UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS EDUARDO COSTA

INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE PENETRAÇÃO NO ROSQUEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

CURITIBA 2022

CARLOS EDUARDO COSTA

INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE PENETRAÇÃO NO ROSQUEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Influence of the penetration methods in threading of AISI 304L Stainless Steel

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Área de concentração: Engenharia de manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Milton Luiz Polli.

CURITIBA

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.





CARLOS EDUARDO COSTA

INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE PENETRAÇÃO NO ROSQUEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 21 de Fevereiro de 2022

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alisson Rocha Machado, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Dalberto Dias Da Costa, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Lucas Freitas Berti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Paulo Andre De Camargo Beltrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 05/05/2022.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e mente sóbria.

Ao meu prezado orientador, professor Milton Polli, pelo conhecimento transmitido, paciência exercida e crença na ciência e na tecnologia.

Aos professores Álisson Machado e Paulo Beltrão, pelas valiosas sugestões durante o exame de qualificação e que se tornaram parte deste trabalho.

À Usifix, por propiciar o ambiente para a execução dos experimentos.

Ao mestre Adriano Lara, pela disponibilidade durante os experimentos de aquisição das forças.

Ao mestre Alessandro Ellenberger, pela parceria durante o curso.

Ao mestre Alexandre Gonçalves do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR, pelo modo divertido de cooperar durante a aquisição das imagens.

À estagiária do CMCM Heloisa Moraes, pelas imagens da superfície da rosca.

Ao aluno de IC Leonardo Bottega (Laboratório de ensaios de materiais da UTFPR), pelo suporte durante a preparação das amostras e ensaios de microdureza.

Ao professor Dr. Marcos Proença, pelas discussões sobre o aço inoxidável.

Ao companheiro de profissão e seguidor nesta linha de pesquisa Emerson Seixas.

Aos meus pais, que foram sempre os maiores incentivadores ao estudo como meio para o alcance dos objetivos profissional e pessoal.

Um capítulo chamado Gratidão, a todos que direta ou indiretamente cooperaram para a concretização deste trabalho e aos que darão continuidade.

RESUMO

Dentre os processos de usinagem, o rosqueamento é um dos mais difíceis de se realizar devido à formação e fluxo do cavaco na zona de corte. O desafio é ainda maior na usinagem do aço inoxidável. Este trabalho analisa a influência dos métodos de penetração no rosqueamento por torneamento externo a seco do aço inoxidável 304L. Foram utilizados o insertos de metal duro classe M com revestimento PVD (TiC, Al₂O₃ TiN) GC 1020. Inicialmente foram comparados os métodos de penetração radial, flanco e incremental com profundidade de corte constante considerando seus efeitos sobre as forças, temperatura, formação do cavaco, vida da ferramenta e qualidade da rosca. Posteriormente, avaliou-se o método de flanco modificado e também o emprego de seção de usinagem constante em termos de vida da ferramenta. Os resultados mostraram que o cavaco obtido pelo método radial foi o que apresentou maiores valores de grau de recalque. Em comum, todos os métodos apresentaram cavaco com perfil serrilhado ao longo das bordas. O método radial foi o que apresentou maiores forças e temperaturas, seguido do método de flanco enquanto o método incremental resultou em valores menores. Para todos os métodos empregados, tanto as forças como as temperaturas cresciam a cada peça rosqueada devido aos desgastes das ferramentas. As condições críticas que ocorreram durante o rosqueamento do aço inoxidável causaram desgaste severo da ponta da ferramenta, desgaste de flanco e desgaste de entalhe. A progressiva alteração da geometria da ferramenta gerada pelo desgaste e aderências afetou negativamente o perfil das roscas. Em comparação com o avanço radial, a vida útil da ferramenta foi 28,57% e 71,43% maior para o avanço de flanco e incremental, respectivamente. O emprego do método de flanco modificado propiciou uma maior vida de ferramenta em comparação aos demais, representando um aumento de 44,44% em relação ao método de flanco tradicional. Além disso, quando se empregou a seção de corte constante, o desgaste na ponta da ferramenta foi reduzido, possibilitando um aumento de 23,08% em comparação com a condição onde a profundidade de corte foi constante.

Palavras-chave: rosqueamento; método de penetração; temperatura; força.

ABSTRACT

Among the machining processes, threading is one of the most challenging due to the difficulties in formation and flow of the chips in the cutting zone. The challenge is even greater when machining stainless steel due to the characteristics of this material. The present work analyzes the influence of infeed methods on external turning threading of 304L stainless steel in dry conditions. M class carbide inserts with PVD coating (TiC, Al2O3 TiN) GC 1020 were used in the experiments. Initially, radial, flank and incremental infeed methods with constant depth of cut were compared considering their effects on forces, temperature, chip formation, tool life and thread quality. Subsequently, the modified flank method was evaluated, as well as the use of a constant machining section in terms of tool life. The results showed that the chip obtained by the radial method was the one with the highest values of chip compression ratio. A common feature of all methods was the serrated profile along the edges, characteristic of segmented chips. The radial method showed the highest forces and temperatures, followed by the flank method, while the incremental method resulted in lower values. For all methods employed, both forces and temperatures increased with the number of machined parts due to tool wear. The critical conditions that occur during the stainless steel threading process have caused severe tool tip wear, flank wear and notch wear. The progressive change in the tool geometry generated by wear and adhesions negatively affected the profile of the threads. Compared to radial infeed, the tool life was 28.57% and 71.43% longer for flank and incremental infeed, respectively. The use of the modified flank method provided a longer tool life compared to the others, representing an increase of 44.44% compared to the traditional flank method. Furthermore, when the constant cutting section was used, the wear on the tool tip was reduced, allowing an increase of 23.08% compared to the condition where the depth of cut was kept constant.

Keywords: threading; infeed method; temperature; force.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Tópicos de uma rosca	14		
Figura 2	Métodos de penetração para rosqueamento em torno	16		
Figura 3	Características geométricas para rosca métrica			
Figura 4	Fabricação pelos de usinagem e de conformação			
Figura 5	Ciclo de Rosqueamento	25		
Figura 6	Dimensões básicas de um inserto para usinagem de rosca	28		
Figura 7	Rosqueamento pelo método de penetração radial	29		
Figura 8	Rosqueamento pelo método de penetração de flanco	30		
Figura 0	Rosqueamento pelo método de penetração de flanco	30		
rigula 9	modificado	50		
Figura 10	Rosqueamento pelo método de penetração incremental	31		
Figura 11	Estratégias de profundidade de corte	32		
Figura 12	Rosqueamento por meio dos métodos radial de flanco e incremental utilizando ferramenta multi-aresta	33		
Figura 13	Forca de usinadem e suas decomposições	35		
Figure 14	Identificação dos nontos de majores esforcos	36		
Figura 14	Internaçãos, optro a variável velocidado do corto o a variável	27		
Figura 15	resposta força de corte	51		
Figura 16	Força de corte para penetrações com ap variável [N]	37		
Figura 17	Fontes de calor em um processo de torneamento	38		
Figura 18	Representação esquemática do fluxo de calor em processo de	39		
C	torneamento			
Figura 19	Identificação de um sistema termográfico	40		
Figura 20	Influência dos parâmetros de corte na medição de temperatura	42		
	no torneamento do aço AISI 316L com insertos com e sem			
	revestimento			
Figura 21	Medições de temperatura por infravermelho em diferentes	42		
	níveis de desgaste da ferramenta de corte			
Figura 22	Distribuição de calor entre peça, cavaco e ferramenta para	43		
	diferentes velocidades de corte em operação de torneamento			
Figura 23	Distribuição de calor na aresta de corte em função da velocidade de corte	44		
Figura 24	Diferentes componentes no desgaste da ferramenta	45		
Figura 25	Causas de desgaste na usinagem peca	46		
Figura 26	Estágio de desgaste da ferramenta de corte no rosqueamento	47		
rigula 20	de titânio	77		
Eigura 27	Leinahilidada rolativa das acos inovidávois	50		
Figure 29	Condutividade térmice entre es asse inevidévois eustenítice	50		
rigula zo	ferrítico e aco carbono	50		
Figura 29	Eatores determinantes do acabamento superficial de uma peca	52		
Figura 30	Corpo de prova	56		
Figura 31	Sistema utilizado para a aquisição das forças	50		
Figura 32	Dotalhos do sistema utilizado para aquisição das forças	60		
Figure 22	Cistoma do posicionamento utilizado para aquisição	61		
า เรนเล จจ	termográfico	01		
Eigure 24	lemoyranda Miorômetre utilizado para madição de esuces	ດາ		
rigula 34	micrometro utilizado para medição do cavaco	02		

Figura 35	Sistema no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTEPR	63		
Figura 36	Etapas para obtenção de imagens	63		
Figura 37	Esquematização do filete com a marcação equidistantes dos			
0	pontos para verificação da microdureza			
Figura 38	Corpo de prova antes e após a remoção dos picos para	65		
0	medicão			
Figura 39	Formação do cavaco no rosqueamento do aco inoxidável 304L	66		
Figura 40	Cavaco real obtido durante o último passe da sétima peça por	68		
Ũ	meio do método radial e esquematização da seção transversal			
Figura 41	Representação das superfícies interna e externa do cavaco	68		
C	para o método de penetração flanco			
Figura 42	Cavaco obtido após o último passe durante o rosqueamento	69		
C	da oitava peça por meio do método de penetração radial			
Figura 43	Lado superior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de	70		
-	rosqueamento, para o último passe das peças 1 e 7			
Figura 44	Lado inferior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de	71		
-	rosqueamento, para o último passe das peças 1 e 7			
Figura 45	Geometria do cavaco durante a usinagem da sétima peça	73		
Figura 46	Influência da profundidade e avanço na formação do cavaco	74		
Figura 47	Seções do cavaco para os métodos os métodos de penetração	76		
Figura 48	Área do cavaco em função do número de passes	77		
Figura 49	Força de corte em função do método de rosqueamento e	78		
	número do passe para a primeira peça			
Figura 50	Força de avanço em função do método de rosqueamento e	79		
	número do passe para a primeira peça			
Figura 51	Força de corte para a última passada em função do método de	81		
	rosqueamento e número de peças rosqueadas			
Figura 52	Força de avanço para a última passada em função do método	82		
	de rosqueamento e número de peças rosqueadas			
Figura 53	Imagem termográfica obtida temperatura durante o processo	84		
Figura 54	Temperatura obtida em função do número de passadas para a	86		
	primeira peça por meio do método de rosqueamento radial			
Figura 55	Comportamento da temperatura em função do número de	86		
	peças usinadas de acordo com o método aplicado			
Figura 56	Desgaste da ferramenta pelo método radial após seis peças	89		
Figura 57	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após a usinagem	90		
	da sétima peça por meio da penetração radial			
Figura 58	Desgaste da ferramenta após rosquear nove peças de	91		
	trabalho usando a penetração de flanco	~ ~		
Figura 59	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após a usinagem	92		
	da nona peça por meio da penetração de flanco	~ ~		
Figura 60	Desgaste da ferramenta após rosquear doze peças de	93		
	trabalho usando a penetração incremental	~~		
⊢igura 61	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após a usinagem	93		
	da decima terceira por meio da penetração incremental	~-		
⊢igura 62	Numero de peças aprovadas para diferentes métodos de	95		
	penetraçao			

Figura 63	Acabamento superficial para a sétima peça rosqueada por	96
Figura 64	Perfil da raiz obtida por meio do método de penetração radial	96
	para a sétima peça	
Figura 65	Perfil 2D no centro da raiz do filete para sétima peça com penetração radial	97
Figura 66	Perfil da rosca obtida e geometria da ferramenta	98
Figura 67	Filetes gerados por meio do método de rosqueamento de pepetração radial para a oitava peça	99
Figura 68	Filetes gerados por meio do método de rosqueamento de pepetração radial para a nona e décima peça	100
Figura 69	Perfil efetivo da raiz do filete com penetração de flanco	100
Figura 70	Perfil 2D no centro da raiz do filete para nona peca rosqueada	100
	por meio do método de penetração de flanco	101
Figura 71	Filete gerado por meio do método de rosqueamento de penetração incremental para a décima segunda	102
Figura 72	Perfil efetivo no centro da raiz do filete para décima segunda	102
	peça rosqueada por meio do método de penetração incremental	
Figura 73	Perfil 2D no centro da raiz do filete para décima segunda peca	103
garare	rosqueada por meio do método de penetração incremental	
Figura 74	Sobreposição da ferramenta sobre o filete da rosca obtida por	103
	meio do método incremental	
Figura 75	Perfil da rosca alterada pelos desgastes da ferramenta	104
Figura 76	Microdureza em função do método de rosqueamento	105
	empregado	
Figura 77	Penetração por flanco modificado com profundidade constante	106
	(A) e seção constante (B)	
Figura 78	Rosqueamento da sétima peça por meio do flanco modificado	107
	com profundidade constante	
Figura 79	Rosqueamento da décima quarta peça por meio do flanco	107
Figura 80	Cavaço obtido para a primeira rosca	108
Figura 81	Adorôncia do matoriais sobro o cavaco	100
Figura 82	Rosqueamento da terceira peca por meio do flanco modificado	100
r igura oz	com seção de corte constante	109
Figura 83	Rosqueamento da sétima peça por meio do flanco modificado	110
	com seção de corte constante	
Figura 84	Rosqueamento da décima sexta peça por meio do flanco modificado com seção de corte constante	110
Figura 85	Qualidade superficial da rosca obtida por meio do método de	111
-	flanco modificado com seção constante para a décima sexta	
Eigura 86	μεγα Qualidado suporficial (Λ) o forromonto utilizado (Ρ) poro cosão	110
i iyula oo	constante na décima sétima peça	112

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1	Tipos a aplicações de roscas Tipos de porfil de forramentas de corte	22
Quadro 3	Ocorrâncias e recomendações sobre a ferramenta	۲1 17
Quadro 4	Tópicos empregados durante o desenvolvimento do trabalho	55
Quadro 5	Sistema de fixação e características do inserto	57
Quadro 6	Dimensões do inserto	57
Quadro 7	Instrumentação do sistema de aquisição	59
Tabela 1	Composição química	56
Tabela 2	Propriedades químicas	56
Tabela 3	Parâmetros de usinagem	58
Tabela 3.1	Parâmetros de usinagem	58
Tabela 4	Grau de recalque em função do avanço durante o último passe para diversas pecas	75
Tabela 5	Análise EDS após a sétima peça por meio do método de penetração radial	90
Tabela 6	Análise EDS após a nona peça por meio do método de penetração flanço	92
Tabela 7	Análise EDS após a sétima peça por meio do método de penetração radial	94
Tabela 8	Grau de recalque para o avanço modificado durante o último passe para diversas peças considerando a profundidade constante e a seção constante	113

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a _p	Profundidade de Corte [mm]
b	Largura de usinagem
cnc	Comando numérico computadorizado
d	Diâmetro maior
d ₁	Diâmetro menor
d ₂	Diâmetro efetivo
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
f	Avanço [mm/volta]
F	Força de usinagem
fem	Métodos de elementos finitos
Fc	Força da corte
Ff	Força de avanço
Fp	Força passiva
h	Espessura de usinagem
hí	Espessura do cavaco
H _A	Altura do triângulo teórico da ferramenta
H _c	Altura final do filete
M	Rosca Métrica [60°]
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
n	Rotação [rpm]
n _{ap}	Número de passadas
P	Passo da rosca
Rc	Grau de recalque
rε	Raio de ponta da ferramenta
S	Espessura do inserto
V _c	Velocidade de corte [m/min]
W	Rosca Whitworth [55°]
α	Ângulo da hélice da rosca
β	Ângulo da rosca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos da pesquisa	19
1.2	Organização do trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Roscas	21
2.2	Processo de rosqueamento	23
2.3	Ferramentas para rosqueamento em torno	26
2.4	Métodos de penetração aplicados ao rosqueamento	28
2.5	Método de penetração radial	29
2.6	Método de penetração de flanco	30
2.7	Método de penetração de flanco modificado	30
2.8	Método de penetração incremental	31
2.9	Número de passes para rosqueamento	31
2.10	Forca de usinadem	33
2.11	Temperatura durante a usinagem	38
2.12	Desgaste de ferramenta	44
2.13	Aco inoxidável 304 L	48
2.14	Usinabilidade dos acos inoxidáveis	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	Material usinado	56
3.2	Ferramenta empregada	57
3.3	Máguina-ferramenta	58
3.4	Parâmetros de usinagem	58
3.5	Sistema de aguisição de dados	59
3.5.1	Sistema de medição de forca	59
3.5.2	Sistema de medição de temperatura	60
3.5.3	Medição do grau de recalque	61
3.6	Equipamentos para medição de imagens	62
3.7	Análise dos cavacos	62
3.8	Medicão da microdureza	64
3.9	Análise da superfície da rosca	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	Formação do cavaço no rosqueamento	66
4.2	Morfologia do cavaco	67
4.3	Formação do cavaço formado durante o rosqueamento	72
4.4	Grau de recalque	74
4.5	Secão do cavaco	75
4.6	Forca de corte e avanco em função do método de	77
	penetração	
4.7	Temperatura em função do método de penetração	83
4.8	Vida da ferramenta	88
4.9	Influência do método de rosqueamento sobre a qualidade da	95
	rosca	
4.10	Influência do método de penetração sobre a microdureza da peça	104

4.11	Método de flanco modificado	106
4.11.1	Profundidade de corte constante	106
4.11.2	Seção de corte constante	109
4.11.3	Grau de recalque para o método de flanco modificado	112
5	CONCLUSÕES	114
5.1	Sugestões para futuros trabalhos	118
	REFERÊNCIAS	119
	PUBLICAÇÕES	128
	ANEXO	129
	APÊNDICES	131

1 INTRODUÇÃO

Poucos são os produtos compostos de peça única, ou seja, a maioria de máquinas e sistemas são compostos de diversos elementos. Diante do fato ressalta-se que a perfeita união destes é responsável pelo funcionamento do mesmo assim como pela segurança dos usuários. A situação é válida para todas as áreas da engenharia. Importante citar que o processo de montagem compreende o posicionamento e a fixação de peças em um conjunto ou produto final considerando também como melhor montagem a que utiliza menor número de peças, uma vez que o fato diminui a possibilidade de falhas BRALLA (1988). Na mesma linha WECKENMANN (2008) destaca que a integração entre o projeto, a engenharia e a fabricação quando alinhados são capazes de suprir as necessidades do produto. Como sistemas de união entre peças, dois grupos predominam a rosca e a solda. Existem vantagens e limitações para as duas aplicações, ressaltando especial atenção quando da escolha visto que em algumas situações as duas possibilidades podem ser utilizadas. Como grande vantagem do conjunto com rosca cita-se a possibilidade de desmontar e remontar o conjunto sem a necessidade de ajustes, fato que o tem tornado preferido, apesar dos muitos pontos a serem considerados durante a fabricação. A Figura 1 apresenta as principais dimensões de uma rosca.

Figura 1 - Tópicos de uma rosca





Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

A falha em qualquer uma destas medidas pode provocar o refugo da peça e perda do valor até então agregado, especialmente em materiais considerados nobres, pois esta operação normalmente é uma das últimas a ser realizada.

Dois são os principais processos utilizados na fabricação de roscas, sendo por usinagem e por conformação, estando o fato diretamente relacionado ao material, dimensões e tamanho do lote de peças a ser fabricado. Salienta-se que independentemente do processo ou ferramenta utilizada é de fundamental importância à observação dos parâmetros diâmetros maior, menor e efetivo, passo e ângulo de rosca. Tais parâmetros são os responsáveis pela conexão entre porca e parafuso e consequente confiabilidade e vida do sistema. Normalmente para a verificação de roscas são empregados calibradores do tipo passa não passa.

Rosqueamento e roscamento são termos considerados sinônimos, e utilizados por diversos autores brasileiros, dentre eles COPPINI (2015), STEMMER (2008), MACHADO (2011), FERRARESI (2003). Diante de reiteradas referências, optou-se pelo termo rosqueamento neste trabalho. No entanto, salienta-se ser roscamento¹ citado pela ABNT NBR 6571, (2015).

No caso do rosqueamento por usinagem a operação pode ser realizada por torneamento com ferramentas de uma ou múltiplas arestas de corte, cabeçotes automáticos com pentes, tangenciais radiais ou circulares, turbilhonamento, com machos, cossinetes, fresamento e retificação (STEMMER, 2008). Nessas situações, o processo de fabricação consiste na geração dos filetes por meio da utilização de ferramentas de corte, responsáveis por reproduzirem suas geometrias sobre o material trabalhado por meio da remoção de cavaco. Ou seja, neste caso o rosqueamento é um processo mecânico de usinagem destinado à geração de filetes, por meio da abertura de sulcos helicoidais de passo uniforme em superfícies cilíndricas ou

¹ Roscamento – processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação. O roscamento pode ser interno ou externo.

cônicas de revolução, podendo ser externa ou interna, de uma ou múltiplas entradas de sentido para direita ou esquerda.

Considerando as muitas características necessárias a uma rosca, conforme a Figura 1 conclui-se ser o rosqueamento por usinagem de grande complexidade. O fato também é justificado devido à geração, remoção de cavacos e lubrificação na zona de corte, além da necessidade de uma relação imprescindível entre a rotação e o avanço, definida pelo passo da rosca. Quanto à fabricação pelo rosqueamento por torneamento, três possibilidades se apresentam como métodos de penetração da ferramenta, conforme mostrado na Figura 2. As setas representam as direções nas quais a ferramenta penetra na rosca ao longo dos passes para cada método, também são destacadas as principais características de cada método. A penetração radial é a estratégia mais simples e mais empregada. Neste caso a ferramenta penetra radialmente e corta com os dois lados gerando um cavaco em forma de V, dificultando o escoamento do mesmo. No método de flanco a penetração é paralela a um dos flancos da rosca e a ferramenta corta com sua aresta principal gerando um cavaco de forma similar ao do torneamento. O método incremental alterna entre os lados da ferramenta e os flancos da rosca e ambas as arestas de corte são utilizadas SMITH (1989).



Figura 2 - Métodos de penetração para rosqueamento em torno: (A) penetração radial, (B) penetração de flanco, (C) penetração incremental

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010) e MITSUBISHI (2021).

O método radial é indicado principalmente para passos finos, sendo o mais utilizado devido principalmente à facilidade de programação para todas as máquinas. O método de penetração de flanco é relativamente de fácil programação, sendo que algumas máquinas já possuem o ciclo pré programado. Já o método de penetração incremental é o que apresenta maior dificuldade quanto à programação da máquina.

Pesquisas anteriores estudaram o efeito dos parâmetros de usinagem durante o rosqueamento. KAFKAS (2010) investigou experimentalmente a força de corte durante o rosqueamento em aços baixa liga AISI 4140 e AISI 4340. Ele observou que quando utilizado o método de penetração radial, com o aumento do número de passadas, a força de corte correspondente aumentava devido à interferência no fluxo dos cavacos. AKYILDIZ e LIVATYALI (2013) estudaram os efeitos dos parâmetros durante o rosqueamento sobre a resistência à fadiga de corpos de prova rosqueados no aço SAE 4340. Seus resultados mostraram que os limites de resistência à fadiga em corpos rosqueados apresentam uma grande variação dependendo dos parâmetros de usinagem. O fator que mais influenciava sobre a resistência à fadiga da rosca era o desgaste da ferramenta. O segundo fator que mais afetou a fadiga foi a velocidade de corte, sendo que o método de penetração de rosqueamento foi o de menor influência. FETULLAZADE et al. (2010) investigaram o encruamento e a formação de tensões residuais nas raízes de juntas rosqueadas no aço SAE 4340 produzidas por usinagem. A microdureza próxima à superfície dos filetes estava entre 320-430 HV, enquanto que a dureza base do material era de 260 HV. A tensão residual oscilou entre 600 a 1450 MPa. GUNAY (2011) pesquisou os efeitos dos ângulos de penetração em termos de acabamento da superfície e componentes da força de usinagem durante o rosqueamento no aço AISI 1050. A força de corte foi a mais significativa em termos de consumo de energia durante a usinagem. De acordo com seus experimentos e a análise de superfície, verificou-se que o melhor ângulo de penetração foi o de 30°. AKYILDIZ e LIVATYALI (2011) desenvolveram um sistema para prever as forças de corte durante o rosqueamento dividindo o cavaco obtido em três partes, sendo um na raiz da rosca e dois nas faces laterais do filete. A influência dos parâmetros de corte sobre o ângulo de cisalhamento,

temperatura média e força de atrito foram analisadas. Na raiz e nas laterais do filete, as taxas de compressão do cavaco em forma de V tiveram as forças de corte medidas sendo também calculadas e comparadas para a usinagem da rosca métrica de precisão no aço SAE 4340. Eles observaram uma discrepância considerável entre o simulado e as forças medidas especialmente para os passes finais. AKYILDIZ (2013) posteriormente relatou que a principal fonte desta discrepância foi a mudança no ângulo de cisalhamento ao longo dos passes de rosqueamento subsequentes.

Apesar das pesquisas já realizadas, ainda se justificam estudos sobre a usinagem de roscas. Isso é ainda mais relevante, principalmente no caso do rosqueamento em materiais considerados de baixa usinabilidade. Dentre estes destacam-se os aços inoxidáveis, visto o crescente aumento de aplicações nas áreas, petrolíferas, químicas, médicas e alimentícias. AISI 304 é um dos aços inoxidáveis austeníticos mais utilizados. É aplicado em acessórios de aeronaves, componentes aeroespaciais, como buchas, eixos, válvulas, parafusos especiais, vasos criogênicos e componentes para ambientes químicos severos (XAVIOR, 2009). O aço AISI 304L por sua vez contém pequena porcentagem de carbono a fim de prevenir a precipitação de carbonetos durante a soldagem sendo comumente usado onde a corrosão intergranular é uma preocupação. Estes aços são considerados difíceis de usinar devido a propriedades específicas, como alta resistência mecânica e microestrutural. Eles são propensos ao encruamento que induz modificações mecânicas e heterogeneidades na superfície usinada, levando à formação de cavacos instáveis e vibrações (SAOUBI et al., 1999). Portanto, a falha prematura da ferramenta e acabamento superficial deteriorado são esperados ao usinar estes materiais. KULKARNI et al. (2014) relataram resultados experimentais de torneamento a seco em alta velocidade do aço austenítico AISI 304 usando pastilha de metal duro com cobertura de AlTiCrN. Os testes de usinagem foram conduzidos em velocidades de corte na faixa de 140 a 320 m/min, avanço na faixa de 0,08 a 0,26mm/rot mantendo a profundidade de corte constante em 1mm. Eles concluíram que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência sobre a temperatura, enquanto a força de corte é principalmente afetada pelo avanço. HE et al. (2017) usaram ferramentas revestidas de TiN e não revestidas durante o torneamento a seco de aço inoxidável AISI 304. Os efeitos dos parâmetros de corte sobre a temperatura foram investigados através de simulações e experimentos. O processo de geração do cavaco e distribuição da temperatura foram analisados usando o método dos elementos finitos (FEM). Eles observaram que a temperatura geralmente aumenta com o aumento da velocidade de corte e do avanço. Além disso, concluíram que a temperatura da ferramenta revestida de TiN é menor do que a ferramenta sem revestimento. De acordo com as simulações, a temperatura mais alta ocorreu na zona de cisalhamento secundária.

Como pode ser visto na literatura, apesar de sua importância, poucos estudos foram realizados sobre os efeitos do método de penetração durante o rosqueamento e nenhum deles focou os aços inoxidáveis austeníticos. Neste contexto, o presente trabalho pesquisa a influência dos métodos de penetração no rosqueamento a seco do aço AISI 304L sobre a morfologia do cavaco, forças de usinagem, temperatura durante o corte, microdureza do filete, vida da ferramenta e qualidade das roscas obtidas.

1.1 Objetivos da pesquisa

O objetivo principal deste trabalho consiste em analisar a influência dos métodos de penetração (radial, flanco e incremental) no rosqueamento por torneamento externo do aço inoxidável austenítico 304L. Para tal, são levados em conta aspectos como as características do cavaco, esforços e temperatura durante o processo, desgaste das ferramentas e acabamento superficial das roscas usinadas.

Os objetivos específicos deste trabalho atendem aos seguintes tópicos:

 a) Verificar os efeitos dos diferentes métodos de penetração sobre a morfologia do cavaco;

 b) Comparar o grau de recalque resultante para os diferentes métodos de penetração;

 c) Analisar as forças de usinagem resultantes para os diferentes métodos de penetração; d) Avaliar as temperaturas de usinagem resultantes para os diferentes métodos de penetração;

e) Determinar a influência dos métodos de penetração sobre a vida da ferramenta;

 f) Comparar a qualidade da superfície obtida pelos diferentes métodos de penetração;

g) Avaliar a microdureza resultantes para os diferentes métodos de penetração.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo é a introdução sobre o assunto proposto. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre pontos necessários para fundamentação e compreensão do trabalho. O terceiro capítulo apresenta o material, máquina, equipamentos e métodos utilizados para a realização dos experimentos e posterior análise dos resultados. No quarto capítulo, a apresentação e discussão dos resultados considerados relevantes. Estando no quinto capítulo as conclusões sobre os resultados e indicações para continuidade dos estudos. Completando o trabalho, encontram-se as principais referências, publicações do autor e do orientador durante o período da pesquisa, anexo e apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é formar uma base teórica a fim de fundamentar a pesquisa, considerando os principais tópicos que exercem influência no trabalho:

- Rosca: definição, tipos, aplicações;

- Métodos de penetração aplicados ao rosqueamento em torno: radial, de flanco, e incremental;

- Formação do cavaco;

- Forças durante o processo de usinagem;

- Temperaturas durante o processo de usinagem;

- Mecanismos de desgaste de ferramenta;

- Usinabilidade do aço inoxidável.

2.1 Roscas

Dentre os muitos métodos de fixação, a rosca e a solda se destacam. A rosca possui a vantagem da possibilidade de separação das partes unidas e remonte do conjunto sem a necessidade de ajustes. No Quadro 1, observam-se alguns dos principais tipos e aplicações de roscas. Além de utilizadas como meios de fixação, as roscas também podem ser usadas como tampão e fuso transportador (KHOSHDARREGI & ALTINTAS 2015). Quanto à classificação, estas podem ser interna ou externa, à direita ou à esquerda, com uma ou múltiplas entradas. Na parte inferior do mesmo quadro apresentam-se os parâmetros característicos e necessários ao conjunto rosca interna e externa, como o passo, o ângulo e os diâmetros.



Quadro 1 - Tipos e aplicações de roscas

Fonte: NBR 5876 - ISO BS 3643-1 (1981).

De acordo com a NBR 5876, a rosca é uma hélice formada ao se enrolar sobre uma peça cilíndrica ou cônica um conjunto de reentrâncias e saliências, com perfil constante, em forma helicoidal, que se desenvolve externa ou internamente. Os principais tipos de roscas são: o sistema Métrico com 60° e o *Whitworth* com 55°. É crescente a utilização de roscas métricas visto que suas características geométricas possibilitam maior atrito entre as partes, externa e interna proporcionando melhor acoplamento conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3 - Características geométricas para rosca métrica

Fonte: NBR 5876 - ISO BS 3643-1 (1981).

2.2 Processo de rosqueamento

A Figura 4 ilustra as linhas obtidas por consequência do processo de rosqueamento utilizado. Estando em (B) a rosca obtida pelo processo de conformação mecânica sendo também conhecido como laminação. Por este meio a rosca é obtida através da conformação plástica do material fato que ocorre sem a geração de cavaco sendo que neste caso a estrutura do material é compactada (KOEPFER, 2003, e FROMENTIN, POULACHON e MOISAN, 2007). O processo de fabricação por usinagem é apresentado em (C). Através

da usinagem o corte do material é o responsável pela remoção do cavaco. Por este processo de fabricação a geração do filete acontece por meio da utilização de ferramenta de corte podendo ser por torneamento, por fresamento ou por retificação, situação que promove o corte das linhas estruturais do material (NALBANT *et al.*, 2009). De acordo com KHANI *et al.* (2020) os filetes de rosca fabricados por deformação plástica têm maior resistência quando comparados aos fabricados por processo de usinagem. Porém, o rosqueamento por usinagem é o mais utilizado devido à versatilidade. Em ambos os casos, a rosca final é resultante da geometria da ferramenta.



Figura 4 - Fabricação de roscas por conformação (B) e por usinagem (C)

Fonte: Adaptado de KOEPFER (2003).

Rosqueamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de roscas, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação (FERRARESI, 2003; STEMMER, 2008). De acordo com GROOVER (2020) no rosqueamento

em tornos, a geometria aguçada da ferramenta de corte é quem determina a forma dos filetes, porém, é a elevada velocidade de avanço responsável pela formação da rosca propriamente dita. A Figura 5 ilustra dados presentes durante o ciclo de usinagem de rosca por torneamento (SANDVIK, 2010). Neste caso observam-se a_p como a profundidade de corte está associada a altura do filete, sendo que o alcance desta é obtida por meio de diversos passes representados pelo n_{ap} , v_c a velocidade de corte, e por *n* a rotação.



Figura 5 -	Ciclo	de Rosc	jueamento
------------	-------	---------	-----------

Item	Descrição		
Vc	velocidade de corte (m/min)		
n	velocidade do fuso (rpm)		
ap	profundidade total do corte (mm)		
nap	número de passes		

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

MACIEL *et al.* (2015) experimentaram as duas possibilidades para a fabricação de roscas, ou seja, por meio da remoção de cavaco e pela conformação, sendo que para tanto usaram como material a liga de titânio, ti–6Al-4V. Neste caso concluíram que a compactação da estrutura dos grãos aumentaram a dureza e resistência da rosca conformada, enquanto que na rosca usinada mantiveram-se as características do material, considerações semelhantes também foram observadas em estudos realizados por CIUCIO *et al.* (2011).

Segundo SONG & WANG (2018) as máquinas CNC modernas necessitam ter disponíveis a programação de rotinas específicas para garantir

a precisão do processo de usinagem de roscas. Durante o rosqueamento em torno CNC, o sincronismo é obtido por um encoder rotativo acoplado ao eixo-árvore. Deste modo, o encoder rotativo correlaciona o avanço do carro com a rotação do eixo-árvore. Tanto a precisão dimensional como a geométrica estão relacionadas aos erros cinemáticos de tornos e de retificadoras de rosca. Os erros cinemáticos podem ser definidos como sendo o desvio relativo de movimento entre dois eixos da máquina que deveriam apresentar um sincronismo exato. Em máquinas CNC, esta coordenação cinemática entre os eixos é realizada por meios eletrônicos (CASTRO e BARROS, 2011). Tal recurso possibilita a usinagem dos mais variados tipos de roscas sendo para tanto necessário à aplicação de funções específicas como a G33, G37, G76 e G92. Salienta-se que estas funções podem ser utilizadas para a usinagem de qualquer tipo de roscas, à direita, à esquerda, de simples ou múltiplas entradas, de geometria paralela ou cônica.

2.3 Ferramentas para rosqueamento em torno

Todas as dimensões, arestas e superfícies são imprescindíveis e influenciam diretamente sobre o funcionamento da ferramenta, contribuindo com sua vida, geração e fluxo do cavaco agindo de modo direto sobre o acabamento da superfície da peça. Da mesma forma os ângulos referentes à ferramenta e à posição da mesma com relação à peça. No caso de ferramentas de metal duro utilizadas na fabricação de rosca em torno, estas podem ser classificadas como de perfil simples ou completo, com uma ou múltipla entrada, como externa ou interna, estando em todos os casos relacionados ao material a ser trabalhado. No Quadro 2 apresentam-se os três perfis característicos a uma ferramenta de metal duro com sugestões do fabricante baseado principalmente na produtividade e estoque necessário de ferramentas (SANDVIK, 2010).

Perfil	Tipos e recomendações
	Perfil completo - para alta produtividade Roscas para uso geral em todos os segmentos da indústria de engenharia, superfície da rosca sem rebarbas com alta qualidade, sobremetal deve ser deixado sobre o diâmetro, cada tamanho de passo requer um inserto específico
	Perfil em V - Para rosqueamento de materiais endurecidos, as pontas das roscas tendem a ser agudas, os diâmetros interno ou externo da rosca precisa ser acabado antes de usinar a rosca, um inserto pode usinar vários tamanhos de passos
	Multi-aresta – para rosqueamento econômico na produção em massa sendo somente recomendada para método de penetração radial, tendo como vantagem a execução de menor número de passes

Quadro 2 - Tipos de perfil de ferramentas de corte

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

A Figura 6 ilustra detalhes de uma ferramenta de metal duro utilizada no rosqueamento. Em (A) ilustra-se a geometria e dimensões básicas de uma ferramenta direcionada a usinagem de rosca, somadas a estas destacam-se o ângulo do perfil a ser gerado sendo de 60° para a M e 55° para a W. Em (B) apresentam detalhes sobre a geometria da ferramenta onde observam-se geometrias: plana, viva e com quebra-cavaco. A geometria plana é recomendada para a maioria dos materiais, enquanto que a geometria viva é a

indicada para trabalhar materiais de baixa usinabilidade, não ferrosos e superligas. Já a geometria com quebra-cavaco é a indicada para a usinagem de materiais que geram cavacos longos resultantes de materiais com baixo teor de carbono e aços liga. Para todas as ferramentas aplicadas em rosqueamento também é importante destacar a importância do ângulo de folga uma vez que este é o responsável pela redução da área de atrito entre ferramenta e peça contribuindo ainda para o fluxo do cavaco (SANDVIK, 2010).

Figura 6 - Dimensões básicas de um inserto para usinagem de rosca. H_A – Altura do triângulo teórico da ferramenta; H_c – altura final do filete; r_c - raio de ponta da ferramenta; d_1 – diâmetro furo para fixação; s – espessura do inserto



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

2.4 Métodos de penetrações aplicados ao rosqueamento

O torneamento de roscas requer atenção especial, a fim de produzir peças roscadas precisas com baixo desgaste da ferramenta e alta produtividade. O rosqueamento pode ser realizado usando três tipos diferentes de métodos de penetração sendo o radial, o de flanco e o incremental. Tais avanços correspondem à maneira de entrada e desenvolvimento do corte a cada passada da ferramenta (KHOSHDARREGI e ALTINTAS, 2015; NALBANT *et al.,* 2009; e PALMER, 2016). O percurso da ferramenta ao longo da peça rosqueada deve ser igual ao comprimento da rosca adicionando-se um

determinado valor na entrada e na saída. Normalmente este corresponde a dois filetes da rosca.

2.5 Método de penetração radial

Este é o método de penetração mais utilizado principalmente em máquinas mais antigas e consequentemente por programadores e operadores mais conservadores. Também é conhecido como rosqueamento por mergulho ou frontal, nomenclatura relacionada à trajetória da ferramenta sobre a peça. Normalmente o método radial é indicado para passos finos, sendo também a primeira escolha para a usinagem de roscas em materiais endurecidos (SANDVIK, 2010). A Figura 7 ilustra a direção da penetração da ferramenta e a formação do cavaco. Neste caso a inserção da ferramenta ocorre perpendicularmente em relação ao eixo de rotação da peça (SMITH, 2008). Por este método o raio da ponta e as duas arestas de corte atuam simultaneamente gerando cavaco em forma de V. Essa forma de cavaco é difícil de quebrar, dificultando deste modo o seu fluxo, provocando maiores forças durante o processo (GUNAY, 2011). Em materiais de difícil usinagem a rosca obtida é normalmente muito áspera e com partes dos filetes arrancados (STEMMER, 2008).

Figura 7 – Rosqueamento pelo método de penetração radial (A) direção de penetração da ferramenta (B) formação do cavaco



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

2.6 Método de penetração de flanco

A Figura 8 apresenta o método de penetração de flanco. Neste caso, a ferramenta penetra o material paralelamente a um dos flancos da rosca. Ressalta-se que a proposição acima tende a direcionar o cavaco para fora da zona de corte, teoricamente favorecendo a vida da ferramenta (SMITH, 2008).

Figura 8 - Rosqueamento pelo avanço de flanco (A) direção de penetração da ferramenta (B) formação do cavaco



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

2.7 Método de penetração de flanco modificado

A Figura 9 ilustra o método de rosqueamento de flanco modificado. Este método de penetração de rosqueamento é uma variação do método de penetração de flanco. Porém, neste caso a penetração da ferramenta acontece a um ângulo menor que 30°. Deste modo evita-se o contato entre a aresta secundária e o flanco oposto do filete da rosca, podendo ser a folga de aproximadamente 1° (STEMMER, 2008).

Figura 9 – Rosqueamento pelo método de penetração de flanco modificado (A) sentido principal da profundidade de corte (B) princípio de formação do cavaco



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

2.8 Método de penetração incremental

Industrialmente essa técnica é pouco difundida e usual, principalmente por exigir uma programação especial conhecida como parametrizada. Por meio deste método de penetração as arestas da ferramenta alternam sua posição de corte, principalmente no sentido lateral, direita e esquerda até alcançar a altura final do filete de acordo com a programação (Figura 10). Este método de entrada é mais indicado para corte de roscas de grandes perfis. Esta aplicação tende ao desgaste uniforme dos dois lados da ferramenta uma vez que estes se alternam durante a operação, sendo que em função disso recomenda-se um passe de acabamento. Se aplicado tal passe, principalmente no caso do aço inoxidável este não deverá ser inferior a 0,03 mm, uma vez que este material tende a aderir sobre a ferramenta influenciando negativamente sobre o acabamento superficial da rosca (SANDVIK, 2010).

Figura 10 - Rosqueamento através da penetração incremental (A) sentido da profundidade de corte (B) princípio de formação intercalada do cavaco gerado durante o processo



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

2.9 Número de passes para rosqueamento

Independentemente do método de penetração utilizado, radial de flanco ou incremental, quando utilizado ferramenta simples são necessários vários passes para o alcance da altura final do filete da rosca. O fato deve-se principalmente à geometria e consequente fragilidade da ferramenta. Normalmente os catálogos apresentam indicações quanto ao número de passes (SECO, 2009; SANDVIK, 2010; KYOCERA, 2015; KENNAMETAL, 2014; SUMITOMO, 2015). Diversos são os fatores que contribuem para a determinação do número de passes para a execução de uma rosca. Dentre eles estão os materiais da peça e da ferramenta e o passo da rosca. O número de passes está diretamente relacionado à profundidade de corte a cada passada, de modo que o emprego de menor número de passes poderá levar a desgastes prematuros ou mesmo avarias na ferramenta. Diante disso é de fundamental importância a necessidade do controle de tal parâmetro independente da operação realizada. Quando da determinação do número de passadas também é interessante citar que são duas possibilidades a empregar quanto à profundidade de corte (Figura 11). São elas, a profundidade de corte constante onde ocorrem variações da área da seção do cavaco e a profundidade de corte variável, sendo neste caso a área da seção do cavaco mantida constante. Quando a profundidade de corte variável é empregada maior profundidade de corte é necessária nos primeiros passes, permitindo na sequência maior equilíbrio na distribuição das forças. Por outro lado, a profundidade de corte constante resulta em maiores esforços sobre a ferramenta nos últimos passes, podendo diminuir sua vida. No caso do rosqueamento em aços inoxidáveis, recomenda-se que a profundidade por passada não seja inferior a 0,08 mm, pois abaixo deste valor aumenta-se a possibilidade de adesão do material da peça sobre a ferramenta, prejudicando o acabamento superficial (SECO, 2009).

Figura 11 - Estratégias de profundidade de corte: (A) área de corte fixa (B) profundidade de corte fixa



Fonte: Adaptado de MITSUBISHI CARBIDE (2021).

Existe a possibilidade de se empregar ferramentas com múltiplas arestas de corte que são conhecidas como pente de roscar. A grande vantagem deste processo é que a rosca pode ser executada em um único passe, uma vez que é composta de vários perfis de rosca. Neste caso, um chanfro distribui a abertura da rosca por vários filetes (STEMMER, 2008). A Figura 12 ilustra este caso, podendo ser empregados os diferentes métodos de penetração. Também são mostrados os cavacos obtidos quando utilizado o método de penetração radial para o primeiro passe, para o passe intermediário e para a última passada (KHOSHDARREGI e ALTINTAS, 2015).

Figura 12 - Rosqueamento por meio dos métodos radial de flanco e incremental utilizando ferramenta multi-aresta



Fonte: Adaptado de KHOSHDARREGI e ALTINTAS (2015).

2.10 Força de usinagem

Durante o processo de usinagem diversos elementos contribuem para facilitar ou não a remoção do cavaco. Dentre estes cabe citar: material da peça, área da seção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição, estado de afiação da ferramenta e parâmetros de corte. De forma direta, tais elementos contribuem para o reconhecimento das forças atuantes sobre a ferramenta e peça. De acordo com MACHADO *et al.* (2011) são duas maneiras de se executar a medição das forças em processos de usinagem: por meio de dinamômetros extensométricos e dinamômetros piezelétricos.

No caso do torneamento, três forças se destacam: a força de corte, a força de avanço e a força passiva. De acordo com FERRARESI (2003), SHAW (2005) e DINIZ *et al.* (2014) a força de corte se sobressai nos estudos por ser a de maior influência sobre a vida da ferramenta. Porém salientam que também as forças secundárias participam dos fenômenos que provocam os desgastes e fraturas no inserto durante o processo.

Também é interessante citar a influência da força de corte sobre a rugosidade da superfície da peça, sua precisão dimensional assim como sobre a geração de calor (ASAL *et al.*, 2018). No caso do rosqueamento em tornos, as forças de corte são superiores às necessárias ao torneamento convencional. O avanço no torneamento de roscas pode ser dez vezes maior quando comparado à operação de desbaste longitudinal. Deste modo, as forças e temperaturas também são superiores e oscilam de acordo com os parâmetros de corte utilizados e o material em processo (PALMER, 2016).

O reconhecimento da força nos processos de usinagem possibilita aperfeiçoar projetos de máquinas, processos e monitorar a vida da ferramenta. O estudo da força requerida na usinagem também possibilita avaliar novos materiais para ferramentas, geometrias de quebra-cavaco, revestimentos e parâmetros de corte (RODRIGUES e COELHO, 2007).

A força de usinagem é a resultante que atua sobre a cunha cortante durante a operação. Não se trabalha diretamente com a força de usinagem, devido à dificuldade em conhecer sua direção e sentido, e sim com suas componentes segundo direções identificadas. A Figura 13 apresenta as decomposições da força de usinagem. As forças normalmente medidas são:

- Força de corte: projeção da força de usinagem sobre a direção de corte;

- Força de avanço: projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;

- Força passiva: força que age perpendicular ao plano de trabalho, não gerando potência de usinagem.

 Força ativa: as forças ativas contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho, (no qual os movimentos de usinagem são realizados);



Figura 13 - Força de usinagem e suas decomposições

Fonte: DINIZ et al. (2001).

Conforme até então tratado, diversos são os fenômenos que ocorrem durante o processo de usinagem gerando forças diversas e em diversas direções, sendo que para uma análise criteriosa, observações devem ser feitas antes, durante e após a remoção do cavaco. Dentre as muitas verificações considera-se a determinação das componentes da força de usinagem uma das mais importantes, porque além da possibilidade de acompanhamento em tempo real, os dados também podem ser armazenados para posterior análise (SHAW, 2005). Quanto ao estudo das forças de usinagem e formação do cavaco durante o rosqueamento, KHOSHDARREGI e ALTINTAS (2015B) realizaram experimentos e o modelamento da usinagem de rosca utilizando para tanto ferramenta com multi-arestas (Figura 14). De acordo com estes pesquisadores, o modelo resultante pode ser utilizado para prever as distribuições do volume de cavaco contribuindo para o desenvolvimento de geometrias de insertos para o rosqueamento. Eles concluíram que o modelo pode ser utilizado para os diferentes métodos de penetrações com a possibilidade do dimensionamento da força total para o processo. Também citam que o modelo não linear de força de Kienzle é o recomendado para explicar o efeito do raio de ponta da ferramenta para pequenos valores de espessura de cavacos. Salientam ainda que as forças totais de corte são obtidas através da resolução das forças elementares no sistema de coordenadas do inserto durante a geração dos filetes.



Figura 14 - Identificação dos pontos de maiores esforços

Fonte: Adaptado de KHOSHDARREGI e ALTINTAS (2015).

TEIXEIRA *et al.* (2017) experimentaram os três métodos de penetração para o rosqueamento em tornos. Tais pesquisadores usinaram a liga de Titânio Ti-6AI-4V usinando a rosca M10 x 1,5 mm x 10 mm. Em relação a força de corte os principais resultados obtidos são mostrados na Figura 15 onde são apresentados os efeitos das interações dos parâmetros velocidade de corte com as variáveis respostas de força. Por meio desta figura observa-se que a menor força de corte foi obtida durante o método incremental associado a velocidade de corte de 40 m/min.


Figura 15 - Interações entre a variável velocidade de corte e a variável resposta força de

Fonte: TEIXEIRA et al. (2017).

A Figura 16 ilustra os resultados obtidos por PINTO (2015) na usinagem do aço 1045 por meio da utilização dos métodos de penetração radial, de flanco modificado e o incremental. Como principais conclusões o estudo indicou que o melhor método de penetração utilizado para as condições propostas foi o incremental e que as componentes ortogonais da força de usinagem (Fu) se mostraram diferentes e influenciadas pelo passe e método de penetração da ferramenta.



Figura 16 - Força de corte para penetrações com ap variável [N]

Fonte: PINTO (2015).

2.11 Temperatura durante a usinagem

Temperaturas consideráveis são geradas durante o processo de usinagem, sendo um dos maiores motivos para a redução da vida útil da ferramenta. Diante disso o conhecimento das temperaturas contribui para o modelamento e compreensão dos fenômenos envolvidos durante a usinagem. Muitas pesquisas sobre temperaturas nos processos de usinagem foram desenvolvidas na última década, pois é bem estabelecido que as temperaturas do cavaco gerado na operação e da interface inserto/peça têm alta influência no desempenho da usinagem (BURUAGA *et al.,* 2018). O fato torna-se mais importante diante do crescente número de materiais considerados de baixa usinabilidade, como é o caso do aço inoxidável 304 em operação de rosqueamento tendo em vista o valor agregado em operações anteriores.

Durante o processo de usinagem, uma grande quantidade de calor é gerada, a energia consumida para a deformação plástica e dissipada pelo atrito é amplamente convertida em calor próximo à aresta de corte da ferramenta (região 1-2 na Figura 17). Como resultado, essas temperaturas têm influência na taxa de desgaste da ferramenta e intensidade de atrito nas interfaces ferramenta/peça e ferramenta/cavaco (GRZESIK, 2017).



Figura 17 - Fontes de calor em um processo de torneamento

Fonte: Adaptado de GRZESIK (2017).

GRZESIK (2017) classifica em quatro as fontes básicas de calor em um processo de torneamento. A fonte de calor Q1 acontece devido à deformação plástica intensa no plano de cisalhamento primário (área 1-2-3-4 da Figura 17). A fonte de calor Q2 se localiza na zona de cisalhamento secundário e acontece por atrito (área 1-2-5-6 da Figura 17). Na fonte de calor Q3 o contato acontece no flanco da ferramenta com a peça usinada (área 1-2-7-8). A fonte Q4 acontece em uma pequena região da peça que acaba provocando tensões residuais.

A Figura 18 representa esquematicamente os fluxos de calor atuantes durante o torneamento e também como ferramenta, peça e cavaco tem as suas temperaturas afetadas pelas fontes geradoras de calor. Esse fluxo varia ainda com as propriedades térmicas da ferramenta e da peça usinada, dos parâmetros de corte, principalmente da velocidade de corte e dos métodos de resfriamentos adotados (GRZESIK, 2017). Medições realizadas revelaram que o pico de temperatura medido em um processo de torneamento aumenta com a velocidade de corte (HEIGEL *et. al.* 2016).





Fonte: Adaptado de GRZESIK (2017).

Grandes melhorias nos processos de usinagem podem ser obtidas através do monitoramento de temperaturas no cavaco e na ferramenta, que são influenciadas pelas zonas de cisalhamento primária e secundária, bem como o atrito no contato do cavaco com a ferramenta. Infelizmente, medir essas temperaturas é desafiador (HEIGEL *et al.* 2016). Novas tecnologias de aquisição e processamento de sinais e informações resultaram em vários sensores para o desenvolvimento do monitoramento eficaz das temperaturas envolvidas durante o processo de usinagem. Controlar a qualidade do produto diretamente no processo pode ser vantajoso, pois permite minimizar ou eliminar peças defeituosas (PRASAD, PRABHA e KUMAR, 2017). Os métodos de medição da temperatura em operações de usinagem mais utilizados são os termopares embutidos, o sistema de termopar ferramenta–peça e a radiação térmica (ABUKHSHIM, MATIVENGA e SHEIKH, 2006).

A termografia é a técnica de monitoramento remoto que possibilita a verificação de temperaturas e a formação de imagens térmicas de um componente, equipamento ou processo a partir da radiação infravermelha emitida pelos corpos envolvidos (Figura 19). Deste modo, por meio da termografia então torna-se possível identificar regiões ou pontos onde a temperatura encontra-se alterada com relação a um padrão preestabelecido.





Por este sistema a temperatura é medida durante a usinagem, porém sem contato (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). No entanto, erros podem ser atribuídos a dificuldades de foco, variação de emissividade e efeitos de fluxo de

Fonte: O autor.

cavaco sobre a zona de medição (ASPINWALL *et al.*, 2013). O principal desafio na medição de temperatura por infravermelho é a obstrução gerada pelo cavaco. A temperatura medida é geralmente da face superior do cavaco e não a temperatura na interface cavaco/ferramenta, normalmente essa interface está obstruída pelo próprio cavaco. Portanto, as medições de temperatura usando câmeras infravermelhas tendem a apresentar valores de temperatura menores para a ferramenta, cavaco e peça usinada do que valores obtidos por métodos pontuais, como o termopar ferramenta / peça (DA SILVA *et al.*, 2013; ZGÓRNIAK e GRDULSKA, 2012). De acordo com SOLER *et al.* (2018) as temperaturas durante o corte podem ser pelo menos 200 °C maiores do que as medidas com câmeras infravermelhas, pois o resfriamento ocorre quando o cavaco se afasta e a face de inclinação fica visível.

PRASAD *et. al.* (2017) estudaram a influência dos parâmetros de corte rotação, avanço e profundidade de corte para ferramentas com e sem revestimento no torneamento do aço AISI 316L, usando a técnica da termografia infravermelho estando na Figura 20 o resultado dos experimentos. Eles indicaram a viabilidade do uso de gradiente de temperatura para monitoramento quando empregado alta velocidade de corte em operações de torneamento.

Velocidade de corte e avanço provaram ser os fatores mais influentes nas medições de temperatura, enquanto que a profundidade de corte é menos influente. Geralmente é observado que temperaturas mais baixas são geradas com a utilização de insertos revestidos, essas temperaturas também são maiores conforme o desgaste e deformação da aresta de corte aumentam (PRASAD *et al.*, 2017). A Figura 21 mostra temperaturas medidas e a formação de cavacos para diferentes condições de desgaste da ferramenta.



Figura 20 - Influência dos parâmetros de corte na medição de temperatura no torneamento do aço AISI 316L com insertos com e sem revestimento

Fonte: Adaptado de PRASAD et al. (2017).

Figura 21 - Medições de temperatura por infravermelho em diferentes níveis de desgaste da ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de PRASAD et al. (2017).

GRZESIK (2017) observou que a velocidade de corte não influencia apenas na temperatura, mas também no modo de distribuição de calor entre ferramenta, peça e cavaco, maiores velocidades de corte tendem a distribuir mais calor para o cavaco, como pode ser visto na Figura 22. Essa diminuição da quantidade de calor na ferramenta e peça normalmente é favorável para o processo.



Figura 22 - Distribuição de calor entre peça, cavaco e ferramenta para diferentes velocidades de corte em operação de torneamento

Fonte: Adaptado de GRZESIK (2017).

ARTOZOUL *et al.* (2014) observaram que a velocidade de corte afeta também a maneira como o calor é distribuído na aresta de corte da ferramenta, durante experimentos realizados no torneamento do aço de médio carbono AISI 1055, o calor foi melhor distribuído na ferramenta para menores velocidades de corte, as maiores temperaturas, bem como maior concentração de calor, aconteceram em maiores velocidades, um mapa de concentração de calor é apresentado na Figura 23.



Figura 23 - Distribuição de calor na cunha cortante em função da velocidade de corte. $f = 0.3 \text{ mm/rot}; a_p = 0.2 \text{ mm};$ (a) $v_c = 50 \text{m/min},$ (b) = $v_c 100 \text{m/min},$ (c) $v_c = 250 \text{m/min}$

Fonte: Adaptado de ARTOZOUL et. al. (2014).

As imagens térmicas são eficazes para mostrar como as regiões próximas à zona de corte sofrem acréscimo da temperatura. O aquecimento excessivo dessas zonas pode ser um bom indicador da condição de desgaste da ferramenta (DA SILVA *et al.,* 2013).

2.12 Desgaste de ferramenta

Independente do processo de usinagem, diversos fenômenos ocorrem, conduzindo a ferramenta ao fim de vida. Uma vez em contato, ferramenta e peça iniciam-se os mecanismos de desgaste, sendo que estes normalmente estão vinculados ao grau de usinabilidade do material e parâmetros empregados (EZUGWU e OKEKE, 2001). Conhecidos os conceitos de usinagem e formação de cavaco, e compreendidas as possibilidades do baixo índice de usinabilidade, de acordo com STEMMER (2008), algumas situações se destacam: desgaste rápido ou superaquecimento da ferramenta, a aderência de material da peça sobre as arestas de corte e o lascamento. Como resultados dos fatores destacam-se o pior acabamento da superfície, crescimento das forças necessárias e potência de corte.

De um modo geral, os mecanismos de desgastes são divididos em duas grandes categorias: os processos físicos e os processos químicos. Quanto aos

mecanismos envolvidos, quatro são os principais: a adesão, a abrasão, a fadiga e as reações triboquímicas. O fato favorece ao desgaste da ferramenta, que deve ser considerado como resultado de um conjunto de fenômenos (ASTAKHOV, 2007). De acordo com BUNSHAH (2001), outro modo de falha considerável são as solicitações mecânicas como a fadiga, a fratura, o fluxo plástico e sobrecarga progressiva. A Figura 24 apresenta a contribuição da componente no desgaste total em função da temperatura ou velocidade de corte.



Figura 24 - Diferentes componentes no desgaste da ferramenta

Fonte: Adaptado de BUNSHAH (2001).

Também KÖNIG e KLOCKE (2002), indicaram as propriedades do material como principal causa de desgaste da ferramenta. Da mesma forma os danos aos gumes são devido às solicitações mecânicas e fadiga térmica excessiva, abrasão, adesão difusão e oxidação conforme apresentado na Figura 25. O desgaste da ferramenta está comumente ligado a temperaturas de ativação acima das quais os mecanismos causam redução exponencial da vida útil da ferramenta. Até mesmo a integridade da superfície das peças usinadas são afetadas pelas temperaturas atingidas durante a operação (JAWAHIR *et al.* 2011).



Figura 25 - Causas de desgaste na usinagem peça

Fonte: KÖNIG e KLOCKE (2002).

O desgaste progressivo da ferramenta é uma importante consideração, principalmente pela possibilidade da previsão do número de arestas necessárias à fabricação de determinado lote (KÖNIG *et al.,* 1997). Os característicos em operações de usinagem de rosca são: lascamento da aresta de corte, deformação plástica, quebra da pastilha e o rápido desgaste do flanco.

Uma vez iniciado o rosqueamento, verificam-se fenômenos diversos, que devido às características geométricas da ferramenta são mais rigorosos, sendo estes responsáveis pela maior ou menor vida da ferramenta e mesmo da qualidade do produto final (AKYILDIZ, 2013). Sabido do fato, e somado a importância da operação, pelo valor agregado, cuidados especiais devem ser tomados com o objetivo de evitar o retrabalho ou refugo. Visando tal minimização, no Quadro 3, apresentam-se as ocorrências mais comuns bem como algumas recomendações ao se tratar do caso.

Ocorrências	Rever a tecnologia
Quebra da pastilha	Adequar a classe da ferramenta ao material a ser rosqueado mantendo-a na altura do centro da peça de acordo com o diâmetro da mesma.
Lascamento e Aresta postiça	Lascamento (A) é conseqência de solicitações mecânica, Aresta postiça (B) afinidade termoquímica entre os materiais.
Deformação Plástica	Analisar e implementar se necessário sistema de Iubrirefrigeração e/ou aumento do número de passes; a evolução dos desgastes vai de (A) para (B).
Desgaste de flanco anormal	Implementar método de avanço adequado (radial, flanco, ou incremental) pois os ângulos da ferramenta e o programado para o corte não estão concordantes.
Vibração	Analisar a estabilidade dos sistemas de fixação, da peça e da ferramenta, proporcionando maior rigidez ao sistema.

Quadro 3 - Ocorrências e recomendações sobre a ferramenta

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

A Figura 26 ilustra o estágio de vida de uma ferramenta utilizada no rosqueamento de titânio, sendo neste caso utilizado o método de penetração radial. Os parâmetros de usinagem empregados foram: vc = 20m/min, a_p = 100µm. O comprimento era de 98,9mm. A peça usinada trata-se de elemento destinado a implante dentário (MANERA *et al.*, 2014).

Figura 26 – Estágio de desgaste da ferramenta de corte no rosqueamento de titânio



Fonte: Adaptado de MANERA et al. (2014)

2.13 Aço inoxidável 304 L

Os aços inoxidáveis austeníticos representam mais de 70% da produção de aço inoxidável mundial e tem como principal característica a resistência à fadiga, mesmo quando empregado a alta temperatura e a condições adversas, como salinidade e esforços repetitivos. Os fatos devem-se à composição química, o que possibilita formar mais de 150 tipos diferentes, sendo mais conhecidos como: austeníticos, ferríticos, martensíticos, super-austeníticos e duplex (PAYLING, 2016). Dentre as principais aplicações do aço inoxidável austenítico destacam-se acessórios de aeronaves. componentes aeroespaciais, como buchas, eixos, válvulas, parafusos especiais, vasos criogênicos e componentes para ambientes químicos severos (XAVIER et al., 2009). O baixo teor de carbono do AISI 304L evita a precipitação do carboneto durante a soldagem, o que favorece a utilização quando a corrosão intergranular é uma preocupação (PRASAD et al., 2017). O teor máximo de carbono para o aço inoxidável 304 L é 0,03%, fato que justifica as aplicações acima ou seja peças de grande responsabilidade. Os aços inoxidáveis austeníticos contêm em sua composição o cromo, manganês e níquel, ou somente cromo e níquel, sendo identificados pelas séries 200 ou 300. Nesta última estão os aços 304, conhecidos também por aços inoxidáveis 18-8, por terem 18% de cromo e 8% de níquel. Estes aços podem ser divididos em dois grupos, os aços ao cromo-níquel e os aços ao cromo-manganês-níquel. O níquel favorece para melhorar a resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas, sendo o responsável pela passivação, formação de uma camada de óxido que protege o material quando exposto a condições adversas. Porém, o cromo e o níquel são materiais que contribuem para a vida do produto, por vezes dificultam a algumas operações de fabricação e tratamento térmico. Muitas tentativas foram feitas para melhorar a usinabilidade dos aços pela adição de elementos como enxofre, chumbo, selênio e telúrio. As propriedades físico-químicas desses aços explicam a tendência de formar nas ferramentas de corte uma aresta postiça quando sofrem processos de usinagem, a baixa velocidade de corte, devido ao encruamento do material de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta (AKASAWA et al., 2003).

2.14 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

Dentre os materiais considerados de baixa usinabilidade, destacam-se os aços inoxidáveis, principalmente o austenítico. É interessante salientar que a usinabilidade está diretamente vinculada a um sistema complexo de propriedades envolvendo materiais da peça, da ferramenta e parâmetros empregados. Nesta linha, diversos pesquisadores concordam que a usinabilidade não é apenas uma propriedade, mas, um "modo" de comportamento do material guando submetido à usinagem (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2011). Em resumo, a usinabilidade refere-se à facilidade ou dificuldade de usinar um material, ou seja, guão fácil ou difícil é, em um processo de usinagem remover cavaco. A usinabilidade de um material pode ser avaliada em função dos critérios de força, vida da ferramenta, formação de cavacos e acabamento da superfície, entre outros (KLOCKE, 2011). Os desgastes ou vida da ferramenta de corte normalmente estão relacionados ao grau de usinabilidade do material. Nesta linha, os mecanismos de desgaste dependem de fatores como o material da peça, a operação, as propriedades do material da ferramenta, as condições de corte, e o sistema de refrigeração e lubrificação (DINIZ et al., 2016). A Figura 27 apresenta a usinabilidade relativa para os principais aços inoxidáveis. Por meio da mesma figura se observa que a usinabilidade do aço inoxidável austenítico está por volta de 60 %. Diante dos diferentes índices de usinabilidade conclui-se a necessidade de ensaios específicos e consequentes parâmetros de usinagem a cada caso. Desta forma, normalmente os fornecedores de ferramentas, apresentam valores iniciais dos parâmetros velocidades de corte e profundidades por passadas para diferentes materiais usinados com ferramentas de metal duro. Assim sendo, cabe ao programador reconhecer os parâmetros adequados, fato que quase sempre é reconhecido empiricamente. Outra situação que confirma a baixa usinabilidade do aço inoxidável austenítico 304 refere-se a sua resistência à tração quando comparado a outros materiais (HANDBOOK, 1989).



Figura 27 - Usinabilidade relativa dos aços inoxidáveis

Fonte: Adaptado de SSINA (1995).

A dificuldade na usinagem do aço inoxidável é atribuída aos seguintes fatos:

- Baixa condutividade térmica, ou seja, pequena propagação do calor para cavaco e peça com maior concentração nas arestas de corte da ferramenta (KORKUT *et al.*, 2004; MAHDAVINEJAD e SAEEDY, 2011). Bom demonstrativo do caso é apresentado na Figura 28, comparando os aços inoxidáveis austeníticos, ferrítico e o aço carbono (HANDBOOK, 1989).



Figura 28 - Condutividade térmica entre os aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e aço carbono

Fonte: HANDBOOK (1989).

- Alta taxa de encruamento, fato que induz a modificação mecânica e o consequente comportamento heterogêneo nas superfícies geradas, provocando instabilidades quanto à formação do cavaco (SAOUBI *et al.,* 1999; AKASAWA, 2003). O endurecimento por encruamento dos aços inoxidáveis austeníticos são acompanhados pelas mudanças parciais na estrutura, com a formação de uma fase de martensítica e ferromagnética.

- Alta resistência à fratura, o que dificulta a quebra de cavaco e quase sempre favorecendo a baixa qualidade superficial (JIANG *et al.*, 1996). A década de 70 foi o período de maior intensidade nos estudos de fluxo e curvatura do cavaco além dos dispositivos de quebra-cavacos mecânico, juntamente com desgaste de ferramenta, forças de corte e qualidade da peça (NORONHA *et al.*, 2015) fato que até os dias atuais tem despertado interesse principalmente na usinagem de materiais considerados de difícil usinagem.

- Altos valores de resistência mecânica e ductibilidade (CHANG e TSAI 2003).

- Alto coeficiente de dilatação térmica, o que dificulta a manutenção de tolerâncias apertadas e alto coeficiente de atrito, que tem como consequência o aumento do esforço e do calor gerado (DINIZ *et al.*, 2014).

Sob o ponto de vista da usinabilidade a característica de maior importância é o encruamento (DOLINSEK, 2003). Os principais problemas encontrados na usinagem do aço inoxidável devido à dificuldade do corte são: desgaste da ferramenta, pior acabamento superficial, cavacos longos e baixas velocidades de corte (MACHADO *et al.,* 2018). Além destes, outros mecanismos acontecem com destaques à abrasão e à difusão (DINIZ *et al.,* 2016). Durante o fluxo do cavaco sobre a ferramenta, altas temperaturas são geradas, acelerando o processo de desgaste. Considerando que o aumento da temperatura de corte na usinagem conduz à abrasão, todos os pontos possíveis para minimizar o caso devem ser considerados como a utilização de refrigeração, escolha adequada do revestimento, e geometria do quebra-cavaco. TRENT (2000) cita que o calor gerado durante o processo prejudica em muito a usinagem como um todo. Ressalta-se que a geração de calor resultará em maior diferencial quando a aresta de corte já estiver desgastada ou se o ângulo de folga for pequeno. Diante do fato considera ser a temperatura um dos principais determinantes dos desgastes sobre a ferramenta e por consequência do acabamento superficial da peça. Nesta linha cita-se que a rugosidade influencia diretamente sobre o princípio da corrosão por pite, considerada uma das principais fontes de falhas em peças de aço inoxidável (ROBERGE, 2000). A Figura 29 apresenta as demais influências sendo estas divididas em quatro grupos: os parâmetros de usinagem, as propriedades das ferramentas, as propriedades dos materiais e os fenômenos de corte (ÇOLAC *et al.,* 2005). Reconhecendo a influência destes muitos fatores torna-se evidente a relação direta entre o acabamento superficial e o custo de fabricação de modo que a rugosidade superficial não deve ser menor que o necessário de acordo com a aplicação da peça.



Fonte: Adaptado de ÇOLAC et al. (2005).

SUNDAY *et al.* (2016) investigaram a influência dos parâmetros do processo de usinagem, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte no acabamento das peças durante o torneamento duro de AISI 304L austenítico. Eles relataram que o parâmetro de maior influência foi o avanço, seguido da profundidade de corte e da velocidade de corte. Na busca de

melhoria na rugosidade, SHARMA e SHRIVASTVA (2018), por meio da Anova, conseguiram bons resultados em termos de rugosidade no, torneamento do aço AISI 304L, quando utilizaram baixos valores de avanço, profundidade de corte e associado também à baixa velocidade de corte. Os experimentos foram realizados utilizando-se fluídos de corte semi-sintético e óleo de canola. Os melhores resultados foram obtidos quando utilizado o óleo de canola. LAWAL *et al.* (2017), utilizando-se de ferramentas de metal duro revestidas e sem revestimento na usinagem do aço inoxidável AISI 304 L, verificaram pior acabamento da superfície com o aumento do avanço. Também observaram que os cavacos formados mesmo que em diferentes condições de corte eram semelhantes, sendo de forma helicoidal e com bordas serrilhadas.

KULKARNI *et al.* (2014) realizaram pesquisas no torneamento a seco em alta velocidade do aço inoxidável austenítico AISI 304 usando pastilha de metal duro com cobertura de AITiCrN. As velocidades de corte empregadas foram entre 140 e 320 m/min, e avanços entre 0,08 a 0,26 mm/rot mantendo a profundidade de corte constante em 1 mm. Eles concluíram que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a temperatura de corte, enquanto a força de corte é principalmente afetada pelo avanço. MAURORRO *et al.* (2017) também usinaram a seco o aço inoxidável. Neste caso investigaram o aço inoxidável austenítico AISI 316L estabelecendo para tanto uma abordagem de Projeto de Experimentos (DOE). Utilizando o modelo estatístico identificaram combinações ótimas de parâmetros de corte com o objetivo de minimizar efeitos indesejáveis no processo. Através dos resultados, observaram os efeitos da combinação dos parâmetros sobre a qualidade da superfície do material após a usinagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo traz descrição do material, ferramenta, equipamentos, máquinas e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como a sistemática utilizada para sua realização. A metodologia deste trabalho foi baseada no desenvolvimento experimental de ensaios sistemáticos partindo de indicações de catálogo e situações encontradas no meio industrial.

Os ensaios foram realizados em uma empresa metalúrgica localizada na Cidade Industrial de Curitiba, conhecido como CIC. Para os experimentos utilizou-se a mesma máquina-ferramenta, classe de ferramenta, material do mesmo lote de fabricação e parâmetros de usinagem. Foram empregados diferentes métodos de penetração: radial, flanco e incremental. Durante o processo de rosqueamento foram medidas as forças de corte e avanço e também a temperatura. Além disso, foi monitorado o desgaste da ferramenta. Em todas as etapas eram gravados os dados, coletados os cavacos, e separados os corpos de prova, e ferramentas para posterior análise em laboratórios específicos da UTFPR.

Inicialmente foram comparados os métodos de penetração radial, flanco e incremental com profundidade de corte constante considerando seus efeitos sobre as forças, temperatura, formação do cavaco, vida da ferramenta e qualidade da rosca. Posteriormente, foi avaliado o método de penetração modificado e também o emprego de seção de usinagem constante em termos de vida da ferramenta.

O Quadro 4 resume as etapas envolvidas na realização deste trabalho. Na sequência estes pontos se encontram detalhados.

Etapas	llustrações
Métodos experimentados (radial, flanco, e incremental)	
Aquisição das forças	
Aquisição da temperatura	
Análise da morfologia do cavaco	
Análise do desgaste das ferramentas	Mark Mark Alls Mark Library Bages Alls Mark Library Bages Alls Bages Alls
Análise da qualidade das roscas	MSTAD PERFIL COMPLETO MITAD PERFIL COMPLETO 5 60 50 40 40 40 50 10 0

Quadro 4 - Tópicos empregados durante o desenvolvimento do trabalho

Fonte: O autor (2021).

3.1 Material usinado

O material usinado foi o aço Inoxidável Austenítico 304L. Sua composição química e propriedades mecânicas encontram-se nas tabelas 1 e 2 adaptadas do anexo e ensaios de laboratório realizados pelo autor. A caracterização do material está de acordo com a norma ASTM A276/16.

Tabela '	1 -	Composição	química
----------	-----	------------	---------

С	Cr	Mn	Мо	N	Ni	Р	S	Si	Fe
0.024	18.25	1.570	0.500	0.085	8.040	0.037	0.028	0.280	bal.

Fonte: GAVLAK & CIA LTDA, 2019.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas

Característica	Valores
Dureza	218 HB
Limite de escoamento	629 MPa
Limite de resistência	737 MPa
Alongamento	42 %

Fonte: O autor.

A Figura 30 ilustra o desenho do corpo de prova empregado nos experimentos.

Figura 30 – Corpo de prova





3.2 Ferramenta empregada

O Quadro 5 ilustra o sistema de fixação do inserto de metal duro intercambiável utilizado durante os experimentos. A codificação do suporte era R166.4FG-2020 e a codificação do inserto foi R166.OG-16UNO1-200 (ISO S15-S25). Sendo o inserto de metal duro classe M com revestimento PVD (TiC, AI_2O_3 TiN) classe GC 1020.



Quadro 5 - Sistema de fixação e características do inserto

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

O Quadro 6 ilustra ilustra o inserto e suas dimensões.

Quadro 6 – Dimensões do inserto



Sendo: H_A = Altura do triângulo teórico da ferramenta; H_c = Altura final do filete; r_{ϵ} = raio de ponta da ferramenta; d_1 = diâmetro do furo para fixação; S = espessura do inserto.

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

3.3 Máquina-ferramenta

Os experimentos foram realizados em um torno CNC Nardini Diplomat Logic 195 II, com torre traseira 16 ferramentas com comando CNC MCS, potência 10 CV (7,5 kW) e rotação máxima 3500 rpm.

3.4 Parâmetros de usinagem

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados. Os experimentos foram realizados a seco tendo em vista a obtenção da temperatura.

Métodos: radial. de	Velocidade de	Altura do	Profundidade por	Número de
flanco e	corte	filete	passada	passes
incremental	51 m/min	1,23 mm	0,08 mm	16

Tabela 3 - Parâmetros de usinagem

Fonte: O autor (2018).

Além disso, foram realizados ensaios empregando o método de penetração de flanco modificado (utilizando folga de 1°) com profundidade de corte constante e também com seção constante conforme a Tabela 3.1.

Métodos: radial, de flanco e incremental	Velocidade de corte	Altura do filete	Profundidade por passada	Número de passes
	51 m/min	1,23 mm	0,08 mm ou variável (seção constante)	16

Fonte: O autor (2018).

3.5 Sistemas de aquisição de dados

Na sequência apresentam-se os sistemas utilizados para a aquisição de dados durante a realização da usinagem.

3.5.1 Sistema de medição de força

Na Figura 31 encontra-se esquematizado o sistema utilizado na aquisição das forças de corte e avanço. Um dinamômetro *Kistler* Modelo 9265B foi utilizado para coletar os sinais das componentes da força de usinagem com frequência de 8192 Hz. Os sinais adquiridos durante cada passada eram amplificados e convertidos de analógico para digital através de uma placa de aquisição e enviados ao computador para armazenamento e posteriores análises.

Figura 31 - Sistema utilizado para a aquisição das forças.



Fonte: O autor (2021).

No Quadro 7 apresentam-se as principais características técnicas para identificação dos elementos dinamômetro, placa de aquisição, amplificador e do *software*.

Elemento	Identificação técnica
Dinamômetro	Kistler 9265B
Placa de aquisição	Placa USB 6259, (16 entradas / 16 bits, 1,25 MS / s; Multifunção com entrada e saída, correlação digital de entrada e saída para USB – entrada analógica – AI 1, AI 2, AI 3.
Amplificador	Amplificador de carga multicanal Kistler, Tipo 5070, Instrumento AG Kistler, Tipo SN
Software Labview	NI 2017

Quadro 7	- Instrumontação	do sistoma	do aquisição
Quadro I	- instrumentação	uo sistema	ue aquisição

Fonte: O autor (2021).

Para a montagem da plataforma piezoelétrica na máquina foi necessária uma adaptação. A Figura 32 mostra a preparação do sistema para a medição das forças de corte e avanço. A plataforma foi instalada sobre o carro principal do torno e a ferramenta sobre a mesma. Na mesma sequência apresentam-se configurações da máquina nas situações anterior e posterior à montagem da plataforma piezoelétrica responsável pela captação das forças durante a usinagem.

Figura 32 – Detalhes do Sistema utilizado para aquisição das forças. Configuração antes e após a montagem da plataforma piezoelétrica



Fonte: O autor (2021).

3.5.2 Sistema de medição da temperatura

Na Figura 33 apresentam-se detalhes do sistema estabelecido para aquisição da temperatura sendo, neste caso, utilizada a Câmera Termográfica *Flir Systems*, modelo: SC-600, com resolução do sensor 620 X 480 *pixels*, faixa de medição de -40°C a 2000°C. Esta série oferece mais de 300.000 pixels de dados de medição de temperatura, com controle digital do fluxo de imagem e gravação para o *software FLIR (FLIR SYSTEMS*, 2017). A emissividade adotada durante os experimentos foi de 0,7.



Figura 33 - Sistema de posicionamento utilizado para aquisição termográfica

Fonte: O autor (2021).

3.5.3 Medição do grau de recalque

Durante o rosqueamento para cada método empregado, paradas estratégicas eram realizadas para a coleta de cavacos. Posteriormente estes cavacos tiveram a medição da espessura utilizando-se micrômetro digital para o cálculo do grau de recalque (*Rc*) por meio da equação 1. Uma média de cinco medidas para cada conjunto de cavaco foi realizada por meio de um micrômetro externo digital de pontas cônicas 0-25mm Resolução 0,001mm conforme ilustrado na Figura 34.

$$Rc = \frac{h'}{h} \tag{1}$$

Sendo h = espessura de corte; h' = espessura do cavaco



Figura 34 - Micrômetro utilizado para medição do cavaco

Fonte: MITUTOYO (2020)

3.6 Equipamentos para aquisição de imagens

Foi empregado microscópio óptico, composto por câmara de vídeo e lentes capazes de capturar e ampliar imagens associado a um software de medição durante paradas estratégicas do ensaio, na avaliação prévia durante os experimentos.

Para análises mais detalhadas e a caracterização qualitativa dos filetes da rosca, desgastes na ferramenta e morfologia do cavaco amostras foram preparadas e imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), Microscópio Confocal Olympus FV 1200, Rugosímetro 3D Talysurf CCI Lite e a análise química por Difratômetro de raios-X (DRX), equipamentos disponíveis nos laboratórios da UTFPR.

3.7 Análise dos cavacos

A Figura 35 apresenta o ambiente utilizado para análises e a caracterização qualitativa dos filetes da rosca, desgastes na ferramenta e morfologia do cavaco, por meio de microscopia eletrônica de varredura, (MEV) modelo EVO MA 15 fabricado pela Zeiss equipamento do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR.

Figura 35 - Sistema no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR



Fonte: O autor (2021).

A Figura 36 apresenta as etapas de preparação, posicionamento das peças a serem analisadas no magazine para posterior acoplamento ao equipamento e tela do *software* com imagens e dados para análise.



Figura 36 - Etapas para obtenção de imagens

Fonte: O autor (2021).

3.8 Medição da microdureza

As amostras foram preparadas por meio de corte transversal e longitudinal de modo a possibilitar o embutimento para posterior lixamento, polimento e secagem das peças.

O ensaio de microdureza foi realizado no micro-indentador SHIMADZU Micro Hardness Testers, HMV-2 Series.

Os parâmetros utilizados foram: carga de 25 N com 5 pontos espaçados em cada corpo de prova com tempo de aplicação de 15 segundos. O indentador utilizado era de diamante com dimensões constantes tipo *Vickers*, o que permite impressões independentes da carga aplicada.

Para a aquisição dos dados o indentador, era forçado contra a superfície do corpo de prova, sendo a impressão resultante observada sob um microscópio verificando sua mensuração, sendo esta convertida em um índice de dureza *Vickers* – HV.

As medições foram realizadas na profundidade do material ao longo de uma linha reta perpendicular à superfície do flanco conforme esquematizado na (Figura 37). Os valores da microdureza eram observados diretamente no painel do microdurômetro.





Fonte: O autor (2021).

3.9 Análise da superfície da rosca

As superfícies das roscas foram analisadas através do Rugosímetro Óptico - Interferômetro de Luz Branca, Modelo *Taysurf* CCI Lite M12-3993-03 fabricado pela Taylor Hobson.

Considerando os objetivos deste trabalho, analisou-se a qualidade das superfícies da raiz e também dos flancos da rosca. Devido a características do equipamento, foi necessário rebaixar o diâmetro do corpo de prova para o alcance da raiz do filete. A Figura 38 apresenta detalhes do corpo de prova antes e após a remoção dos picos para medição.

Figura 38 - Corpo de prova antes (A) e após (B) a remoção dos picos para medição.



Fonte: O autor (2021).

Para análise das superfícies usinadas também foram consideradas imagens do filete da rosca obtidas por meio do MEV.

4 **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Na sequência, apresentam-se os resultados e as discussões sobre os experimentos realizados.

4.1 Formação do cavaco no rosqueamento

A Figura 39 ilustra o mecanismo de formação do cavaco para uma operação de rosqueamento. Verifica-se que a largura do cavaco pode ser dividida em regiões onde há contato entre o raio de ponta da ferramenta e o material ou entre as arestas de corte e o material da peça. Observa-se principalmente no método de penetração radial que nas regiões onde o corte é realizado pelas arestas de corte o cavaco é restringido por um lado e é livre em outro. Ao passo que na região onde o corte é realizado pelo raio de ponta da ferramenta o cavaco é restringido em ambos os lados. Uma vez que a cada passe ocorre o crescimento da área de contato entre a ferramenta de corte e peça, a situação passa a ser significativa impactando sobre a formação e escorregamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta. Além das deformações ocorridas nas zonas primárias e secundárias de corte, também é fundamental considerar o atrito entre ferramenta e cavaco, uma vez que o crescimento deste fator dificulta o escoamento.





Fonte: O autor (2021).

Observa-se ainda na Figura 39 que o perfil serrilhado ao longo das bordas está presente na morfologia microscópica do cavaco. Esta é uma característica dos cavacos cisalhados. Dependendo da operação e das condições de corte, o cavaco formado na usinagem do aço inoxidável 304L pode ser contínuo ou cisalhado. Isto depende da deformação do material na zona primária, do contato entre o cavaco e a ferramenta na zona secundária e do aumento da temperatura devido à deformação em ambas as zonas de corte. Na formação do cavaco contínuo constantemente ocorre o cisalhamento, enquanto que a formação do cavaco cisalhado envolve o efeito combinado da falha do modo dúctil e cisalhamento adiabático (WANG e LIU, 2014). Na formação dos cavacos cisalhados ocorrem pequenas lamelas ao invés de bandas de cisalhamento como mostrado no detalhe da Figura 39. De acordo com Hoppe (2003), o tipo do cavaco formado ainda pode variar ao longo de sua seção longitudinal. Sendo que o cavaco cisalhado pode ser formado na região onde o corte ocorre com a aresta de corte, ao passo que o cavaco contínuo pode se formar na região da ponta da ferramenta.

4.2 Morfologia do cavaco

Na Figura 40 se observa a imagem do cavaco obtido durante o último passe da sétima peça rosqueada através do método de penetração radial e também a representação da sua secção transversal. Na parte superior do cavaco em forma de V predomina a tração enquanto na inferior acontece a compressão. Também é possível verificar a origem da formação do cavaco a partir do centro. A região central do cavaco está associada à formação da raiz do filete, resultante do contato entre o raio de ponta da ferramenta e o material da peça. Enquanto que os flancos do filete foram gerados por meio das arestas de corte, caracterizando o método de penetração do rosqueamento empregado.

Figura 40 - Cavaco real obtido durante o último passe da sétima peça por meio do avanço radial e esquematização da seção transversal



Fonte: O autor (2021).

A Figura 41 ilustra um cavaco obtido pelo método de penetração de flanco. Cavacos similares foram encontrados também para o método incremental, principalmente quando analisadas as superfícies consideradas como superior e inferior do cavaco. Porém para estes métodos observou-se uma melhor geração do cavaco e menor restrição ao seu fluxo. É possível observar que o lado inferior do cavaco que se desloca sobre a superfície de saída da ferramenta se apresenta mais liso. Ao passo que o lado superior tem mais irregularidades com a formação de um perfil serrilhado.

Figura 41 - Representação das superfícies inferior e superior do cavaco para o método de penetração de flanco.



Parte inferior Fonte: O autor (2021). A Figura 42 ilustra o cavaco obtido durante o último passe da peça número oito por meio do método radial, tendo sido a rosca produzida foi refugada. Por meio desta é possível verificar deformações irregulares do cavaco. Tal análise contribui quanto a identificação do estágio de fim de vida da ferramenta.

10µm

Figura 42 - Cavaco obtido após o último passe durante o rosqueamento da oitava peça por meio do método de penetração radial

Fonte: O autor (2021).

As Figuras 43 e 44 ilustram imagens de cavacos obtidos durante o último passe da primeira e sétima peças para os três métodos de rosqueamento experimentados. Na Figura 43 é mostrado o lado superior do cavaco. Para o método de penetração radial, nota-se que para a peça 1, a secção do cavaco é em forma de V. Uma maior protuberância na região central ocorre com o aumento do número de passes, conforme visto por meio da peça 7. Neste caso a raiz se destacou ainda mais em relação às duas bordas do cavaco que foram geradas pelas arestas de corte laterais da ferramenta. A atuação da ferramenta pela ponta e ambos os lados simultaneamente dificultava o escorregamento do cavaco e aumentava a sua deformação.



Figura 43 - Lado superior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de rosqueamento, para o último passe das peças 1 e 7

Fonte: Autoria própria (2021).

No caso da penetração de flanco, a formação do cavaco se caracterizou pelo paralelismo em relação à aresta de corte e melhor fluxo do cavaco quando comparado ao radial. Também é interessante citar que uma pequena curvatura formou-se associada à ponta da ferramenta, enquanto que a aresta de corte principal teve um comprimento de contato maior com flanco do filete. Com o aumento do número de peças rosqueadas observou-se a aderência do material da peça sobre a superfície do cavaco. Os cavacos obtidos pelo método de

penetração incremental são similares aos obtidos pelo método de penetração de flanco. Porém, as diferenças encontradas entre os cavacos da primeira e sétima peça não são tão notáveis em função do menor desgaste da ferramenta resultante do emprego deste método. Na Figura 44 é mostrado o lado inferior do cavaco que teve contato com a superfície de saída da ferramenta.



Figura 44 - Lado inferior dos cavacos obtidos para o último passe das peças 1 e 7

Fonte: Autoria própria (2021).

O lado inferior do cavaco se apresenta mais liso que o superior. Neste caso também é possível verificar a influência do desgaste da ferramenta sobre o cavaco. Para os métodos de penetração radial e de flanco nota-se a aderência do material da peça sobre a superfície do cavaco para a sétima peça. Isso não ocorreu de forma significativa para o método de incremental.

4.3 Formação do cavaco formado durante o rosqueamento

A Figura 45 apresenta respectivamente a forma teórica e os cavacos obtidos durante o rosqueamento da sétima peça para cada método experimentado. Através do modelo apresentam-se três variáveis principais sendo: P = Passo, r1 = raio externo do cavaco e r2 = raio interno do cavaco. Analisando as características dos cavacos obtidos, algumas considerações sobre suas curvaturas podem ser destacadas. Segundo DEVOTTA (2015) a geometria do cavaco é teoricamente resultante da curvatura vertical, lateral e do fluxo do mesmo. Durante os experimentos, o cavaco em formato de hélice longa foi o predominante. Verifica-se que o lado externo da hélice corresponde ao lado inferior do cavaco, que se apresenta com aspecto mais liso. Enquanto que o lado interno da hélice, mais rugoso, corresponde ao lado superior do cavaco. A cinemática durante a formação do cavaco influenciou diretamente sobre a sua geometria, uma vez que diferentes velocidades ocorrem durante o deslocamento deste sobre a superfície de corte (lados interno e externo do cavaco), alterando sua curvatura lateral. Também é interessante considerar que para todos os métodos de penetração de rosqueamento, além do deslocamento de avanço propriamente dito, deve-se considerar também o raio de ponta da ferramenta, especialmente para o caso radial. Neste caso, somadas às características do material, a dificuldade de formação e restrição ao fluxo do cavaco em consequência do contato do raio de ponta e de ambos os lados da ferramenta, provocam uma deformação extra, com alta tendência à formação de bordas serrilhadas. O fato conduz a geração de variações com maiores distorções e consequentes alterações no passo e diâmetro das hélices obtidas. Os métodos de rosqueamento de flanco e incremental apresentaram cavacos semelhantes, tendo como principais diferenças o diâmetro das hélices
geradas e o passo. Os cavacos gerados durante a penetração de flanco assemelham-se aos obtidos por meio do torneamento convencional. Neste caso, o diâmetro permaneceu praticamente constante, com pequena variação quanto ao passo. Quando verificados os cavacos obtidos pelo método de penetração incremental, maior consistência foi observada quanto ao passo e mesmo do diâmetro, porém de menor dimensão, quando comparado ao método de flanco.



Figura 45 - Geometria do cavaco durante a usinagem da sétima peça

Fonte: O autor (2021).

A Figura 46 ilustra de forma genérica as variações da forma de cavaco em função da profundidade de corte e avanço para o torneamento. No presente trabalho para os três métodos de penetração empregados no rosqueamento verificou-se a predominância de cavacos longos, característicos de materiais dúcteis. A forma do cavaco dominante foi a helicoidal, com alterações significativas quanto ao passo entre as hélices geradas. Isto ocorreu principalmente devido à pequena profundidade de corte empregada, uma vez que o valor do avanço foi relativamente alto por representar o passo da rosca.



Figura 46 - Influência da profundidade e avanço na formação do cavaco

Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2011).

4.4 Grau de recalque

A Tabela 4 mostra os valores do grau de recalque referentes ao último passe realizados nas peças rosqueadas pelos diferentes métodos de penetração. Os valores aumentam com o número de peças rosqueadas em função do desgaste das ferramentas. Outro fator que pode contribuir para o aumento das força de corte é a tendência ao encruamento do aço inoxidável austenítico durante o processo de usinagem. Os valores encontrados foram maiores para o método radial, sendo isto evidenciado já para a primeira peça. Este comportamento era esperado, em função das características do cavaco gerado por este método como discutido anteriormente. O valor encontrado para o método de flanco foi similar ao do método incremental para a primeira peça. Entretanto, o grau de recalque aumentou mais rapidamente à medida que mais peças foram rosqueadas com o método de flanco.

		Peça					
Penetração		1	3	5	6	7	
Radial	alque	1,87	2,75	4,0	4,5	4,75	
Flanco	de recc (Rc)	1,25	2,87	3,50	3,5	3,75	
Incremental	Grau o	1,25	1,87	2,5	2,75	3,0	

Tabela 4 - Grau de recalque em função da penetração durante o último passe para diversas pecas

Fonte: Autoria própria (2021).

4.5 Seção do cavaco

A Figura 47 mostra as seções do cavaco referentes a cada passe da ferramenta para os diferentes métodos de penetração empregados durante o rosqueamento. No primeiro passe, como a profundidade de corte é inferior ao raio de ponta da ferramenta, o contorno da seção do cavaco se apresenta como um segmento de arco. A seção do cavaco é similar para os três métodos de penetração. A partir do próximo passe com a maior penetração da ferramenta a seção do cavaco passa a ser formada por diferentes regiões. Neste caso, conforme descrito por AKYIDIZ (2013) há uma região delimitada por uma fronteira interna gerada pelo raio da ponta da ferramenta no passe anterior e uma fronteira externa gerada pelo raio da ponta no passe atual. Esta corresponde a região A da Figura 47. Há também as regiões B e B', cujas fronteiras internas são geradas pelo raio da ponta da ferramenta no passe anterior e fronteiras externas lineares geradas pelas arestas de corte. E também, regiões C e C', onde as fronteiras internas e externas são lineares e geradas pelas arestas de corte durante o passe anterior e o atual, respectivamente.

A distribuição destas regiões difere entre os métodos. No método radial as regiões lineares estão simetricamente dispostas resultando em cavaco na forma de V. Neste caso, a espessura do cavaco nas laterais da rosca corresponde à metade da espessura do cavaco na sua raiz. No método de flanco a região linear se concentra em um dos lados da rosca e a forma do cavaco se assemelha a das operações de torneamento cilíndrico. A região linear no método incremental é similar à do método de flanco, porém alterna sua posição a cada passe em ambos os lados da rosca. A espessura do cavaco em uma das laterais da rosca é mais próxima da espessura do cavaco na sua raiz.

Na região linear a espessura do cavaco permanece constante independentemente do método de penetração empregado. No método radial a espessura do cavaco se altera em toda a região não linear. Ao passo que para os métodos de flanco e incremental a espessura do cavaco se altera de forma mais acentuada somente em metade dela. Segundo AKYILDIZ (2013) as forças de usinagem mudam suas direções ao longo dos segmentos de cavaco curvilíneos. Isto faz com que a magnitude e o comportamento das forças de usinagem sejam diferentes das operações de torneamento cilíndrico.



Figura 47 - Seções do cavaco para os métodos de penetração

Fonte: O autor (2021).

A Figura 48 mostra a área teórica do cavaco calculada para cada um dos passes realizados para produzir a rosca conforme os parâmetros dos experimentos. Elas apresentam os mesmos valores independentemente do método de penetração empregado. A área aumenta linearmente com o aumento do número de passes realizados, sendo que a área do último passe corresponde a aproximadamente seis vezes a área do primeiro.



Figura 48 - Área do cavaco em função do número de passes

Fonte: O autor (2021).

4.6 Forças de corte e avanço em função do método de penetração

A Figura 49 apresenta a evolução da força de corte de acordo com o número de passes para as primeiras peças rosqueadas. Pode-se observar que para a primeira peça usinada a força de corte aumenta a cada passe realizado. Isto acontece principalmente porque ocorre o aumento da área de corte à medida que os passes se sucedem. Entretanto, este aumento pode ser maior do que se esperaria em função da variação da área do cavaco. Com o aumento do número de passes se evidencia a interferência entre os cavacos na superfície de saída da ferramenta. De acordo com KAFKAS (2010) durante a

usinagem de roscas, cada aresta de corte produz cavaco simultaneamente. Os cavacos seguem em diferentes direções colidindo uns com os outros e interferindo com os cortes subsequentes, o que afeta as forças atuantes na área de cisalhamento ou na superfície de saída da ferramenta.

A distribuição das regiões com diferentes seções do cavaco também influenciam o comportamento da força de corte. Observa-se que para o método radial, nas regiões lineares onde o corte é realizado pelas arestas de corte o cavaco é restringido por um lado e é livre em outro. Ao passo que na região onde o corte é realizado pelo raio de ponta da ferramenta o cavaco é restringido em ambos os lados pelas regiões lineares. Conforme AKYILDIZ (2013), isto resulta em uma elevada tensão compressiva durante o processo em função das diferenças no grau de recalque dos cavacos destas regiões. A cada passe realizado, as condições de corte se tornam mais severas e mais energia é necessária para deformar o cavaco acarretando em aumento da força de corte. Outro fator que pode contribuir para o aumento das forças de usinagem é a tendência ao encruamento do aço inoxidável austenítico quando submetido a usinagem. As forças de corte medidas para os métodos de flanco e incremental foram similares e inferiores àquelas obtidas no avanço radial.





Fonte: O autor (2021).

A Figura 50 apresenta a evolução da força de avanço de acordo com o número de passes para as primeiras peças rosqueadas de acordo com o método de penetração. Pode-se observar que para a primeira peça usinada a força de avanço aumenta a cada passe realizado. Comparando as figuras 51 e 52 observa-se semelhança na tendência ao crescimento das forças. Porém, valores inferiores foram obtidos durante a obtenção da força de avanço.



Figura 50 - Força de avanço em função do método de rosqueamento X número do passe para a primeira peça.

A Figura 51 mostra os valores máximos das forças de corte obtidas durante o rosqueamento para cada peça de acordo com o método de penetração empregado. Para a primeira peça, as forças apresentaram pequena diferença de valores para os diferentes métodos de penetrações empregados. Em função do desgaste progressivo da ferramenta e a consequente alteração de sua geometria, os valores da força de corte aumentaram a cada peça rosqueada. Um aumento considerável foi observado quando comparadas a primeira e a terceira peças, sendo que neste momento as forças eram de 480 N, 370 N e 340 N obedecendo a sequência anterior. A partir deste ponto, o

método de penetração radial apresentou certa uniformidade e constância no crescimento até a sexta peça com valor de 540 N. De modo diferente ao avanço radial, as forças para os métodos de flanco e incremental cresceram de modo mais significativo para o mesmo intervalo, porém ainda eram bem menores, 520 N e 480 N para a sexta peça. Durante o rosqueamento da sétima peça pelo método radial, a força de corte subiu de forma abrupta para 780 N, sendo que esta foi a última peça aprovada após a verificação com o calibrador passa não-passa. Enquanto que para o método de penetração de flanco o valor da força de corte foi de 640 N para a sétima peça. E pouco cresceu para a oitava, sendo que a partir de então apresentou significativo aumento para a nona e última peça aprovada para este caso com força de corte de 710 N. A partir da sétima peça para o avanço incremental a força de corte apresentou certa estabilização, com pequeno índice de aumento, chegando a 560 N quando rosqueada a décima segunda peça, concluindo esta o lote de peças aprovadas após a verificação com o calibrador. O aumento abrupto das forças principalmente para os métodos de penetração de rosqueamento radial e flanco são bons indicativos para propor a troca da ferramenta evitando que esta venha a falhar durante a operação fato que poderá provocar danos à peça e possível refugo. Já para o método incremental, o crescimento da força de corte não se apresentou tão pronunciado, mesmo alcançando a décima segunda peça rosqueada.



Figura 51 - Força de corte para a última passada em função do método de rosqueamento e número de peças rosqueadas

A Figura 52 mostra a força de avanço máxima em função do método de penetração de acordo com o número de peças rosqueadas. Semelhante à força de corte, também a força de avanço apresentou aumento com o número de peças usinadas, porém com valores significativamente menores. Por meio da figura observa-se valores próximos quando do início da operação para os diferentes métodos de penetração empregados. Entretanto, neste momento observou-se uma pequena influência do método de penetração da ferramenta, uma vez que a profundidade de corte foi mantida constante. Para a segunda peça houve um crescimento acentuado da força para o método de penetração radial subindo para 185 N enquanto que para os métodos de flanco e incremental as forças apresentaram pouca evolução até a quarta peça, com 133 N e 118 N. Para o método radial também verificou-se pequeno crescimento entre a segunda e a quarta peça. A partir da quinta peça observa-se maior inclinação da curva, culminando com o valor de 460 N para a sétima peça, que foi a última aprovada pelo calibrador. Para a sétima peça, as forças para os métodos de flanco e incremental estavam em 260 N e 130 N respectivamente.

Para o método de flanco outras duas peças ainda foram aprovadas, chegando a força de avanço até 320 N para a nona peça. Para o método incremental foi possível usinar mais cinco peças, sendo que o comportamento da força de avanço foi aproximadamente linear até atingir o valor de 250 N para a décima segunda peça. Através deste método de penetração sempre observou-se valores de forças consideravelmente menores sendo o fato explicado pela divisão da profundidade de corte total da rosca em cortes menores e alternados pelas arestas de corte, não sobrecarregando demasiadamente o raio de ponta da ferramenta.

Figura 52 - Força de avanço para a última passada em função do método de rosqueamento X número de peças rosqueadas



Para os três métodos experimentados ocorreram expressivos aumentos das forças de corte e avanço principalmente durante a usinagem das últimas peças aprovadas. Portanto, o monitoramento das forças de usinagem pode ser uma alternativa adequada para a determinação do momento de troca da ferramenta para o processo de rosqueamento do aço inoxidável 304 L.

4.7 Temperatura em função do método de penetração

O calor gerado está diretamente relacionado à propriedade do material da peça, material da ferramenta, sua geometria e parâmetros de corte. Ele aumenta com a taxa de remoção de material ou tempo de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011). Tal afirmação se sobressai principalmente na usinagem de materiais de baixa usinabilidade como é o caso do aço inoxidável 304 L. Diante do fato, é de fundamental importância obedecer a combinação adequada dos parâmetros, pois estes são os responsáveis diretos por otimizações na qualidade da peça uma vez que agem diretamente sobre a vida da ferramenta por meio da interação física entre a aresta de corte e a peça (DENKENA *et al.*, 2012). Particularmente no processo de rosqueamento, o método de penetração também deve ser considerado.

Grande é o desafio de medir a temperatura durante o processo de usinagem, pois a geração e distribuição do calor ocorre simultaneamente em materiais de diferentes composições químicas e propriedades. Somado a isso, a área de cisalhamento do cavaco é pequena e muitas vezes obstruída pelo fluxo contínuo e irregular resultante dos movimentos relativos entre peça e ferramenta (LIANG *et al.,* 2013).

A termografia por infravermelho é um método de monitoramento estabelecido e amplamente aceito onde a temperatura é medida em tempo real e sem contato (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). Contudo, erros podem ser atribuídos a dificuldades de foco, variação de emissividade e efeitos de fluxo de cavacos sobre o campo de medição (ASPINWALL *et al.*, 2013). De acordo com DA SILVA *et al.* (2018), as imagens térmicas são eficazes para mostrar como as regiões ao redor da zona de corte se aquecem. O aquecimento excessivo dessas zonas pode ser um bom indicador da condição de desgaste da ferramenta, portanto esse método foi utilizado no presente trabalho.

A Figura 53 mostra um exemplo de imagem térmica obtida durante a realização de um passe de rosqueamento. Também é apresentada a máxima temperatura medida na área de varredura delimitada pelas linhas vermelhas. A máxima temperatura medida foi considerada para as análises do presente trabalho. Entretanto, esta não é a maior temperatura que ocorre durante o

processo de usinagem, pois as temperaturas obtidas pelas câmeras térmicas tendem a apresentar valores mais baixos na região de corte do que os reais. As obstruções pelo próprio cavaco tornam difícil medir adequadamente a temperatura na interface ferramenta-cavaco. A imagem também mostra que houve a formação de longos cavacos durante o processo. Segundo as simulações realizadas por HE *et al.* (2017) a maior temperatura durante o torneamento do aço inoxidável AISI 304L é encontrada na zona de deformação secundária. A temperatura do cavaco diminui à medida que ele se afasta dela, sendo que a temperatura da sua extremidade superior pode ser de 200°C a 300°C inferior à maior temperatura da zona de deformação (HE *et al.*, 2017).



Figura 53 – Imagem termográfica da temperatura durante o processo

Fonte: O autor (2021).

A Figura 54 apresenta as temperaturas registradas diretamente pelo *"Software Flir"* durante o rosqueamento pelo método radial da primeira peça. Imagens semelhantes foram obtidas para as demais peças e para os métodos de penetração de flanco e incremental, porém com diferentes gradientes de temperaturas. Verifica-se a divisão de 16 conjuntos representando o número de passes programados para o rosqueamento. As temperaturas se elevam abruptamente no início da operação e caem acentuadamente após seu final. Observa-se que não há tempo suficiente entre os passes para que a temperatura da peça volte a ser a ambiente, chegando a resfriar somente até 90°C no intervalo entre os passes finais. Também observam-se três patamares (A, B e C), representando as temperaturas consideradas para o princípio (primeiro ao quinto passe), o meio (sexto ao décimo passe) e o final da operação (décimo primeiro ao décimo sexto passe). No princípio da operação a temperatura ainda era relativamente baixa podendo ser justificada pelo cavaco formado ser ainda de pequeno tamanho e espessura. Em forma de lascas, o cavaco era removido com maior facilidade da zona de corte. Já nos patamares seguintes provavelmente a aderência de material da peça sobre a aresta de corte começou a influenciar na formação e fluxo do cavaco e por consequência no gradiente de temperatura. De uma forma geral a temperatura aumentou com o número de passes realizados. Isto acontece principalmente porque ocorre o aumento da área de corte à medida que os passes se sucedem e consequentemente aumento da força de corte. Além disso, como discutido anteriormente, aumenta a interferência entre os cavacos na superfície de saída da ferramenta e o encruamento do aço inoxidável a cada passe realizado. Com isso mais energia é necessária para deformar o cavaco acarretando em aumento da força de corte e também da temperatura. Segundo AKYILDIZ (2013), a razão da compressão do cavaco na raiz da rosca aumenta a cada passe da ferramenta provocando também aumento da temperatura. Grau de recalque mais altos indicam maiores deformações plásticas no cavaco e isto significa maior aquecimento adiabático e consequentemente maior temperatura, uma vez que o calor gerado na zona de cisalhamento não pode ser adequadamente removido.

Durante um mesmo passe pode haver diferenças significativas nos valores das temperaturas obtidas. Isto se deve a restrições das medições devido a possíveis obstruções do próprio cavaco gerado durante a operação. Para as análises posteriores se levou em consideração a temperatura máxima medida durante a usinagem de cada peça.

Figura 54 - Temperatura obtida em função do número de passadas para a primeira peça por meio do método de rosqueamento radial.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 55 apresenta a evolução da temperatura máxima medida durante o último passe das peças rosqueadas pelos diferentes métodos de penetração. De uma forma geral a temperatura aumenta praticamente de uma forma linear com o número das peças usinadas, ocorrendo um substancial aumento durante a usinagem da última peça indicando que a ferramenta estava chegando ao fim de sua vida útil.

Figura 55 - Comportamento da temperatura em função do número de peças usinadas de acordo com o método aplicado



Fonte: O autor (2021).

A baixa condutibilidade térmica, do aço inoxidável austenítico 304 L, dificulta em muito a retirada de calor pelo cavaco. Deste modo a maior parte do calor gerado no processo se concentra sobre a aresta de corte da ferramenta (DENKENA *et al.*, 2012).

As temperaturas medidas para o método de penetração radial foram mais altas. Neste método a ferramenta deve usinar simultaneamente os dois flancos da rosca, havendo contato das duas arestas de corte da ferramenta e de seu raio de ponta. Isto faz com que a ponta da ferramenta seja exposta a temperaturas mais elevadas. Além disso, a geração do cavaco em forma de V resulta em maiores dificuldades em seu escoamento e consequentemente menor dissipação do calor.

Observa-se que para a terceira peça usinada a temperatura já foi aproximadamente 300°C. Houve um aumento quase linear até a sexta peça onde o valor medido foi aproximadamente 520°C e posteriormente um aumento considerável para a última peça atingindo um valor de 670°C.

As temperaturas medidas durante a usinagem pelo método de flanco apresentaram valores intermediários entre aqueles encontrados para os métodos radial e incremental para o mesmo número de peças usinadas. Neste método o corte ocorre em apenas um dos flancos da rosca, pela ação da aresta principal da ferramenta. Desta forma o cavaco tende a ser direcionado para fora da região de corte, contribuindo para a dissipação do calor. É possível observar que o aumento da temperatura foi aproximadamente linear até a oitava peça, havendo um súbito aumento para 500°C durante a usinagem da última peça.

O emprego do método incremental resultou em temperaturas mais baixas durante o rosqueamento apresentando inicialmente um crescimento semelhante ao método radial, um aumento menos pronunciado a partir da nona peça e um súbito aumento para a última peça atingindo 400°C. Neste método há a alternância das arestas da ferramenta envolvidas no corte, havendo um maior período de tempo para serem resfriadas antes de voltarem a usinar. Além disso, ocorre um desgaste mais uniforme da ferramenta e menos pronunciado em cada um de seus lados. O fim da vida útil da ferramenta ocorreu para temperaturas diferentes para os três métodos, porém foi notório o aumento da temperatura durante a usinagem das últimas peças rosqueadas. Portanto, a termografia por infravermelho é um método que pode ser empregado com sucesso no monitoramento das ferramentas de rosqueamento.

Outro detalhe interessante refere-se aos valores obtidos pelas temperaturas quando usinada a peça de número 7. Neste caso, a ferramenta já estava em fim de vida para o método radial com temperatura aproximando-se a 700°C. Para o mesmo número de peças considerando o método de flanco a temperatura era pouco mais de 350°C enquanto que para o método de rosqueamento incremental a temperatura estava por volta de 290°C. É sabido que o custo do inserto é pequeno se comparado ao sistema máquina, dispositivos e pessoas envolvidas porém, especialmente no caso do rosqueamento em materiais e peças especiais, a falha abrupta desta pode gerar perda significativa considerando o material e valor agregado justificando especial atenção sobre a operação considerando que grande parte dos mecanismos de desgastes tem ligação direta com princípios térmicos.

4.8 Vida da ferramenta

A Figura 56 apresenta imagens da ferramenta após o rosqueamento de seis peças usando o método de penetração radial, que foram obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV).



Figura 56 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração radial após seis peças

Fonte: O autor (2021).

Ocorreu um desgaste severo da ponta da ferramenta. Além disso, houve aderência do material da peça sobre esta região. Este foi o resultado de condições críticas que ocorrem durante o processo de rosqueamento do aço inoxidável, como cavacos abrasivos. altas temperaturas, adesão e encruamento do material. Conforme descrito por KONG et al. (2016) materiais de peças com altas taxas de encruamento geram rebarbas duras, que causam alta tensão e atrito na superfície de folga da ferramenta. Portanto, nestas circunstâncias, o material da peça facilmente adere na superfície de folga da ferramenta e conduz a condições extremamente severas na ponta da ferramenta. A microgeometria da ferramenta estava longe do estado inicial, resultando em maior atrito e maior geração de calor.

Figura 57 – Superfície de saída da ferramenta após a usinagem da sétima peça por meio do método de penetração radial



Fonte: O autor (2021).

Ponto	Ti	Ν	Fe	Со	W
1	41,87	27,59	6,24	-	-
2	-	-	5,28	7.71	72,95

Tabela 5 - Análise EDS após a sétima peça por meio do método de penetração radial

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 57 apresenta a superfície de saída da ferramenta após a usinagem de sete peças. Por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi possível confirmar a presença dos elementos químicos da peça na superfície de saída da ferramenta (Tabela 5). No ponto 1, próximo a aresta da ferramenta, o revestimento foi preservado conforme indicado pela alta concentração de Ti e N (41,87% e 27,59%, respectivamente). No entanto, houve também aderência do material da peça como indicado pela presença de Fe (6,24%). No ponto 2, os elementos Co e W (7,71% e 72,95%, respectivamente) que correspondem ao substrato da ferramenta foram encontrados, confirmando assim a remoção do revestimento. Isso facilitou a aderência do material da peça sobre a superfície da ferramenta, onde foi

detectada a presença de Fe (5,28%). No ponto 3, por estar mais distante das arestas de corte, não houve aderência significativa de material da peça.

A progressiva alteração da geometria da ferramenta gerada pelo desgaste e aderências afetou negativamente o perfil da rosca e resultou na rejeição da oitava peça. Neste caso, o material remanescente na raiz da rosca impediu a aprovação da peça durante a verificação com o calibrador.

A Figura 58 ilustra imagens da ferramenta após o rosqueamento de nove peças por meio do método de penetração de flanco. É possível observar um grande desgaste do entalhe (VB_N = 237 μ m) e severo desgaste na ponta da ferramenta. De acordo com CHANDRASEKARAN e JOHANSON (1994), o desenvolvimento do desgaste de entalhe em aços inoxidáveis austeníticos está relacionado à extensão da área disponível para a aderência, e a afinidade química entre os materiais da peça e da ferramenta.





Fonte: O autor (2021).

Conforme a Figura 59, a análise por EDS revelou a ocorrência de aderência do material da peça sobre a superfície da ferramenta, conforme indicado pela presença de Fe (22,74%) e Cr (10,4%) no ponto 1. Além disso,

os elementos W e Co (47,69% e 4,25%, respectivamente) foram encontrados no ponto 2, indicando que o revestimento foi removido nesta região expondo deste modo o substrato da ferramenta (Tabela 6). O progressivo desgaste de entalhe e o severo desgaste da ponta da ferramenta causaram desvios no perfil da rosca da próxima peça, provocando deste modo a sua reprovação.

Figura 59 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após a usinagem da nona peça por meio do avanço de flanco.



Fonte: O autor (2021).

Ponto	Ti	Ν	Fe	Со	W
1	0,61	-	22,74	-	-
2	12,71	-	-	4,25	47,69

Tabela 6 - Análise EDS após a nona peça por meio do método de penetração flanco

Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 60 ilustra a ferramenta após o rosqueamento de doze peças usinadas por meio do método de penetração incremental. O desgaste foi relativamente uniforme em ambos os lados da pastilha. Desgaste de flanco progressivo e desgaste de entalhe ocorreram durante o rosqueamento.



Figura 60 - Desgaste da ferramenta após rosquear doze peças de trabalho usando o avanço incremental

Fonte: O autor (2021).

A Figura 61 ilustra a superfície de saída da ferramenta após a usinagem da décima segunda peça. Por meio da análise EDS verificou-se que ocorreu aderência de materiais da peça na arestas de corte, conforme indicado pelo altos teores de Fe (57,78 %) no ponto 1 e no ponto 3 (61,91%). No ponto 2 praticamente não houve aderência de materiais da peça (Tabela 7).

O fim da vida útil da ferramenta foi alcançado durante o rosqueamento da peça seguinte, devido aos desgastes de flanco e ponta da ferramenta que causaram desvios no perfil da rosca e sua reprovação.



Figura 61 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após a usinagem da décima terceira por meio do avanço incremental

Fonte: O autor (2021).

Ponto	Ti	Ν	Fe	Co	W
1	-	9,82	57,78	-	-
		,	,		
0	40 74				
2	12,71	-	-	-	-
2		0.70	61.01		
3	-	9,72	01,91	-	-

Tabela 7 - Análise EDS após a sétima peça por meio do método de penetração radial

Fonte: Autoria própria (2021).

O desgaste de flanco médio (VB) de 0,3mm é geralmente considerado como o critério de vida da ferramenta de acordo com a Norma ISO 3685. Entretanto, no caso do rosqueamento, a qualidade da peça é afetada por desgastes ocorridos tanto na superfície de folga da ferramenta como na sua ponta. EZUGWU et al. relataram que a vida útil da ferramenta para rosqueamento do aço 817M40T foi o tempo correspondente a um desgaste de flanco médio de 0,587 mm associado a um crescimento de 5% na raiz do filete. No entanto, o desgaste de flanco não é o único modo de falha da ferramenta no rosqueamento do aço austenítico AISI 304L. Desgaste da ponta da ferramenta, desgaste de entalhe e aderência de materiais da peça também ocorrem e têm efeito adverso na qualidade da rosca. Portanto, os efeitos combinados dos modos de desgaste da ferramenta causam desvios do perfil da rosca e devem ser levados em consideração para a determinação da vida útil da ferramenta. Por esta razão, no presente trabalho o fim da vida útil da ferramenta foi alcançado para valores de desgaste de flanco médio abaixo de 0,3 mm.

A Figura 62 ilustra a vida útil da ferramenta em função do método de penetração considerando como critério o número de peças aprovadas. A menor vida útil da ferramenta foi observada quando empregado o método de penetração radial. Neste caso, o número de peças usinadas e aprovadas pelo calibrador foi sete. Restrições ao fluxo do cavaco contribuíram para a menor vida quando comparado aos métodos de flanco e incremental, pois neste caso, a ferramenta é submetida a altas temperaturas e maiores esforços. Empregando-se o método de flanco, foram aprovadas pelo calibrador nove

peças. Ao passo que para o método incremental foi possível obter doze peças aprovadas.



Figura 62 - Números de peças aprovadas para diferentes métodos de penetração

4.9 Influência do método de rosqueamento sobre a qualidade da rosca

A Figura 63 mostra alguns detalhes da superfície de um filete da sétima peça rosqueada por meio do método de penetração radial, sendo estas obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura. Em A, são destacados ambos os lados do filete. E em B é mostrada a ampliação de um dos lados do filete. Neste podem ser observadas algumas estrias na direção radial. É possível verificar maior distanciamento e profundidade das estrias a partir da raiz do filete para o flanco. Essas estrias são provocadas por microlascamentos, aderências de materiais sobre a aresta de corte da ferramenta e por partículas soltas entre peça e ferramenta. Em C é notória a influência do desgaste da ponta da ferramenta. A raiz do filete é resultante da geometria da ferramenta durante o último passe. Apesar do aparente desvio da geometria da ponta da ferramenta esta peça ainda foi aprovada pelo calibrador.

Fonte: O autor (2021).



Figura 63 - Acabamento superficial obtido por meio do microscópio eletrônico de varredura para a sétima peça rosqueada por meio do método de penetração radial

Fonte: O autor (2021).

A Figura 64 apresenta o perfil da raiz da sétima peça obtida pelo método de penetração radial, sendo que a aquisição da imagem foi realizada por meio de um rugosímetro óptico 3D.



Figura 64 - Perfil da raiz obtida por meio do método de penetração radial para a sétima peça

Fonte: O autor (2021).

Por meio deste método quantitativo, as diversas irregularidades resultantes do rosqueamento no aço inoxidável austenítico 304 L foram obtidas, tornando visível o acabamento da superfície da peça. O parâmetro de amplitude *Sa* foi o utilizado para a identificação da rugosidade neste trabalho. Por este meio é possível constatar a média aritmética do valor absoluto da altura dentro de uma área de amostragem. O valor observado neste caso foi *Sa* = 11,71 µm. No detalhe B é mostrado que houve uma pequena área com adesão de material sobre a raiz do filete.

A Figura 65 mostra o perfil 2D no centro da raiz do filete para a mesma peça. Por este meio foi possível perceber grandes amplitudes no perfil correspondente entre as distâncias de picos e vales. Neste caso a profundidade do perfil Pt foi de 67,13 µm. O perfil Pt, corresponde a distância entre duas retas paralelas, dentro de uma determinada área de medição Quanto menor for esta área, melhores serão os resultados obtidos. Para tanto deve-se indicar o comprimento de medição, sendo o perfil Pt o resultado em forma de gráfico verificado por meio dos desvios da reta média dentro do comprimento de medição ALVES (2014).



Figura 65 - Perfil 2D no centro da raiz do filete para sétima peça com penetração radial

Fonte: O autor (2021).

A rugosidade da superfície é intrínseca ao processo de usinagem, de modo que o conhecimento das causas, sua mensuração e monitoramento devem ser controlados de acordo com a aplicação da peça. GRAVALOS et al. (2010) verificaram a relação entre a rugosidade da superfície e a resistência à corrosão devido à formação de pites no aço inoxidável superaustenítico. No rosqueamento isto é ainda mais relevante podendo levar a falha catastrófica do conjunto rosqueado a partir de microtrincas iniciadas a partir de uma elevada rugosidade da superfície.

A Figura 66 ilustra o perfil da rosca resultante ainda na sétima peça e também a ferramenta com marcas de desgaste para o avanço radial. Nota-se a presença de material excedente no flanco e na raiz da rosca e que não foram retirados em função dos desgastes de flanco e ponta da ferramenta. O erro Δ_w no perfil do flanco da rosca é consequência do desgaste da ferramenta e segundo KOLEVA et al. (2017) pode ser calculado em função do desgaste de flanco VB e ângulo de folga conforme a equação 2. No entanto, conforme discutido anteriormente, além do desgaste de flanco também ocorrem desgaste na ponta ferramenta e microlascamentos nas arestas de corte que também repercutem no perfil da rosca usinada.

$\Delta_w = VB \tan \alpha$







Fonte: O autor (2021).

A Figura 67 ilustra a rosca obtida pelo método de penetração radial para a oitava peça. Em A observa-se a aderência de material sobre um dos filetes enquanto que no outro nota-se início de destacamento de parte do flanco do filete a partir do pico da rosca (detalhe B). Semelhante ao ocorrido na sétima peça, para a oitava também verificou-se melhor acabamento na raiz do filete em comparação com os flancos. Salienta-se que a oitava peça não foi aprovada pelo calibrador.

Figura 67 - Filetes gerados por meio do método de penetração radial para a oitava peça



Fonte: O autor (2021).

A Figura 68 apresenta um exemplo de filete obtido por meio do método de penetração de flanco, sendo em A destacada a nona e em B a décima peça.

Por meio desta figura verifica-se a influência do método de rosqueamento de flanco. O melhor acabamento é observado sobre o flanco do filete que é gerado pela aresta principal de corte. Os aspectos destes flancos e da raiz da rosca pouco se alteraram da nona para a décima peça. Enquanto que no flanco gerado pela aresta secundária observou-se considerável deterioração da superfície próxima a raiz do filete para ambas as peças. A décima peça não foi aprovada após a verificação pelo calibrador. Por meio do microscópio eletrônico de varredura verificou-se que para esta peça o ângulo

entre os flancos não eram exatamente os 60° que seriam esperados para o perfil da rosca.



Figura 68 - Filetes gerados por meio da penetração por flanco para a nona e décima peça

Fonte: O autor (2021).

A Figura 69 mostra um exemplo do perfil efetivo da raiz da rosca obtida por meio do método de penetração de flanco. O resultado corresponde a nona peça rosqueada e o valor observado foi $Sa = 10,3 \mu m$. Por meio deste exemplo verifica-se que não houve considerável presença de picos resultantes de aderência concentrada de materiais na raiz da rosca.



Figura 69 - Perfil efetivo da raiz do filete com penetração de flanco

Fonte: O autor (2021).

A Figura 70 mostra o perfil 2D no centro da raiz do filete para a nona peça rosqueada por meio do método de penetração de flanco. Neste caso a profundidade do perfil Pt foi de 16,44 µm. Salienta-se que este valor foi consideravelmente menor que o obtido pelo método de penetração radial.



Figura 70 - Perfil 2D no centro da raiz do filete para nona peça rosqueada por meio do método de penetração de flanco

A Figura 71 apresenta um exemplo de filete obtido por meio do método de penetração incremental para a décima segunda peça. Observa-se um aspecto superficial semelhante em ambos os lados do filete caracterizando deste modo o método de penetração empregado, que ocorre por meio da alternância do corte. Também boa qualidade foi observada na raiz do filete. Por meio do microscópio eletrônico de varredura verificou-se que o ângulo entre os flancos era 60.1° superior ao teoricamente ideal para a rosca métrica que é de 60°. No entanto, esta peça foi aprovada pelo calibrador.



Figura 71 - Filete gerado por meio do método de penetração incremental para a décima segunda

Fonte: O autor (2021).

A Figura 72 apresenta o perfil efetivo da raiz obtida por meio do método de penetração incremental. O resultado corresponde a décima segunda peça rosqueada e o valor observado foi $Sa = 9,6 \mu m$. Para este método também não houve concentração de aderência significativa de materiais. É importante ressaltar que foram usinadas três peças a mais que o método de flanco e apesar disso, o método de penetração incremental apresentou valor menor de rugosidade.

Figura 72 - Perfil efetivo no centro da raiz do filete para décima segunda peça rosqueada por meio da penetração incremental



Fonte: O autor (2021).

A Figura 73 mostra o perfil 2D no centro da raiz do filete para a décima segunda peça por meio do método de penetração incremental.





Fonte: O autor (2021).

Nesse caso, a profundidade do perfil Pt foi de 25,11 µm. Este valor é próximo ao encontrado para o avanço de flanco, e consideravelmente menor que o resultante do método radial.

A Figura 74 mostra a superposição das imagens do perfil da rosca e da ferramenta para a usinagem desta peça. Pode-se observar que o perfil da ferramenta desgastada é reproduzido no filete da rosca usinada.

Figura 74 - Sobreposição da ferramenta sobre o filete da rosca obtida por meio do método de penetração incremental



Fonte: O autor (2021).

Durante a usinagem da próxima peça, a ferramenta continuou se desgastando, alterando o perfil da rosca usinada conforme apresentado na Figura 75. Neste caso, observa-se que o acabamento principalmente do flanco oposto foi comprometido. O fluxo do cavaco para esta situação também pode ter prejudicado a formação do filete. Portanto, devido às alterações no perfil da rosca, esta peça foi reprovada após a verificação com o calibrador.



Figura 75 – Perfil da rosca alterada pelos desgastes da ferramenta

4.10 Influência do método de penetração sobre a microdureza da peça

A Figura 76 ilustra os valores de microdureza medidos no flanco da rosca para as últimas peças aprovadas e obtidas pelos diferentes métodos de penetração (radial, de flanco e incremental). Valores máximos de microdureza foram obtidos para o avanço radial logo abaixo da superfície rosqueada. As alterações da microdureza observadas durante o rosqueamento são decorrentes de efeitos térmicos e mecânicos. A intensidade das forças geradas é muito maior para o método radial, resultando em uma superfície com microdureza muito superior à do núcleo da peça. Além disso, mais atrito é gerado quando empregado o método de penetração radial uma vez que o corte é executado com ambas as arestas de corte. Conforme explicado por Saï *et al.*, a dureza da superfície aumenta pois a tensão de escoamento da camada superficial cresce com a deformação promovendo o encruamento, o qual

Fonte: O autor (2021).

depende da intensidade do atrito entre a ferramenta de corte e a peça. Nesse caso, para o método de penetração radial a maior microdureza foi de 394 HV. Com o aumento da profundidade de medição, a microdureza diminuiu gradualmente e atingiu a dureza do núcleo 270 HV na profundidade de 640 µm. Para o rosqueamento por meio do método de penetração de flanco a microdureza logo abaixo da superfície foi de 335 HV e gradualmente diminuiu para a dureza do núcleo. O encruamento, quando aplicado o método de flanco, foi menor em comparação com o método de penetração radial devido ao menor atrito gerado e menor penetração de calor na camada superfície foi próxima do valor encontrado para o avanço de flanco. No entanto, rapidamente diminuiu para a dureza do núcleo com o aumento da profundidade. Este resultado indica que o avanço incremental reduz os efeitos térmicos e mecânicos na superfície rosqueada.



Figura 76 - Microdureza em função do método de rosqueamento empregado

Fonte: O autor (2021).

105

4.11 Método de flanco modificado

A partir dos resultados das seções anteriores percebeu-se que a vida da ferramenta e a qualidade das roscas obtidas para o método de flanco foram comprometidas principalmente devido ao contato da aresta secundária com o flanco oposto do filete. Uma maneira de minimizar este problema é o emprego do método de flanco modificado. A Figura 77 ilustra o caso descrito, onde se vê o número de passes e o ângulo proposto de 1°. Por meio deste método experimentou-se duas possibilidades, sendo a de profundidade constante (A) e a de seção constante (B). As setas indicam o ângulo de afastamento da aresta secundária da ferramenta. Nota-se que esta aresta durante os vários passes para a abertura do filete não toca diretamente sobre a peça. Somente no último passe é que a ferramenta assume toda a área do filete.

Figura 77 – Penetração por flanco modificado com profundidade constante (A) e seção constante (B)



Fonte: O autor (2021).

4.11.1 Profundidade de corte constante

A Figura 78 apresenta a ferramenta utilizada por meio do rosqueamento através do método de flanco modificado com a profundidade de corte constante. A imagem é resultado após a usinagem da sétima peça, onde se percebe que ocorreu desgaste mais pronunciado mais próximo à ponta da ferramenta.



Figura 78 - Rosqueamento da sétima peça por meio do flanco modificado com profundidade constante

Fonte: O autor (2021).

A Figura 79 ilustra a ferramenta após a usinagem da décima quarta peça. Torna-se evidente o elevado desgaste na ponta da ferramenta (A) e também o desgaste de entalhe (B). Estes provocaram o refugo da peça usinada por esta ferramenta. Estas formas de desgaste foram as mesmas encontradas para o método de flanco convencional, entretanto as suas progressões foram menos acentuadas e isto permitiu a usinagem de um maior número de peças. O emprego deste método possibilitou o rosqueamento de 13 peças.



Figura 79 - Rosqueamento da décima quarta peça por meio do flanco modificado com profundidade constante

Fonte: O autor (2021).

A Figura 80 mostra a imagem do cavaco para o último passe da primeira peça para o caso da profundidade constante. Vê-se nesta figura o lado anterior e também o posterior do cavaco, sendo que o lado liso é o que desliza sobre a superfície da ferramenta. Observa-se que o lado oposto apresenta aspecto mais rugoso.



Figura 80 - Cavaco obtido para a primeira rosca

A Figura 81 ilustra o cavaco do último passe para a décima sétima peça. Com o aumento do número de peças rosqueadas, observou-se a aderência do material da peça sobre a superfície do cavaco. Além disso, houve preenchimento dos espaços entre as lamelas (A e B), também nota-se pontos de adesão nas superfícies mais proeminentes do cavaco (C).





Fonte: O autor (2021).

Fonte: O autor (2021).
4.11.2 Seção de corte constante

A Figura 82 é resultado da usinagem da terceira peça por meio do método de penetração modificado com a seção de corte constante. Nesta é notório a aderência de materiais ao longo da aresta de corte. Os materiais aderidos foram identificados por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Foram confirmadas as presenças de elementos químicos da peça (Fe, Cr, Mn, Ni) sobre a ferramenta. A figura mostra apenas a aresta principal de corte, uma vez que o lado oposto da ferramenta devido ao ângulo modificado, não apresentava pontos com adesão de material.

Figura 82 - Rosqueamento da terceira peça por meio do flanco modificado com seção de corte constante



Fonte: O autor (2021).

A Figura 83 mostra a ferramenta obtida pelo mesmo método para a sétima peça. As aderências mostradas na figura anterior aumentaram com o número de passadas a cada peça usinada. No corte da sétima rosca o material aderido foi removido durante o processo arrancando parte do revestimento do substrato do metal duro, expondo no ponto 1 o elemento Co do substrato e Ni da peça (45,78% e 23,38% respectivamente). Também no ponto 2 foram expostos os elementos do substrato da ferramenta W e Co (67,49% e 7,35%, respectivamente).



Figura 83 - Rosqueamento da sétima peça por meio do flanco modificado com seção de corte constante

Fonte: O autor (2021).

A Figura 84 apresenta o resultado da ferramenta utilizada na usinagem da décima sexta peça. Por meio da mesma é possível verificar a marca de desgaste ao longo do flanco da ferramenta. O desgaste foi mais pronunciado próximo à ponta da ferramenta. Neste caso, no ponto 1 é exposto o substrato da ferramenta como comprovado pela presença dos elementos Co e W (8,6% e 81,67%, respectivamente). Também o raio de ponta sofreu dano considerável. Esta foi a última peça aprovada por meio do calibrador passa-não-passa. Estas formas desgastes seguiram se acentuando e resultaram no fim de vida da ferramenta durante a usinagem da próxima peça.



Figura 84 - Rosqueamento da décima sexta peça por meio do flanco modificado com seção de corte constante

Fonte: O autor (2021).

A Figura 85 é exemplo da qualidade da superfície obtida pelo método de penetração de flanco modificado. A imagem é resultado da décima sexta peça rosqueada por meio da seção de corte constante. O flanco (A) gerado pela aresta principal de corte apresenta sulcos paralelos resultantes de desgastes da ferramenta. Isso não ocorre no flanco oposto (B) que apresenta melhor aspecto de acabamento da superfície. Aspecto semelhante é observado na raiz do filete. Apesar do visível desvio na crista do filete, a rosca foi aprovada na verificação com o calibrador da rosca.

Figura 85 - Qualidade superficial da rosca obtida por meio do método de flanco modificado com seção constante para a décima sexta peça



Fonte: O autor (2021).

A Figura 86 apresenta a imagem do filete da décima sétima peça rosqueada por meio da seção constante. Em 86 B é mostrada a ferramenta utilizada nesta operação, durante a qual foi atingido o seu fim de vida. Neste caso, o perfil desgastado da ferramenta repercutiu sobre a superfície gerada. Consequentemente, esta peça não foi aprovada pelo calibrador passa-não-passa.

Figura 86 - Qualidade da superfície (A) e ferramenta utilizada (B) para seção constante na décima sétima peça



Fonte: O autor (2021).

4.11.3 Grau de recalque para o flanco modificado

A Tabela 8 apresenta os valores do grau de recalque referentes ao último passe realizado nas peças rosqueadas pelo método de flanco modificado, empregando a condição de profundidade de corte constante e também a de seção constante. A tabela mostra que os valores do grau de recalque cresceram para ambos os casos em função do número de roscas executadas. Isso pode ser atribuído aos desgastes da ferramenta e a tendência ao encruamento do aço inoxidável austenítico durante o processo de usinagem. Desde a primeira peça os valores encontrados foram maiores para a condição da profundidade constante, sendo que estes mantiveram-se próximos aos valores encontrados para o flanco convencional até a sétima peça. Observa-se também que o grau de recalque praticamente triplicou entre a primeira e a décima terceira peça rosqueada para esta condição. Os valores do grau de recalque verificados para a condição da seção constante foram menores do que a condição da profundidade de corte constante quando comparados para o mesmo número de peças rosqueadas. Isto é resultado do

menor desgaste na ponta da ferramenta, uma vez que na condição da seção de corte constante há uma menor variação dos esforços ao longo dos passes, não havendo forças excessivas durante os passes finais na raiz do filete. Contrariamente, na condição de profundidade de corte constante ocorrem forças progressivamente maiores a cada passe realizado provocando maior desgaste na ponta da ferramenta.

			Peça						
Flanco modificado			1	3	7	13	16		
Profundidade constante	u de	lue R <i>c</i>	1,31	3,10	3,77	4,15			
Seção constante	Grau	Recalo	1,27	2,65	2,96	3,20	4,35		

Tabela 8 - Grau de recalque em função do método de rosqueamento durante o último passe para cada peça apresentada

Fonte: Autoria própria (2021).

5 CONCLUSÕES

Considerando a realização da análise referente à influência dos métodos de penetração (radial, flanco e incremental) no rosqueamento por torneamento externo do aço inoxidável austenítico, e seguindo a metodologia apresentada assim como os resultados expostos, é possível concluir que:

 O cavaco obtido pelo método de penetração radial foi o que apresentou maiores valores de grau de recalque para o mesmo número de peças usinadas, quando comparado aos métodos de penetração de flanco e incremental. Para o método de penetração radial, cuja secção do cavaco é em forma de V, ocorre uma maior protuberância na região central com o aumento do número de passes. Neste caso, a atuação da ferramenta pela ponta e ambos os lados simultaneamente dificulta o escorregamento do cavaco e aumenta a sua deformação. Durante os experimentos, o cavaco em formato de hélice longa foi o predominante. Outro aspecto em comum foi o perfil serrilhado ao longo das bordas, característica dos cavacos cisalhados. A cinemática durante a formação do cavaco influenciou diretamente sobre a sua geometria, uma vez que diferentes velocidades ocorrem durante o deslocamento deste sobre a superfície de saída da ferramenta (lados interno e externo do cavaco), alterando sua curvatura lateral. Cavacos similares foram obtidos durante o rosqueamento por meio dos métodos de penetração de flanco e incremental tendo como principais diferenças o diâmetro das hélices geradas e o passo.

No primeiro passe, como a profundidade de corte é inferior ao raio de ponta da ferramenta, o contorno da seção do cavaco se apresenta como um segmento de arco. A seção do cavaco é similar para os três métodos de penetração. A partir do próximo passe com a maior penetração da ferramenta a seção do cavaco passa a ser formada por diferentes regiões que resultam em diferenças nas forças de usinagem em função do método de penetração. O método de penetração radial foi o que apresentou maiores forças de corte e de avanço desde o princípio do rosqueamento, seguido do método de penetração de flanco enquanto o método de penetração incremental resultou em valores menores. Para a primeira peça usinada a força de corte aumenta a cada passe realizado. Isto acontece quando se emprega a profundidade de corte constante e consequentemente ocorre o aumento da área de corte à medida que os passes se sucedem. Entretanto, este aumento foi maior para o método radial, uma vez que com o aumento do número de passes se evidencia a interferência entre os cavacos na superfície de saída da ferramenta. Para todos os métodos de penetração empregados, tanto as forças de corte como as forças de avanço cresciam a cada peça rosqueada devido aos desgastes da ferramenta.

• As imagens térmicas foram eficazes para mostrar como as regiões ao redor da zona de corte se aquecem. O aquecimento excessivo dessas regiões foi um bom indicador sobre o estágio de vida da ferramenta, principalmente quando o desgaste se aproxima de falha catastrófica. A temperatura máxima aumentou em função do número de peças usinadas. Para o método de penetração radial a temperatura aumentou de forma quase linear até a sexta No entanto, para a sétima peça a temperatura máxima foi peca. consideravelmente mais elevada, culminando com o fim da vida útil da ferramenta. As maiores temperaturas observadas durante o método de penetração radial são decorrentes da geração do cavaco em forma de V que resulta em maiores dificuldades em seu escoamento e consequentemente menor dissipação do calor. As temperaturas medidas durante o rosqueamento pelo método de flanco apresentaram valores intermediários entre aqueles encontrados para os métodos radial e incremental para o mesmo número de peças usinadas. O fim da vida útil da ferramenta ocorreu para temperaturas diferentes para os três métodos, porém foi notório o aumento da temperatura durante a usinagem das últimas peças rosqueadas. Portanto, a termografia por infravermelho é um método que pode ser empregado com sucesso no monitoramento das ferramentas de rosqueamento.

 As condições críticas que ocorrem durante o processo de rosqueamento do aço inoxidável, como cavacos abrasivos, altas temperaturas, adesão e encruamento do material causaram de uma forma geral desgaste severo da ponta da ferramenta, desgaste de flanco e desgaste de entalhe. Além disso, houve aderência do material da peça sobre esta região. Portanto, o desgaste de flanco não é o único modo de falha da ferramenta no rosqueamento do aço austenítico AISI 304L. Desgaste da ponta da ferramenta, desgaste de entalhe e aderência de materiais da peça também ocorrem e têm efeito adverso na qualidade da rosca. Portanto, os efeitos combinados dos modos de desgaste da ferramenta causam desvios do perfil da rosca e devem ser levados em consideração para a determinação da vida útil da ferramenta. O método de penetração tem influência direta na vida útil da ferramenta. Em comparação com o avanço radial, a vida útil da ferramenta foi 28,57% e 71,43% maior para o avanço de flanco e incremental, respectivamente. O emprego do método de flanco modificado (utilizando folga de 1°) propiciou uma maior vida de ferramenta em comparação aos demais, representando um aumento de 44,44% em relação ao método de flanco tradicional. Além disso, quando se empregou a seção de corte constante o desgaste na ponta da ferramenta foi reduzido, possibilitando a usinagem de um maior número de peças correspondendo a um aumento de 23,08% em comparação com a condição onde a profundidade de corte foi mantida constante.

• A qualidade da peça é afetada por desgastes ocorridos tanto nas superfícies de folga da ferramenta como na sua ponta durante o processo de rosqueamento. A progressiva alteração da geometria da ferramenta gerada pelo desgaste e aderências afeta negativamente o perfil das roscas. Foram observadas algumas estrias na direção radial no flanco dos filetes, sendo que maior distanciamento e profundidade das estrias ocorreu a partir da raiz do filete para o flanco. Essas estrias são provocadas por microlascamentos, aderências de materiais sobre a aresta de corte da ferramenta e por partículas soltas entre peça e ferramenta. Elas foram mais evidentes para o método de penetração radial, mas também estiveram presentes em menor proporção para os métodos de flanco e incremental. Para o método de penetração radial foi possível perceber no centro da raiz do filete maiores amplitudes no perfil correspondente entre as distâncias de picos e vales, quando comparado aos demais métodos de penetração para o mesmo número de peças rosqueadas.

Para o método de flanco foi observado melhor acabamento sobre o flanco do filete que é gerado pela aresta principal de corte em comparação ao gerado pela aresta secundária. Esta situação não ocorreu para o método de penetração de flanco modificado e para o incremental. Valores máximos de microdureza foram obtidos para o avanço radial logo abaixo da superfície rosqueada. As alterações da microdureza observadas durante o rosqueamento são decorrentes de efeitos térmicos e mecânicos. A intensidade do calor gerado na zona de corte é muito maior para o método radial, resultando em uma superfície com microdureza muito superior à do núcleo da peça. O rosqueamento por meio dos métodos de penetração radial, de flanco e incremental provocaram o encruamento do material, elevando a microdureza do filete de 270 HV para 394 HV, 335 HV e 334 HV, respectivamente. Para o avanço incremental a microdureza logo abaixo da superfície foi próxima do valor encontrado para o avanço de flanco. No entanto, rapidamente diminuiu para a dureza do núcleo com o aumento da profundidade. Este resultado indica que o avanço incremental reduz os efeitos térmicos e mecânicos na superfície rosqueada.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

Após a revisão do estado da arte, estabelecimento da metodologia dos experimentos e a realização dos mesmos, observou-se algumas lacunas e consequentes sugestões para a continuidade do estudo, estando estas citadas abaixo:

 Analisar a influência dos métodos de lubrirefrigeração sobre o processo de rosqueamento de aços inoxidáveis austeníticos.

 Avaliar o efeito dos métodos de penetração sobre a resistência à fadiga de peças rosqueadas de aço inoxidável austenítico.

Verificar o efeito dos métodos de penetração sobre as vibrações no processo de rosqueamento interno.

Monitorar a vida da ferramenta durante o processo de rosqueamento empregando vários sensores.

 Avaliar a tensão residual induzida pelo método de penetração durante o rosqueamento do aço inoxidável 304 L.

• Simular as temperaturas durante o processo de rosqueamento empregando o método de elementos finitos.

REFERÊNCIAS

ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n.7-8, p. 782-800, 2006.

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO, K. Effect of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 143–144, 2003, (https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00321-2).

AKYILDIZ, H. K. Evaluating of cutting forces in thread machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1601–1612, 2013, (http://doi.org/ 10.1007/s00170-013-4957-2).

ALVES, J. M. Análise da transformação martensítica e tensão residual em um aço inoxidável 304L. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

ARTOZOUL, J.; LESCALIER, C.; BOMONT, O.; DUDZINSKI, D. Extended infrared thermography applied to orthogonal cutting: Mechanical and thermal aspects, **Applied Thermal Engineering, Elsevier V. 64, pp.441 – 452,** March 2014,

(https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.057).

ASAL, O.; DILIPAK, H.; CANLAR, B.; GULDAS, A. Experimental Investigation of The Cutting Forces In The Machining of AISI 4140 Steel, **By Using The CNC Turning Machine**; 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327466511>.

ASPINWALL, D. K.; MANTLE, A. L.; CHAN, W. K.; HOOD, R.; SOO, S. L. Cutting temperatures when ball nose end milling γ-TiAl Intermetallic Alloys. **CIRP Annals - Manufacturing Technology,** v. 62 (1), p. 75-78, 2013, (https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.007).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 6175 Usinagem, Processos Mecânicos,** Rio de Janeiro: ABNT, 2015. ISBN 978-85-07-05672-0.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 5876**. **Roscas, terminologia,** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3002.1:** Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra cavaco. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 261 - Rosca métrica ISO de uso geral - Plano geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASTAKHOV, V. P. Tribology of metal cutting. **Publisher: Elsevier Science**, 392p., 2007.

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B. B.; SARAVAN, T.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, .T. Infrared thermography for condition monitoring – a review, Infrared Physics & Technology, v. 60, p. 35-55, 2013, (https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006).

BRALLA, J. G. **Handbook of product design for manufacturing.** Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1988.

BUNSHAH, R. F. Handbook of hard coatings - deposition technologies. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Publications, 2001.

BURUAGA, M. S.; SOLER, D.; ARISTIMUNO, P. X.; ESNAOLA, J. A.; ARRAZOLA, P. J. Determining tool/chip temperatures from thermography measurements in metal cutting. **Appl Therm Eng 145**, v. 305, p. 314, 2018, (http://doi.org/10.106/j.applthermaleng.2018.09.051).

CASTRO, H. F. F.; BARROS, W. S. Sistema de Calibração Para Avaliar os Erros Cinemáticos e de Atraso do Servoacionamento de Tornos CNC Através de um Laser Interferométrico, **II Cimec – Congresso Internacional de Metrologia Mecânica**, R.N., 2011.

CHANDRASEKARAN H, JOHANSSON J, O. Chip flow and notch wear mechanisms during the machining of high austenitic stainless steels. **CIRP Annals-Manufacturing.Technology**, 43(1):101105 (1994), (https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62174-X).

CIUCCIO, R. L.; LIRA, R. A. C.; GARBULHA, D.; PASTOUKHOV, V. Application of the process of forming a cold rolling mechanics in screws fixing prostheses dentals. **Innov. Implant J., Biomater. Esthet. (Online)**, São Paulo, v. 6, n. 3, p. 33-37, set./dez. 2011.

ÇOLAC, O.; KURBANOGLU, C.; KAYACAN, M. C. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials & Design**, Oxford, v. 28, n. 2, p. 657-666, 2005.

COPPINI, N. L. **Usinagem Enxuta** – Gestão do Processo. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2015.

DA SILVA, L. R. R.; FILHO, A. F.; COSTA E. S.; PICO, D. F. M.; SALES W.F.; GUSSER, W. L.; MACHADO, A. R. Cutting temperatures in end milling of compacted graphite irons. **CIRP Annals, Manufacturing Technology**, v. 26, p. 474–484, 2013,

(https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.056).

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; MENGESHA, M. S. Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces and cutting temperature. **Production Engineering – Research and Development**, v. 6, n. 4-5, p. 329-338, 2012.

DEVOTTA, A. M. Characterization & modelling of chip flow angle & morphology in 2D & 3D turning process, Licentiate Thesis, Production Technology. University West, 2015.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, Nona Edição, 2014.

DINIZ, A.; MACHADO, A. R.; CORREA, J. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. Int. J. Adv. Manuf. Technol., Springer-Verlag, Londres, 2016.

EZUGWU, E. O., OKEKE, C .I, MACHADO, A. R. High speed threadindo of inclusion-modified steels with coated carbide tools, **Journal of Materials Processing Technology** 86 (1999) 216 - 225.

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C. I. Tool life and wear of TiN coated tools in an intermittent cutting operation, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 116, p. 10–15, 2001.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

FETULLAZADE, E.; AKYILDIZ, H. K.; SARITAS, S. Effects of the machining conditions on the strain hardening and the residual stresses at the roots of screw threads. **Materials & Design**, v. 31(4), p. 2025-2031, 2010. (https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.023).

FLIR SYSTEMS, 2017. Acesso em: março, 2018. < https://www.flir.com/news-center/press-releases/flir-launches-five-new-thermal-cameras-at-ces-2017/>.

FROMETIN, G.; POULACHON, G.; MOISAN, A. Thread forming tapping of alloyed steel. **ICME Proceedings**, Nápoles, Itália, p. 15-18, 2007.

GROOVER, M. P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons, 2020.

GUNAY, M. Investigation of the effects on screw thread of infeed angle during external threading. **Gazi University Journal of Science,** GUJ Sci, v. 24 (1), p. 153 – 160, 2011. Disponível em: <www.gujs.org>. Acesso em: 11/11/2016.

HE, H. B.; LY HY; YANG, J. A study on major factors influencing dry cutting temperature of AISI 304 stainless steel, **Int. J. Precis. Eng. Manuf.,** v. 18, p. 1387–1392, 2017, (https://doi.org/10.1007/c12541.017.0165.6)

(https://doi.org/10.1007/s12541-017-0165-6).

HOPPE, S. Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting. (Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar - Berichter: Univ. Prof. Dr.-Ing. F. Klocke; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff). Dezembro, 2003.

JIANG, L.; PARO, J.; HANNINEN, H.; KAUPPINEN, V.; ORASKARI, R. Comparison of grindability of IPED austenitic 316L duplex 2205 and super duplex 2507 and as cast 304 stainless steels using alumina wheels. **Journal of Materials Processing Technology,** v. 62, p. 1–9, 1996, (doi.org/10.1016/0924-0136(95)02199-x).

KAFKAS, F. An Experimental Study on Cutting Forces in the Threading and the Side Cut Turning With Coated and Uncoated Grades. Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme, Materials Science, August 2010, (doi:10.1115/1.4001867); ID: 109775171.

KENNAMETAL. Lathe tooling. Catalog, 2014.

KHANI, S.; RAZFAR, M. R.; HAGHIGHI, S. S.; FARAHNAKIAN, M. Optimization of microtextured tools parameters in thread turning process of aluminum 7075 aerospace alloy. **Materials and Manufacturing Processes**, p. 1–9, 2020.

KHOSHDARREGI, M. R.; ALTINTAS, Y. Generalized modelling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** v. 98, p. 21–32, 2015A.

KHOSHDARREGI, M. R.; ALTINTAS, Y. Generalized modelling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 98, p. 21-32, 2015B. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ijmactool>.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1**: cutting. Londres: Editora Springer, 2011.

KOEPFER, C. Rolling threads has advantages. Production Machining, 2003.

KOLEVA, S.; ENCHV, M.; SZECSI, T. Compensation of the deviations caused by mechanical deformations during machining of threads. **Manufacturing engineering Society International Conference 2017**, MESIC, Vigo (Pontevedra), Espanha, 2017. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/procedia>. KONG, J.; XIA, Z; XU, D.; HE, N. Investigation on notch wear mechanism in finish turning pure iron material with uncoated carbide tools under different cooling/lubrication conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, p. 97-105, 2016, (https://doi.org/10.1007/s00170-015-8171-2).

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. Fertigungsverfahren - drehen, fräsen, bohren. **Springer Verlag.** 7^a Edição. Berlin, 2002.

KORKUT, I.; KASAP, M.; CIFTCI, I.; SEKER, U. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Material & Design,** v. 25, p. 330–305, 2004, (doi.org/10.1016/j.matdes.2003.10.011).

KULKARNI, A. P.; JOSHI, G. G.; KAREKAR, A.; SARGADE, V.; G Investigation on cutting temperature and cutting force in turning AISI 304 austenitic stainless steel using AITiCrN coated carbide insert, International **Journal of Machining and Machinability of Materials,** v. 15(3-4), p. 147-15, 2014, (https://doi.org/10.1504/IJMMM.2014.060546).

KYOCERA. Cutting tools, Advancing Productivity, 2014 – 2015.

LAWAL, S. A.; SULE, I. S.; NAMESSAN, N. O.; UGHEOKE, B. I.; ABUTU, J. Evaluation of Cutting Variables on Surface Roughness and Chip Formation in Turning AISI 304 L Steel With Coated Carbide Insert. **Journal of NI MechE**, v. 7, nº. 1, p.23–34, Impresso na Nigéria, 2017, ISSN 2141-2987. Disponível em: http://repository.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/1654>.

LIN, W. S.; LEE, B. Y.; WU, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 108, p. 286–293, 2001,

(https://doi.org/10.1016/S924-013(00)00835-9).

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. e DA SILVA, M. B. **Teoria da** usinagem dos materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MACIEL, D. T.; FILHO, S. L. M. R.; BRANDÃO, L. C. Análise dos processos de roscamento por usinagem e conformação na liga Ti-6AI-4V, 8° **COBEF,** Salvador, Bahia, 2015.

MAHDAVINEJAD, R. A.; SAEEDY, S. Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. **Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 36, ed. 6, p. 963–979, dezembro 2011.

MANERA, R. S.; RODRIGUES, A. R.; MATSUMOTO, H.; GALLEGO, J. – Influence of the external threading process at high speed cutting on turning of dental implants. **20th International Congress of Mechanical Engineering**, p. 15-20, Gramado, Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-2826.pdf>.

MAURORRO, A.; TSIVOULAS, D.; GU, Y.; BURKE, M. G. Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L Stainless Steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 151, p. 35-44, março 2017, (https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.02.004).

MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Guide to threading tools. Disponível em: <https://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/catalog_en/c007a_g.pdf >. Acesso em: 05/03/2021.

MITUTOYO. Disponível em:

https://www.mitutoyo.com.br/micrometro-ext-dig-0-25mm-0001mm-coolant-pro of-c-ponta.html>. Acesso em: 12/03/2021.

NALBANT, M; GOKKAYA, H.; TOKTAS, I.; SUR, G.The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD – and CVD - coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in cnc turning and its prediction using artificial neural networks. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 25, p. 211-223, 2009, (https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.11.004).

NALBANT, M.; GUNAY, M.; YILDIZ, Y. Modelling of the effect of different infeed angles and cutting areas on the cutting forces in external threading, Turkish J. Env. Sci. 32 (2008), 153 – 161, Tubitak.

NORONHA, A. M; SAID, L. F. B.; AMES, J. P.; SILVA, J.C. ABRÃO, A. M. Development of a chip breaker for external threading of modified ABNT 4133 Steel. **ISSN 1517-7076 - 11603**, v. 20, n° 02, p.353-367, Rio de Janeiro, Junho de 2015,

(https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0036).

PALMER, S. **The Right Choices in Tooling and Technique Can Optimize the Thread Turning Process**, Threading On A Lathe, Disponível em: <www.mmsonline.com/articles/threadingonalathe>. Acesso em: 19/10/2016.

PAYLING, R. **Considerações sobre a usinagem do aço inoxidável.** Usinagem Brasil, 2016. Disponível em: http://www.usinagem-brasil.com.br/10562-consideracoes-sobre-a-usinagem-d e-acos-inoxidaveis/>. Acesso em 21/10/2016.

PINTO, N. F. Análise dos esforços de usinagem no roscamento do aço ABNT 1045 quando utilizados diferentes movimentos de ajustes da

ferramenta. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei, 2015.

PRODUCTS. **Mitsubishicarbide.** Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/external_turning_tools/>. Acesso em: 15/06/2020.

PRASAD, K. S.; RAO, C. S.; RAO, D. N. A Review on welding of AISI 304L austenitic stainless steel. **Journal for Manufacturing Science and Production,** v. 14. p.1-11, 2015, (https://doi.org/10.1515/jmsp-2012-0007).

PRASAD, K. S.; PRABHA, K. A.; KUMAR, P. V. S. G. Condition monitoring of turning process using infrared thermography technique – an experimental approach. **Infrared Physics & Technology**, v. 81, p. 137–147, 2017, (https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.023).

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering.** New York: McGraw-Hill Handbooks, 2000.

RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T. Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng., Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, 2007.

SAOUBI, R. M.; OUTEIRO, J. C.; CHANGEUX, B.; LEBRUN, J. L.; DIAS, A. M. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 96. p. 225-233, 1999,

(https://doi.org/10.1081/MST-120005959).

SANDVIK, COROMANT. Manual técnico, Tecnologia da Usinagem dos Metais, 2010.

SANDVIK, COROMANT: El torneado de rosca, Guia de Aplicacion, 1995.

SECO. Torneamento. Catálogo & Guia Técnico, 2009.

SHAW, M. C. Metal cutting principles. Great Britain: Clarendon Press, 2005.

SHARMA, G.; SHRIVASTVA, S. Turning Operation of AISI 304L Steel using Taguchi Technique, Volume 3, Issue 9, September, 2018, International Journal of Innovative Science and Research Technology, ISSN n^o: 2456-2165.

SILVA, A.; MEI, P. Aços e ligas especiais. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

SMITH, G. T. Advanced Machining: the handbook of cutting technology, IFS Publications, 1989.

SMITH, G. T. **Cutting tool technology:** industrial handbook. Springer Verlag, London, Limited 2008.

SOLER, D.; ARISTIMUNO, P.; BURUAGA, M. S.; GARAY, A.; ARRAZOLA, P. New calibration method to measure rake face temperature of the tool during dry orthogonal cutting using thermography. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, p. 74-82, 2018,

(https://doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.03.056).

SONG, Z.; WANG, W. On processing methods and skills of trapezoidal thread by means of CNC lathe. International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms – MMSA, 2018.

SSINA – SPECIALITY STEEL INDUSTRY OF NORTH AMERICA. **Stainless** steel for machining. 1995.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II, 4. Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.

SUMITOMO. Ferramentas de corte de alto desempenho. Catálogo Ferramentas de Corte, 2015 – 2017.

SUNDAY, J. O.; ALBERT, A. A.; RASHEE, S. O. Experimental Prediction and Optimization of Material Removal Rate During Hard Turning of Austenitic 304L Stainless Steel. **Journal of Science and Technology**, v. 36, n° 2, p. 34-49, 2016,

(http://dx.doi.org/10.4314/just.v36i2.4).

TEIXEIRA, L.; BRANDÃO, L; FREITAS, S.; FREITAS, T.; COELHO, W.; LAURO, C. Influência do ângulo de ataque nos esforços de corte e acabamento superficial de roscas usinadas externas, 10.26678/ABCM. **COBEF 2017. COF 2017-**1048, 201, 2017,

(http://doi.org/10.26678 /ABCM.COBEF2017.COF2017-1048).

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting.** Boston: Butterworths-Heinemann, 2000.

WANG B. and LIU Z. Serrated chip formation mechanism based on mixed mode of ductile fracture and adiabatic shear, **Proc. Inst. Mech. Eng. Part B**, **J. Eng. Manuf**., v. 228, n. 2, pp. 181–190, 2014.

WECKENMANN, A., **10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing** – **CAT 2007**, Measuring Science and Technology, Vol. 19, Nr. 6, United Kingdom, 2008,

(http://doi10.1088/0957-0233/19/6/060101).

XAVIOR, A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p.900-909, 2009.

XIONG, Y. Cryorolling effect on microstructure and mechanical properties of Fe-25Cr-20Ni austenitic stainless steel, **Material and Design**, v. 88, p. 398-405, 2015.

ZGÓRNIAK, P.; GRDULSKA, A. Investigation of temperature distribution during milling process of AZ91HP magnesium alloys. **Mechanics and Mechanical Engineering**, v. 16, p.33-40, 2012.

WECKENMANN, A., 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing – CAT 2007. **Measuring Science and Technology**, v. 19, n° 6, Reino Unido, 2008,

(http://doi10.1088/0957-0233/19/6/060101).

PUBLICAÇÕES

COSTA, C. E.; POLLI, M. L. Effects of the infeed method on thread turning of AISI 304L stainless steel, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43, 253, 2021, (https://doi.org/10.1007/s40430-021-02978-7).

COSTA, C. E.; POLLI, M. L. The influence of temperature on tool life in threading of AISI 304L austenitic stainless steel. **25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Uberlândia, MG, Brazil, October 20-25, 2019.

COSTA, C. E.; POLLI, M. L.; LARA, A. P. Análise da Força de Corte e Vida da Ferramenta no Rosqueamento Externo do Aço Inoxidável 304 L: In: Martins, Fábio.; Junior, Laércio Javarez.; Villanova, Rodrigo Lupinacci Villanova. (Org.). A Engenharia Mecânica na UTFPR. 1 ed. Ponta Grossa: Texto e Contexto, 2019, v. 1, p. 44-55.

COSTA, C. E.; ARRUDA, J. R.; DIAS, M. P.; LARA, A. P.; POLLI, M. L. Análise da usinabilidade dos aços inoxidáveis ABNT 304 e ABNT 420 durante o processo de torneamento. In: 23 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat, 2018, Foz do Iguaçu. Anais do 23° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECiMat, 2018.

COSTA, C. E.; POLLI, M. L. Influence of the infeed method on tool and surface finish in austenitic stainless steel threading machining. **24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Dezembro 3-8, 2017, Curitiba, PR, Brasil.

COSTA, C. E.; POLLI, M. L.; SEIXAS, E. S. Tendência ecológica da usinagem na produção de peça a seco. In: VI Congresso Online de Engenharia de Produção, 2021, Macaé/RJ. VI Congresso Online de Engenharia de Produção, 2021.

COSTA, C. E.; POLLI, M. L.; SEIXAS, E. S. Desafios na Usinagem dos aços inoxidáveis, **III ENGMATICOM**, 2021, São Paulo. Anais III Congresso Online. São Paulo: Congresse.me, v. 1, 2021.

ANEXO



ANEXO 1 - Certificado de caracterização do Aço Inoxidável 304 L.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Exemplo de medição de sinais as forças de usinagem (último passe da primeira peça para o método radial)



APÊNDICE 2 - Exemplo de medição de temperatura durante a usinagem (último passe para a terceira peça para o método radial)



Método de penetração		Resultados por número de peças					
		Valores para sétima peça					
		Fc (N)	Fa (N)	T °C	Rc		
al		780	460	670	4,75		
Radi		Número de peças aprovadas: 7					
		Rugosidade da última peça aprovada: Sa 11,9 µm					
		Microdureza da última peça aprovada: 394 (HV)					
Flanco		Valores para nona peça					
		Fc (N)	Fa(N)	T °C	Rc		
		670	310	510	3,75		
		Número de peças aprovadas: 9					
		Rugosidade da última peça aprovada: Sa 10,3 µm					
		Microdureza da última peça aprovada: 335 (HV)					
remental		Valores para décima segunda peça					
	<u>×</u>	Fc (N)	Fa(N)	Т℃	Rc		
		490	210	290	3,0		
		Número de peças aprovadas: 12					
lnc		Rugosidade da última peça aprovada: Sa 9,6 µm					
		Microdureza da última peça aprovada: 334 (HV)					
0 0		Valores para décima quarta peça					
Flanco. modificad Profund. constante		Rc: 3,77					
		Número de peças aprovadas: 14					
		Rugosidade da última peça aprovada: Sa 8,3 µm					
	1.4						
Flanco. modidicado Seção constante		Valores para décima sexta peça					
		Rc: 2,96					
		Número de peças aprovadas: 16					
		Rugosidade da última peça aprovada: Sa 7,6 µm					
	1						

APÊNDICE 3 - Quadro resumo de resultados