a seguir:

- a velocidade de corte utilizada foi de 9 m/min (350 rpm);
- foram utilizados doze machos provenientes do mesmo lote, sendo seis para a condição 1 (machos sem condicionador metálico) e seis para a condição 2 (machos com condicionador metálico);
- por meio de um gerenciador de números aleatórios *online*, os machos foram enumerados, alternando-os na formação dos grupos das condições 1 e 2, sendo o primeiro número sorteado, pertencente ao macho da condição 1, o seguinte ao macho da condição 2 e assim sucessivamente;
- um teste foi considerado encerrado quando a verificação da rosca produzida pelo macho estava fora da tolerância, ou seja, reprovada pelo calibrador passa-não-passa, ou ainda, na ocorrência de uma falha catastrófica da ferramenta, tais como quebra ou lascamento.

O procedimento para tratamento do condicionador metálico na condição 2 consistiu nas seguintes etapas:

- limpeza da superfície do macho com acetona até eliminar óleo protetivo utilizado pelo fabricante;
- aplicação do produto por meio de imersão da ferramenta no condicionador;
- secagem do lubrificante aderido a superfície do macho em estufa com temperatura controlada (80 ± 2 °C por 30 min.); e
- resfriamento das ferramentas em temperatura ambiente.

O tratamento realizado nos machos é praticamente imperceptível sob o aspecto visual quando comparado aos não tratados. Desta forma, a manufatura das rosas foi feita escolhendo-se aleatoriamente o macho a ser empregado, ou seja, sem especificar ao operador qual era a condição do mesmo. Ao atingir o critério de fim de vida da ferramenta, anotava-se o número de rosas produzidas em planilha específica, sendo este um procedimento padrão adotado pela empresa.

A Tabela 3.2 apresenta o resumo das condições utilizadas durante os ensaios, como foi mencionado anteriormente, as condições empregadas pela empresa foram mantidas, alterando somente a condição de aplicação ou não do condicionador metálico nos machos.

Tabela 3.2 - Resumo das condições utilizadas nos ensaios de rosqueamento

Condição	Condicionador Metálico	Macho	Substrato	Velocidade de Corte (Vc)	Lubrificação
1	Não	M8x1,25-6H	HSS	9 m/min	Oléo integral para rosqueamento (externo)
2					

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Análise estatística dos dados coletados

Inicialmente, pré-testes foram realizados para se definir qual o número mínimo de ensaios a serem realizados para cada uma das condições da ferramenta. Nesta fase foi utilizado seis machos, sendo três para cada condição.

Adotou-se como adequado para este processo de rosqueamento interno um erro amostral de 10% em torno da média de roscas produzidas (vida da ferramenta), assim, pode-se determinar que um total de seis ensaios para cada condição da ferramenta foi necessário para se obter um intervalo de confiança desejado, detalhes podem ser visto em (DE OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Todos os testes e pré-testes utilizaram-se da Equação 3.1, baseado em Chwif e Medina (2014), para análise estatística das condições ensaiadas.

$$n^* = \left\lceil n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (3.1)$$

Sendo que:

- n = número de amostras;
- n^* = número de réplicas;
- h = precisão da amostra e;
- h^* = precisão desejada (erro amostral).

Os dados coletados foram devidamente tratados e analisados pelo software estatístico Minitab® versão 17.1.0, no qual, primeiramente, verificou-se a normalidade das amostras obtidas nas condições 1 e 2. Na sequência, realizou-se o teste F para se determinar a equivalência das variâncias das amostras e, por fim, o teste t para verificar a influência do condicionador metálico no desempenho em relação à vida útil da ferramenta, medido por meio da quantidade de rosas produzidas. Esta sequência torna-se adequada, pois o teste F é utilizado somente para comparar as variâncias de duas amostras, permitindo verificar se elas realmente são ou não equivalentes, isto, por sua vez, ajuda na escolha adequada do teste t a ser utilizado (MONTGOMERY, 2012).

3.3.2 Análise das condições econômicas

Na análise das condições econômicas de usinagem considerou-se o aumento médio da vida útil do macho, comparando-se a média de rosas produzidas pelas condições 1 e 2. Também por comparação, buscou-se estimar a redução dos custos envolvidos no processo após a realização dos ensaios.

O custo da mão-de-obra e da máquina-ferramenta não foi somado ao custo de produção por que ambos são comuns às condições de ensaios, sendo que, desta forma não torna-se relevante para uma análise comparativa das condições econômicas envolvidas neste processo.

Assim, a determinação do custo total do macho na condição 1 foi definida somente pelo preço de mercado da ferramenta, que é de R\$ 70,00. E para a condição 2, um acréscimo monetário foi adotado, baseado na sequência a seguir, conforme realizado em (ALVES, 2014):

- o condicionador metálico é comercializado em embalagem de 200 mL, com custo de aproximadamente R\$ 100,00;
- os 200 mL foram despejados em um béquer, pode ser verificado em uma balança de precisão uma massa de 185,0 g;
- o valor do grama de condicionador metálico é de R\$ 0,54, obtido pela razão do preço pela massa, sendo que ambos tem a mesma quantidade de condicionador metálico (200 mL);
- ao utilizar o mesmo béquer para o banho das ferramentas, pode-se verificar que a quantidade média de condicionador utilizado por macho, que foi de 3,2 g (aproximadamente 3,5 mL);
- ao considerar todo o processo realizado no tratamento dos machos utilizados na condição 2, foi possível chegar a um acréscimo monetário no valor de R\$ 2,00 no preço de aquisição considerado na condição 1;
- o valor total das ferramentas pertencentes a condição 2, pode então ser determinado e, é considerada neste trabalho com preço de R\$ 72,00.

3.3.3 Medição do nível de desgaste dos machos na superfície de folga

Os valores de desgaste da superfície de folga das ferramentas foram realizados em uma média de três medições ao longo do mesmo filete. Dentre os cinco filetes da região chanfrada dos machos, o segundo, terceiro e quarto filete sofreram o maior nível de desgaste e, portanto, foram escolhidos para representar o desgaste da superfície de folga das ferramentas testadas nas condições 1 e 2.

3.3.4 Avaliação da qualidade das roscas produzidas

Foram selecionadas algumas peças roscadas, sendo sempre a última peça, tanto para a condição 1 quanto para a condição 2. A escolha da última peça foi devido aos custos associados para se produzir mais peças que a demanda, além

disso, a facilidade do operador disponibilizar a última peça considerada aprovada pelo critério estabelecido de fim de vida da ferramenta.

As peças passaram por uma avaliação da qualidade superficial utilizando-se de imagens obtidas no MEV. A preparação dos corpos de prova foi feita inicialmente em uma serra de corte para retirada da parte que contém as três rosca M8x1,25 e posteriormente em um policorte com disco diamantado de 1mm de espessura para separação das laterais das rosca. Tal avaliação visou comparar a influência que a deterioração dos machos sem e com condicionador metálico exercearam sobre a qualidade das rosca.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são explicitados os resultados provenientes dos ensaios de rosqueamento. São abordados os seguintes itens: análise estatística do número de roscas produzidas, efeito do condicionador metálico na vida do macho, análise das condições econômicas de usinagem, desgaste de flanco apresentado nos machos e qualidade das roscas produzidas.

Após a realização dos ensaios foram obtidas a quantidade de roscas produzidas para ambas as condições. Conforme apresentado na Tabela 4.1, a resposta é representada por meio da vida útil de cada ferramenta testada, a qual é medida por meio do número de roscas produzidas até atingir o critério de vida.

Tabela 4.1 - Número de roscas produzidas por macho para cada condição

Ensaio nº	Macho nº	Condição	Vida (Nº. de Roscas)	Critério de fim de vida
1	05	1	5604	Quebra do macho
2	01	2	6408	Reprovado no calibrador P/NP
3	07	1	5034	Reprovado no calibrador P/NP
4	08	1	6183	Reprovado no calibrador P/NP
5	03	2	7008	Reprovado no calibrador P/NP
6	11	2	7197	Reprovado no calibrador P/NP
7	06	1	5538	Reprovado no calibrador P/NP
8	09	2	8181	Reprovado no calibrador P/NP
9	10	1	5418	Quebra do macho
10	04	2	7449	Quebra do macho
11	12	2	8952	Reprovado no calibrador P/NP
12	02	1	4575	Quebra do macho

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Análise estatística do número de roscas produzidas

Nesta etapa o nível de confiança adequado foi obtido por meio do planejamento de experimentos baseado em metodologia estatística, que é a única forma objetiva de avaliar os erros experimentais que afetam diretamente os resultados obtidos (MONTGOMERY, 2012).

4.4.1 Resultados das ferramentas na condição 1

A Tabela 4.2 apresenta as roscas produzidas pelos machos na condição 1, ou seja, sem condicionador metálico.

Tabela 4.2 - Vida dos machos testados na condição 1

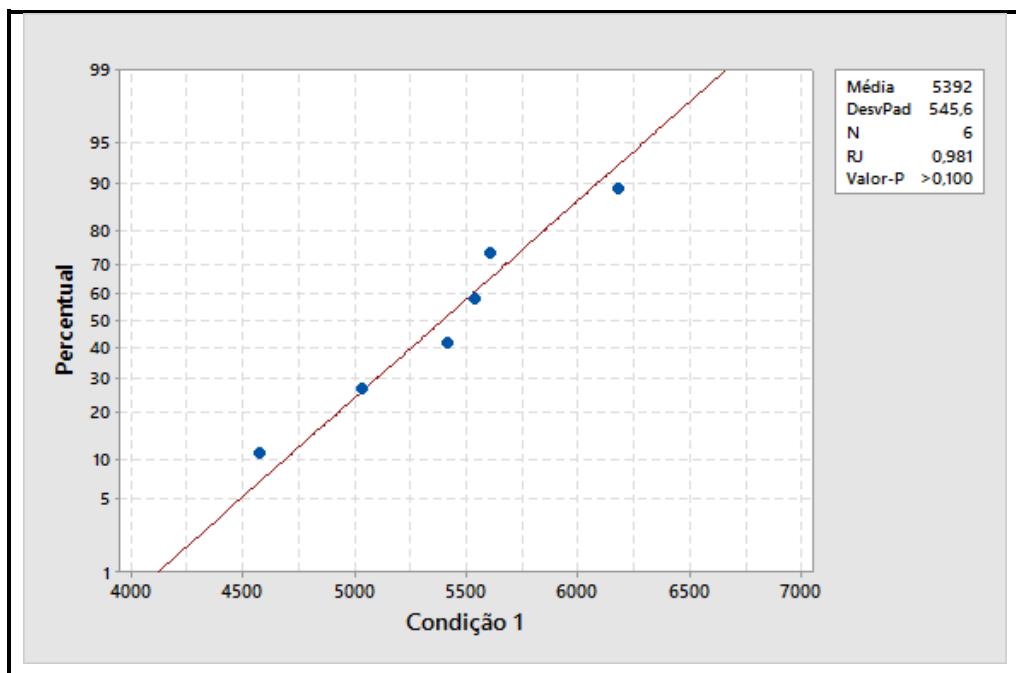
Macho nº	Vida (Nº. de Roscas)	Média	Desvio	Critério de fim de Vida
05	5604			Quebra do macho
07	5034			Reprovado no calibrador P/NP
08	6183	5392	545,6	Reprovado no calibrador P/NP
06	5538			Reprovado no calibrador P/NP
10	5418			Quebra do macho
02	4575			Quebra do macho

Fonte: Elaborado pelo autor

Antes de seguir para análise estatística referente ao desempenho da vida útil da ferramenta, buscou-se verificar se os dados obtidos na condição 1 seguem uma distribuição normal. Para tanto, utilizou-se do teste de normalidade *Ryan-Joiner* (RJ), que similar ao *Shapiro-Wilk* é mais adequado para amostras pequenas ($n < 30$). O tratamento dos dados foi realizado no software estatístico Minitab® versão 17.0.1.

Pode-se verificar na Figura 4.1 que além da alta estatística RJ, os pontos encontrados se aproximam da reta, o que pode caracterizar mais uma evidência para normalidade dos dados coletados para os machos da condição 1. Ademais, o teste apresentou um *p*-valor maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), o que indica mais uma tendência dos dados desta amostra seguir uma distribuição normal.

Figura 4.1 - Normalidade dos dados obtidos na condição 1



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos dados contidos na Tabela 4.2, assim como a média e o desvio padrão apresentados na Figura 4.1, pode-se analisar o desempenho das ferramentas referentes à condição 1.

As Tabelas 4.3 e 4.4 a seguir, apresentam respectivamente o intervalo de confiança para a média e o número mínimo de ensaios necessários na condição 1 para determinados níveis de significância.

Foi considerado um erro amostral em torno de 10% ao redor da média de roscas produzidas para a referida condição. Isso é equivalente a 539 roscas, foi considerada adequada esta margem de erro, já que este valor indica o grau de concordância entre os diversos resultados experimentais obtidos sob condições de repetitividade, e este não é muito o caso da operação de rosqueamento, que normalmente, possui uma alta dispersão (variabilidade) dos dados obtidos em testes experimentais (DEL VAL *et al.*, 2013).

Uma alternativa para a aplicação de análise estatística de pequenas amostras ($n < 30$) que seguem uma distribuição normal é por meio da distribuição de t de *student*. Desta forma, um intervalo de confiança $100(1-\alpha)\%$ para a média de uma amostra proveniente de população normal, utilizando a distribuição t de *student*, é construído por meio da Equação 4.1 (DEVORE, 2011):

$$P(\bar{X} - h \leq \mu \leq \bar{X} + h) = 1 - \alpha, \quad \text{ou} \quad \bar{X} \pm t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.3 - Intervalo de confiança para o número médio de roscas produzidas na condição 1

<i>n</i>	Nível de confiança	α	$t_{n-1,\alpha/2}$	$h = t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$	IC da condição 1 ($X_1 = 5392$)
	99%	0,01	4,03	898	$4494 \leq X_1 \leq 6290$
	95%	0,05	2,57	573	$4819 \leq X_1 \leq 5965$
6	90%	0,10	2,02	449	$4943 \leq X_1 \leq 5841$
	80%	0,20	1,48	329	$5063 \leq X_1 \leq 5721$
	70%	0,3	1,16	257	$5135 \leq X_1 \leq 5649$

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.4 - Número de ensaios para um determinado nível de confiança

<i>n</i>	Nível de confiança	α	$h = t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Erro amostral h^*	Nº. de ensaios n^*
	99%	0,01	898	539	17
	95%	0,05	573	539	7
6	90%	0,10	449	539	5
	80%	0,20	329	539	3
	70%	0,3	257	539	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando-se as Tabelas 4.3 e 4.4, pode-se verificar que a condição 1 apresenta um nível de confiança de 90%, considerando os seis ensaios realizados.

Na prática, isto indica que repetindo estes ensaios e, mantendo-se as mesmas condições de usinagem, tem-se a probabilidade de 90% de chance de a média estar contida no intervalo de 4943 a 5841 rosca aceitáveis. Porém deve-se atentar que quanto maior for o intervalo de confiança, maior é o erro obtido.

4.4.2 Resultados das ferramentas na condição 2

A seguir apresenta-se na Tabela 4.5 a quantidade de rosca produzidas pelos machos da condição 2, ou seja, com condicionador metálico.

Tabela 4.5 - Vida dos machos testados na condição 2

Macho nº	Vida (Nº. de Roscas)	Média	Desvio	Critério de fim de vida
01	6408			Reprovado no calibrador P/NP
03	7008			Reprovado no calibrador P/NP
11	7197	7533	904,9	Reprovado no calibrador P/NP
09	8181			Reprovado no calibrador P/NP
12	8952			Reprovado no calibrador P/NP
04	7449			Quebra do macho

Fonte: Elaborado pelo autor

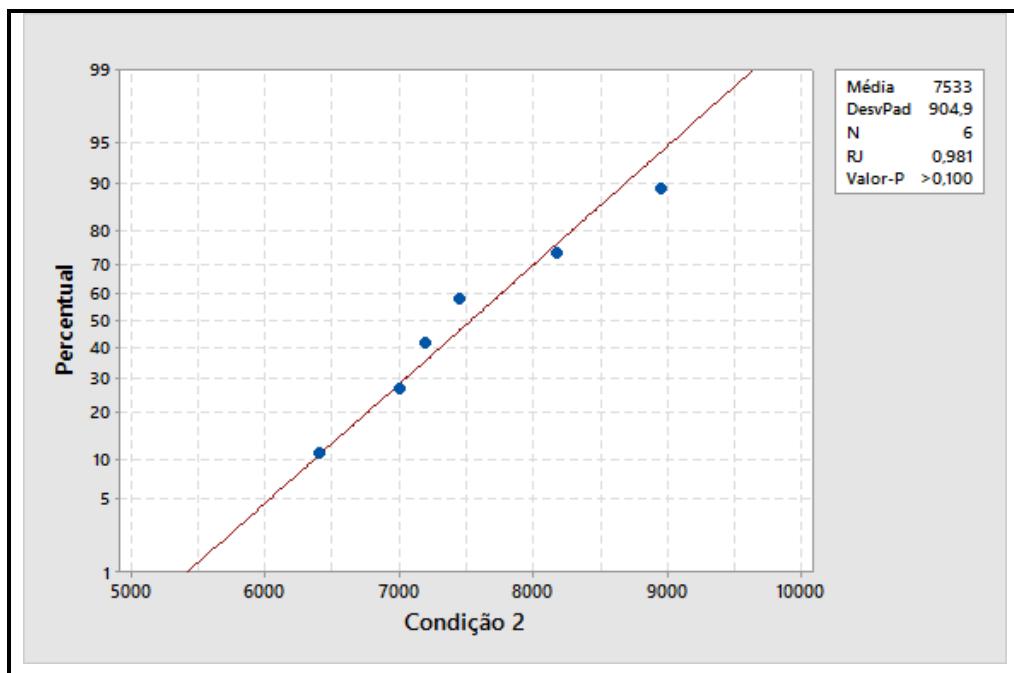
Pode-se verificar na Tabela 4.5 que das seis ferramentas testadas na condição 2, apenas o macho nº. 04 teve a quebra como critério de fim de vida.

As outras cinco ferramentas, 83% do total, atingiram seu limite de produção por meio da verificação geométrica da qualidade das rosca produzidas utilizando-se do calibrador passa-não-passa. Fazendo uma comparação com a condição 1, na qual somente três ferramentas, 50% do total, não tiveram quebra.

As ferramentas que não sofreram quebra foram encaminhadas para uma análise posterior de imagens e avaliação do desgaste em MEV.

Similar à condição 1, antes de seguir para análise estatística referente ao desempenho da condição 2, buscou-se verificar se os dados obtidos tendem a seguir uma distribuição normal.

Figura 4.2 - Normalidade dos dados obtidos na condição 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se, neste caso, que o teste apresenta um *p*-valor maior que o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), o que indica uma tendência da amostra a seguir uma distribuição normal. Assim, ambas as condições podem ser tratadas e foram ao longo deste trabalho considerados que seus dados seguem uma distribuição normal.

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam respectivamente o intervalo de confiança e o número mínimo de ensaios necessários na condição 2 para determinados níveis de significância considerando também um erro amostral estabelecido em 10% da média de roscas produzidas para a referida condição, ou seja, 753 roscas.

Quanto ao intervalo de confiança, na prática ele é utilizado para indicar a confiabilidade de um intervalo conter realmente a média alcançada nos ensaios, sendo que o quanto isto é provável de ocorrer é definido pelo nível de confiança da amostra. Em outras palavras, o quanto maior for o intervalo de confiança, mais confiança tem-se que o intervalo calculado contenha realmente a média. Por outro

lado, quanto maior o intervalo, menos informação tem-se sobre o verdadeiro valor da média. Então, para uma situação considerada “ideal”, prefere-se utilizar um intervalo que seja relativamente curto e que contenha um alto nível de confiança, assim, o valor a ser alcançado tem maior probabilidade de ocorrer.

Tabela 4.6 - Intervalo de confiança para a média de roscas produzidas na condição 2

<i>n</i>	Nível de confiança	α	$t_{n-1,\alpha/2}$	$h = t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$	IC da condição 2 ($X_2 = 5392$)
	99%	0,01	4,03	1490	$6043 \leq X_2 \leq 9023$
	95%	0,05	2,57	950	$6583 \leq X_2 \leq 8483$
6	90%	0,10	2,02	744	$6789 \leq X_2 \leq 8277$
	80%	0,20	1,48	545	$6988 \leq X_2 \leq 8078$
	70%	0,3	1,16	427	$7106 \leq X_2 \leq 7960$

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.7 - Número de ensaios para um determinado nível de confiança

<i>n</i>	Nível de confiança	α	$h = t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Erro amostral h^*	Nº. de ensaios n^*
	99%	0,01	1490	753	24
	95%	0,05	950	753	10
6	90%	0,10	744	753	6
	80%	0,20	545	753	4
	70%	0,3	427	753	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se nas Tabelas 4.6 e 4.7 que a condição 2 também apresenta um nível de confiança de 90% considerando os seis ensaios realizados.

Portanto, com base nos resultados obtidos, pode-se assumir que os dados das condições 1 e 2 seguem uma distribuição normal, permitindo utilizar os testes de

hipóteses para fazer inferências quanto os efeitos da aplicação do condicionador metálico em ferramentas de roscar. Além do mais, em ambas as condições, os resultados mostraram que o nível de confiança de 90% pode ser alcançado, mantendo-se um erro de apenas 10% sobre o número médio de roscas produzidas. Desta forma, considerando as evidências e os resultados apresentados no item anterior, segue-se para a determinação da equivalência das variâncias para as condições 1 e 2.

4.4.3 Determinação da equivalência das variâncias

Para verificar se as variâncias das condições ensaiadas são ou não equivalentes foi aplicado o teste F. Na Figura 4.3 pode-se observar que o teste F apresentou um *p*-valor maior que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,10$).

Figura 4.3 - Teste F para determinação da equivalência de variância dos dados

Método				
Hipótese nula	Variância(Condição 1) / Variância(Condição 2) = 1			
Hipótese alternativa	Variância(Condição 1) / Variância(Condição 2) $\neq 1$			
Nível de significância	$\alpha = 0,1$			
O método F foi usado. Esse método é preciso apenas para dados normais.				
Estatísticas				
Variável	N	DesvPad	Variância	
Condição 1	6	545,6	297654,0	
Condição 2	6	904,9	818933,1	
Razão de desvios padrão = 0,603				
Razão de variâncias = 0,363				
Intervalos de 90% de Confiança				
	IC para		IC para	
Método	razão do DesvPad		razão da Variância	
F (normal)	(0,268; 1,355)		(0,072; 1,836)	
Testes				
	Estatística			
Método	GL1	GL2	de teste	p-Valor
Teste F	5	5	0,36	0,291

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no teste F, aceita-se a hipótese nula e assume que as variâncias são equivalentes, ou seja, não existem evidências estatísticas de que as variâncias sejam diferentes. Neste sentido, para as amostras verificadas, constata-se que não há evidências que as variâncias sejam diferentes para confiança adotada de 90%.

Logo, presumindo-se variâncias equivalentes, no próximo item é realizada uma análise detalhada para verificar se existem diferenças significativas entre as médias de roscas produzidas para as duas condições ensaiadas.

4.2 Efeito do condicionador metálico na vida útil dos machos

Após verificação e confirmação da equivalência das variâncias das condições das ferramentas utilizadas neste estudo, pode-se proceder com a aplicação do teste t (bilateral) apresentado na Figura 4.4. O teste t é considerado adequado para comparar os dados das condições ensaiadas. Para tanto, foi estabelecido as seguintes hipóteses: ($H_0 : \mu_1 = \mu_2$; $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$), sendo H_0 e H_1 , respectivamente, as hipóteses nula e alternativa, as quais permitem fazer inferências sobre a vida média das ferramentas.

Figura 4.4 - Teste t para as duas condições presumindo variâncias equivalentes

Teste T para 2 amostras: Condição 1 versus Condição 2				
	N	Média	DesvPad	EP Média
Condição 1	6	5392	546	223
Condição 2	6	7533	905	369
 Diferença = $\mu(\text{Condição 1}) - \mu(\text{Condição 2})$				
Estimativa para a diferença: -2141				
IC de 90% para a diferença: (-2922; -1359)				
Teste T de diferença = 0 (versus ≠): Valor T= -4,96 p-Valor = 0,001 GL = 10				
Ambos usam DesvPad Combinado = 747,19				

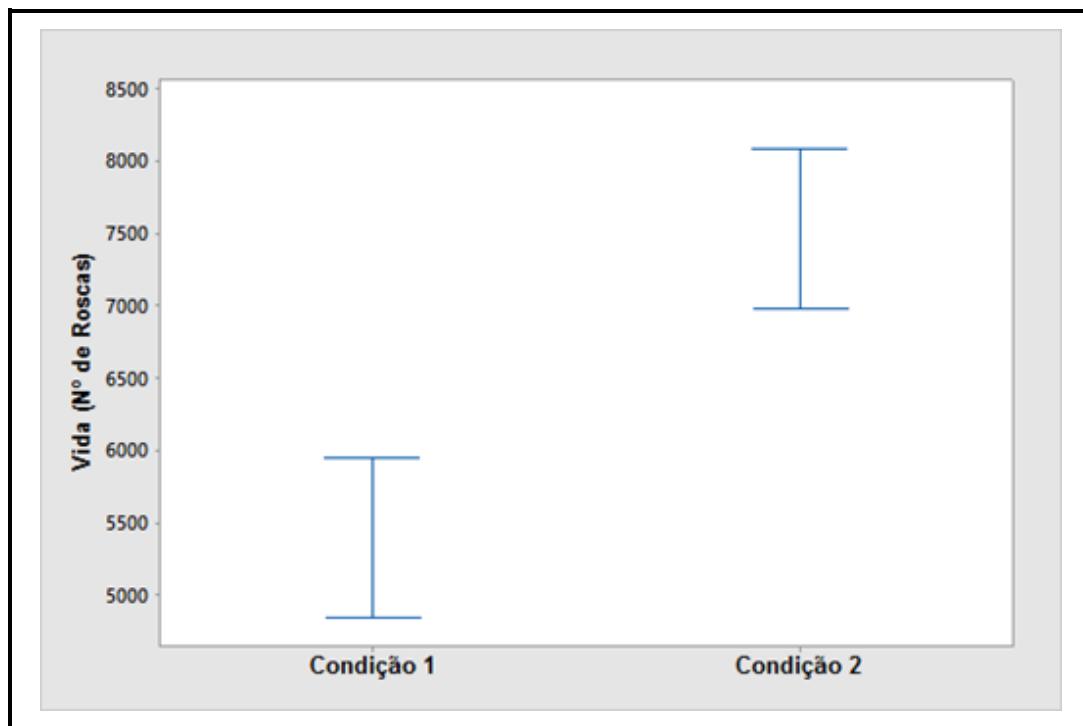
Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que na Figura 4.4, representada pelo teste t de *student*, presumindo-se variâncias equivalentes, foi constatado uma probabilidade de

significância (*p*-valor) menor que o adotado pelo teste ($\alpha = 0,1$). Isto indica que o valor estatístico da média está na região crítica da curva e, portanto, rejeita-se a hipótese nula. Quanto a região crítica, significa, na prática, que este valor obtido é muito pouco provável de acontecer e, portanto, as médias das condições testadas são realmente diferentes. Pode-se verificar que o *p*-valor apresentado no teste é muito pequeno em relação ao nível de significância, o que aponta também uma forte evidência para se rejeitar a hipótese nula e aceitar a hipótese alternativa.

Portanto, pode-se inferir que o efeito do condicionador metálico influenciou significativamente no desempenho do processo de rosqueamento interno, aumentando a vida útil dos machos da condição 2 em comparação aos machos da condição 1.

Figura 4.5 - Efeito do condicionador metálico na vida das ferramentas



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme apresentado na Figura 4.5, verifica-se que na pior situação encontrada pela condição 2, ainda é melhor que o desempenho obtido pelas ferramentas de roscar utilizadas na condição 1. Assim, por meio da Figura 4.5 pode-se constatar que as quantidades medias e limites de cada condição são realmente diferentes, ou seja, esta é mais uma evidência que o condicionador metálico influenciou positivamente no processo de rosqueamento interno.

O aumento médio na vida útil dos machos utilizados na condição 2 pode ser um bom indicativo sobre a melhoria do processo por meio da redução de custo, uma vez que os custos envolvidos no referido processo passam a ser rateado por um número maior de peças fabricadas.

É importante salientar que, mesmo não sendo analisado neste estudo, o fato de machos condicionados apresentarem um melhor desempenho contribui para um melhor aproveitamento da máquina e da mão-de-obra disponível, aumentando a produtividade e reduzindo os tempos de *setup*. Além disso, os prazos de entrega podem ser reduzidos, uma vez que para um mesmo lote, menor são os custos envolvendo os tempos de troca e procedimentos para reafiação da ferramenta.

4.3 Análise das condições econômicas de usinagem

Conforme apresentado na Tabela 4.8, pode-se verificar que o efeito do condicionador metálico potencializou a vida útil dos machos, sendo que a condição 2 desempenhou um aumento médio de 39,7% em relação às roscas produzidas na condição 1.

Tabela 4.8 - Aumento médio na vida útil do macho de roscar

Condição	Média de rosas	Aumento médio na vida do macho
1	5392	39,7 %
2	7533	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os machos pertencentes a condição 2 possibilitou um processo mais vantajoso, apresentando um desempenho 1,4 vezes maior em comparação a vida útil das ferramentas da condição 1. No que diz respeito aos tempos de produção, para um lote de 500 peças, os machos da condição 2 pode realizar a operação completa de 5 lotes sem que haja a necessidade de troca do macho, contra apenas 3 lotes quando executado com os machos da condição 1.

Comparando-se os custos das condições 1 e 2 é obtido a redução média de custos no processo de rosqueamento. O procedimento utilizado para determinação dos custos de cada condição do ensaio foi apresentado no item 3.3.2 do capítulo 3 e os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

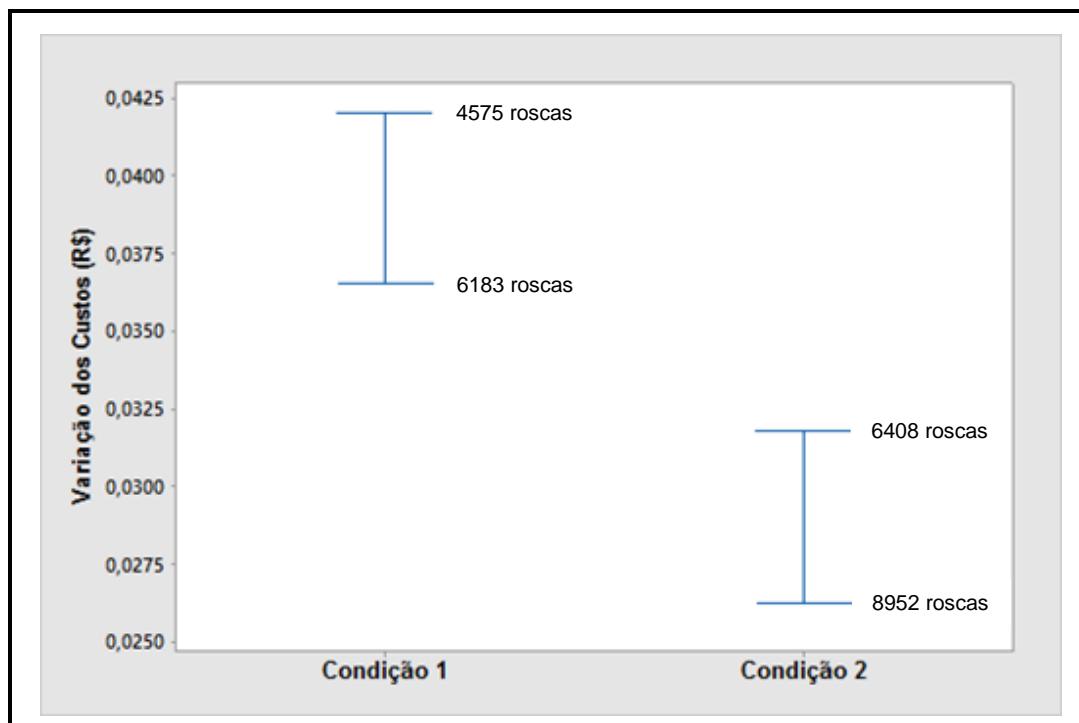
Tabela 4.9 - Redução média dos custos de produção

Condição	Custo total/macho	Custo médio/peça	Redução média de custos
1	R\$ 70,00	R\$ 0,0390	
2	R\$ 72,00	R\$ 0,0287	26,4 %

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos dados contidos nas Tabelas 4.1, a qual apresenta o número de roscas produzidas por todas as ferramentas e a Tabela 4.9, foi possível calcular a variação dos custos para as condições 1 e 2. Estes valores são apresentados a seguir na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Variação dos custos para cada condição da ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor

Tradicionalmente, em um processo de fabricação, a análise sobre o desempenho de qualquer melhoria aplicada ao processo é feita por meio de uma análise de custo-benefício, verificando se o valor do investimento da alteração proposta é viável financeiramente. Na Figura 4.6, pode-se verificar que a condição 2 desempenhou condições favoráveis do ponto de vista econômico. Nota-se que o menor custo para a condição 1 é mais caro em relação ao maior custo apresentado na condição 2.

Logo, em função dos valores apresentados quanto à variação de custos, pode-se afirmar que a aplicação do condicionador metálico impactou nas condições econômicas de usinagem, reduzindo os custos em relação as ferramentas envolvidas no processo de rosqueamento.

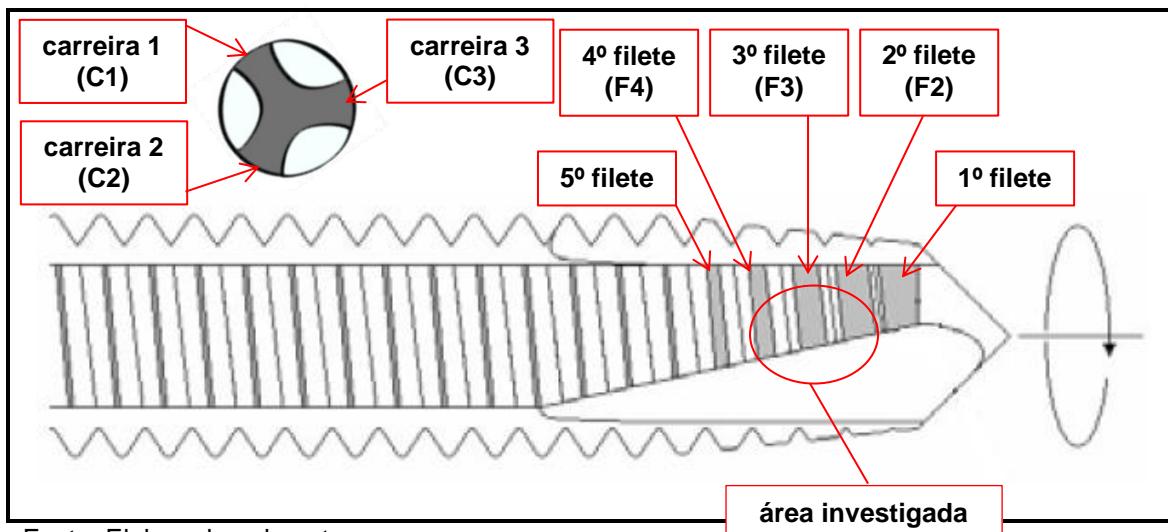
A condição 2 apresentou uma redução média de custos de 26,4% em comparação a condição 1. Entretanto, avaliando-se o desempenho das quantidades máximas e mínimas de roscas produzidas em cada condição, pode-se alcançar outras condições econômicas.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.6, a quantidade mínima de roscas fabricadas na condição 2 em comparação a quantidade máxima de roscas produzidas pela condição 1, tem-se o mínimo desempenho em relação aos custos de ferramenta, equivalente a 12,3%. Por outro lado, comparando-se a quantidade máxima de roscas fabricadas na condição com a mínima quantidade produzida pela condição 1, tem-se o máximo desempenho em relação aos custos do macho, equivalente a 38,1%.

4.4 Desgaste de flanco apresentado nos machos

Os níveis de desgaste médio do flanco das ferramentas utilizadas neste trabalho foram medidos (em milímetros) nos três filetes (F2, F3, F4) da região chanfrada, sendo que nesta área investigada, conforme ilustrada na Figura 4.7, foram os filetes que apresentaram o maior nível de desgaste médio.

Figura 4.7 - Medidas do desgaste médio de flanco dos machos



Fonte: Elaborado pelo autor

Os desgastes foram plotados em função das três carreiras (C1, C2, C3) dos machos utilizado nas condições 1 e 2, os valores são apresentados na Tabela 4.10, representando, assim, o nível de desgaste médio dos machos em final de vida.

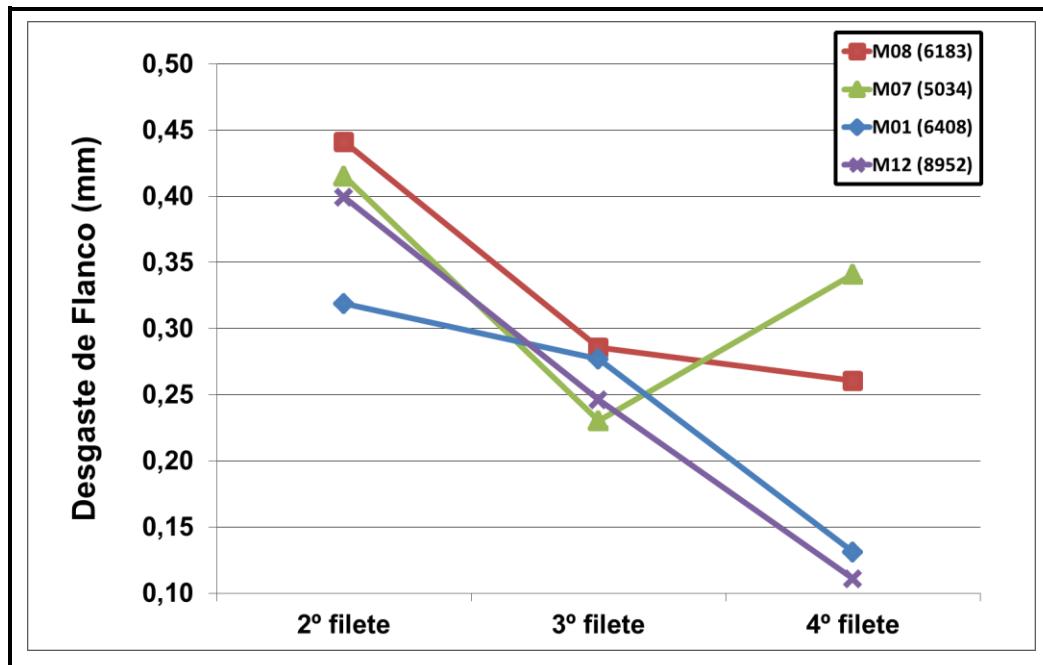
Tabela 4.10 - Níveis de desgaste médio de flanco dos machos

	Macho nº 01 (mm)	Macho nº 07 (mm)	Macho nº 08 (mm)	Macho nº 12 (mm)
C1F2	0,32	0,42	0,44	0,40
C1F3	0,28	0,23	0,29	0,25
C1F4	0,13	0,34	0,26	0,11
C2F2	0,48	0,27	0,32	0,27
C2F3	0,25	0,21	0,30	0,33
C2F4	0,16	0,26	0,26	0,19
C3F2	0,21	0,38	0,36	0,39
C3F3	0,36	0,51	0,46	0,35
C3F4	0,25	0,27	0,30	0,20
Média F2	0,34	0,36	0,37	0,35
Média F3	0,30	0,32	0,35	0,31
Média F4	0,18	0,29	0,27	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor

O mesmo procedimento foi adotado para medição do desgaste dos demais machos testados. No entanto, devido a três ferramentas da condição 1 (Tabela 4.2) sofrerem quebra, foram escolhidos para comparação, os machos que apresentaram a menor e a maior vida útil na condição 1 (machos nos. 07 e 08) e na condição 2 (machos nos. 01 e 12), representado a seguir pelos gráficos das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

Figura 4.8 – Comparação do desgaste médio dos filetes da primeira carreira



Fonte: Elaborado pelo autor

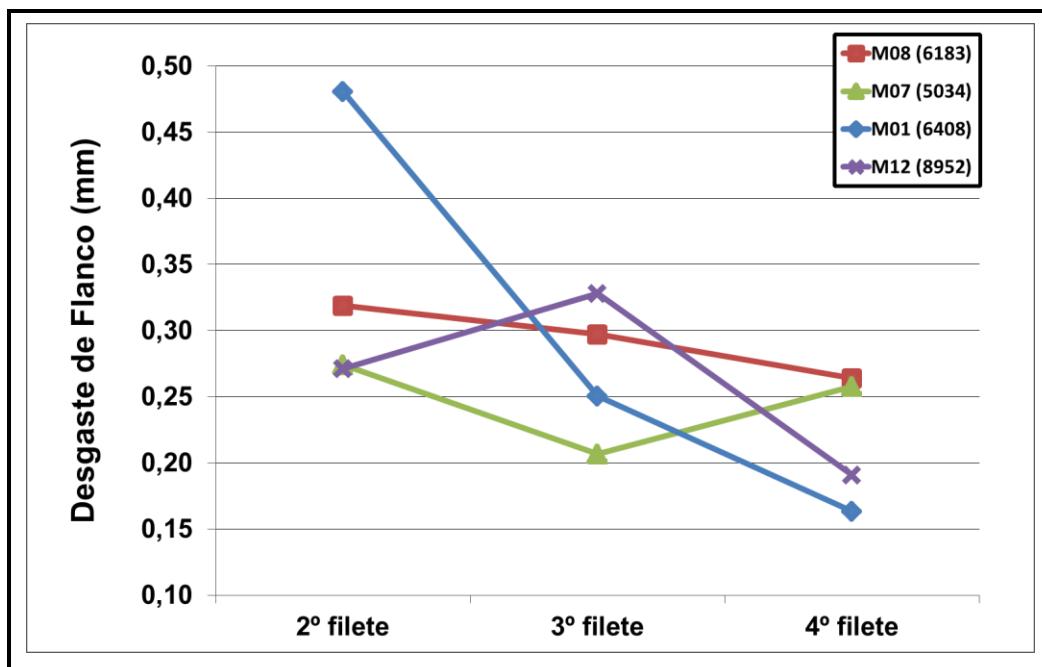
A Figura 4.8 apresenta o nível de desgaste médio encontrado nas ferramentas com e sem condicionador metálico, medidos na carreira 1 por meio de imagens realizadas em MEV, possibilitando realizar algumas comparações entre os machos. Os resultados apontam que nos três filetes medidos, os machos com condicionador metálico (M01 e M12), apresentaram uma estabilidade desejada para este tipo de ferramenta, mantendo-se constante ao longo do canal e, assim, apresentando seu maior e menor nível de desgaste, respectivamente, no 2º e 4º filete. Com exceção do 3º filete desta carreira, os machos sem condicionador (M07 e M08) apresentaram os piores níveis de desgaste em comparação as ferramentas condicionadas, assim como altos níveis de desgaste ocorridos no 4º filete.

A Figura 4.9 apresenta o nível de desgaste médio para a carreira 2 dos machos testados nas condições supracitadas. Este canal proporcionou o melhor

nível de desgaste para todas as ferramentas, mantendo-se abaixo de 0,35 mm no 3º e 4º filete, os quais foram medidos na superfície de folga das ferramentas.

O macho nº 01, que após produzir 6408 roscas foi reprovado por calibre P/NP, apresentando um elevado nível de desgaste no 2º filete. Neste filete pode-se notar um desgaste causado por rasgamento e avarias como lascamento, que provavelmente pode ter sido causado pelo atrito da ferramenta tanto no avanço quanto no retorno devido a tolerância do pré-furo e retorno do material da peça (efeito elástico).

Figura 4.9 – Comparação do desgaste médio dos filetes da segunda carreira

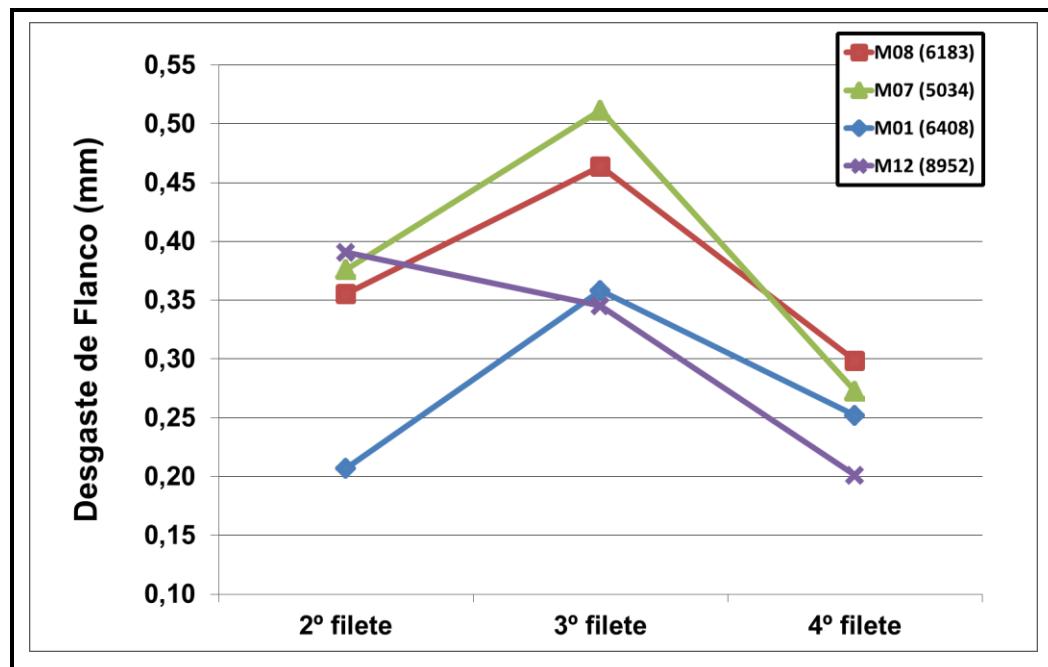


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.10 apresenta a última carreira (C3) dos machos analisados. Os valores encontrados para as ferramentas sem condicionador quanto para os machos condicionados seguem uma repetibilidade não linear, sendo que para ambas as condições, o maior nível de desgaste para este canal foi encontrado no 3º filete.

Nesta carreira, pode-se constatar que o desempenho das ferramentas condicionadas em relação a média de roscas produzidas (vida útil) foi muito bom. Provavelmente devido ao bom desempenho em relação ao desgaste apresentados por essas ferramentas, com exceção do 2º filete, os machos condicionados M01 e 12, apresentaram os melhores níveis de desgaste (~0,35 mm) em comparação as ferramentas sem condicionador metálico (~0,50 mm).

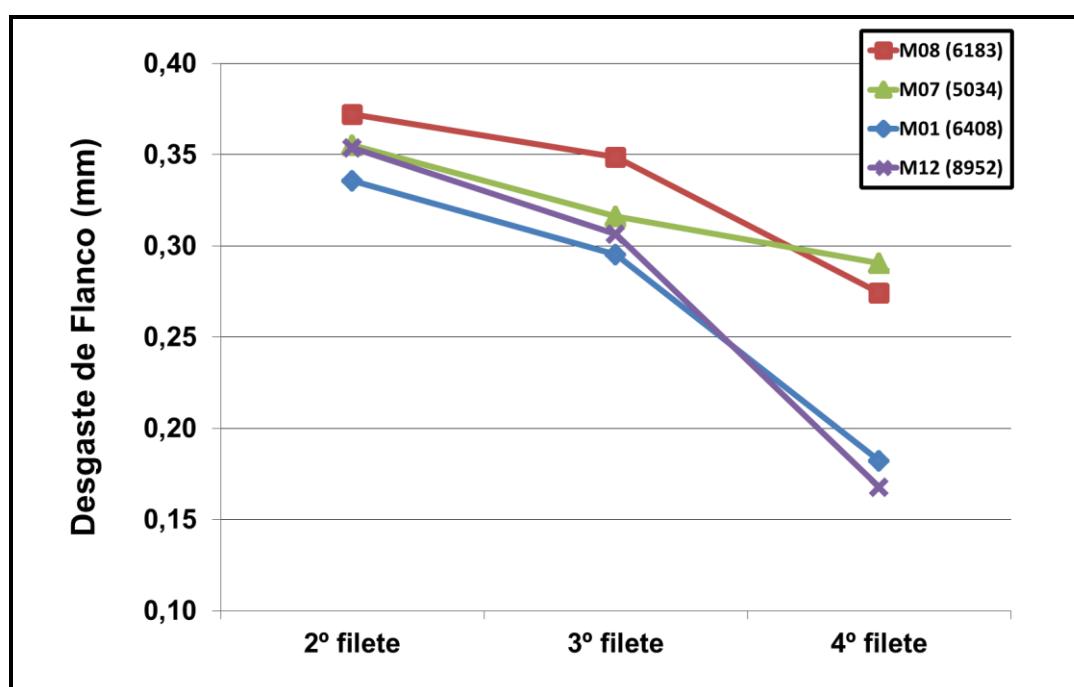
Figura 4.10 – Comparação do desgaste médio dos filetes da terceira carreira



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de realizar uma comparação mais ampla nos machos testados em cada condição, utilizou-se os níveis de desgaste médio de flanco encontrados nos respectivos filetes dos machos e, após uma média calculada para todas as carreiras dos machos, para ambas as condições, tem-se o gráfico plotado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Comparação do desgaste médio para as três carreiras



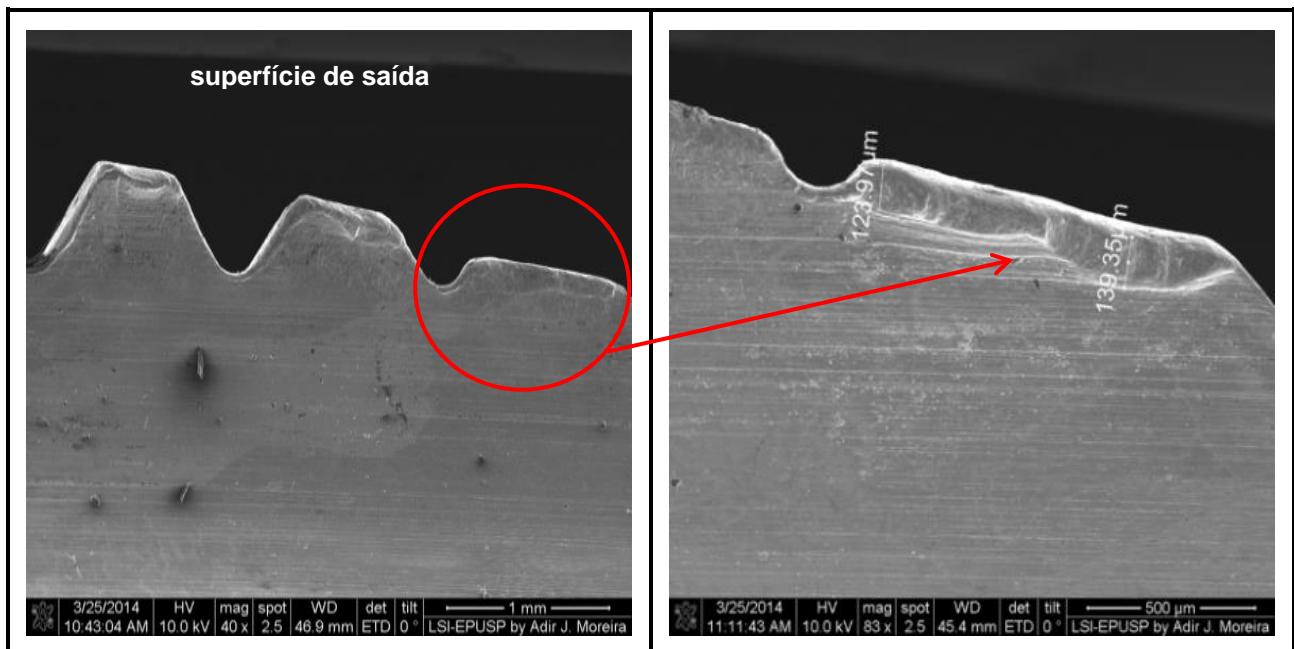
Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico apresentado na Figura 4.11 ilustra a média dos níveis de desgaste encontrados nos três filetes para as três carreiras. Verifica-se que os machos da condição 2, apresentaram o melhor desempenho quanto ao nível médio de desgaste, que é menor em relação aos apresentados pelos machos sem tratamento. Isto possivelmente deve-se as propriedades antiatriito do condicionador metálico. Assim, diminuindo o atrito, consequentemente, favorece a redução do nível de desgaste no macho, fato este nitidamente apresentado pelos machos da condição 2.

4.5 Mecanismo de desgaste apresentado nos machos

O objetivo das análises apresentadas a seguir foi investigar a presença de elementos químicos sobre a superfície dos machos, com a finalidade de identificar os principais mecanismos de desgaste ocorridos na usinagem do aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) LNE 380. Até então, conforme a Figura 4.12, as imagens obtidas no MEV mostravam somente uma região considerada como área desgastada, permitindo também realizar medições para determinação do nível de desgaste médio da superfície.

Figura 4.12 - Imagens feita em MEV de um macho sem condicionador

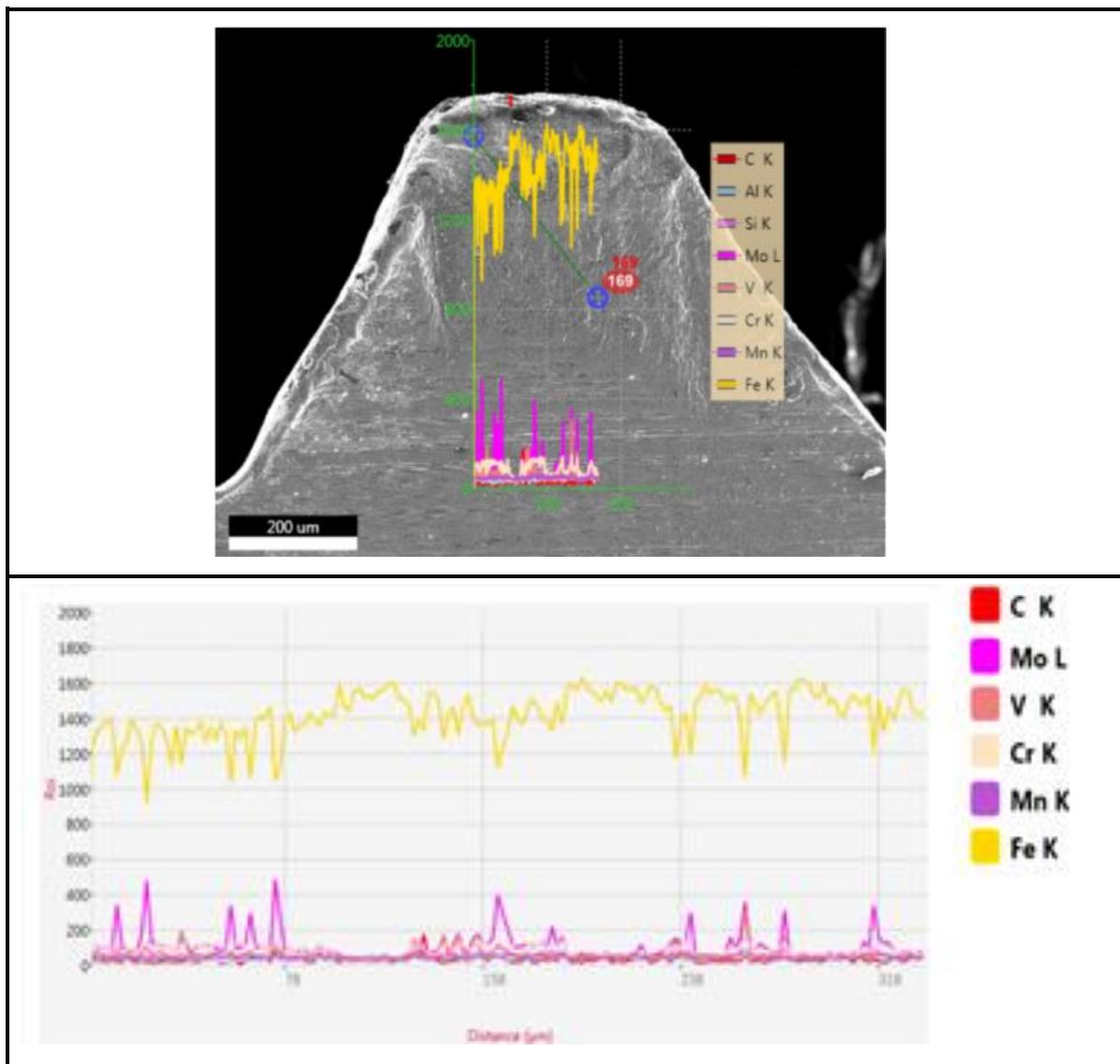


Fonte: Elaborado pelo autor

Neste tópico, foram realizadas algumas análises em regiões críticas das superfícies de saída de um macho de roscar da condição 2 (nº 12), o qual produziu 8952 roscas e, de um macho da condição 1 (nº 08), que usinou 6183 roscas. A escolha destas ferramentas foi determinada por apresentar em suas respectivas condições o melhor desempenho em relação a vida útil do macho.

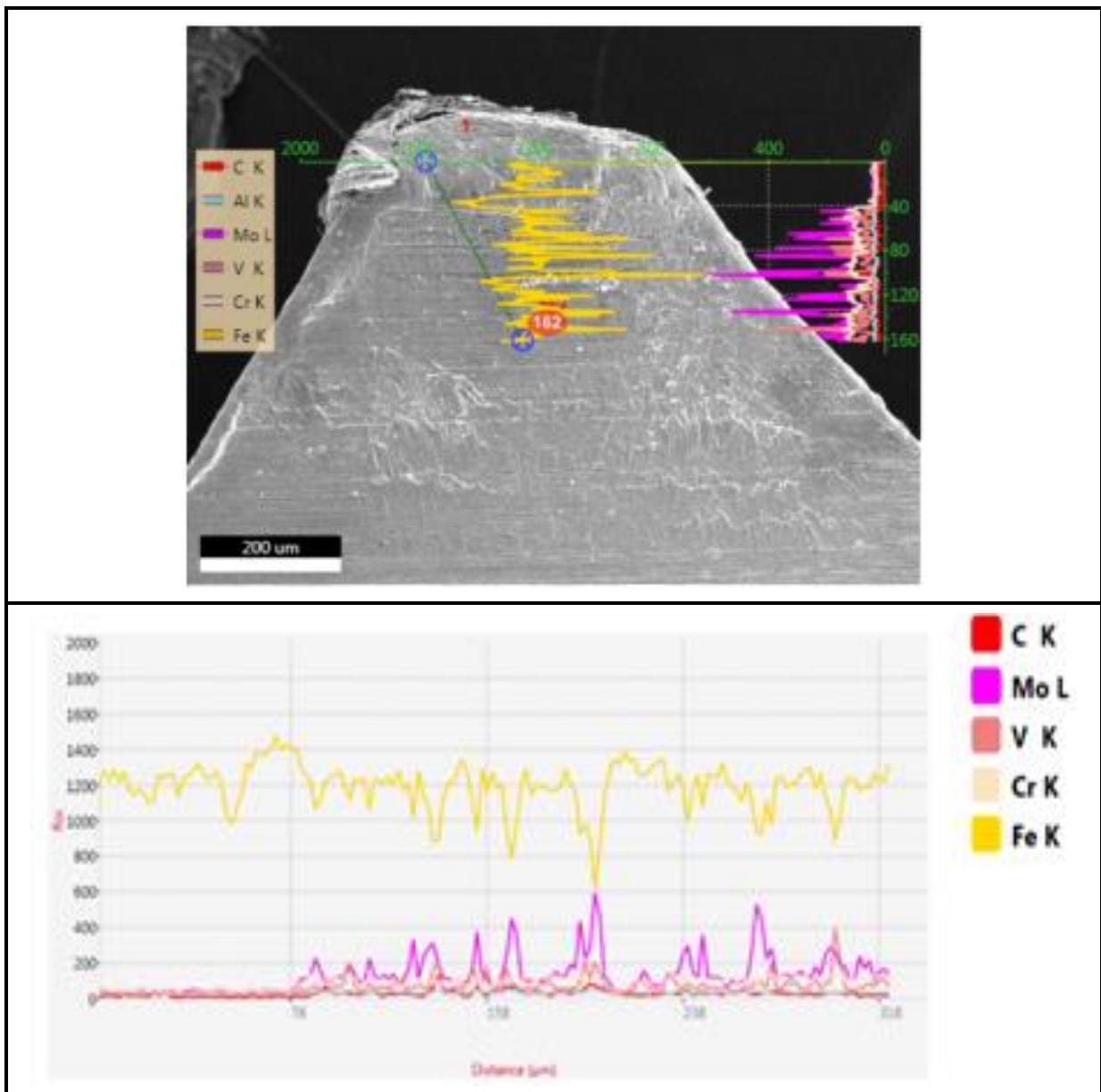
Ao todo, para cada condição, três análises foram realizadas, sendo uma em linha e duas por áreas. Inicialmente, foi traçada uma linha em diagonal nas regiões mais desgastadas das ferramentas e fez-se EDS em toda a sua extensão, conforme apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.13 – EDS para análise dos principais elementos químicos presentes na linha demarcada para o macho nº 08 (condição 1)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.14 - EDS para análise dos principais elementos químicos presentes na linha demarcada para o macho nº 12 (condição 2)



Fonte: Elaborado pelo autor

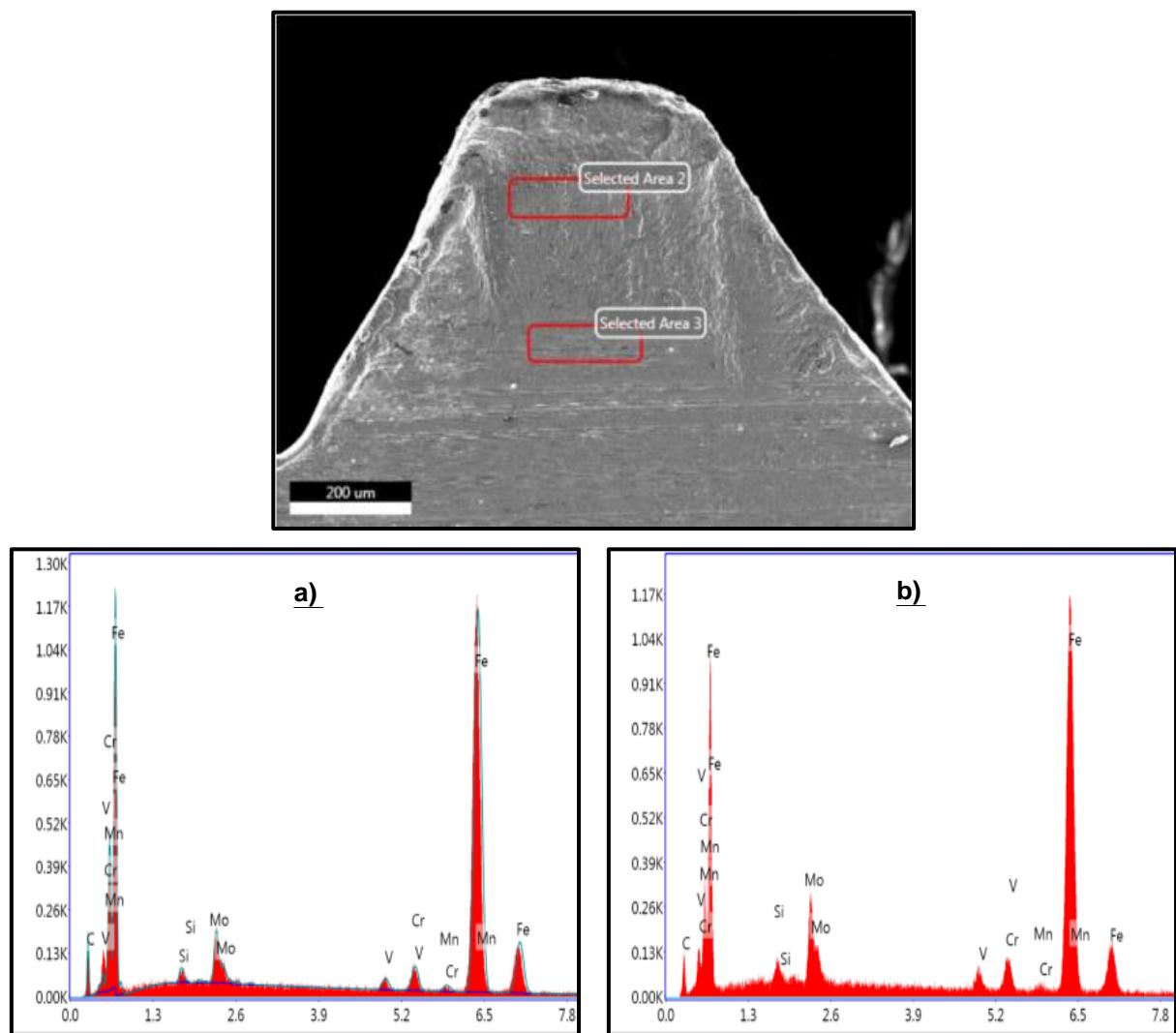
Os resultados apresentaram uma grande quantidade de ferro (Fe), que muito provavelmente é pertencente a matriz do substrato dos machos. Pode-se notar a presença dos elementos químicos mais significativos, como Carbono (C), Cromo (Cr), Vanádio (V) e Molibdênio (Mo), normalmente, presentes em elevados teores nas ferramentas de roscar fabricadas com aço rápido convencional AISI M7. Pode-se evidenciar que em determinadas regiões do gráfico de linha não foi possível detectar níveis consideráveis de elementos químicos. Isso pode estar relacionado ao forte desgaste abrasivo na região demarcada pela linha de referência.

O desgaste abrasivo pode ser detectado em todos os machos empregados nesta pesquisa.

Contudo, notou-se a presença do elemento manganês no macho referente a condição 1 (Figura 4.14), e este é um elemento presente exclusivamente na peça utilizada como corpo de prova (Tabela 3.1 do capítulo 3).

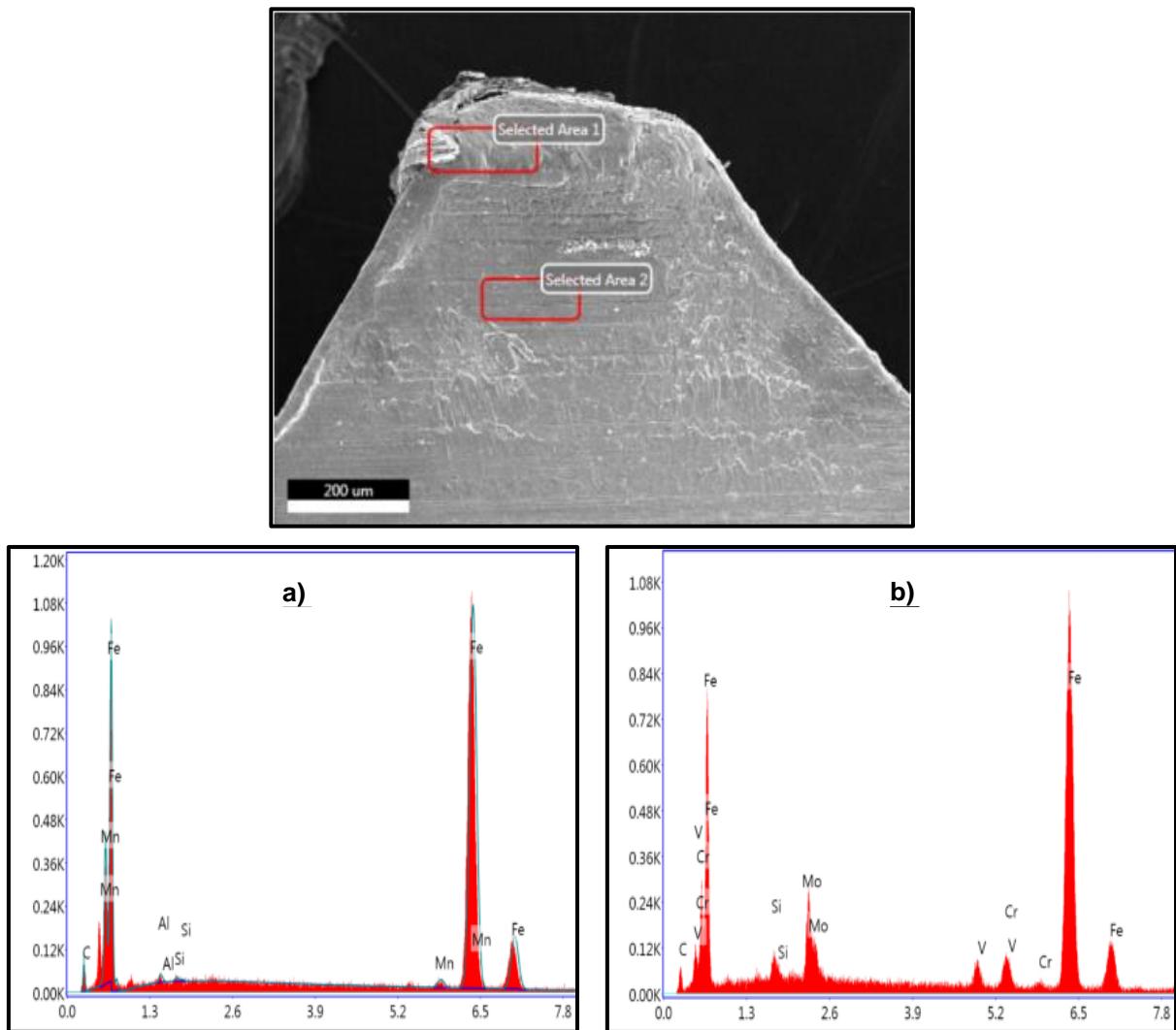
A fim de esclarecer melhor a presença desse elemento químico em ambas as condições, sendo de maior intensidade nas ferramentas pertencentes a condição 1, foram realizados mais alguns espectros em regiões distintas as já realizadas pela análise em linha. Estas análises estão denotadas na Figura 4.15 e 4.16 como áreas 2 e 3 para condição 1 e 1 e 2 para a condição 2.

Figura 4.15 - Espectro da análise química da área 2 (a) e da área 3 (b) para o macho nº 08 (sem condicionador metálico)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.16 - Espectro da análise química da área 1 (a) e da área 2 (b) para o macho de nº 12 (com condicionador metálico).



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme era esperado, pode-se constatar a presença de manganês nas regiões 2 e 3 da superfície da saída da ferramenta de roscar da condição 1 (macho nº 08), representado pelas Figuras 4.15a e 4.15b.

Nota-se que na área 2, com espectro ilustrado pela Figura 4.15b, não foi possível detectar a presença do elemento químico manganês na superfície do macho, o que poderia evidenciar uma forte adesão do material da peça na superfície dos machos para ambas as condições.

Já quanto aos gráficos dos espectros apresentado pela Figura 4.16, pode-se verificar também uma pequena presença do elemento manganês próximo a borda

da superfície de saída do macho nº 12, especificamente na área 1, representado pela Figura 4.16a.

Com base nesta análise, acredita-se que o condicionador metálico foi fundamental para a redução do atrito, arrastando pouco material pertencente ao material da peça usinada e, consequentemente, contribuindo para um menor desgaste em relação aos machos utilizados na condição 1.

Além disso, por meio das imagens obtidas em MEV, foi possível verificar a formação dos mecanismos de desgaste como abrasão e adesão (*attrition*) em ambas as condições dos machos utilizados neste trabalho. Entretanto, deve-se considerar que a aderência do material da peça no macho da condição 2 é menor em comparação ao observado na ferramenta de roscar da condição 1, pois, nesta última, o manganês está fortemente presente em todas as análises realizadas, tanto em linha (diagonal) como nas respectivas áreas 2 e 3.

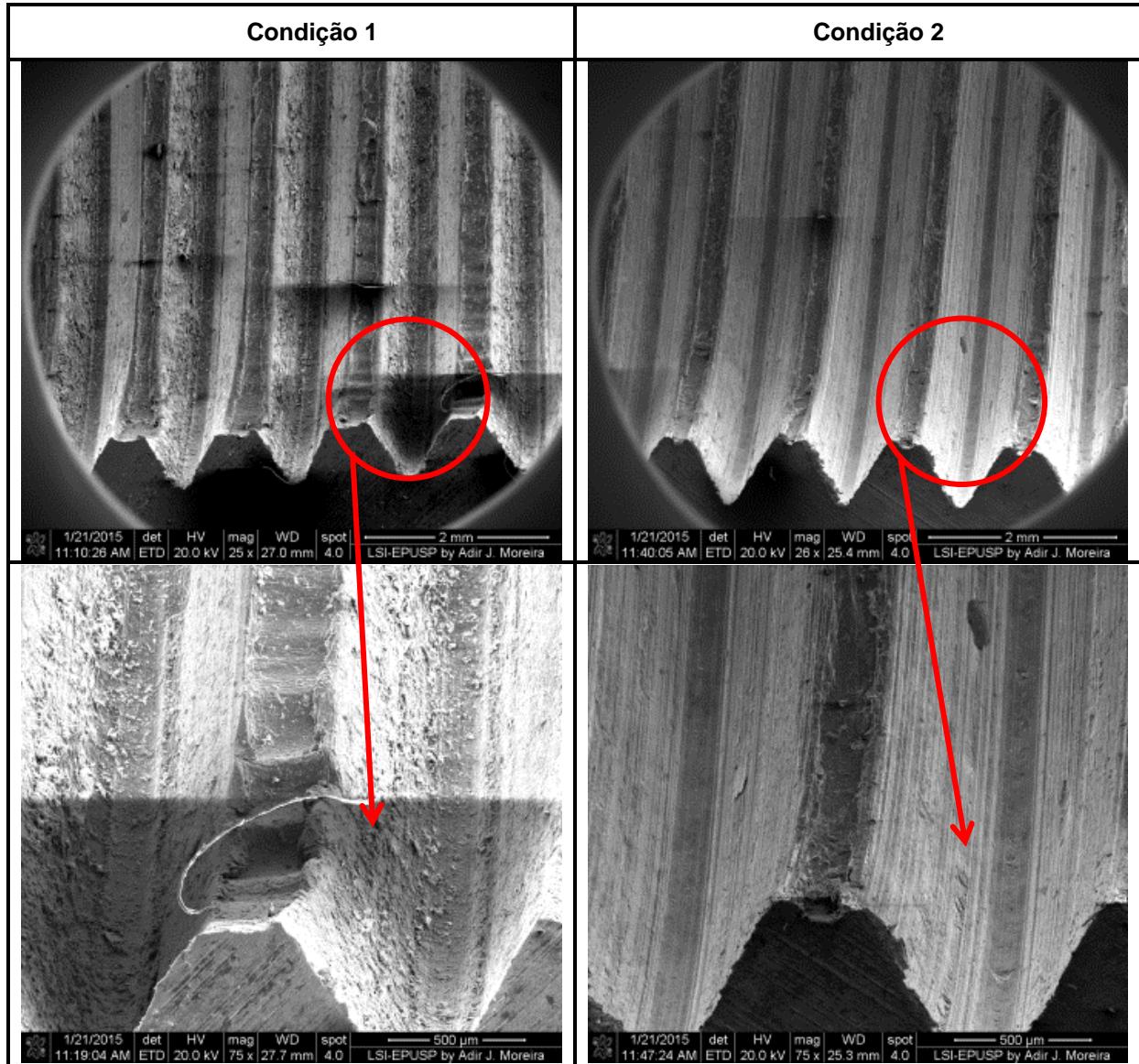
Vale ressaltar que, inicialmente, os espectros contidos nas Figuras 4.13 e 4.14 apresentaram somente os elementos mais significativos. Neste sentido, outros elementos foram detectados apenas na forma de resíduos e não foram discutidos nesta dissertação por dois motivos: i) a sonda de análise química utilizada no EDS apresenta uma dificuldade em identificar elementos leves, ou seja, com peso abaixo de 1% e; ii) a quantidade apresentada nas análises das áreas é insuficiente para se identificar na análise por linha apresentada nos gráficos das Figuras 4.13 e 4.14.

4.6 Avaliação da qualidade das roscas produzidas

A qualidade das rosas produzidas pode, indiretamente, ajudar a avaliar as formas e mecanismos de desgaste. Neste trabalho, notou-se que em praticamente todas as rosas analisadas no MEV houve material aderido na superfície das rosas usinadas, seguido ou não por arrancamento do material. Na Figura 4.17, o perfil roscado, principalmente nas cristas das rosas produzidas com os machos da condição 1, mostra situações típicas de falhas em rosqueamento convencional, tais como o arrancamento do material da peça e riscos provenientes do desalinhamento do macho. Comparando-se as condições ensaiadas quanto ao acabamento

superficial da rosca, nota-se na condição 1 uma baixa qualidade da rosca, inclusive, verifica-se muito material impregnado na região de vale do perfil da rosca.

Figura 4.17 - Imagens da região intermediaria de uma rosca produzida na condição 1 (após 6183 roscas) e na condição 2 (após 8952 roscas).



Fonte: Elaborado pelo autor

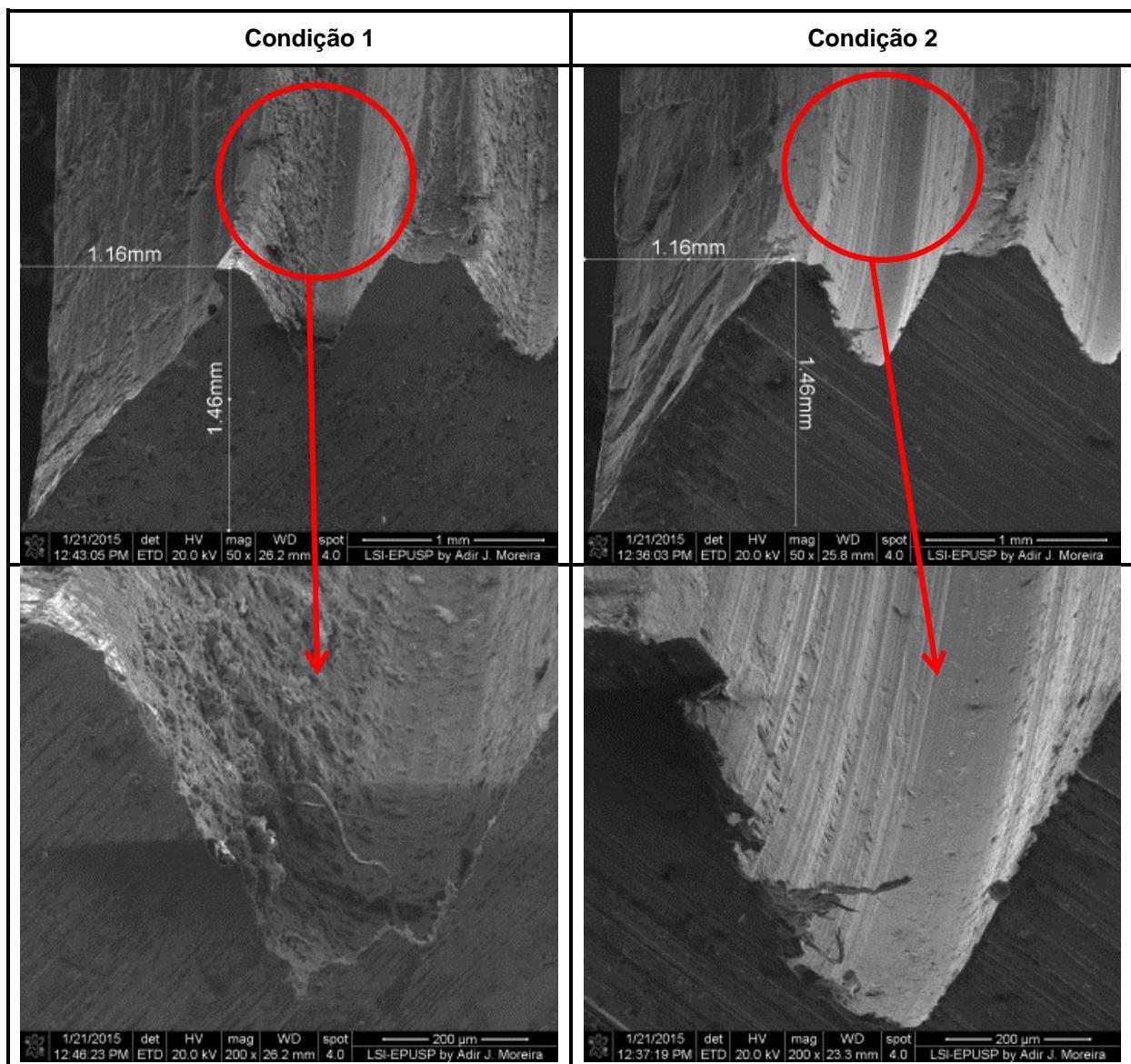
Em contraste, na condição 2, tem-se um acabamento sem muito material aderida à superfície roscada, no qual percebe-se, visualmente, uma boa qualidade da rosca produzida em comparação a condição 1.

Avaliando outra imagem, mais próxima da região intermediária da rosca e, no sentido de avanço do macho, constata-se com maior nitidez a diferença no

acabamento superficial dos filetes roscados. A Figura 4.18 apresenta uma outra comparação para avaliação da qualidade das roscas entre as condições testadas.

Nestas imagens, o macho nº. 12 representou a condição 2. Esta ferramenta também apresentou o melhor desempenho em relação a todas as outras ferramentas utilizadas nos ensaios de rosqueamento interno, produzindo 8952 rosas aprovadas pelo calibrador P/NP.

Figura 4.18 - Imagens de uma rosca usinada (região de entrada) no sentido de avanço do macho máquina nas condições 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nestas imagens, acredita-se que a proteção realizada pelo condicionador metálico, permitiu produzir rosas com melhor qualidade superficial

em comparação as ferramentas sem tratamento. Vale ressaltar que nas observações realizadas na ferramenta de roscar da condição 1, pode-se verificar a adesão de material da peça, independentemente do estado de degradação do macho, promovido pelo desgaste natural das arestas de corte.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitem concluir que:

- a utilização de um condicionador metálico em machos pode influenciar positivamente o desempenho do processo de rosqueamento interno, contribuindo para melhorias na vida útil das ferramentas, nas condições econômicas da operação e na qualidade final das rosas produzidas;
- o desempenho em relação a vida útil dos machos da condição 2 foram, em média, 39,7% maior que as ferramentas utilizadas na condição 1;
- em relação as condições econômicas de usinagem, utilizando-se os machos com condicionador foi possível alavancar uma redução média de custos de 26,4% em comparação as mesmas ferramentas sem condicionador;
- as medições e imagens realizadas em MEV indicaram que o macho com condicionador metálico pode proporcionar menores níveis de desgaste em comparação aos tradicionais machos de aço rápido;
- as ferramentas utilizadas na condição 1 e 2 apresentaram mecanismos de desgaste como abrasão e adesão, no entanto, as análises feitas em EDS apontaram uma menor quantidade do material da peça aderido aos machos com condicionador em relação a ferramenta sem condicionador;
- o procedimento empregado foi adequado, pois contribuiu para o aumento da vida útil da ferramenta de roscar, reduzindo os custos envolvidos no processo de rosqueamento interno, além de propiciar uma boa qualidade das superfícies roscadas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A metodologia empregada neste trabalho e os resultados alcançados, permitem propor algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como:

- realizar novos ensaios de rosqueamento interno sem o uso de fluido de corte, utilizando-se de novos materiais que favoreçam o desgaste da ferramenta de roscar, de tal forma que a mesma possa atingir mais rapidamente seu critério de fim de vida;
- aplicar o procedimento proposto neste trabalho em outros processos de usinagem, principalmente naqueles que utilizam-se de baixa velocidade de corte e tenham o atrito como um fator dominante, sob diferentes condições lubri-refrigerantes, verificando como resposta o desempenho em relação as forças de corte;
- realizar ensaios de rosqueamento à seco com machos revestidos com lubrificantes sólidos e tratados com condicionador metálico, comparando os efeitos em relação ao desempenho da vida útil das ferramentas, além das condições econômicas de usinagem.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 5967, **Machos para roscar – Nomenclatura dos principais tipos e terminologia**, Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6656, **Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Especificação**, Rio de Janeiro, 2008.

ADACHI, K. ASPINWALL, D.; SAKURAI, K.; HIRATSUKA, A. A Study on Tapping Viewed from Eco-Machining Technology. *In:* Materials Forum, v. 28, p.184-189, 2004.

ahn, J. H.; LEE, D. J.; KIM, S. H.; KIM, H. Y.; CHO, K. K. Effects of Synchronizing Errors on Cutting Performance in the Ultra-High-Speed Tapping. *In:* CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 52, n. 1, p. 53-56, 2003.

ALLEN, T. T. **Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems**, London: Springer, 1th., 529p., 2006.

ALVES, D. J. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Aplicação de Condicionador Metálico em Processo de Alargamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nove de Julho (UNINOVE). São Paulo, SP, Brasil, 2014.

ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIANS, T. A. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**, v.2, 219p., 2008.

ARMAREGO, E. J. A.; CHEN, M. N. P. Predictive cutting models for the forces and torque in machine tapping with straight flute taps. *In:* CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 51, n. 1, p. 75-78, 2002.

BAPTISTA, E. A. Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem com Auxílio de Sistema Especialista. *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP. 2001.

BAPTISTA, E. A. **Desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem baseado na web.** Tese de Doutorado. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara D'Oeste, SP. 2004.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Otimização de processo de usinagem: uma abordagem para sistemas de fabricação flexível que foi implementada em um sistema baseado na web. *In:* Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF. 2006.

BATALLER, H.; LAMAALLAM, S.; LACHAISE, J.; GRACIAA, A.; DICHARRY, C. Cutting Fluid Emulsions Produced by Dilution of a Cutting Fluid Concentrate Coining a Cationic/Nonionic Surfactante Mixture. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 152, pp. 215-220, 2004.

BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. D. Testing Of Vegetablebased Cutting Fluids By Hole Making Operations. **Lubrificating Engineering**, pp. 12-16, 2001.

BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. D. Surface Integrity and Part Accuracy in Reaming and Tapping Stainless Steel with new Vegetable based Cutting Oils. **Tribology International**, v. 35, pp. 865-870, 2002.

BENGA, G.; CIUPITU, I. Influence of Coating and Tool Geometry on the Tool Life. **DAAAM International Scientific Book**, 2009.

BENGA, G.; CIUPITU, I.; STANIMIR, A. Correlation Between Cutting Forces and Tool Wear when Thread Tapping AISI P20 Hardened Steel. *In:* Annals of DAAAM & Proceedings, 2009.

BEZERRA, A. A. **Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R. T. Tool Wear Aspects when Applying High-Speed Tapping on Grey Cast Iron. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 222, n. 2, p. 129-136, 2008.

BHOWMICK, S.; LUKITSCH, M. J.; ALPAS, A. T. Tapping of Al-Si Alloys with Diamond-Like Carbon coated Tools and Minimum Quantity Lubrication. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2142-2153, 2010.

BRAGA, D.U.; DINIZ, A.E.; MIRANDA, G.W.A., COPPINI, N.L. Using a Minimum Quantity of Lubrificant (MQL) and Diamond coated Tool in the Drilling of Aluminum-Silicon Alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v.122 p. 127-138, 2002.

BRANDAO, L. C.; COELHO, R. T. Temperature and Heat Flow when Tapping of the Hardened Steel using different Cooling Systems. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 17, n. 2, p. 267-274, 2009

BRANDAO, L. C.; COELHO, R. T.; MALAVOLTA, A. T. Experimental and Theoretical Study on Workpiece Temperature when Tapping Hardened AISI H13 using different Cooling Systems. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 32, n. 2, p. 154-159, 2010.

BUGLIOSI, S.; FAGA, M. G.; SETTIMERI, L. Mechanical and Tribological Characterization of Tools Coatings for Dry Tapping. **In:** Proceeding of the 13th International Scientific Conference “Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME. 2005. p. 51-54.

BUTTON, S. T. **Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados**, Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 88p., 2010.

CAMBIELLA, A.; BENITO, J. M.; PAZOS, C.; COCA, J.; HERNANDEZ, A.; FERNANDEZ, J. E. Formulation of Emulsifiable Cutting Fluids and Extreme Pressure Behaviour. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, pp. 139-145, 2007.

CAO, T.; SUTHERLAND, J. W. Investigation of Thread Tapping load Characteristics through Mechanistics Modeling and Experimentation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 14, p. 1527-1538, 2002.

CARVALHO, A. O. **Análise Dinâmica do Processo de Roscamento por Conformação na Liga de Magnésio AM60**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2011.

CHEN, M. L. G.; ZHANG, X. Optimization Studies on Hole-Making Tools for High-Performance Cutting Austenitic Stainless Steel. **Machining Science and Technology** 11, 183–200, 2007.

CHENG, C., PHIPPS, D., ALKHADDAR, R.M. Treatment of Spent Metalworking Fluids. **Water Research**, v.39, p. 4051–4063, 2005.

CHINAS-CASTILLO, F.; LARA-ROMERO, J.; ALONSO-NUNEZ, A.; BARCEINAS-SANCHEZ, J. D. O.; JIMENEZ-SANDOVAL, S. Friction Reduction by Water-Soluble Ammonium Thiometallates. **Tribology Letter**, v. 26, pp. 137-144, 2007.

CHILDERS, J. **The chemistry of metalworking fluids**. Metalworking Fluids. New York: Marcel Dekker, p.165-190, 1994.

CHWIF, L., MEDINA, A.C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria & Aplicações**, São Paulo, Ed. Elsevier, 4^a.ed. 320p., 2014.

CLARENS, A.F.; ZIMMERMAN, J. B.; LANDIS, H. R.; HAYES, K.F.; SKERLOS, S.J. Experimental Comparison of Vegetable and Petroleum base Oils in Metalworking Fluids using the Tapping Torque Test. **In:** Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Manufacturing, pp. 19-21, 2004.

CLARENS, A. F.; HAYES, K. F.; SKERLOS, S. J. Feasibility of Metalworking Fluids delivered in Supercritical Carbon Dioxide. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 8, n. 1, p. 47-53, 2006.

CLAUSS, F. J. **Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids**. Academic Press, London, 1972.

COELHO, R.T.; ARAI, R.; WATANUKI, H. M.; BORGES, E. An Experimental Investigation on Wear aspects of Tapping Operation on Hardened Steels. **Machining science and technology**, v. 10, n. 2, p. 235-250, 2006.

COPPINI, N.L.; FERREIRA, S.S.; ALVES, D.J.; BAPTISTA, E.A. Maximização da Produtividade e Minimização de Custos na Produção de Furos com Brocas Especiais. *In:* VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM, Uberlândia, MG, Brasil, 2014.

CRESWELL, J. W. **Research Design – Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches**. 3. Ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2009.

CULBERTSON, R. J.; BURNS, F. C.; FRANZEN, W.; LOWDER, L. J.; RICCA, J. J.; GONZALES, A. Performance Evaluation of Ion-implanted Cutting Tools and Dies. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 56, p. 652-655, 1991.

DA CUNHA, J.T. **Estudo dos desgastes de rodas de pontes rolantes utilizadas em Siderurgia**. Tese de Mestrado programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalurgia e materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

DA MOTA, P. R. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

DA MOTA, P.R. **Estudo do Processo de Rosqueamento com Machos de Corte de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

DA MOTA, P. R.; JUNIOR, F. G. N.; REIS, A. M.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. Efeito da Variação do Avanço Programado na Máquina CNC durante o Rosqueamento com Machos de Roscar em Ferro Fundido Vermicular. *In:* Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF, Caxias do Sul, RS, Brasil, 2011.

DA SILVA, E. N.; BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Otimização de Processos de Usinagem: Análise de Viabilidade na adoção de Condicionamento Superficial em Machos Máquina. *In:* XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, Salvador, BA, Brasil, 2013.

DE CARVALHO, A. O.; BRANDAO, L. C.; PANZERA, T. H.; LAURO, C. H. Analysis of Form Threads using Fluteless Taps in Cast Magnesium Alloy (AM60). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 8, p. 1753-1760, 2012.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R. A methodology to Determine Surfasse Durability in Multifunctional Coatings applied to Soft Substrates. **Tribology International**, v. 39, p. 769-773, 2006.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R.; DEMAS, N. G.; POLYCARPOU, A. A. Effect of the Actual Environment present in Hermetic Compressor on the Tribological Behaviour of a Si rich Multifunctional DLC Coating, **Wear**, v. 267, p. 907-915, 2009.

DE OLIVEIRA, F.S., BAPTISTA, E.A., PEREIRA, F.H., COPPINI, N.L., FERREIRA, S.S. Avaliação de Desempenho Econômico da Aplicação de um Condicionador Metálico em Machos de Corte no Processo de Rosqueamento Interno, *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, Curitiba, São Paulo, Brasil, 2014.

DE SOUZA, A.J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 226f., 2004.

DEL VAL, A. G.; FERNANDEZ, J.; ARIZMENDI, M.; VEIGA, F.; URIZAR, J. L.; BERRIOZABAL, A.; DIEGUEZ, P. M. On Line Diagnosis Strategy of Thread Quality in Tapping. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 208-217, 2013.

DEL VAL, A. G.; FERNANDEZ, J.; DEL CASTILLO, E.; ARIZMENDI, M.; VEIGA, F. Monitoring of Thread Quality when Tapping Nodular Cast Iron with TiN-coated HSS Cutting Taps. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5-8, p. 1273-1282, 2013.

DEMETRIO, V.B. **Desenvolvimento de aços auto lubrificantes via compactação de pós granulados**. Tese de Mestrado, programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais - Universidade Federal de Santa Catarina 2012.

DERFLINGER, V., BRÄNDLE, H., ZIMMERMANN, H. New Hard/Lubricant Coating for Dry Machining. **Surface and Coatings Technology**, v.113, p. 286–292, 1999.

DEVORE, J.L. **Probability and Statistics for Engineering and Sciences**, Brooks-Cote, Thomson Learning Publication, Canadá, 8th. ed., 768p, 2011.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: 8. ed.: Artliber Editora, 2013. 270p.

DONNET, C.; ERDEMIR, A. Historical Developments and New Trends in Tribological and Solid Lubricant Coating. **Surface & Coatings Technology**. v. 181, p. 76-84, 2004.

DOS ANJOS, G.C. **Utilização de matérias primas vegetais para a aplicabilidade como inibidores de corrosão**. Tese de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012

ERDEMIR, A. **Modern Tribology Handbook**, vol. II, Ed. B. Bhushan, CRC Press, p. 787-825, 2001.

FANG, J.; XIA, Y.; LIU, W. The Tribological Behavior of Bismuth Dithiophosphate as Water-Based Additive in Aluminium Alloy Tapping. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 62, n. 6, p. 327-331, 2010.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3 ed. v.1, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1995. 751p.

FRANCO JR., A. R. **Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e H13**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FROMENTIN, G. **Etude Mécanique et Technologique du Taraudage par Déformation: Application aux aciers prétraités**, (These Docteur) – L'ecole Nationale Supérieure D'Arts et Métiers, Paris Tech. 2004.

FROMENTIN, G., BIERLA, A., MINFRAY, C., POULACHON, G. An Experimental Study on the Effects of Lubrication in Form Tapping. **Tribology International**, v.43(9), 1726-1734, 2010.

GIL, A. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U.; A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua aplicação nos Processos de Corte. **Revista Máquinas e Metais**, n.385, p.22-38, 1998

ISO 3685. **Tool Life Testing Single-Point Turning Tools**, 1993.

JAREO, J. E.; BRADBURY, J. **Tool Coating for Dry Machining Conditions**. Modern Machine Shop, v.1, p. 212-216, 1999.

JIANXIN, D.; ZE, W.; YUNSONG, L.; TING, Q.; JIE, C. Performance of Carbide Tools with Textured Rake-Face filled with Solid Lubricants in Dry Cutting Processes. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 30, n. 1, p. 164-172, 2012.

JIN, M.; WATANABE, S.; MIYAKE, S.; MURAKAWA, M. Trial Fabrication and Cutting Performance of CBN-coated Taps. **Surface and Coatings Technology**, v. 133, p. 443-447, 2000.

JOHNSON, M. Tapping. *In:* American Society for Metals. Metals Handbook, 9.ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p. 255-267. 1989.

JUSTE, K. R. C. **Caracterização Tribológica da Lubrificação Sólida.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

KALIN, M.; KOGOVSEK, J.; REMSKAR, M. Mechanisms and Improvements in the Friction and Wear Behavior using MoS₂ Nanotubes as Potential Oil Additives. **Wear**, v. 280, p. 36-45, 2012.

KISHAWY, H. A.; DUMITRESCU, M.; ELBESTAWI, M. A. Effect of Coolant Strategy on Tool Performance, Chip Morphology and Surface Quality during High-Speed Machining of A356 Aluminum Alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 2, p. 219-227, 2005.

KLAUBERG, A.L. **Aplicação de Mínimas Quantidades de Fluido de Corte nos Processos de Furação e Rosqueamento Interno de Eixos para Motores Elétricos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

KLOCKE, F.; EISENBLATTER, G. Machinability investigation of the Drilling Process using Minimal Cooling Lubrication techniques. *In:* Annals of the CIRP, v.46, p.19-24, 1997.

KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. Minimalmengenschmierung – Systeme, Medien, Einsatzbeispiele und ökonomische Aspekte der Trockenbearbeitung, Trockenbearbeitung von Metallen. *In:* Proc. of the VDI-Seminar, Stuttgart, v. 18, p. 2.1-2.20, 2003.

KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K.; SCHIFFLER, M.; DESSARZIN, P.; LUNG, D.; FRANK, H. Adapted DLC coatings for increasing Tapping Performance in TiAl6V4. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 44, n. 8, p. 710-715, 2013.

KOELSH, J.R. Rosqueamento De Alto Desempenho. **Máquinas e Metais**, n. 432, p. 20-35, 2002.

KOMANDURI, R.; HOU, Z. B. General Solutions for Stationary/Moving Plane Heat source Problems in Manufacturing and Tribology. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.43, p.1679-1698, 2000.

KOMURA, A.; YAMAMOTO, M.; OKUSIMA, K. Study of a Tapping Method for Large Size Threads (1st report) - Consideration for the Initial Thrust Force at Tapping. **Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering**. v.24, n.2, jun, p.100-105. 1990.

KOMURA, A.; YAMAMOTO, M.; IKAWA, N. Study of Tapping Method for Large Size Threads (2nd report) - Consideration for the Oversized Effective Diameter by Tapping. **Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering**. v. 24, n.3, set, p.178-183, 1990.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**, v.5, Berlin: Springer, 471p.

KRIONI, N.K. Frictional Properties of Metallic Surfaces Separated by a solid lubricant film at high temperature. **Russian Engineering Reseach**, v.32, n.1, p. 111-113, 2012.

KUO, K. L. Experimental Investigation Of Ultrasonic Vibration-Assisted Tapping. **Journal of materials processing technology**, v. 192, p. 306-311, 2007.

KUSTAS, F. M.; FEHREHN BACHER, L. L.; KOMANDURI, R. Nanocoatings on Cutting Tools for Dry Machining, *In: CIRP Annals Manufacturing Technology*, v.46, p.39-42, 1997.

LANSDOW, A. R. Molybdenum Disulphide Lubrication. Amsterdam: **Tribology Series**, Elsevier, v. 35, p. 56-58, 1999.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. A Critical Assessment of Lubrication techniques in Machining Processes: a case for Minimum Quantity Lubrication using Vegetable Oil-based Lubricant. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 210-221, 2013.

LI, W.; LI, D.; NI, J. Diagnosis of Tapping Process using Spindle Motor Current. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 1, p. 73-79, 2003.

LI, H. Z.; ZENG, H.; CHEN, X. Q. An Experimental Study of Tool Wear and Cutting force Variation in the End Milling of Inconel 718 with coated Carbide inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, pp. 296-304, 2006.

LIAN, Y. F.; YU, L. G.; XUE, Q. J. The Antiwear and Extreme Pressure Properties of some Oil-water double Soluble rare Earth complexes part I: their tribological behaviour in water. **Wear**, v. 196, pp. 188-192, 1996.

LINSS, M. Processo De Rosqueamento De Alto Desempenho. **Revista Máquinas e Metais**, Aranda Editora – ano XXXIX, n. 443, p. 24-33, 2002.

LIU, T.; LEE, J.; LIU, G.; WU, Z. Monitoring and Diagnosis of the Tapping Process for Product Quality and Automated Manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, n. 5-8, p. 1169-1175, 2013.

LUDEMA, K. C. **Friction, Wear and Lubrication**. CRC Press: New York, p. 123-124, 1996.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 371 p.

MEZENTSEV, O. A.; ZHU, R.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; KLINE, W. A. Use of Radial Forces for Fault Detection in Tapping. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 4, p. 479-488, 2002.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, v.3, 463p., 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, New York: John Wiley & Sons, 8th., 725p., 2012.

NAND, A.R.; DAVIM, J.P. A Study of Drilling Performances with Minimum Quantity of Lubricant using Fuzzy Logic rules. **Mechatronics**, v.19, n.2, p.218-232, 2009.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamentos e Otimização de Experimentos**, v.2, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 229p., 1995.

OSG. **Manual Técnico – Machos**. OSG Ferramentas de Precisão Ltda. v.4, São Paulo, p. 01 - 58, 2011.

PATEL, H. J., PATEL, B. P., PATEL, S. M. A Review on Thread Tapping Operation and Parametric Study. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, p. 109-113, 2012.

PEREIRA, I.C. **Análise do Torque e da Força Axial, em Diferentes Condições de Corte durante o Rosqueamento de dois Ferros Fundidos Cinzentos (CrCuSn e CrCuSnMo) e um Ferro Fundido Vermicular da Classe 350**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PRITCHARD, A. Statistical Bibliography or Bibliometrics? **Journal of Documentation**, v. 25, n. 4, p. 348-349, 1969.

RAKIC, R.; RAKIC, Z. The Influence of the Metal Working Fluids on Machine Tool Failures. **Wear**, v. 352, pp. 438-444, 2002.

REDDY, N. S. K.; NOUARI, M.; YANG, M. Development of Electrostatic Solid Lubrication System for Improvement in Machining Process Performance. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 9, p. 789-797, 2010.

REIS, A. M. **Avaliação do Desempenho de Diferentes Materiais de Ferramenta no Processo de Rosqueamento interno de Ferro Fundido Cinzento, através do Monitoramento do Desgaste**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

REITER, A. E.; BRUNNER, B.; ANTE, M.; RECHBERGER, J. Investigation of Several PVD Coatings for Blind Hole Tapping in Austenitic Stainless Steel. **Surface and Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5532-5541, 2006.

SAKAMOTO, Y.; TAKAYA, M.; ISHII, Y.; IGARASHI, S. Surface Modified Tool Fabricated by Radical Nitriding. **Surface and Coatings Technology**. v. 142-144, p. 152-155, 2001.

SALES, M.H.; BRITO, L.C.; ANDRADE, P.S.; DUMONT, T.S.; BRITO, J.N.; PORTES, D.F. Diagnóstico do estado de conservação de equipamentos industriais através da análise de óleo: casos de sucesso, *In: XI Congresso de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial*, Porto Alegre, RS, ago. 2011.

SANDVIK COROMANT (a): *In: Knowledge Threading Tapping Standard*. Disponível em:<http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/threading/tapping_choice_of_tools/standard/pages/default.aspx>. Acessado em 12 dez., 2013.

SANDVIK COROMANT (b): *In: Tap Catalogue*. Disponível em:<<http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/downloads/pages/search.aspx?q=Catalogues&rootsite=%5eptpt%24&applications=%5e%22threading+tools%22%24>>. Acessado em: 12 dez., 2013.

SANTANA, J.S.; FARIAS, A.C.M.F.; DE SANTANA, J.S.; BARBOSA, C.R.F.; MEDEIROS, J.T.N. Estudo tribológico de óleos biodegradáveis de coco e rícino através de ensaios abrasivos. **Holos**, V.4, n.26, 2010.

SANTOS, S.C. **Estudo da Influência de Ferro Fundido Cinzento com brocas de metal duro integral.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 108p., 1999.

SCHULZ, H.; EMRICH, K; FINZER, T.; DÖRR, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Revista Máquinas e Metais.** São Paulo, p. 30-37, 2000.

SHA, J.; NI, J.; WU, S.M. Development of a Tap Wear Monitoring Scheme Proceedings of Manufacturing International '90. Part4: **Advances in Materials and Automation**, Atlanta: GA, 1990.

SLINEY, H. E. Solid lubricant materials for high temperatures: A review. **Tribology International**, v. 15, p. 293-302, 1982.

SOUZA, E. M.; ROSA, A. F. C.; BAPTISTA, E.A.; COPPINI, N. L. New Operational Support System For Cutting Process Optimization. *In:* International Conference on Industrial Engineering and Operations Management - ICIEON, Guimarães, Portugal. 2012.

SRIVASTAVA, A. K.; FINN, M. E.; KINNEY, M.A. Tool/Work Material/Cutting Fluid Interaction While Tapping Into AA319 and AA356 Lost Foam Aluminum Castings. **Transaction of NAMRI/ASME 32**, 263–270, 2004.

STEPHAN, P.; MATHURIN, F.; GUILLOT, J. Analytical Study Of Maximal Tapping Torque During Forming Screw Process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 2, p. 212-221, 2011.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Ecological Aspects Of The Cutting Fluids And Its Influence On Quantifiable Parameters Of The Cutting Processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 1, p. 181-189, 2001.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos.** Ed. Da UFSC, Florianópolis, 326 p., 1992.

SULLIVAN, D., O'COTTERELL, M. Temperature measurement in single point turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v.118, p. 301–308, 2001.

SUPEKAR, S. D.; CLARENS, A. F.; STEPHENSON, D. D.; SKERLOS, S. J. Performance Of Supercritical Carbon Dioxide Sprays As Coolants And Lubricants In Representative Metalworking Operations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, p. 2652-2658, 2012.

TANAKA, R.; YAMAZAKI, S.; HOSOKAWA, A.; FURUMOTO, T.; UEDA, T.; OKADA, M. Analysis of Cutting Behavior during Tapping and Measurement of Tool Edge Temperature Measured by a Two-Color Pyrometer. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v. 7, p. 115-124, 2013.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H. Investigation on Minimum Quantity Lubricant- MQL grinding of 100 Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.50, n.8, p.698-708, oug. 2010.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th. Edition, Butterworths – Heinemann, 446 p., 2000.

TSAO, C. C.; KUO, K. L. Ultrasonic-assisted vibration tapping using taps with different coatings. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 22, p. 764-768, 2012.

UZUN, G.; KORKUT, İ. The Effect Of Cryogenic Treatment On Tapping. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 1-4, p. 857-864, 2013.

VANTI, N. A. P. Da Bibliometria à Webometria: uma Exploração Conceitual dos Mecanismos Utilizados para Medir o Registro da Informação e a Difusão do Conhecimento. **In:** Ciência da Informação, Brasília, v. 31, n. 2, p. 152-162, 2002

VELDHUIS, S. C.; DOSBAEVA, G. K.; BENGA, G. Application of Ultra-Thin Fluorine-content Lubricating Films to Reduce Tool/Workpiece Adhesive Interaction during Thread-Cutting Operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 3, p. 521-528, 2007.

VIANA, R. **Desempenho De Brocas De Hss Revestidas Na Furação De Ligas Da Al-Si**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2004.

WAKABAYASHI, T.; SUDA, S.; INASAKI, I.; TERASAKA, K.; MUSHA, Y.; TODA, Y. Tribological Action and Cutting Performance of MQL media in Machining of Aluminum. *In: CIRP Annals Manufacturing Technology*, v. 56, n. 1, pp. 97-100, 2007.

WEINERT, K.; INASAKI, L., SUTHERLAND, J. W.; WAKABAYASHI, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. **Manufacturing Technology**, v.3, n. 2, p. 511–537, 2004.

WENLONG, S.; JIANXIN, D.; ZE, W.; HUI, Z.; PEI, Y.; XING, A. Cutting Performance Of Cemented-Carbides-Based Self-Lubricated Tool Embedded With Different Solid Lubricants. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 52, n. 5-8, p. 477-485, 2011.

YIN, B.; HAN, R. Investigation of the Torque Characteristics in Vibration Tapping of Hardened Steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 6, p. 623-630, 2006.

ZEDAN, Y.; SAMUEL, F. H.; SAMUEL, A. M.; DOTY, H. W. Effects of Fe Intermetallics on the Machinability of Heat-Treated Al-(7-11)%Si alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, pp. 245-257, 2010.

ZEUS, T. High Performance Tapping and Thread Forming. *In: Proceedings of the Int. Conf. "Smart Solutions for metal cutting", EMUGE*, p. 1-15, Aachen Germany, February, 2005.

ZHANG, B.; YANG, F.; WANG, J. Fundamental Aspects in Vibration-Assisted Tapping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 132, n. 1, p. 345-352, 2003.

ZIMMERMAN, J.; TAKAHASHI, S.; HAYES, K.F.; SKERLOS, S.J. Experimental and Statistical Design Considerations for Economical Evaluation of Metalworking Fluids Using the Tapping Torque. **Lubrication Engineering**, v.59, p.17-24, 2003b.