

IGOR CÉZAR PEREIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
ROSQUEAMENTO INTERNO POR USINAGEM E
LAMINAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

IGOR CÉZAR PEREIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE ROSQUEAMENTO
INTERNO POR USINAGEM E LAMINAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2014

Dedico este trabalho a todos os meus amigos, a minha namorada (Taiana), as minhas irmãs (Fernanda e Alessandra) e principalmente a minha mãe (Juselem Alves Ferreira Pereira), que fez de tudo em sua vida para que pudesse ter a melhor educação possível e que me deixou como principal ensinamento que um homem deve fazer o que é certo independente das consequências.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que criou todas as situações favoráveis à realização deste trabalho.

A minha mãe, Juselem Alves Ferreira, e a minha irmã, Fernanda Alves Pereira, pela dedicação e apoio em todos esses anos.

Ao meu orientador a quem considero mais um amigo do que realmente um orientador, por todos esses anos de parceria, pela oportunidade de crescer como profissional.

A minha namorada Taiana Moreira Zenha, pela paciência e carinho.

Ao amigo e parceiro de doutorado Daniel Fernandes da Cunha, que sempre me ajudou em relação às dificuldades criadas pela distância.

Aos professores Alisson Rocha Machado e Rosemar Batista da Silva pela ajuda e incentivo.

Ao professor e amigo Gilmar Guimarães, pelas vezes que me livrou de problemas e me aconselhou.

Ao laboratório de projetos mecânicos e ao professor Cleudmar Araújo.

A minha irmã, Alessandra Alves Pereira e aos demais familiares que me apoiaram.

Aos amigos de laboratório, Ricardo, Armando, Jairo, Cleudes e todos os outros cujo nome não foi citado.

Ao laboratório de Mecânica e Estruturas.

Aos técnicos de laboratório Lázaro Henrique Alves Vieira e Eurípedes Balsanulfo Alves da Universidade Federal de Uberlândia.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À Universidade Federal de Ouro Preto.

À OSG SULAMERICANA pelo apoio.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Por fim a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram e não foram citadas aqui, mas não por falta de reconhecimento.

PEREIRA, I. C. **COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE ROSQUEAMENTO INTERNO POR USINAGEM E LAMINAÇÃO**. 2014. 121p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

O rosqueamento interno com macho de corte e laminador são processos de fabricação extremamente difundidos dentro da indústria nacional e mundial. Contudo, as pesquisas ainda são poucas, sendo a maior parte do conhecimento dominado e difundido pelos fabricantes de ferramentas. Mas até o conhecimento adquirido com o tempo pelos fabricantes ainda é limitado e por conta dos segredos industriais que eles protegem as informações mais relevantes não são repassadas. O objetivo desse trabalho é entender melhor cada processo, comparar suas vantagens e desvantagens em condições iguais para assim entender em quais situações cada processo pode ser vantajoso ou não. Para esta avaliação as duas principais condições de entrada que foram variadas nos dois processos foram o material da peça e a velocidade de corte. O rosqueamento interno, ao contrário de processos como torneamento ou fresamento, tem algumas restrições e dificuldades na alteração das condições de corte. A partir destas condições de entrada, os parâmetros de saída avaliados foram o toque, a força de avanço, a microdureza dos filetes e a carga de ruptura das roscas no ensaio de tração. Testes complementares foram realizados para compreender melhor as características dos processos de rosqueamento interno como a variação da espessura e comprimento rosqueado, alteração do passo, do revestimento da ferramenta e uma avaliação do torque filete a filete. Um dos resultados encontrado foi que a carga de ruptura das roscas M10X1.5 laminadas e usinadas foram estatisticamente iguais, mas tendo uma tendência em que a rosca usinada suporte um esforço de tração maior do que as roscas laminadas.

Palavras Chave: Rosqueamento interno. Roscas usinadas. Roscas laminadas. Torque. Microdureza.

PEREIRA, I. C. **COMPARISON BETWEEN THE PROCESSES OF INTERNAL THREAD ROLLING AND TAPPING**. 2014. 121p. Doctorate Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

Internal threading with formed and cut taps are extremely widespread manufacturing processes within both national and global industry. However, research are still few, being most part of the knowledge mastered and disseminated by tool manufacturers. Yet even the knowledge acquired by the manufacturers over time is still limited and due to the industrial secrets they protect, the most relevant information are not forwarded. The aim of this paper is to better understand each process and compare their advantages and disadvantages within equal conditions, in order to understand in which situations each process can be advantageous or not. For this assessment, the two main input conditions that were varied in both processes were the workpiece material and the cutting speed. Internal threading, unlike processes such as turning and milling, has a few restrictions and difficulties regarding the alteration of cutting conditions. From these input conditions, the evaluated output parameters were torque, thrust force, microhardness of the screw threads and load break of the threads, in tensile test. Other additional tests were conducted in order to better comprehend the characteristics of the internal threading processes, such as the threaded thickness and length variation, pitch alteration, tool coating variation and a thread by thread torque assessment. One of the found results was that the load break of M10x15 formed and cut threads were statistically the same, yet there was a tendency pointing that the cut thread holds greater tensile stress than the formed screws.

Keywords: Tapping. Cut Thread. Formed Thread. Torque. Microhardness.

Lista de Figuras

Figura 2. 1 - Representação das partes de um macho de corte (DORMER, 2013)	7
Figura 2. 2 - Características da entrada de um macho de corte (TITEX PLUS, 1999; BEZERRA, 2003; DA MOTA, 2006)	8
Figura 2. 3 - Representação do detalonamento em um macho de corte (TITEX PLUS, 2012)	8
Figura 2. 4 - Comparativo do torque com uma ferramenta com detalonagem convencional e outra com uma maior detalonagem (TITEX PLUS, 2012, modificado)	9
Figura 2. 5 - Tipos de ângulos de saída de macho de corte (OSG, 1999)	9
Figura 2. 6 - Tipos de canais (OSG, 2012)	10
Figura 2. 7 - Processo de rosqueamento e geometria do cavaco (CAO; SUTHERLAND, 2002, Modificado)	12
Figura 2. 8 - Diferentes formatos de macho laminador (EMUGE, 2012)	13
Figura 2. 9 - (a) Macho laminador; (b) Seção Transversal (CHOWDHARY et al., 2003, modificado)	14
Figura 2. 10 - Seção transversal de machos laminadores (EMUGE, 2012, Modificado)	14
Figura 2. 11 - Características dos machos laminadores (IVANOV; KIROV, 1997)	15
Figura 2. 12 - Rosqueamento por laminação (EMUGE, 2013)	16
Figura 2. 13 - Padrão de escoamento dos grãos (FROMENTIN, 2004)	17
Figura 2. 14 - Fluxo de material durante o rosqueamento por laminação (DOMBLESKY & FENG, 2002, Modificado)	19
Figura 2. 15 - Representação do sinal de torque durante o rosqueamento interno por usinagem (FANTIN, 1992; REITER et al., 2006; DA MOTA, 2006)	20
Figura 2. 16 - Evolução do torque durante o rosqueamento por laminação (FROMENTIN et al. 2010, modificado)	21
Figura 2. 17 - Distribuição de calor durante a usinagem (CIMM, 2014)	22
Figura 2. 18 - Curvas de torque no rosqueamento por laminação para diferentes lubrificantes (FROMENTIN et al., 2010, modificado)	23
Figura 2. 19 - Síntese dos resultados de torque no rosqueamento por laminação para diferentes lubrificantes (FROMENTIN et al., 2010, modificado)	24
Figura 2. 20 - Eficiência do torque no rosqueamento interno por usinagem em cinco diferentes óleos, em solução e em emulsão (semi-sintético) (ANDRES, 2004; SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010, modificado)	25

Figura 2. 21 - Torque máximo durante o rosqueamento interno por laminação usando cabeçote flutuante e diferentes lubrificantes: 1: cloreto de parafina; 2: ácido oleico; 3: valtsol; 4: resinoide 31T (IVANOV; KIROV, 1997, modificado).....	26
Figura 2. 22 - Sinal de torque na quebra do macho (AHN et al., 2003, modificada)	27
Figura 2. 23 - Torque em função do comprimento da rosca e da velocidade de corte, durante o rosqueamento de uma chapa escalonada, com furos passantes com um macho M13X1,5 (DA MOTA, 2009)	28
Figura 2. 24 - Média dos torques para diferentes espessuras rosqueadas com um macho M6X1 a uma velocidade de corte de 35m/min a seco, material ferro fundido vermicular da classe 350 (PEREIRA; NAVES; DA SILVA, 2010).....	29
Figura 2. 25 - Variação do torque durante o rosqueamento interno por usinagem. (a) HSS rosqueamento a seco; (b) HSS revestida com DLC, rosqueamento a seco (BHOWMICK, 2010, modificado)	30
Figura 2. 26 - Sinal de torque durante o rosqueamento interno por laminação de um aço AISI 1045, com velocidade de corte de 10m/min.....	31
Figura 2. 27 - Diferentes posições do macho laminador durante o processo (FROMENTIN et al., 2010, modificado).....	32
Figura 3. 1 - Teste de rosqueamento por usinagem do aço AISI 414.....	34
Figura 3. 2 - Ferramentas usadas para preparação dos furos para rosqueamento	35
Figura 3. 3 - Machos de corte e laminadores usados para os testes de rosqueamento	36
Figura 3. 4 - Macho de corte modificado para análise filete a filete	37
Figura 3. 5 - Comprimento rosqueado	38
Figura 3. 6 - Espessura rosqueada	38
Figura 3. 7 - Corpos de prova para ensaios de dureza e microdureza	39
Figura 3. 8 - Corpos de prova para ensaio de microdureza da seção transversal do filete de rosca.....	39
Figura 3. 9 - Microdurômetro DuraScan 10 EMCOTEST e um durômetro M4C 025 G3 EMCOTEST	40
Figura 3. 10 - Resultado de microdureza.	41
Figura 3. 11 - Pontos de medição da microdureza na seção do filete de rosca.....	41
Figura 3. 12 - Corpo de prova para ensaio de tração.....	43
Figura 3. 13 - Ensaio de tração dos filetes de rosca.....	44
Figura 4. 1 - Dureza média dos materiais	47
Figura 4. 2 - Microdureza média dos materiais	48
Figura 4.3 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço SAE 1045.....	49

Figura 4. 4 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço AISI 4140	50
Figura 4. 5 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para a liga de alumínio 6351	51
Figura 4. 6 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço N2711M	52
Figura 4. 7 - Curva de torque do processo de usinagem para diferentes velocidades de corte para o aço endurecido N2711M	52
Figura 4. 8 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido VP ATLAS	53
Figura 4. 9 - Curva de torque do processo de usinagem para diferentes velocidades de corte para o aço endurecido VP ATLAS	54
Figura 4. 10 - Torque de retorno no rosqueamento interno por usinagem de um ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo a seco	55
Figura 4. 11 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço SAE 1045	56
Figura 4. 12 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço AISI 4140	57
Figura 4. 13 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para a liga de alumínio 6351	58
Figura 4. 14 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido N2711M	60
Figura 4. 15 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido VP ATLAS	60
Figura 4. 16 - Sinal de força de avanço em diferentes velocidades de corte e diferentes materiais durante o rosqueamento interno por usinagem	63
Figura 4. 17 - Sinal de força de avanço em diferentes velocidades de corte e diferentes materiais durante o rosqueamento interno por laminação	66
4.5. Efeito da velocidade de corte na microdureza em regiões próximas aos filetes das roscas fabricadas	66

Figura 4. 18 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza do aço SAE 1045.....	67
Figura 4. 19 - Variação da microdureza com a profundidade (Fromentin et al., 2005)	68
Figura 4. 20 - Variação da microdureza com a variação do diâmetro do pré-furo e da velocidade de laminação em uma liga de magnésio AM60 (Carvalho et al., 2012).....	68
Figura 4. 21 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas do aço SAE 1045	69
Figura 4. 22 - Variação da microdureza com a profundidade usando três tipos fluidos de corte (Belluco e Chiffre, 2002)	70
Figura 4. 23 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza das roscas laminadas do aço AISI 4140	70
Figura 4. 24 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas do aço AISI 4140.....	71
Figura 4. 25 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza das roscas laminadas de uma liga de alumínio 6351	72
Figura 4. 26 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas de uma liga de alumínio 6351	73
Figura 4. 27 - Região deformada após o rosqueamento interno por usinagem do aço AISI 316L (Belluco e Chiffre, 2002)	73
Figura 4. 28 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 10m/min no aço SAE 1045.....	74
Figura 4. 29 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 20m/min no aço SAE 1045.....	75
Figura 4. 30 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 30m/min no aço SAE 1045.....	75
Figura 4. 31 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 10m/min no aço AISI 4140	76
Figura 4. 32 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 20m/min no aço AISI 4140	76
Figura 4. 33 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 30m/min no aço AISI 4140	77
Figura 4. 34 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 10m/min em uma liga de alumínio 6351	77
Figura 4. 35 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 20m/min em uma liga de alumínio 6351	78
Figura 4. 36 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 30m/min em uma liga de alumínio 6351	78

Figura 4. 37 - Comparação da microdureza do aço SAE 1045, do AISI 4140 e de uma liga de alumínio 6351 à 20m/min no processo de rosqueamento por laminação	79
Figura 4. 38 - Comparação da microdureza do aço SAE 1045, do AISI 4140 e de uma liga de alumínio 6351 à 20m/min no processo de rosqueamento por usinagem.....	79
4.6. Influência do material na força de avanço e no torque	80
Figura 4. 39 - Torque durante o rosqueamento por laminação em diferentes materiais	80
Figura 4. 40 - Força de avanço no rosqueamento por laminação em diferentes materiais ...	81
Figura 4. 41 - Torque de retorno para o rosqueamento por laminação em diferentes materiais	81
Figura 4. 42 - Torque durante o rosqueamento por usinagem em diferentes materiais.....	82
Figura 4. 43 - Força de avanço no rosqueamento por usinagem em diferentes materiais....	83
Figura 4. 44 - Torque de retorno para o rosqueamento por usinagem em diferentes materiais	83
Figura 4. 45 - Carga de ruptura da liga de alumínio 6351 em função da velocidade de corte/laminação	84
Figura 4. 46 - Carga de ruptura do aço SAE 1045 em função da velocidade de corte/laminação	85
Figura 4.47 - Carga de ruptura do aço AISI 4140 em função da velocidade de corte/laminação	86
Figura 4. 48 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração	88
Figura 4. 49 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração	88
Figura 4. 50 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração	89
Figura 4. 51 - Variação do torque médio com o comprimento rosqueado, quando usinando a uma velocidade de corte de 10 m/min.....	90
Figura 4. 52 - Sinal de torque para diferentes comprimentos rosqueados no processo de rosqueamento por usinagem a uma velocidade de corte de 10 m/min.....	91
Figura 4. 53 - Sinal de torque para diferentes comprimentos rosqueados no processo de rosqueamento por laminação a uma velocidade de laminação de 10 m/min.....	92
Figura 4. 54 - Força de avanço em diferentes comprimentos rosqueados durante o processo de rosqueamento por laminação.....	93
Figura 4. 55 - Força de avanço em diferentes comprimentos rosqueados durante o processo de rosqueamento por usinagem.....	94
Figura 4.56 - Torque em diferentes espessuras rosqueadas para o processo de rosqueamento por laminação e usinagem	95
Figura 4. 57 - Força de avanço em diferentes espessuras rosqueadas por laminação	96
Figura 4. 58 - Força de avanço em diferentes espessuras rosqueadas por usinagem	96

Figura 4. 59 - Torque durante o rosqueamento por laminação usando ferramentas com e sem revestimento	97
Figura 4. 60 - Sinal de torque durante o rosqueamento por usinagem usando ferramentas com e sem revestimento (Da Mota, 2006)	97
Figura 4. 61 - Macho laminador sem revestimento	98
Figura 4. 62 - Torque de retorno no rosqueamento por laminação usando macho com e sem revestimento	99
Figura 4. 63 - Força de avanço no rosqueamento por laminação usando macho com e sem revestimento a velocidade de 20m/min	99
Figura 4. 64 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 10 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045	100
Figura 4. 65 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045	101
Figura 4. 66 - Comparação entre os gráficos de torque em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045	102
Figura 4. 67 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 10 m/min, para roscas laminadas no SAE 1045	103
Figura 4. 68 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para roscas laminadas no SAE 1045	103
Figura 4. 69 - Torque médio por filete no rosqueamento por usinagem com uma velocidade de corte de 10m/min	104
Figura 4. 70 - Sinal de torque para cada filete da parte cônica	105
Figura 4. 71 - Sinal de força de avanço para cada filete da parte cônica	105
Figura 4. 72 - Profundidade de corte realizada por cada filete do macho de corte	106
Figura 4. 73 - Rosca produzida pelo rosqueamento filete a filete: (a) primeiro filete, (b) segundo filete, (c) terceiro filete, (d) quarto filete e (e) quinto filete	107
Figura 4. 74 - Variação do torque com o diâmetro do pré-furo no aço SAE 1045 para a velocidade de 20m/min	108
Figura 4. 75 - Influência do diâmetro do pré-furo no torque (Carvalho et al., 2012).....	109
Figura 4. 76 - Roscas laminadas com aumento de 12X: (a) pré-furo 9,2mm e (b) pré-furo 9,1mm	110
Figura 4. 77 - Sinal de força de avanço em função do diâmetro do pré-furo no rosqueamento por laminação	111
Figura 4. 78 - Sinal de força de avanço em função do diâmetro do pré-furo no rosqueamento por usinagem	111

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1 - Composição química dos materiais.....	34
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais.	48
Tabela 4.2 - Comparação entre os processos de rosqueamento (Baldo et al., 2010)	87

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI.....	Instituto Nacional Americano de Padronização
ASTM.....	“American Society for Testing and Materials
C.....	Carbono
Cr.....	Cromo
Cu.....	Cobre
d_0 , $d_{1,0}$ e $d_{2,0}$	diâmetros de aferição da rosca
DIN.....	Deutsches Institut für Normung
d_{max} e d_{min}	distâncias mínimas e máximas do centro às cristas dos dentes
Fe.....	Ferro
Fig.....	Figura
FUTURA.....	Revestimento de multicamadas de TiN/TiAlN
H ₂ O.....	Água
HB.....	Dureza Brinell
HCl.....	Ácido Clorídrico
HF.....	Ácido Fluorídrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
HRC.....	Dureza Rockwell C
HSS.....	Aço rápido M7 convencional

HSS-E.....	Aço rápido especial M3 com alto teor de vanádio
HV.....	Dureza Vickers
L/D.....	Relação do comprimento (L) em função do diâmetro (D)
M10 X 1,5.....	Rosca métrica com 10 milímetros de diâmetro e passo igual a 1,5 mm
Mg.....	Magnésio
Mn.....	Manganês
Mo.....	Molibdênio
Nb.....	Nióbio
NBR.....	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ni.....	Níquel
OSG.....	Osawa Screw Grinding
P.....	Passo da rosca
P.....	Fósforo
RPM.....	Rotações por minuto
S	Enxofre
SAE.....	Society of Automotive Engineers
Si.....	Silício
Sn.....	Estanho
Tab.....	Tabela
TaC.....	Carboneto de Tântalo
TiAlN.....	Nitreto de titânio e alumínio
TiC.....	Carboneto de Titânio
TiCN.....	Carbonitreto de Titânio
TiN.....	Nitreto de titânio

V.....	Vanádio
VB _B	Desgaste de flanco médio
VB _B max.....	Desgaste de flanco máximo
Vc.....	Velocidade de corte

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xvii
I - Introdução.....	1
II - Revisão Bibliográfica	5
2.1. Rosqueamento com machos de corte.....	6
2.2. Características do rosqueamento interno por usinagem	11
2.3. O rosqueamento com machos laminadores.....	12
2.4. Características do rosqueamento interno por laminação	15
2.5. Torque na ferramenta durante o rosqueamento.....	19
2.5.1. Fatores que afetam o torque.....	22
2.5.2. Características que alteram o torque no rosqueamento por usinagem	27
2.5.3. Características que alteram o torque no rosqueamento por laminação.....	30
III - Metodologia	33
3.1. Materiais para corpos de prova.....	33
3.2. Equipamentos e ferramentas	35
3.3. Ensaio de Microdureza e dureza.....	38
3.3.1. Avaliação do filete de rosca através da microdureza	41
3.4. Ensaio de Resistência à Tração das Roscas	42
3.5. Condições de Corte	44
IV - Resultados e Discussões	47
4.1. Caracterização dos Materiais dos Corpos de Prova	47
4.2. Efeito da Velocidade de corte e laminação no sinal de torque	48

4.3. Efeito da velocidade de corte/laminação no torque de retorno do macho	54
4.4. Efeito da Velocidade de corte no sinal da força de avanço.....	61
4.5. Efeito da velocidade de corte na microdureza em regiões próximas aos filetes das roskas fabricadas	66
4.6. Influência do material na força de avanço e no torque.....	80
4.7. Efeito do processo na tensão de ruptura da rosca fabricada	84
4.8. Testes complementares	89
4.8.1. Comprimento rosqueado.....	89
4.8.2. Espessura Rosqueada.....	94
4.8.3. Revestimento.....	96
4.8.4. Alteração do avanço (passo).....	100
4.8.5. Torque e força de avanço para cada filete da parte cônica	103
4.8.6. Efeito do Diâmetro do pré-furo	108
V - Conclusão.....	113
VI - Proposta Para Trabalhos Futuros	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

CAPÍTULO I

Introdução

Por muito tempo o rosqueamento interno não recebeu o mesmo tratamento em pesquisa que outros processos, como por exemplo, o torneamento e fresamento receberam, pois, o rosqueamento, comparado com os outros processos, é uma operação de curta duração, mesmo a baixas velocidades de corte. Logo, no processo global ele tinha pouca expressão, mas com a diminuição dos tempos produtivos e com o aumento da produção, este tempo, mesmo que pequeno, representa uma parcela importante do tempo total. Com isso o processo ganha uma maior importância e atenção da indústria e dos laboratórios de pesquisa.

Segundo Badami, Hege e Patterson (2003), roscas são produzidas em massa usando dois processos básicos: usinagem e laminação. Mas apesar do produto final dos dois processos ser a rosca, os princípios básicos para produzir estas roscas são distintos entre os processos. O processo de usinagem produz roscas através da remoção de material (cavaco), o que traz uma série de problemas ao processo. Enquanto que a laminação produz roscas através da deformação plástica antes da ruptura do material da peça.

O rosqueamento interno por usinagem é uma operação de alta complexidade. Devido a características como a saída do cavaco principalmente em furos cegos e em material onde o cavaco é curto, a dificuldade de lubrificação e refrigeração quando necessário, grandes profundidades rosqueadas e sistemas de fixação da ferramenta. Isso gera uma enorme preocupação, já que por ser uma operação em muitos casos realizadas em peças já com um alto valor agregado, não podem falhar, pois a falha gera altos custos. Contudo, o rosqueamento interno por laminação não apresenta dificuldade de saída de cavaco, uma

vez que não gera cavaco. Mas possui limitação no tipo de material a ser laminado, sendo imprescindível uma ductilidade mínima, necessária para a deformação do material.

A importância desses processos, sua vasta aplicação industrial, a complexidade dos processos e infelizmente a pouca investigação em laboratórios de pesquisa (industriais e acadêmicos), levam a escolha do tema para esta tese de doutorado.

O objetivo desse trabalho é compreender melhor as características e limitações dos processos de rosqueamento interno por usinagem e laminação. Avaliar as influências de algumas variáveis e comparar os dois processos.

As variáveis a serem avaliadas inicialmente serão:

- Velocidade de corte
- Tipo de processo de rosqueamento: laminação e usinagem
- Material da peça: aço SAE 1045, liga de aço AISI 4140, liga de alumínio 6351 e dois aços endurecidos, sendo um VP ATLAS e o outro N2711M
- Diâmetro do pré-furo
- Revestimento do macho laminador
- Comprimento e espessura rosqueada
- Torque de formação de cada filete da parte cônica do macho

As variáveis de saída são:

- Micro dureza: entender como a velocidade de corte, tipo de processo e diâmetro do pré furo influenciam nestas variáveis.
- Resistência mecânica: analisar se há alteração na resistência mecânica da rosca com a alteração da velocidade de corte, tipo de processo de rosqueamento e diâmetro do pré furo.
- Torque e força de avanço: analisar o sinal de torque e força de avanço, entender como é dividida cada etapa do processo e avaliar a influência dos parâmetros de entrada na alteração do sinal de torque.

A seguir são apresentadas as etapas desenvolvidas. No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os processos de rosqueamento interno por usinagem e laminação, características das ferramentas, características que afetam o torque e a força de avanço e sobre tensão residual. No Capítulo III será descrita a metodologia adotada para execução dos ensaios, os equipamentos e ferramentas usadas. O capítulo IV trata dos resultados e discussão das possíveis causas e efeito dos fenômenos analisados. O capítulo V é a conclusão do que foi discutido no capítulo IV. No capítulo VI serão apresentada as sugestões para trabalhos futuros e por fim, no capítulo VII virão as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

A vasta maioria dos produtos mundialmente utilizados nos setores de consumo e indústria empregam fixadores em algum momento em seu design, e uma fonte industrial estima que tais elementos representem pelo menos um por cento (1%) do preço de venda de quaisquer produtos acabados em que estejam instalados (DOMBLESKY e FENG, 2002).

A junta rosqueada é uma das soluções mais utilizadas para montagens mecânicas, isso porque conduz a uma montagem com uma elevada resistência mecânica e rigidez. Além disso, juntas rosqueadas permitem desmontagens para manutenções ou trocas de componentes. Para a fabricação de roscas internas existem dois processos principais: usinagem e laminação (FROMENTIN et al., 2010).

Apesar de o produto final destes processos serem similares (roscas), os processos são fundamentalmente diferentes. Um produz roscas com remoção de material (cavaco) e o outro por deformação. A rosca produzida por cada um desses processos possui características peculiares e diferentes, como resistência mecânica, micro dureza dos microconstituintes, a rugosidade dos filetes, etc.

Roscas laminadas são preferíveis sobre as roscas usinadas. Os principais motivos são o preço de custo unitário mais baixo, utilização reduzida de material, e propriedades mecânicas superiores. Como consequência, o rosqueamento por laminação tem virtualmente eliminado o rosqueamento por usinagem como técnica competitiva para a produção em massa de fixadores (DOMBLESKY e FENG, 2002).

O rosqueamento interno com macho corte/laminação, comparado com outros processos como torneamento, fresamento e furação, tem tido pouca atenção em pesquisas.

O rosqueamento interno por laminação tem tido uma atenção menor ainda. No Brasil são raros os trabalhos envolvendo este tema.

2.1. Rosqueamento com machos de corte

O rosqueamento interno, apesar de ser uma operação de curta duração, apresenta inúmeras características e parâmetros peculiares. Alguns destes são fixos, inerentes ao conjunto ferramenta-peça escolhido, e outros são ajustáveis. Contudo, tanto os parâmetros fixos como os ajustáveis têm enorme influência nas variáveis de saída como a força de avanço, torque e desgaste da ferramenta.

O sucesso de qualquer operação de rosqueamento depende de diversos fatores e todos afetam a qualidade do produto acabado (DORMER, 2013):

- Geometria correta do macho para o tipo de material e furo a ser rosqueado.
- Fixação correta.
- Dimensões das brocas.
- Velocidade de corte.
- Fluido de corte adequado.
- Nas aplicações com comando numérico, ao utilizar um dispositivo para rosquear, recomenda-se que se utilizem passos de 95 a 97% do passo da ferramenta. Para permitir que o macho produza seu próprio passo.
- Quando possível fixar o macho em um dispositivo que limite o torque. Isso protege o macho de uma possível quebra.
- Controlar a entrada suave do macho no furo, pois um avanço desigual poderá causar um alargamento da rosca.

O processo de rosqueamento utiliza ferramentas muito específicas, ao contrário de processos como o torneamento que oferece um grande número de opções de geometria da ferramenta. Os fabricantes de machos, sejam eles laminadores ou de corte, em geral não fornecem informações sobre as características geométricas destas ferramentas. Características como ângulo de saída ou detalonagem não são detalhes que possam ser escolhidos para a usinagem de uma mesma classe de material.

O macho é uma ferramenta sofisticada tanto em sua utilização como em sua fabricação, empregada para a usinagem de roscas internas cilíndricas ou cônicas, que possui filetes externos e rasgos longitudinais, originando o aparecimento de arestas cortantes e sulcos necessários à saída dos cavacos (FREIRE, 1976). O macho de corte pode ser dividido em várias partes. A Fig. 2.1 mostra estas partes e seus respectivos nomes.

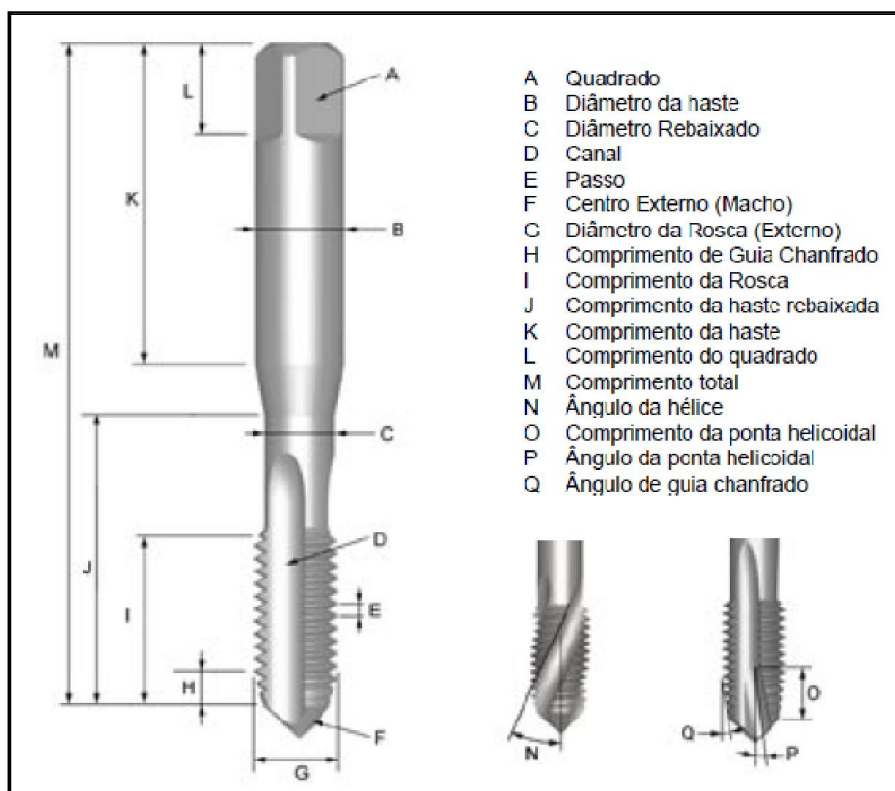


Figura 2. 1 - Representação das partes de um macho de corte (DORMER, 2013)

O macho de corte é composto por uma parte cônica e uma reta, isto faz com que o corte seja realizado pela parte cônica e pelo primeiro filete da parte reta. Com isso o desgaste se concentra principalmente na parte cônica (Fig. 2.2).

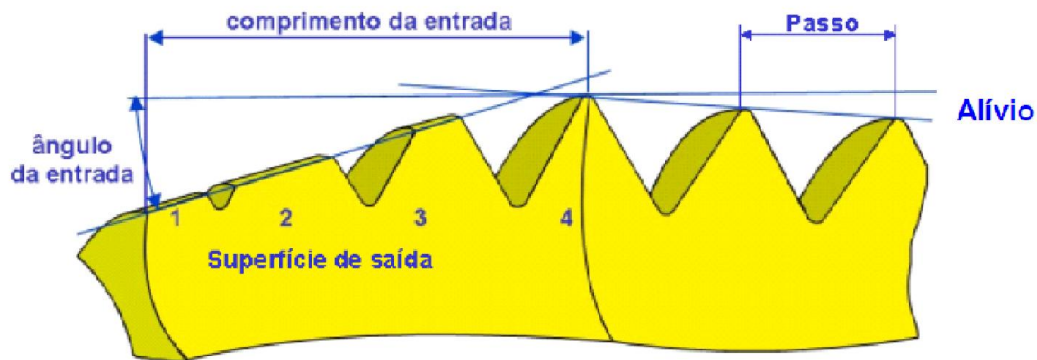


Figura 2. 2 - Características da entrada de um macho de corte (TITEX PLUS, 1999; BEZERRA, 2003; DA MOTA, 2006)

Cada uma dessas características geométricas do macho tem uma finalidade durante a usinagem. Uma das principais características do macho de corte é a detalonagem. Esse detalhe pode ser compreendido como os ângulos de folga dos dentes do macho de corte, utilizado para reduzir o atrito da ferramenta com a peça. Quão maior a profundidade da rosca maior deve ser a detalonamento. A Fig. 2.3 representa o detalhe do detalonamento.

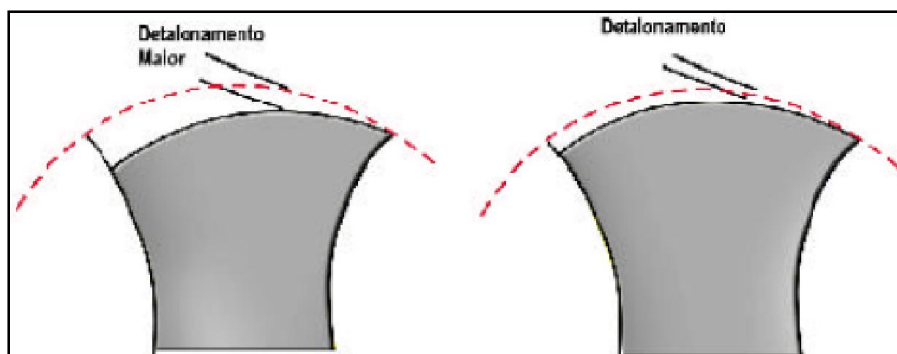


Figura 2. 3 - Representação do detalonamento em um macho de corte (TITEX PLUS, 2012)

Segundo Titex Plus (2012), a detalonagem influencia diretamente o torque, quando rosqueando furos com profundidade acima de 1,5 vezes o diâmetro. Ao rosquear com um macho convencional o torque aumenta substancialmente devido à dificuldade de escoar o cavaco, Fig. 2.4.

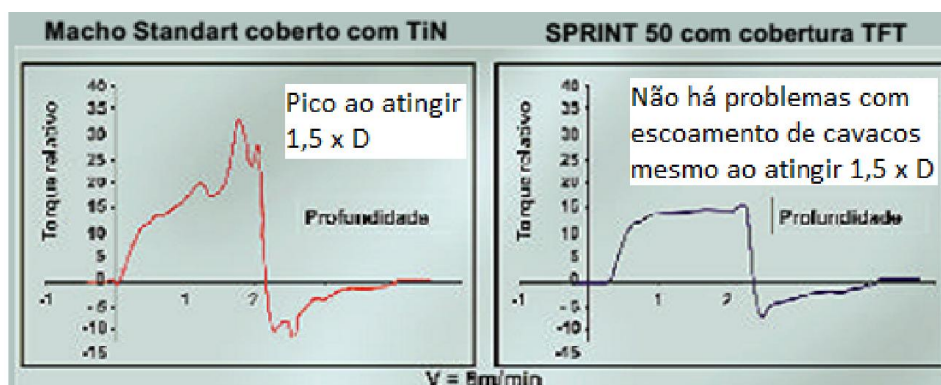


Figura 2. 4 - Comparativo do torque com uma ferramenta com detalonagem convencional e outra com uma maior detalonagem (TITEX PLUS, 2012, modificado)

Outra importante característica é a geometria do canal do macho, pois esta determinará o ângulo de saída (Fig. 2.5), ângulo este que é um dos mais influentes na força de corte, e estes são determinados de acordo com o material a ser usinado (Pereira, 2010).

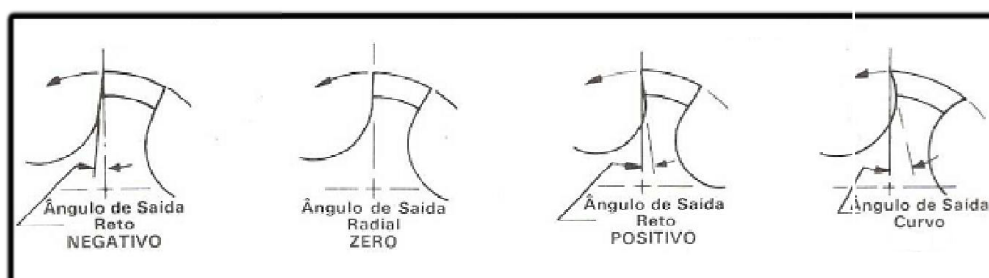


Figura 2. 5 - Tipos de ângulos de saída de macho de corte (OSG, 1999)

A resistência à torção de um macho é determinada pelo diâmetro do núcleo. Porém, quanto maior for este núcleo, maior a dificuldade para saída do cavaco, já que núcleos maiores significam um número menor de canais de escoamento do cavaco. Com isso, a necessidade de projetar cada tipo de macho para um tipo de material específico (OSG, 1999). O tipo de canal é determinado pelo material a ser usinado, sendo que o material também determina o tipo de canal a ser usado. A Fig. 2.6 mostra alguns dos tipos de canais



Figura 2. 6 - Tipos de canais (OSG, 2012)

Segundo OSG (1999), o macho com ponta helicoidal à esquerda (POT) tem como características:

- Ponta helicoidal para direcionar o cavaco para frente.
- Canal raso de formato único proporciona uma estrutura resistente.
- Utilizado em furos passantes.
- Utilizado em materiais dúcteis.

O macho de canal helicoidal (SFT) é caracterizado por:

- Saída do cavaco em direção a haste.
- Torque de rosqueamento baixo e aplicável até o fundo do furo.
- Utilizado em materiais dúcteis.
- Recomendados para furos não passantes.

Já o macho de canal reto (MT) tem como características:

- Arestas de cortes resistentes.
- Fácil de reafiar.
- Para furos passantes e não passantes.
- Para cavacos descontínuos (material frágil).

2.2. Características do rosqueamento interno por usinagem

O processo de rosqueamento interno com macho de corte é um processo amplamente difundido na indústria, de fácil aplicação e em geral de baixo custo. No entanto, isso não reflete sua realidade quanto a características do processo. O rosqueamento interno com macho de corte é um processo é influenciado por características como: o furo passante ou não passante, o comprimento rosqueado, as características geométricas da ferramenta e o material da peça que neste processo é mais limitante do que, por exemplo, para o torneamento.

As forças de corte no rosqueamento interno com macho de corte, quando o diâmetro e o passo são iguais, é influenciada pela geometria da ferramenta (LORENS, 1980).

Durante o rosqueamento, o que ocorre na região de corte não é totalmente conhecido e é dependente das características de produção da ferramenta. A dificuldade do processo se dá em função do corte simultâneo de uma série de filetes com a utilização de diversos “dentes” do macho de corte orientados angularmente em torno de um cilindro. Com isso uma série de esforços surgem nas direções radial, axial e tangencial em cada “dente” ativo, produzindo uma resultante de forças e torque (ARMAREGO; MARILYN, 2002)

A Figura 2.7 mostra como é formado o filete de rosca em uma peça. Cada filete de rosca do macho na parte cônica é responsável por uma porção de cavaco retirado, um filete após o outro, em sequência forma um filete de rosca completo, ou seja, quando o macho de corte dá a primeira volta após o contato com o material da peça, o primeiro filete da parte cônica entrou totalmente na peça. Se este macho tiver três canais por exemplo, então todo o cavaco retirado pelo primeiro filete foi retirado por três dentes que este possui distribuído na circunferência da ferramenta. Assim, passarão todos os filetes da parte cônica e o primeiro da parte reta, até formar o filete de rosca completo no material da peça.

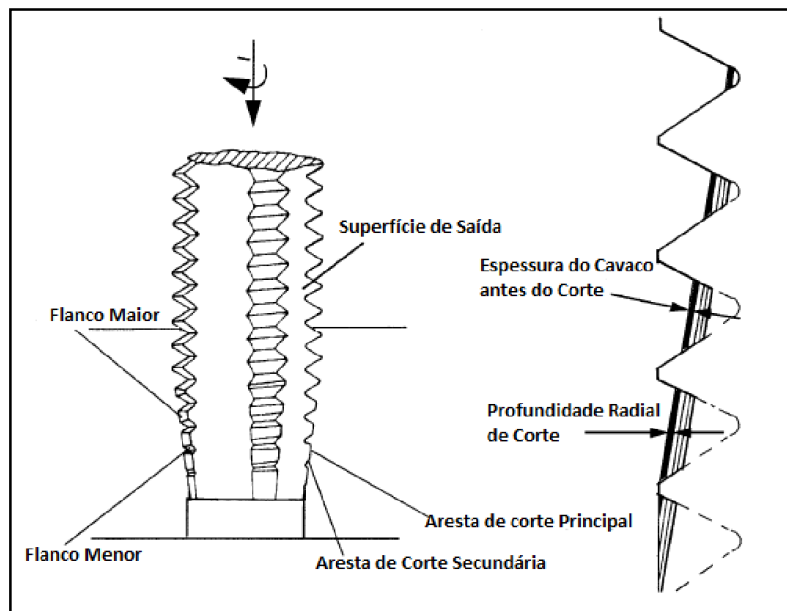


Figura 2. 7 - Processo de rosqueamento e geometria do cavaco (CAO; SUTHERLAND, 2002, Modificado)

2.3. O rosqueamento com machos laminadores

O macho laminador, ao contrário do macho de corte, não necessita de canais para saída do cavaco. Os machos de laminação dispõem de uma parte cônica e uma parte cilíndrica. A hélice da rosca estende-se por ambas as partes. Ao observar a secção transversal da ferramenta, pode-se apreciar uma formato poligonal (Fig. 2.8) que forma um ângulo reto com o eixo da ferramenta. Este formato poligonal cria arestas de laminação responsáveis pelo perfil efetivo da rosca (EMUGE, 2012).

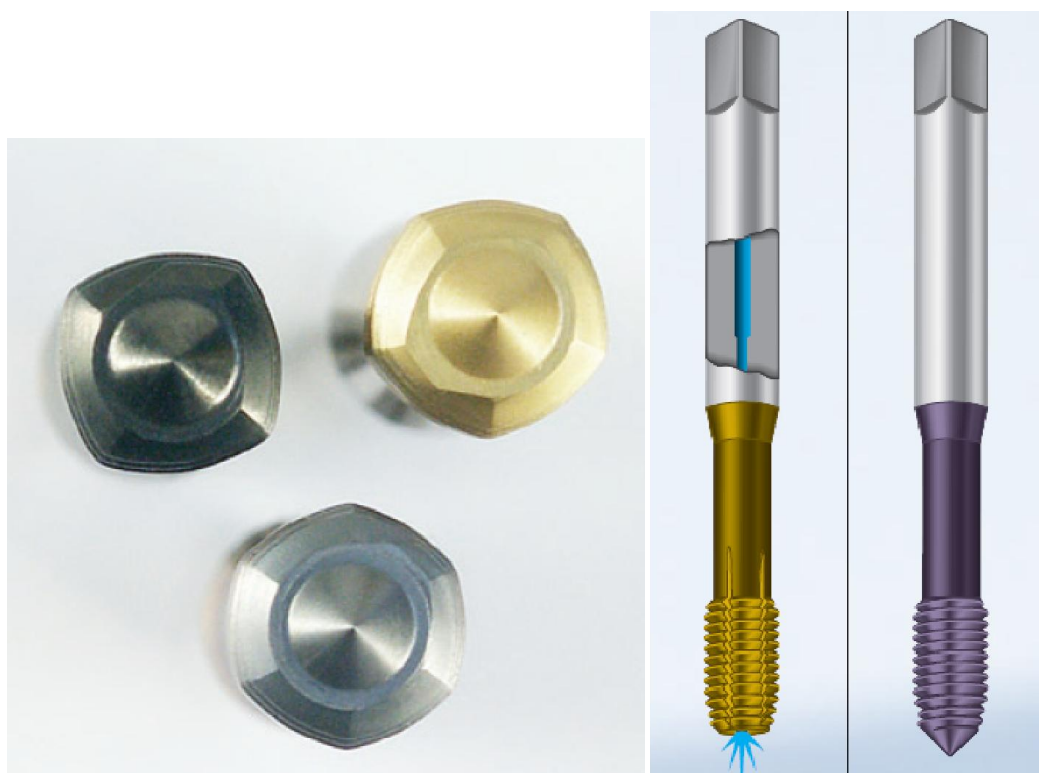


Figura 2. 8 - Diferentes formatos de macho laminador (EMUGE, 2012)

As excelentes características de auto guiar-se dos machos de laminação impedem a realização de cortes axiais defeituosos. A extraordinária estabilidade das ferramentas é muito útil, especialmente para diâmetros pequenos. A forma poligonal de um macho de laminação tem uma importância decisiva na chamada zona de contato ou de torque das arestas de laminação. Estas exercem, de longe, a maior influência nas características do atrito da ferramenta, e determinam a velocidade do fluxo e o comportamento do fluxo do material da peça de trabalho (EMUGE, 2012).

A Figura 2.9 representa uma vista longitudinal e uma vista da seção transversal de um macho laminador. Na figura, d_{min} e d_{max} representam as distâncias mínimas e máximas do centro às cristas dos dentes. Os ângulos de entrada e retorno são importantes, pois esses definem a geometria e o comportamento do torque, a conicidade de entrada determina a distribuição da deformação em vários dentes da região cônica. Já o ângulo de saída minimiza a área de contato, reduzindo assim as forças de atrito. H é o raio do furo onde será fabricada a rosca. Os canais de lubrificação são vistos na seção transversal do macho laminador, esses servem para facilitar o fluxo de fluido de corte até a região onde está se desenvolvendo as deformações.

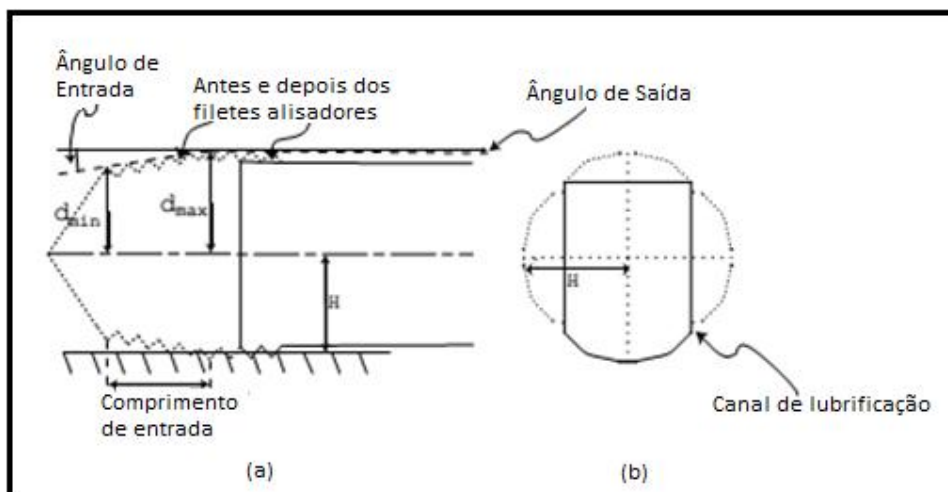


Figura 2. 9 - (a) Macho laminador; (b) Seção Transversal (CHOWDHARY et al., 2003, modificado)

Contudo, segundo Chowdhary et al. (2003), o número de dentes no cone de entrada não altera o valor do torque de rosqueamento. O aumento ou diminuição do número de dentes na parte cônica irá alterar a contribuição individual de cada dente, mas não o valor final do torque. Este aumento de força que cada dente realiza pode aumentar o desgaste e com isso diminuir a vida da ferramenta.

Os canais de lubrificação podem assumir diversas formas, ou mesmo podem não existir em algumas ferramentas. Contudo eles não possuem as mesmas funções dos canais dos machos de corte. O material a ser “deformado” influencia diretamente na escolha da forma do polígono e no número e aresta de laminação (Fig. 2.10).

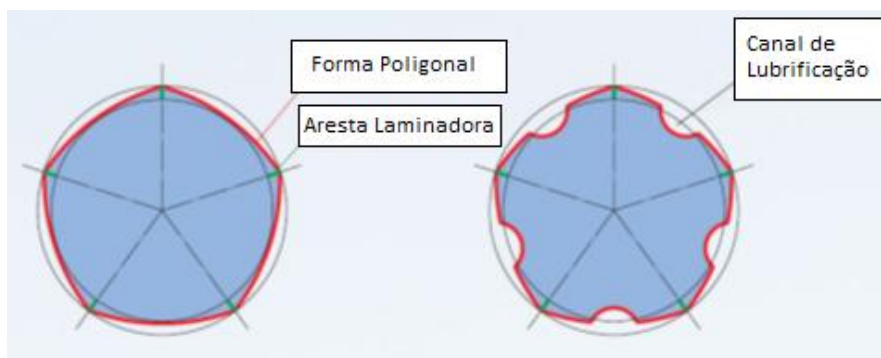


Figura 2. 10 - Seção transversal de machos laminadores (EMUGE, 2012, Modificado)

Segundo Ivanov e Kirov (1997), durante a concepção dos machos laminadores os seguintes pontos devem ser observados: a determinação da forma e os parâmetros da seção transversal do macho (corte A-A), determinação dos parâmetros do cone de entrada (detalhe B) e por último a determinação dos diâmetros de aferição da rosca (d_0 , $d_{1,0}$ e $d_{2,0}$). Todas essas características podem ser observadas na Fig. 2.11.

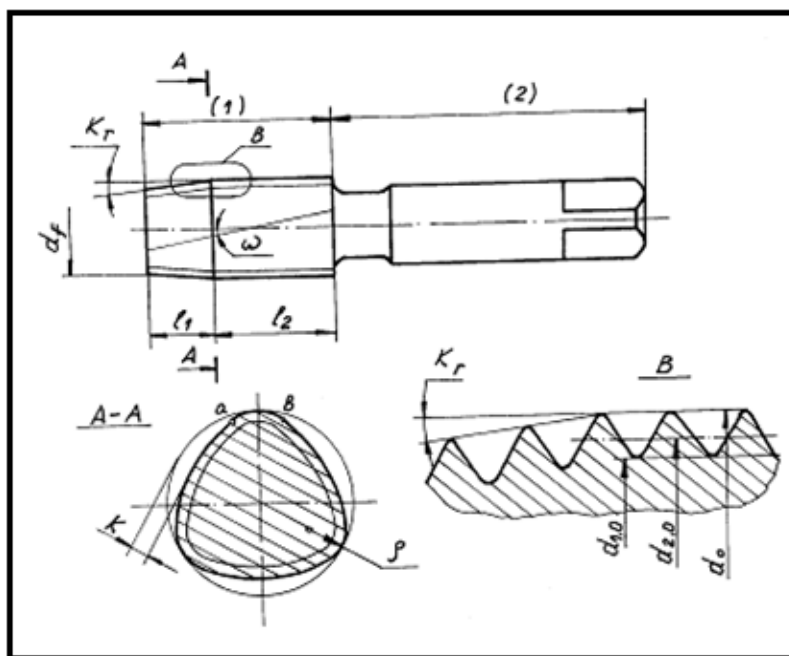


Figura 2. 11 - Características dos machos laminadores (IVANOV; KIROV, 1997)

2.4. Características do rosqueamento interno por laminação

Segundo Geiger et al. (2001), microconformação é um processo de deformação plástica para fabricar peças pequenas, com pelo menos duas dimensões em escala sub-milimétrica e com as vantagens de uma elevada produtividade e baixo custo de produção. Todas essas características podem ser aplicadas às rosas produzidas pelo processo de rosqueamento interno por laminação, desde que a dimensão da rosca se mantenha dentro das dimensões sub-milimétricas.

O rosqueamento por laminação possui limitação no tipo de material a ser laminado, sendo imprescindível uma ductilidade mínima, necessária para a deformação do material (PEREIRA; DA SILVA; FARIA, 2013). De acordo com Fromentin et al. (2010), rosqueamento

interno por laminação é um processo de laminação de roscas cada vez mais utilizado na indústria devido a maior vida útil da ferramenta e sua capacidade de alterar características dos materiais. Este é um processo muito interessante e economicamente benéfico, quando comparado com rosqueamento por usinagem, pois proporciona uma vida maior da ferramenta, maior confiabilidade e maior limpeza do processo.

Rosqueamento por laminação é um processo diferente do rosqueamento por usinagem para obtenção de roscas internas. Corte de roscas é um processo de usinagem, as roscas são resultados da remoção do cavaco. No caso do rosqueamento por laminação (Fig. 2.12), as roscas são formadas somente pelo deslocamento do material (FROMENTIN et al., 2005).

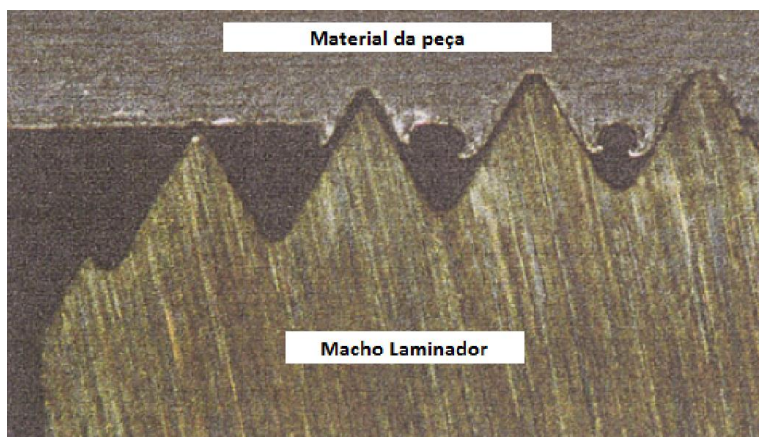


Figura 2. 12 - Rosqueamento por laminação (EMUGE, 2013)

Segundo Carvalho *et al.* (2012), a grande vantagem do rosqueamento por laminação está nas características das roscas. As roscas são formadas por deformação plástica do material, formando roscas dentro das tolerâncias e sem resíduos. Baldo *et al.* (2010), investigou a determinação da resistência a tração de roscas internas no processo de rosqueamento por laminação em uma liga de alumínio 7055. Os resultados demonstram que as roscas laminadas possuíam a mesma resistência mecânica do que uma rosca usinada, quando comparada as mesmas condições de produção.

O rosqueamento por laminação é uma tecnologia de fabricação já estabilizada, contudo, os projetos de processo e otimização para rosqueamento por laminação ainda são baseados em empirismo e experiência prática. Apesar de existir um acúmulo de experiência industrial referente ao rosqueamento por laminação, informação detalhada e modelos

quantificando o comportamento e parâmetros do processo não foram ainda rigorosamente desenvolvidos. Design de produtos que exploram de maneira completa as propriedades mecânicas e tensões residuais compressivas de rosas laminadas não foram plenamente realizadas devido à atual falta de capacidade preditiva correlacionando propriedades do rosqueamento com parâmetros do processo (DOMBLESKY & FENG, 2002).

A Figura 2.13 mostra o fluxo de grãos em uma rosca externa laminada. É evidente, pelas linhas de fluxo, que o material através da raiz e flancos de cada dente é altamente alongado e comprimido. Perto do pico (crista) e no interior da rosca, os grãos são também alongados, mas são orientados paralelamente à direção de penetração da ferramenta (Fig. 2.13) por ter sido comprimido pelos flancos para preencher a crista. A falta de deformação subsuperficial no blank foi confirmada pelo teste de dureza de blanks laminados que mostraram que a dureza base do material abaixo das rosas permaneceu inalterada após a laminação (DOMBLESKY & FENG, 2002).

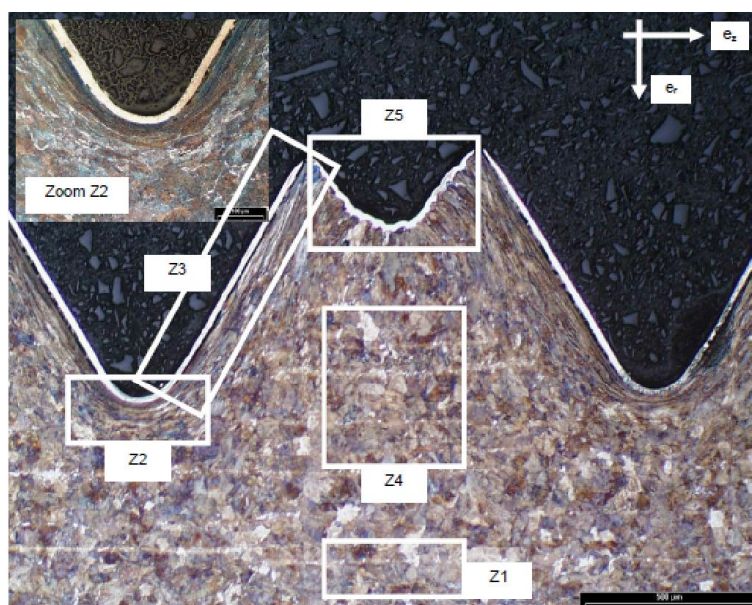


Figura 2. 13 - Padrão de escoamento dos grãos (FROMENTIN, 2004)

Segundo Domblesky e Feng (2002), a formação do filete de rosca se dá em dois estágios. No primeiro estágio, o material que compreende a maior parte de cada filete é essencialmente não deformado e vê-se que os flancos de cada filete formam-se separadamente uns dos outros. A deformação é localizada na vizinhança do contato entre a superfície do blank e as pontas de dentes individuais na ferramenta e o fluxo de material no

primeiro estágio é restrito pelo volume de material não deformado nos arredores. Na medida em que a ferramenta penetra a superfície do blank, o material diretamente à frente de cada dente é simultaneamente empurrado para baixo e para algum dos lados (Fig 2.14 a). O material adjacente na superfície livre em qualquer lado de um dente individual também é deslocado horizontalmente, mas tende a fluir para cima ao longo do flanco da ferramenta, causando o desenvolvimento de uma pequena “pilha” em qualquer lado de cada dente. Com a continuidade da penetração da ferramenta (Fig 2.14 b e c) o padrão inicial do fluxo é mantido ao longo do topo de cada dente apesar de que material adicional do blank está, agora, sendo deformado, levando a um aumento da zona deformada. O desenvolvimento de uma superfície côncava em cada crista de filete é também evidente devido à zona morta de metal que existe no interior de cada filete.

Quando o filete está aproximadamente 50% completo, marca-se o início do segundo estágio de deformação, que é caracterizado pelo começo de deformação e fluxo no interior de filetes individuais e o preenchimento da crista do filete. No início do segundo estágio, o material deslocado nos flancos dos filetes adjacentes começa a encontrar na superfície (Fig 2.14 d). Uma vez que o fluxo horizontal (direção z) opõe-se a filetes vizinhos, a penetração contínua da ferramenta causa extrusão lateral de metal morto no interior de cada filete. Nota-se que a crista em desenvolvimento começa a “achatar-se” e tornar-se menos côncava durante este estágio. A 90% de penetração (Fig 2.14 f), o contínuo fluxo de material para cima (direção r) é restrito e o seguinte movimento da ferramenta resulta em um deslocamento progressivo em direção ao interior do blank com pequenos movimentos para cima para o preenchimento da crista. Uma vez que a pressão para obter preenchimento completo (100% de penetração de um indentador) é muito alta e normalmente resultaria em quebra da ferramenta, cristas completamente preenchidas são raramente alcançadas na prática, e a laminação é geralmente interrompida antes da completa penetração da ferramenta.

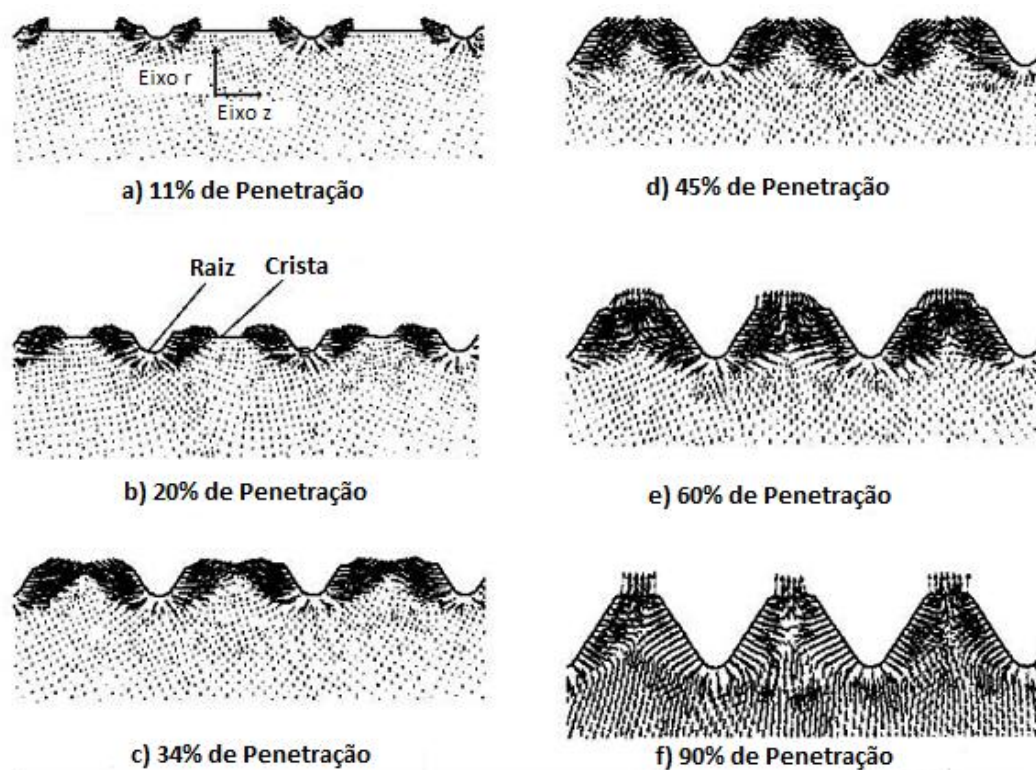


Figura 2. 14 - Fluxo de material durante o rosqueamento por laminação (DOMBLESKY & FENG, 2002, Modificado)

2.5. Torque na ferramenta durante o rosqueamento

Durante a operação de rosqueamento o torque na ferramenta varia até a inversão de rotação do eixo por diferentes razões (FROMENTIN et al. 2010). Diversos fatores durante o rosqueamento contribuem para esta variação. Dentre eles podem ser citados a geometria da ferramenta, o tipo de material a ser usinado, ou seja, o tipo de cavaco produzido ou resistência à deformação, o tipo de fluido lubrificante/refrigerante, características dos equipamentos utilizados, tipo de furo (passante ou não passante), entre outros.

O sinal de torque na operação de rosqueamento se compõe de diferentes fases (Fig. 2.15). Mas apenas duas são exploradas no processamento de dados: a zona 1 onde se identificam os valores médio e máximo do sinal de torque; e a zona 2 que contém o valor máximo do pico de reversão. A exploração da zona 1 permite otimizar as condições de corte e controlar o desgaste da ferramenta. Estes dados são utilizáveis para a pesquisa de

geometrias ótimas de machos de corte. Na zona 2 o valor máximo do pico de reversão informa sobre a qualidade do furo realizado. Este pico é representativo do torque devido ao atrito quando do retorno do macho de corte (FANTIN, 1992; REITER et al., 2006; DA MOTA, 2006)

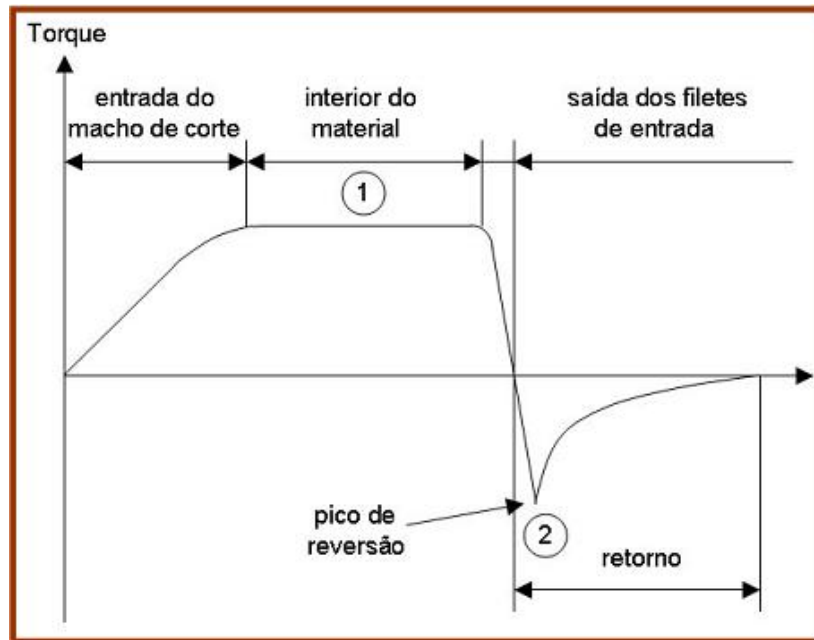


Figura 2. 15 - Representação do sinal de torque durante o rosqueamento interno por usinagem (FANTIN, 1992; REITER et al., 2006; DA MOTA, 2006)

Durante o rosqueamento por usinagem o valor do torque representa as forças de usinagem e as forças geradas pelo atrito. No entanto, se não houver erros de sincronismos associado ao processo, a parcela referente ao atrito se torna insignificante. O valor do torque no retorno, segundo Ahn et al. 2003, é o torque gerado pelo atrito durante o rosqueamento. Para saber o valor do torque referente às forças de usinagem, durante o corte propriamente dito, basta subtrair o valor do torque de retorno do valor do torque durante o corte.

Já no processo de rosqueamento por laminação o sinal de torque é composto pelas forças necessárias para a deformação plástica do material e atrito entre o macho laminador e o material da peça. Segundo Stéphan et al. (2011), as forças geradas durante o processo são decorrentes da deformação do material da peça e o fluxo resultante do material

deformado ao logo das faces do dente do macho de laminação, o que leva à recuperação elástica do material.

De acordo com Fromentin et al. (2010), o gráfico de torque de T_2 a T_3 (Fig. 2.16) é chamado de torque de atrito. É claro que existe atrito entre o material e a ferramenta durante a entrada da parte cônica do macho. No entanto, o termo chamado de torque de atrito aplica-se ao torque causado pelo contato do material da peça com a parte do dente do macho que não está envolvida com a formação do filete de rosca (Fig. 2.16).

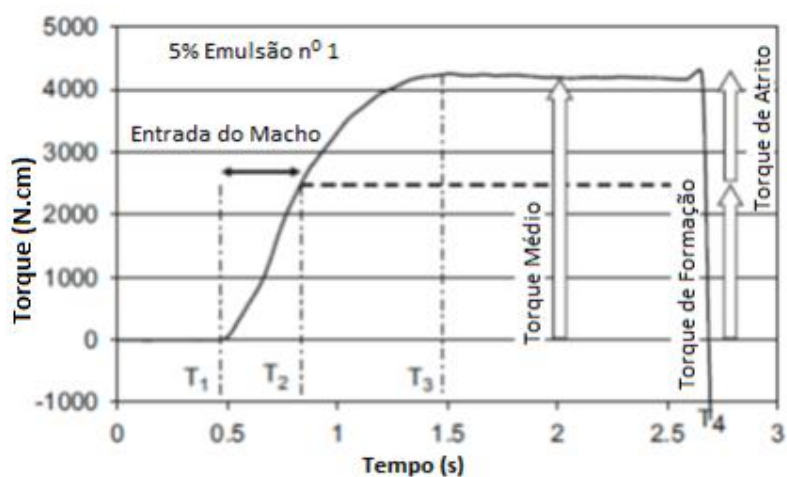


Figura 2. 16 - Evolução do torque durante o rosqueamento por laminação (FROMENTIN et al. 2010, modificado)

Em seu trabalho, Fromentin et al., (2010), afirma que o torque de atrito é a diferença entre o torque médio e o torque de formação.

Hayama (1972) analisou parafusos auto-rosqueadores e estabeleceu um modelo para prever o torque máximo, através do método de energia mínima. No entanto, as curvas das pressões de contato em função da profundidade da rosca mostram uma diferença em relação aos fenômenos reais. Isso foi causado por ter negligenciado o atrito. Esta parcela referente ao atrito, tão comentada por diversos autores, se deve à recuperação elástica do material e/ou pelos erros de sincronismo inerentes ao processo.

2.5.1. Fatores que afetam o torque

Existem vários fatores que afetam o sinal de torque durante o rosqueamento. Dentre eles pode-se citar a velocidade de corte, o fluido de corte, a velocidade de avanço e o material da peça.

A variação da velocidade de corte tem uma influência direta sobre os fenômenos na zona de corte provocando mudanças no comportamento elástico e plástico, o que resulta em diferentes taxas de deformação, forças e tensões de corte, assim como o fluxo de cavacos e vida da ferramenta (NEUGEBAUER, et al., 2011). Uma das explicações para a queda do torque no rosqueamento é devido ao aumento de temperatura, isso porque o rosqueamento foi realizado a seco, o que contribui para o aumento da temperatura.

Independentemente do material analisado há uma diminuição do torque com o aumento da velocidade de corte. Essa diminuição ocorre devido ao aumento de temperatura na região de corte, como ilustrado na Fig. 2.17. Ao analisar a distribuição de temperatura, observa-se que a maior parte do calor gerado vai para o cavaco e as maiores temperaturas são encontradas na ferramenta. Esses aumentos de temperatura nas regiões de cisalhamento primário e secundário diminuem a resistência mecânica do material da peça. Logo, a força necessária para deformar e cisalhar o material é menor.

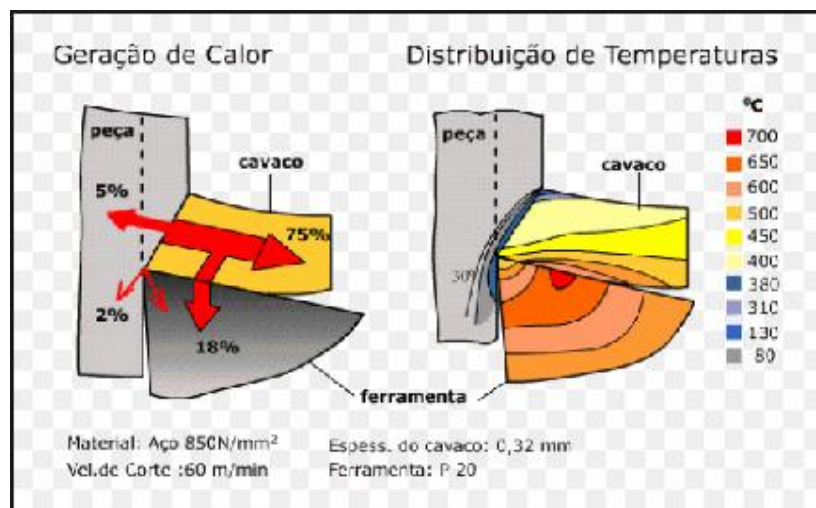


Figura 2. 17 - Distribuição de calor durante a usinagem (CIMM, 2014)

Durante o processo de rosqueamento por laminação não há formação de cavaco, ou seja, o calor gerado que antes era direcionado ao cavaco, cerca de 75%, agora será redistribuído apenas entre a ferramenta e a peça. Logo, as temperaturas atingidas pela peça durante o processo serão maiores, isso faz com que a resistência mecânica do material da peça diminua o que diminui o torque necessário para a formação do filete de rosca.

Fromentin et al. (2010) cita em seu trabalho que há uma falta de conhecimento sobre o atrito entre a ferramenta e o material da peça, e o conhecimento das condições de atrito é muito importante nas roscas laminadas para a escolha correta do fluido lubrificante, refrigerante ou ambos. A Fig. 2.18 mostra o efeito de diferentes fluidos lubrificantes no torque. Os fluidos de corte tem influência até nos aspectos metalúrgicos do filete de rosca, já que estes alteram a temperatura de trabalho e as taxas de resfriamento.

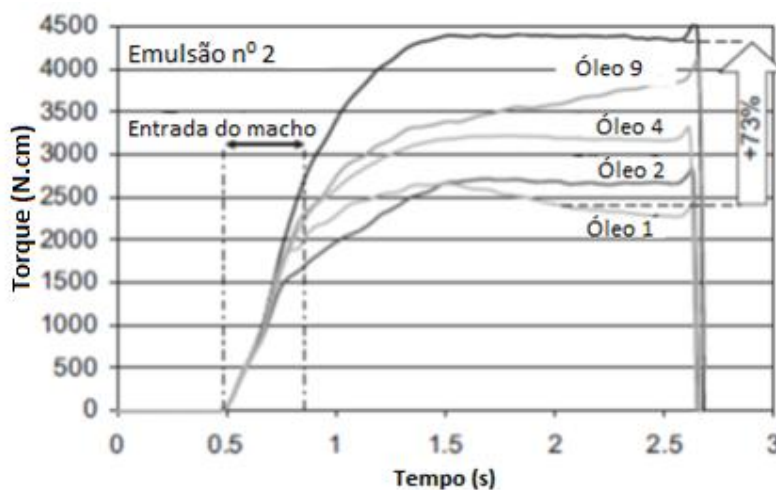


Figura 2. 18 - Curvas de torque no rosqueamento por laminação para diferentes lubrificantes (FROMENTIN et al., 2010, modificado)

A Figura 2.19 mostra o comportamento do torque médio com a utilização de diferentes tipos de lubrificantes em um processo de rosqueamento interno por laminação. Percebe-se que a porcentagem do torque devido ao atrito aumenta, enquanto que a porcentagem do torque necessário para a formação da rosca diminui. Este fato comprova a importância, não somente da utilização do fluido de corte, mas também, do tipo de fluido de corte usado no processo de laminação. Saindo de um torque médio de 2500N.cm para um torque de aproximadamente 4250N.cm.

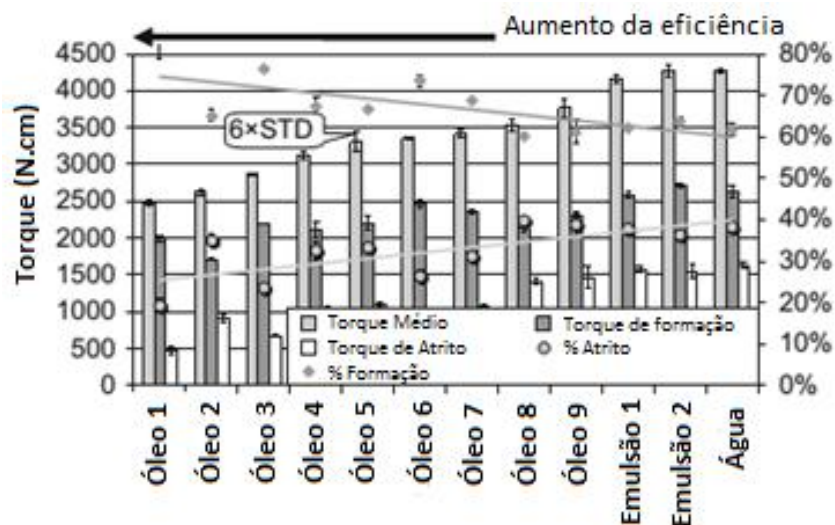


Figura 2. 19 - Síntese dos resultados de torque no rosqueamento por laminação para diferentes lubrificantes (FROMENTIN et al., 2010, modificado)

No rosqueamento interno por laminação deseja-se que o fluido de corte tenha uma melhor ação lubrificante do que refrigerante. Já que o aumento de temperatura da peça resulta em diminuição da resistência mecânica do material da peça, o que em muitas situações é benéfico ao processo, e também porque a parcela devido ao atrito no processo de laminação é bem mais significativa do que no processo de rosqueamento interno por usinagem.

O rosqueamento interno por usinagem é muito sensível a lubrificação ou refrigeração. Logo, o teste de rosqueamento tem sido proposto como um teste padrão para a avaliação e comparação de fluidos de corte (NORDTEST, 1998; ASTM, 2000; Apud FROMENTIN et al., 2010).

A Figura 2.20 mostra o efeito do tipo de fluido sobre o torque durante o rosqueamento interno por usinagem. Não é possível notar uma grande diferença entre uma solução e um fluido semissintético, contudo, ao analisar a diferença entre os óleos minerais, vegetais e ésteres é possível observar uma diferença na eficiência que cada um tem sobre o processo. Esse é o motivo do rosqueamento interno ser usado como teste para avaliar e comparar fluidos de corte.

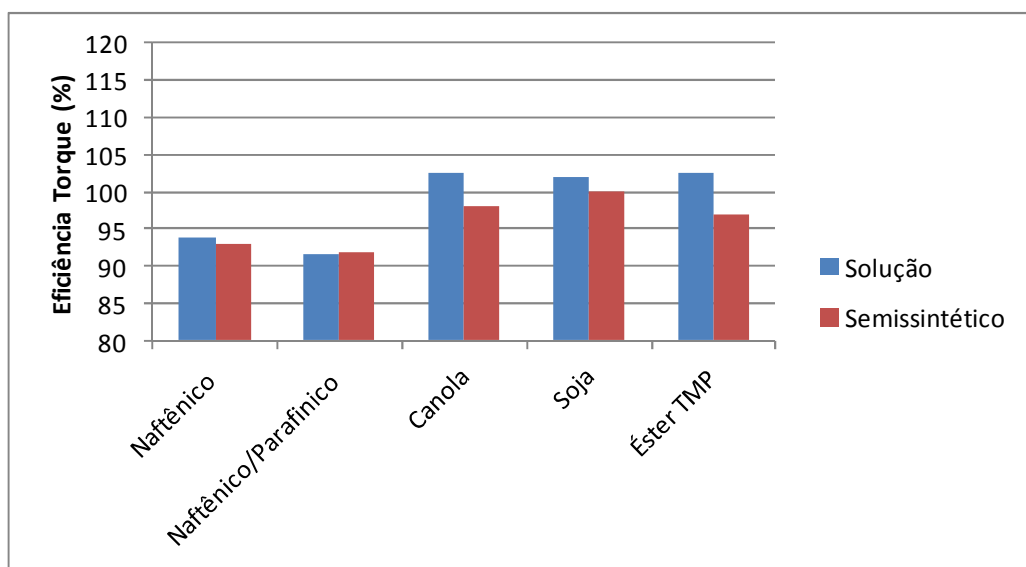


Figura 2. 20 - Eficiência do torque no rosqueamento interno por usinagem em cinco diferentes óleos, em solução e em emulsão (semi-sintético) (ANDRES, 2004; SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010, modificado)

No rosqueamento interno por usinagem, o fluido de corte não influencia tanto o torque devido ao efeito sobre a força de atrito, já que a parcela de torque devido ao atrito em muitos casos é baixa, mas sim sobre a temperatura do processo e também sobre a retirada do cavaco da zona de usinagem. Na Fig. 2.20 os fluidos com menor efeito refrigerante apresentam um menor torque associado, devido à maior temperatura e consequentemente menor resistência mecânica do material da peça.

Entretanto o fator mais influente no torque, independente do processo de usinagem, é o tipo de material. As principais características do material da peça para o processo são a dureza e a resistência mecânica. Outras propriedades como a condutividade térmica a encruabilidade do material, dentre outras, podem afetar com maior ou menor intensidade o torque durante os processos de rosqueamento interno por usinagem ou por laminação.

A Figura 2.21 mostra a influência do tipo de material sobre o torque durante o rosqueamento interno por laminação. Observa-se a influência, principalmente da resistência mecânica sobre o torque.

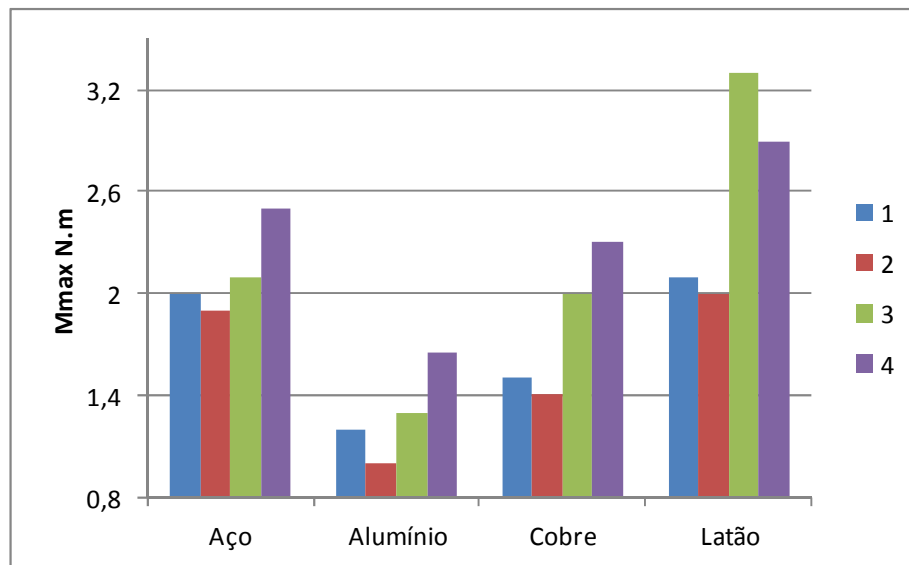


Figura 2. 21 - Torque máximo durante o rosqueamento interno por laminação usando cabeçote flutuante e diferentes lubrificantes: 1: cloreto de parafina; 2: ácido oleico; 3: valtsol; 4: resinoide 31T (IVANOV; KIROV, 1997, modificado)

Contudo, no rosqueamento interno por usinagem, pequenas alterações na resistência mecânica do material não necessariamente se convertem em alterações no sinal de torque. O processo de usinagem não sofre a mesma influência que o processo de laminação, quando se analisa a resistência mecânica do material. O processo de laminação é um processo mais sensível a esta característica.

Um fator que influencia o torque durante o retorno no rosqueamento interno por laminação é a recuperação elástica do material. Além de afetar o torque o retorno elástico do material afeta as suas dimensões finais. Quando as dimensões finais são pequenas e com uma tolerância pequena, isso pode comprometer o processo. Liu et al. (2011) (apud Fu e Chan, 2012), realizaram testes, onde avaliaram o efeito do tamanho de grão no retorno elástico. Verificou-se que o retorno elástico aumenta com a diminuição do tamanho de grão do material da peça.

2.5.2. Características que alteram o torque no rosqueamento por usinagem

Todo processo de usinagem possui características peculiares, reconhecer e entender essas peculiaridades pode auxiliar em um ganho de produtividade e até mesmo a evitar falhas catastróficas.

Uma característica marcante no processo de rosqueamento interno com macho de corte é o tipo de furo, passante ou não passante. Os furos passantes apresentam menores problemas, pois nestes o cavaco pode sair por baixo ou por cima dependendo da configuração do canal, reto ou helicoidal, e da ponta helicoidal. Em geral, quando o furo é passante, utiliza-se uma configuração de macho que permite a saída do cavaco por baixo.

Em furos não passantes o maior problema é à saída do cavaco, mas há também um aumento de temperatura se comparado com os furos passantes em alguns casos. Contudo retirar o cavaco de dentro do furo durante e após a usinagem é um grande problema e que durante a usinagem pode levar a falhas catastróficas da ferramenta. A quebra do macho de cote se dá na maioria dos casos durante o retorno, que é quando o cavaco se aloja entre o material da peça e o macho, isso faz com que haja um aumento abrupto e pontual do torque. A Fig. 2.22 mostra esse comportamento.

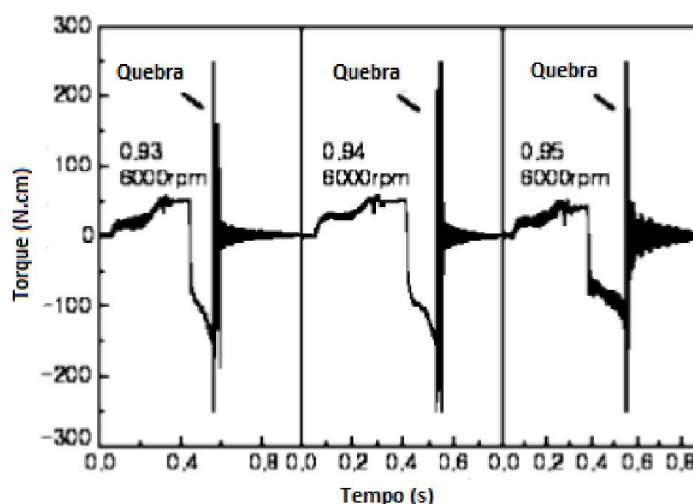


Figura 2. 22 - Sinal de torque na quebra do macho (AHN et al., 2003, modificada)

Há também o problema de acúmulo de cavaco no fundo do furo, para que esse acúmulo não se torne um problema é necessário contemplar no projeto um espaço para o

acúmulo de cavaco, que seria a diferença entre o comprimento do furo e o comprimento rosqueado. Cada material possui uma relação específica entre essas dimensões.

O material da peça é outro fator determinante no processo de rosqueamento com macho de corte. Apesar de ser um fator determinante em qualquer processo de usinagem o material, no rosqueamento isso é agravado pela limitação dos materiais encontrados para a ferramenta de corte. Ao contrário de processos como torneamento, fresamento e furação, no rosqueamento interno o material da ferramenta limita-se ao aço rápido e ao metal duro.

Outro aspecto a ser analisado e que afeta o torque é o comprimento rosqueado (comprimento em que o macho de corte entra na peça). Assim como a maioria das brocas os machos de corte não são projetados para grandes profundidades, que para esta operação são valores acima de 1,5 vezes o diâmetro. Acima desta medida o processo começa a ficar comprometido em suas tolerâncias indicadas pelo fabricante. Mas o principal efeito é sobre o torque, quanto maior a profundidade rosqueada maior o torque, Fig. 2.23, mas a partir de uma determinada profundidade o torque passa a ser constante.

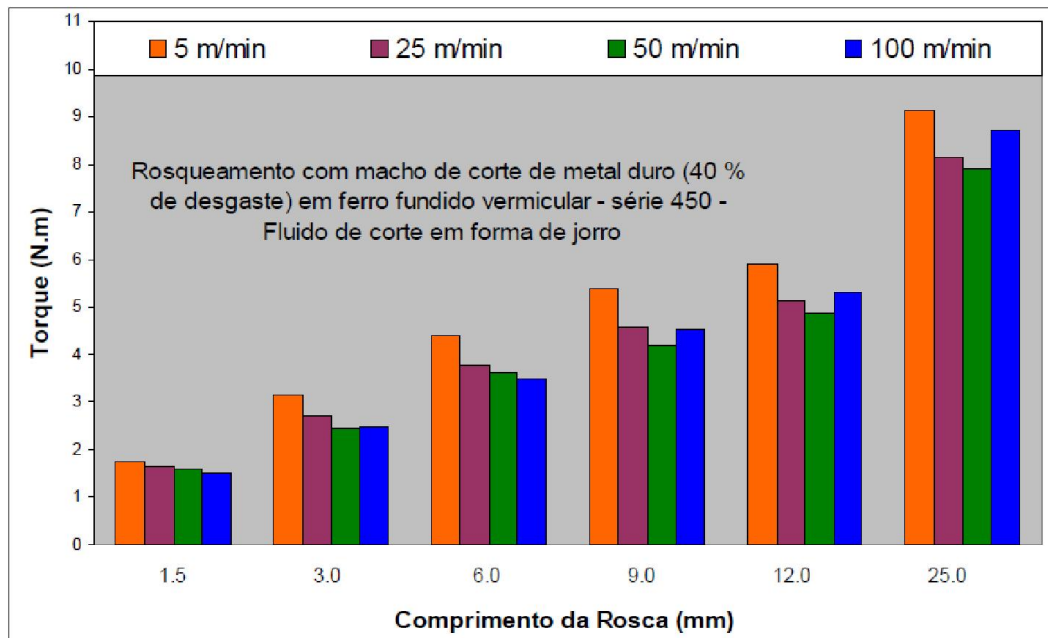


Figura 2. 23 - Torque em função do comprimento da rosca e da velocidade de corte, durante o rosqueamento de uma chapa escalonada, com furos passantes com um macho M13X1,5 (DA MOTA, 2009)

Além do comprimento rosqueado, há também a variação da espessura da peça, essa se diferencia do comprimento rosqueado pelo fato de que agora o comprimento da ponta chanfrada do macho de corte será desconsiderado. Pois toda a parte cônica irá passar além da espessura da peça, contudo, o comportamento do torque é similar à variação do comprimento rosqueado. Mas a variação do torque é menos acentuada em função da espessura da peça. A Fig. 2.24 apresenta esse comportamento.

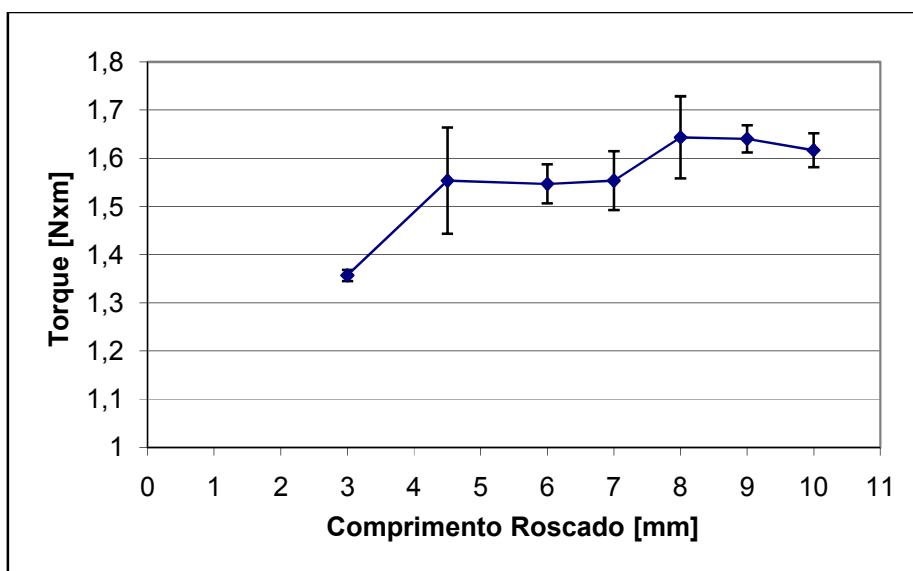


Figura 2. 24 - Média dos torques para diferentes espessuras rosqueadas com um macho M6X1 a uma velocidade de corte de 35m/min a seco, material ferro fundido vermicular da classe 350 (PEREIRA; NAVES; DA SILVA, 2010)

Para a maioria dos materiais a ser rosqueado é imperativo o uso de fluido de corte, somente em alguns casos não há a necessidade de utilizar o fluido de corte, como por exemplo, o rosqueamento do ferro fundido cinzento, mas caso ele seja utilizado traz alguns benefícios para o processo. O rosqueamento interno com machos de corte de aços é um exemplo de operação impossível de ser realizada sem fluido de corte.

Um problema muito comum durante o rosqueamento de materiais dúcteis é a adesão do material da peça ao macho de corte. Essa característica é muito comum na usinagem a seco e gera alguns problemas ao processo. Sendo o mais grave deles a quebra do macho de corte. A Fig. 2.25 mostra o torque durante o rosqueamento interno por usinagem a seco de uma liga de alumínio com silício. Nota-se que a imagens dos machos de corte

apresentam material aderido, mas na ferramenta de aço rápido sem revestimento, essa adesão é tão acentuada que leva a quebra da ferramenta. Nos dois gráficos observa-se picos no sinal de torque, eles são provocados pela adesão do material da peça na ferramenta, mas também devido ao cavaco solto na região de corte.

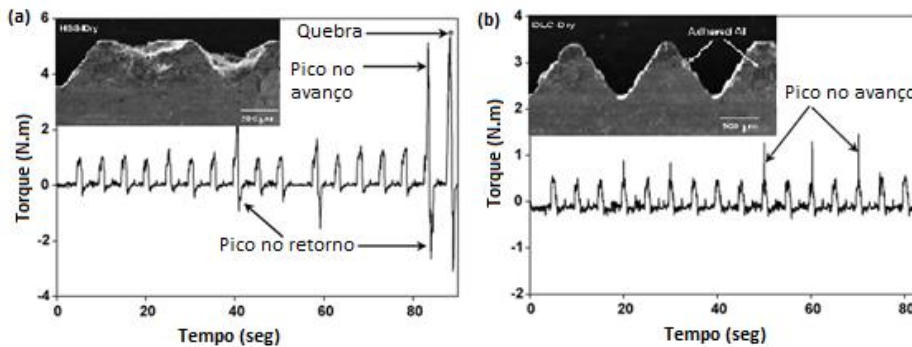


Figura 2. 25 - Variação do torque durante o rosqueamento interno por usinagem. (a) HSS rosqueamento a seco; (b) HSS revestida com DLC, rosqueamento a seco (BHOWMICK, 2010, modificado)

2.5.3. Características que alteram o torque no rosqueamento por laminação

Ao contrário do rosqueamento interno por usinagem o processo de rosqueamento interno por laminação não apresenta as mesmas dificuldades em furos não passantes. Uma vez que o processo não produz cavaco, todos os problemas associados a sua formação são eliminados. Então, acúmulo de cavacos no “fundo” do furo e cavacos suspensos alojando-se entre a ferramenta e a peça não serão mais problemas.

Outra característica importante é o comprimento rosqueado (profundidade que o macho penetra no material). O torque aumenta com o aumento do contato da ferramenta com o material da peça, mas até um determinado ponto, aproximadamente o segundo filete da parte reta do macho laminador. A Fig. 2.27 mostra que, a partir de um determinado comprimento rosqueado o contato não aumenta devido a uma folga em uma parte da região cilíndrica da ferramenta (FROMENTIN et al., 2010). Essa característica pode ser confirmada pelo gráfico de torque do processo (Fig. 2.26), pois a partir de um determinado tempo o torque assume um valor constante até o momento da inversão do movimento. Sendo o torque total formado pelo torque de formação mais o torque devido ao atrito entre o macho laminador e o material da peça (recuperação elástica).

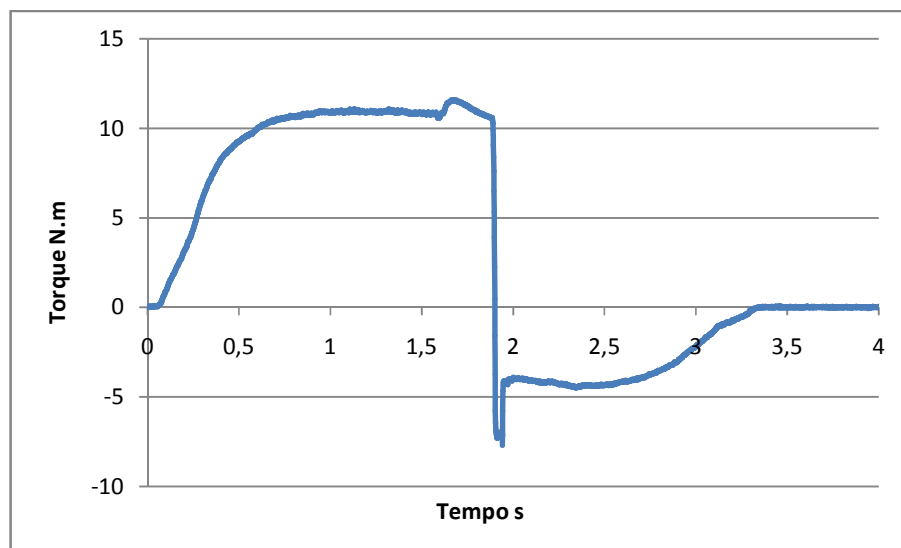


Figura 2. 26 - Sinal de torque durante o rosqueamento interno por laminação de um aço AISI 1045, com velocidade de corte de 10m/min

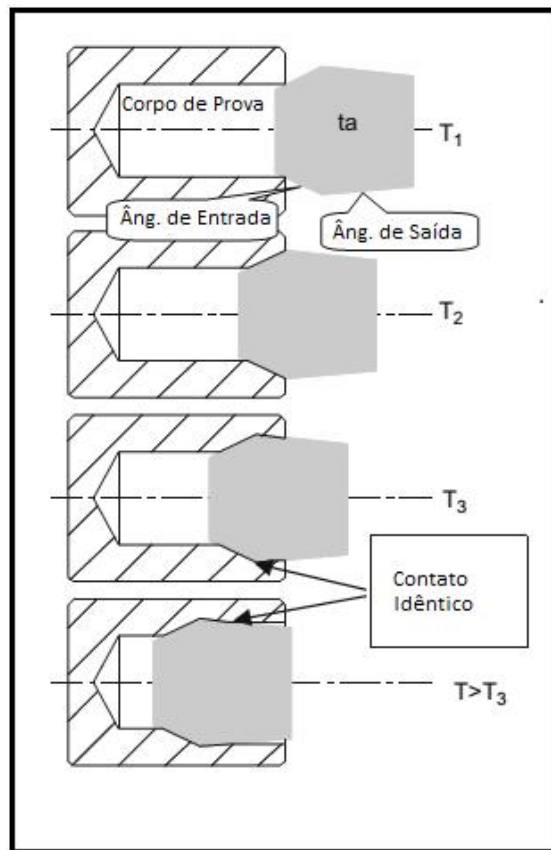


Figura 2. 27 - Diferentes posições do macho laminador durante o processo (FROMENTIN et al., 2010, modificado)

CAPÍTULO III

Metodologia

Neste capítulo está detalhado o procedimento experimental, assim como os materiais, ferramentas e equipamentos utilizados para realização do trabalho.

Para o testes de rosqueamento foram utilizados cinco diferentes materiais para os corpos de prova, ferramentas de corte e laminação, sistema de fixação dos corpos de prova e das ferramentas, sistema de aplicação de fluido, máquina ferramenta e sistema de aquisição de dados. Independente do tipo de teste realizado o numero de repetições foram três, para que pudesse ser feita a média e desvio padrão. Cada um dos itens acima será detalhado a seguir.

3.1. Materiais para corpos de prova

Uma das variáveis deste trabalho foi o material do corpo de prova, sendo utilizado um total de cinco materiais. Todos os materiais utilizados possuem uma ductilidade mínima que permite a realização do processo de rosqueamento por laminação. Eles são listados em ordem crescente de resistência mecânica e sua composição química esta na Tab. 3.1. A escolha dos materiais foi baseada nos diferentes níveis de ductilidade, dureza e resistência mecânica, mas claro que respeitando as características mínimas que o material deveria possuir para ser usinado e laminado.

Tabela 3. 1 - Composição química dos materiais.

Material	Porcentagem do Elemento Químico
Liga de alumínio 6351	1,2% Si --- 0,16% Fe --- 0,47% Mn --- 0,41% Mg
Aço SAE 1045	0,43 - 0,50% C --- 0,15 - 0,35% Si --- 0,60 - 0,90% Mn --- Max 0,4% P --- Max 0,05% S --- 0,10 - 0,20% Cr
Aço ligado AISI 4140	0,38 - 0,43% C --- 0,20 - 0,35% Si --- 0,75 - 1,0% Mn --- 0,80 - 1,10% Cr --- 0,15 - 0,25% Mo
Aço endurecido N2711M	0,56% C --- 0,25% Si --- 0,70% Mn --- 1,10% Cr --- 1,65% Ni --- 0,075% V
Aço endurecido VP ATLAS	0,23% C --- 0,20% Si --- 1,6% Mn --- 1,90% Cr --- 0,50% Ni --- 0,70% Mo --- 0,03% Nb

Foram preparados corpos de prova de cada um destes materiais. As dimensões dos corpos de prova são diferentes em função da diferença entre as dimensões do material, mas todos tem em comum a espessura a ser rosqueada, que é de 16 mm. A Fig. 3.1 mostra o sistema para teste de rosqueamento montado, com um exemplo de corpo de prova e o método de aplicação de fluido de corte a baixa vazão.

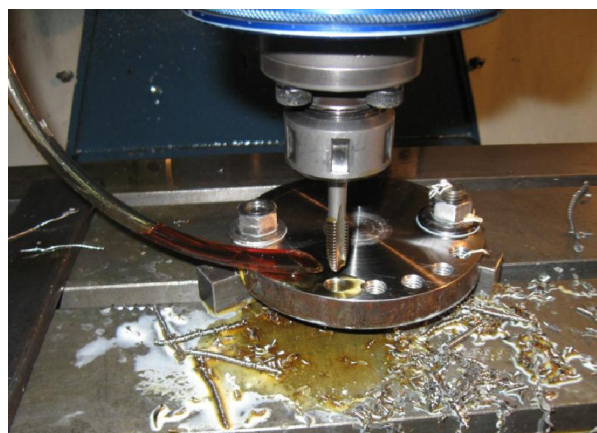


Figura 3. 1 - Teste de rosqueamento por usinagem do aço AISI 414

3.2. Equipamentos e ferramentas

Para realizar os testes de rosqueamento, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Centro de usinagem Discovery 760 Romi, com 3 eixos, potência de 11kW e variação de velocidade de 0 à 10.000rpm.
- Dinamômetro Kistler modelo 9123 C1211.
- Condicionador de sinal de multicanais da Kistler modelo 5223131.
- Placa de aquisição de sinais DAK 6202 com taxa de aquisição de 1000Hz.
- Sistema de aplicação de fluido à baixa vazão (5ml/s).

As ferramentas usadas foram brocas, escareadores e machos de corte e laminação, sendo uma broca escalonada HSS-E Titex Plus com diâmetro menor de 8.5mm e maior de 12mm, um escareador OSG de metal duro 12 X 10 X 65mm e uma broca de metal duro Hypro Carb de 9.3mm revestida com TiAlN (Fig. 3.2). O óleo de corte foi um óleo mineral Rosca Corte.



Figura 3. 2 - Ferramentas usadas para preparação dos furos para rosqueamento

Os machos de corte e laminação usados estão mostrados na Fig. 3.3. As suas especificações são:

- Macho laminador S-XPF M10X1.5 DIN371.
- Macho de corte 250/1 M10X1.5 POT DIN 371.
- Macho laminador 320/1 M10X1.5 NTR-B DIN 371.

- Macho laminador 320/1 M10X1.5 NTR-B TiN DIN 371.



Figura 3. 3 - Machos de corte e laminadores usados para os testes de rosqueamento

O macho laminador S-XPF M10X1.5 DIN371, foi escolhido porque o fabricante o classifica como uma excelente escolha para aços de médio carbono, aço liga, aços endurecidos até 35HRC e para alumínio e suas ligas. Os machos laminadores usados no ensaio que avaliou o revestimento (320/1 M10X1.5 NTR-B DIN 371 e 320/1 M10X1.5 NTR-B TiN DIN 371) foi escolhido por terem as mesmas características geométricas, usarem o mesmo material de base e seguirem a mesma norma, sendo a única diferença um ser com revestimento e o outro sem revestimento. O macho de corte 250/1 M10X1.5 POT DIN 371, não pode ser escolhido devido as suas excelentes características com os diferentes materiais, pois ele só é indicado pelo fabricante para aços de médio carbono, mas devido a sua disponibilidade e falta de tempo utilizou-se este macho de corte. Já que a avaliação não se concentrava em sua vida ou desempenho.

A Figura 3.4 mostra os machos de corte usados no teste que avaliou o torque filete a filete. Para este teste os machos de corte foram modificados, ou seja, os filetes posteriores aos que foram avaliados foram retirados. O teste consiste em avaliar a parcela do torque de formação com que cada filete de rosca do macho de corte contribui no torque total. Para

elucidar melhor como o método foi aplicado, o primeiro filete será usado como exemplo. Para analisar o torque que o primeiro filete de rosca do macho de corte produz foi retirado todos os outros filetes do macho, em um macho com três canais isso significa deixar apenas o primeiro dente de cada carreira de dentes. Após isso rosquear a peça e analisar o sinal gerado por aquele filete.

Para avaliar o torque gerado pelo segundo filete, retira-se todos os outros filetes do macho deixando apenas o primeiro e o segundo filete. Como o torque gerado pelo primeiro já foi medido, a diferença é o torque gerado pelo segundo. Assim foram feitos os testes até o quinto filete de rosca do macho de corte.



Figura 3. 4 - Macho de corte modificado para análise filete a filete

Para a análise de comprimento e espessura rosqueado é necessário mostrar a diferença entre os termos. A Fig. 5 mostra o comprimento rosqueado, este medida representa o quanto a ferramenta penetra na peça.

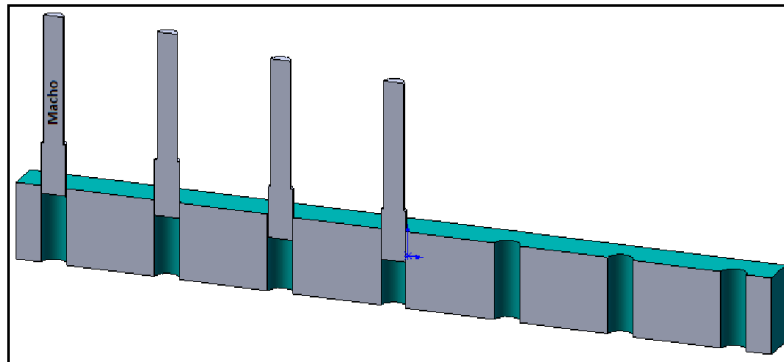


Figura 3. 5 - Comprimento rosqueado

A Figura 6 mostra a espessura rosqueada é a espessura da peça rosqueada, uma vez que toda a espessura tenha sido rosqueada.

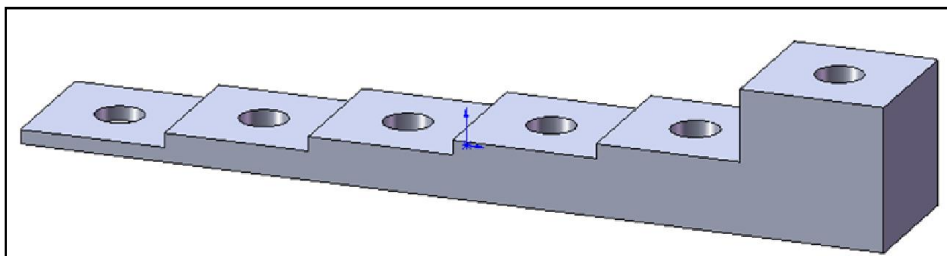


Figura 3. 6 - Espessura rosqueada

3.3. Ensaios de Microdureza e dureza

Para caracterizar os materiais utilizados nos corpos de prova, foram realizados ensaios de dureza e microdureza. Também foi avaliado o efeito do processo na dureza e microdureza na proximidade dos filetes produzidos. Contudo os ensaios de microdureza para avaliação do filete de rosca produzido por usinagem e laminação foram realizados apenas no aço SAE 1045, no AISI 4140 e na liga de alumínio 6351. Para os ensaios de dureza e microdureza nos materiais, foram preparados corpos de prova, com sessão perpendicular à direção de avanço a ser utilizado. A Fig. 3.5 mostra os corpos de prova embutidos. Os corpos de prova após o processo de rosqueamento estão mostrados na Fig. 3.6.

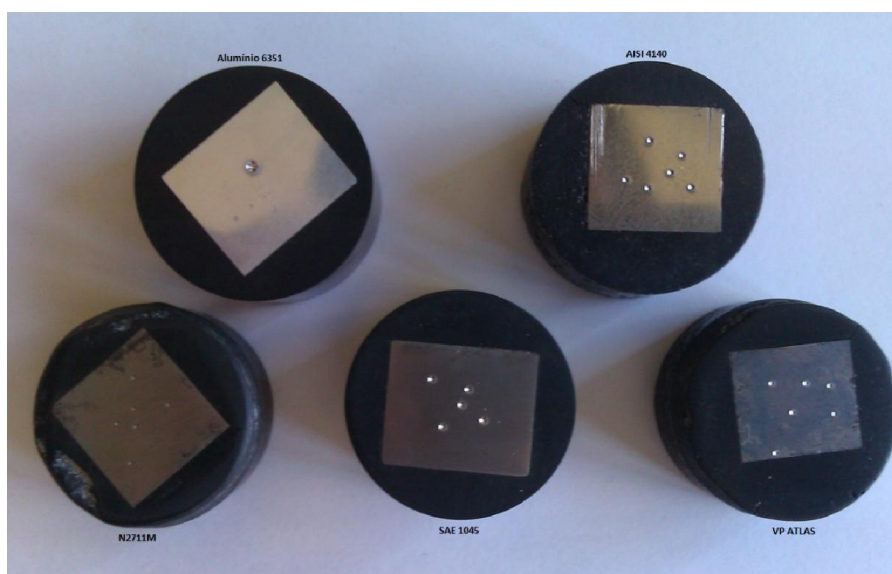


Figura 3. 7 - Corpos de prova para ensaios de dureza e microdureza

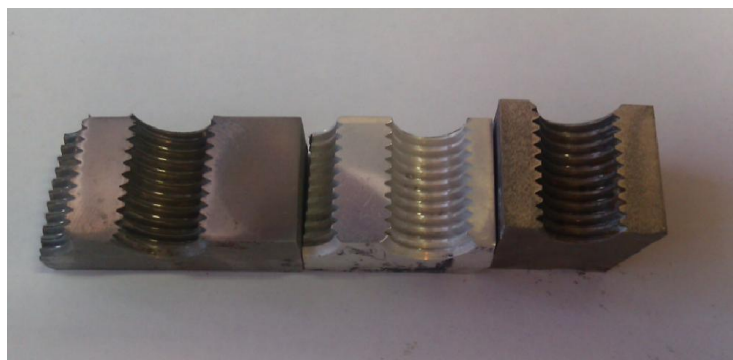


Figura 3. 8 - Corpos de prova para ensaio de microdureza da seção transversal do filete de rosca

Para realizar os ensaios de microdureza, os corpos de prova foram lixados e polidos para depois fazer o ataque químico que revelou a microestrutura. As amostras do corpo de prova a ser usinado foram embutidas, já as amostras das sessões das roscas produzidas não foram embutidas. Após essa etapa as amostras foram lixadas na sequencia de lixa 120, 220, 400, 600, 800 e 1000, após o lixamento foi feito o polimento com pasta de diamante de $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$.

Encerrada a etapa de polimento as amostras foram atacadas. A liga de alumínio 6351 foi atacada com Keller (190 ml H_2O , 5ml HCl, 3ml HNO_3 , 2ml HF), o aço SAE 1045 e o AISI 4140 foram atacados com Nital 2% e os aços endurecidos N2711M e VP ATLAS com Nital 4%.

Após revelada a microestrutura o primeiro ensaio realizado foi o de microdureza. Para isso foi utilizado um microdurômetro DuraScan 10 EMCOTEST, Fig. 3.7. Em seguida foi feita a macrodureza com um durômetro M4C 025 G3 EMCOTEST, Fig. 3.7. A Fig. 3.8 mostra um exemplo de resultado de microdureza.

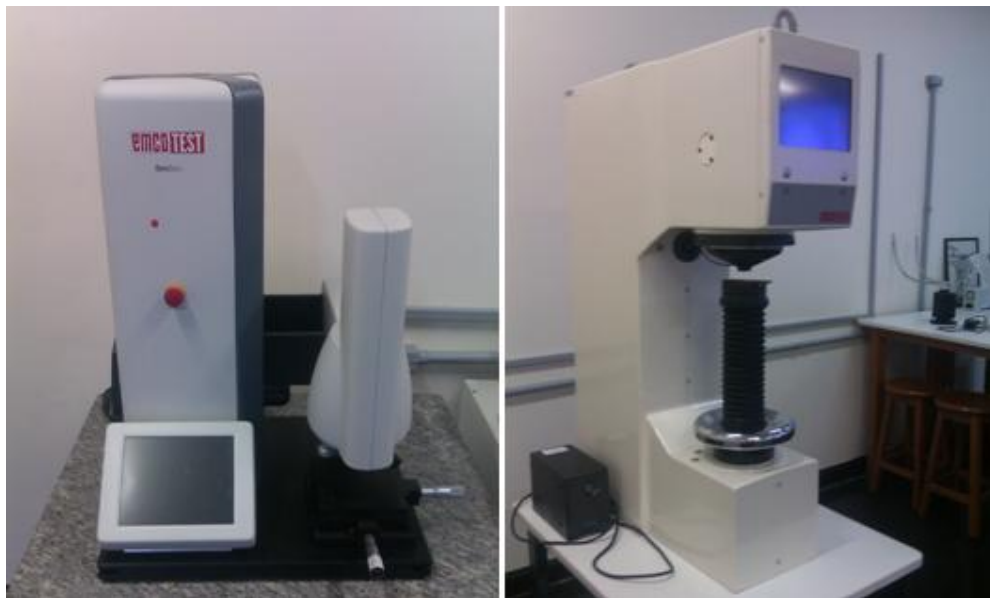


Figura 3. 9 - Microdurômetro DuraScan 10 EMCOTEST e um durômetro M4C 025 G3 EMCOTEST

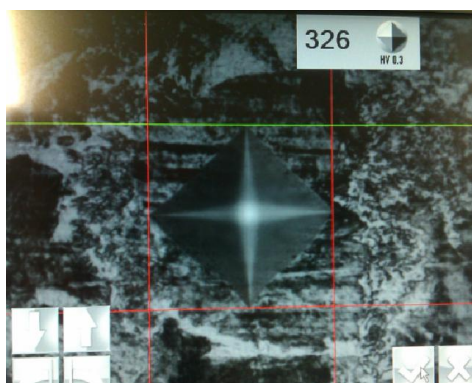


Figura 3. 10 - Resultado de microdureza.

3.3.1. Avaliação do filete de rosca através da microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados em todos os materiais dos corpos de prova para a sua caracterização. No entanto, apenas do aço AISI 4140, SAE 1045 e na liga de alumínio 6351 o ensaio foi usado para avaliar o efeito da velocidade de corte na microestrutura do material analisado e comparar o efeito dos diferentes processos de rosqueamento sobre a microestrutura do filete de rosca. A Fig. 3.9 mostra os pontos onde foi realizada a microdureza na seção transversal do filete de rosca. Os pontos 1 e 8 foram medidos a uma distância de 80 μ m da superfície, os pontos 2,4,5,7 a 100 μ m, os pontos 9 e 10 a aproximadamente 150 μ m do ponto anterior e os pontos 3 e 6 no centro do filete sendo o 3 a 200 μ m do ponto 1 e o ponto 6 a 200 μ m do ponto 3. Contudo, para uma melhor posição de medição e para medir a dureza da estrutura desejada essas medidas sofreram alguma alteração.

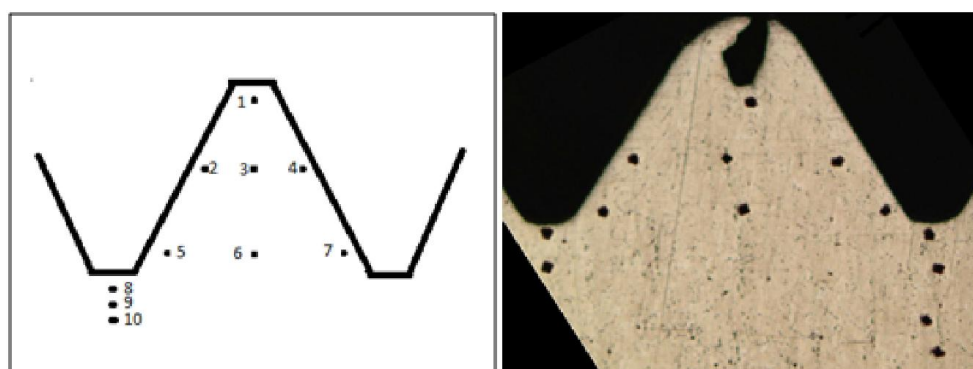


Figura 3. 11 - Pontos de medição da microdureza na seção do filete de rosca

As variáveis analisadas nos ensaios de microdureza foram:

- Material do corpo de prova.
- Velocidade de corte/laminação.
- Processo de rosqueamento (usinagem e laminação).

Para a realização do ensaio uma rosca usinada ou laminada era cortada ao meio depois lixada, polida e atacada com algum reagente químico. Durante o ensaio em uma mesma rosca, três filetes foram submetidos ao ensaio, ao final a média e o desvio padrão foi feita entre os três.

3.4. Ensaio de Resistência à Tração das Roscas

A resistência à tração das roscas produzidas foram avaliadas através de ensaio segundo metodologia proposta por Reis (2004). Esta metodologia propõe avaliar a resistência mecânica de roscas através de ensaios de tração de um para parafuso-corpo de prova roscado. Os Ensaios de tração foram realizados apenas no aço SAE 1045, no AISI 4140 e na liga de alumínio 6351. Para os ensaios de tração dos filetes de roscas os corpos de prova foram usinados com 19 X 19 X 10mm, Fig. 3.10, e um furo rosqueado foi realizado no centro do corpo de prova. Um dispositivo de fixação foi fabricado para realizar os ensaios, já que neste formato não havia como fixar na máquina de ensaios de tração. Neste ensaio o número de repetições para os ensaios foram três e destes foram feitas a média e desvio padrão.

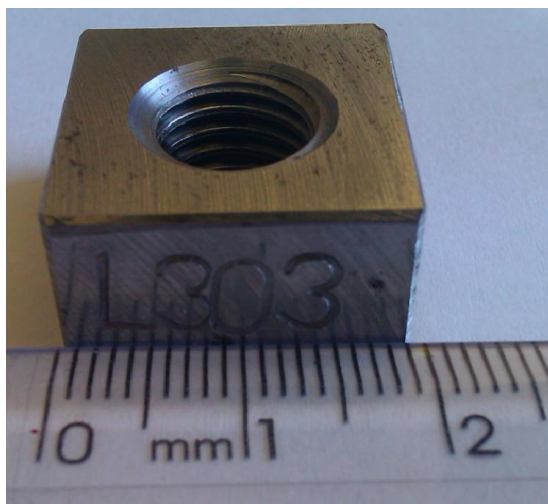


Figura 3. 12 - Corpo de prova para ensaio de tração

Para os ensaios foram usados uma máquina de tração MTS 810, o dispositivo fabricado, os corpos de prova e parafusos de aço ligado tratados termicamente da classe 12,9. Contudo, o ideal seria parafusos com uma resistência mecânica ainda maior, como por exemplo, a classe 14,9. A Fig. 3.11 mostra o sistema durante a execução do ensaio.

Os ensaios de tração foram realizados nos filetes de rosca e em corpos de prova padronizados de acordo com a NBR 6152 (2002), para caracterização de propriedades mecânicas como tensão de escoamento, tensão limite e módulo de elasticidade. Os ensaios de tração para caracterização do material foram realizados em todos os materiais e cada material teve três corpos de prova e destes foram feitas a médias e desvios padrões.



Figura 3. 13 - Ensaio de tração dos filetes de rosca.

3.5. Condições de Corte

Além do material dos corpos de prova, foram avaliados o efeito de outros parâmetros no processo de usinagem. Os parâmetros avaliados foram:

- material do corpo de prova.
- velocidade de corte/laminação.
- comprimento rosqueado.
- espessura rosqueada.
- diâmetro do pré-furo.
- revestimento da ferramenta.
- avanço (passo programado).
- número de filetes durante o rosqueamento.

A alteração do material do corpo de prova, da velocidade de corte/laminação, do comprimento e espessura rosqueada, o diâmetro do pré-furo e do avanço (passo

programado) foram feitos para os dois processos de rosqueamento analisados, usinagem e laminação. Já a alteração do tipo de revestimento foi realizada apenas no rosqueamento por laminação e a alteração do número de filetes durante o rosqueamento apenas no processo por usinagem.

Os testes com alteração do comprimento e espessura rosqueada, diâmetro do pré-furo, revestimento da ferramenta, avanço (passo programado) e alteração do número de filetes, foram realizados apenas no aço SAE 1045.

As velocidades adotadas foram de 10, 20 e 30m/min. Esses valores foram determinados em função das especificações do fornecedor e em função dos materiais analisados. Evidentemente, o alumínio pode ser usinado com velocidades de corte bem superiores. Porém, os aços endurecidos tem uma limitação indicada pelo fabricante de 25m/min para materiais com até 35 HRC. Mesmo assim, foram usadas velocidades de corte/laminação de 30m/min para materiais com dureza de 40 HRC aproximadamente.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

4.1. Caracterização dos Materiais dos Corpos de Prova

A Figura 4.1 mostra as durezas de todos os materiais usinados, sendo que a unidade usada para a liga de alumínio 6351 é Brinell. A Fig. 4.2 mostra os resultados de microdureza. Nos aços SAE 1045 e AISI 4140 a microdureza foi realizada na perlita enquanto que nos aços endurecidos foi sobre a martensita para o N2711M e na bainita para o VP ATLAS.

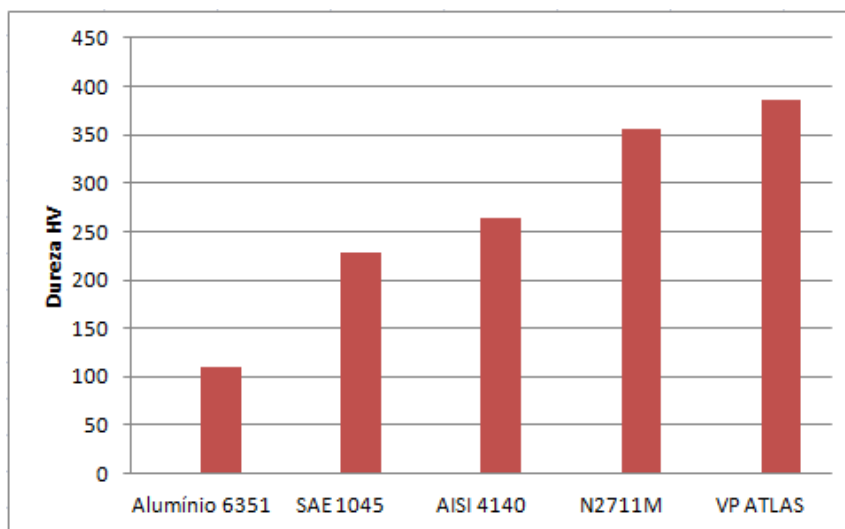


Figura 4. 1 - Dureza média dos materiais

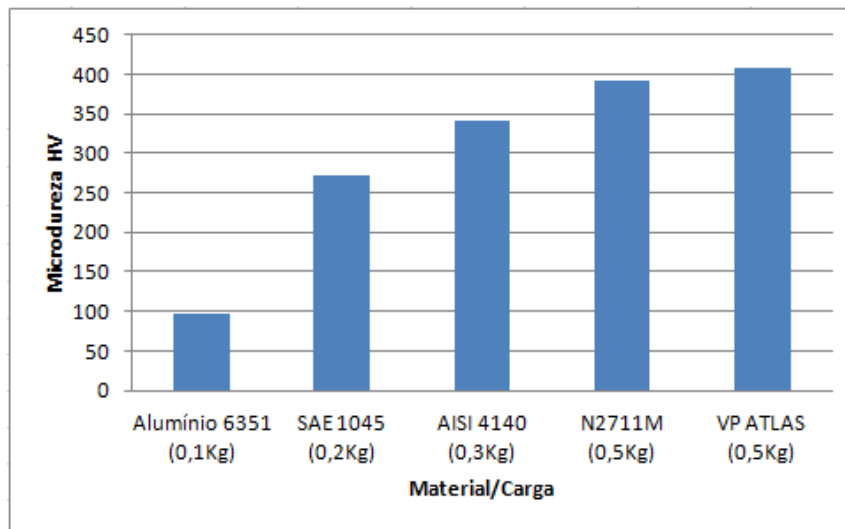


Figura 4. 2 - Microdureza média dos materiais

A Tabela 4.1 mostra os resultados de tensão de escoamento, tensão limite e módulo de elasticidade.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Tensão Esc. (MPa)	Tensão Lim. (MPa)	Módulo de Elast. (MPa)
Alumínio 6351	232	270	47300
SAE 1045	681	804	97653
AISI 4140	630	924	87943
N2711M	1002	1216	76557
VP ATLAS	1044	1249	76871

Estes primeiros resultados, que caracterizam algumas propriedades mecânicas dos materiais, serviram para auxiliar no entendimento do comportamento dos materiais frente aos testes realizados.

4.2. Efeito da Velocidade de corte e laminação no sinal de torque

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram uma comparação entre as curvas de torques no rosqueamento interno por usinagem e laminação em diferentes velocidades de corte. No rosqueamento por usinagem praticamente não há influência da velocidade de corte. No

entanto, no processo de laminação o torque diminui com o aumento velocidade de laminação. O torque tem uma queda de aproximadamente 17%, no aço SAE 1045, entre as velocidades de corte de 5 e 30 m/min. Essa queda pode ser explicada pelo efeito da temperatura. Com o aumento da velocidade de corte, ocorre um aumento da geração de calor, o que significa aumento de temperatura e consequente diminuição da resistência mecânica do material, facilitando a deformação. Segundo Trent (2000) apud Machado et al. (2009), ao alterar apenas a velocidade de corte, ou seja, alterando a taxa de remoção de cavaco, a um aumento da temperatura do processo. Isto ocorre tanto no processo de usinagem quanto no de laminação, mas no processo de rosqueamento por laminação o aumento de temperatura é maior devido ao maior atrito. Com isso há uma maior queda da resistência mecânica ao comparar com o rosqueamento por usinagem e por isso nota-se essa queda na curva de torque com o aumento da velocidade de laminação.

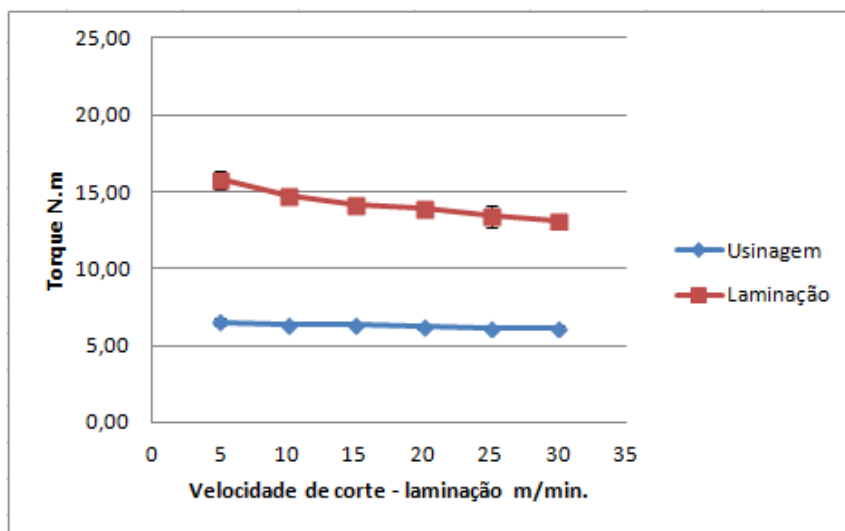


Figura 4.3 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço SAE 1045

Ao comparar as curvas de torque das figuras 4.3 e 4.4, para o processo de usinagem, nota-se que não há diferença entre o aço SAE 1045 e o AISI 4140. Mas ao analisar as curvas do processo de laminação há uma diferença significativa, sendo o torque de rosqueamento do SAE4140 superior ao SAE 1045. Isso pode ser explicado pela diferença entre tensão máxima de escoamento do material. O aço AISI 4140 tem uma resistência de 924MPa e o aço SAE 1045 804Mpa.

A diferença entre os valores de torque no processo de rosqueamento por laminação do aço AISI 4140 e SAE 1045 não depende apenas da resistência mecânica do material do corpo de prova. Estes dois materiais têm valores de resistência mecânica próximos, mas os elementos de liga também são responsáveis pelo comportamento do material durante a deformação. Esses elementos aumentam a encruabilidade do material, ou seja, cada nível de deformação criado dificulta o próximo nível que será aplicado ao material. Levando em consideração que cada filete da parte cônica do macho laminador cria um determinado nível de deformação, logo, o primeiro tem certa dificuldade, que é maior para o segundo e assim sucessivamente.

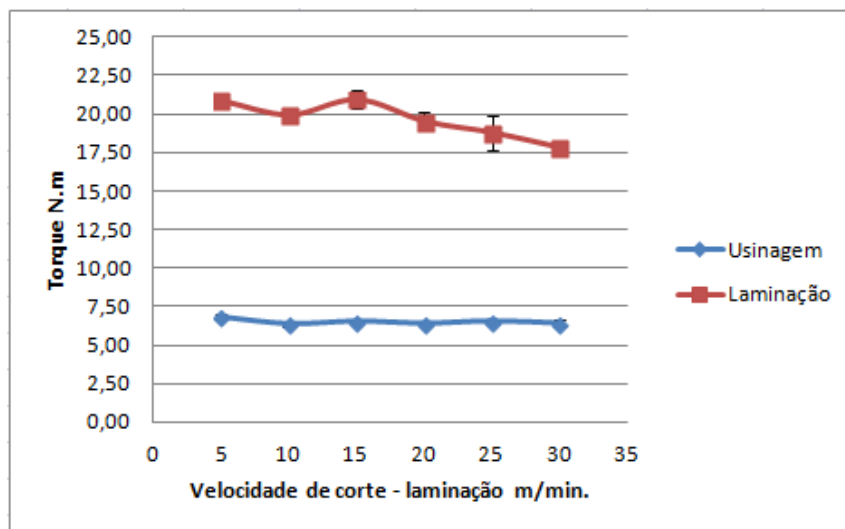


Figura 4. 4 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço AISI 4140

Na Figura 4.5, observam-se os baixos valores do torque de rosqueamento tanto para usinagem quanto para laminação na liga de alumínio. Isso se deve a baixa dureza e resistência mecânica do alumínio. Contudo, o alumínio foi o material que apresentou a maior redução percentual no torque com a velocidade de corte, aproximadamente 20%.

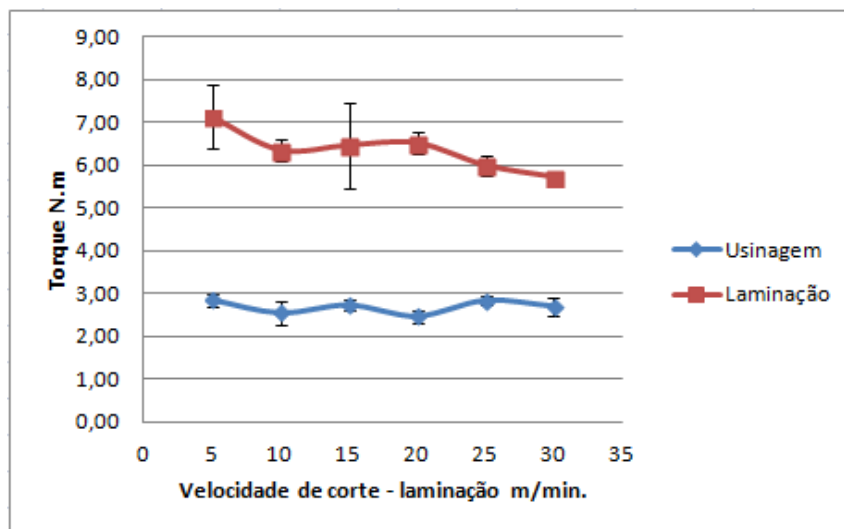


Figura 4. 5 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para a liga de alumínio 6351

Para os aços endurecidos, a faixa de velocidade de corte utilizada é menor devido às altas durezas destes materiais. No aço N2711M, o aumento de velocidade de corte resulta em um aumento do torque (Fig. 4.6). Durante os ensaios percebe-se que esse comportamento ocorre em função do desgaste prematuro da ferramenta. Apesar de ter rosqueado poucos furos o macho de corte apresentou um acentuado desgaste. De acordo com o fabricante, as velocidades de corte indicadas para este material são de 8 a 10 m/min. A Fig. 4.7 mostra o comportamento do sinal de torque durante uma operação de rosqueamento por usinagem. Além do aumento do torque durante o avanço da ferramenta, outro detalhe que reforça o desgaste da ferramenta, é o aumento do torque durante o retorno do macho. Um aumento do torque significa um aumento nas forças de atrito no retorno.

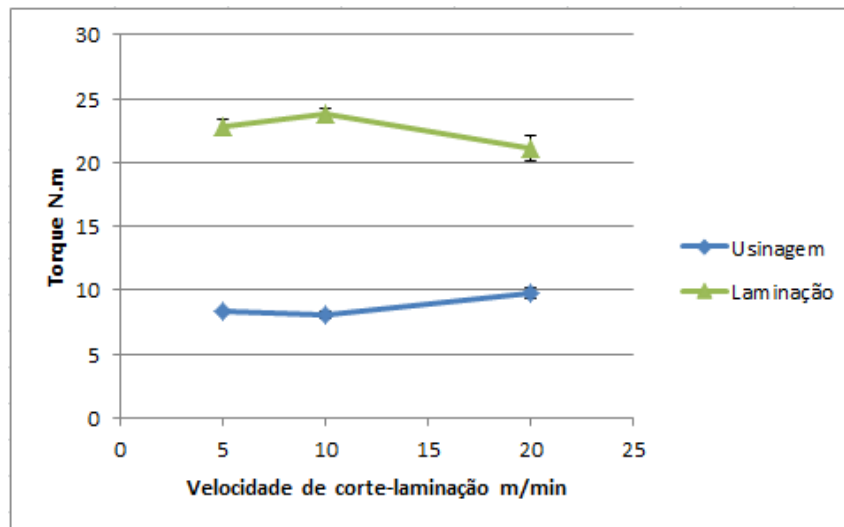


Figura 4. 6 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço N2711M

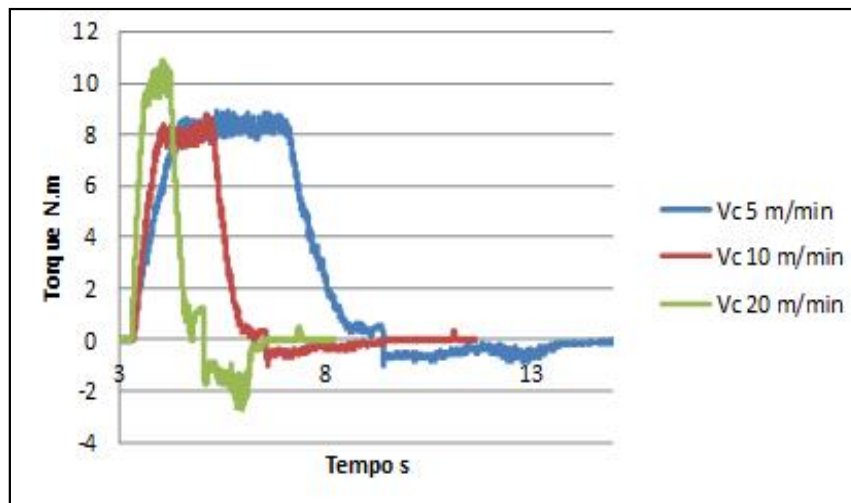


Figura 4. 7 - Curva de torque do processo de usinagem para diferentes velocidades de corte para o aço endurecido N2711M

A curva referente ao torque (Fig. 4.6), no processo de rosqueamento por laminação tem um comportamento oposto ao torque pelo processo de usinagem. O aumento da velocidade de laminação gera uma queda no valor do torque. Características como alta dureza e resistência mecânica fazem com que as temperaturas alcançadas sejam maiores dos que nos outros materiais como o aço SAE 1045 e o AISI 4140. Segundo Gruning

(1966), quanto maior for a velocidade de conformação, maior será o calor gerado pelo atrito interno. Assim como nos outros materiais analisados o aumento de temperatura favorece, mais do que na usinagem, o processo de rosqueamento interno por laminação. Isso porque o aumento da ductilidade em função do aumento de temperatura é mais influente nas deformações plásticas do que no cisalhamento do material. Mas ao contrário do macho de corte, o macho laminador não apresenta sinais de desgaste devido às características geométricas, por ser uma ferramenta mais robusta, e também por ser uma ferramenta revestida com multicamadas de carbonitreto de titânio (TiCN).

A Figura 4.8 mostra o comportamento para o aço VP ATLAS. Assim como no aço N2711M ele apresentou o mesmo comportamento das curvas, mas com um valor médio de torque maior do que o aço N2711M. Como eles são aços concorrentes na fabricação de moldes plásticos, utilizando o valor do torque médio como fator de usinabilidade o VP ATLAS apresenta um pior usinabilidade em relação ao N2711M.

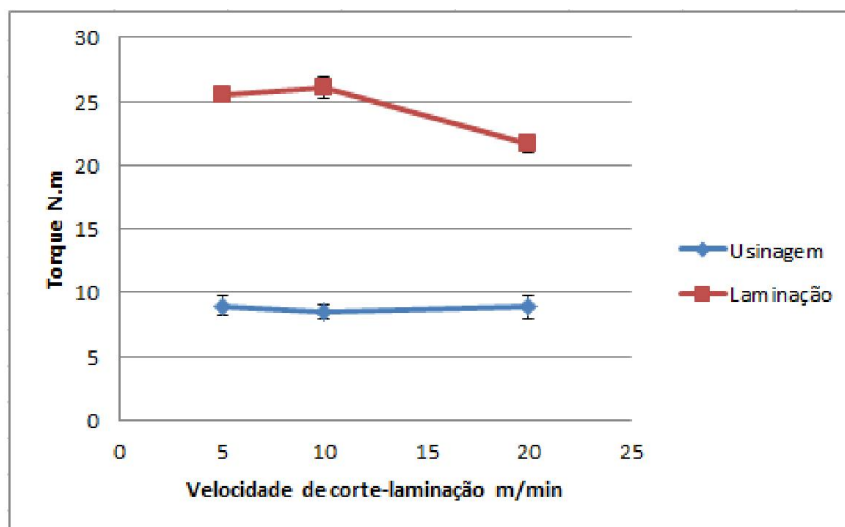


Figura 4. 8 - Comparação entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido VP ATLAS

A Fig. 4.9 mostra os sinais de torque durante a operação de laminação em três velocidades. Assim como na Fig. 4.7, a Fig. 4.9 mostra uma alteração no gráfico na curva referente à velocidade de corte de 20m/min. A curva apresenta um pico no avanço e um torque (negativo) bem superior às outras curvas no retorno. Como já foi dito, esse aumento no torque de retorno é em função do aumento na força de atrito entre a ferramenta e o

material da peça. No caso, o que gera esse aumento é o desgaste da ferramenta, o que foi observado após o rosqueamento.

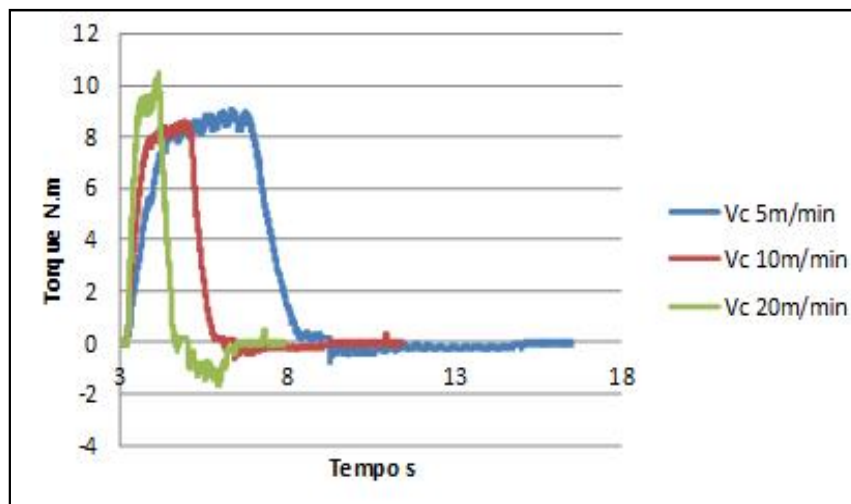


Figura 4. 9 - Curva de torque do processo de usinagem para diferentes velocidades de corte para o aço endurecido VP ATLAS

4.3. Efeito da velocidade de corte/laminação no torque de retorno do macho

A Figura 4.10 mostra a variação do torque de retorno com a velocidade de corte para o rosqueamento por usinagem do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo . Este resultado servirá para uma análise comparativa com os resultados do torque de retorno obtidos neste trabalho. Isto porque, uma vez que o ferro fundido cinzento apresenta uma baixíssima recuperação elástica. Guessier (2009) cita que os ferros fundidos se deformam elasticamente até o limite de proporcionalidade, que representa a tensão limite entre as regiões elásticas e plásticas. E com isso o torque de retorno é pouco influenciado pelo retorno elástico, e sim pelo erro de sincronismo, material aderido ou desgaste da ferramenta. Sendo o desgaste da ferramenta desconsiderado, já que cada ferramenta executou apenas nove roscas e o material aderido também pode ser descartado devido às características do material (material frágil).

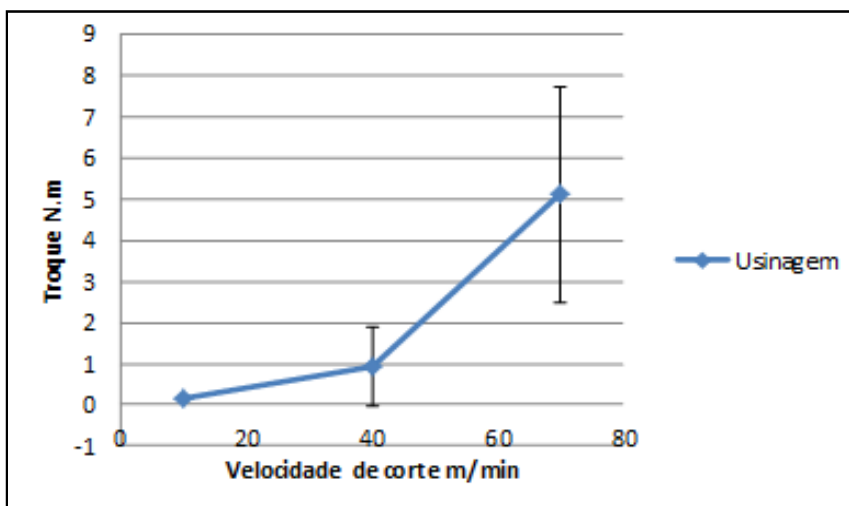


Figura 4. 10 - Torque de retorno no rosqueamento interno por usinagem de um ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo a seco

Ao analisar comportamento do torque no rosqueamento interno por laminação e usinagem do aço SAE 1045, percebe-se uma queda considerável do torque no processo de laminação com a velocidade (Fig 4.11). O aumento da velocidade de laminação gerou uma redução média de 27% do torque de retorno, contudo, no processo de rosqueamento por usinagem o aumento da velocidade de corte não teve influência sobre o torque de retorno. Ao comparar o torque de retorno no aço SAE 1045 com o torque de retorno do ferro fundido FC250, observa-se que o retorno elástico do aço SAE 1045 é desprezível para as roscas produzidas por ambos os processos. Outro fator que não influenciou o torque de retorno, dentro dessa faixa de velocidade, foi o erro de sincronismo e apesar do aço SAE 1045 ter uma tendência de aderir nas superfícies da ferramenta (folga e saída), isso não ocorreu talvez devido a utilização de fluido de corte.

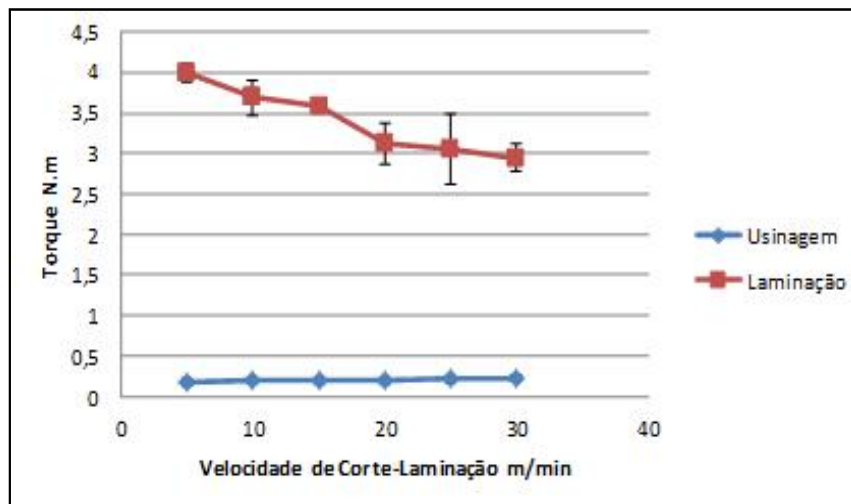


Figura 4. 11 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço SAE 1045

Para o aço AISI 4140 o comportamento das curvas de torque, tanto da usinagem como da laminação, tem o comportamento semelhante ao do aço SAE 1045 (Fig.4.12). Contudo, a redução percentual no torque de retorno no processo de laminação foi de aproximadamente 15%. Uma explicação para isso é a maior encruabilidade do aço AISI 4140, ou seja, apesar de sofrer o mesmo nível de deformação da liga de alumínio 6351 e do aço SAE 1045, ele sofre um aumento maior na sua resistência mecânica devido sua maior encruabilidade. Essa maior resistência mecânica, aumentou a dificuldade de deformar elasticamente o material no retorno, isso exigiu um maior torque para vencer a força de atrito. E a diferença percentual é menor devido ao maior encruamento em velocidades de laminação maiores.

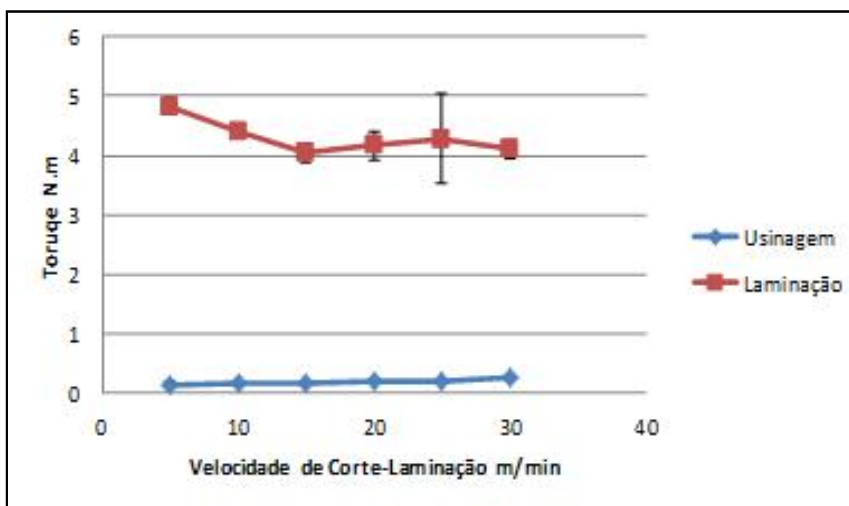


Figura 4. 12 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço AISI 4140

Na Figura 4.13, que mostra o torque de retorno para a liga de alumínio 6351, observa-se um comportamento um pouco diferente do que ocorreu no aço SAE 1045 e AISI 4140. A curva referente ao toque no processo de laminação teve um comportamento parecido, sendo a redução percentual aproximadamente 28%. Contudo, devido a baixa resistência mecânica do material, o material que retornou elasticamente não impõe uma resistência ao movimento (força de atrito) como os anteriores. No entanto, o torque de retorno para o processo de rosqueamento é superior aos dois aços apresentados anteriormente. A primeira hipótese para explicar essa diferença é o coeficiente de atrito dos dois metais, sendo o alumínio superior ao aço e o outro motivo está relacionado à recuperação elástica do material, que para os aços considera-se desprezível nas roscas produzidas por usinagem, mas no alumínio a dimensão da recuperação elástica é mais considerável. Associando um maior coeficiente de atrito a uma maior recuperação elástica teremos um torque devido ao atrito maior no alumínio do que nos aço.

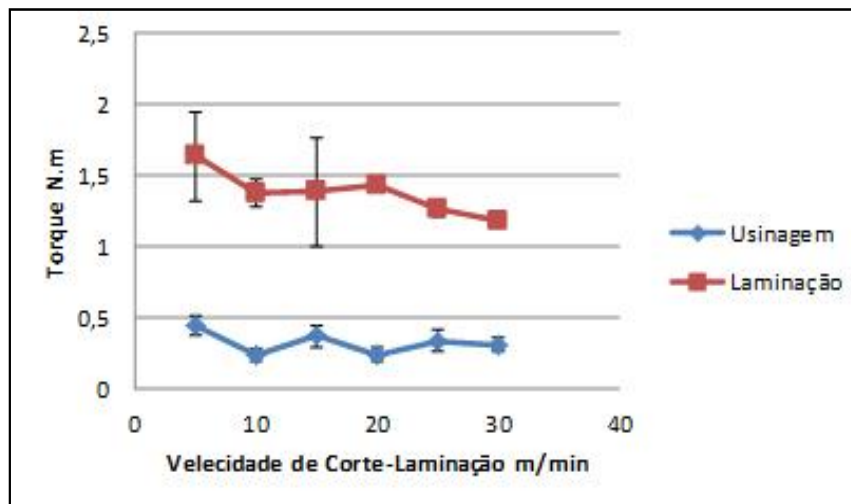


Figura 4. 13 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para a liga de alumínio 6351

Outro detalhe na Fig. 4.13 é que, ao considerar a velocidade de corte mínima e máxima, houve uma redução do torque de retorno na usinagem, o que não tinha sido observado até o momento.

No rosqueamento dos aços endurecidos o comportamento alterou em relação aos demais materiais. Entretanto, os valores de torque de retorno não foram superiores aos demais materiais ensaiados, apesar da maior resistência mecânica e dureza. Estas influenciam o torque de retorno, mas não da mesma maneira que o torque de avanço, uma vez que no retorno é necessário vencer apenas o atrito gerado pelo retorno elástico do material.

Apesar da necessidade de um maior esforço para deformar elasticamente um aço endurecido, o que instintivamente conduz a uma conclusão de que o torque de retorno terá um valor maior do que os outros aços, o valor da deformação criada por esse retorno é menor do que nos outros dois aços e no alumínio. O que é esperado de um aço endurecido para moldes de plástico. Outro fator que ajuda a explicar o torque de retorno é o menor coeficiente de atrito que aços de alta dureza apresentam sobre os de média ou baixa dureza, isso porque segundo Hutchings (1992), o coeficiente de atrito é diretamente proporcional a ductilidade do material.

A Figura 4.14 mostra o comportamento do torque de retorno para o aço endurecido N2711M. Apesar de estatisticamente não haver diferença entre os pontos do gráfico ao analisar o macho laminador observa-se uma pequena deformação plástica em alguns dentes. De acordo com Machado et al. (2009), ela ocorre devido a altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas e ocorre mais comumente em ferramentas de aço rápido e pode sim ser tratado como desgaste. Essas deformações se apresentam nos flancos dos dentes do macho laminador, principalmente no terceiro e quarto filete. Contudo medir essa deformação plástica é uma tarefa complexa.

Há também a presença de desgaste abrasivo na aresta de deformação, que também é muito difícil de ser medida. Esses dois mecanismos de desgaste atuando no macho laminador ajudam a explicar o motivo que leva a um aumento do torque de retorno a 30m/min, ao invés de diminuir como havia ocorrido nos outros materiais até o momento. Esse também é o motivo para explicar o alto desvio padrão dos resultados nesta velocidade de laminação. Os desgastes apareceram por volta da sétima e oitava rosca laminada, no entanto, esses machos são recomendados para usinar materiais endurecidos na faixa de 25 a 35 HRC, os aços endurecidos utilizados estão na faixa de 38 a 42 HRC. As faixas de velocidade de laminação recomendada pelo fabricante são de 5 a 20 m/min, a mesma faixa de velocidade utilizada nos ensaios.

Na curva referente ao processo de usinagem o comportamento é o mesmo, também devido ao desgaste da ferramenta, contudo, no macho de corte os desgastes são mais acentuados e mais fáceis de serem identificados. Os desgastes mais acentuados no macho de corte se deve a geometria do macho de corte, quando comparado ao macho laminador. O aumento percentual foi de aproximadamente 150%.

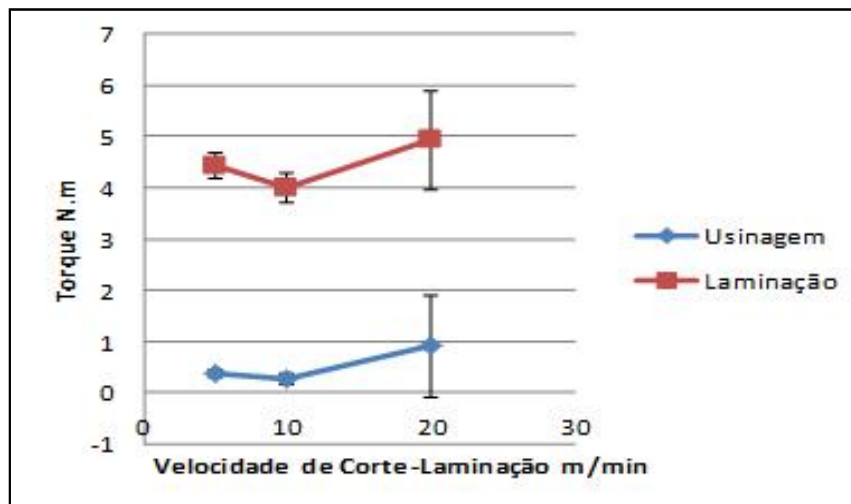


Figura 4. 14 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido N2711M

A Figura 4.15 mostra o comportamento do torque de retorno para o aço endurecido VP ATLAS. Observe que o torque de retorno para o rosqueamento por laminação é superior ao torque de retorno do aço N2711M, o que condiz com o comportamento do torque durante o avanço. No entanto, o torque de retorno na usinagem do N2711M foi superior ao do VP ATLAS.

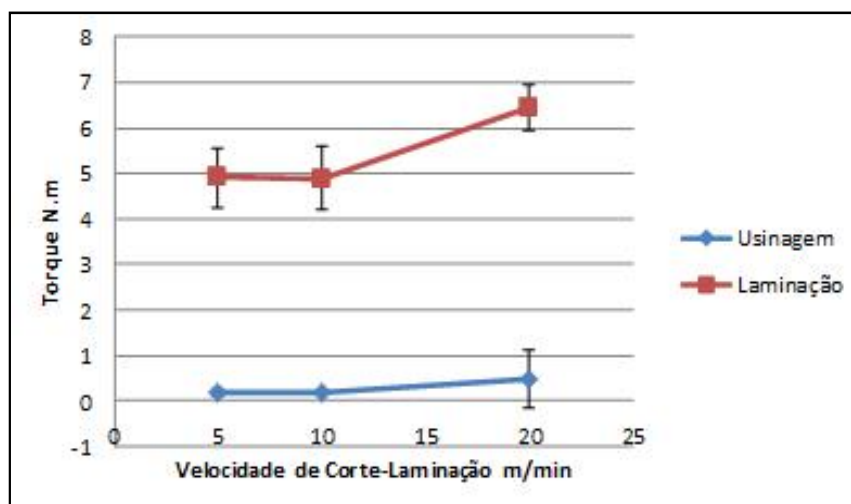


Figura 4. 15 - Comparação do torque de retorno entre os processos de rosqueamento interno por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação para o aço endurecido VP ATLAS

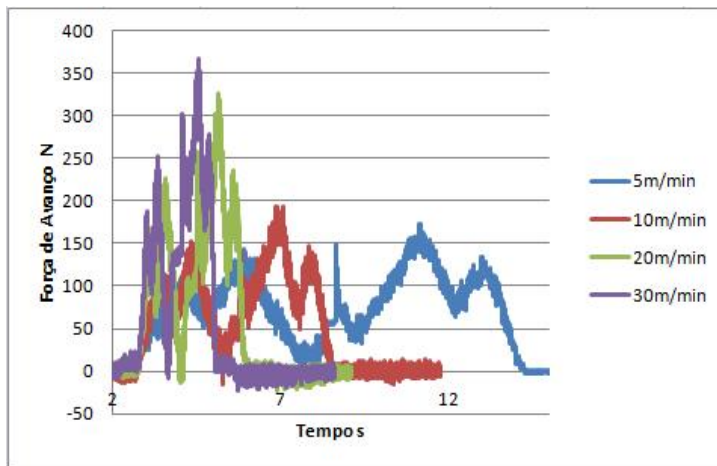
4.4. Efeito da Velocidade de corte no sinal da força de avanço

A força de avanço sofre uma influência diferente, quando comparada ao torque, da velocidade de corte/laminação. O valor da força de avanço (Fig. 4.16), durante o avanço da ferramenta, não sofre alteração aparente com o aumento da velocidade de corte. Mas é possível notar uma oscilação tanto no avanço como no retorno, essa oscilação é uma resposta à manutenção do sincronismo entre a rotação e o avanço, ou seja, durante o rosqueamento a máquina ferramenta faz pequenas acelerações e frenagens para compensar pequenos erros de sincronismo/posição.

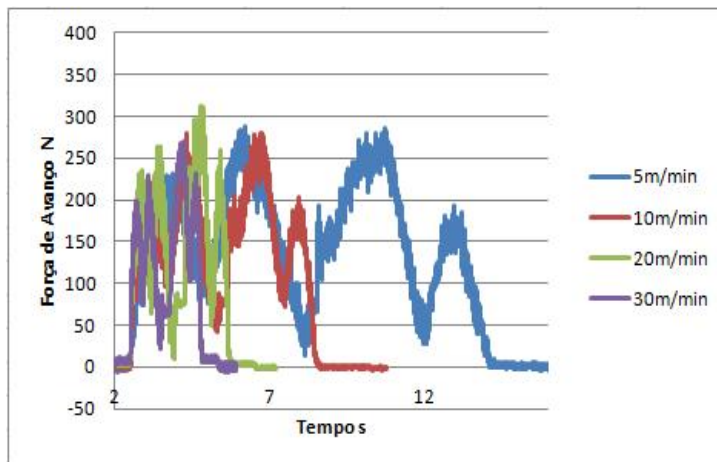
Uma característica que pode ser observada é que antes da parada para inversão do movimento a força de avanço cai consideravelmente, próxima de zero, isso porque próximo à parada a velocidade de corte decresce e quanto menor a velocidade de corte, menores os erros de sincronismo.

Observe que quanto maior a velocidade de corte, os picos de retorno passam a ter seus valores superiores aos picos de avanço. Isso porque ao avançar, o macho de corte tem um espaço para acelerar e aí sim iniciar o processo de corte. No entanto, no retorno a ferramenta já está em contato com a peça, logo a sua aceleração até chegar a velocidade de trabalho indicada é realizada com a ferramenta em contato com a peça. Quanto maior essa aceleração maior o pico da força de avanço no retorno.

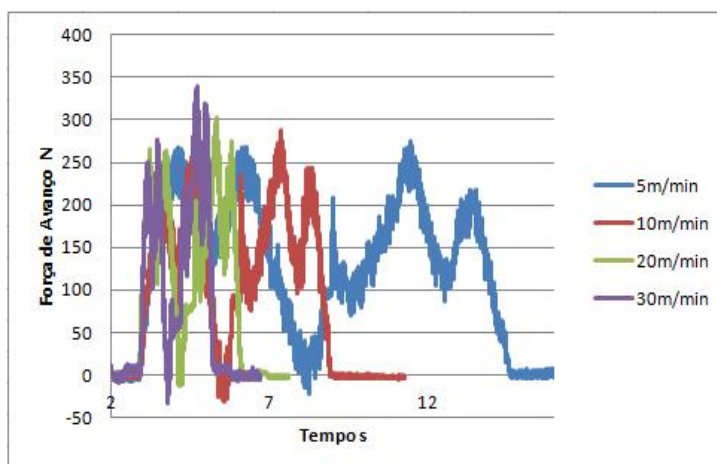
A força de avanço é altamente influenciada por características da máquina ferramenta. Observe que mesmo em diferentes materiais, na maioria dos casos a força de avanço tem valores muito próximos. Isso porque, características como aceleração, desaceleração, sincronismo e sistema de fixação influenciam muito mais a força de avanço do que o material da peça.



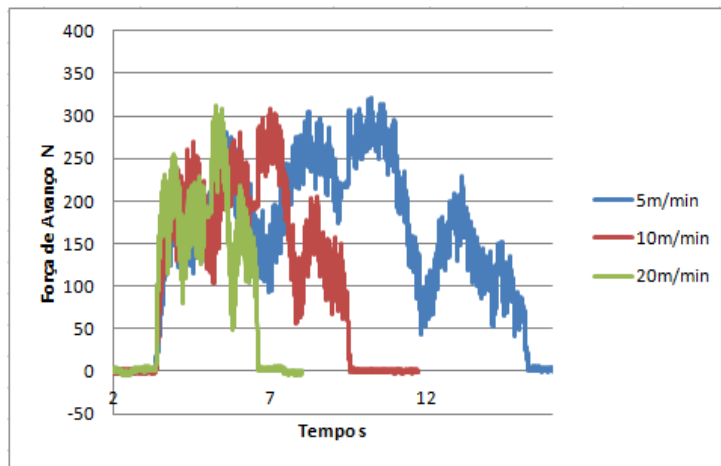
(a) Alumínio 6351



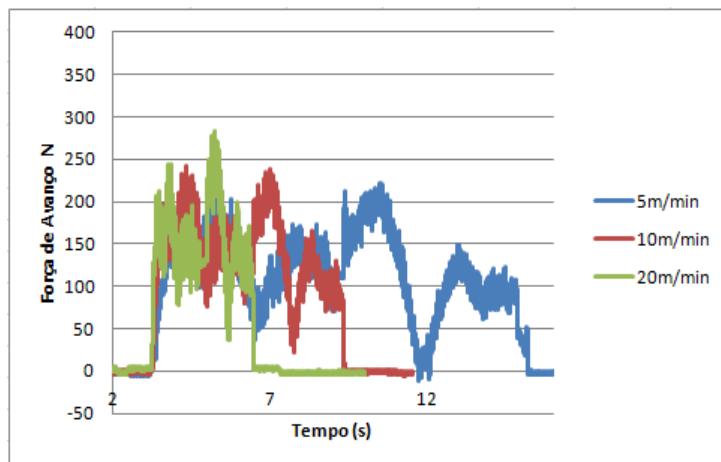
(b) SAE 1045



(c) AISI 4140



(d) N2711M



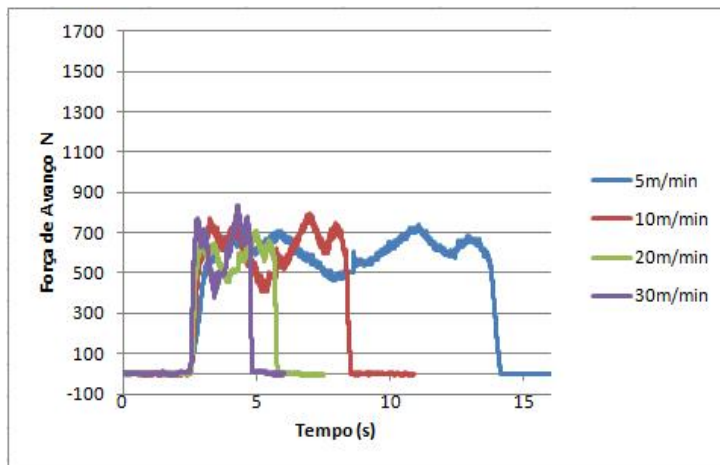
(e) VP ATLAS

Figura 4. 16 - Sinal de força de avanço em diferentes velocidades de corte e diferentes materiais durante o rosqueamento interno por usinagem

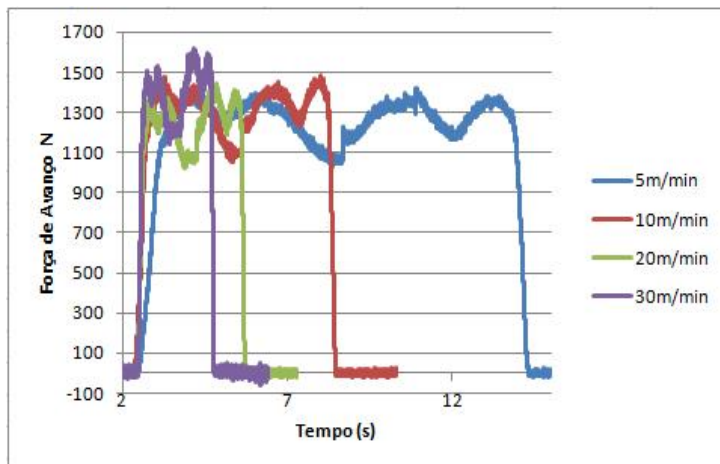
A força de avanço no processo de rosqueamento por laminação (Fig. 4.17) tem um comportamento muito parecido com o processo de rosqueamento por usinagem. Contudo, algumas diferenças podem ser notadas, são elas: a força de avanço é muito superior ao processo de usinagem, em média de 4 a 5 vezes, e a diferença entre os materiais são mais perceptíveis.

Como os valores de força de avanço são consideravelmente altas, essas podem gerar deformações elásticas e também plásticas em alguns casos, consideráveis. Isso

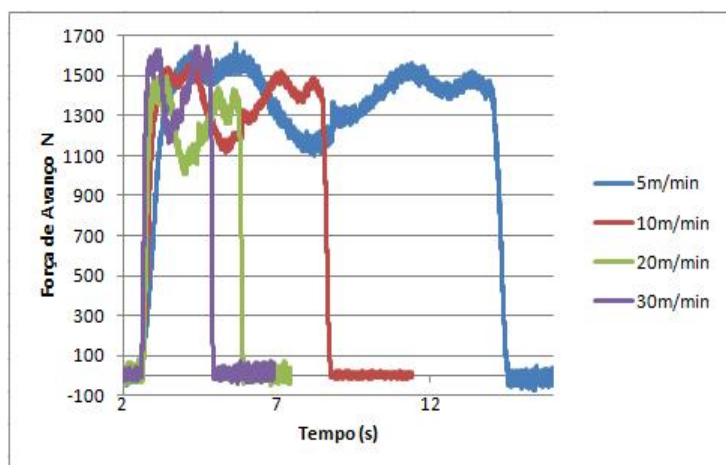
explica a diferença, que não se mostrou assim em todas as velocidades de corte no processo de rosqueamento, entre o alumínio e os outros materiais. Como o alumínio sofre deformação a tensões consideravelmente menores ao aplicar um esforço o material irá se deformar e a resposta será menor do que a força aplicada, já que parte da força é utilizada para deformar o material.



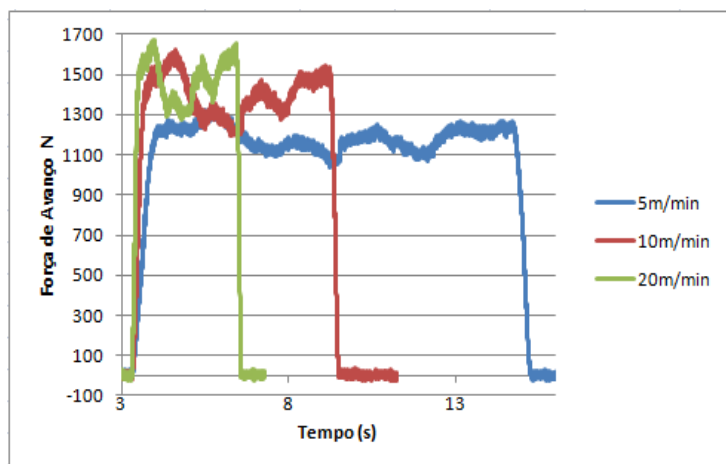
(a) Alumínio 6351



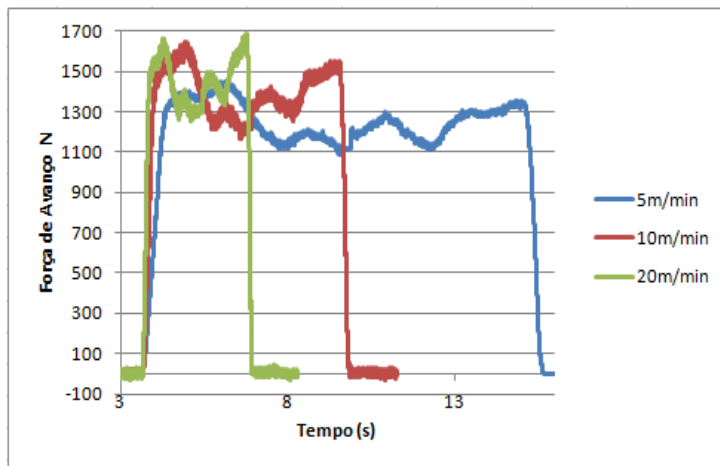
(b) SAE 1045



(c) AISI 4140



(d) N2711M



(e) VP ATLAS

Figura 4. 17 - Sinal de força de avanço em diferentes velocidades de corte e diferentes materiais durante o rosqueamento interno por laminação

4.5. Efeito da velocidade de corte na microdureza em regiões próximas aos filetes das roscas fabricadas

A análise dos resultados de microdureza tem algumas dificuldades, a principal delas é a variação da dureza de um microconstituente em relação a ele mesmo, ou seja, os materiais são considerados homogêneos em sua totalidade, mas quando analisada as propriedades dos grãos, ou microconstituintes, passam a ser heterogêneos. Essa heterogeneidade dos microconstituintes cria um desvio padrão considerável que dificulta a avaliação dos resultados. Outra dificuldade é o tamanho do microconstituente na região onde se deseja avaliar e sua presença nessa região. Não é sempre que se tem a presença do constituinte na posição onde se deseja avaliar e sua dimensão as vezes é menor do que a marca que o indentado irá imprimir, ou seja, não será medida apenas a dureza da estrutura desejada, mas também da estrutura vizinha.

Todas essas dificuldades não tiram a importância dos resultados encontrados. Nas Fig. 4.18 e 4.21 observa-se o comportamento da microdureza, em diferentes pontos de medição dentro do filete de rosca como mostra a Fig. 3.9, com a velocidade de corte no processo de rosqueamento por usinagem e laminação. Nas duas figuras não é possível

notar um comportamento padrão da microdureza com o aumento da velocidade. Contudo os pontos 6 e 10 podem ser usados como parâmetro, pois nesses pontos o nível de deformação devido ao processo de laminação é desprezível. Isso se dá por suas posições.

No processo de rosqueamento por laminação, a curva que representa o comportamento a 10m/min nunca é superior às outras duas. Ao mesmo tempo, no máximo se aproxima ou supera apenas uma em alguns pontos. Nos pontos 1 (crista) e 8 (raiz) é possível notar uma diferença no encruamento dos grãos em função da velocidade de corte (Fig. 4.18). Entre os motivos possíveis, está a distância de medição. Fromentin et al. (2005) mostra os resultados de microdureza em função da profundidade para dois tipos de fluido de corte (Fig. 4.19). A partir de 50 μ m não é mais possível observar alteração consistente na curva da condição com óleo como fluido de corte.

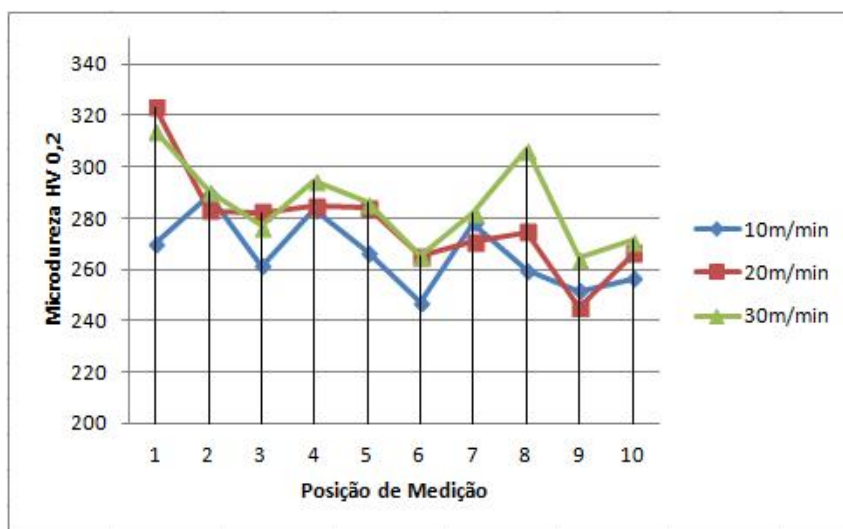


Figura 4. 18 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza do aço SAE 1045

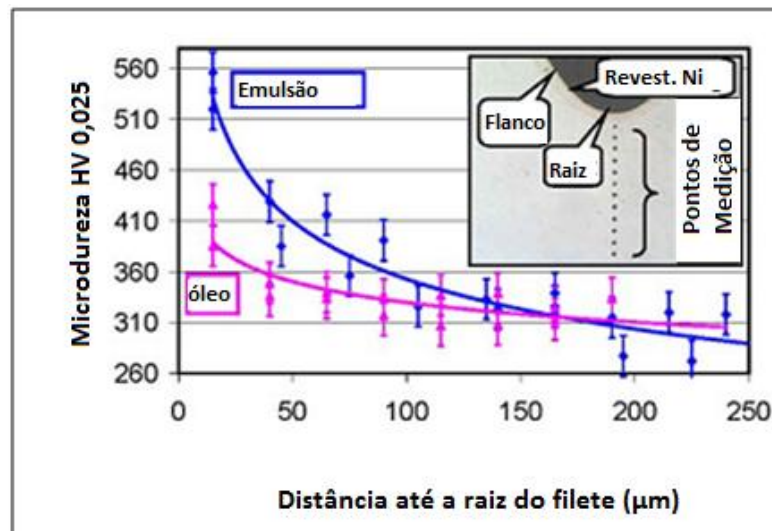


Figura 4. 19 - Variação da microdureza com a profundidade (Fromentin et al., 2005)

Carvalho et al. (2012), avaliou a microdureza da seção transversal do filete de rosca (Fig. 4.20), assim como foi realizado neste trabalho, e não obteve um comportamento padronizado, não é possível afirmar sobre o efeito da velocidade na microdureza, uma vez que o aumento da velocidade de laminação não mostrou uma tendência de aumento ou diminuição na microdureza. Há um fato interessante nesse gráfico, ao diminuir os níveis de deformação, passando o diâmetro do furo de 9.1mm para 9.5mm, houve um aumento da microdureza em alguns pontos.

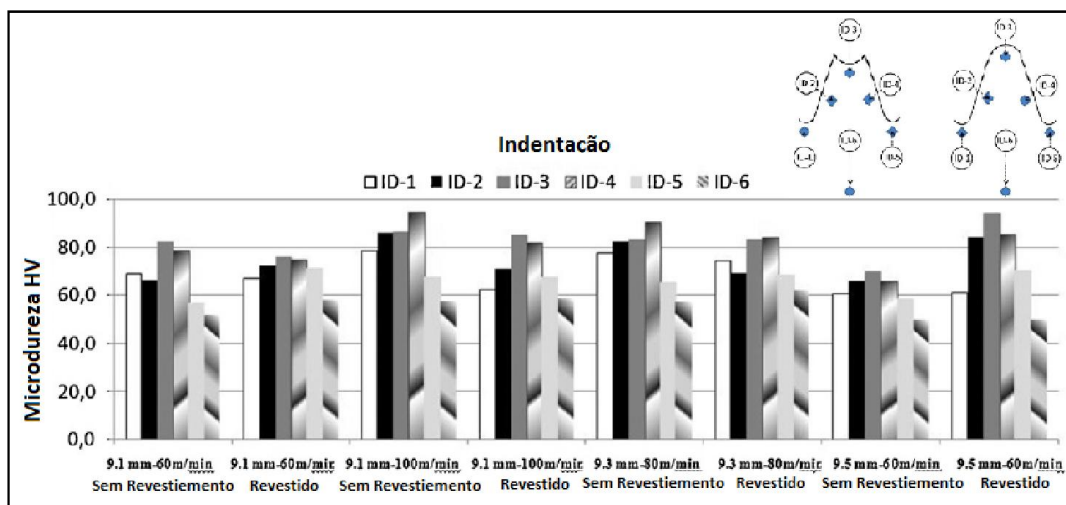


Figura 4. 20 - Variação da microdureza com a variação do diâmetro do pré-furo e da velocidade de laminação em uma liga de magnésio AM60 (Carvalho et al., 2012)

A Figura 4.21 mostra os valores de microdureza em função da velocidade de corte para a usinagem do aço 1045. Não é possível notar a influência da velocidade de corte na microdureza e também não é possível observar uma alteração devido a posição de medição. Ou seja, há uma constância desta propriedade na seção transversal do filete de rosca usinada. Mas, até mais do que nas roscas laminadas, a distância de medição em relação à superfície tem influência no valor medido, já que na usinagem a camada deformada pelo processo é bem menor do que nas roscas laminadas. Belluco e Chiffre (2002) avaliaram o comportamento da microdureza pela distância medida em relação à superfície para três tipos de fluido de corte. A Fig. 4.22 mostra esse comportamento, a partir de 125 μ m os valores se estabilizam, mas a pequenas distâncias como 15 e 25 μ m há um aumento considerável em relação às demais medidas.

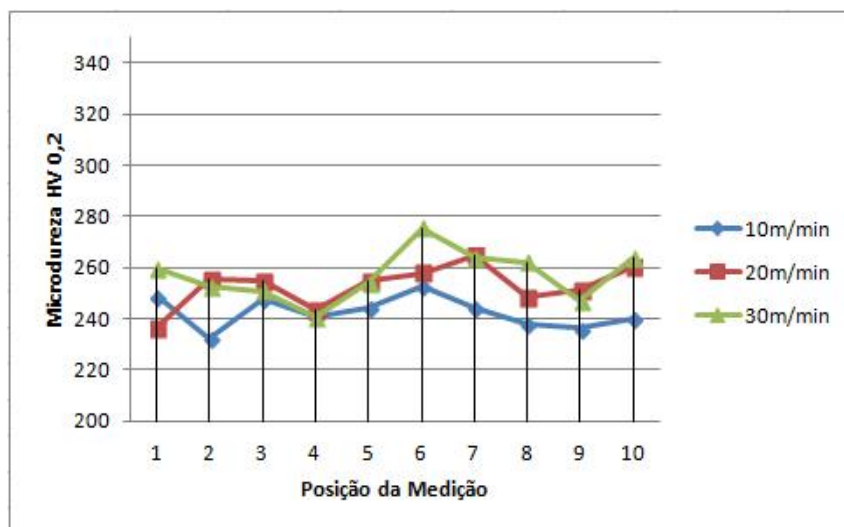


Figura 4. 21 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas do aço SAE 1045

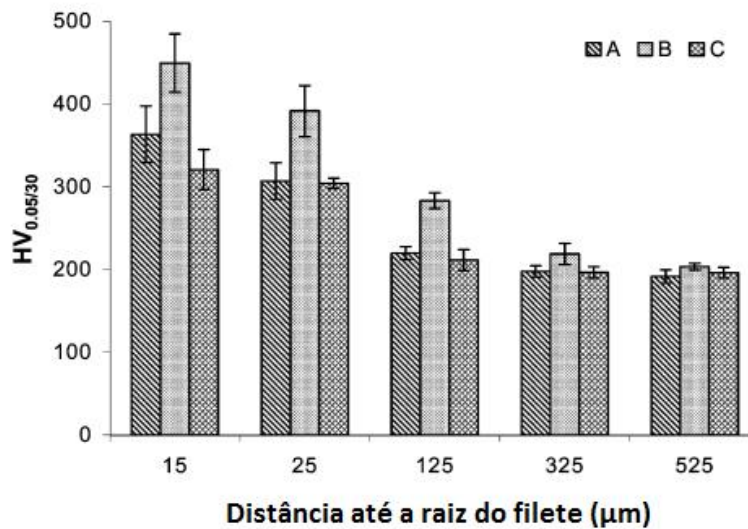


Figura 4. 22 - Variação da microdureza com a profundidade usando três tipos fluidos de corte (Belluco e Chiffre, 2002)

A Figura 4.23 mostra um comportamento muito similar ao da Fig. 4.18. No ponto 1 é possível notar o aumento da microdureza em função do processo de deformação, os pontos dois, quatro, cinco e sete, que têm a mesma posição só que em extremidades opostas dentro do filete, possuem um comportamento dos valores de dureza similar entre eles. Não há uma tendência no comportamento das curvas com o aumento da velocidade de laminação.

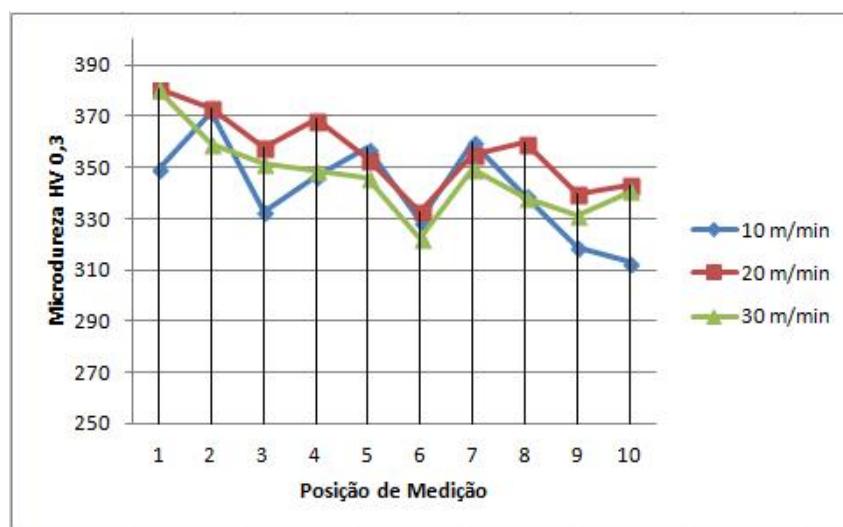


Figura 4. 23 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza das roscas laminadas do aço AISI 4140

O comportamento mostrado nas curvas da Fig. 4.24 é similar ao da Fig. 4.21. Não há grandes variações entre os pontos de medição e também não se pode notar uma tendência de comportamento com o aumento da velocidade de corte. Ao comparar com o gráfico do processo de laminação para o aço AISI 4140 percebe-se que para a maioria dos pontos o valor da microdureza do processo de rosqueamento por usinagem é menor do que no rosqueamento por laminação.

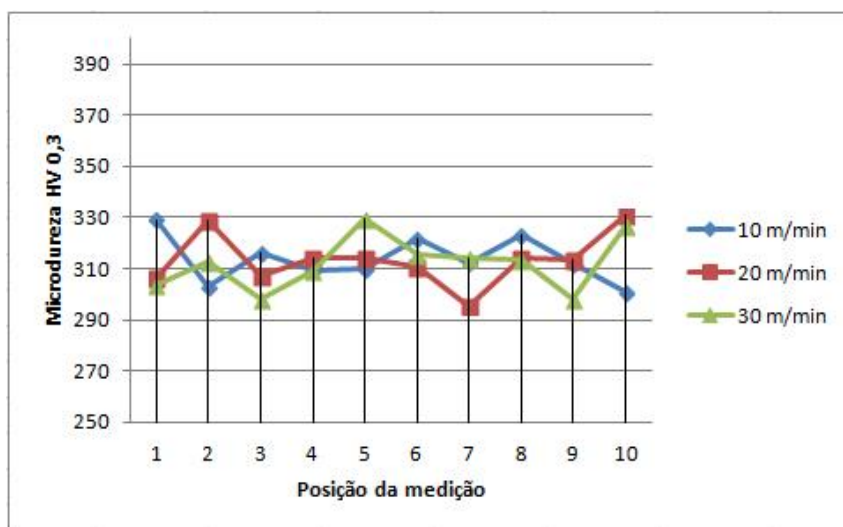


Figura 4. 24 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas do aço AISI 4140

No rosqueamento por laminação do alumínio a diferença entre a microdureza nos pontos analisados e a microdureza do material antes de sofrer qualquer processo de deformação, é menor ou mesmo inexistente em alguns pontos. Isso por que o alumínio suporta maiores níveis de deformação sem que haja um aumento significativo de sua dureza ou resistência mecânica, ou seja, ele é um material com menor encruabilidade quando comparado com o aço SAE 1045 e o AISI 4140 (Fig. 4.25 e 4.26).

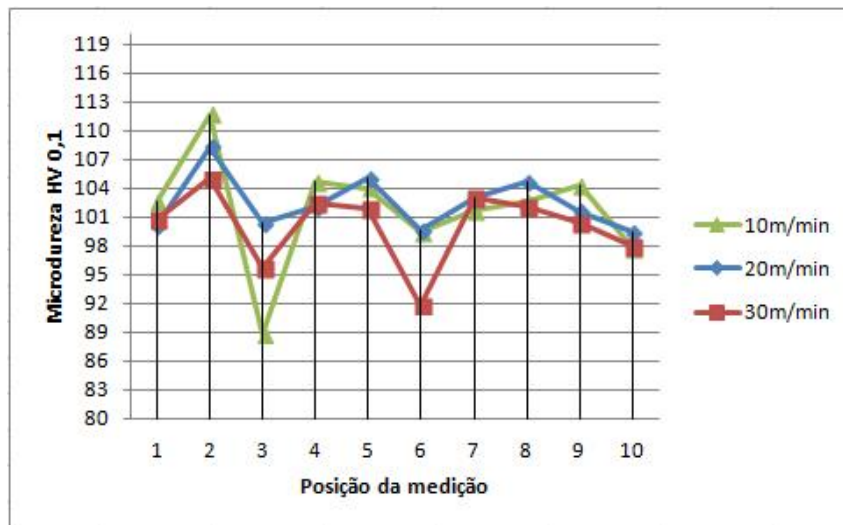


Figura 4. 25 - Efeito da velocidade de laminação na microdureza das roscas laminadas de uma liga de alumínio 6351

O valor de microdureza, em todos os materiais analisados, não foi alterado devido ao processo de rosqueamento interno por usinagem, ou seja, o processo não deformou o material o suficiente para que o encruamento alterasse a dureza do material. No entanto, Belluco e Chiffre (2002) mostram em seu trabalho a profundidade da camada deformada de um aço inoxidável AISI 316L (Fig. 4.27). A camada tem aproximadamente 30 μ m de profundidade, contudo a profundidade medida neste trabalho foi de no mínimo de 80 μ m. Isso explica o motivo de não haver alteração na microdureza de nenhum dos materiais analisados. As forças geradas devido ao processo de rosqueamento por usinagem não conseguem criar uma banda de deformação tão extensa, é claro que essa extensão tem outros parâmetros além do processo, tais como o material, o fluido de corte, as dimensões da rosca, a geometria da ferramenta de corte, etc.

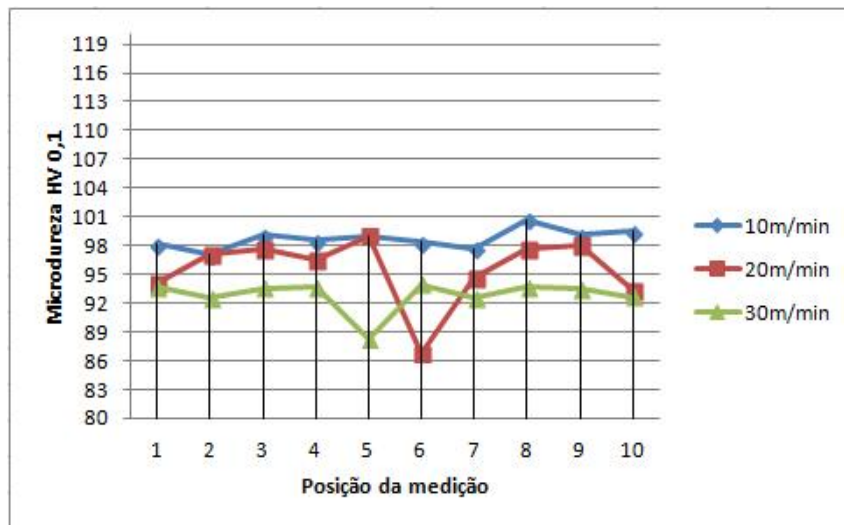


Figura 4. 26 - Efeito da velocidade de corte na microdureza das roscas usinadas de uma liga de alumínio 6351

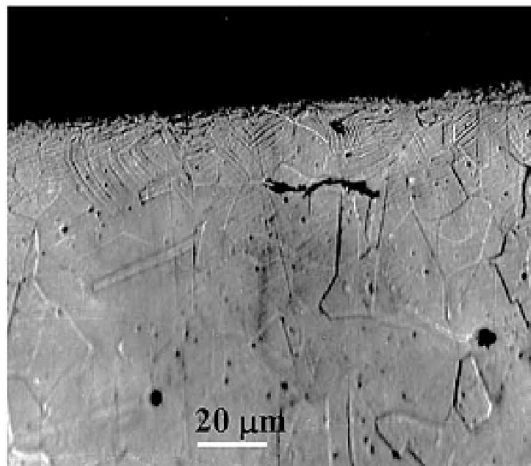


Figura 4. 27 - Região deformada após o rosqueamento interno por usinagem do aço AISI 316L (Belluco e Chiffre, 2002)

Ao comparar os processos de rosqueamento por laminação e usinagem em diferentes velocidades de corte/laminação percebe-se um comportamento similar nas três velocidades analisadas. As Fig. 4.28, 4.29 e 4.30 mostram que há um aumento do valor de microdureza em função do processo usado, contudo, esse aumento não foi observado em todos os pontos. Os pontos 6 e 10, como já dito anteriormente, servem como controle, pois estes não

sofrem com as forças envolvidas nos processos. Logo, nestes pontos não é observado aumento em função dos processos.

Nos outros pontos o que pode influenciar a microdureza é o nível de deformação imposto ou a dificuldade em medir a dureza da estrutura desejada, por exemplo, a dificuldade de medir a microdureza da perlita em um determinado ponto a uma determinada distância da superfície, devido à sua presença no local desejado e ao tamanho mínimo necessário da estrutura. Nas curvas a 30m/min a diferença entre usinagem e laminação é maior. Talvez devido ao maior encruamento causado pelos maiores esforços aplicados e maiores taxas de deformação.

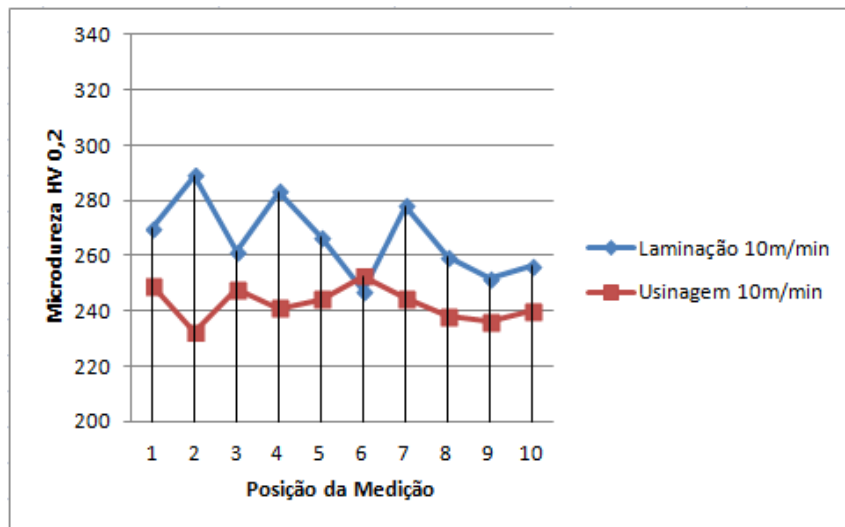


Figura 4. 28 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de rosca a velocidade de corte/laminação de 10m/min no aço SAE 1045

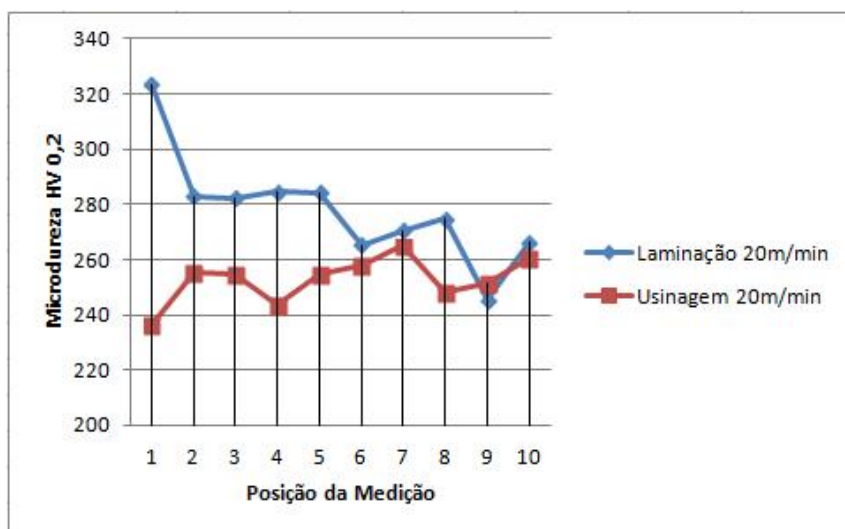


Figura 4. 29 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 20m/min no aço SAE 1045

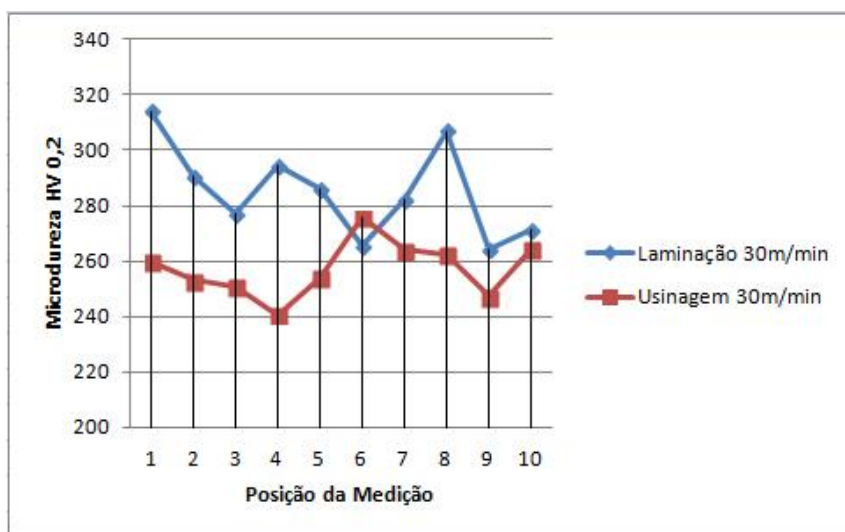


Figura 4. 30 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 30m/min no aço SAE 1045

Nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 o material utilizado é o aço AISI 4140, a diferença dos valores de microdureza para os processos de usinagem e laminação para as três velocidades de corte /laminação são maiores ao comparar com a liga de alumínio 6351 e

com o aço SAE 1045. Isso porque o AISI 4140 é um material mais encruável do que os outros dois analisados.

Ao contrário do SAE 1045 na velocidade de 30m/min é quando se tem as menores diferenças nos valores de microdureza ao comparar os processos.

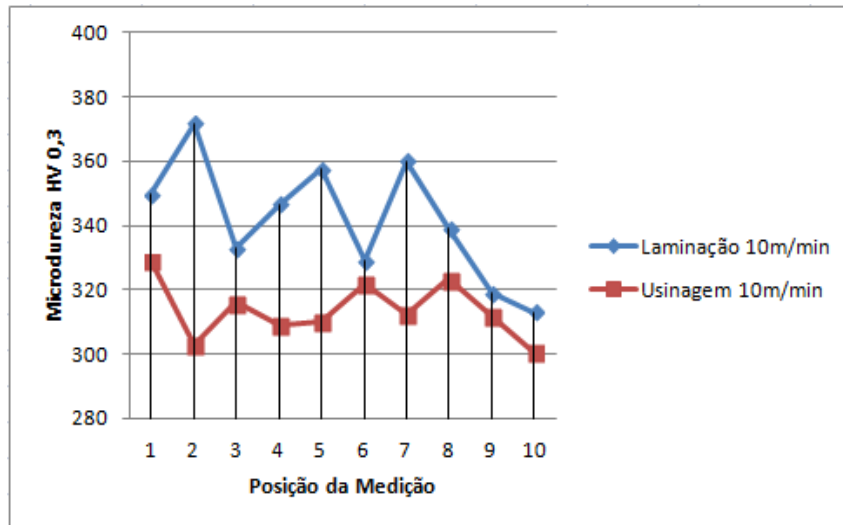


Figura 4. 31 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de rosca a velocidade de corte/laminação de 10m/min no aço AISI 4140

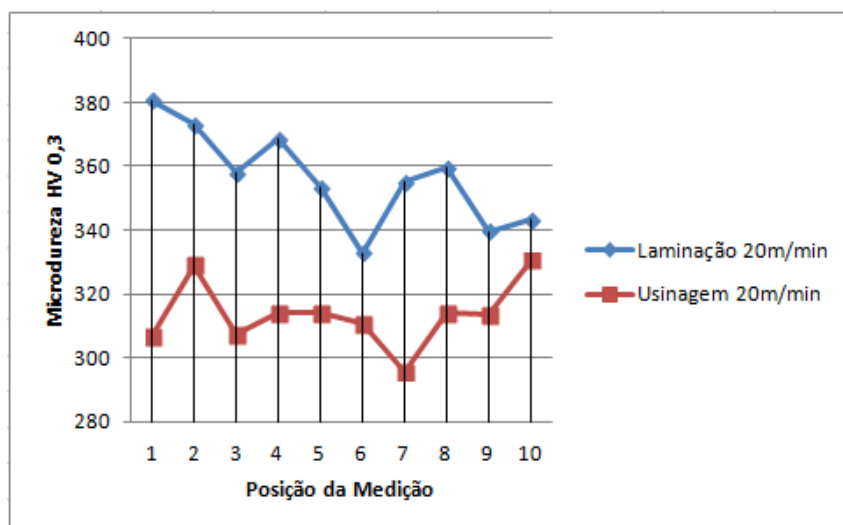


Figura 4. 32 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de rosca a velocidade de corte/laminação de 20m/min no aço AISI 4140

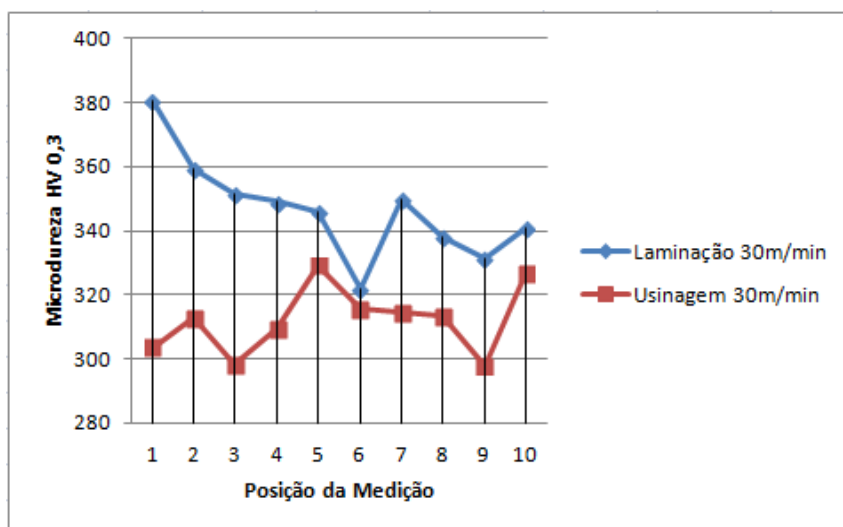


Figura 4. 33 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 30m/min no aço AISI 4140

As Figuras 4.34, 4.35 e 4.36 mostram a variação da microdureza com a profundidade para a liga de alumínio 6351. Essas apresentam as menores diferenças entre os valores de microdureza para os processos de usinagem e laminação. Isso porque o alumínio possui uma menor capacidade de se encruar quando comparado com os outros dois aços.

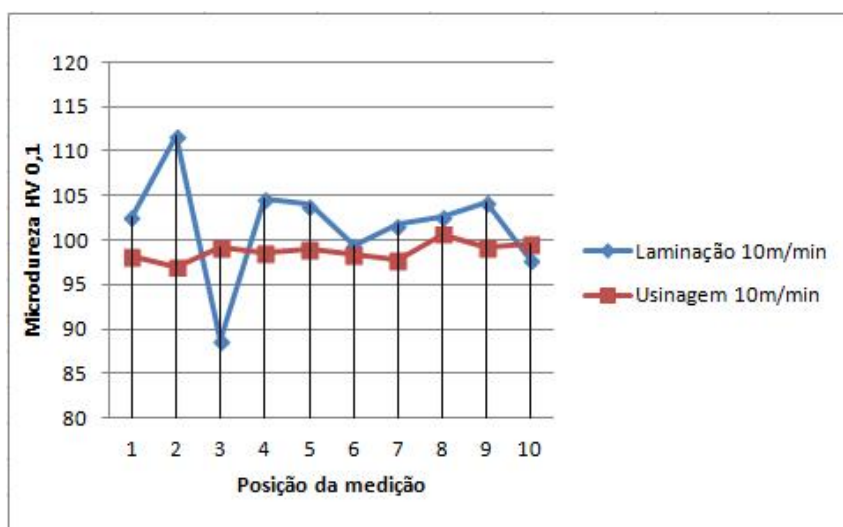


Figura 4. 34 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de roscas a velocidade de corte/laminação de 10m/min em uma liga de alumínio 6351

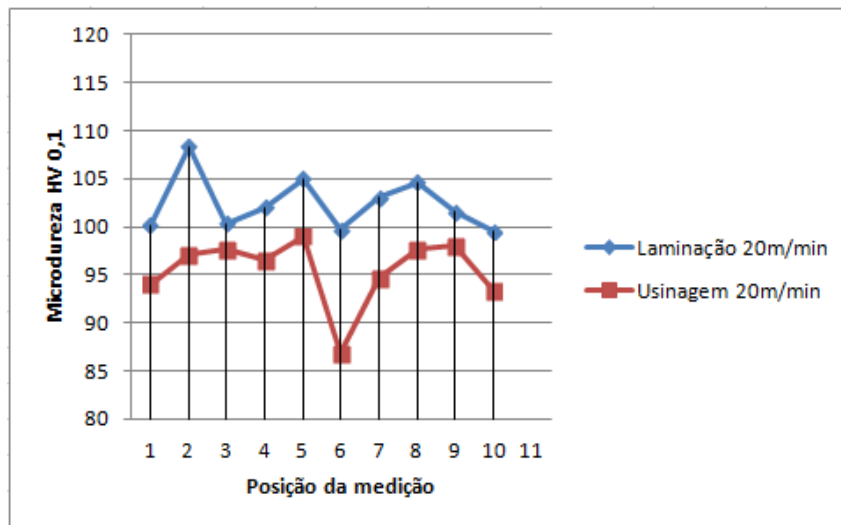


Figura 4. 35 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de rosca a velocidade de corte/laminação de 20m/min em uma liga de alumínio 6351

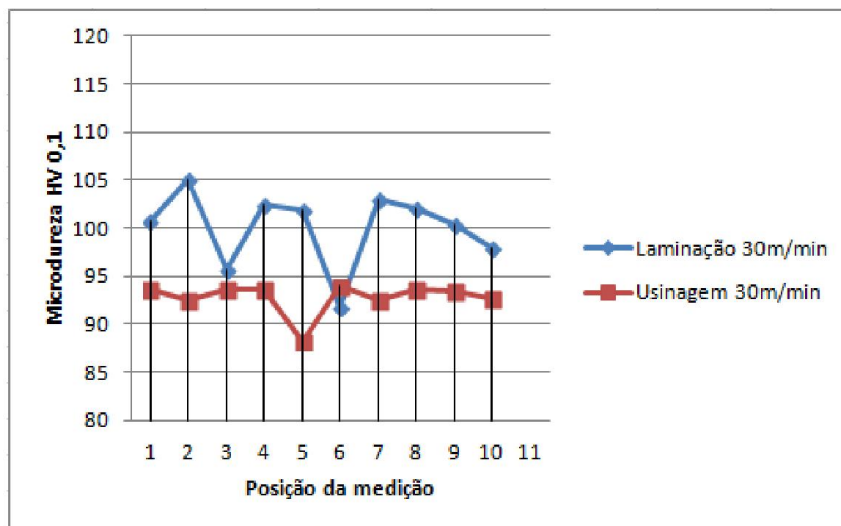


Figura 4. 36 - Valores de microdureza em função do processo de fabricação de rosca a velocidade de corte/laminação de 30m/min em uma liga de alumínio 6351

Ao comparar os três materiais no rosqueamento por laminação e usinagem o comportamento da microdureza, independente do ponto de medição, está coerente com as propriedades de cada material (Fig. 4.37 e 4.38). O aço AISI 4140 tem maior dureza e

resistência mecânica e também é um material mais encruável, logo a sua dureza deve se manter maior do que o aço AISI 4140 e da liga de alumínio 6351.

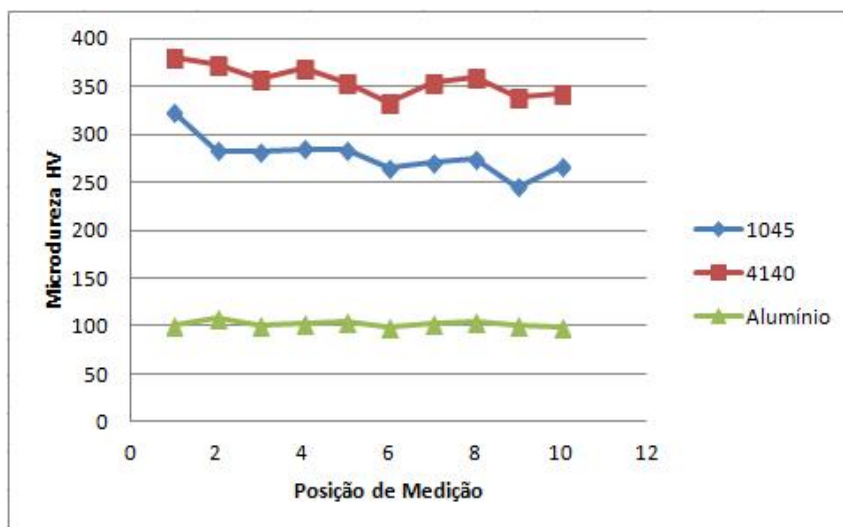


Figura 4. 37 - Comparação da microdureza do aço SAE 1045, do AISI 4140 e de uma liga de alumínio 6351 à 20m/min no processo de rosqueamento por laminação

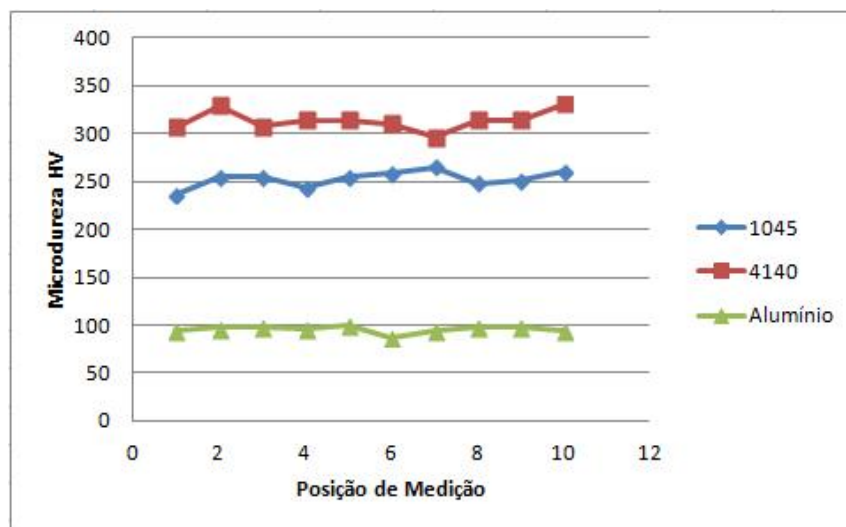


Figura 4. 38 - Comparação da microdureza do aço SAE 1045, do AISI 4140 e de uma liga de alumínio 6351 à 20m/min no processo de rosqueamento por usinagem

4.6. Influência do material na força de avanço e no torque

O material da peça, apesar de não ser um parâmetro do processo, uma vez que ele não se adapta ao processo e sim o processo se adapta a ele, é a característica mais importante no momento de determinar as condições em que será realizado o processo de fabricação. E se um processo de usinagem já é muito sensível ao material da peça, os processos de conformação mecânica são ainda mais sensíveis ao material da peça.

A Figura 4.39 mostra essa sensibilidade mesmo em materiais que possuem características mecânicas como tensão limite de tração e dureza muito próximas como os aços endurecidos VP ATLAS e N2711M. Mesmo assim há uma diferença considerável no torque de rosqueamento a 5 e 10m/min.

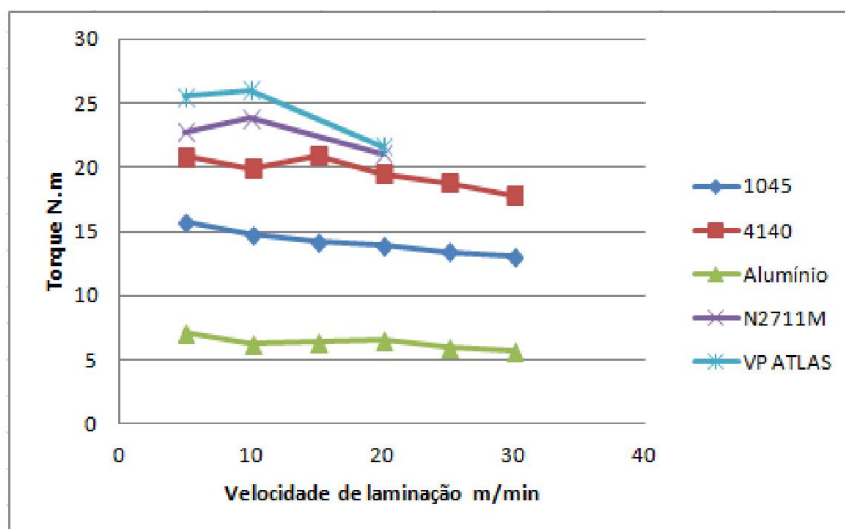


Figura 4. 39 - Torque durante o rosqueamento por laminação em diferentes materiais

A força de avanço, mostrada na Fig. 4.40, que representa parcelas de força referentes às forças de atrito e erros de sincronismo durante o processo, também sofre influência do material da peça através da resposta do material devido à recuperação elástica e do comportamento do coeficiente de atrito.

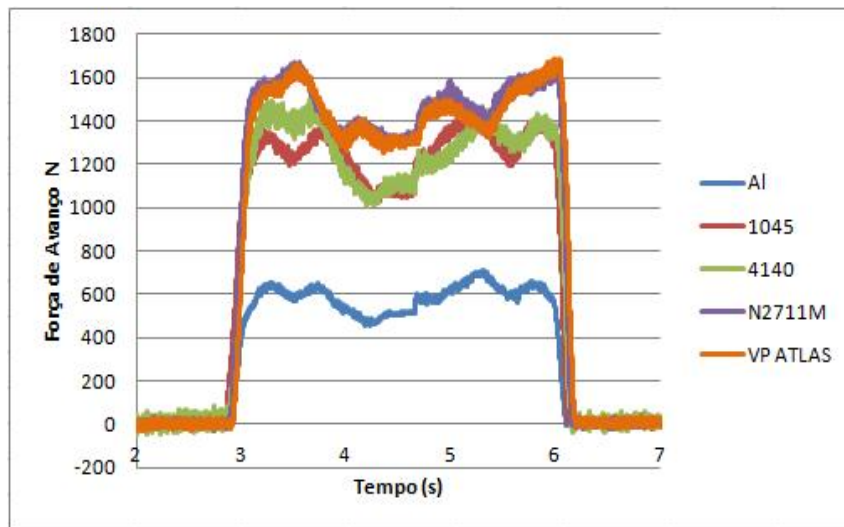


Figura 4. 40 - Força de avanço no rosqueamento por laminação em diferentes materiais

O torque de retorno, que representa o torque devido ao atrito, mostra um comportamento diferente do torque total, isso devido às características já citadas que são o retorno elástico do material e o coeficiente de atrito entre o material da peça e da ferramenta. Na Fig. 4.41 é possível observar que os materiais endurecidos tiveram um torque de retorno menor ou igual ao aço AISI 4140, antes da ferramenta apresentar um desgaste acentuado. Após isso a força de atrito teve um aumento considerável.

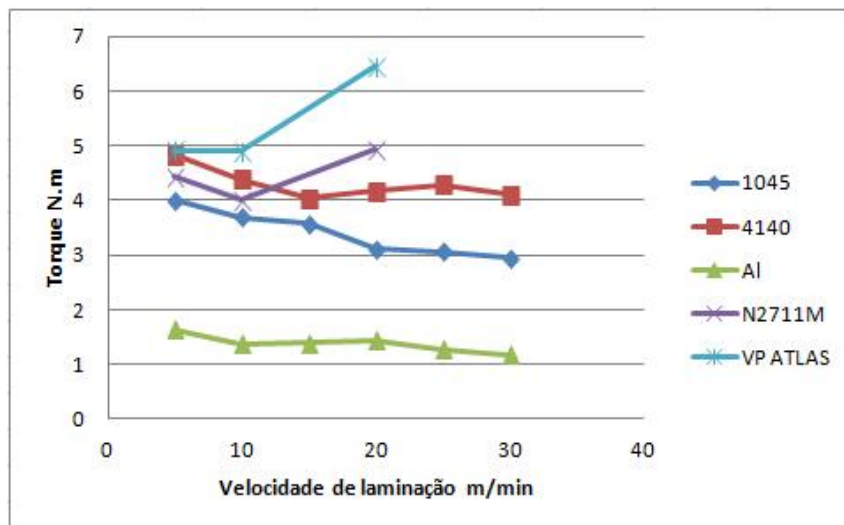


Figura 4. 41 - Torque de retorno para o rosqueamento por laminação em diferentes materiais

No processo de rosqueamento por usinagem, essa diferença no torque de rosqueamento em diferentes materiais, não é tão acentuada, isso porque a usinagem é um processo com menor sensibilidade do que a laminação. Na Fig. 4.40, o aço SAE 1045 e o AISI 4140, independente da velocidade de corte apresentam os mesmos valores de torque e os aços endurecidos apresentam valores muito próximos.

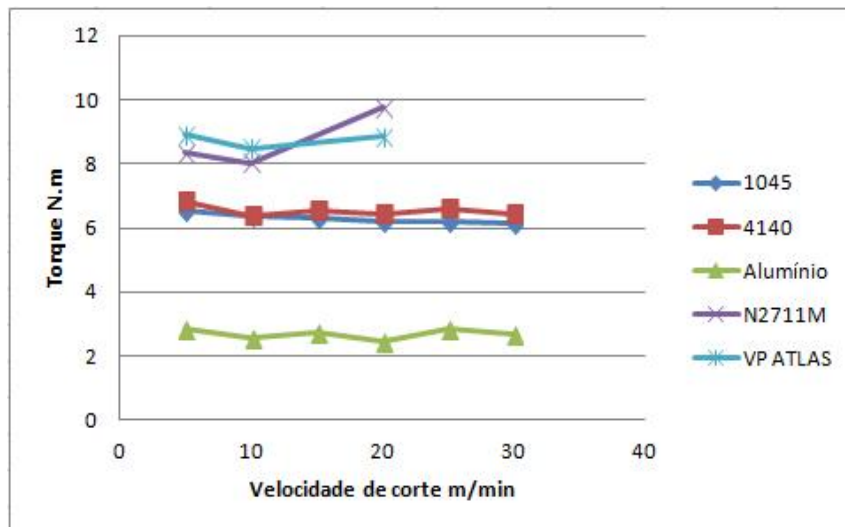


Figura 4. 42 - Torque durante o rosqueamento por usinagem em diferentes materiais

Devido às características da ferramenta e às forças envolvidas no processo, e consequente nível de deformação na fase elástica, não é possível notar diferença nos sinais de força de avanço. Isso porque a componente que gera essa força é quase que exclusivamente devido ao erro de sincronismo (Fig. 4.43). Isso é possível observar pelo torque de retorno na Fig. 4.44, à velocidade de corte de 10m/min em todos os materiais o torque de retorno é desprezível.

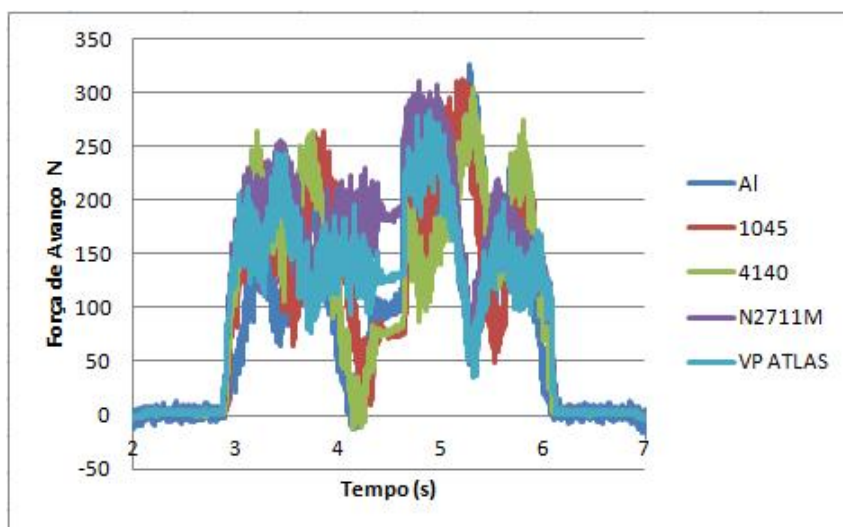


Figura 4. 43 - Força de avanço no rosqueamento por usinagem em diferentes materiais

Ao contrário do torque de retorno do processo de rosqueamento por laminação, o rosqueamento por usinagem apresenta um torque de retorno mínimo, salvo algumas exceções. Isso porque a geometria da ferramenta contribui para que exista o menor contato possível durante o processo. Os aumentos repentinos do torque de retorno nos aços endurecidos são em função do desgaste da ferramenta. E os maiores valores de torque de retorno do alumínio 6351 se dão pela sua ductilidade.

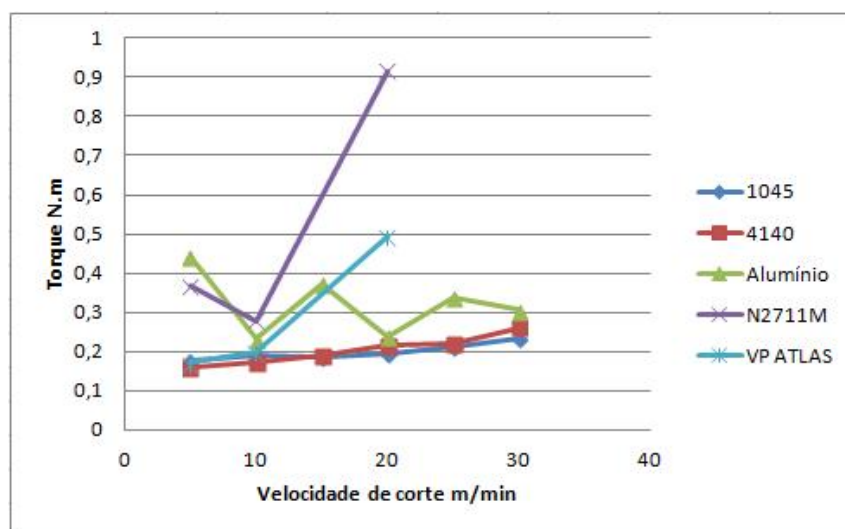


Figura 4. 44 - Torque de retorno para o rosqueamento por usinagem em diferentes materiais

4.7. Efeito do processo na tensão de ruptura da rosca fabricada

Os resultados mostrados a seguir são referentes ao ensaio de tração entre o parafuso e porca, sendo a porca o corpo de prova analisado. A força axial máxima representa a maior carga que o filete de rosca do material analisado suporta até o seu rompimento e consequente queda da força axial.

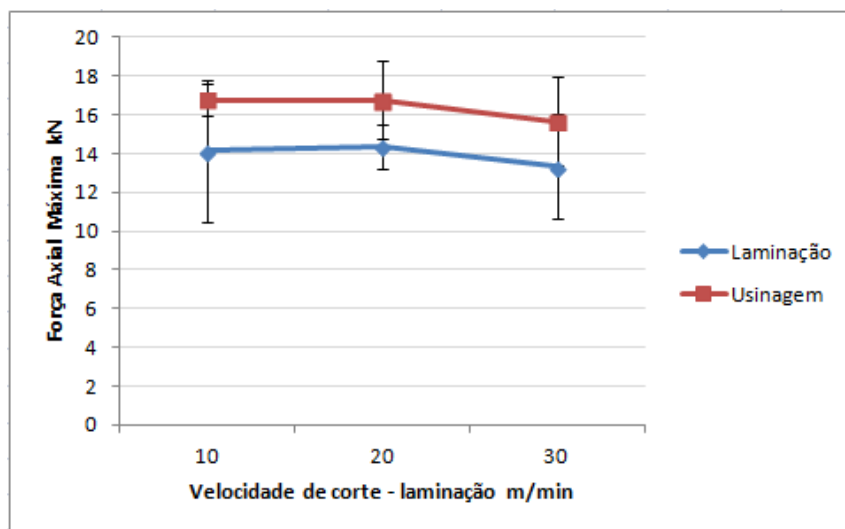


Figura 4. 45 - Carga de ruptura da liga de alumínio 6351 em função da velocidade de corte/laminação

Na Figura 4.45 o material analisado é a liga de alumínio 6351, a tensão limite máxima do material do parafuso é aproximadamente 3,5 vezes maior do que a liga em questão. Com essa diferença é possível garantir que o parafuso deformou-se apenas na fase elástica. No entanto, devido aos desvios padrões não é possível afirmar se houve um decréscimo da carga com o aumento da velocidade de corte e tampouco se o filete formado pelo processo de usinagem tem uma resistência maior do que o filete formado pelo processo de laminação. Mas é claro que há uma tendência que as roscas usinadas suportem uma maior carga de ruptura, isso em todos os materiais analisados. Um dos motivos que ajudam a explicar este fenômeno que parece contradizer o senso comum é a direção de alongamento dos grãos. Os materiais quando analisados em sua totalidade são considerados homogêneos, mas ao analisar microestruturalmente cada grão possui propriedades diferentes uns dos outros, ao se alongar estes grãos com determinada orientação essa

heterogeneidade se destaca ainda mais. Na direção de alongamento os grãos passam a ter uma maior resistência mecânica em relação à direção perpendicular ao alongamento. Como a carga é aplicada em uma direção perpendicular ao alongamento há uma maior facilidade em iniciar uma trinca que irá se propagar e conseqüentemente romper o filete.

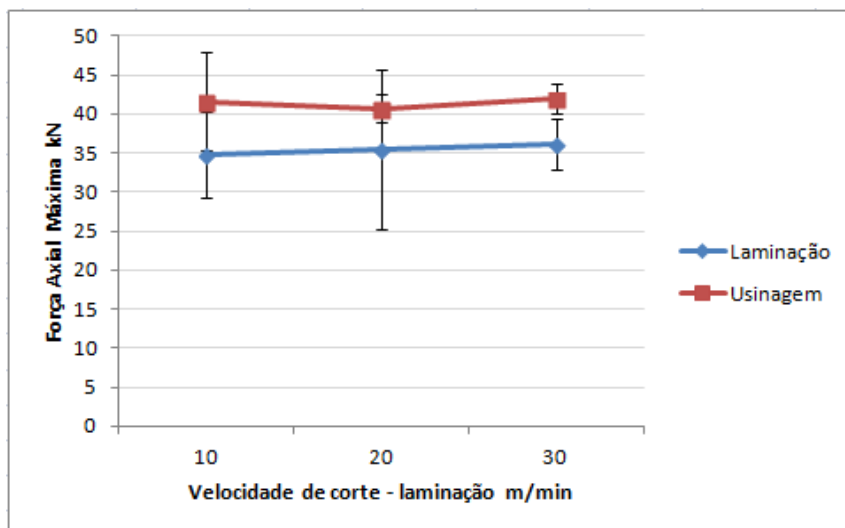


Figura 4. 46 - Carga de ruptura do aço SAE 1045 em função da velocidade de corte/laminação

Em relação ao SAE 1045, a tensão de escoamento do material do parafuso é aproximadamente 1,6 vezes superior e a tensão limite é 1,35 vezes superior à tensão limite do SAE 1045. Logo, o parafuso também provavelmente não atingiu o regime plástico. O único material que levou o parafuso a se deformar foi o aço AISI 4140, como mostra a Fig. 4.47.

Com isso, parte da força axial máxima foi utilizada para deformar elasticamente o parafuso. No entanto, isso não atrapalha o resultado enquanto resultado de comparação. Assim como no alumínio, estatisticamente não é possível afirmar o produto de qual processo suporta uma carga de ruptura maior (Fig. 4.46).

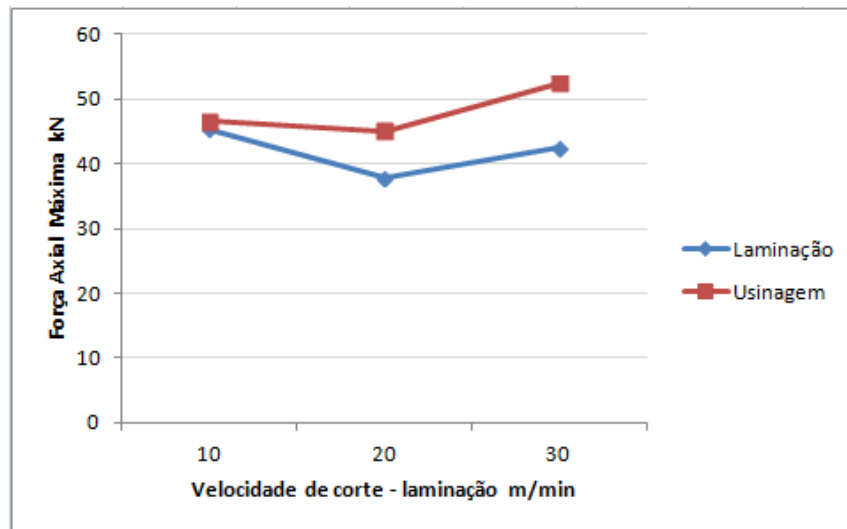


Figura 4.47 - Carga de ruptura do aço AISI 4140 em função da velocidade de corte/laminação

Ao contrário da liga de alumínio 6351 e do aço SAE 1045, no ensaio com as roscas produzidas no aço AISI 4140, ocorreu a ruptura dos filetes de rosca durante o ensaio de tração, mas o filete de rosca do parafuso se deformou plasticamente. Mas como os valores são superiores aos dos outros materiais, tanto o filete produzido por usinagem quanto o filete produzido por laminação suportaram no mínimo esta carga máxima sem romper. Como o filete de rosca do parafuso se deformou, para esses ensaios não foram realizadas réplicas e trélicas, logo os seus resultados são apenas demonstrativos.

Apesar dos resultados referentes ao AISI 4140 não serem conclusivos, os resultados do aço SAE 1045 e da liga de alumínio 6351 são relevantes. Há um consenso de que roscas produzidas por laminação tem uma maior resistência mecânica do que roscas produzidas por usinagem. Contudo, dentro das condições analisadas, essa maior resistência mecânica não foi comprovada, ao contrário, o que pode observar foi uma tendência que as roscas usinadas possuam uma maior resistência. Em seu trabalho, Baldo et al. (2010), avaliou a resistência a tração de roscas laminadas e usinadas em uma liga de alumínio 7475, conforme Tab. 4.2. Ele concluiu que os resultados são bastantes semelhantes, não sendo notado uma diferença significativa na resistência a tração dos filetes de rosca. Uma possível explicação para a tendência a menor carga de ruptura é a tensão residual de tração deixada no filete.

Tabela 4.2 - Comparação entre os processos de rosqueamento (Baldo et al., 2010)

	Usinado	Conformado
Diâmetro do Furo (mm)	8,5	9,3
Carga Máxima (t)	6,24	6,21
Área (mm²)	0,676	0,672

A deformação que o processo de rosqueamento interno com macho laminador imprime na peça faz com que haja um aumento na microdureza até uma determinada profundidade, neste trabalho aproximadamente 120µm. Mas ao contrário de outros processos de deformação a frio, como laminação de chapas, por exemplo, não há um aumento da resistência à tração, um dos motivos pode ser o baixo nível de deformação aplicado ao material. Em geral, processos de deformação plástica que geram aumento da resistência mecânica, são aqueles que imprimem um maior nível de deformação. É possível que roscas de maior passo possam ter um aumento na sua resistência a tração devido ao processo de laminação.

Ao comparar os diferentes materiais dentro do mesmo processo, o comportamento se mostra coerente, sendo o comportamento da carga máxima de ruptura coerente com a tensão limite de cada material.

As Figuras 4.48, 4.49 e 4.50 mostram as imagens de roscas produzidas por usinagem e por laminação após o ensaio de tração e ao lado da rosca o respectivo parafuso que executou o ensaio de tração. Note que os corpos de prova da liga de alumínio sofreram a ruptura, mas os parafusos que executaram não. Nos corpos de prova referentes ao SAE 1045, os filetes de rosca dos corpos de prova foram rompidos e os parafusos que realizaram os ensaios também sofreram uma deformação plástica. Por fim, os corpos de prova referentes ao AISI 4140 sofreram deformação plástica, mas não sofreram ruptura e desta vez quem sofreu a ruptura foram os filetes de rosca dos parafusos. Todas essas diferentes situações foram criadas devido aos diferentes limites de resistência à tração de cada material.

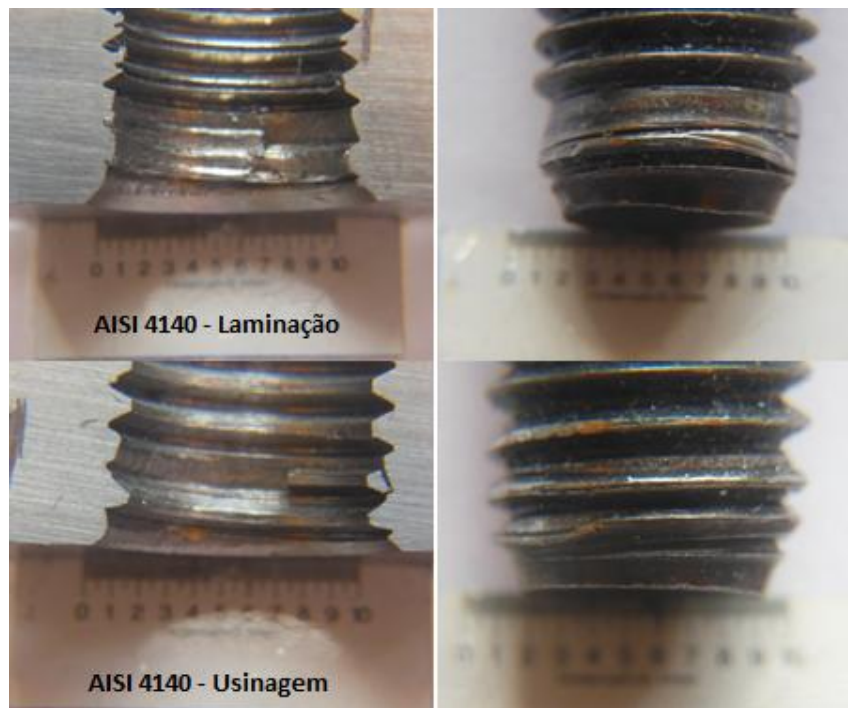


Figura 4. 48 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração

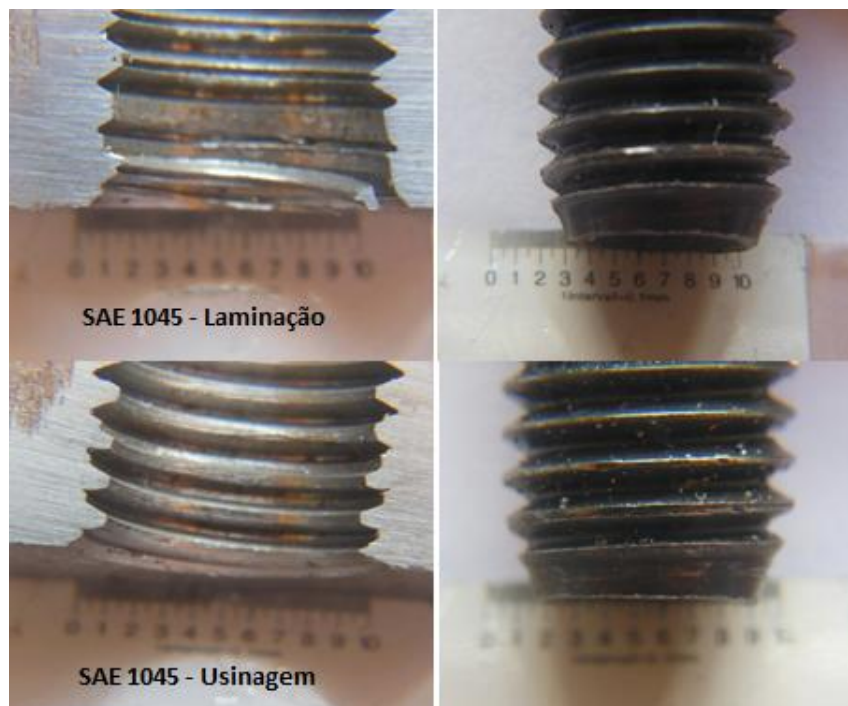


Figura 4. 49 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração

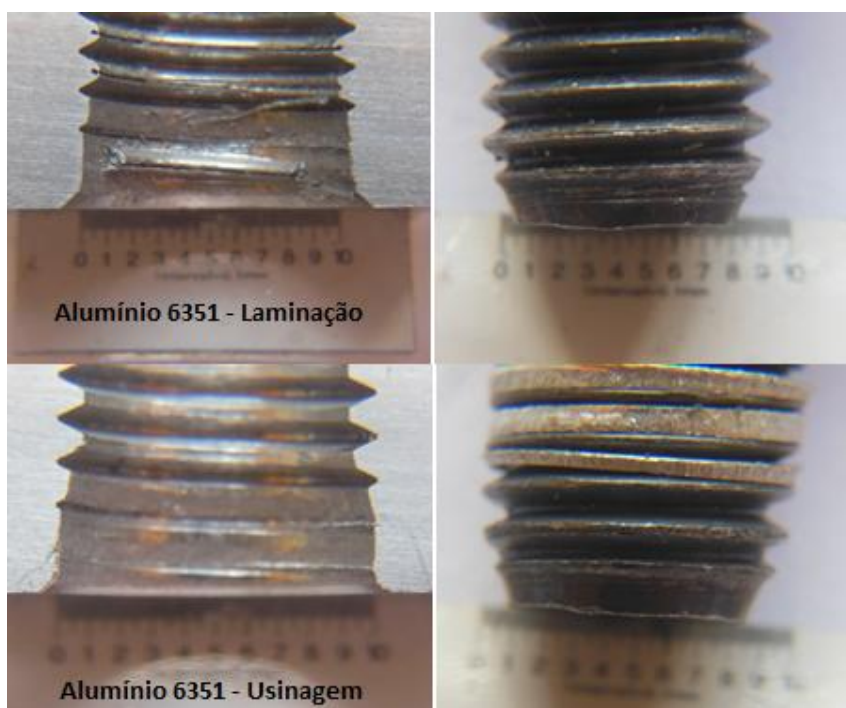


Figura 4. 50 - Corpo de prova e parafusos deformados após ensaio de tração

4.8. Testes complementares

4.8.1. Comprimento rosqueado

Nesta seção é feita uma avaliação do efeito do comprimento rosqueado no torque, ou seja, a profundidade na qual a ferramenta penetra no corpo de prova. A Fig. 4.51 mostra a variação do torque médio com o comprimento rosqueado durante a usinagem para o aço SAE 1045.

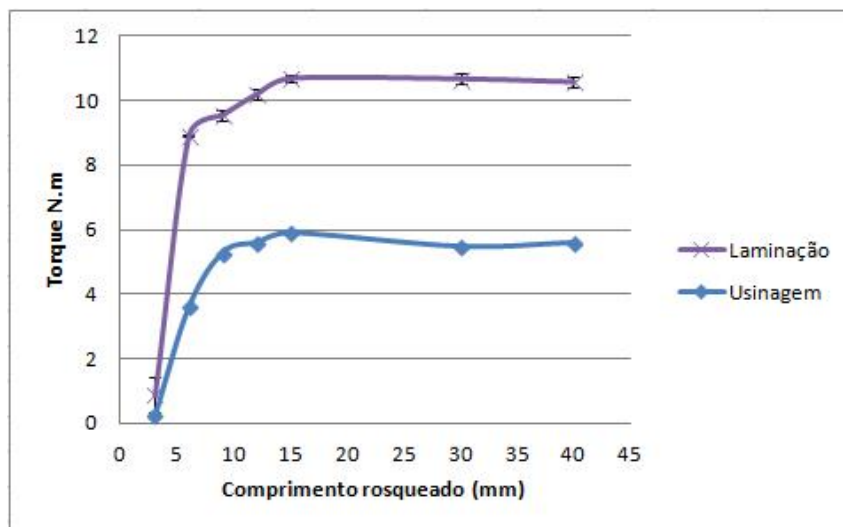


Figura 4. 51 - Variação do torque médio com o comprimento rosqueado, quando usinando a uma velocidade de corte de 10 m/min

Note que entre os comprimentos de 12 e 15mm o torque estabiliza e mesmo com o aumento significativo do comprimento rosqueado, quatro vezes o diâmetro do macho de corte, não há aumento no valor do torque. Lembrando que a profundidade recomendado pelo fabricante é de 1,5 vezes o diâmetro da ferramenta.

No rosqueamento por usinagem a diferença de um torque de aproximadamente 0,5 N.m para um comprimento rosqueado de 3mm e um torque de aproximadamente 6 N.m para 6mm deve-se não à porção de material que foi rosqueada, mas sim a parte da ferramenta que teve contato com o material do corpo de prova. Quando o comprimento rosqueado foi de 3mm, apenas o primeiro e o segundo filete de rosca do macho teve contato com o material, uma profundidade de corte menor do que 0,2mm. Podendo até ser considerada uma operação de micro usinagem se estivessemos avaliando apenas a usinagem feita por cada dente do macho de corte. Ao rosquear 6mm os 5 filetes da parte cônica estão em contato, contudo, o quinto filete não tem o contato total com o material da peça. Quando a profundidade atinge 9mm toda a parte cônica do macho de corte já está em contato com o material, a partir deste ponto não é possível afirmar se houve um aumento ou diminuição do torque em função do comprimento rosqueado. Fabricantes de machos de corte em geral indicam uma profundidade máxima de 1.5 vezes o diâmetro da ferramenta, assim as tolerâncias geométricas e dimensionais serão atingidas em condições normais e também porque há uma informação não comprovada que o aumento da profundidade de

corte aumenta o torque de rosqueamento. No entanto, mesmo usinando profundidade de até 4 vezes o diâmetro (limitado pelo comprimento do macho), não houve aumento do torque de rosqueamento para altas profundidades.

Assim como no rosqueamento por usinagem o torque médio no rosqueamento por laminação começa a se estabilizar entre os comprimentos rosqueados de 12 e 15mm, mesmo considerando que a parte cônica da ferramenta é menor no macho laminador. O menor valor de torque no comprimento de 9mm e até mesmo no de 6mm está mais relacionado a frenagem, que gera um torque contrário. Como a desaceleração do centro de usinagem é constante, quanto menor o comprimento rosqueado maior é a parcela deste comprimento em que a máquina já está desacelerando para parar. Isso significa que em um comprimento, por exemplo de 3mm, o macho laminador já entra na peça desacelerando. Há também o efeito da área de contato da ferramenta com a peça que aumenta o valor da parcela referente ao torque devido ao atrito, mas após um determinado comprimento da ferramenta ela apresenta uma conicidade de saída, isso faz com que mesmo que aumente a profundidade rosqueada a área de contato do material com a ferramenta permaneça constante.

A Figura 4.52 mostra o sinal de torque para todos os comprimentos rosqueados durante a usinagem.

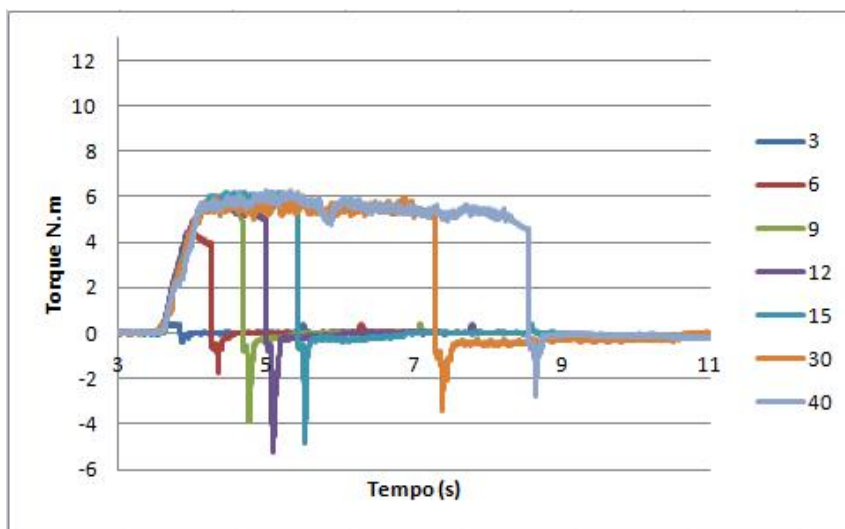


Figura 4. 52 - Sinal de torque para diferentes comprimentos rosqueados no processo de rosqueamento por usinagem a uma velocidade de corte de 10 m/min

A primeira parte inclinada do gráfico representa a entrada da parte cônica até a formação do primeiro filete completo de rosca. Depois disto, o processo entra na fase constante de usinagem. Isso significa que no comprimento de 6mm ainda não foi formado o primeiro filete de rosca completo na peça pois a parte cônica da ferramenta ainda não penetrou completamente na peça. No retorno do macho de corte há uma região de pico que dura em média 0,2 s, isso equivale a 1,59 mm de deslocamento para uma velocidade de avanço de 10m/min e esse pico não é devido apenas a inércia do movimento de retorno. Essa região é característica do teste de comprimento rosqueado, pois nesse caso o macho fica sempre embutido na peça e não passa além da peça durante o avanço. E talvez por não passar a espessura da peça (ficar embutido), haja alojamento de cavaco entre a ferramenta e a peça, o que leva a esse região de pico.

Após o pico há um torque de retorno mais constante até que o macho perca o contato com a peça. Esse torque de retorno é zero para os comprimentos de 3 e 6mm e para 9, 12 e 15mm esse torque aumenta em relação aos anteriores, mas permanece constante entre eles. No comprimento de 30mm o torque aumenta ainda mais, contudo, o valor ainda é pequeno mesmo com esses aumentos, pois características do processo e da ferramenta minimizam o torque devido ao atrito.

A Figura 4.53 mostra o sinal de torque para todos os comprimentos rosqueados durante o rosqueamento por laminação.

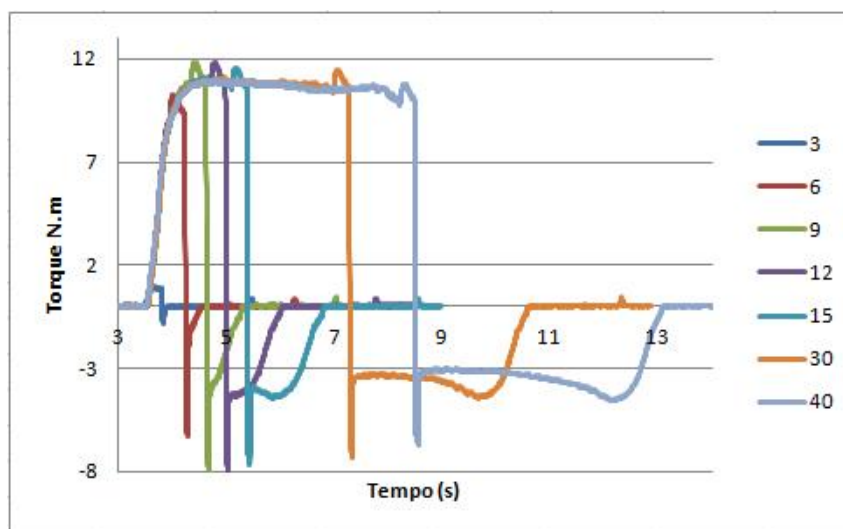


Figura 4. 53 - Sinal de torque para diferentes comprimentos rosqueados no processo de rosqueamento por laminação a uma velocidade de laminação de 10 m/min

No processo de rosqueamento por laminação, ao rosquear o comprimento 6mm, um filete completo de rosca foi formado, diferente do processo de usinagem para o qual a conicidade da ferramenta é maior. Outra diferença está no pico de retorno, que no processo de usinagem é chamada de região de pico, pois é uma região de maior valor do torque de retorno antes de se tornar constante e próximo de zero. No rosqueamento por laminação não há essa região de pico, pois o torque de retorno é quase constante até a saída do macho laminador, mas apenas um pico que caracteriza a inversão do movimento, contudo, o alto valor desse pico está associado à inércia do movimento e a maior força de atrito causado por características do processo e do macho laminador. Essas características associadas ao retorno elástico causam uma maior força de atrito.

As Figuras 4.54 e 4.55 mostram o comportamento da força de avanço em função do comprimento rosqueado. Tanto para o rosqueamento por usinagem como por laminação apenas nos comprimentos de 3 e 6mm a força de avanço esteve abaixo dos outros comprimentos rosqueados. Até o comprimento de 12mm não se nota flutuações da força, para exemplificar a flutuação observe o comprimento de 40mm, note que até a parada a força tem três picos e três vales, como ocorre a partir do comprimento de 15mm e é muito mais evidente para os comprimentos de 30 e 40mm. Isso porque o ciclo de flutuação é de 12mm aproximadamente, esses ciclos que tem o seu comprimento ou tempo em função da velocidade de corte/laminação usada, provavelmente são compensações da velocidade de avanço feita durante o processo para manter o avanço sincronizado com a rotação.

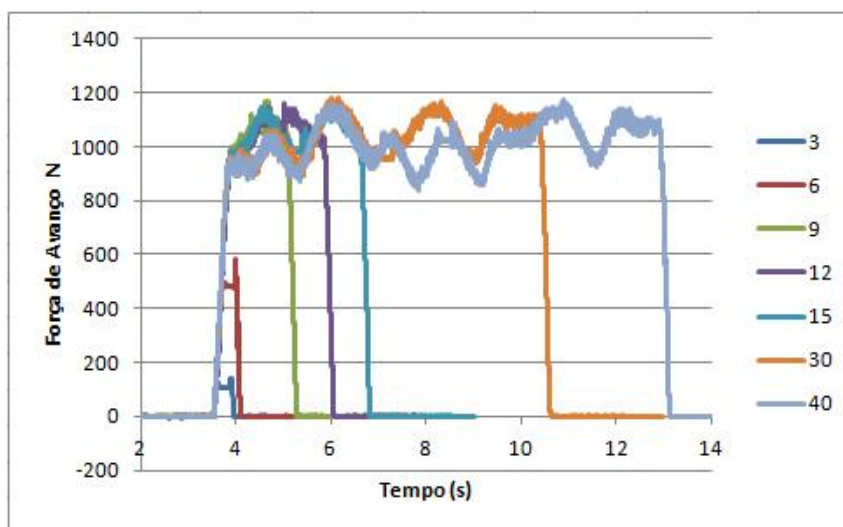


Figura 4. 54 - Força de avanço em diferentes comprimentos rosqueados durante o processo de rosqueamento por laminação

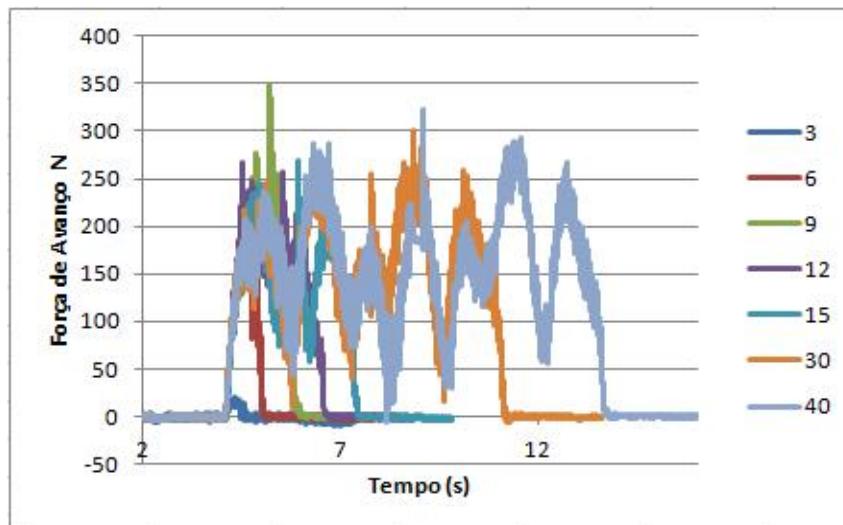


Figura 4. 55 - Força de avanço em diferentes comprimentos rosqueados durante o processo de rosqueamento por usinagem

4.8.2. Espessura Rosqueada

Nesta seção é analisado o efeito da espessura da peça rosqueada no torque. O furo é vazado e a ferramenta penetra na peça o suficiente para formar um filete completo.

A Figura 4.56 mostra o comportamento do torque com o aumento da espessura rosqueada. O comportamento é similar ao efeito do comprimento rosqueado, mas a estabilidade do torque é atingida a partir de 9mm de espessura, pois não há mais a influência do torque de frenagem que subtrai do torque de rosqueamento. Quando a peça possui 3mm de espessura, há no máximo dois filetes do macho em contato, logo o torque de rosqueamento é o torque gerado pelos dois filetes que estão em contato. O mesmo raciocínio pode ser usado para explicar o menor torque na espessura de 6mm. Contudo, o número de filetes do macho que estão em contato agora é maior, todos os filetes da parte cônica, seja do macho laminador ou de corte, estão em contato. O torque só não é maior porque para formar o primeiro filete completo de rosca na peça o primeiro filete e parte do segundo da parte cônica do macho perde o contato com a peça e isso causa uma diminuição do torque.

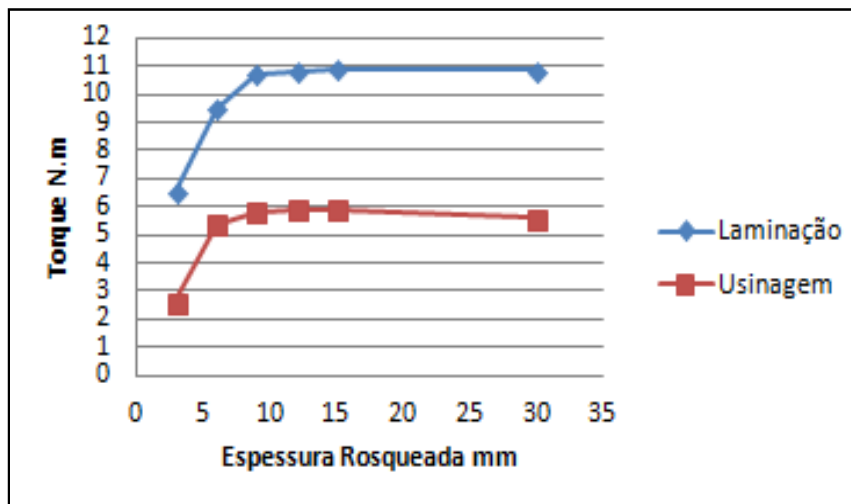


Figura 4.56 - Torque em diferentes espessuras rosqueadas para o processo de rosqueamento por laminação e usinagem

As Figuras 4.57 e 4.58 mostram o comportamento da força de avanço com a espessura rosqueada para o processo de usinagem e laminação. A curva de força apresenta mudanças apenas ao rosquear as espessuras de 3 e 6mm, nesses dois casos o valor da força de avanço é menor do que o restantes das espessuras. Assim como no comprimento rosqueado o que explica isso é a área de contato do macho com a peça. Nos dois casos a área menor gera uma força menor, a partir de 9mm a área se mantém constante devido à características do macho laminador e de corte.

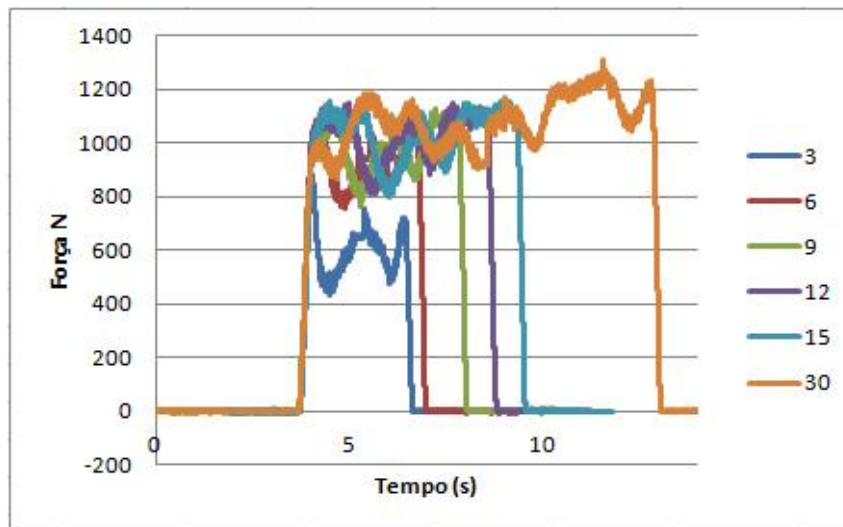


Figura 4. 57 - Força de avanço em diferentes espessuras rosqueadas por laminação

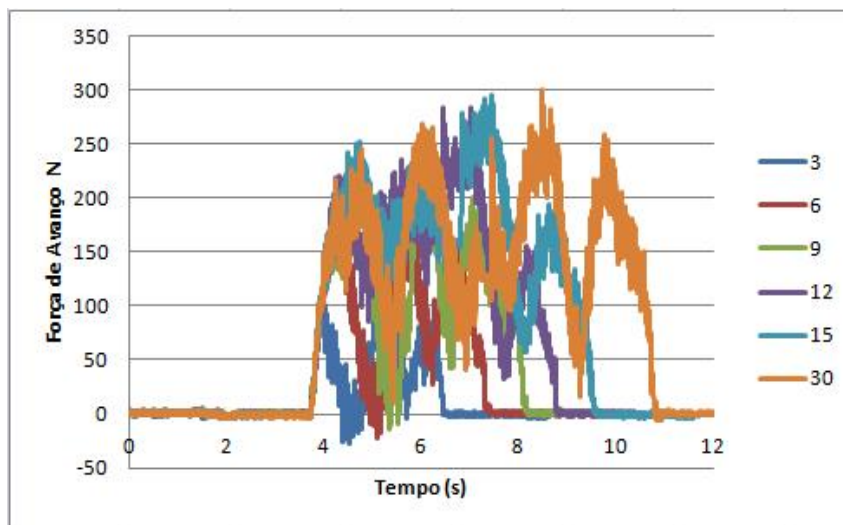


Figura 4. 58 - Força de avanço em diferentes espessuras rosqueadas por usinagem

4.8.3. Revestimento

A principal função do revestimento em ferramentas é a proteção com a finalidade de aumentar sua vida. Em geral os revestimentos têm maior dureza e um alto ponto de fusão, mas são materiais frágeis. Esses revestimentos podem ser metálicos ou cerâmicos e uma característica dos revestimentos, que auxilia na explicação do menor torque durante o

rosqueamento, seja por laminação, Fig. 4.59, ou por usinagem, Fig. 4.60, é o menor coeficiente de atrito apresentado pelos revestimentos duros. O aumento significativo observado na Fig. 4.59 à velocidade de corte de 30m/min com o macho sem revestimento pode ser em função de material aderido no macho laminador, como observado na Fig. 4.61.

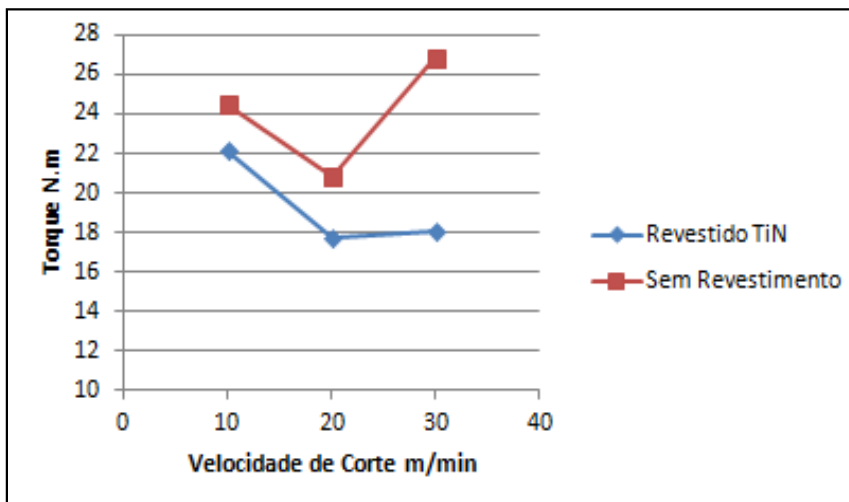


Figura 4. 59 - Torque durante o rosqueamento por laminação usando ferramentas com e sem revestimento

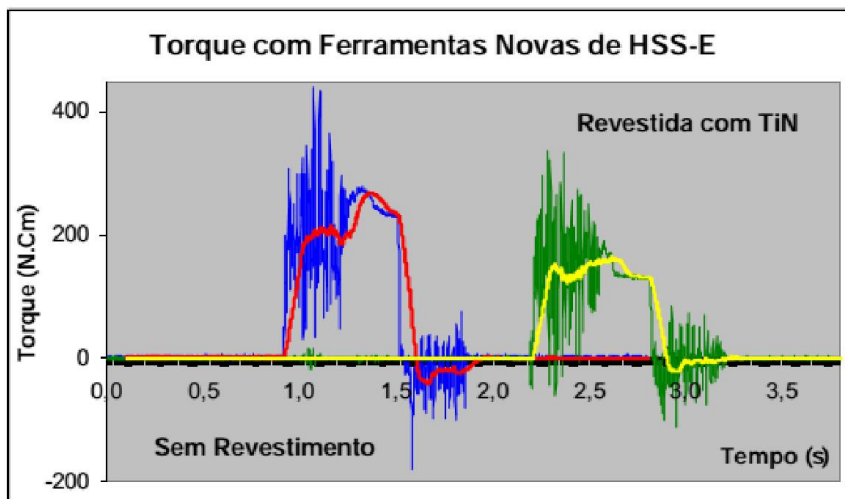


Figura 4. 60 - Sinal de torque durante o rosqueamento por usinagem usando ferramentas com e sem revestimento (Da Mota, 2006)

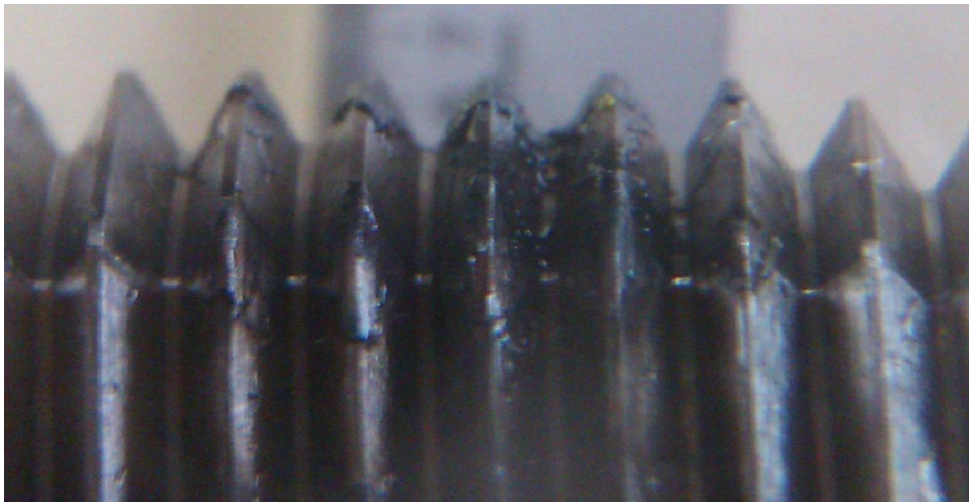


Figura 4. 61 - Macho laminador sem revestimento

O torque de retorno, Figura 4.62, tem um comportamento contrário ao torque de rosqueamento, pois o torque de retorno do macho laminador revestido é superior ao macho sem revestimento, contudo, a 30m/min devido à aderência de material, o torque do macho sem revestimento sobe consideravelmente. Uma dificuldade apresentada é explicar como o torque de retorno, que é o mesmo que torque devido ao atrito ser maior na ferramenta que tem o menor coeficiente de atrito. A provável explicação para esse fato controverso com os resultados da Fig. 4.59 está na maior força de atrito devido a maior força normal causada por uma menor área de alojamento do material deformado. Isso porque a área para alojar o filete de rosca formado é menor no macho revestido quando comparado com o macho sem revestimento, logo com a recuperação elástica cria-se uma força normal superior o que leva a um aumento do torque devido ao atrito.

Em função da espessura do revestimento, a distância entre um flanco e outro diminui no macho revestido. Como a recuperação elástica quase não sofre alteração no rosqueamento do macho revestido comparado com o macho sem revestimento a única mudança é na dimensão entre os flancos do filete do macho. Essa alteração de medida que tem valor considerável quando comparado com o valor da recuperação elástica aumenta e muito a força de atrito e conseqüentemente o torque de retorno. Com isso as variáveis importantes ao revestir um macho são o material do revestimento e a espessura do revestimento.

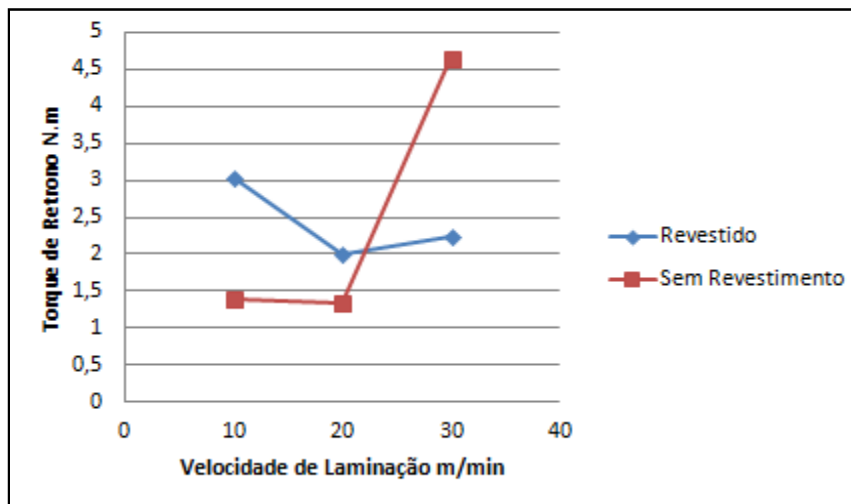


Figura 4. 62 - Torque de retorno no rosqueamento por laminação usando macho com e sem revestimento

A Figura 4.63 auxilia a explicar o aumento do torque de retorno. A figura mostra que a força de avanço na etapa de retorno na laminação é maior para o macho revestido. A diminuição da área de alojamento cria uma maior força de compressão sobre o macho laminador o que leva a um aumento da força de avanço.

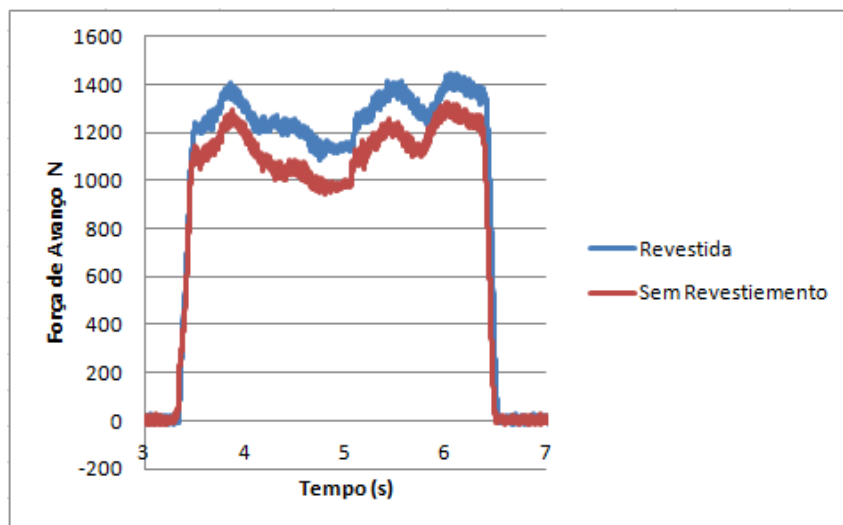


Figura 4. 63 - Força de avanço no rosqueamento por laminação usando macho com e sem revestimento a velocidade de 20m/min

4.8.4. Alteração do avanço (passo)

A Fig. 4.64 apresenta os resultados da força de avanço para vários avanços utilizados para o processo de rosqueamento por usinagem no aço ABNT1045. Observa-se na Fig. 4.64 que para valores de passo menor do que 1,50mm, os valores de força axial são negativos e valores maiores foram sempre positivos. A pequena porção do gráfico que está acima do eixo zero para os passos inferiores a 1,5mm é a parte cônica e o primeiro filete da parte reta do macho de corte, após isso a curva se torna negativa até a saída da do primeiro filete da parte reta e a parte cônica do macho. O valor de passo que apresentou os menores valores de força foi o de 1,50mm. Os resultados sugerem que, para uma menor força de avanço, o passo ideal está entre os valores de 1,495 e 1,500.

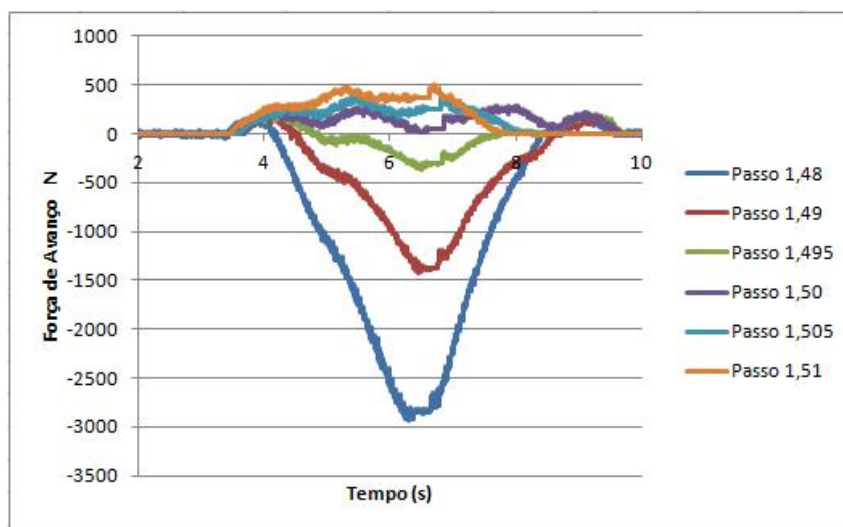


Figura 4. 64 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 10 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045

A Fig. 4.65 mostra os resultados para o torque em função do passo para velocidade de corte de 30m/min para o aço ABNT1045. Os resultados sugerem, novamente, que o valor ideal de passo está entre 1.495 e 1.50mm. Apesar do aumento de velocidade de corte em relação a Fig. 4.64, os valores de força axial são bem próximos. Esta variação de velocidade não teve uma grande influencia sobre os valores de força axial.

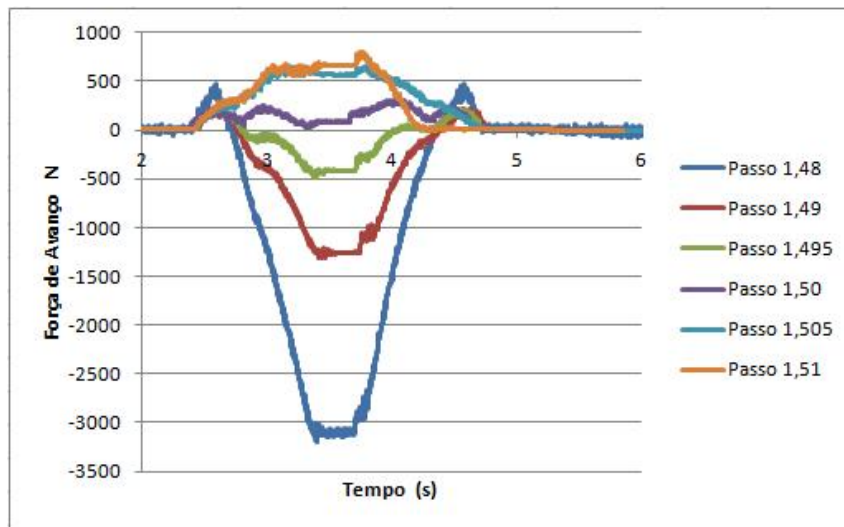


Figura 4. 65 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045

A Figura 4.66 mostra o sinal de torque em função do passo para o rosqueamento por usinagem do aço ABNT1045 a 30m/min. É possível observar na parte circulado de vermelho que as curvas com passo maior do que 1.50mm têm um “pico” nesta região e as curvas com o passo menor tem um pequeno “vale”. Lembrando que a ferramenta movimenta-se na vertical de cima para baixo, logo, passos maiores significam que a ferramenta está “empurrando” a peça e passos menores está “puxando”. Decompondo as forças envolvidas quando a ferramenta está empurrando a peça, aparece uma componente que auxilia o aumento do torque e este pico é justamente quando a ferramenta está saindo da peça, ou seja, não há mais material para ser cortado, logo não há mais nada que impeça o movimento da ferramenta. De maneira análoga ocorre quando a ferramenta está puxando a peça, mas a componente do torque agora auxilia para a diminuição do mesmo.

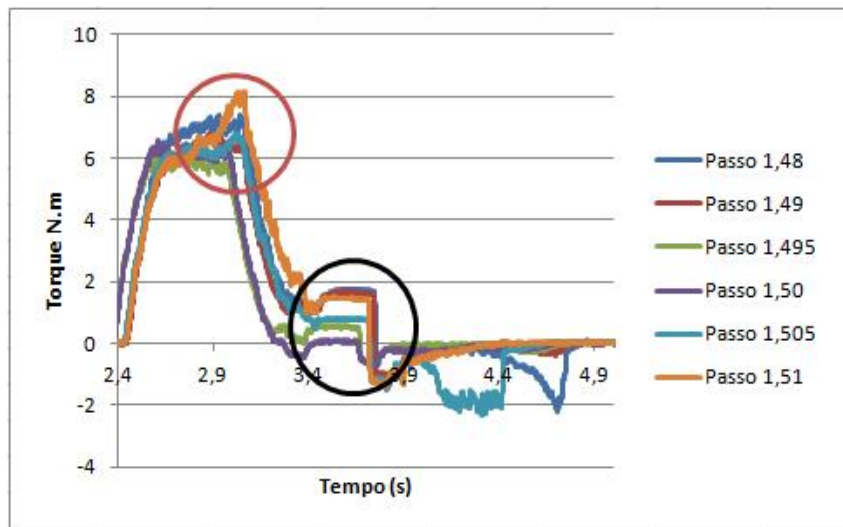


Figura 4. 66 - Comparação entre os gráficos de torque em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para roscas usinadas no SAE 1045

Outro detalhe do gráfico, circulado de preto, é o momento da parada, antes da inversão do movimento. Um erro de passo pode ser facilmente identificado pelo valor do torque na parada. Em furos passantes o valor deve ser zero, caso haja um erro de sincronismo ou mesmo uma alteração do passo no programa, isto será percebido pelo comportamento do gráfico. Uma característica do gráfico de torque é que independente do passo ser maior ou menor do que 1,50mm, ele é positivo até a inversão do movimento e negativo após a inversão até a parada. É possível notar também um aumento no torque de retorno à medida que se aumenta o erro no passo.

Tanto no gráfico da Figura 4.67 como no da Fig. 4.68, observa-se o mesmo comportamento das curvas, alterando apenas os seus valores. Nos gráficos de força axial no processo de laminação, o passo que mais se aproxima do ideal é o de 1.495mm. Isso se deve à contribuição do atrito para este tipo de processo, se decomposmos a força normal gerado pelo atrito de duas superfícies, com um passo menor do que 1.50mm, o valor da componente irá subtrair devido a sua direção. Isso faz com que o valor de força se aproxime de zero. Observa-se que quando a ferramenta toca a peça há um súbito aumento da força, que para todos os diferentes passos são próximos.

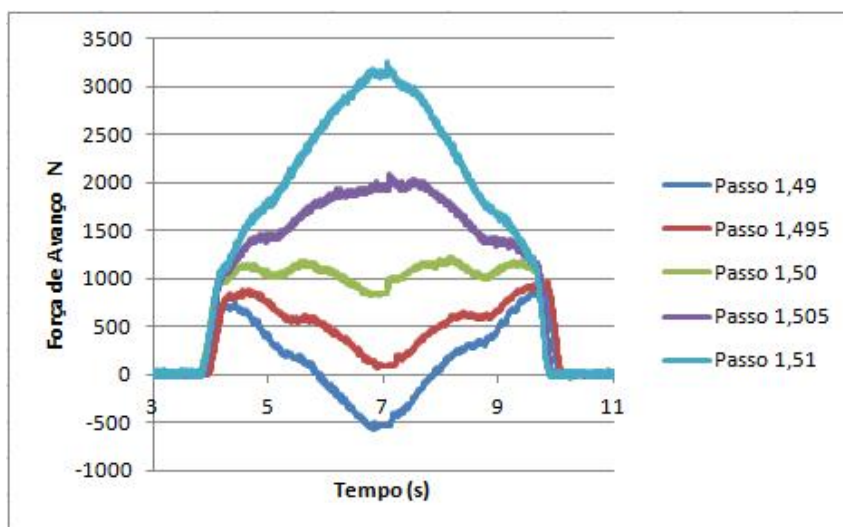


Figura 4. 67 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 10 m/min, para rosas laminadas no SAE 1045

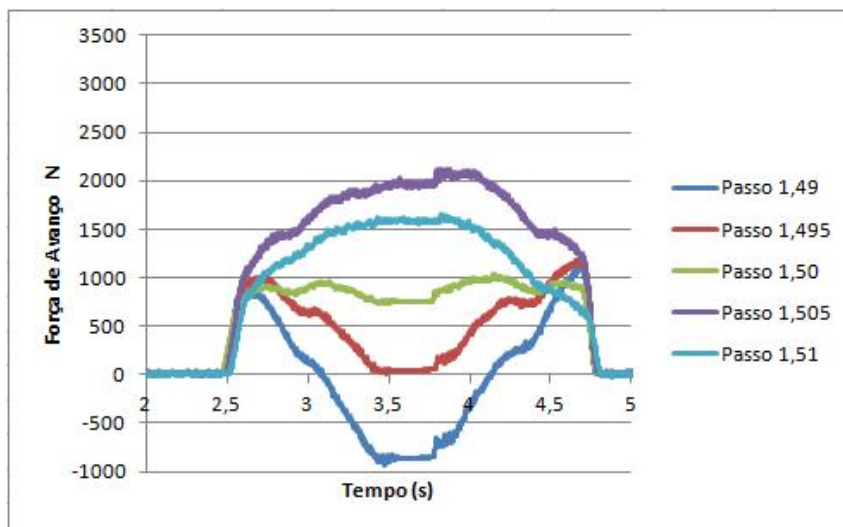


Figura 4. 68 - Comparação entre os gráficos de força axial em diferentes passos com velocidade de corte de 30 m/min, para rosas laminadas no SAE 1045

4.8.5. Torque e força de avanço para cada filete da parte cônica

Esta seção apresenta os resultados dos testes realizados com os machos de corte com número de filetes reduzidos conforme descrito no capítulo de procedimentos

experimentais. A Fig. 4.69 mostra o torque construído a partir dos resultados dos testes individuais. Os resultados deixam evidente a maior concentração do torque no terceiro filete, uma vez que o torque do primeiro é nulo, o segundo exerce apenas um pequeno esforço, menor do que 10% do torque total para a formação da rosca, como mostra a Fig. 4.69.

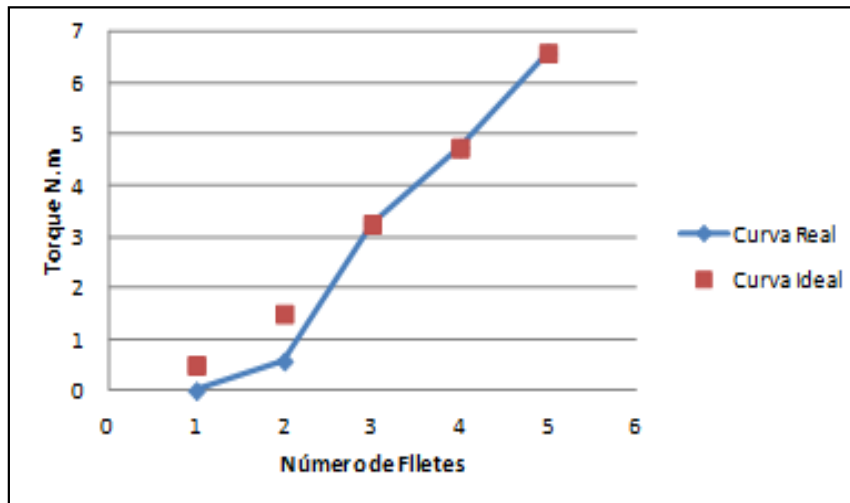


Figura 4. 69 - Torque médio por filete no rosqueamento por usinagem com uma velocidade de corte de 10m/min

A curva dita ideal, apresentada na Fig. 4.69, é apenas uma curva que contempla uma melhor distribuição do torque para cada filete da parte cônica do macho de corte. Este maior esforço de corte do terceiro filete, cerca de 40% do total, pode levar a uma tendência de fim de vida prematuro em relação aos outros filetes da parte cônica do macho de corte. Uma melhor distribuição do torque entre os filetes do macho de corte pode aumentar a vida da ferramenta. A Fig. 4.70 mostra as curvas de torque para cada filete da parte cônica do macho de corte. Claro que a distribuição de torque em cada filete é dependente da conicidade do macho utilizado.

A Figura 4.70 evidencia a não homogeneidade do torque gerado por cada filete do macho de corte.

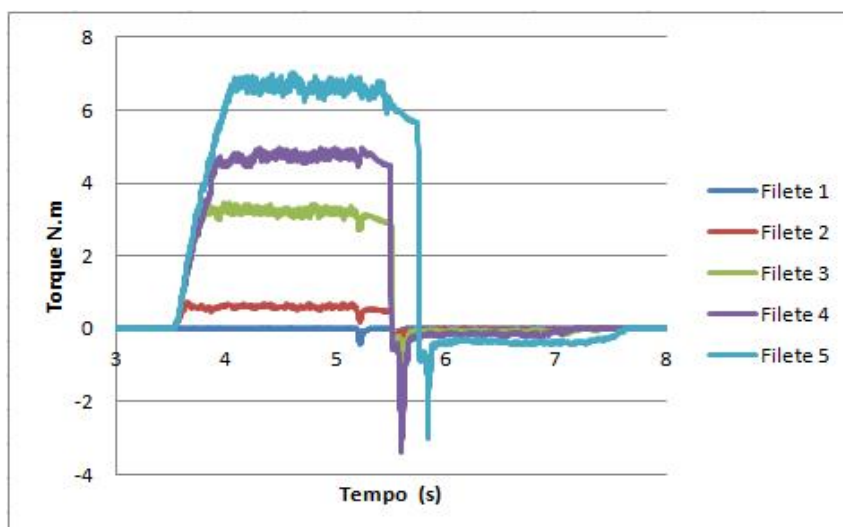


Figura 4. 70 - Sinal de torque para cada filete da parte cônica

A Fig. 4.71 mostra a variação da força de avanço em função do número de filetes. A força de avanço é determinada pela área de contato dos filetes da parte cônica e o primeiro filete da parte reta. Logo as menores áreas de contato que se têm nos primeiros filetes justificam as menores forças de avanço.

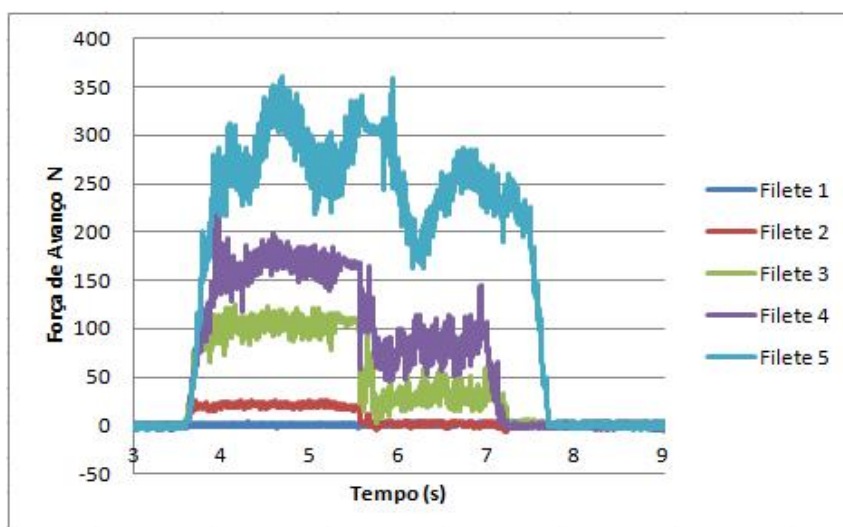


Figura 4. 71 - Sinal de força de avanço para cada filete da parte cônica

A Figura 4.72 mostra a profundidade de corte de cada filete, este valor foi obtido através da perfilometria das roscas depois de usinadas. O terceiro filete possui a maior profundidade o que explica o motivo do torque durante o rosqueamento possuir o maior valor, quando comparado aos demais.

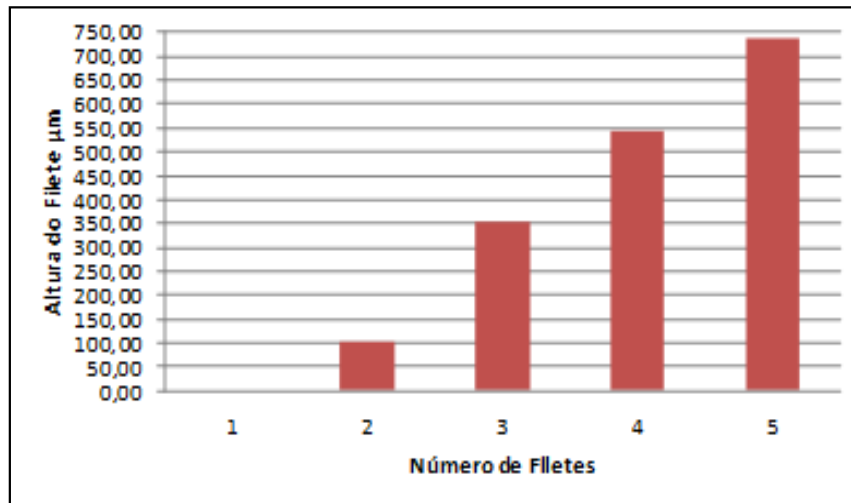


Figura 4. 72 - Profundidade de corte realizada por cada filete do macho de corte

O primeiro filete não retira material, o segundo retira a uma profundidade de 100 μm aproximadamente, o terceiro 250 μm , o quarto 200 μm e o quinto 200 μm . Note que a profundidade de corte de cada filete esta coerente com as médias de torque de cada filete. O primeiro não retira material e consequentemente não tem torque correspondente, o segundo retira a menor quantidade dentre os restantes e possui o menor torque dentre os filetes que geram torque, o terceiro possui a maior profundidade de corte e o maior torque médio e os dois últimos retiram praticamente a mesma quantidade e possuem aproximadamente o mesmo valor de torque.

A profundidade de corte realizada por cada filete é uma usinagem de pequenas dimensões. Ao dividir essa profundidade pelo número de dentes de cada filete, no caso analisado por três (número de dentes em um filete), temos uma profundidade de 33 μm para cada dente do segundo filete por exemplo. Essa dimensão é quase a metade do diâmetro de um fio de cabelo, e sugere que o processo de rosqueamento em muitos casos pode ser considerado um processo de micro usinagem, mas que forma uma macro geometria. Logo, inúmeros detalhes que não influenciam ou pouco influenciam no processo de usinagem

convencional vão alterar o processo de rosqueamento devido às dimensões usinadas. Como o efeito de tamanho dos constituintes, a dureza dos mesmos, cavaco na região de corte e pequenos desgastes da ferramenta.

A Figura 4.73 mostra a evolução do filete de rosca em uma peça ao rosquear filete por filete do macho de corte.

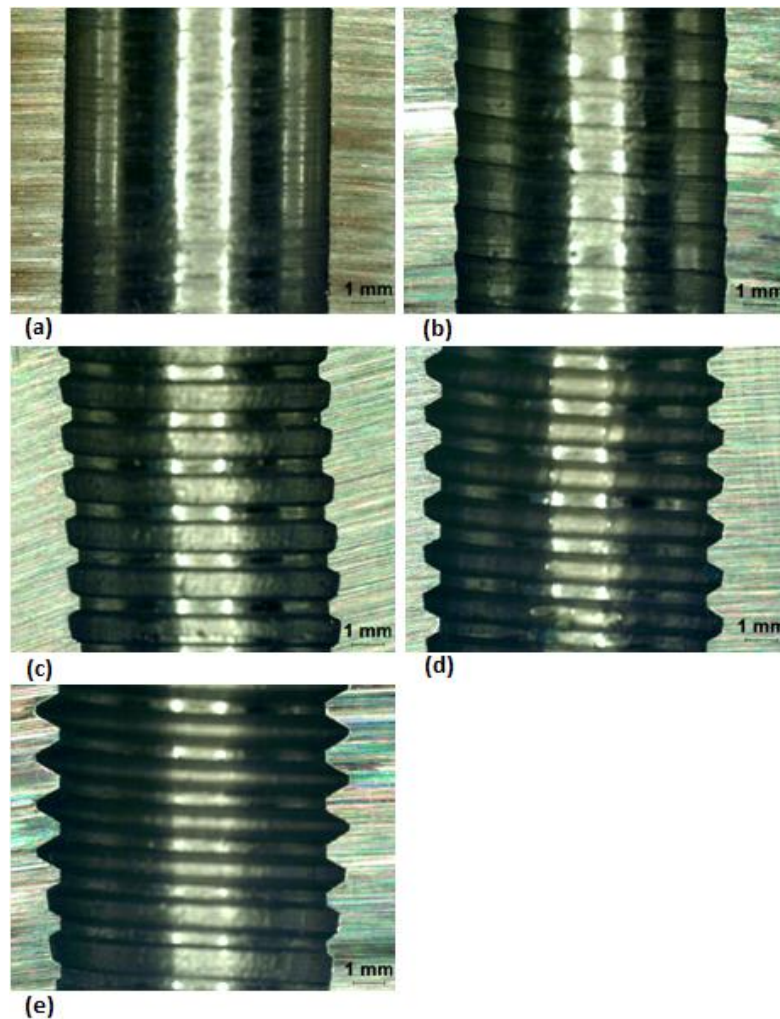


Figura 4. 73 - Rosca produzida pelo rosqueamento filete a filete: (a) primeiro filete, (b) segundo filete, (c) terceiro filete, (d) quarto filete e (e) quinto filete

4.8.6. Efeito do Diâmetro do pré-furo

O diâmetro do pré-furo é uma variável muito importante no processo de rosqueamento interno. Apesar de existir um valor ótimo recomendado para cada tipo de rosca, ao realizar a furação esta pode variar em torno do valor recomendado. Em alguns casos essa variação pode ter um valor considerável em função da qualidade da ferramenta de corte, do sistema de fixação e da rigidez da máquina ferramenta.

A Figura 4.74 mostra o comportamento do torque com a variação do diâmetro do pré-furo para o rosqueamento por laminação e usinagem. Para o rosqueamento por usinagem o diâmetro recomendado é 8,5mm. Como mostrado na Fig. 4.72 o primeiro filete da parte cônica não retira material ao usinar um furo com 8,5mm, mas ao diminuir esse diâmetro o primeiro filete passa a usinar. Mas quando o diâmetro do pré-furo é de 8,7mm, o segundo filete passa a não usinar mais, já que sua profundidade de corte é de 0,1mm.

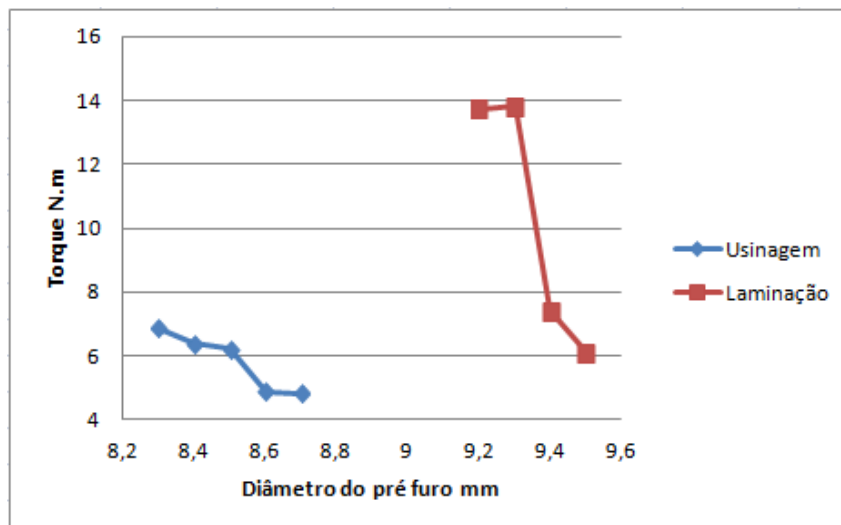


Figura 4. 74 - Variação do torque com o diâmetro do pré-furo no aço SAE 1045 para a velocidade de 20m/min

No rosqueamento por laminação o diâmetro recomendado é de 9,3mm. Para esta operação, o número de diâmetros testados foi menor do que no processo por usinagem, pois ao rosquear com o macho laminador um pré-furo de 9,1mm, a ferramenta travou durante o avanço e o torque aumentou acima do limite de aquisição de sinais.

Ao rosquear um pré-furo de 9,2mm não houve alteração no valor do torque, isso porque esse menor diâmetro ainda não foi suficiente para preencher toda a área entre os filetes do macho. Para garantir que não haja travamento ou quebra do macho laminador o diâmetro do pré-furo recomendado pelo fabricante contempla uma folga, ou seja, uma falta de preenchimento da área entre os filetes do macho. Por esse motivo, apesar da diminuição do diâmetro do pré-furo, o torque não aumentou em relação ao pré-furo de 9,2mm. Ao aumentar o diâmetro do pré-furo para 9,4mm houve uma queda de mais de 47% no torque e em um pré-furo de 9,5mm a queda foi de aproximadamente 56%. Carvalho et. al. (2012), mostrou o mesmo comportamento, contudo, o percentual de queda foi menor (Fig. 4.75).

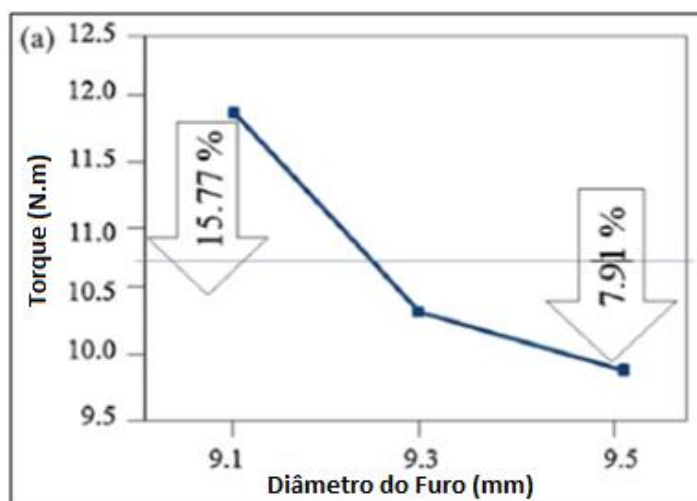


Figura 4. 75 - Influência do diâmetro do pré-furo no torque (Carvalho et al., 2012)

O não preenchimento das áreas entre os filetes do macho laminador pode ser observado na Fig. 4.76. Os círculos vermelhos na Fig. 4.76 evidenciam as cristas numa rosca usinada um pré-furo de 9,2mm e 9,3mm. É possível observar que na Fig. 4.76 (a) há um pequeno rasgo na crista da rosca, o que confirma o não preenchimento total. Contudo, essa mesma característica não foi notada em nenhum filete da rosca com pré-furo de 9.1mm, Fig. 4.76 (b).

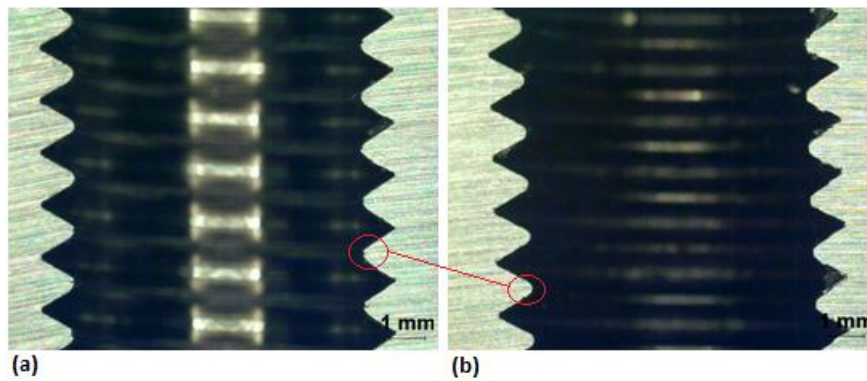


Figura 4. 76 - Roscas laminadas com aumento de 12X: (a) pré-furo 9,2mm e (b) pré-furo 9,1mm

As Figuras 4.77 e 4.78 mostram o comportamento da força de avanço em função do diâmetro do pré-furo no rosqueamento por usinagem. No rosqueamento por usinagem a influência é menor, com isso é possível notar uma pequena queda na força nas curvas relativas aos diâmetros de 8,6 e 8,7mm. No entanto, ao analisar as curvas referentes ao rosqueamento por laminação é possível notar uma maior influência do diâmetro do pré-furo principalmente quando esse diâmetro é aumentado. Assim como no caso em que se analisou o rosqueamento filete a filete, neste caso a causa para a diminuição da força de avanço é o mesmo, ou seja, a diminuição da área de contato.

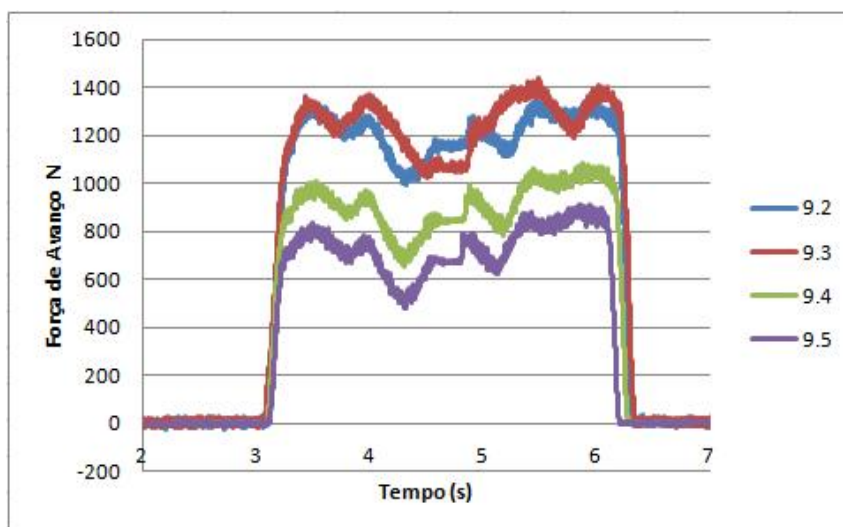


Figura 4. 77 - Sinal de força de avanço em função do diâmetro do pré-furo no rosqueamento por laminação

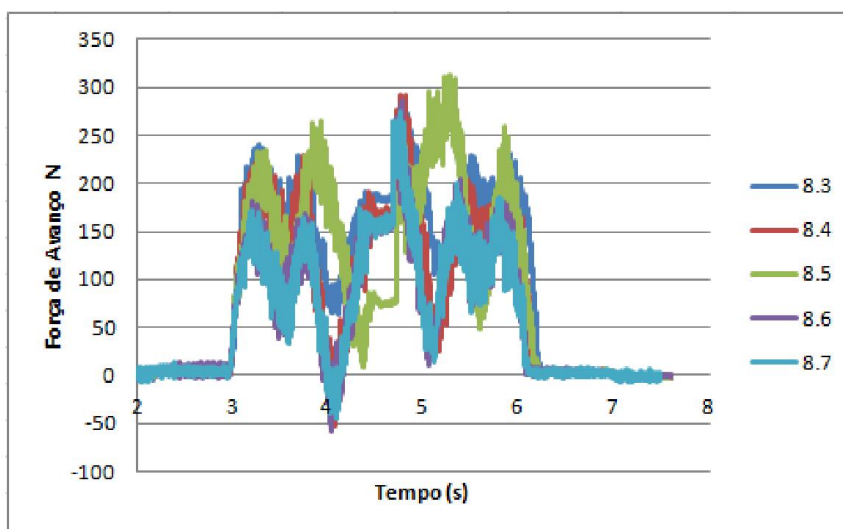


Figura 4. 78 - Sinal de força de avanço em função do diâmetro do pré-furo no rosqueamento por usinagem

CAPÍTULO V

Conclusão

A partir da análise dos resultados e discussões feitas, concluiu-se que assim como no processo de usinagem o torque no processo de laminação diminuiu com o aumento da velocidade de laminação. Os casos pontuais onde isso não ocorreu, ou seja, o toque não diminuiu com o aumento da velocidade de corte ou laminação, foram em função do desgaste do macho.

Nos ensaios de microdureza na seção transversal do filete não é possível notar um padrão de comportamento da microdureza com o aumento da velocidade de corte e laminação. Contudo, os resultados de microdureza das roscas laminadas são superiores aos das roscas usinadas.

Já a carga máxima de tração necessária para romper os filetes de roscas produzidos por usinagem se mostraram iguais ou superiores aos das roscas produzidas por laminação.

Por fim, ao avaliar o torque produzido por cada filete da parte cônica do macho de corte, percebe-se que o aumento do torque não é uniforme, sendo que o terceiro filete retira uma maior profundidade de corte do que os demais e que em função disso o torque necessário é superior ao demais.

CAPÍTULO VI

Proposta Para Trabalhos Futuros

As dúvidas e os resultados que surgiram durante a tese mostram algumas opções de trabalhos futuros:

- Análise do desgaste em machos laminadores
- Determinação do torque dente a dente para diferentes ângulos de entrada de machos de corte e laminação
- Análise do alongamento mínimo do material da peça para o rosqueamento interno por laminação
- Estudo da microdureza da seção transversal do filete de rosca em diferentes profundidades para vários passos de rosca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, J. H., LEA, D. J., KID, S. H., KIM, H. Y., & CHO, K. K. (2003). Effects os Synchronizing Errors on Cutting Perfomance in the Ultra-High-Speed Tapping. *CIRP Anals*, 52, 53-56.
- AMAREGO, E. J., & MARILYN, N. P. (2002). Predictive Cutting Models for the Forces and Torque in Machining Tapping with Straight Flute Taps. *CIRP - Annals*, 51, pp. 75-78.
- ANDRES, F. C. (2004). Experimental Comparison of Vegetable and Petroleum Base Oils in Metal Working Fluids using the Tapping Torque test. *Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation*.
- ASTM, D.-0. (2000). Standard Test Method for Comparing Metal Removal Fluids Using the Tapping Torque Test Machine. *American Society for Testing and Materials*.
- BADAMI, V. G., HEGE, R. E., & PATTERSON, S. R. (08 de 2002). A Novel Method for Forming Fine-Pitch Threads in Superinvar. *Precision Engineering*, 27, pp. 87-90.
- BALDO, D., LAURO, C. H., BRANDÃO, L. C., & FITTEMAN, J. C. (2010). Estudo Comparativo da Resistência a Tração de Roscas Internas Laminadas e Usinadas. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 1-7.
- BELLUCO, W., & CHIFFRE, L. D. (2002). Surface Integrity and Party Accuracy in Reaming and Tapping Stainless Steel with New Vegetable Based Cutting Oils. *Tribilogy International*, 35, pp. 865-870.
- BEZERRA, A. A. Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido. 2003. 209 f. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BHOWMICK, S., LUKITSCH, M. J., & ALPAS, A. T. (2010). TAPPING of Al-Si Alloys with Diamond-Like Carbon Coated Yools and Minimum Quantity Lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp. 2142-2153.

- BRINKSMEIR, E., CAMMETT, J. T., KONIG, W., LESKOVAR, P., PETERS, J., & TONSHOFF, H. K. (1982). Residual Strees - Measurement and Causes in Machining Processes. *CIRP - Annals*, 31, pp. 491-509.
- CAO, T., & SUTHERLAND, W. O. (2002). Investigation of Thread Tapping Load Characteristics Through Mechanistics Modeling and Experimentation. *International Journal of Machine Tools e Manufacture*, 42, pp. 1527-1538.
- CARVALHO, A. O., BRANDÃO, L. C., PANZERA, T. H., & LAURO, C. H. (march de 2012). Analysis of Form Threads Using Flutelles Taps in Cast Magnesium Alloy (AM60). *Journal Of Materials Processing Tecnology*, 212, 1753-1760.
- CHOWDHARY, S., OZDOGANLAR, B. O., KAPOOR, S. G., & DEVOR, R. E. (11 de 2003). Modeling and Analysis of Internal Thread Forming. *Journal Manufacturing Science Engeneering*, pp. 689-695.
- DA MOTA, P. R. (2006). investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço Rápido no Proceso de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte. *Dissertação de Mestrado - Universidade Fedral de Uberlândia, Uberlândia*, 142f.
- DA MOTA, P. R. (2009). *Estudo do Processo de Rosqueamento com macho de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular*. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.
- DOMBLESKY, J. P., & FENG, F. (2002). A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling. *Journal of Materials processing Technology*, 121, pp. 341-349.
- DORMER. (2013). "Catálogo Dormer" www.dormertools.com.
- EMUGE. (2013). "Catálogo Emuge: Tapping Tecnology" www.emuge-franken.com.
- FANTIN, J. P. (1992). Ensaio com Machos: em Busca de Bons Resultados na Usinagem. *Máquinas e Metais*, 320, pp. 58-60.
- FREIRE, J.M. Tecnologia Mecânica (Instrumento de Trabalho na Bancada) Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A., v. 1, 1ª ed, 1976. 271p.
- FROMENTIN, G. (2004). Etude Mecanique et Technologique du Taraudage par Deformation Aplication aux Aciers Pretraites. *Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Cluny*.

- FROMENTIN, G., BIERLA, A., MINFRAY, C., & POULACHON, G. (2010). An Experimental Study on the Effects of Lubrication on Form Tapping. *Tribology International*, 43, 1726 - 1734.
- FROMENTIN, G., POULACHON, G., MOISAN, A., JULIEN, B., & GIESSELER, J. (2005). Precision and Surface Integrity of Threads Obtained by Form Tapping. *CIRP Annals*, 519-522.
- FU, M. W., & CHAN, W. L. (5 de 2012). A Review on the State-of-the-Art Microforming Technologies. *International Journal Advanced Manufacture Technology*.
- GEIGER, M., KLEINER, M., ECKSTEIN, R., TIESLER, N., & ENGEL, U. (2001). Microforming. *CIRP - Annals*, 50, pp. 445-462.
- GRIZA, S., SILVA, E. G., SANTOS, S. V., PIZZIO, E., & STROHAECKER, T. R. (2013). The Effect of Bolt Length in the Strength of M24X3 Bolt Studs. *Engineering Failure Analysis*, 34, pp. 397-406.
- GRUNING, K., Técnica de Conformação, Polígono, São Paulo, 1966.
- GUESSER, W. L. (2009). *Propriedade Mecânica dos Ferros Fundidos* (1 ed.). São Paulo: Blucher.
- HAYAMA, M. (1972). Estimation of Torque in Cold Forming of Internal Thread. *Bulletin of the Faculty of Engineering Yokohama National University*, 21, 77-90.
- HUTCHINGS, I. M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (1 ed.). London: British Library.
- IVANOV, V., & KIROV, V. (1997). Rolling of Internal Threads: Part 1. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, pp. 214-220.
- LIU, J. G., FU, M. W., & CHAN, W. L. (2011). Influence of Size Effect on the Springback of Sheet Metal Foils in Micro-Bending. *Computer Material Science*, 50, pp. 2604-2614.
- LORENZ, G. (1980). Division of Manufacturing Technology. *CSIRO*. 29, pp. 1-4. Melbourne/Australia: CIRP.
- 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.

- NBR 6152, A. (5 de 2002). Materiais Metálicos - Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente.
- NEDIC, B., & LAKIC-GLOBOCKI, G. L. (2005). Friction Coefficient for all Alloys and Tool Materials Contact Pairs. *Tribology in Industry*, 27, pp. 53-56.
- NEUGEBAUER, R., BOUZAKIS, K. D., DENKENA, B., KLOCKE, F., STERZING, A., TEKKAYA, A. E., et al. (2011). Velocity Effects in Metal Forming and Machining Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 627-650.
- NordTest MECH, O. (1998). Tapping Torque Test for Cutting Fluid Evaluation. *NordTest Method*.
- OSG. Manual Técnico – Machos. OSG Ferramentas de Precisão Ltda. v.1, São Paulo, 01 - 58, 1999.
- OSG. Manual Técnico – Machos. OSG Ferramentas de Precisão Ltda. São Paulo, 222p., 2012.
- PARKER, W. J., JENKINS, R. J., BUTLER, C. P., & ABBOTT, G. L. (8 de 1961). Flash Method to Determine Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 279, pp. 1679-1684.
- PEREIRA, I. C. (2010). Análise do Torque e da Força Axial em Diferentes Condições de Corte no Rosqueamento de dois Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e um Vermicular da Classe 350. *Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia*, 100p. Uberlândia.
- PEREIRA, I. C., DA SILVA, M. B., & FARIA, E. A. (2013). Influence of Feed Rate and Threaded Length in Thread Forming and Tapping Operations. *World Congress on Engineering*, pp. 1781 - 1784.
- PEREIRA, I. C., NAVES, V. T., & DA SILVA, M. B. (2010). Análise da Usinabilidade Através da Força Axial e do Torque no Rosqueamento de Dois Ferros Fundidos Cinzentos Ligados ao CrCuSn e CrCuSnMo e um Ferro Fundido Vermicular da Classe 350. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 1-12.
- 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. 2004. 192 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- REITER, A. E., BRUNNER, B., ANTE, M., & RECHBERGER, J. (5 de 2006). Investigation of Several PVD Coatings for Blind Hole Tapping in Austenitic Stainless Steel. *Surface e Coating Technology*, 200, pp. 5532-5541.
- SHASHIDHARA, Y. M., & JAYARAM, S. R. (2010). Vegetable Oils as a Potential Citting Fluid - An Evolution. *Tribology International*, 43, pp. 1073-1081.
- STÉPAN, P., MATHURIN, F., & GUILLOT, J. (2011). Analytical Study of Maximal Torque During Forming Screw Process. *Journal of Materials Processing Tecnology*, 211, pp. 212-221.
- TITEX-PLUS. (2012). Machos SPRINT de Alta Perfomance Exclusivos. *O Mundo da Usinagem*, 26-28.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p