

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO SOBRE A QUALIDADE DOS FUROS GERADOS NA FURAÇÃO DOS  
AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO CORE® 304L E SUPER AUSTENÍTICO  
ULTRA® 904L

por

Abdiel Moguidante Vilanova

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2023

INVESTIGAÇÃO SOBRE A QUALIDADE DOS FUROS GERADOS NA FURAÇÃO DOS  
AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO CORE® 304L E SUPERAUSTENÍTICO  
ULTRA® 904L

por

Abdiel Moguidante Vilanova  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), da Escola de Engenharia (EE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim ..... DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann ..... PPGMEC / UCS

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 de Junho de 2023

## AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dr. André João de Souza, por todo o empenho exercido, dedicação, paciência, e a grande parceria nos trabalhos que desenvolvemos juntos.

Ao técnico do Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS), Guilherme Vargas Schirmer, que foi fundamental para a realização dos experimentos.

Aos colegas do PROMEC, Dr. Eng. Liu Yesukai, Eng. Rafael Pimentel, e em especial o grande amigo MSc. Eng. Émerson Passari, que me proporcionaram todo suporte necessário para atingir esse objetivo.

Aos professores da banca, pelas sugestões e conhecimento proporcionado para que este trabalho tenha obtido o melhor resultado possível.

Aos professores Dr. Walter Fontana e Dr. Fabiano Brites, que confiaram em mim desde o tempo de graduação da engenharia mecânica.

A todos colegas de trabalho da empresa Liess (Canoas, RS), em especial, o supervisor de compras Carlos Santos, o comprador João Élvio, o coordenador de desenvolvimento de produtos Eng. Adriano Perkov, o gerente da fábrica Eng. Antonio Forte, o supervisor da qualidade Vanderlei Rosa, o inspetor de qualidade Tiago Nicolau, e o supervisor de engenharia Eng. Luís Fernando, por toda a ajuda necessária no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de profissão, em especial o Eng. mecânico Maicon Hencke, que sempre foram essenciais para que juntos busquemos as melhores soluções de engenharia para garantir uma vida melhor a todos as pessoas.

Aos meus grandes amigos André, Eduardo, Micael (meu irmão) e Angélica (minha cunhada), que foram pacientes em compreender os momentos que precisei me dedicar na pesquisa, mas que estiveram sempre me apoiando.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), pelo ensino gratuito e de qualidade.

À minha família, especialmente meus pais, por serem o alicerce da minha vida.

## RESUMO

A indústria está cada vez mais preocupada com redução de custos e com a necessidade de flexibilizar os seus processos por usinagem, transformando os seus variados produtos em uma solução única com poucas modificações. Além disso, as furações de aços inoxidáveis austeníticos e super austeníticos apresentam grandes desafios devido a suas propriedades estruturais (alta tenacidade, encruamento e baixa condutividade térmica), que os tornam difíceis de serem usinados. Com este enfoque, o trabalho apresenta uma investigação comparativa da furação em cheio dos aços inoxidáveis austenítico Core® 304L e super austenítico Ultra® 904L, utilizando os mesmos níveis de parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço), e aplicando externamente um biofluido em abundância. O estudo analisou a rugosidade, o desvio de circularidade e o desvio dimensional dos furos realizados nos dois aços inoxidáveis. Os resultados mostraram que maiores velocidades de corte ( $v_c$ ) favoreceram a furação do 904L, enquanto menores  $v_c$  mostraram melhor desempenho no 304L. Maiores  $v_c$  facilitam o escoamento do cavaco, mas aumentam a temperatura na zona de corte. Cavacos não fragmentados tem maior facilidade de extração de dentro dos furos quando aplicadas maiores  $v_c$ , gerando menor rugosidade. Avanços ( $f$ ) maiores aumentam as vibrações da máquina e geram instabilidade na ferramenta durante o corte, prejudicando a rugosidade. Os desvios dimensionais e de circularidade foram maiores nas saídas dos furos no 304L e menores no 904L, pois a resistência mecânica a altas temperaturas é menor e o coeficiente de expansão térmica é maior no 304L.

**Palavras-chave:** Aço Inoxidável austenítico e super austenítico; Furação em cheio; Rugosidade; Circularidade; Desvio dimensional

## ABSTRACT

The industry is increasingly concerned about cost reduction and the need to make its machining processes more flexible, transforming its various products into a single solution with few modifications. In addition, drilling austenitic and super austenitic stainless steels presents significant challenges due to their structural properties (high toughness, work hardening, and low thermal conductivity), which make these materials difficult to cut. Then, the work presents a comparative investigation of the full drilling of Core<sup>®</sup> 304L austenitic stainless steel and Ultra<sup>®</sup> 904L super austenitic stainless steel using the same levels of cutting parameters (cutting speed and feed rate) and externally applying a biofluid in abundance. The study analyzed the surface roughness, roundness, and dimensional deviation of the holes made in both stainless steels. The results showed that higher cutting speeds ( $v_c$ ) favored drilling 904L, while lower  $v_c$  performed better on 304L. Higher  $v_c$  facilitates chip evacuation but increases the temperature in the cutting zone. Non-fragmented chips are more easily removed from inside holes at higher  $v_c$ , resulting in lower surface roughness. Higher feed rates increase machine vibrations and cause tool instability during cutting, impairing the surface roughness. Dimensional and roundness deviations were larger at the hole exit for 304L and smaller for 904L because mechanical strength at high temperatures is lower and the coefficient of thermal expansion is larger for 304L.

**Keywords:** Austenitic and super austenitic stainless steels; Full drilling; Surface roughness; Roundness error (circularity); Dimensional error

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Organização do Trabalho.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos e Super Austeníticos .....	5
2.2	Processo de Furação .....	7
2.2.1	Material e geometria da ferramenta.....	9
2.2.2	Efeitos dos parâmetros de usinagem.....	11
2.2.3	Problemas na furação de aços inoxidáveis austeníticos .....	13
2.3	Rugosidade da Superfície Usinada .....	15
2.3.1	Parâmetros estatísticos de rugosidade .....	19
2.4	Desvio Dimensional e Desvio Geométrico de Circularidade .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
4.1	Rugosidades das Paredes dos Furos .....	30
4.1.1	Efeito dos Parâmetros de Corte .....	36
4.1.2	Curva de Abbott-Firestone e Função Distribuição de Amplitudes.....	39
4.2	Desvios de Circularidade.....	44
4.2.1	Efeito dos parâmetros de corte nos desvios de circularidade .....	46
4.3	Desvios Dimensionais .....	48
4.3.1	Efeito dos Parâmetros de Corte nos Desvios Dimensionais .....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
5.1	Rugosidades.....	53
5.2	Desvios de Circularidade.....	54
5.3	Desvios Dimensionais .....	54
5.4	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	55

**REFERÊNCIAS .....56**

**APÊNDICES .....68**

**APÊNDICE A Valores Medidos das Rugosidades, Circularidades e Desvios .....68**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Microestrutura dos aços inoxidáveis: (a) austenítico 304L [Lopez et al., 2016]; (b) super austenítico 904L [Tehovnik, et al., 2014].....	6
Figura 2.2	Furação em cheio [adaptada de Tolouei-Rad e Aamir, 2021]. .....	8
Figura 2.3	Principais partes da broca helicoidal [adaptada de Tolouei-Rad e Aamir, 2021]. .....	9
Figura 2.4	Rugosidade média utilizando diferentes fluidos lubrificador-refrigerantes na furação do aço AISI 304 [adaptada de Ozcelik et al., 2013]. .....	12
Figura 2.5	Imagem das rebarbas na saída dos furos usinados com diferentes condições de lubrificação-refrigeração [adaptada de Girinon et al., 2019]. .....	14
Figura 2.6	Irregularidades que compõem a superfície real de uma peça usinada [adaptada de Novaski, 1994].....	15
Figura 2.7	Representação simplificada do perfil de rugosidade [adaptada de Bordin, 2013]. .....	16
Figura 2.8	Representação gráfica das rugosidades: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ [Motta Neto, 2017]. .....	17
Figura 2.9	Representação dos parâmetros e propriedades que influenciam na rugosidade [adaptada de Khorasani, 2012]. .....	17
Figura 2.10	Valores e perfis de rugosidades média na furação do aço ABNT P20 com brocas revestidas de TiAlN [adaptada de Bordin, 2013]. .....	18
Figura 2.11	Curva de Abbott-Firestone [adaptada de Petropoulos et al., 2010]. .....	19
Figura 2.12	Distribuição do perfil de rugosidade: (a) assimetria; (b) curtose [adaptada de Petropoulos et al., 2010]. .....	20
Figura 2.13	Representação do desvio de circularidade [adaptado de Bezerra, 1998].....	21
Figura 2.14	Posição para medição do batimento radial [Sandvik, 1994].....	22
Figura 3.1	Centro de usinagem ROMI Discovery 308.....	24
Figura 3.2	Broca helicoidal com revestimento de TiAlN [adaptada de Kennametal, 2023]. .....	24
Figura 3.3	Fixação dos corpos de prova para realização dos experimentos.....	25
Figura 3.4	Estado da broca: (a) nova; (b) após três furos no aço 904L; (c) limpa para uso no aço 304L.....	26
Figura 3.5	Mapeamento dos furos para os experimentos nos aços 304L e 904L.....	27
Figura 3.6	Rugosímetro utilizado e as posições das medições indicadas em milímetros. .	27



Figura 3.7	Posição das medições de circularidade. ....	28
Figura 4.1	Valores das rugosidades médias $R_a$ de todos os experimentos. ....	31
Figura 4.2	Cavacos comuns aos furos de todos os experimentos realizados. ....	33
Figura 4.3	Menores e maiores valores médio das rugosidades médias $R_a$ de todos os experimentos. ....	34
Figura 4.4	Representação dos estágios de interação da ferramenta de corte com a peça usinada [Bordin, 2013]. ....	35
Figura 4.5	Comparativo das rugosidades $R_a$ e $R_z$ em relação à velocidade de corte com $f = 0,12$ mm/volta. ....	36
Figura 4.6	Comparativo das rugosidades médias $R_a$ e $R_z$ em relação ao avanço com $v_c = 23,75$ m/min. ....	37
Figura 4.7	Comparativo das rugosidades médias $R_a$ e $R_z$ em relação ao avanço com $v_c = 35,62$ m/min. ....	38
Figura 4.8	Perfis de rugosidades do experimento E4 nos aços 304L e 904L. ....	39
Figura 4.9	Curva de Abbott-Firestone do experimento E4 nos aços 304L e 904L. ....	40
Figura 4.10	Função Distribuição de Amplitudes do experimento E4 nos aços 304L e 904L .....	40
Figura 4.11	Imagens das superfícies do experimento E4 nos aços 304L e 904L. ....	41
Figura 4.12	Perfis de rugosidades do experimento E6 nos aços 304L e 904L. ....	42
Figura 4.13	Curva de Abbott-Firestone do experimento E6 nos aços 304L e 904L. ....	43
Figura 4.14	Função Distribuição de Amplitudes do experimento E6 nos aços 304L e 904L .....	43
Figura 4.15	Imagens das superfícies do experimento E6 nos aços 304L e 904L. ....	44
Figura 4.16	Desvio médio da circularidade na furação dos aços 304L e 904L. ....	45
Figura 4.17	Comparativo dos desvios de circularidade em relação à velocidade de corte com $f = 0,12$ mm/volta. ....	46
Figura 4.18	Comparativo dos desvios de circularidade em relação ao avanço com $v_c = 23,75$ m/min. ....	47
Figura 4.19	Comparativo dos desvios de circularidade em relação ao avanço com $v_c = 35,62$ m/min. ....	48
Figura 4.20	Desvio médio dimensional na furação dos aços 304L e 904L. ....	49
Figura 4.21	Comparativo dos desvios dimensionais em relação à velocidade de corte com $f = 0,12$ mm/volta. ....	50

Figura 4.22	Comparativo dos desvios dimensionais em relação ao avanço com $v_c = 23,75$ m/min.....	51
Figura 4.23	Comparativo dos desvios dimensionais em relação ao avanço com $v_c = 35,62$ m/min.....	51
Figura A.1	Valores das rugosidades médias $R_z$ de todos os experimentos.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química do Core <sup>®</sup> 304L (% em massa).....	23
Tabela 3.2	Composição química do Ultra <sup>®</sup> 904L (% em massa).....	23
Tabela 3.3	Parâmetros de corte aplicados nos experimentos.....	26
Tabela A.1	Valores das rugosidades dos experimentos.....	68
Tabela A.2	Valores das médias das rugosidades dos experimentos.....	69
Tabela A.3	Valores das circularidades dos experimentos. ....	71
Tabela A.4	Valores das médias das circularidades dos experimentos.....	71
Tabela A.5	Valores dos desvios dimensionais dos experimentos. ....	71
Tabela A.6	Valores das médias dos desvios dimensionais dos experimentos.....	72

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	<i>Amplitude Distribution Function</i> (Função de Distribuição de Amplitudes)
AFC	<i>Abbott-Firestone Curves</i> (Curvas de Abbott-Firestone)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
APC	Aresta Postiça de Corte
ASS	<i>Austenitic Stainless Steel</i> (Aço Inoxidável Austenítico)
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
PREn	<i>Pitting Resistance Equivalent Number</i> (Resistência Equivalente à Corrosão por Pite)
SCC	<i>Stress Corrosion Cracking</i> (Corrosão Sob Tensão)
SS	<i>Stainless Steel</i> (Aços Inoxidáveis)
SASS	<i>Super Austenitic Stainless Steel</i> (Aço Inoxidável Super Austenítico)
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$	Avanço por volta [mm/volta]
$l_e$	Comprimento de amostragem
$l_m$	Comprimento de medição
$l_n$	Comprimento de medição unitário final
$l_t$	Comprimento de medição total
$l_v$	Comprimento de medição unitário inicial
$Mr1$	Porção do material 1
$Mr2$	Porção do material 2
$R_a$	Rugosidade média
$R_k$	Profundidade da rugosidade do núcleo
$Rku$	Curtose
$Rpk$	Altura reduzida do pico
$Rsk$	Assimetria
$Rvk$	Altura reduzida do vale
$R_t$	Rugosidade total
$R_z$	Rugosidade média parcial
$v_c$	Velocidade de corte [m/min]
$v_f$	Velocidade de avanço [mm/min]
$y_i$	Ordenadas de afastamento de picos e vales de um perfil de rugosidade
$Z_i$	Linha média de um perfil de rugosidade

## 1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico (ASS), formado principalmente pela adição dos elementos de liga cromo e níquel, caracteriza-se por sua resistência contra influências químicas e eletroquímicas da atmosfera, gases, bases ou ácidos. O cromo garante uma ótima resistência à corrosão, e o níquel estende a região austenítica para valores encontrados em temperatura ambiente. As características intrínsecas dos aços inoxidáveis, como alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alta taxa de encruamento, são potencializadas pela matriz austenítica [Dolinsek, 2003; Peckner e Bernstein, 1997] que, associadas à alta tendência de gerar aresta postiça de corte (APC), reduzem a usinabilidade do material em comparação aos aços em geral [Kulkarni et al., 2013].

Nos últimos anos, as aplicações em aços inoxidáveis aumentaram em vários campos da indústria, como na fabricação de produtos químicos, de equipamentos para processamento de alimentos e peças de máquinas que requerem alta resistência à corrosão [Groover, 2010]. A atraente combinação de uma excelente resistência à corrosão, retenção da resistência mecânica em condições criogênicas e em elevadas temperaturas, boa conformabilidade e uma aparência esteticamente agradável tornaram o ASS uma boa escolha para um conjunto diversificado de aplicações [Selvaraj e Chandramohan, 2010]. Contudo, o aço inoxidável super austenítico (SASS), uma variação particular deste material, pode ser aplicado em ambientes ainda mais extremos que o ASS. Tais propriedades decorrem de uma alta liga austenítica que possui maiores teores de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio [Han et al., 2013].

Especificamente em processos de usinagem, o ASS e, principalmente, o SASS, são considerados tipicamente de difícil usinagem. Elevada taxa de encruamento, formação de aresta postiça, baixa condutividade térmica, elevada ductilidade, e as altas pressões específicas de corte, combinados com a geração de elevadas temperaturas de corte durante a usinagem, resultam em alta taxa de desgaste na ferramenta (menor tempo de vida) e baixa qualidade de acabamento na peça [Camargo, 2008; Dolinsek, 2003; Kaladhar et al., 2012; Pradeep e Shakel, 2017; Trent e Wright, 2000].

Em virtude de o processo de furação ser um dos mais utilizados na indústria metalmeccânica, é de suma importância a compreensão dos fenômenos físicos e suas implicações em peças com furos [Diniz et al., 2013]. Devido ao processo ser enclausurado, onde o cisalhamento do material ocorre no interior do furo, há uma enorme dificuldade de lubrificar e refrigerar a zona de corte e de evacuar os cavacos, o que prejudica a qualidade do

furo e, conseqüentemente, pode gerar falha prematura na ferramenta de corte (broca) [Arif et al., 2020; Sahoo e Sahoo, 2012].

Portanto, é extremamente importante avaliar os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) para se obter a forma e a dimensão desejada do furo com qualidade que atenda aos requisitos de fabricação [Gillespie, 1994; Ko et al., 2003]. Por exemplo, baixas velocidades de corte ( $v_c$ ) podem gerar aresta postiça de corte (APC) na broca, deixando a furação com um acabamento ruim. Entretanto, a formação de APC na usinagem de ASS ou SASS é presente mesmo em maiores  $v_c$ , resultando em piora no acabamento do furo, aumento dos esforços de corte e o surgimento de desgastes ou avarias na ferramenta [Klocke, 2011; Nomani et al., 2013]. Além dos parâmetros de corte, a vida da ferramenta pode impactar na qualidade do furo, interrompendo o processo e aumentando o custo final do produto [Agapiou e Stephenson, 2013; Belluco et al., 2004].

A qualidade da superfície usinada é um parâmetro importante para avaliar a produtividade de máquinas-ferramentas, bem como de componentes usinados. Portanto, alcançar a qualidade superficial desejada é de grande importância para o comportamento funcional das peças mecânicas [Benardos e Vosniakos, 2003; Bordin, 2013]. Um bom acabamento é desejável para melhorar as propriedades tribológicas, resistência à fadiga, resistência à corrosão, e até mesmo a condição estética do produto. Contudo, a busca por um acabamento refinado pode envolver maiores custos de fabricação [Boothroyd, 1981]. Assim, através da caracterização do acabamento (textura e integridade) e da compreensão dos mecanismos que influenciam a qualidade de componentes fabricados, é possível melhorar a usinagem evitando falhas e reduzindo custos [Costa et al., 2006; Farias, 2009].

Os desvios dimensionais e geométricos são fatores importantes para avaliar a qualidade do furo usinado. No processo de furação, haverá sempre um desvio dimensional envolvido, visto que a dimensão do furo poderá ser maior ou menor em relação a medida nominal do diâmetro especificado em projeto [Agostinho et al., 1997]. Os desvios geométricos estão relacionados com o grau de variação das superfícies reais em relação aos sólidos geométricos que os definem. Esses desvios normalmente são analisados em furação e desempenham um papel muito importante na avaliação da qualidade da peça usinada [Zeilmann, 2003]. Estes desvios são causados principalmente pela falta de rigidez (máquina e ferramenta), batimento e desgaste da ferramenta, e variações de temperatura [Miranda, 2003; Sandvik, 1994].

Na fabricação, rebarbas são remanescências de material dos cantos usinados de peças. Existem diversas denominações para rebarba, que vão desde “formação indesejável de

material” até “crescimentos metálicos em forma de crista”. A grande quantidade de definições pode ser explicada pelas diferentes formas e tipos de rebarbas gerados nos diversos processos de usinagem [Soares Filho, 1995]. Em furação, a rebarba de entrada se forma na superfície de entrada à medida que o material próximo à broca sofre deformação plástica, e a rebarba de saída é a extensão do material na superfície de saída da peça. Como a rebarba de saída é muito maior que a de entrada, a maioria dos problemas relacionados a rebarbas estão associados com a saída do furo [Kim e Dornfeld, 2002].

Os fluidos de corte têm por objetivo reduzir o atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça (ação lubrificante), extrair o calor gerado (ação refrigerante) na zona de corte e, dependendo da forma de aplicação, facilitar a quebra e o escoamento do cavaco. Por conseguinte, melhoram a usinabilidade. Assim, para garantir um bom desempenho em serviço, a escolha correta do fluido torna-se necessária, levando em consideração o material a ser usinado e os parâmetros de corte [Pal et al., 2022]. Entretanto, a dificuldade da penetração do fluido na zona de corte é um dos problemas mais frequentes observados no processo de furação, principalmente para máquinas e ferramentas que não possuem acesso à lubrificação interna [Dixit et al., 2012].

Considerando as características apresentadas, pode-se afirmar que a furação é um dos processos com maiores dificuldades na sua execução. Assim, a peça de trabalho, a ferramenta de corte (material e geometria), a rigidez da máquina-ferramenta, os parâmetros de corte, o meio lubrificante empregado e sua forma de aplicação devem ser levados em consideração no planejamento e na análise dos experimentos [Klocke, 2011], visando a redução da rugosidade e dos desvios dimensionais e geométricos da peça [Boothroyd, 1981; Xavier e Adithan, 2009].

Visto que os processos de usinagem com ASS e SASS têm sido foco de atenção de pesquisadores, o presente trabalho visa contribuir com as pesquisas relacionadas à qualidade superficial na furação em cheio dos aços inoxidáveis austenítico Core® 304L e super austenítico Ultra® 904L utilizando biolubrificante em abundância aplicado externamente à broca.

## **1.1 Objetivos**

Investigar comparativamente a qualidade superficial (rugosidade, circularidade e desvios dimensionais) de furos passantes gerados na furação em cheio dos aços inoxidáveis austenítico Core® 304L e super austenítico Ultra® 904L com diferentes níveis de velocidade de



corte e avanço, e aplicando biolubrificante em abundância. Para atender ao objetivo geral, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- examinar os perfis e os parâmetros de rugosidade das superfícies usinadas;
- analisar a influência dos parâmetros de corte conforme as rugosidades obtidas e comparar entre os dois materiais;
- investigar a morfologia dos cavacos entre os materiais conforme os parâmetros de corte empregados em cada experimento;
- aplicar a Curva de Abbott-Firestone (AFC) e a Função Distribuição de Amplitudes (ADF) na análise dos perfis de rugosidade;
- avaliar os desvios dimensionais e de circularidade dos furos produzidos.

## 1.2 Justificativa

Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados na indústria em diferentes aplicações. Contudo, ao realizar uma pesquisa bibliográfica, constatou-se que a maioria dos estudos encontrados com o super austenítico 904L estão concentrados na área de soldagem e na avaliação de resistência à corrosão. A baixa usinabilidade e o alto custo do SASS deveriam ser motivadores para a realização de estudos sobre a usinagem de SASS. No entanto, tais investigações são limitadas, especialmente em furação de 904L, ainda mais se comparadas com um material de conhecimento mais amplo e disponível na literatura (304L).

## 1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está disposto em cinco Capítulos, conforme descrição que se segue.

- Capítulo 1. Introdução do tema e contextualização, apresentando os objetivos propostos e a justificativa do trabalho.
- Capítulo 2. Revisão bibliográfica específica sobre os conceitos e as principais informações técnicas para o desenvolvimento do trabalho (aços inoxidáveis austeníticos, processo de furação e qualidade do furo).
- Capítulo 3. Descrição dos materiais e métodos utilizados no estudo.
- Capítulo 4. Apresentação dos resultados obtidos (rugosidade, circularidade e desvio dimensional) na furação dos aços inoxidáveis Core<sup>®</sup> 304L e Ultra<sup>®</sup> 904L sob diferentes condições de corte.
- Capítulo 5. Conclusões sobre estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo será apresentado os conceitos fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa: (i) aços inoxidáveis austeníticos e super austeníticos; (ii) processo de furação em cheio; (iii) textura da peça usinada (iv) desvios dimensionais e geométricos.

### 2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos e Super Austeníticos

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro e cromo, com, pelo menos 12% de cromo. Contêm ainda, na sua composição, níquel e baixas quantidades de carbono. O aço inoxidável é um dos principais materiais de engenharia, comum em grande variedade de produtos e componentes, pelo fato de ser resistente à oxidação. Esta resistência é conseguida pela presença do cromo como elemento de liga que cria uma película passivadora de óxido e hidróxido de cromo que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade, além de solubilidade praticamente nula. O grau de resistência à oxidação do aço depende da estabilidade dessa película, que tem uma espessura média de 20 nm [Telles, 2003]. Há diversos tipos de aços inoxidáveis, que se diferenciam pela composição química e pelas propriedades mecânicas. A classificação mais comum é feita de acordo com a estrutura cristalina do material, que pode ser austenítica (ASS), ferrítica (FSS), martensítica (MSS) ou duplex (DSS). Dentre eles, ASS é o mais utilizado devido às suas características técnicas atenderem uma grande diversidade de aplicações [Gamarra e Diniz, 2018; Oliveira et al., 2014].

A austenita ( $\text{Fe-}\gamma$ ) é um alótropo metálico não magnético de ferro com elementos de liga. Ela se forma quando a ferrita ( $\text{Fe-}\alpha$ ) sofre mudanças de temperatura de 912 °C para 1394 °C. No caso, a transição de fase passa a estrutura de cúbica de corpo centrado (CCC) para cúbica de face centrada (CFC). Além de ser a formação mais comum entre os aços inoxidáveis, a austenita contém cromo e níquel (por vezes com adição de manganês e nitrogênio) que servem para a estabilização da estrutura cristalina. Esta estrutura confere certas propriedades aos ASS, tais como boa soldabilidade, ductilidade, características não magnéticas, resistência à corrosão, além de excelente tenacidade mesmo em temperaturas criogênicas [Kaladhar et al., 2012]. Já os super austeníticos (SASS) são definidos como ASS com maior quantidade de elementos de liga, resultando em um percentual de ferro menor ou igual a 50% da composição do material [Plaut et al, 2007] e, por conseguinte, maior resistência à corrosão. As microestruturas do ASS 304L e do SASS 904L, laminado e recozido, estão representadas pela Figura 2.1.

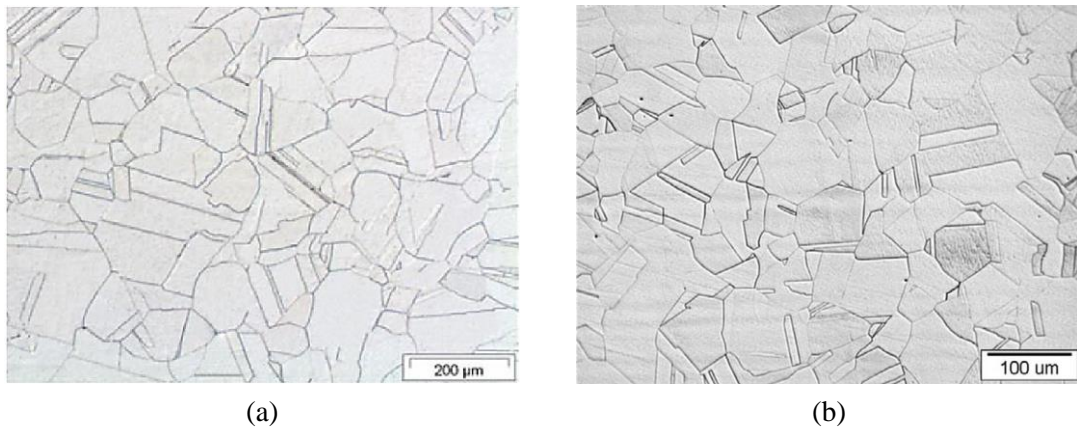


Figura 2.1 – Microestrutura dos aços inoxidáveis: (a) austenítico 304L [Lopez et al., 2016];  
(b) super austenítico 904L [Tehovnik, et al., 2014].

O SASS pode ser classificado pelo valor de resistência equivalente à corrosão por pite, PREn (*pitting resistance equivalent number*), que é acima de 30\* [Nilsson, 1992; Roberge, 2000]. De modo geral, quanto maior o valor de PREn, obtido pela Equação 2.1, mais resistente é o aço inoxidável à corrosão localizada por cloreto, como também é menor a sua usinabilidade. Segundo Lourenço, 1996, quanto maior a quantidade de elementos de liga, mais difícil é a usinagem. O autor cita ainda que o molibdênio é outro elemento adicionado ao aço inoxidável que proporciona alta resistência em elevadas temperaturas, necessitando assim maior energia no corte e, com isso, elevando a temperatura na zona de corte.

$$PREn = Cr (\%) + [3,3 \cdot Mo (\%)] + [16 \cdot N (\%)] \quad (2.1)$$

A baixa usinabilidade do ASS e, principalmente, do SASS, está associada a alta taxa de encruamento, baixa condutividade térmica e elevada ductilidade. Como resultado, observam-se maiores forças de usinagem, elevada taxa de desgaste da ferramenta e altos valores de rugosidade resultantes do processo de usinagem [Kaladhar et al., 2012]. Segundo Dolinsek, 2003, a fase austenítica possui alta tendência a deformação devido ao elevado número de planos de deslizamento, enquanto o aumento de dureza e resistência mecânica durante a deformação resulta também da transformação da austenita em martensita. Ainda segundo o autor, os cavacos

---

\* O valor padronizado para a resistência equivalente à corrosão por pite (PREn) do aço inoxidável super austenítico Ultra® 904L é 35,49 [Outokumpu, 2013].

resultantes apresentam perfil serrilhado ao longo das bordas. Devido à alta ductilidade, Korkut et al., 2004, relatam a forte adesão do material à ferramenta de corte, podendo resultar na formação da aresta postiça de corte (APC), além de maiores variações nas forças de usinagem quando comparada aos aços não ligados.

Os efeitos da usinagem em aço inoxidável resultam em uma camada encruada de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta, dificultando a ação de corte e aumentando as forças. Ao mesmo tempo, formam-se cavacos longos devido à elevada ductilidade desse aço, além da adesão de material na ferramenta, a qual forma APC e reduz a vida útil da aresta de corte. Somado a isso, o elevado atrito na interface ferramenta-peça é responsável pelo aquecimento da ferramenta, pois o calor gerado não é bem dissipado pelo cavaco e pela peça em consequência da baixa condutividade térmica da liga austenítica, comprometendo a qualidade superficial da peça usinada [Martines, 2017].

Para contornar a baixa usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, costuma-se adicionar elementos de liga formadores de inclusões frágeis como enxofre, cobre e bismuto, que reduzem a ductilidade e facilitam a quebra do cavaco [Diniz et al., 2013]. No entanto, a adição desses elementos reduz significativamente a sua resistência à corrosão. Como alternativa, a estratégia citada por Ahmed et. al., 2019, envolve a utilização de refrigeração de alta pressão (HPC). O HPC auxilia na remoção do cavaco, facilita a transferência de calor por convecção ao promover escoamentos turbulentos, proporciona melhor lubrificação e gera um resfriamento mais eficiente, reduzindo a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

## **2.2 Processo de Furação**

A furação é um processo de usinagem indispensável em muitas indústrias e tem sido o foco de muitos estudos de pesquisa, gerando muito progresso e desenvolvimento. Com a evolução da tecnologia de ferramentas e materiais, mais pesquisas tornam-se necessárias para melhorar a produtividade e a eficiência deste importante processo [Tolouei-Rad e Shah, 2012]. Na furação, os furos são gerados com a utilização de uma ferramenta chamada broca. Os furos podem ser feitos de diferentes maneiras; entre as mais conhecidas estão: furação em cheio, furação com pré-furo, furação de centro, furação escalonada e trepanação [Groover, 2010; Oberg, 2012]. O processo de furação em cheio é atribuído à abertura de um furo cilíndrico passante em toda a espessura da peça utilizando uma broca que remove todo o volume de material contido na região a ser furada em forma de cavaco, conforme Figura 2.2.

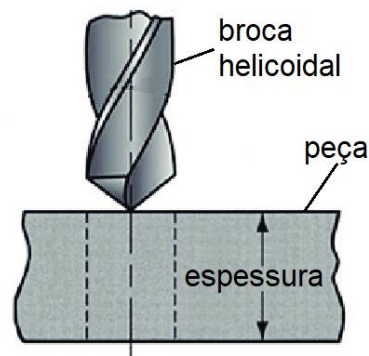


Figura 2.2 – Furação em cheio [adaptada de Tolouei-Rad e Aamir, 2021].

No processo de furação sem pré-furo, o material total a ser removido para atingir o diâmetro final do furo é limitado por várias restrições, como a utilização de ferramenta para execução de um furo único em que a potência da máquina esteja disponível. A furação com pré-furo pode ser uma alternativa, pois as peças já possuem um ou mais furos que são perfurados novamente até atingir o diâmetro desejado com menor consumo de potência da máquina. Uma das desvantagens na utilização da furação com pré-furo está no tempo de produção que pode ser maior, visto que o setup da máquina pode ser prejudicado com a aplicação de várias brocas com diâmetros diferentes para obter a usinagem final da peça. Contudo, pode ter como vantagem o uso de valores de avanço duas ou três vezes maiores que o furo inicial devido à remoção de material ser menor [Hoshi, e Zhao, 1989; Oberg, 2012].

Outro ponto a ser destacado é que os furos podem ser passantes ou cegos. Os furos cegos são gerados até uma certa profundidade, enquanto os furos passantes referem-se à condição em que a broca passa através do material e sai da peça de trabalho do outro lado. Costa et al., 2007, observaram que os valores de rugosidade média  $R_a$  nos furos passantes diminuíram em média de 8% em relação aos furos cegos, pois o desgaste da broca foi menor no primeiro caso. Segundo os autores, o desgaste da ferramenta gerou maiores esforços de corte e maior vibração durante a execução do furo cego, afetando diretamente os valores de rugosidade. Sharif et al., 2012, citam que furos com uma relação profundidade/diâmetro igual ou menor que 5 são comumente executados por brocas helicoidais convencionais. Contudo, furos com relação maior que 5 podem ser efetuados usando brocas de alto desempenho equipadas com sistemas de refrigeração interna.

### 2.2.1 Material e geometria da ferramenta

A broca helicoidal é a mais utilizada e desempenha um papel importante no processo. De modo geral, as partes mais importantes são destacadas pela Figura 2.3. A maioria das brocas helicoidais possuem uma geometria em comum formada por uma haste que normalmente é fixada no mandril de uma máquina. Os canais presentes no núcleo da broca formam uma geometria helicoidal que servem para facilitar o escoamento e retirada dos cavacos. Na ponta da broca são encontradas as principais partes que são responsáveis pelo corte durante a usinagem [Klocke, 2011]. Os principais fenômenos mecânicos do processo de furação ocorrem nesta região da ponta da ferramenta, pois é aí que estão as interfaces com o cavaco e a peça, influenciando diretamente nos esforços de corte, na vida da ferramenta e na qualidade do furo.

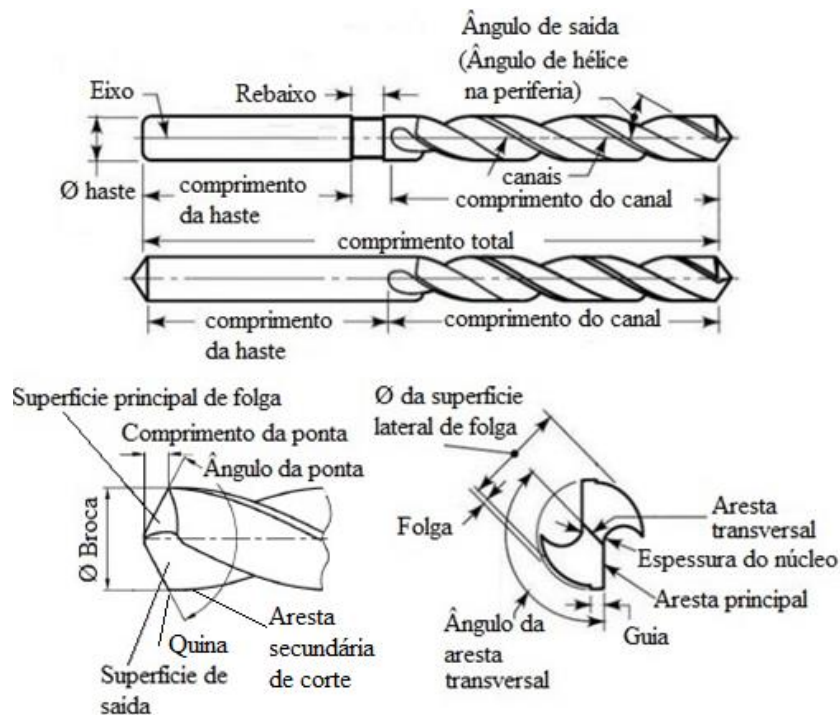


Figura 2.3 – Principais partes da broca helicoidal [adaptada de Tolouei-Rad e Aamir, 2021].

Durante a furação de materiais dúcteis, o material é extrudado na direção e sentido do avanço durante a furação. Com isso, o calor e o consumo de energia aumentam nesta região. Além disso, há a formação de aresta postiça de corte (APC), pois a velocidade de corte tende a zero no centro da broca. Assim, a aresta transversal de corte busca minimizar esses problemas. No entanto, o comprimento da aresta transversal afeta a centralização da ferramenta e contribui significativamente com a força de avanço (40 a 58%) durante a furação [Guo et al., 2018].

Os materiais empregados nas ferramentas de corte são importantes para a qualidade superficial do furo. A broca helicoidal produzida em metal-duro (WC-Co) tem recebido muitos avanços nos últimos anos. Estas apresentam elevado desempenho, possuem maior rigidez e permitem altas rotações pela máquina-ferramenta, quando comparada à broca de aço-rápido (HSS). Com isso, obtêm-se furos mais precisos, com menores valores de tolerância, e sem a necessidade da utilização de pré-furo [Diniz et al., 2013; Tschätsch, 2009].

Na furação de aços inoxidáveis, as empresas que atuam no segmento de ferramentas de corte têm apresentado novas classes de metal-duro com revestimento por deposição física de vapor (PVD), sendo indicado principalmente para a furação de superligas resistentes ao calor (ISO S) e aços inoxidáveis (ISO M), materiais de difícil usinagem [Iscar, 2023]. Ferramentas com revestimento PVD possuem alta dureza a quente (maior resistência ao desgaste) e baixo coeficiente de atrito, reduzindo o processo de adesão de material e favorecendo o acabamento do furo [Edwards, 1993; Jareo e Bradbury, 1999; Klocke et al., 1998; Kustas et al., 1997; Narutaki et al., 1997]. O revestimento PVD de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) é atualmente o mais empregado na furação de aços inoxidáveis austeníticos e duplex, pois apresenta elevada dureza a quente, o que permite garantir um desempenho satisfatório da ferramenta em operações de corte com dificuldade de lubrificarrefrigeração, sem comprometer a qualidade superficial do furo [Beltrão e Marmentini, 2007; Schulz et al., 2000]. O carbonitreto de titânio (TiCN) é outro revestimento bastante utilizado, pois apresenta alta dureza sob temperaturas relativamente baixas e maior tenacidade que o TiAlN [Schulz et al., 2000].

Çaydaş et al., 2011, avaliaram o desempenho de brocas HSS sem revestimento, metal duro K20 e HSS revestida com PVD-TiN na furação a seco de aço inoxidável austenítico AISI 304. Os efeitos da rotação, velocidade de avanço, ângulo da ponta da broca e número de furos sobre a rugosidade da parede do furo, desgaste de flanco, altura da rebarba na saída do furo e aumento do diâmetro do furo foram investigados experimentalmente. Os resultados mostraram que todas as variáveis de resposta analisadas aumentaram com o incremento dos parâmetros de corte. Os autores constataram que a broca HSS revestida com TiN e ângulo de ponta de 118° apresentou o melhor desempenho, com maior vida da ferramenta, gerando menor rugosidade, menor altura de rebarba e menor desvio dimensional, seguida pelas ferramentas de metal duro K20 e HSS. Concluíram que os resultados estão associados às propriedades do revestimento.

Quando comparado com ferramentas revestidas convencionais, o tratamento criogênico (aquecimento a 200 °C seguido por refrigeração a temperaturas abaixo de -150 °C) em brocas de metal-duro aumenta a vida útil das mesmas. Arun et al., 2018, investigaram o efeito desse

tratamento realizado em duas temperaturas (-196 °C e -80 °C) sobre a rugosidade média, circularidade e altura da rebarba na saída dos furos do aço AISI 304 e concluíram que a menor temperatura (-196 °C) gerou os melhores resultados nas três variáveis de saída avaliadas.

## 2.2.2 Efeitos dos parâmetros de usinagem

Os parâmetros de corte possuem grande influência no processo de furação. Como a velocidade de corte ( $v_c$ ) diminui da periferia para o centro da broca, a formação da APC próximo à aresta transversal de corte nas furações em cheio (sem pré-furo) com refrigeração externa é quase que inevitável. Além disso, o aumento do avanço ( $f$ ) sob baixas rotações resulta em uma superfície usinada ainda pior, pois o material no fundo do furo é predominantemente deformado plasticamente e encruado ao invés de cisalhado durante a furação. Isso impacta no desgaste da aresta transversal na região mais próxima ao centro da broca e no aumento da força de avanço [Bresseler et. al., 1997]. Além disso, a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço da ferramenta na peça tendem a aumentar com crescimento do avanço [Klocke, 2011]. Um incremento na rotação pode reduzir a APC, mas pode aumentar os desgastes na periferia da ferramenta pelo aumento de  $v_c$  [Çiçek et al., 2012a; Dolinsek, 2003].

Na furação a aplicação de meio lubrificadorrefrigerante influencia na qualidade da superfície usinada. Entretanto é necessário que o fluido tenha boa propriedade lubrificante, além de baixa viscosidade, para facilitar a remoção dos cavacos pelos canais de saída da broca [Klocke, 2011]. Os fluidos lubrificadorrefrigerantes reduzem o calor gerado na zona de corte, lubrificando a interface ferramenta-cavaco, e reduzindo o coeficiente de atrito que ocorre nessa interface. Essa redução da temperatura de corte durante a usinagem permite que os parâmetros de corte sejam incrementados aumentando a produtividade [Diniz et al., 2013]. Na busca por uma usinagem ambientalmente amigável, Kuram et al, 2010, investigaram a influência de alguns tipos de óleos (mineral ou vegetal, bruto e refinado) na rugosidade dos furos gerados durante a furação do aço inoxidável AISI 304L. Os autores constataram que o melhor acabamento foi gerado utilizando fluido à base de óleo de girassol. Ozcelik et al., 2013, também focaram em fluidos de corte de base vegetal na furação do aço AISI 304. Os autores avaliaram o desempenho do óleo de girassol, do óleo de canola refinado e do fluido de corte comercial semissintético e concluíram que o lubrificadorrefrigerante à base de óleo de canola oferece o melhor desempenho quanto a desgaste de ferramenta e rugosidade, conforme Figura 2.4.



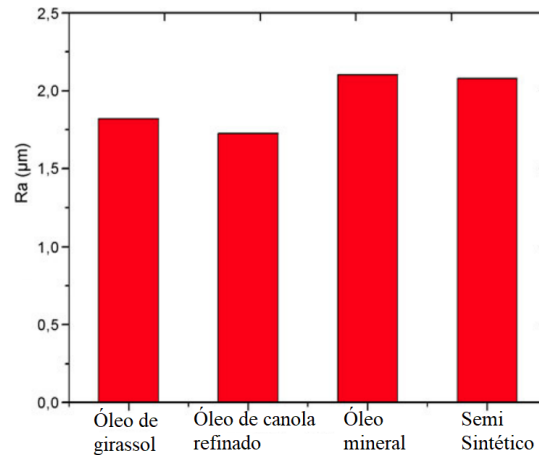


Figura 2.4 – Rugosidade média utilizando diferentes fluidos lubrificador-refrigerantes na furação do aço AISI 304 [adaptada de Ozcelik et al., 2013].

A qualidade e a precisão do furo também são critérios importantes no processo de furação, e os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) possuem influência direta nesses fundamentos. Além do mais, a análise e a otimização dos parâmetros podem ser realizadas para definir quais podem significar maior influência nos esforços de corte, na vida da ferramenta e no acabamento da superfície usinada [Bork, 1995]. As técnicas de otimização são citadas por diversos pesquisadores.

Siddiquee et al., 2014, realizaram a otimização dos parâmetros de usinagem com base no método Taguchi e na ANOVA para reduzir os valores de rugosidade na furação do aço inoxidável austenítico AISI 321 com broca de 10 mm de diâmetro. A rotação ( $n$ ), a velocidade de avanço ( $v_f$ ) e a profundidade do furo foram considerados em três níveis cada, enquanto as condições lubrificantes foram sem e com fluido de corte. Os resultados indicaram que os quatro parâmetros afetaram significativamente a rugosidade, com contribuição máxima da rotação (27,02%), seguida do meio lubrificante (25,10%), da velocidade de avanço (22,99%) e da profundidade do furo (14,29%). Os autores concluíram que a combinação ideal para atingir os menores valores de rugosidade foi a furação com fluido de corte usando maior  $n$  (500 rpm), média  $v_f$  (2,4 mm/min), e menor profundidade do furo (25 mm).

Balaji et al, 2016, investigaram com a ajuda do método Taguchi e da análise de variância (ANOVA) o efeito dos parâmetros de corte ( $n$  e  $v_f$ ) na vibração da broca, no desgaste da ferramenta e na rugosidade da superfície usinada durante a furação em cheio do aço inoxidável austenítico AISI 304. Os autores notaram que a vibração da broca aumenta com a progressão do desgaste da ferramenta, e que o ângulo da hélice e a vibração da broca afetam de maneira

significativa a rugosidade da superfície (contribuições de 78,22% e 50,02%, respectivamente). Além disso, concluíram que a menor rugosidade foi gerada com  $n = 800$  rpm e  $v_f = 12$  mm/min, e a menor vibração da ferramenta com  $n = 600$  rpm e  $v_f = 10$  mm/min.

Ramachandran et al, 2017, aplicaram o método Taguchi para otimizar os parâmetros de corte na furação do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Os autores avaliaram a velocidade de corte ( $v_c$ ) em dois níveis e o avanço ( $f$ ) em três níveis, e perceberam que a maior  $v_c$  (30 m/min) e menor  $f$  (0,03 mm/volta) contribuíram para um melhor acabamento. Além disso, após a realização de 18 furos com esta combinação, eles observaram que a taxa de desgaste da broca foi constante e lenta, e que a rugosidade e o dimensional do furo mantiveram-se sem alterações significativas.

Jayaganth et al., 2018, utilizaram o método Taguchi para avaliar os efeitos dos parâmetros de corte ( $v_c$  e  $f$ ) e do meio lubrificante (óleo de rícino, querosene e óleo de coco) na rugosidade média e no tempo de corte na furação do aço inoxidável martensítico AISI 410. Notaram que os valores de rugosidade diminuíram com o aumento de  $v_c$  e com a diminuição de  $f$ . Já o menor tempo de corte ocorreu com níveis máximos de  $v_c$  e  $f$ , como esperado. No entanto, a melhor usinabilidade foi obtida ao aplicar fluido à base de óleo de coco com altos níveis de  $v_c$  e  $f$ .

Portanto, melhorias significativas na rugosidade podem ser obtidas usando esta abordagem, sendo uma técnica muito útil para uso nas indústrias otimizando o desempenho da usinagem com redução de custos e tempo.

### **2.2.3 Problemas na furação de aços inoxidáveis austeníticos**

Particularmente, em processos de furação de aços inoxidáveis austeníticos (ASS) e super austeníticos (SASS), é importante considerar os diversos fatores intrínsecos à usinagem. A taxa de encruamento, que ocorre no fundo do furo executado, aumenta os esforços de corte; a baixa condutividade térmica resulta em alta concentração de calor na zona de corte, acelerando o desgaste da ferramenta; a alta ductilidade do material pode favorecer a formação de APC e a geração de cavacos longos, que podem ficar presos dentro do furo e prejudicar o acabamento; a tendência de endurecimento em temperaturas acima de 700° pode incentivar a formação de desgaste de cratera na ferramenta por difusão [Bork, 1995; Diniz et al., 2013; Trent e Wright, 2000]. Além disso, a zona de corte fica confinada dentro do furo, dificultando ainda mais a operação de corte.

Durante o processo de furação, a penetração da ferramenta na peça de trabalho aumenta a temperatura na zona de corte e a lubrificação no fundo do furo executado torna-se deficiente. Essa deficiência de fluido quando aplicado externamente pode gerar uma grande variação de temperatura sobre a broca quando sai da peça, que pode levar uma ferramenta sem tenacidade suficiente a uma falha por fadiga térmica [Tschätsch, 2009] e prejudicar o acabamento [Haan et al., 1997]. Para exemplificar, Girinon et al., 2019, avaliaram a furação do AISI 316L a seco e com fluido em abundância aplicado externamente e constataram que a ausência de lubrificação gerou valores de rugosidade média 50% maiores que com a presença de fluido. Resultados semelhantes foram obtidos por Sankar e Choudhury, 2015, na comparação da aplicação do ar comprimido com a do fluido em abundância.

Outro problema constatado na furação de materiais com alta ductilidade (como o ASS e o SASS) é a formação de rebarbas na entrada e principalmente na saída dos furos passantes. Estes materiais estão mais susceptíveis à formação de rebarbas por possuírem alta capacidade de deformação plástica. Além disso, materiais encruáveis formam maiores rebarbas que aqueles com menor tendência ao encruamento [Soares Filho, 1995]. Bagchi e Guha, 2017, avaliaram a formação de rebarbas durante a furação de peças de aço inoxidável em diferentes condições de corte. Os autores verificaram que a altura da rebarba é fortemente afetada pela variação da velocidade de corte e do avanço e que o meio lubrificante possui pouca influência sobre os resultados. Girinon et al., 2019, também concluíram que o meio lubrificante (corte a seco, fluido de corte aplicado externamente e aplicado internamente) não influenciou no tamanho e no formato de rebarba dos furos executados de forma significativa, pois a broca não apresentou desgastes que pudessem afetar a formação das rebarbas na saída dos furos, como mostra a Figura 2.5.

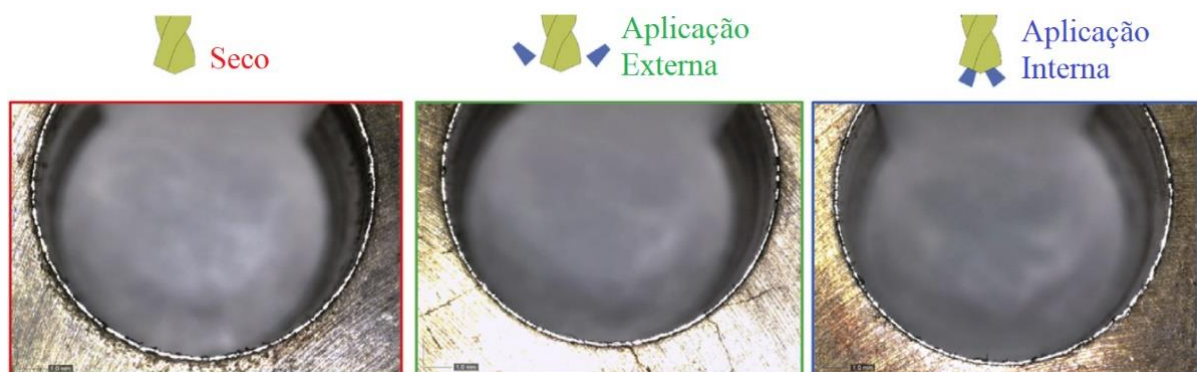


Figura 2.5 – Imagem das rebarbas na saída dos furos usinados com diferentes condições de lubrificação [adaptada de Girinon et al., 2019].

Apesar dos problemas apresentados, o processo de furação em cheio de SASS possui poucos estudos na literatura consultada, e não são investigados de forma tão completa como no processo de torneamento, mesmo que seja amplamente utilizado para a fabricação de componentes críticos em diversas áreas como aeronáutica, nuclear e médica. Dessa maneira, este presente trabalho irá abordar o estudo da furação em cheio com a aplicação externa de um biofluido em abundância, comparando os efeitos dos parâmetros de corte no acabamento (rugosidade, circularidade e desvio dimensional) dos furos gerados nos aços 304L e 904L.

### 2.3 Rugosidade da Superfície Usinada

A superfície real de uma peça usinada possui irregularidades que diferem da superfície geométrica do projeto especificado, e isso necessita o estabelecimento de limites que garantam o produto esperado. Essas irregularidades são os elementos que compõem uma superfície real, e estão divididas em três partes, que servem como critério de avaliação da qualidade da peça fabricada (Figura 2.6). Klocke, 2011, descreve as irregularidades que definem a superfície real.

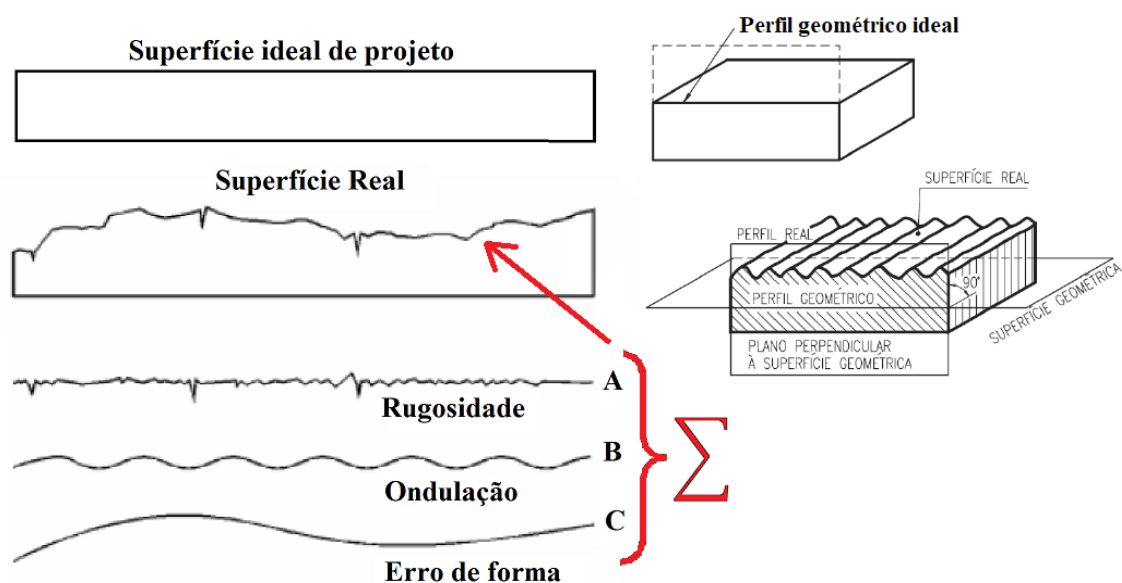


Figura 2.6 – Irregularidades que compõem a superfície real de uma peça usinada [adaptada de Novaski, 1994].

- A. Rugosidade (ranhuras, estrias, picos, e estrutura do material): o conjunto das irregularidades causadas no processo de fabricação da superfície, que também é conhecido como erro micro geométrico e somente com equipamentos específicos é possível mensurar.

- B. Ondulação: o conjunto de irregularidades micro geométricas causadas pelas vibrações e deformações que podem ocorrer devido a tratamento térmico ou processo de fabricação. No caso, a rugosidade pode estar presente isolada ou sobreposta à ondulação.
- C. Erro de forma: desvio geométrico total entre a superfície real e a superfície ideal de projeto. Também conhecido como erros macro geométricos que podem ser, em alguns casos, detectados por instrumentos convencionais.

A rugosidade é quantificada por diversos parâmetros que dependem da superfície a ser medida e da exatidão escolhida para que resultados aceitáveis sejam obtidos. Conforme a norma NBR 4287, 2002, o percurso de medição ( $l_t$ ) é dividido em sete comprimentos unitários, descartando o primeiro ( $l_v$ ) e último ( $l_n$ ), restando apenas cinco comprimentos de amostragem ( $l_e$ ) contidos em um comprimento de medição ( $l_m$ ), como mostra a Figura 2.7 [Bordin, 2013].

Segundo Oliveira, 2006, os parâmetros de rugosidade baseados no critério de linha média e aplicados na maioria dos estudos com usinagem são rugosidade média ( $R_a$ ), rugosidade média parcial ( $R_z$ ) e rugosidade total ( $R_t$ ). No presente trabalho serão abordados  $R_a$  e  $R_z$ .

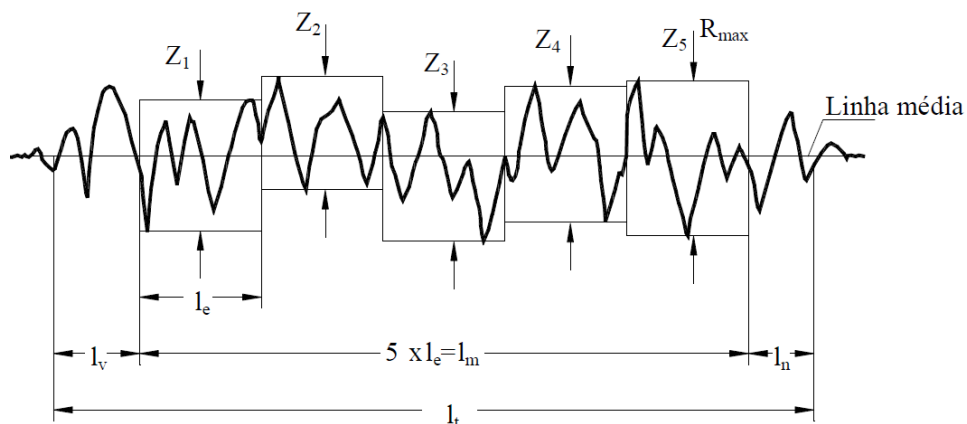


Figura 2.7 – Representação simplificada do perfil de rugosidade [adaptada de Bordin, 2013].

- Rugosidade média ( $R_a$ ): média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento representadas por vales e picos ( $y_i$ ), referente aos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de medição ( $l_m$ ) (Figura 2.8a).
- Rugosidade média parcial ( $R_z$ ): média aritmética dos cinco valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento que estão acima e abaixo da linha média ( $Z_i$ ) tomados em cada comprimento de amostragem ( $l_e$ ) (Figura 2.8b).

A rugosidade normalmente é avaliada com a utilização de um apalpador mecânico que percorre o percurso de medição ( $l_t$ ), e registra com uma ponteira de diamante o perfil da

superfície com base no comprimento de medição ( $l_m$ ). O detalhamento do perfil registrado é realizado aplicando comprimentos de amostragem ( $l_e$ ) ou *cut-offs* distintos. A definição do *cut-off*, com diversos filtros disponíveis, permite a análise de cada  $l_e$  separadamente [Nicola, 2008].

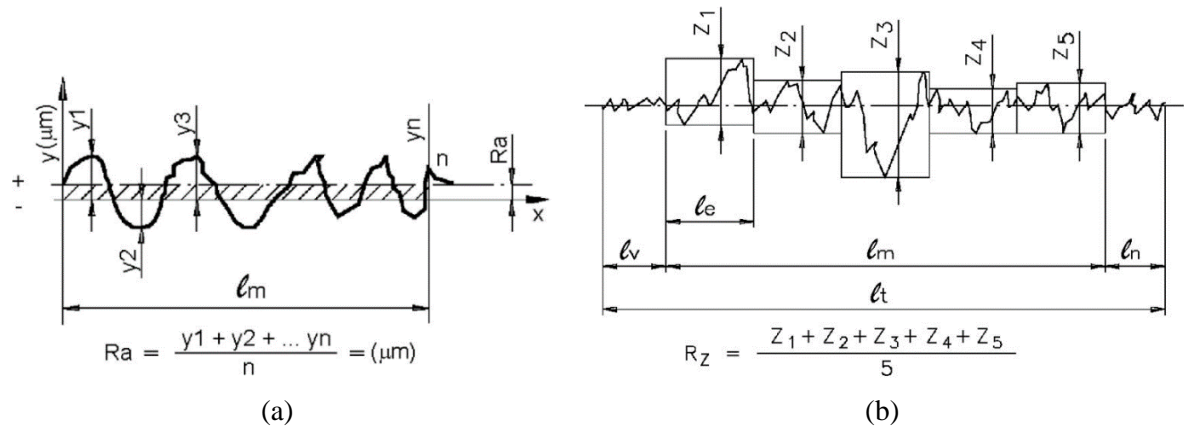
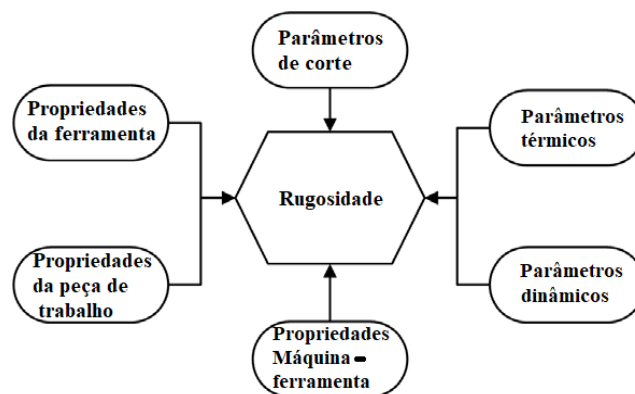


Figura 2.8 – Representação gráfica das rugosidades: (a)  $Ra$ ; (b)  $Rz$  [Motta Neto, 2017].

A Figura 2.9 categoriza, em seis partes, os diferentes estudos realizados para determinar os parâmetros de corte ideais visando atingir a rugosidade mínima na superfície usinada. Todos têm efeitos significativos sobre a rugosidade; entretanto, a categoria mais importante é “parâmetros de corte”, e o mecanismo mais efetivo é o “avanço” [Khorasani, 2012].



Propriedades Máquina-ferramenta	Propriedades da peça de trabalho	Propriedades da ferramenta	Parâmetros de corte	Parâmetros térmicos	Parâmetros Dinâmicos
*Tolerâncias/folgas *Eixo-árvore desbalanceado *Potência	*Dureza *Dimensões *Sistema de fixação	*Geometria *Desgastes e/ou avarias	*Profundidade *Avanço *Velocidade	*Meio lubrificadorrefrigerante *Temperatura na zona de corte	*Forças de usinagem *Vibrações *Formação do cavaco

Figura 2.9 – Representação dos parâmetros e propriedades que influenciam na rugosidade [adaptada de Khorasani, 2012].

Sultan et al., 2015, observaram na furação do aço AISI 316L que a rugosidade da parede do furo diminui à medida que a velocidade de corte aumenta, pois o escoamento do cavaco é facilitado. Em contrapartida, quando o avanço aumenta, o valor da rugosidade também aumenta por causa das marcas deixadas pela broca. Resultados semelhantes foram obtidos por Pelikán et al., 2023, na furação do aço inoxidável endurecível por precipitação 17-4 PH (AISI 630).

O processo de furação em cheio pode apresentar variação da rugosidade na entrada e no final do furo usinado. Bordin, 2013, identificou essa diferença na furação do aço ABNT P20 com brocas de metal-duro revestidas de TiAlN (Figura 2.10). Nota-se que os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  na entrada do furo foram maiores que na saída. Contudo, esta abordagem foi pouco explorada em relação aos parâmetros de corte que mais influenciam a alteração da rugosidade ao longo da superfície do furo.

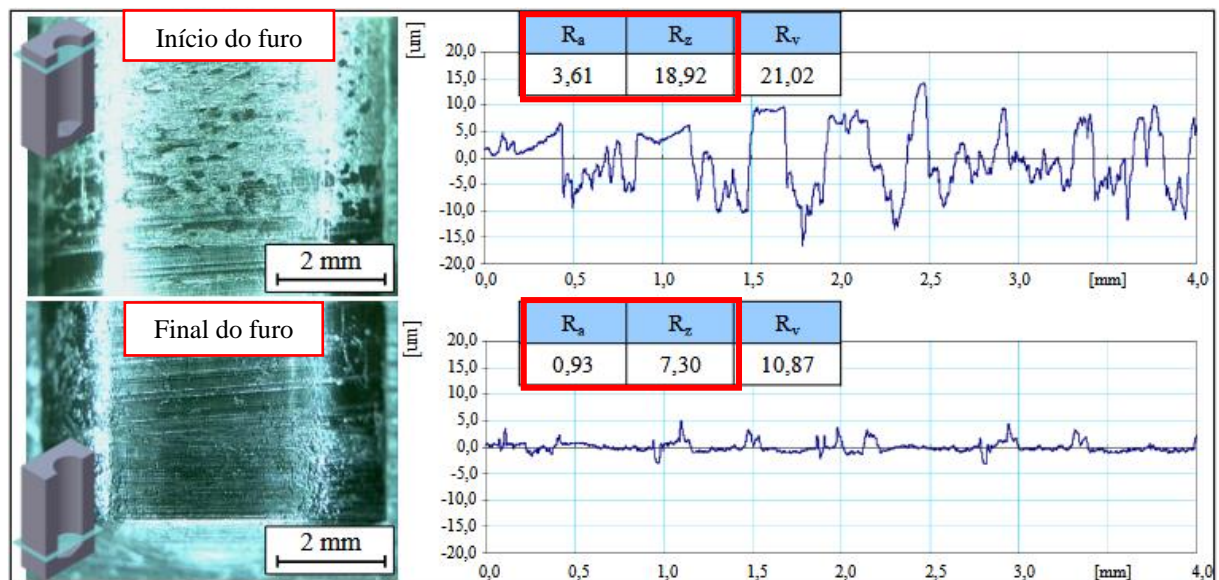


Figura 2.10 – Valores e perfis de rugosidades média na furação do aço ABNT P20 com brocas revestidas de TiAlN [adaptada de Bordin, 2013].

Bordin, 2013, justifica que a textura no início do furo apresenta marcas e material aderido de forma irregular, resultando em um perfil de rugosidade com picos e vales acentuados. Ademais, o atrito do cavaco com a parede do furo provavelmente contribuiu para um maior valor de rugosidade na entrada do furo. Para que esta hipótese corroborasse, a realização de micrografias nesta região confirmou a presença de material aderido. Segundo Nicola et al., 2010, o material pode deslizar entre as guias da broca e a peça e, por compressão, ser soldado na superfície do furo usinado devido às altas temperaturas na zona do corte, gerando

um perfil escamado aderido à superfície, que usualmente é chamado de caldeamento. Por fim, Bordin, 2013, observou no final do furo menores valores de rugosidade, com marcas transversais uniformes e alinhadas ao furo, caracterizando uma passagem adequada da ferramenta, e corroborando com os perfis de rugosidade observados.

### 2.3.1 Parâmetros estatísticos de rugosidade

Parâmetros estatísticos de rugosidade tem um melhor fundamento científico que os parâmetros aritméticos e podem melhor caracterizar a superfície usinada. Assim, a textura pode ser mais bem interpretada com a avaliação de ferramentas como a Curva de Abbott-Firestone (AFC) e a Função Distribuição de Amplitudes (ADF) aplicada nos perfis de rugosidade [Policena et al., 2019].

A AFC representa o perfil de rugosidade através de uma função de probabilidade cumulativa que indica o quanto acima ou abaixo de uma linha de referência estará o perfil. Essa função fornece informações importantes sobre o contato real e a capacidade de carga de superfície [Petropoulos et al., 2010]. De acordo com a norma DIN 4776, 1990, podem ser usados parâmetros de rugosidade para descrever o perfil, dividindo a AFC em três partes: picos ( $Rpk$ ), vales ( $Rvk$ ) e rugosidade central ( $Rk$ ). A Figura 2.11 demonstra como são determinados os parâmetros. Os parâmetros  $Mr1$  e  $Mr2$  representam a menor e a maior parcela de material.

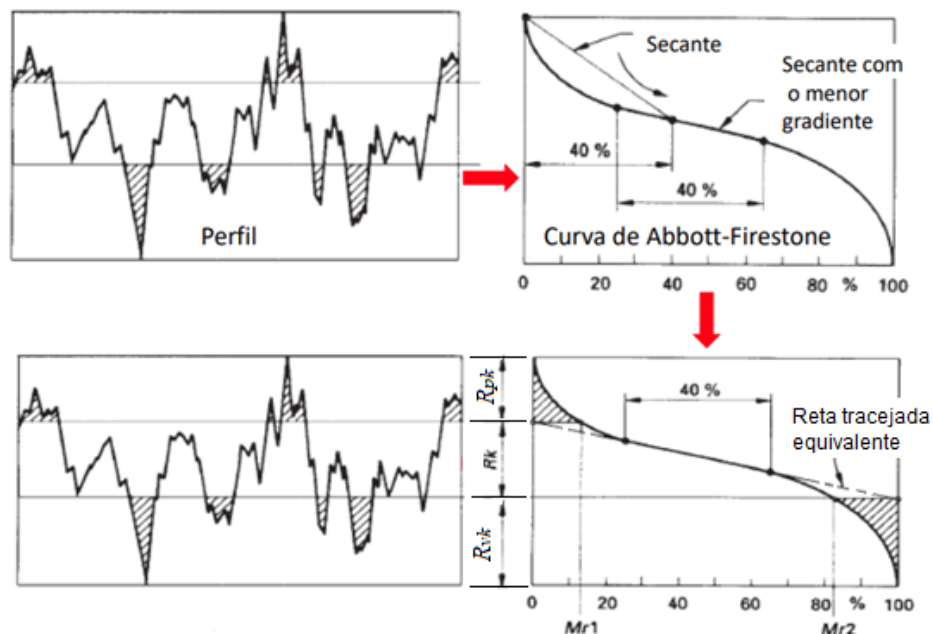


Figura 2.11 – Curva de Abbott-Firestone [adaptada de Petropoulos et al., 2010].



A ADF pode representar a distribuição de um perfil de rugosidade auxiliando na compreensão do comportamento dos picos e vales que uma superfície usinada apresenta. A Figura 2.12 mostra os dois parâmetros estatísticas de avaliação: assimetria ( $R_{sk}$ ) e curtose ( $R_{ku}$ ).

A assimetria ( $R_{sk}$ ) avalia o grau de desvio ou afastamento do eixo de simetria de um perfil de rugosidade. Em relação ao eixo de simetria, a superfície pode apresentar valores  $R_{sk}$  positivos ou negativos. Superfícies “vazias” de material (picos mais agudos) caracterizam  $R_{sk} > 0$ , enquanto superfícies “preenchidas” (vales mais agudos) distinguem  $R_{sk} < 0$  (Figura 2.12a). A curtose ( $R_{ku}$ ) descreve o grau de achatamento do perfil de rugosidade, atribuindo  $R_{ku} = 3$  para distribuições normais ou “mesocúrtica”. Para  $R_{ku} > 3$ , a superfície é definida com picos e vales mais agudos (distribuição leptocúrtica) enquanto para  $R_{ku} < 3$ , os picos e vales são mais achatados (distribuição platicúrtica) (Figura 2.12b) [Petropoulos et al., 2010].

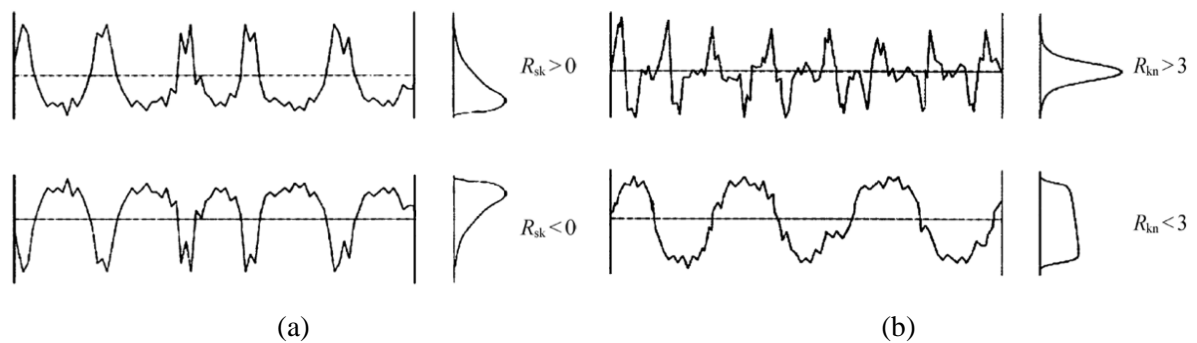


Figura 2.12 – Distribuição do perfil de rugosidade: (a) assimetria; (b) curtose [adaptada de Petropoulos et al., 2010].

Cada processo de usinagem, seu modo e as suas condições empregadas, confere características específicas de topografias às superfícies. Dessa maneira, o tipo de processo de usinagem empregado para remoção de material da peça de trabalho afeta diretamente nos valores de orientação obtidos na AFC e na ADF. Portanto, de acordo com a literatura, estudos da relação dos parâmetros de corte com os valores de AFC e ADF, e sua inter-relação com outros parâmetros de rugosidade da superfície, ainda são pouco estudados.

## 2.4 Desvio Dimensional e Desvio Geométrico de Circularidade

A qualidade da superfície dos furos é um parâmetro significativo para o comportamento funcional de componentes mecânicos que melhora as propriedades tribológicas, de corrosão e de resistência à fadiga. Os desvios dimensionais e geométricos normalmente ocorrem durante

a furação devidos aos efeitos da geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem (avanço, velocidade de corte e meio lubrificante). A microestrutura da peça de trabalho e a rigidez da máquina-ferramenta também proporcionam um efeito significativo sobre a rugosidade, o desvio dimensional e a circularidade [Ramachandran e Nidhi, 2017].

Normalmente, as condições ideais do processo de furação têm como objetivo minimizar as forças de corte, o desgaste da ferramenta e o consumo de energia, e maximizar a taxa de remoção de material, sem comprometer a qualidade do furo especificada em projeto. A precisão dos furos executados também é um parâmetro importante na furação, e os fatores controláveis de entrada considerados (geometria da ferramenta e parâmetros de usinagem) influenciam diretamente nos resultados. A análise de todos os fatores pode ser realizada para encontrar quais as principais influências na qualidade do furo, visto que baixos níveis de avanço ( $f$ ) reduzem os erros de circularidade [Hayajneh, 2001] e o incremento da velocidade de corte ( $v_c$ ) pode aumentar ligeiramente este desvio [Sultan et al., 2015].

No processo de furação, o desvio dimensional é a diferença entre o diâmetro nominal da broca utilizada e o diâmetro real produzido, que pode estar contido dentro de uma tolerância dimensional estipulada conforme o projeto [Agostinho et al., 1997]. O desvio de circularidade pode ser definido como a máxima diferença entre o maior raio ( $R$ ) e o menor raio ( $r$ ) de um círculo padrão que representa a superfície ideal de projeto de um furo, conforme apresentado de maneira simplificada na Figura 2.13. Assim, a diferença entre os raios destas circunferências corresponde ao valor numérico da tolerância [Bezerra, 1998].

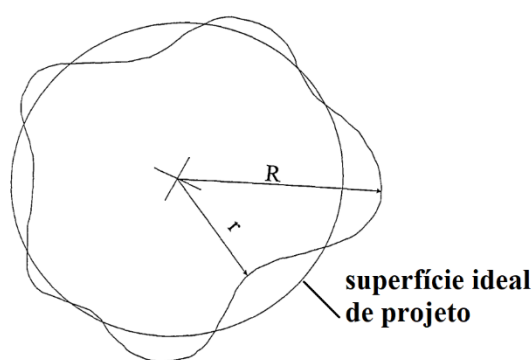


Figura 2.13 – Representação do desvio de circularidade [adaptado de Bezerra, 1998].

Durante a furação de aços inoxidáveis austeníticos, a maior parte da energia mecânica associada à formação de cavacos é convertido em calor, aumentando consideravelmente a temperatura na zona de corte. Este aumento pode causar danos térmicos na broca (rápido

desgaste) e na peça (desvios dimensionais e geométricos). Assim, é necessário uma compreensão precisa dos efeitos da temperatura na qualidade dos furos durante a usinagem [Sato et al., 2013]. O desvio dimensional pode ser menor na saída dos furos executados, e esta diferença é causada pela maior temperatura na zona de corte. Uma maior temperatura na saída do furo tem relação direta com a falta de lubrificação no fundo do furo, que ocasiona dilatação térmica durante o corte e uma contração no diâmetro do furo após o resfriamento [Santana, 2015]. Os controles dos desvios são mais críticos quando o uso de lubrificante é reduzido ou eliminado, pois as altas temperaturas no processo podem afetar as precisões geométrica e dimensional dos furos. No entanto, essa influência não é completamente compreendida e pouco estudada na literatura.

Na furação o batimento radial da broca também possui um elevado grau de importância, visto que pode comprometer a circularidade e o desvio dimensional dos furos devido ao centro da broca estar deslocado em relação a linha de centro do furo a ser usinado [Chiou e Wu, 1998]. Uma das maneiras de reduzir esse problema é medindo o batimento radial nas guias da broca, no ponto mais distante de sua fixação, conforme representado pela Figura 2.14. Os fabricantes de brocas recomendam que esse batimento radial não ultrapassem o valor de 20  $\mu\text{m}$  [Sandvik, 1994; Smith, 2008].

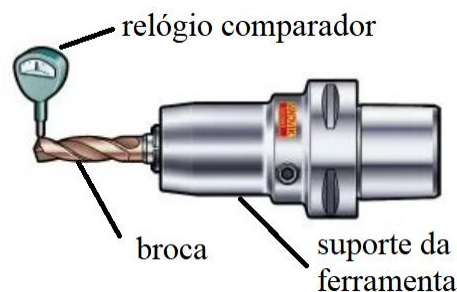


Figura 2.14 – Posição para medição do batimento radial [Sandvik, 1994].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo estão caracterizados os materiais e métodos adotados experimentalmente para o estudo investigativo da qualidade dos furos gerados pelo processo de furação em cheio dos aços inoxidáveis austenítico Core<sup>®</sup> 304L e super austenítico Ultra<sup>®</sup> 904L. Os procedimentos utilizados na experimentação foram:

- obtenção do material para os experimentos e sua caracterização;
- especificação do centro de usinagem, ferramental e dispositivos para fixação dos materiais;
- realização dos furos conforme planejamento experimental;
- medição das rugosidades dos furos efetuados;
- medição das circularidades dos furos realizados;
- medição dos desvios dimensionais dos furos executados.

Os aços inoxidáveis austenítico Core<sup>®</sup> 304L (PREn = 18) e super austenítico Ultra<sup>®</sup> 904L (PREn = 33) utilizados na experimentação apresentam composição química certificada pelo fabricante [Outokumpu, 2013] e estão apresentadas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Composição química do Core<sup>®</sup> 304L (% em massa).

	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	Si	N	C	P	S
Certificado	8,07	18,3	-	-	1,73	0,27	0,086	0,023	0,043	0,002
Normalizado	8 ~ 10,5	18 ~ 20	-	-	< 2,0	< 0,75	< 0,10	< 0,03	< 0,045	< 0,03

Tabela 3.2 – Composição química do Ultra<sup>®</sup> 904L (% em massa).

	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	Si	N	C	P	S
Certificado	24,3	19,7	4,3	1,35	1,44	0,28	0,06	0,01	0,021	0,001
Normalizado	24 ~ 26	19 ~ 21	4 ~ 5	1,2 ~ 2,0	< 2,0	< 0,7	< 0,1	< 0,02	< 0,030	< 0,01

As durezas dos materiais foram medidas na empresa 3D Metrologia através do durômetro Rockwell HRS-150, com carga de 100 kgf ( $\cong$  981 N) e penetrador esférico de 1/16” (1,58 mm). Os valores médios obtidos foram 88,6 HRB para o 304L e 87,2 HRB para o 904L.

Os corpos de prova com utilizados nos experimentos foram cortados a laser conforme desenho elaborado no AutoCAD com dimensões de 105 x 140 mm a partir de duas chapas de

com 12,7 mm de espessura, uma de aço Core<sup>®</sup> 304L e outra de Ultra<sup>®</sup> 904L. Para facilitar a fixação das chapas cortadas por parafusos, furos foram gerados no corte a laser de tal forma que atendessem as furações existentes na base do centro de usinagem. Em relação ao controle de quais furos seriam realizados durante os experimentos, fez-se necessário gerar um desenho com o mapeamento dos furos (ver Figura 3.5) para indicá-los de acordo com a execução proposta.

Os experimentos foram realizados utilizando o centro de usinagem ROMI Discovery 308 localizado no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). A máquina possui motor do eixo-árvore com rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 7,5 cv (5,5 kW) e está representada pela Figura 3.1.



Figura 3.1 – Centro de usinagem ROMI Discovery 308.

Para a realização de todos os experimentos deste trabalho foram utilizadas seis brocas helicoidais de metal-duro Kennametal KC7315 conforme Figura 3.2. A broca possui revestimento multicamadas de TiAlN (nitreto de titânio-alumínio) e canais internos de lubrificação. De acordo com o fabricante, a ferramenta pode ser utilizada na furação de praticamente todos os materiais das classes ISO (exceto endurecidos), diferindo apenas nos níveis dos parâmetros empregados [Kennametal, 2023].

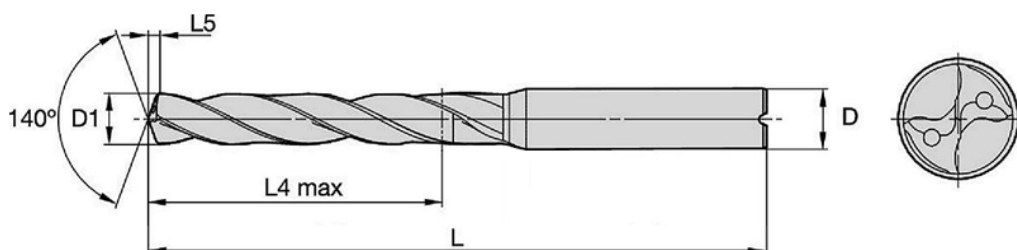


Figura 3.2 – Broca helicoidal com revestimento de TiAlN [adaptada de Kennametal, 2023].

As dimensões da broca incluem diâmetro (D1) de 9 mm, comprimento total da broca (L) de 89 mm, comprimento máximo de furação (L4 max) de 35 mm, diâmetro da haste (D) de 10 mm, comprimento de ponta (L5) de 1,531 mm e ângulo de ponta de 140°.

Considerando a fixação por cone (mandril) porta-pinça, o batimento da broca foi verificado em cada experimento realizado, e todos os valores encontrados ficaram abaixo de 10  $\mu\text{m}$ , ou, seja, inferior a 20  $\mu\text{m}$  [Smith, 2008].

A fixação das chapas foi realizada com a aplicação de buchas espaçadoras que garantem uma distância segura entre o material usinado e as bases do centro de usinagem evitando contato da ferramenta, e sendo fixado por parafusos Allen com sextavado interno. A Figura 3.3 mostra a montagem da peça usinada sobre a mesa do centro de usinagem. Na experimentação, utilizou-se o biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 com diluição 1:20 a uma vazão máxima de 960 l/h aplicado em abundância externamente à broca (entrada do furo).

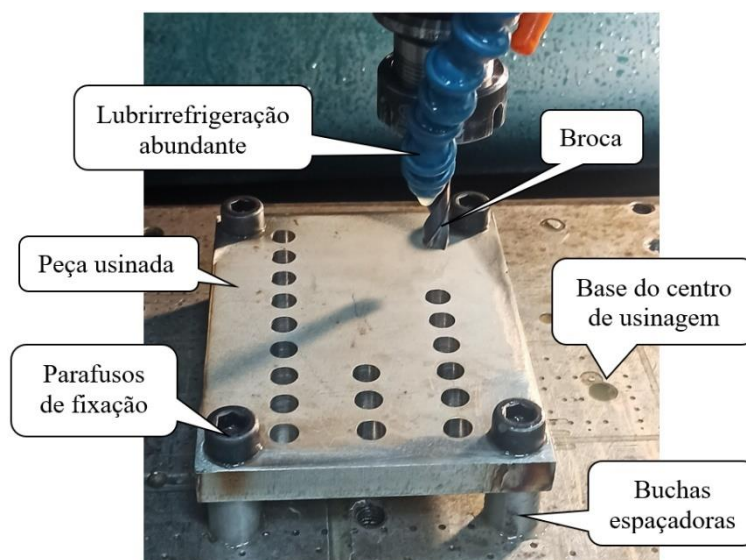


Figura 3.3 – Fixação dos corpos de prova para realização dos experimentos.

A avaliação da qualidade dos furos foi realizada com as condições idênticas de usinagem para os dois materiais Core<sup>®</sup> 304L e Ultra<sup>®</sup> 904L, conforme cada experimento identificado por E1 a E6. Na Tabela 3.3 são apresentados os parâmetros de corte com aumento/redução de rotação ( $n$ ) e velocidade de avanço ( $v_f$ ) para cada experimento.

Ensaio preliminares de vida de ferramenta foram realizados com os parâmetros de corte referentes aos experimentos E5 e E6 para o aço inoxidável 904L [Vilanova et al., 2023], considerando as faixas de valores indicadas pelo fabricante da broca para a furação com lubrificação interna. Contudo, o centro de usinagem ROMI só dispõe de aplicação externa

à broca. No E5, o ensaio foi interrompido quando a broca apresentou microlascamentos na aresta principal de corte após 60 furos, sem exibir desgastes significativos. No E6, os microlascamentos ocorreram após o 10º furo, também sem a presença de desgastes. Assim, constatou-se que a afiação da broca não era comprometida com a realização de até dez furos.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte aplicados nos experimentos.

Experimentos	$n$ (rpm)	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/volta)	$v_f$ (mm/min)	Material
Experimento E1	1260	35,62	0,12	150	904L/304L
Experimento E2	1050	29,69	0,10	100	904L/304L
Experimento E3	840	23,75	0,06	50	904L/304L
Experimento E4	630	17,82	0,12	75	904L/304L
Experimento E5	840	23,75	0,12	100	904L/304L
Experimento E6	1260	35,62	0,08	100	904L/304L

Em se tratando de acabamento, optou-se então por variar os níveis com valores de  $n$  entre 840 e 1260 rpm e de  $v_f$  acima e abaixo de 100 mm/min com o intuito de verificar a influência de tais parâmetros na rugosidade e nos desvios (de circularidade e dimensional). Diferentes trabalhos sustentam a escolha dos níveis de  $v_c$  empregados no presente estudo [Çaydaş et al., 2011; Sultan et al., 2015].

Visto a quantidade de brocas disponíveis, definiu-se para cada experimento que as brocas novas efetuassem primeiramente os três furos no aço 904L e, depois, fossem reutilizadas para a usinagem dos três furos no aço 304L. Após a realização dos três furos no 904L, as brocas foram colocadas em um recipiente com uma solução de ácido clorídrico (10%) para remoção do material aderido e posterior furação no 304L, conforme mostra a Figura 3.4.

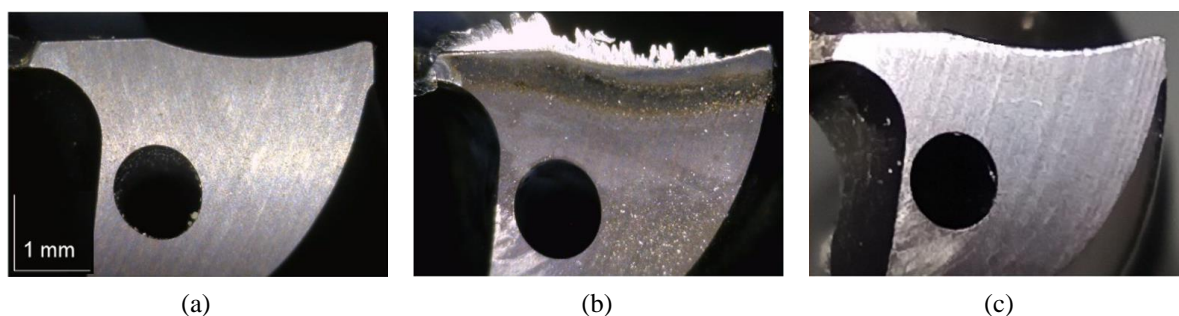


Figura 3.4 – Estado da broca: (a) nova; (b) após três furos no aço 904L; (c) limpa para uso no aço 304L.

Os experimentos seguiram rigorosamente o desenho desenvolvido no AutoCAD e foi respeitado a sequência de furos indicada pela Figura 3.5, de acordo com cada execução identificada pela nomenclatura EX.X

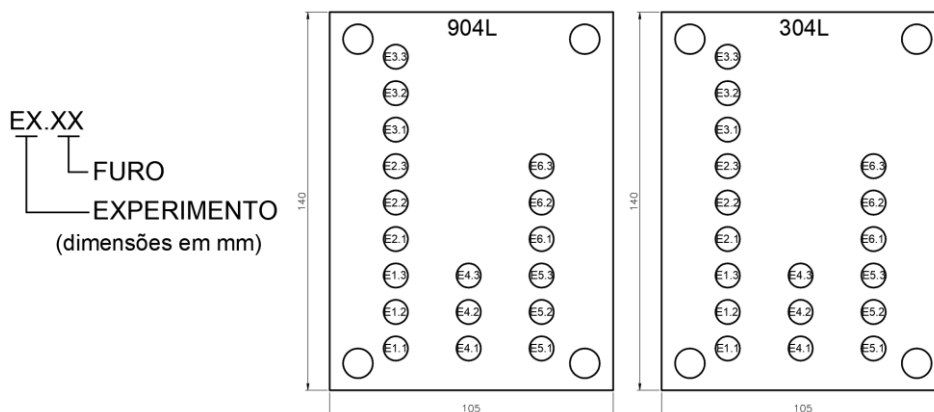


Figura 3.5 – Mapeamento dos furos para os experimentos nos aços 304L e 904L.

Para cada furo executado, foram feitas aquisições de valores de rugosidade média ( $R_a$ ) e média parcial ( $R_z$ ) em cada região do furo (entrada, meio, saída) de ambos os materiais. As medições foram realizadas através do rugosímetro portátil Mitutoyo® SurfTest SJ-201P com resolução de  $0,01 \mu\text{m}$ . A Figura 3.6 indica as posições de medição das rugosidades em três intervalos para cada furo (entrada, meio, saída), com distâncias aproximadas de 4 mm entre elas. Os perfis de rugosidade foram analisados individualmente e as medições identificadas com valores de picos ou vales divergentes foram repetidas.

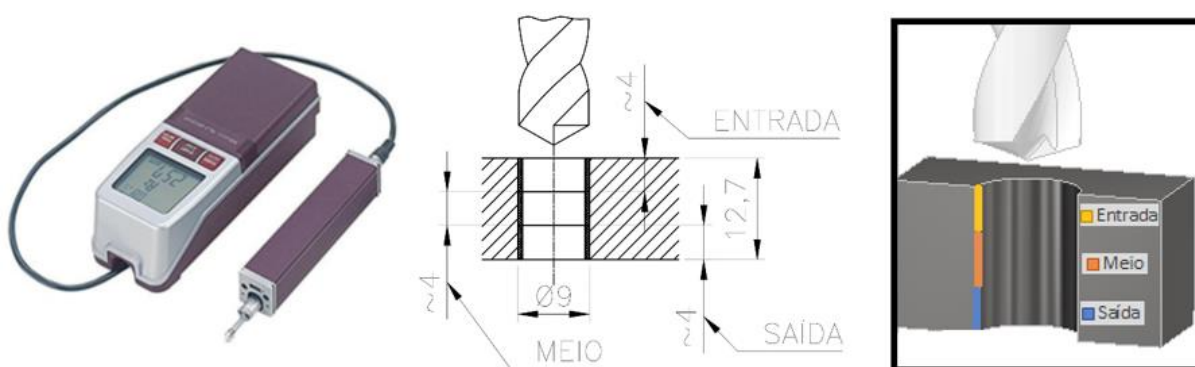


Figura 3.6 – Rugosímetro utilizado e as posições das medições indicadas em milímetros.

A medição de circularidade dos furos foi realizada através do escaneamento dos diâmetros com a utilização de uma máquina de medição por coordenadas com sensor SP25



(resolução de  $0,1 \mu\text{m}$ ). A distância em relação às faces da peça foi de 2 mm (cota X), tanto para entrada como para saída do furo, conforme representado pela Figura 3.7.

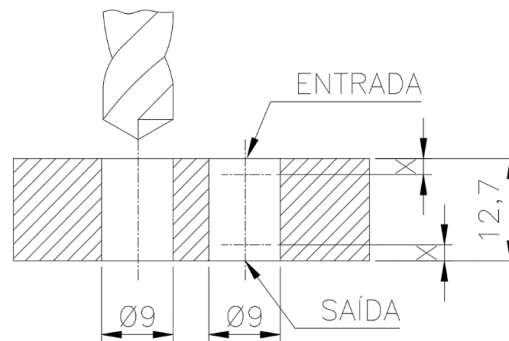


Figura 3.7 – Posição das medições de circularidade.

Imagens da entrada e da saída dos furos foram obtidas através do microscópio estereoscópio binocular modelo Stemi 508, com uma ampliação de 25x, disponível no Laboratório de Tribologia (LATRIB-UFRGS) (Figura 3.8a). As placas de 304L e 904L foram posicionadas a  $45^\circ$  em relação à lente do microscópio para captura das imagens na entrada e na saída dos furos sem a necessidade de realizar o corte nas placas (Figura 3.8b).

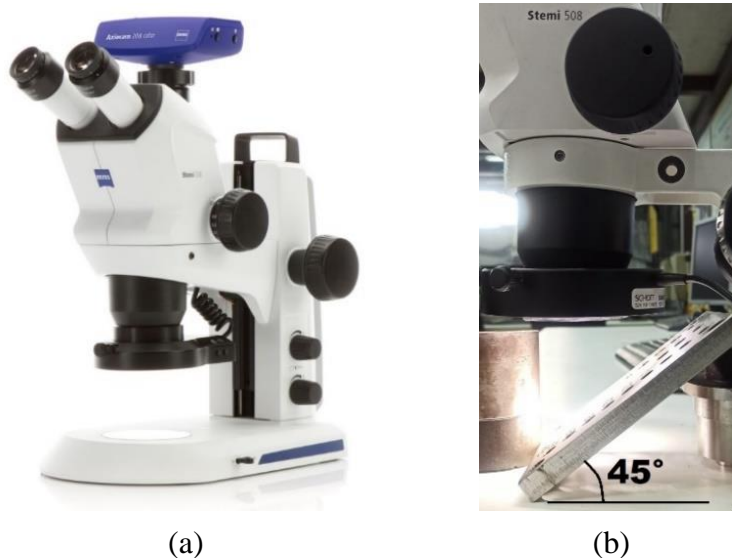


Figura 3.8 – Aquisição de imagens dos furos: (a) microscópio Stemi 508; (b) posição de coleta das imagens.

As imagens dos cavacos foram capturadas com a utilização de uma câmera digital Sony IMX586 de 64 MP, com lentes de comprimento focal de 35 mm e zoom digital de 3x, sem

utilização de flash. Os cavacos foram colocados sobre uma mesa plana sem imperfeições. Para identificar a escala das imagens capturadas, utilizou-se uma régua de acrílico transparente posicionada próxima dos materiais coletados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O efeito dos parâmetros de usinagem na qualidade do furo produzido ao longo da profundidade desenvolve uma boa compreensão do efeito que estes parâmetros de processo podem impactar na qualidade do furo. Tal entendimento pode fornecer uma visão dos problemas de controle de qualidade dos furos quando os parâmetros do processo são ajustados para obter certas características que atendam os requisitos do produto final. Assim, este Capítulo apresenta os resultados de rugosidade, circularidade e desvios dimensionais obtidos nos experimentos de furação em cheio dos aços inoxidáveis Outokumpu Core<sup>®</sup> 304L e Ultra<sup>®</sup> 904L. Estes dados foram analisados na entrada, no meio e na saída dos furos.

### 4.1 Rugosidades das Paredes dos Furos

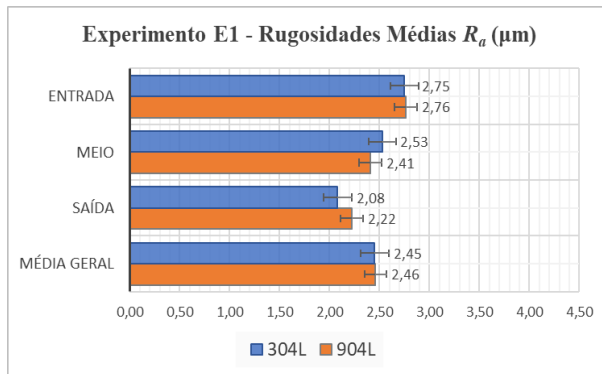
Os resultados obtidos pelas medições das rugosidades de todos os experimentos estão nas Tabelas A.1 e A.2 (Apêndices). Os menores valores médios de rugosidade encontrados foram no experimento E4 ( $v_c = 17,82$  m/min,  $f = 0,12$  mm/volta) na furação do aço 304L ( $R_a = 1,46$  mm e  $R_z = 8,01$  mm) e os maiores também foram no E4 na furação do 904L ( $R_a = 3,34$  mm e  $R_z = 16,17$  mm). Além disso, os valores de rugosidade medidos tenderam a ser menores no 304L em comparação ao 904L. O maior teor de níquel do 904L (24,3%) em comparação ao do 304L (8,07%) faz com que o SASS tenha resistência mecânica bastante superior ao ASS. O elevado teor de níquel, associado com alto teor de cromo (19,7%) e a presença de molibdênio (4,3%), fazem com que a usinabilidade de SASS seja bem menor que a do ASS, pois alta resistência mecânica, alto grau de encruamento e alta ductilidade tendem a gerar desgaste rápido da ferramenta e pior acabamento [Polishetty et al., 2015; Takatsu, 1990].

A Figura 4.1 apresenta todos os valores médios dos três furos (entrada, meio, saída) executados em cada experimento referente à rugosidade média  $R_a^\dagger$ . Em ambos os materiais, os valores de  $R_a$  foram maiores na entrada do furo que na saída, indo ao encontro com o estudo realizado por Bordin, 2013. Segundo Silva et al., 2019, na entrada do furo os maiores valores de rugosidade estão relacionados com o atrito do cavaco e das guias da broca com a parede do furo. De acordo com Dirviyam, 2010, a redução dos valores de rugosidade quando há aumento

---

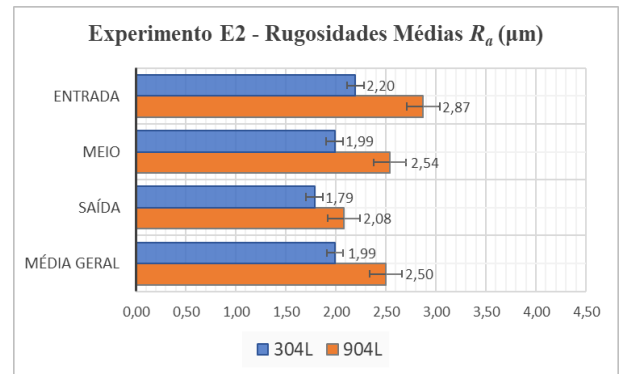
<sup>†</sup> Como o comportamento dos gráficos referentes à rugosidade  $R_z$  foram semelhantes ao dos gráficos de  $R_a$  (ver Figura A.1 nos Apêndices), a análise preliminar foi realizada apenas para  $R_a$ .

de  $v_c$  é devido à diminuição da formação de APC e ao melhor escoamento dos cavacos. No entanto, segundo o autor, a alta  $v_c$  tende a causar um aumento na rugosidade, possivelmente devido ao aumento do desgaste da ferramenta de corte.



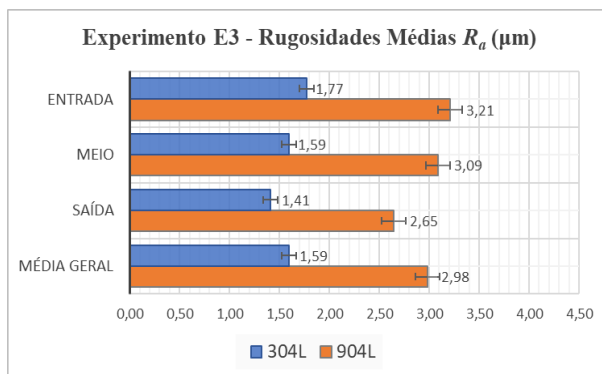
$v_c = 35,62 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(a)



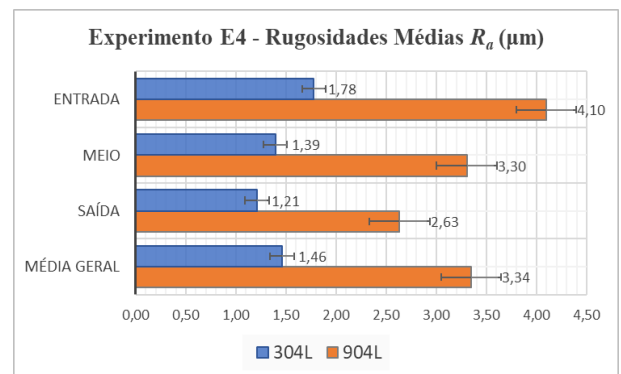
$v_c = 29,69 \text{ m/min}; f = 0,10 \text{ mm/volta}$

(b)



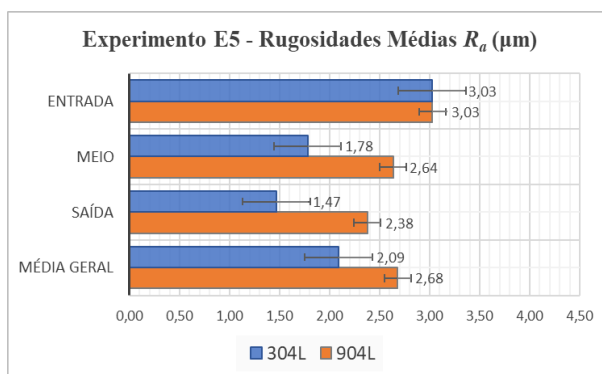
$v_c = 23,75 \text{ m/min}; f = 0,06 \text{ mm/volta}$

(c)



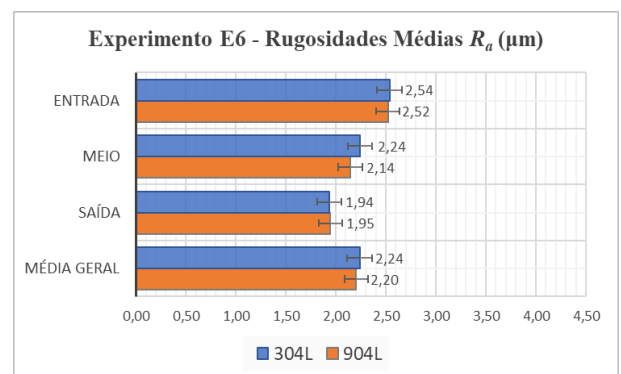
$v_c = 17,82 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(d)



$v_c = 23,75 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(e)



$v_c = 35,62 \text{ m/min}; f = 0,08 \text{ mm/volta}$

(f)

Figura 4.1 – Valores das rugosidades médias  $R_a$  de todos os experimentos.

Na comparação do experimento E1 (Figura 4.1a) com o E6 (Figura 4.1f), ambos com velocidades de corte iguais ( $v_c = 35,62$  m/min) mas avanços diferentes ( $f = 0,12$  mm/volta e  $f = 0,08$  mm/volta, respectivamente), o E6 apresentou valores médios de  $R_a$  menores em todas posições dos furos nos dois materiais (304L e 904L). Kamdani et al., 2018, realizaram a furação em cheio do aço austenítico AISI 316L com diferentes condições de lubrificação e encontraram valores de rugosidade média  $R_a$  menores quando reduziram os valores de  $f$ , pois à medida que o avanço diminui, as marcas de avanço deixadas pela broca, o desgaste da ferramenta e a força de avanço também diminuem.

Ao comparar os valores médio de  $R_a$  nos experimentos E3 (Figura 4.1c) e E5 (Figura 4.1e), também com velocidades de corte iguais ( $v_c = 23,75$  m/min) e avanços diferentes (respectivamente  $f = 0,06$  mm/volta e  $f = 0,12$  mm/volta), menores valores de  $R_a$  foram observados para o E3 no 304L. Em contrapartida, o maior avanço reduziu o valor médio de  $R_a$  para o E5 no 904L. Isto pode ser explicado devido à menor formação de aresta postiça (APC) na ferramenta de corte com o aumento da velocidade de avanço (50 para 100 mm/min). A APC tem uma estrutura instável que resulta na deterioração da qualidade e no aumento da rugosidade da superfície da peça [Hayajneh, 2001].

Nos experimentos E1 (Figura 4.1a) e E4 (Figura 4.1d), com o mesmo avanço ( $f = 0,12$  mm/volta) e velocidades de corte diferentes ( $v_c = 35,62$  m/min e  $v_c = 17,82$  m/min, respectivamente), os valores médios de  $R_a$  apresentaram grande diferença para ambos os materiais. A menor  $v_c$  aumentou a rugosidade na furação do 904L (cerca de 36%); no entanto, reduziu os valores de  $R_a$  no 304L (aproximadamente 40%). Isto sugere que altas velocidades de corte e baixos avanços favorecem melhor acabamento no 904L. Isso pode ter relação direta com a baixa formação de APC e a facilidade da extração dos cavacos. Além disso, a alta velocidade de corte aumenta a temperatura e consequentemente reduz a resistência do material ao cisalhamento [Ciftci, 2006]

Nos experimentos E3 (Figura 4.1c) e E4 (Figura 4.1d) foram identificadas as maiores diferenças de valores de  $R_a$  gerados em todas as regiões dos furos medidos nos materiais em estudo. No E3, o valor médio de  $R_a$  na furação do 904L foi 1,87 vezes maior que na do 304L, enquanto no E4, essa diferença foi 2,29 vezes maior. Esse comportamento pode estar relacionado com a morfologia de cavaco gerado. A Figura 4.2f (E3) e a Figura 4.2h (E4) mostram cavacos fragmentados do 904L, diferentemente dos cavacos longos do 304L (Figura 4.2e e Figura 4.2g).

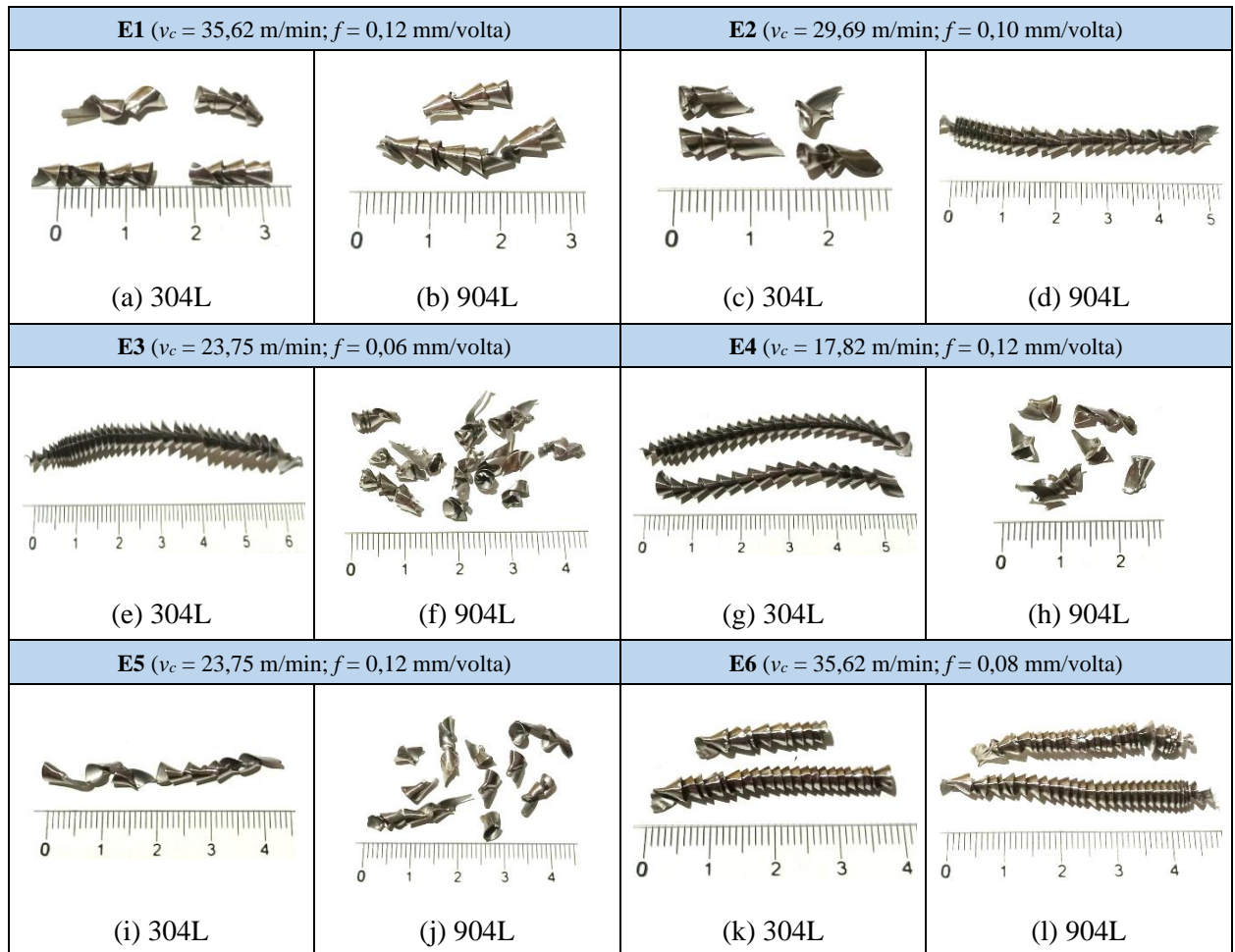


Figura 4.2 – Cavacos comuns aos furos de todos os experimentos realizados.

O acúmulo de cavacos fragmentados e a sua dificuldade na extração de dentro dos furos (principalmente na aplicação externa de fluido lubrificante) são considerados negativos no processo de furação, pois contribuem para uma superfície pobre e com altos valores de rugosidade média [Tian et al., 2020]. Com a aplicação de lubrificação internamente à broca, provavelmente este problema deixaria de existir. Ao comparar o processo de furação em cheio do AISI 316L com lubrificação externa e interna com condições de corte iguais, Kamdani et al., 2018, identificaram que o sistema de refrigeração interno reduz as forças de avanço e, por conseguinte, melhora o acabamento do furo. Além disso, se a furação fosse realizada com lubrificação interna, poderia reduzir a temperatura da ferramenta durante a usinagem e melhorar o fluxo de escoamento de cavacos durante a usinagem.

O experimento E4 ( $v_c = 17,82$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) gerou os menores valores de rugosidade média na furação do aço inoxidável 304L, enquanto o E6 ( $v_c = 35,62$  m/min;  $f = 0,08$  mm/volta) resultou nos menores valores de  $R_a$  na furação do aço 904L (Figura 4.3a).

Neste caso, os valores foram em média 33,6% inferiores para o aço 304L (E4) em comparação ao 904L (E6). Por outro lado, os maiores valores de  $R_a$  foram encontrados no experimento E1 ( $v_c = 35,62$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) para o 304L e no E4 para o 904L (Figura 4.3b). Aqui, os valores foram em média 36,3% superiores para o 904L (E4) em comparação ao 304L (E1). O mesmo comportamento de  $R_a$  ocorreu com  $R_z$ . No caso, os valores de  $R_z$  foram 34,4% menores no 304L (E4), Figura 4.3c, e 19,5% maiores no 904L (E4), Figura 4.3d.

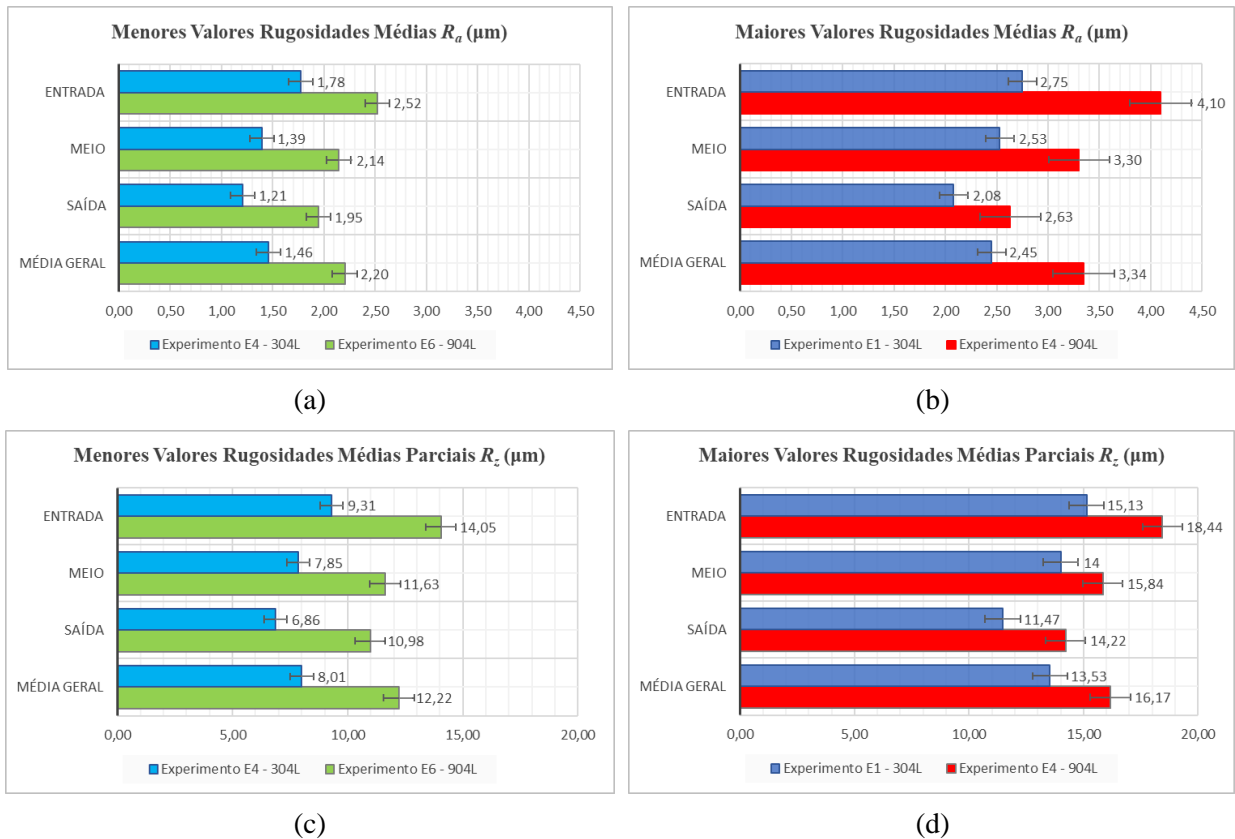


Figura 4.3 – Menores e maiores valores médio das rugosidades médias  $R_a$  de todos os experimentos.

Nota-se que alta  $v_c$  e baixo  $f$  favorecem o acabamento do 904L, enquanto baixa  $v_c$  e alto  $f$  reduz a rugosidade do 304L. Ramachandran et al, 2017, conseguiram obter com a mais alta  $v_c$  (30 m/min) e o mais baixo  $f$  (0,03 mm/volta) o melhor acabamento na furação do AISI 316L. Os autores concluíram que o aumento de  $v_c$  reduziu a formação de APC e a redução do avanço proporcionou menor força de avanço, o que contribuiu para a redução da vibração do eixo-árvore, e conseqüentemente melhorou o acabamento.

Por fim, os menores valores de rugosidade na saída do furo podem estar relacionados com a menor deformação plástica nesta região. A intensidade do atrito dos cavacos e das guias

da broca com a parede do furo depende do tempo em que estão em contato. Entretanto, na entrada do furo, ocorre maior tempo de exposição das guias com maior arraste de material que na saída do furo. A distribuição da "deformação plástica triangular" (DPT), representada na Figura 4.4, pode ser usada para mostrar de forma ilustrativa o volume de material que é arrastado, e a interação das guias da broca sobre a peça durante a furação em cheio.

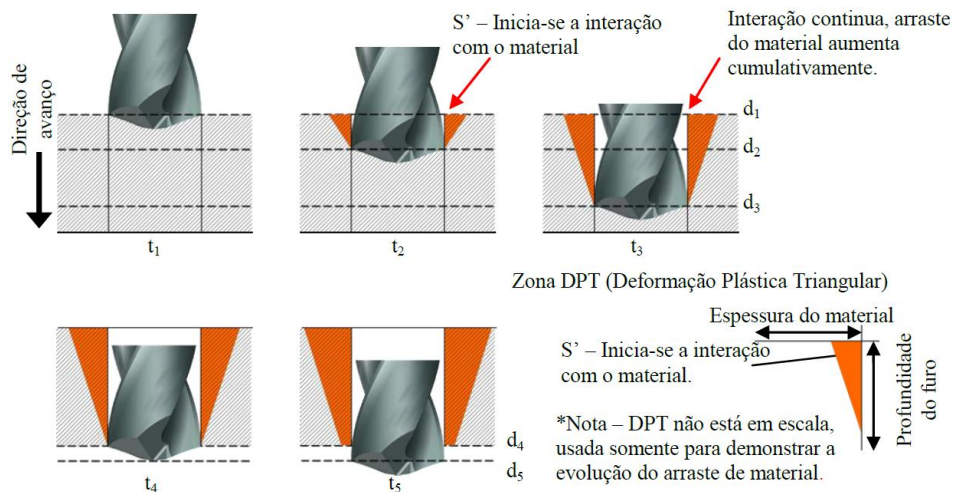


Figura 4.4 – Representação dos estágios de interação da ferramenta de corte com a peça usinada [Bordin, 2013].

Na entrada do furo, tem-se um aumento do cisalhamento até um valor crítico que gera fraturas na superfície do furo. Após a ferramenta ultrapassar a espessura da peça, o contato das guias não ocorre mais, pois as arestas de cortes principais já realizaram o furo por completo. Entretanto, a geração de calor persiste após as quinas da broca ultrapassarem a parede do material, mesmo a DPT sendo menor [Kwong et al., 2009]. A quantidade de calor gerada é muito alta, pois a maior parte permanece na zona de corte devido à baixa condutividade térmica do material inoxidável. Essa alta temperatura, juntamente com o atrito na margem da broca, pode resultar essa DPT ao longo da parede do furo. Em geral, a camada DPT é fina e muitas vezes não é facilmente decifrável ao usinar com ferramentas com arestas de corte afiadas. À medida que a broca se desgasta e se deteriora, e com uso de altas  $v_c$ , ocorre o aumento da espessura da camada de DPT. Reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta e remover o calor da zona de corte são abordagens comuns para reduzir efetivamente o tamanho da espessura da zona deformada, melhorando os valores de rugosidade na entrada do furo [Pradeep e Raj, 2022].



#### 4.1.1 Efeito dos Parâmetros de Corte

A Figura 4.5 mostra os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) e média parcial ( $R_z$ ) gerados na entrada, no meio e na saída dos furos dos aços inoxidáveis austeníticos 304L e 904L em função da velocidade de corte nos experimentos E1, E4 e E5 com avanço fixo (0,12 mm/volta).

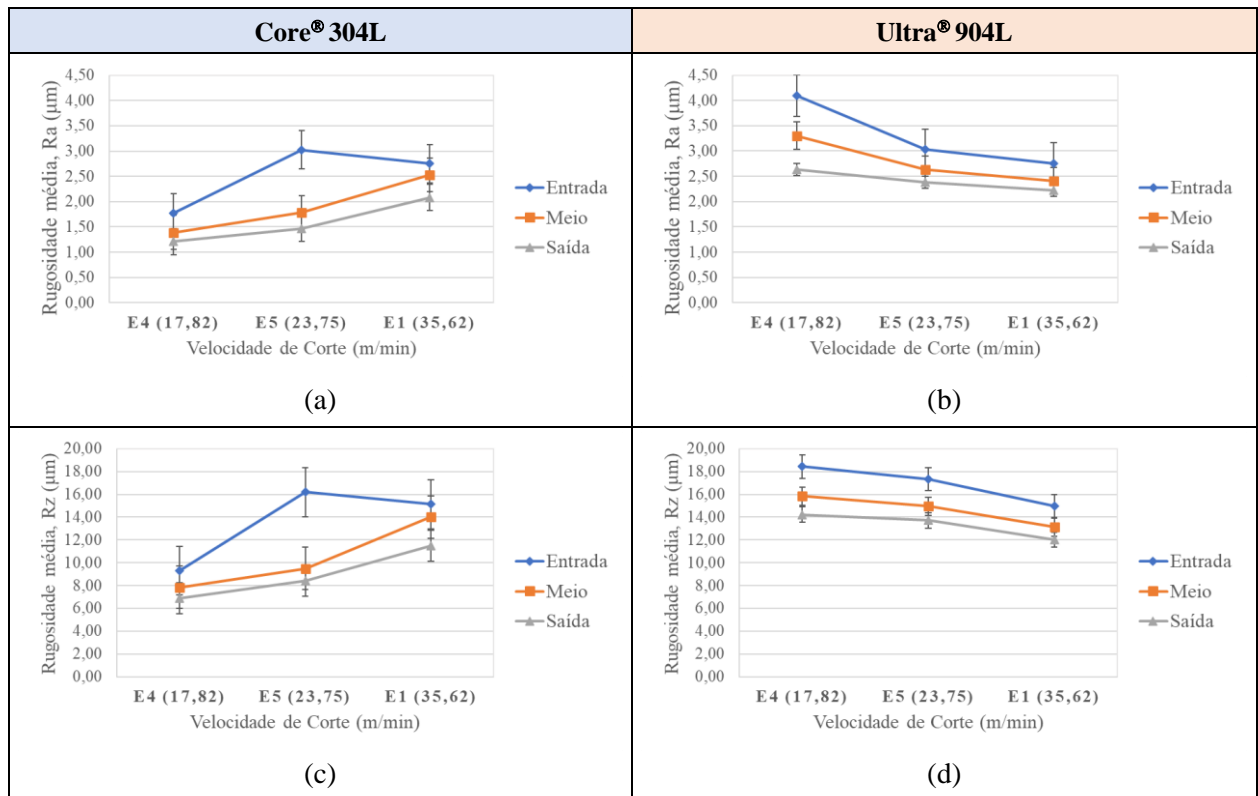


Figura 4.5 – Comparativo das rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  em relação à velocidade de corte com  $f = 0,12$  mm/volta.

Com o incremento da velocidade de corte e mantendo o avanço constante ( $f = 0,12$  mm/volta), houve aumento dos valores das rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  no aço inoxidável 304L. Contudo, na entrada do furo, os valores foram menores no experimento E1 ( $v_c = 35,62$  m/min) em relação ao E5 ( $v_c = 23,75$  m/min), como mostram a Figura 4.5a e a Figura 4.5c. Como mencionado anteriormente, o material no fundo do furo deforma-se plasticamente e encrua ao invés de sofrer cisalhamento (principalmente na região central da broca). Isto favorece o desgaste da aresta transversal de corte e aumenta a força de avanço e, por conseguinte, a vibração da máquina e da ferramenta, prejudicando o acabamento [Balaji et al, 2016]. Por outro lado, o mesmo crescimento da velocidade de corte com  $f = 0,12$  mm/volta causa uma diminuição dos valores de  $R_a$  e  $R_z$  em todas as posições dos furos do 904L, conforme

Figura 4.5b e Figura 4.5d. No SASS, o aumento da  $v_c$  pode melhorar tanto o acabamento do furo com a diminuição da APC quanto o escoamento dos cavacos. No entanto, o incremento de  $v_c$  tende a aumentar o desgaste da broca, que contribui para o aumento dos valores de rugosidade [Dirviyam, 2010].

A Figura 4.6 apresenta os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  produzidos na entrada, no meio e na saída dos furos dos aços inoxidáveis 304L e 904L em função do avanço nos experimentos E3 e E5 com velocidade de corte constante (23,75 m/min).

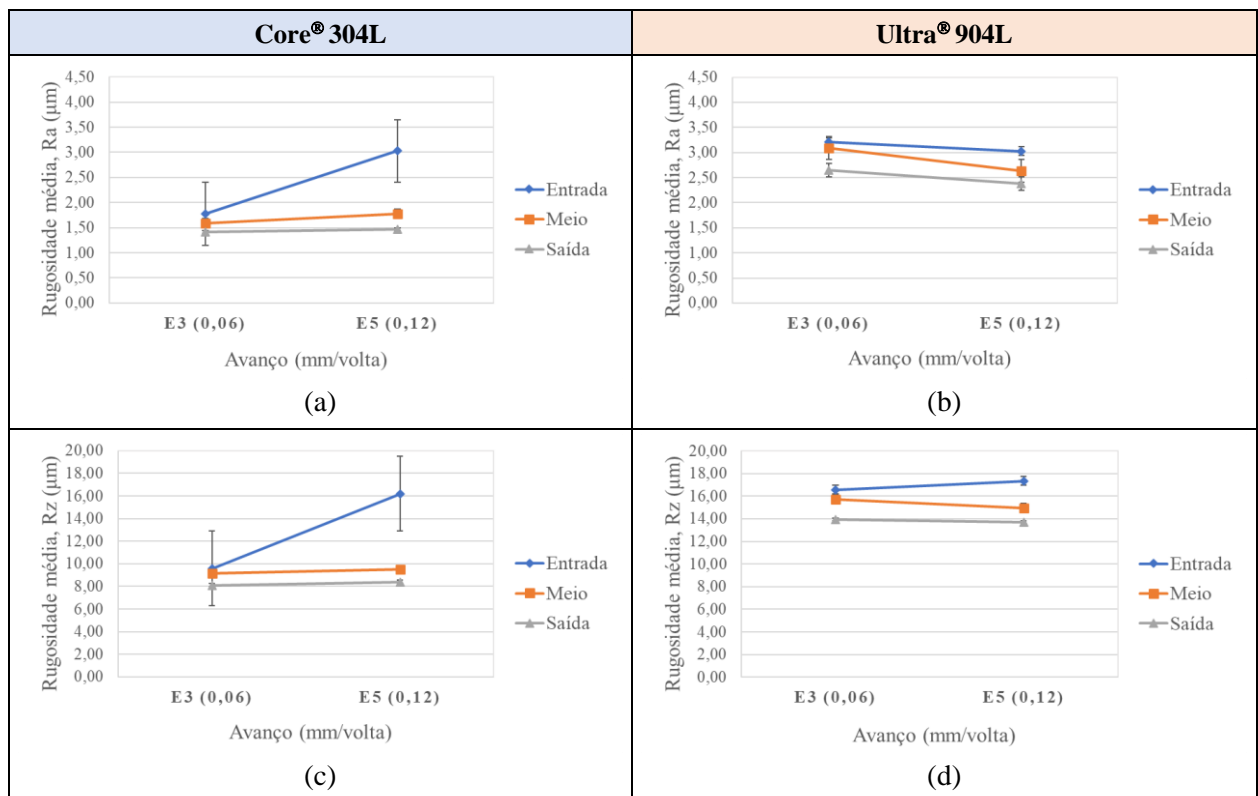


Figura 4.6 – Comparativo das rugosidades médias  $R_a$  e  $R_z$  em relação ao avanço com  $v_c = 23,75$  m/min.

Observa-se que o aumento de  $f$  em 100% gerou maiores valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  em todas as posições do furo para o aço 304L (maior efeito na entrada do furo e menor na saída), conforme Figura 4.6a e Figura 4.6c. Com exceção na entrada do furo do 904L, em que o valor de  $R_z$  aumenta ligeiramente com o acréscimo de  $f$  (Figura 4.6d), em todas as outras posições (Figura 4.6b e Figura 4.6d) as rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  foram um pouco menores com o incremento do avanço. Isso sugere que o avanço tem um efeito bastante expressivo sobre o 304L e pouca influência sobre o 904L quando  $v_c = 23,75$  m/min, pois o 304L deforma-se mais plasticamente que o 904L, encruando ao invés de cisalhar, aumentando a força de avanço e os valores de

rugosidade [Ciftci, 2006]. Jayaganth et al., 2018, realizaram a furação do aço inoxidável martensítico AISI 410 usando três velocidades de corte (11, 16 e 21 m/min) e três avanços (0,02, 0,05 e 0,08 mm/volta). Os resultados obtidos pelos autores foram semelhantes aos encontrados na furação do 904L. Os valores de  $R_a$  diminuíram de 7,326 para 2,423  $\mu\text{m}$  com o aumento de  $v_c$  de 11 para 16 m/min devido à facilidade da remoção dos cavacos em fita, e também pela redução da formação de APC na broca.

A Figura 4.7 exibe os valores de  $R_a$  e  $R_z$  medidos na entrada, no meio e na saída dos furos dos aços 304L e 904L em função do avanço nos experimentos E1 e E6 com velocidade de corte constante (35,62 m/min).

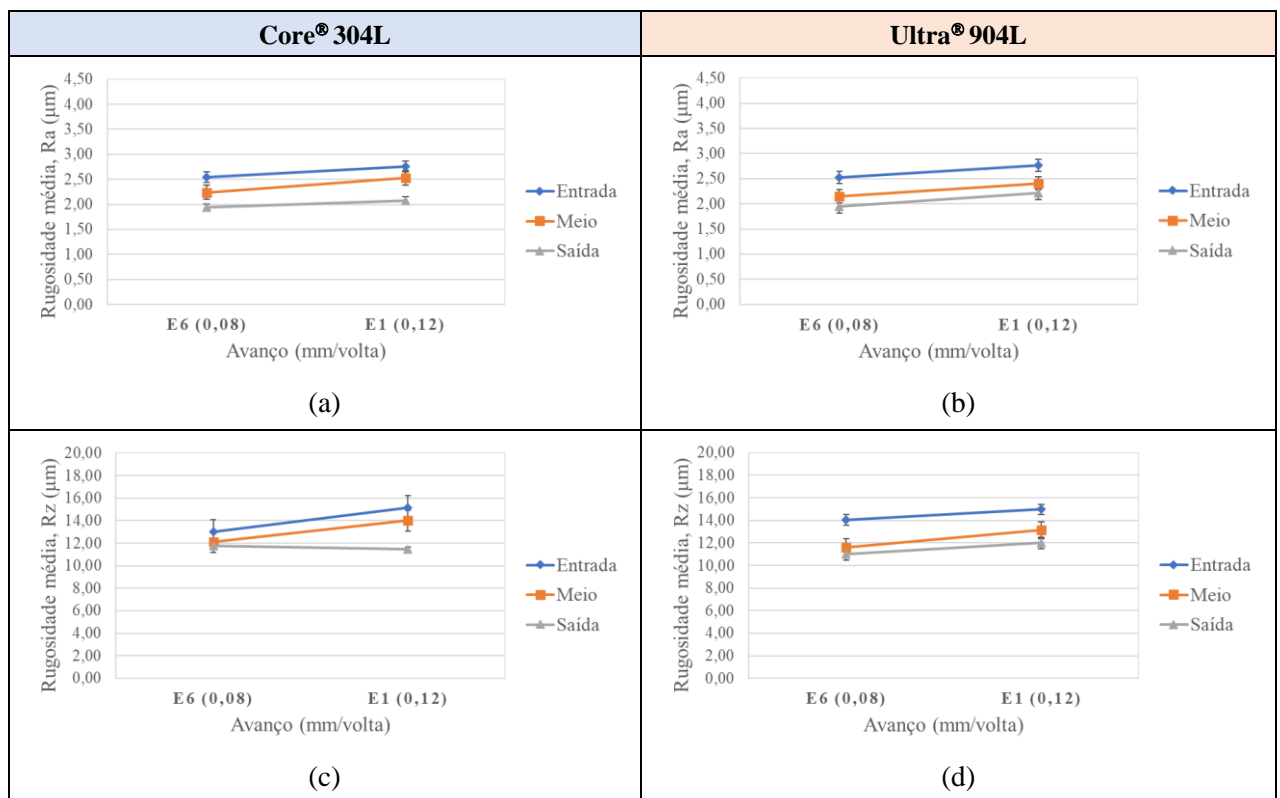


Figura 4.7 – Comparativo das rugosidades médias  $R_a$  e  $R_z$  em relação ao avanço com  $v_c = 35,62$  m/min.

Neste caso, o aumento de  $f$  em 50% gerou maiores valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  em todas as posições do furo para o 904L, conforme Figura 4.7b e Figura 4.7d. Com exceção na saída do furo do 304L, em que o valor de  $R_z$  diminuiu com o incremento de  $f$  (Figura 4.7c), nas demais situações (Figura 4.7a e Figura 4.7c) as rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  foram maiores com o acréscimo do avanço, como esperado, visto que as marcas de avanço da ferramenta dependem diretamente de  $f$ , além das vibrações geradas pelo aumento dos esforços de corte. Isso sugere que o

incremento de 50% em  $v_c$  altera o comportamento do processo de furação dos aços inoxidáveis em estudo.

Çiçek et al., 2012b, realizaram a furação do aço inoxidável AISI 304 variando a velocidade de corte (10, 12, 14 e 16 m/min) e mantendo o avanço fixo (0,06 mm/volta). Os autores observaram que os valores de rugosidade média  $R_a$  aumentaram com o incremento da velocidade de corte, pois este acréscimo de  $v_c$  favoreceu a formação de cavacos quebradiços que ficaram presos no fundo do furo, com difícil remoção, que prejudicaram o acabamento.

#### 4.1.2 Curva de Abbott-Firestone e Função Distribuição de Amplitudes

O experimento E4 ( $v_c = 17,82$  m/min,  $f = 0,12$  mm/volta) demonstrou maior diferença de valores médios de rugosidades obtidos nas furações dos aços inoxidáveis Core® 304L e Ultra® 904L, e escolheu-se o furo N° 2 do experimento em cada material. Na Figura 4.8 estão representados os perfis de rugosidades de acordo com a posição medida. Notam-se as variações de picos e vales que ocorrem entre os materiais.

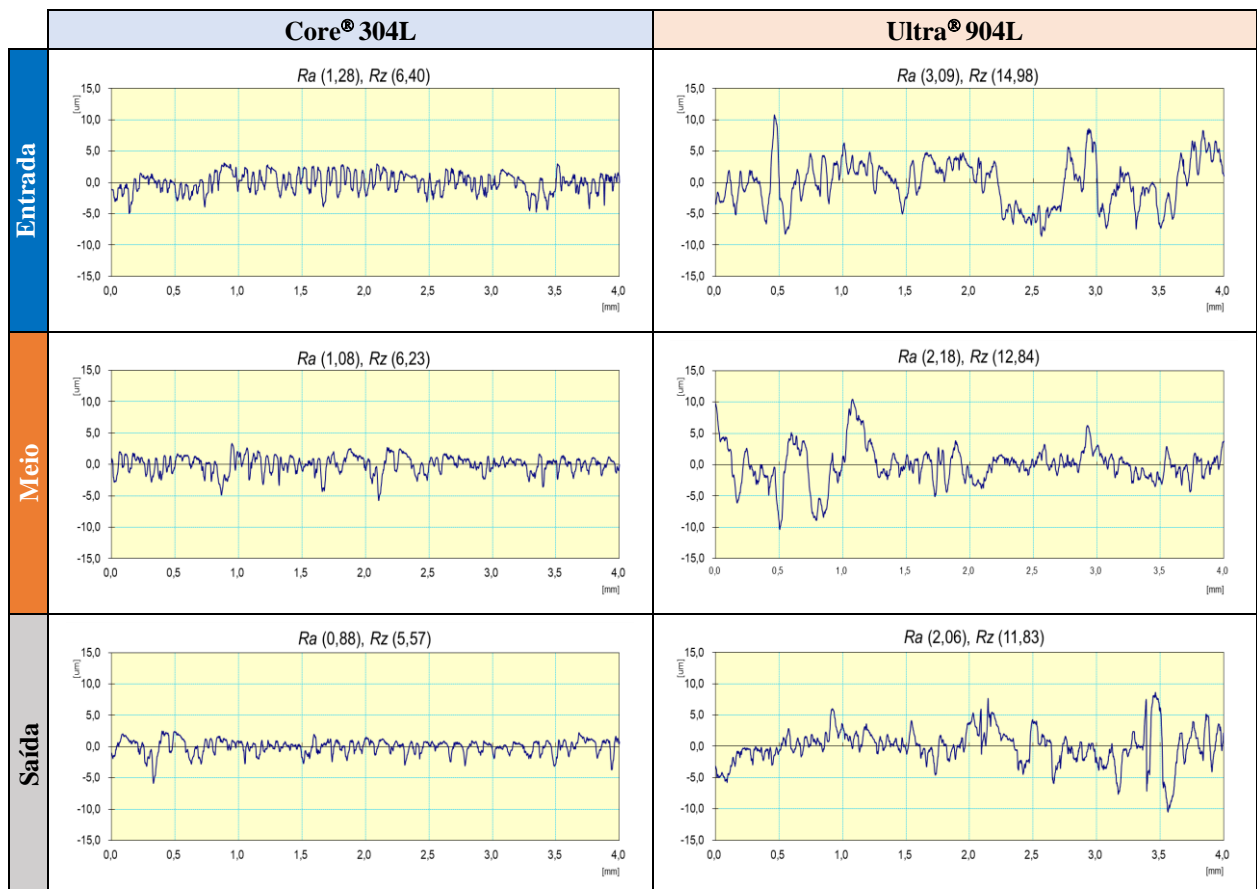


Figura 4.8 – Perfis de rugosidades do experimento E4 nos aços 304L e 904L.

A partir dos perfis de rugosidade, a Curva de Abbott-Firestone (AFC) (Figura 4.9) e a Função Distribuição de Amplitudes (ADF) (Figura 4.10) foram geradas.

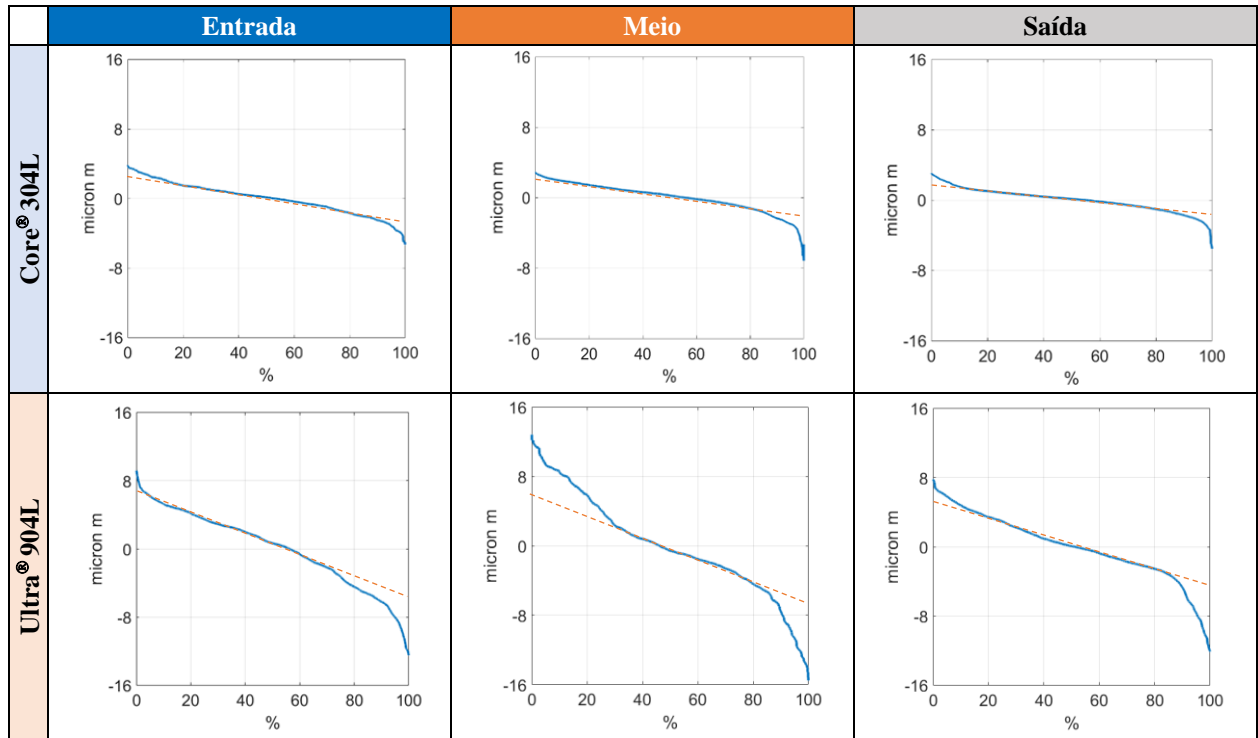


Figura 4.9 – Curva de Abbott-Firestone do experimento E4 nos aços 304L e 904L

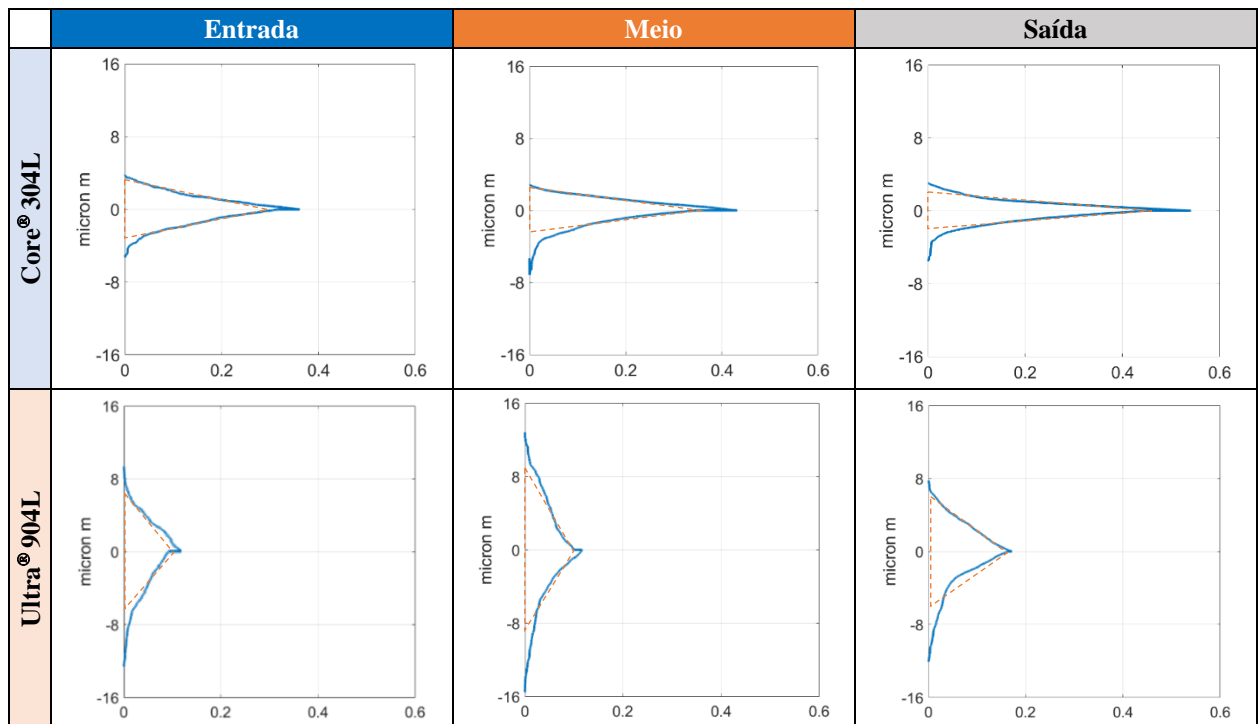


Figura 4.10 – Função Distribuição de Amplitudes do experimento E4 nos aços 304L e 904L

No 304L, a AFC (Figura 4.9) teve menor inclinação e a ADF (Figura 4.10) uma distribuição mais aguda (leptocúrtica), com maior concentração de valores em torno da média e assimetria negativa (vales mais agudos), principalmente no meio e na saída do furo. No 904L, a AFC (Figura 4.9) mostra maior inclinação com tendência a vales mais profundos, em especial, na entrada e na saída do furo (no meio, picos elevados e vales profundos), e a ADF (Figura 4.10) uma distribuição achatada (platicúrtica), sobretudo no meio do furo, e uma assimetria negativa evidenciada na saída do furo, indicando a presença de vales profundos em alguns pontos do perfil de rugosidade. Segundo Policena et al., 2019, a AFC que possui menor inclinação e a ADF mais aguda indicam superfícies com melhores acabamentos, justificando os menores valores de rugosidade encontrados no 304L. Para confirmar os dados obtidos pelas curvas AFC e ADF, as imagens das superfícies da entrada e da saída dos furos N° 2 do experimento E4 (Figura 4.11) mostram marcas na superfície do aço 304L menores que no aço 904L.

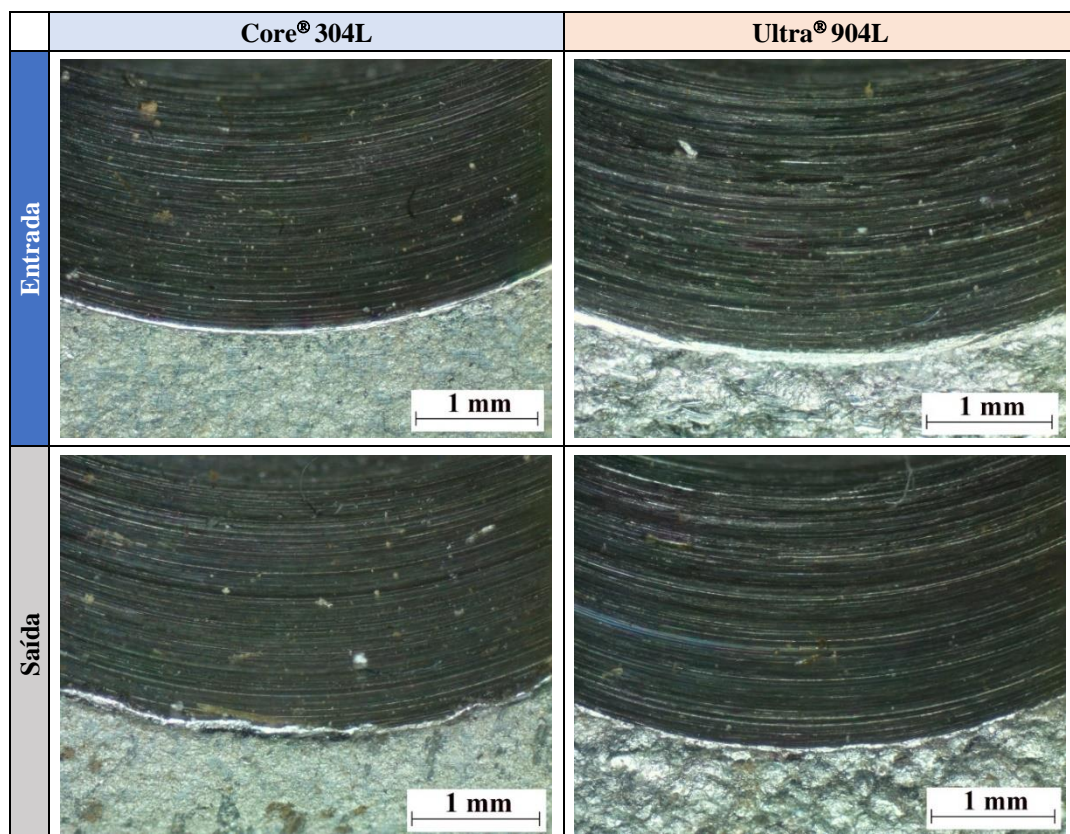


Figura 4.11 – Imagens das superfícies do experimento E4 nos aços 304L e 904L.

O experimento E6 ( $v_c = 35,62$  m/min,  $f = 0,08$  mm/volta) resultou nos menores valores médios de rugosidade gerados na furação do Ultra® 904L. Nesta mesma condição, os valores médios de rugosidade dos furos no Core® 304L foram maiores que no Ultra® 904L em todas as

posições medidas. Novamente optou-se por escolher o furo N° 2 para análise. A Figura 4.12 ilustra os perfis de rugosidades de acordo com a posição medida, não indicando diferenças expressivas entre eles.

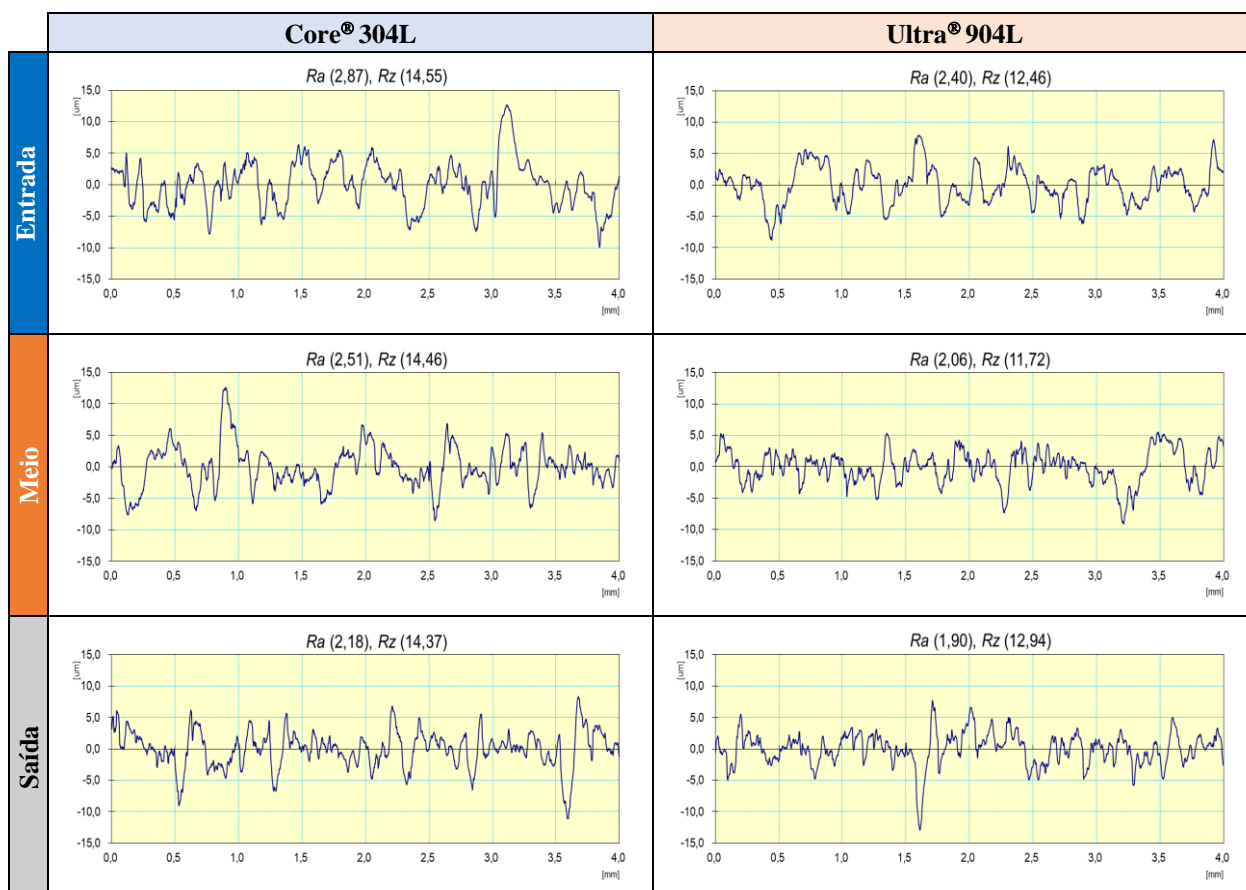


Figura 4.12 – Perfis de rugosidades do experimento E6 nos aços 304L e 904L.

A partir dos perfis de rugosidade, as curvas AFC e ADF foram também geradas para o experimento E6. No 304L, a AFC (Figura 4.13) teve uma maior inclinação, com tendência a vales mais profundos na saída do furo e a ADF (Figura 4.14) uma baixa concentração de valores em torno da média, com evidente assimetria negativa na saída do furo. A maior inclinação da AFC indica maiores valores de rugosidade encontrados na experimentação E6 com o material 304L. No 904L, a AFC (Figura 4.13) mostra uma menor inclinação, mas também com tendência a vales mais profundos, principalmente na saída do furo, e a ADF (Figura 4.14) uma distribuição com assimetria negativa no meio e principalmente na saída do furo, indicando que em alguns pontos do perfil de rugosidade ocorreu uma maior incidência de vales profundos. As imagens das superfícies dos furos N° 2 para ambos os materiais (Figura 4.15) não apresentam

diferenças significativas que permitam afirmar que a rugosidade gerada no 904L é menor que no 304L, especialmente na entrada dos furos.

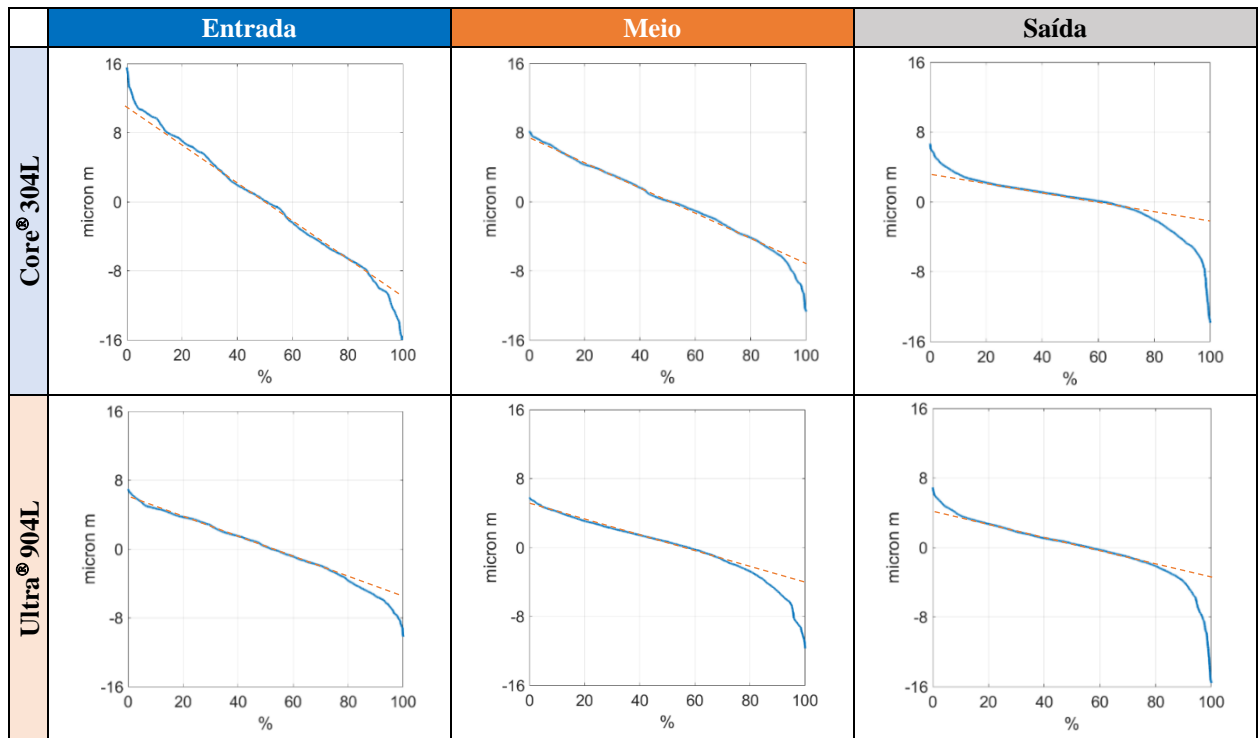


Figura 4.13 – Curva de Abbott-Firestone do experimento E6 nos aços 304L e 904L

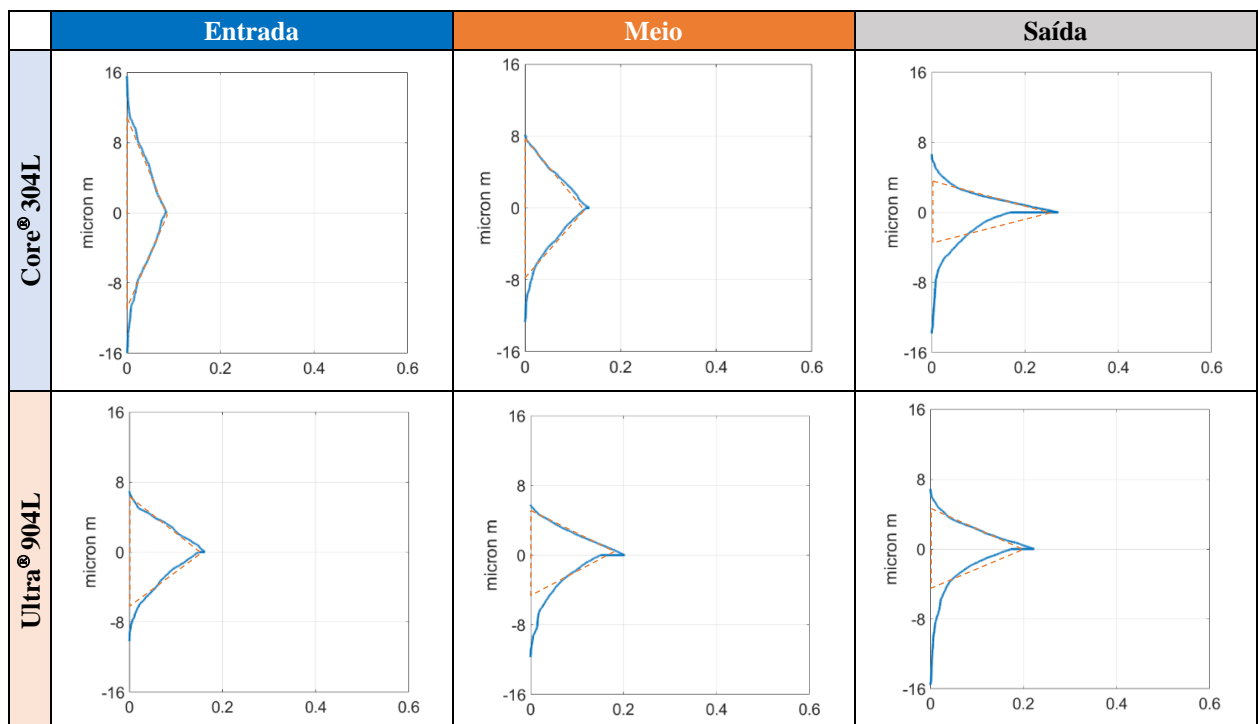


Figura 4.14 – Função Distribuição de Amplitudes do experimento E6 nos aços 304L e 904L



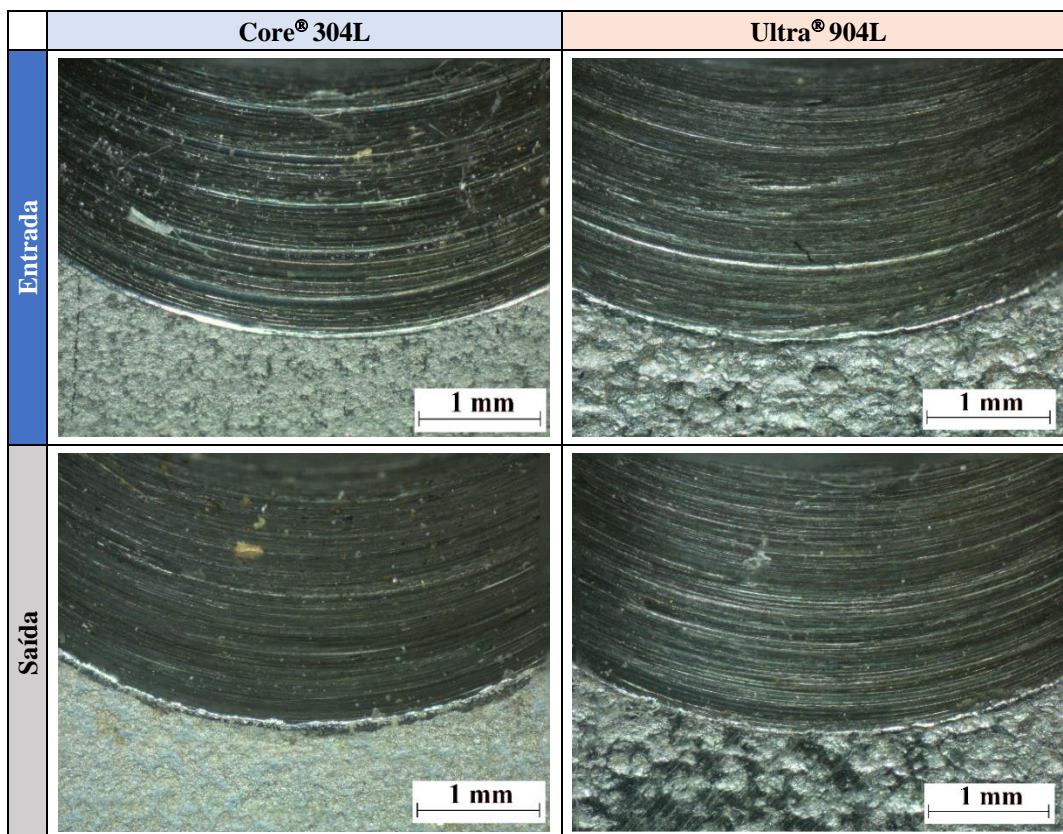


Figura 4.15 – Imagens das superfícies do experimento E6 nos aços 304L e 904L.

## 4.2 Desvios de Circularidade

Os valores dos desvios de circularidade de todos os experimentos estão representados nas Tabelas A.3 e A.4 (Apêndices). O menor desvio médio de circularidade encontrado foi no experimento E6 ( $v_c = 35,62$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) na furação do aço 904L ( $10,58 \mu\text{m}$ ) e o maior foi no E5 ( $v_c = 23,75$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) na furação do 304L ( $34,20 \mu\text{m}$ ).

Além disso, os valores de circularidade demonstraram comportamentos diferentes entre os materiais, tendendo a apresentar menores desvios na entrada dos furos no 304L e menores na saída no 904L para todos os experimentos, conforme mostra a Figura 4.16. Nos experimentos E5 e E6 o desvio médio foi maior na entrada do furo para o material 904L em relação ao 304L, entretanto todos os outros experimentos (E1, E2, E3, E4) ocorreu o contrário: valores menores na entrada para o 904L.

Ramachandran et al., 2017, constataram que os erros de circularidade aumentaram com o incremento da rotação na furação em cheio no AISI 316L, pois a alta rotação gerou maior vibração no conjunto máquina-ferramenta, que possuía baixa rigidez. Além disso, essa baixa

rigidez causou várias mudanças de direção durante o movimento da broca ao longo do eixo do furo, agravando a geometria do furo. Singaravel et al., 2020, também concluíram que os erros de circularidade foram maiores possivelmente devido à baixa rigidez mecânica que a máquina-ferramenta oferecia durante a furação com os maiores valores de rotação do eixo-árvore.

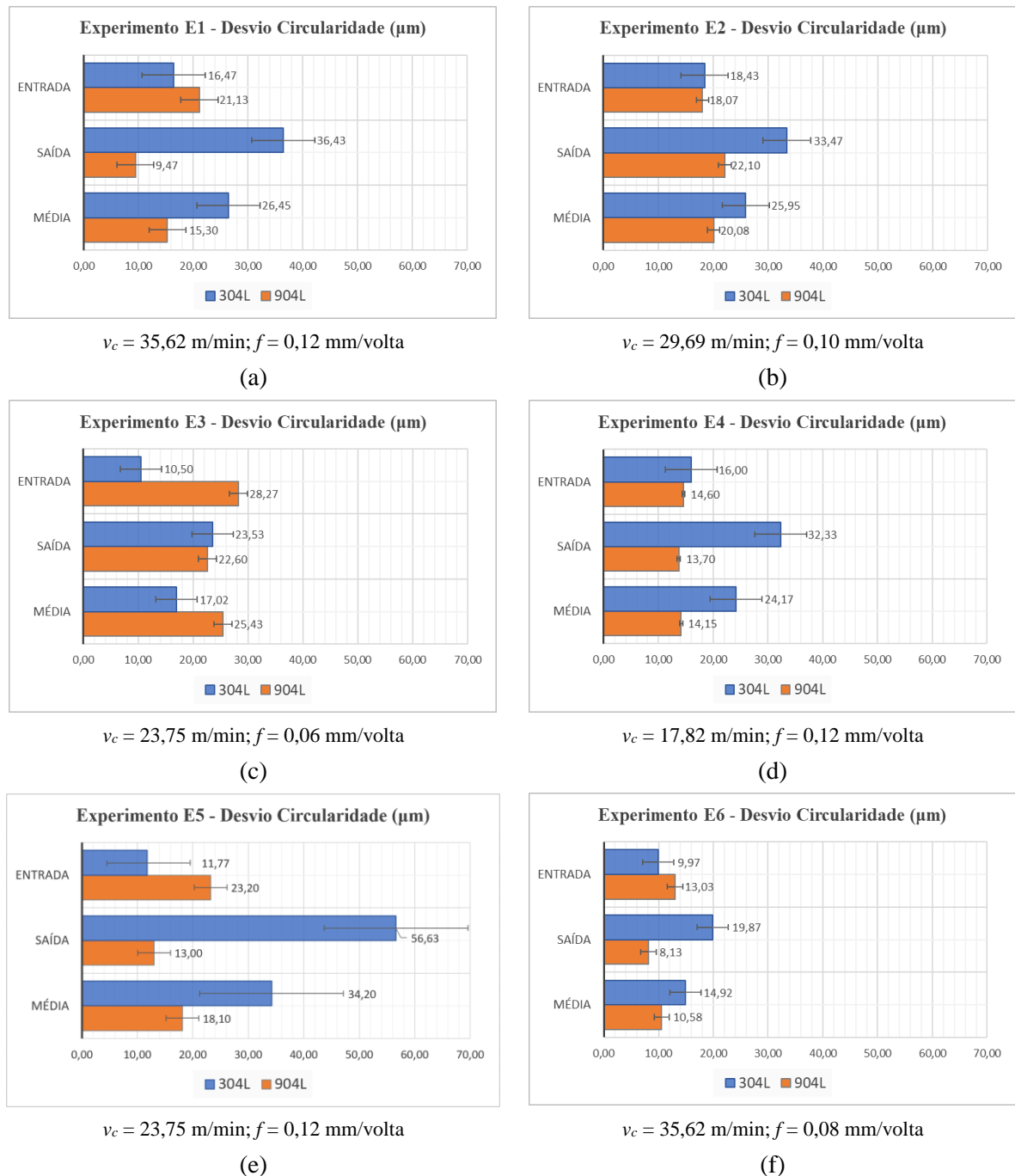


Figura 4.16 – Desvio médio da circularidade na furação dos aços 304L e 904L.

#### 4.2.1 Efeito dos parâmetros de corte nos desvios de circularidade

Os parâmetros de corte influenciam nos desvios de circularidade dos furos. Ao avaliar os desvios nos dois materiais com avanço fixo ( $f = 0,12$  mm/volta), constatou-se que o incremento da velocidade de corte (de 17,82 para 35,62 m/min) gera poucas diferenças nos valores médios de circularidade na entrada dos furos, sendo estes ligeiramente maiores para o 904L. No entanto, na saída dos furos, as diferenças são evidentes. No aço inoxidável 304L (Figura 4.17a), os valores de circularidade na saída dos furos são maiores que na entrada, enquanto que no 904L (Figura 4.17b), ocorre o oposto (maiores na entrada). Nota-se também que com o incremento de  $v_c$ , os desvios tendem a aumentar na saída dos furos no 304L e a diminuir no 904L. Consta-se ainda que o experimento E5 (ver Figura 4.16e) no 304L ocasionou o maior erro de circularidade na saída do furo dentre todos os analisados.

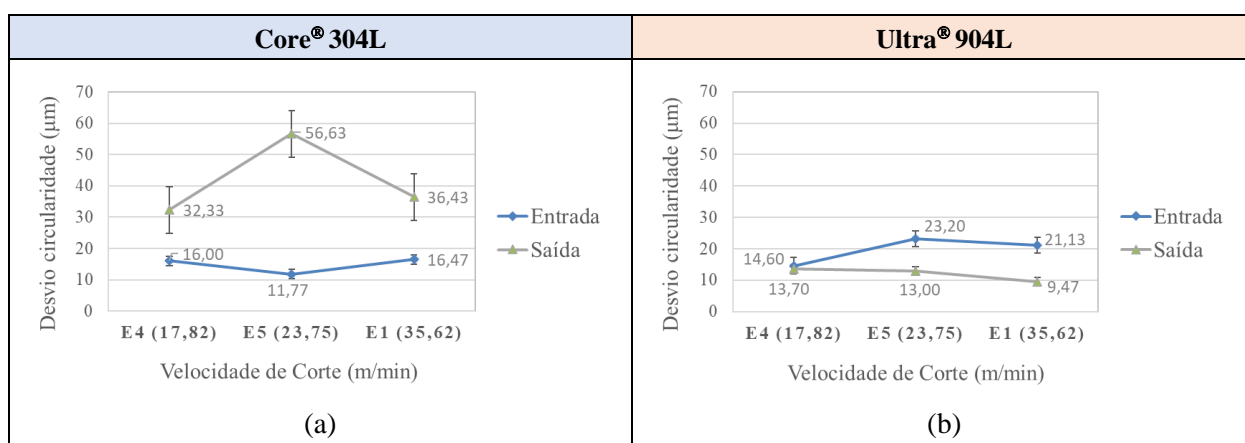


Figura 4.17 – Comparativo dos desvios de circularidade em relação à velocidade de corte com  $f = 0,12$  mm/volta.

A taxa de alongamento do aço inoxidável super austenítico (904L) é de 35% enquanto o do aço austenítico (304L) é de 58%. Essa taxa mais baixa no 904L reduz significativamente a ductilidade do material, o que em altas velocidades de corte não interfere significativamente na deformação do material. O 304L, que é mais dúctil, e com menor resistência mecânica, pode apresentar maior deformação na saída do furo, e conseqüentemente maiores valores de circularidade e desvio dimensional [Desu et al., 2016].

Hayajneh, 2001, notou que o erro de circularidade na furação do aço AISI 1060 é influenciado pela velocidade de corte e pelo avanço em furos muito profundos. Diferentes níveis de avanço e velocidade de corte constante produziram um erro de circularidade alto na entrada do furo devido à instabilidade da ferramenta de corte. Outro ponto observado é que o

erro de circularidade diminuiu com o comprimento do furo, pois a broca tende a se estabilizar dentro do furo em grandes profundidades, reduzindo o balanço em relação à linha de centro do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Com avanço constante e diferentes níveis de velocidade de corte, o erro de circularidade ao longo do comprimento do furo aumenta com o incremento da velocidade de corte. No entanto, com velocidade de corte constante, o autor explica que o deslocamento vibratório da ferramenta de corte resulta em instabilidade dinâmica devido ao aumento das forças de corte geradas pelos altos valores de avanço.

Na avaliação comparativa dos desvios de circularidade com velocidade de corte fixa ( $v_c = 23,75$  m/min) e aumentando o avanço (de 0,06 para 0,12 mm/volta), identificou-se ligeiro aumento do erro de circularidade na entrada do furo e grande aumento na saída do 304L (Figura 4.18a). Porém, no 904L (Figura 4.18b) os valores de desvio reduziram pouco com o aumento do avanço. Novamente, observa-se que os desvios na saída dos furos no 304L são maiores que na entrada, enquanto que no 904L, ocorre o inverso (menores na saída que na entrada).

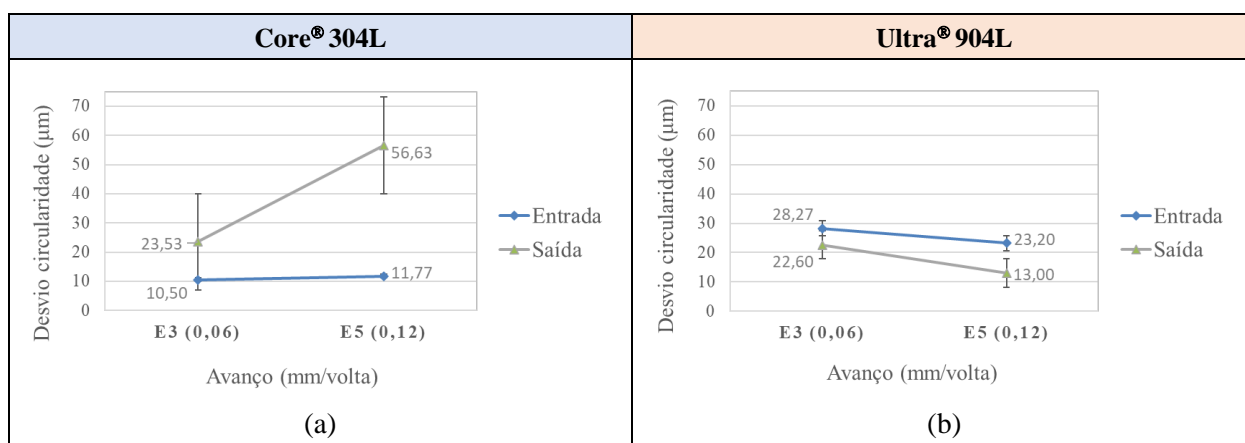


Figura 4.18 – Comparativo dos desvios de circularidade em relação ao avanço com  $v_c = 23,75$  m/min.

Ao comparar a circularidade com maior velocidade de corte ( $v_c = 35,62$  m/min) e aumentando o avanço (de 0,06 para 0,12 mm/volta), os desvios aumentaram para ambos os materiais (Figura 4.19), indicando que  $v_c$  e  $f$  possuem valores limítrofes para gerar um bom acabamento nesses aços inoxidáveis.

A presença de Ni e Mo aumentam a resistência mecânica do 904L em altas temperaturas, enquanto no 304L as altas temperaturas diminuem a resistência do material gerando maiores desvios de circularidade na saída do furo que possui maior temperatura na usinagem pela

dificuldade da entrada do fluido lubrificante [Alabdullah, 2017]. Outro fator que também pode ter contribuído com os desvios maiores no 304L é a formação de rebarbas, que foram maiores na saída do furo que no material 904L. Esse comportamento de maiores rebarbas e maiores deformações no furo foram identificados por alguns autores no estudo da furação em cheio do material AISI 304 [Pradeep e Raj, 2022].

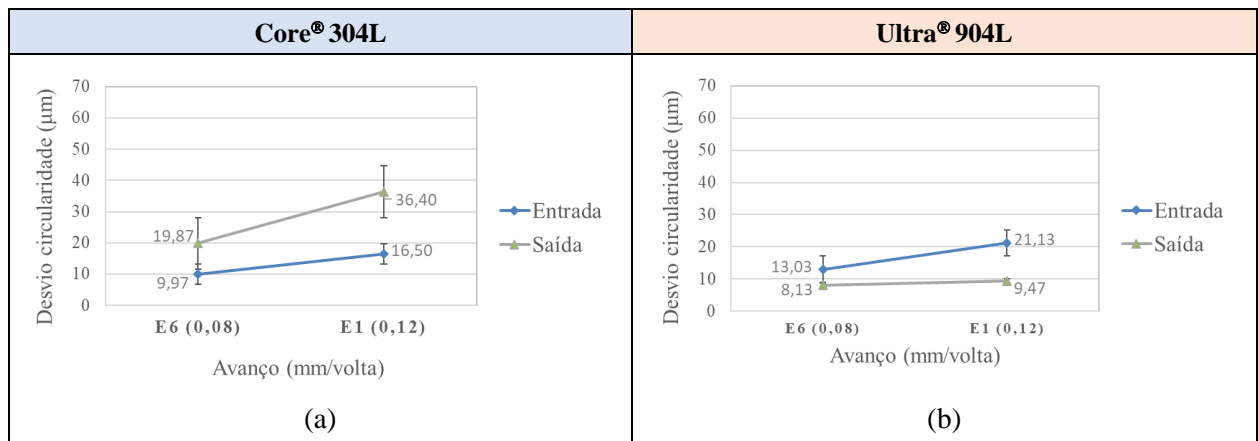


Figura 4.19 – Comparativo dos desvios de circularidade em relação ao avanço com  $v_c = 35,62$  m/min.

### 4.3 Desvios Dimensionais

Os valores dos desvios dimensionais de todos os experimentos estão apresentados nas Tabelas A.5 e A.6 (Apêndices). O menor desvio médio dimensional encontrado foi no experimento E4 ( $v_c = 17,82$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) na furação do aço 304L ( $17,12$   $\mu\text{m}$ ) e o maior foi no E2 ( $v_c = 29,69$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta) na furação do 904L ( $37,90$   $\mu\text{m}$ ). De acordo com a Figura 4.20, o comportamento dos desvios dimensionais entre os materiais apresentou diferenças nos experimentos entre a entrada e saída dos furos. Nos experimentos E1, E2, E4 e E6, os desvios dimensionais tenderam a apresentar menores desvios na saída dos furos no 304L, e para o 904L os desvios menores na saída ocorreram em todos os experimentos.

Segundo Carvalho, 2018, o desvio dimensional no aço 304L está relacionado ao comportamento do material durante a furação. Na entrada do furo, a lubrificação externa é mais eficiente; contudo, na saída, o efeito lubrificante é menor, resultando em maior temperatura na zona de corte, que inicialmente dilata o material e, posteriormente, o contrai. Outros pesquisadores também identificaram esse mesmo comportamento com os desvios dimensionais na furação em cheio, associando tais mudanças dimensionais com a dilatação e contração na saída dos furos [Santana, 2015; Uçak e Çiçek, 2018].

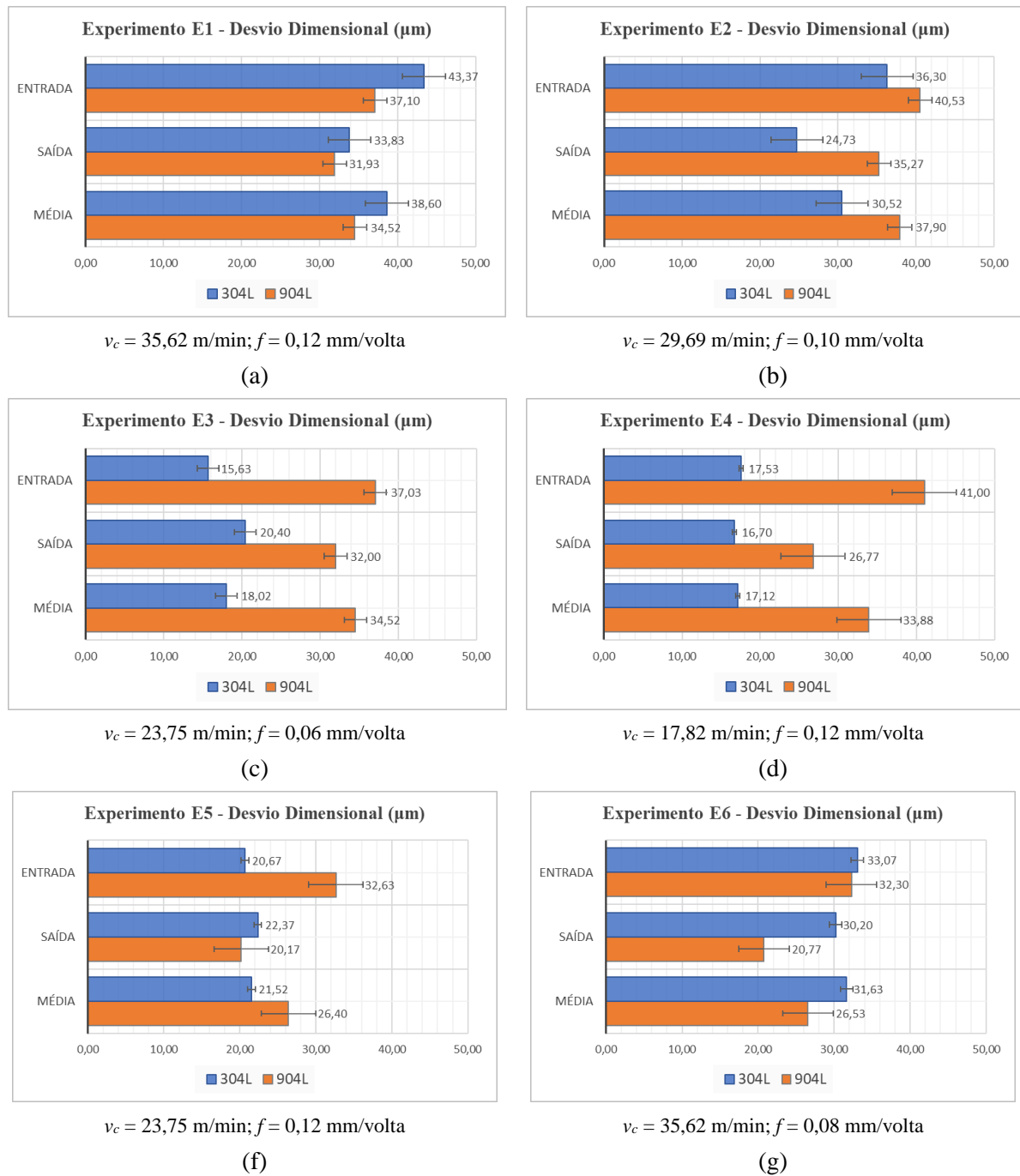


Figura 4.20 – Desvio médio dimensional na furação dos aços 304L e 904L.

Nos experimentos E2, E3, E4 e E5, o erro dimensional médio foi maior na entrada do furo para o 904L em relação ao 304L; entretanto, nos demais experimentos (E1, E6), ocorreu o contrário, i.e., valores menores na entrada para o 904L. O aço inoxidável super austenítico 904L possui menor condutividade térmica ( $12,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) e menor coeficiente de expansão térmica ( $15,8 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ ) que o austenítico 304L ( $16,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  e  $17,3 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ ).

Portanto, com a mesma temperatura na zona de corte, quanto maior for o coeficiente de expansão térmica, maior será a dilatação térmica do material [Köse e Topal, 2022]. Como em altas velocidades de corte ocorre aumento da temperatura, provavelmente essa tenha sido a causa dos valores de desvio dimensional no 904L serem menores que no 304L para os experimentos E1 e E6.

### 4.3.1 Efeito dos Parâmetros de Corte nos Desvios Dimensionais

Os parâmetros de corte também influenciam nos desvios dimensionais dos furos usinados. Com o avanço fixo ( $f = 0,12$  mm/volta), constatou-se que o incremento da velocidade de corte no 304L produziu aumento nos valores médios de desvio dimensional (Figura 4.21a), principalmente na entrada dos furos quando se tem aumento de  $v_c$  de 23,75 para 35,62 m/min. No 904L (Figura 4.21b), os valores médios na entrada e na saída dos furos apresentaram redução quando a  $v_c$  aumentou de 17,82 para 23,75 m/min. Contudo, quando a  $v_c$  cresceu de 23,75 para 35,62 m/min, houve um aumento dos valores médios de desvio dimensional. Além disso, os valores na entrada foram sempre maiores que na saída dos furos para o 904L.

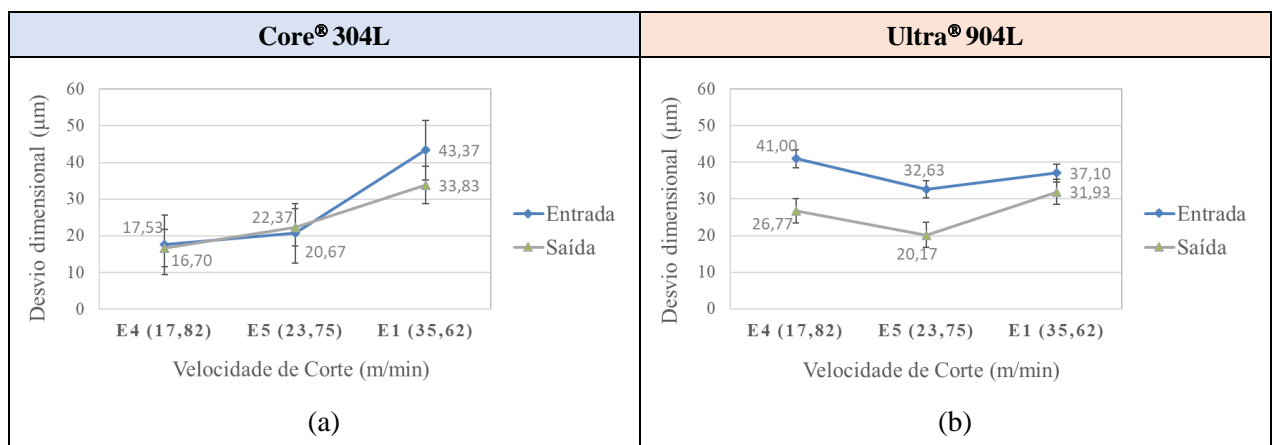


Figura 4.21 – Comparativo dos desvios dimensionais em relação à velocidade de corte com  $f = 0,12$  mm/volta.

Na avaliação comparativa dos desvios dimensionais com velocidade de corte fixa ( $v_c = 23,75$  m/min) e aumentando o avanço (de 0,06 para 0,12 mm/volta), identificou-se um pequeno aumento do erro dimensional na entrada e na saída do furo do 304L (Figura 4.22a). No caso, os desvios na saída foram ligeiramente maiores que na entrada, possivelmente pela maior dificuldade de lubrificação na saída do furo. Entretanto, no 904L (Figura 4.22b) os valores de desvio reduziram na entrada e, mais expressivamente, na saída dos furos com o

aumento do avanço. Além disso, os valores dos desvios na saída foram inferiores aos da entrada, o que pode estar relacionado com a estabilidade da ferramenta em diferentes profundidades do furo e/ou instabilidade dinâmica da broca durante o primeiro contato da aresta transversal de corte com a peça [Bresseler et. al., 1997].

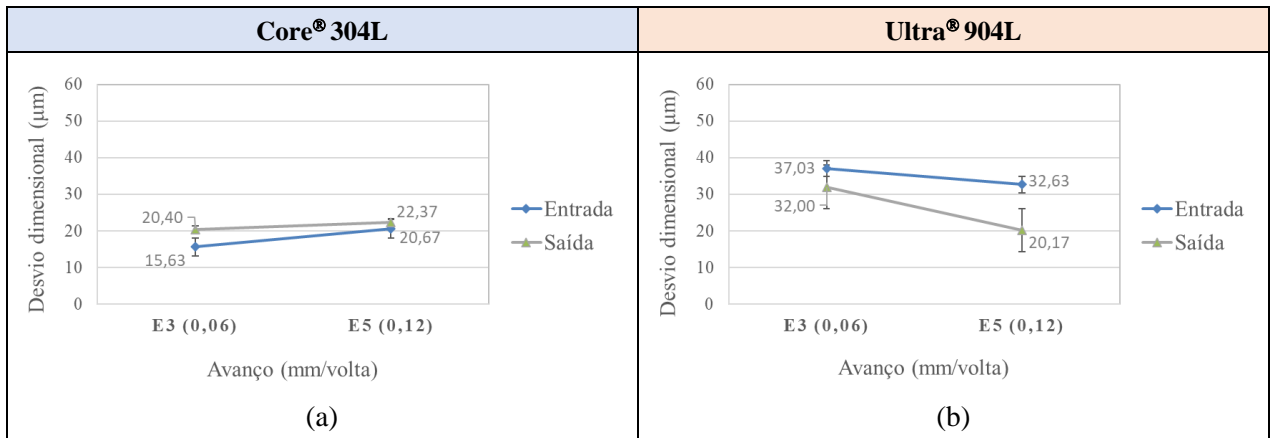


Figura 4.22 – Comparativo dos desvios dimensionais em relação ao avanço com  $v_c = 23,75$  m/min.

Ao comparar o desvio dimensional com maior velocidade de corte ( $v_c = 35,62$  m/min) e incrementando o avanço (de 0,06 para 0,12 mm/volta), os desvios aumentaram nos dois aços inoxidáveis em estudo (Figura 4.23), com maiores valores na entrada do furo, o que demonstra que o aumento simultâneo de  $v_c$  e  $f$  não contribui para a qualidade dos furos.

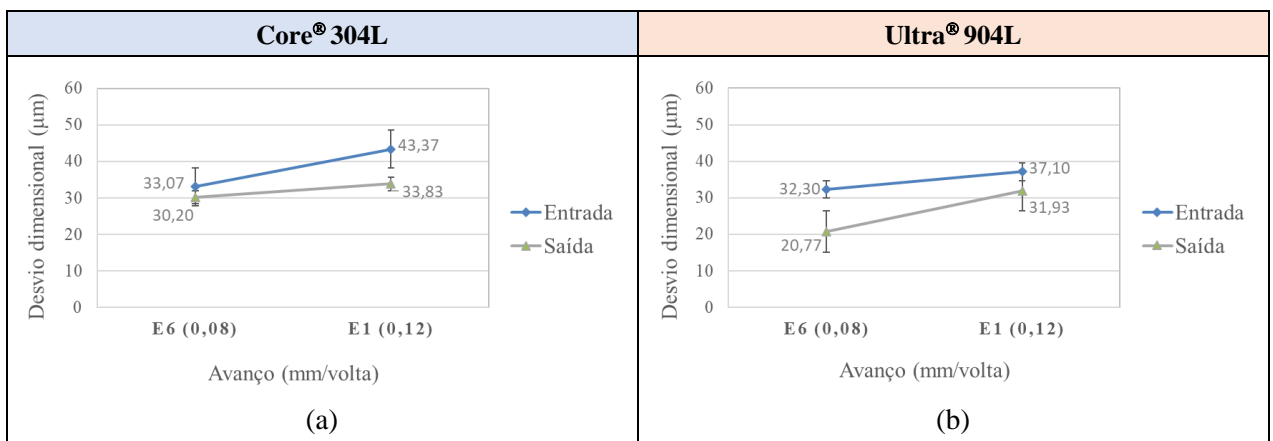


Figura 4.23 – Comparativo dos desvios dimensionais em relação ao avanço com  $v_c = 35,62$  m/min.



Maiores valores de avanço podem contribuir para instabilidade da ferramenta no corte aumentando os valores de desvio dimensional, como também de circularidade no fundo do furo, pois altos valores de  $f$  aumentam as forças de corte e geram maiores vibrações na máquina-ferramenta e nos dispositivos de fixação. A redução do erro dimensional e de circularidade do furo nas ligas metálicas deve-se à maior rigidez e menor deformação elástica da broca no fundo do furo, o que proporciona uma ação de auto centragem à ferramenta de corte [Alsi, 2017; Hayajneh, 2001]. Além disso, Abdelhafeez et al., 2015, citam que há variações não lineares na circularidade ao longo da profundidade do furo devido a outros fatores como a configuração do dispositivo de fixação da peça, a interação dinâmica entre a ferramenta e a peça, vibrações resultantes na broca, deflexões da ferramenta de corte e características de amortecimento.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho proporcionou uma avaliação comparativa do processo de furação em cheio dos aços inoxidáveis Core<sup>®</sup> 304L (austenítico) e Ultra<sup>®</sup> 904L (super austenítico) com aplicação externa de biolubrificante em abundância e diferentes parâmetros de corte para cada material. As principais conclusões encontradas no estudo realizado estão apresentadas abaixo.

### 5.1 Rugosidades

- Os comportamentos das rugosidades foram semelhantes para  $R_a$  e  $R_z$ , sem apresentar variações significativas entre os maiores e os menores valores encontrados em todos os experimentos realizados (E1 a E6).
- Para os dois materiais utilizados no estudo, as rugosidades foram maiores na entrada do furo que na saída, visto que valores de rugosidade menores na saída podem estar relacionados com a deformação plástica triangular (DPT) que é menor na saída do furo. Além do mais, na entrada do furo, existe a instabilidade dinâmica da broca devido ao primeiro contato entre a aresta transversal de corte e a peça de trabalho.
- Ao considerar a maior velocidade de corte ( $v_c = 35,62$  m/min), notou-se que os valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  foram menores para o menor avanço (0,08 mm/volta) em todas as posições (entrada, meio, saída) do furo nos dois materiais (304L e 904L) em comparação com o maior avanço (0,12 mm/volta).
- A menor  $v_c$  (17,82 m/min) com maior  $f$  (0,12 mm/volta) gerou os menores valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  na furação do 304L, e a maior  $v_c$  com maior  $f$  os maiores valores. Contudo, o aumento de  $v_c$  com maior  $f$  (0,12 mm/volta) tende a reduzir os valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  na furação do 904L em todas as posições do furo.
- A Curva de Abbott-Firestone (AFC) e a Função Distribuição de Amplitudes (ADF) identificaram distribuições diferentes para os aços inoxidáveis 304L e 904L considerando a menor  $v_c$  com maior  $f$ . O 904L resultou em maior inclinação da AFC e maior achatamento da ADF, indicando um acabamento inferior ao 304L. Com a maior  $v_c$  e menor  $f$ , os melhores resultados foram evidenciados no 904L.

## 5.2 Desvios de Circularidade

- Os valores médios de circularidade foram maiores na saída dos furos do 304L. Porém, no 904L, os valores foram menores na saída dos furos em todos os experimentos.
- Os desvios aumentaram na entrada e saída dos furos dos aços 304L e 904L com o incremento de  $v_c$  (23,75 para 35,62 m/min) e  $f$  (0,08 para 0,12 mm/volta).
- O incremento de  $v_c$  (17,82 para 35,62 m/min) com  $f$  fixo (0,12 mm/volta) aumenta os valores médios de circularidade no 304L e diminuem no 904L.
- O aumento de  $f$  (0,06 para 0,12 mm/volta) com  $v_c$  fixa (23,75 m/min) promove o crescimento dos valores de circularidade na entrada e saída do furo no 304L e redução dos desvios no 904L.
- Altos teores de níquel e molibdênio do 904L aumentam a resistência mecânica em altas temperaturas, enquanto no 304L, as altas temperaturas diminuem a resistência do material, gerando maiores desvios de circularidade na saída do furo.
- Maior formação de rebarbas no 304L indica que o material tenha sofrido maiores deformações e maiores desvios de circularidade que o 904L.

## 5.3 Desvios Dimensionais

- Os desvios dimensionais apresentaram diferenças dos valores médios entre a entrada e saída dos furos na experimentação. Porém, no 904L, os valores foram menores na saída dos furos em todos os experimentos.
- Os valores médios de desvio dimensional na entrada e na saída dos furos aumentam no 304L e diminuem no 904L com o incremento da velocidade de corte e avanço fixo em 0,12 mm/volta.
- Provavelmente a causa dos valores médios de desvio dimensional do 904L serem menores que o 304L em alta  $v_c$  tenha sido a dilatação do material.
- A maior  $v_c$  e crescimento de  $f$  resulta em aumento dos desvios dimensional nos dois aços inoxidáveis, o que demonstra que  $v_c$  e  $f$  ao serem aumentados em conjunto não contribuem para a qualidade dos furos.
- Menores valores de desvio dimensional na saída do furo podem estar relacionado com a estabilidade da ferramenta em diferentes profundidades, enquanto na condição com alto  $f$ , a rigidez diminui e os desvios aumentam na saída do furo.

#### **5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros**

- Avaliar as alterações de micro e macroestrutura resultante da usinagem sob condições de corte diferentes analisando a deformação plástica, microdureza, e as tensões residuais.
- Realizar um projeto de experimento para novos parâmetros de corte com a base de estudo realizada neste trabalho.
- Investigar o comportamento de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos utilizando os parâmetros de corte deste trabalho e ajustando para condições mais severas.
- Repetir os experimentos deste trabalho utilizando um centro de usinagem com sistema de lubrificação interna para comparar os dados obtidos e identificar as vantagens e desvantagens de cada sistema.

## REFERÊNCIAS

Abdelhafeez, A.M., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Dowson, A. e Arnold, D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. **Procedia CIRP**, vol. 37, p. 230–235, 2015.

Agapiou, J. e Stephenson, D. A. Cutting tool wear and failure mechanisms. **Encyclopedia of Tribology**, Boston, MA: Springer US, p. 661-677, 2013.

Agostinho, O. L., Rodrigues, A.C.S. e Lirani, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões: Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, p. 17-19, 1977.

Ahmed, Y. S., Paiva, J. M. e Veldhuis, S.C. Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 102, p. 1671-1688, 2019.

Alabdullah, M. F. A. **Machinability analysis of super austenitic stainless steel**, Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, Deakin University, Australia, 2017.

Alsi, I. Effect of cutting parameters on the drilling of AlSi7 metallic foams. **Materials Technology**, vol. 51, p. 19–24, 2017.

Arif, R., Fromentin, G., Rossi, F. e Marcon, B. Investigations on drilling performance of high resistant austenitic stainless steel. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 56, p. 856-866, 2020.

Arun, M. Arunkumar, N., Vijayaraj, R. e Ramesh, B. Investigation on the performance of deep and shallow cryogenic treated tungsten carbide drills in austenitic stainless steel, **Measurement**, vol. 125, p. 687-693, 2018.

Bagchi, A. e Guha, S. Parametric optimization of burr height reduction and machining time in drilling operation on stainless steel specimen. **Proceedings of the International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy**, Sikkim, India, December 8-10, 2017.

Balaji, M., Murthy, B. S. N. e Mohan Rao, N. Optimization of cutting parameters in drilling of AISI 304 stainless steel using Taguchi and ANOVA, **Procedia Technology**, vol. 25, 2016, p. 1106-1113, 2016.

Belluco, W. e De Chiffre, L. Performance evaluation of vegetable-based oils in drilling austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 148, n. 2, p. 171-176, 2004.

Beltrão, P. A. e C., Marmentini, M. M. Análise comparativa do desempenho de brocas helicoidais revestidas com TiAlN e AlCr na furação do aço SAE 4144 beneficiado. **Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Águas de São Pedro, SP, 15-18 abril, 2007.

Benardos, P.G. e Vosniakos, G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 43, n. 8, p. 833-844, 2003.

Bezerra, A.A. **Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 1998.

Boothroyd, G. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. McGraw-Hill, New York. p. 156-158, 1981.

Bordin, F.M. **Efeito do Tratamento da Microgeometria de Brocas Helicoidais de Metal-Duro sobre a Integridade Superficial dos Furos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2013.

Bork, C. A. S., **Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austeníticos DIN 1.4541**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

Bresseler, B., El-Wardany e T., Elbestawi, M. Material side flow in high speed finish boring of case hardened steel. **Proceedings of the 1st French and German Conference on High Speed Machining**, Metz, France, June 17-18, 1997.

Camargo, A. C. S., **Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos Através do Processo de Furação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Campinas, 2008.

Carvalho, A. C. S., **Análise da Furação do Aço Inoxidável AISI 304 com a Aplicação Externa de Nanofluidos em Quantidade Reduzida**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

Çaydaş, U., Hasçalık, A., Buytoz, Ö. e Meyveci, A. Performance evaluation of different twist drills in dry drilling of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 26, p. 951-960, 2011.

Chiou, R. e Wu, K. Analysis of the runout effect on hole quality in drilling. **Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, Anaheim, USA, November 15–20, 1998.

Çiçek, A., Kivak, T. e Samtas, G., Application of Taguchi method for surface roughness and roundness error in drilling of AISI 316 stainless steel. **Journal of Intelligent Manufacturing**, vol. 58, p. 165-174, 2012a.

Çiçek, A., Kivak, T. e Uygur, I., Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 60, p. 65-73, 2012b.

Ciftci, I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, **Tribology International**, vol. 39, n. 6, p. 565-569, 2006.

Costa, E. S., Machado, A. R., Rosa, S. N. e Souza Jr., E. A. Qualidade dos furos usinados com diferentes métodos de lubrificação e refrigeração. **Máquinas e Metais**, Vol. 484, p. 140-161, 2006.

Costa, E. S., Silva, R. B. e Machado, A. R. Comparação do erro de cilindridade e rugosidade na usinagem de furos cegos e passantes em função de diferentes sistemas lubri-refrigerantes. **Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Águas de São Pedro, SP, 15-18 abril, 2007.

Desu, R. K., Krishnamurthy, N. H., Balu, A., Gupta, A. K. e Singh, K. S. Mechanical properties of austenitic stainless steel 304L and 316L at elevated temperatures, **Journal of Materials Research and Technology**, Vol. 5, p. 13-20, 2016.

DIN 4776. **Measurement of surface roughness; parameters Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 for the description of the material portion (profile bearing length ratio) in the roughness profile, measuring conditions and evaluation procedures**. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1990.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8.ed., Artliber Editora, São Paulo, 2013.

Dirviyam, P. S. Influence of cutting speed, feed rate and bulk texture on the surface finish of nitrogen alloyed duplex stainless steels during dry turning. **Scientific Research Publishing of Engineering**, Vol. 2, No. 6, p. 453-460, 2010.

Dixit, U. S., Sarma, D. K. e Davim, J. P. **Environmentally Friendly Machining**. Springer-Verlag, New York, 2012.

Dolinsek, S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 133, p. 63-70, 2003.

Edwards, R. **Cutting Tools**. The University Press, Cambridge, 1993.

Farias, A. **Análise da Tensão Residual e Integridade Superficial no Processo de Torneamento em Materiais Endurecidos no Aço ABNT 8620 Cementado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2009.

Gamarra, J.R. e Diniz, A.E. Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 40, p. 39, 2018.

Gillespie, L.K. Process control for burrs and deburring. **Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology**, Seoul, South Korea, January, 1994.



Giriron, M., Karaouni, H., Masciantonio, U., Lefebvre, F., Jourden, E., Valiorgue, F., Rech, J. e Feulvarch, E. Risks related to the lack of lubrication on surface integrity in drilling, **Heliyon**, vol. 5, n. 1, p. e01138, 2019.

Groover M. P. **Fundamental of Modern Manufacturing: Materials Processes and Systems**, 4 ed., Wiley, Hoboken, 2010.

Guo, H., Liang, Z., Wang, X., Zhou, T. e Jiao, L. Influence of chisel edge thinning on helical point micro-drilling performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 99, p. 2863–2875, 2018.

Haan, D. M., Batzer, S.A., Olson, W. W. e Sutherland, J. W. An experimental study of cutting fluid effects in drilling, **Journal of Materials and Processes Technology**, vol. 71, n. 2, p. 305-313, 1997.

Han, Y., Liu, G., Zou, D., Liu, R. e Qiao, G., Deformation behavior and microstructural evolution of as-cast 904L austenitic stainless steel during hot compression. **Materials Science and Engineering: A**, vol. 565, p. 342-350, 2013.

Hayajneh, M. T. Hole quality in deep hole drilling, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 16, n. 2, p. 147-164, 2001.

Hoshi, T. e Zhao, H. Study of a high performance drill geometry. **Annals of the CIRP**, vol. 38, n. 1, p. 87-90, 1989.

Iscar. **Competência Inoxidável Iscar do Brasil**.  
<https://www.iscardobrasil.com.br/newarticles.aspx/countryid/4/newarticleid/9359>, 2023,  
Acesso em: 11-06-2023.

Jareo, J. E. e Bradbury J. Tool coating for dry machining conditions. **Modern Machine Shop**, vol. 1, p. 212-216, 1999.

Jayaganth A., Jayakumar, K., Deepak, A. e Pazhanivel, K. Experimental studies on drilling of 410 stainless steel, **Materials Today: Proceedings**, vol. 5, p. 7168-7173, 2018.

Kaladhar, M., Subbiah, V. K. e Rao, C. H. S. Machining of austenitic stainless steels – a review. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, vol. 12, p. 178-192, 2012.

Kamdani, K., Hamsah, A.A., Rafai, N. H., M.Z., Wong, C.K. e Chong, Y.L. Study of cutting force and surface roughness on drilling stainless steel 316L under various coolant condition. **Key Engineering Materials**, vol. 791, p.116-122, 2018.

Kennametal. **Broca Inteira de Metal Duro para Aplicações Universais**. <https://www.kennametal.com/pt/pt/products/p.kenna-universal-b976-3-x-d-refrigeracao-interna-haste-reta.1913534.html>, 2023, Acesso em: 07-05-2023.

Khorasani, A. M., Yazdi, M. R. S. e Safizadeh, M.S. Analysis of machining parameters effects on surface roughness: A review. **International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering**. vol. 5, n. 1, p. 68-84, 2012.

Kim, J. e Dornfeld, D.A. Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials. **Transactions of the ASME**, vol. 124, p. 192-198, 2002.

Klocke, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer, Berlin-Heidelberg, RWTH edition, 2011.

Klocke, F., Krieg, T., Gerschwiler, K., Fritsch, R., Zinkann, V., Pohls, M. e Eisenblatter, G. **Improved Cutting Processes with Adapted Coating Systems**. Laboratory for Machine Tools and Production Engineering. RWTH, Aachen. p. 4, 1998.

Ko, S.L., Chang, J.E. e Yang, G.E. Burr minimizing scheme in drilling. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 140, p. 237–242, 2003.

Korkut, E., Atlar, M. e Incecik, A. An experimental study of motion behaviour with an intact and damaged Ro-Ro ship model. **Ocean Engineering**, vol. 31, n. 3-4, p. 483-512, 2004.

Köse, C. e Topal, C. Effect of heat input and post-weld heat treatment on surface, texture, microstructure, and mechanical properties of dissimilar laser beam welded AISI 2507 super duplex to AISI 904L super austenitic stainless steels, **Journal of Manufacturing Processes**, vol 73, p. 861-894, 2022.

Kulkarni, A., Joshi, G. e Sargade, V.G. Design optimization of cutting parameters for turning of AISI 304 austenitic stainless steel using Taguchi method, **Indian Journal of Engineering & Material Science**, vol. 20, p. 252-258, 2013.

Kuram, E., Ozcelik, B., Demirbas, E. e Şik, E. Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, London, UK, June 30 - July 2, 2010.

Kustas, F. M., Fehrehnbacher, L. L. e Komanduri, R. Nanocoatings on cutting tools for dry machining. **CIRP Annals**, v. 46, n. 1, p. 39-42, 1997.

Kwong, J., Axinte, D. A., Withers, P. J. e Hardy, M. C. Minor cutting edge-workpiece interactions in drilling of an advanced nickel-based superalloy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 49, p. 645-658, 2009.

Lourenço, C. J. **A Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1996.

Lopez, D., Alonso-Falleiros, N. e Tschiptschin, A. Use of electrochemical tests for assessment of the effect of erosive particle size on the erosion-corrosion behaviour of AISI 304L austenitic stainless steel. **Materials Research**, vol. 19, n. 2, p. 451-458, 2016.

Martines, A. Os aços inoxidáveis e a usinabilidade. **Usinagem Brasil**. <https://www.usinagem-brasil.com.br/11916-os-acos-inoxidaveis-e-a-usinabilidade>, 2023, Acesso em: 07-05-2023.

Miranda, G.W.A.A. **Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluidos de Corte com Brocas de Metal Duros Revestidas com TiAlN**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

Motta Neto, W., S. **Comparação do Efeito do Método de Medição com Contato e sem Contato na Rugosidade**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

Narutaki, N., Yamane, Y., Tashima, S. e Kuroki, H. A new advanced ceramic for dry machining. **CIRP Annals**. vol. 46, n. 1, p. 43-48, 1997.

NBR 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2002.

Nicola, G.L. **Análise de Superfícies Fresadas por Diferentes Estratégias em Aço AISI H13 Endurecido.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2008.

Nicola, G. L., Missel, F. P. e Zeilmann, R. P. Surface quality in milling of hardened H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 49, p. 53-62, 2010.

Nilsson, J.O. Super duplex stainless steel. **Materials Science and Technology**, vol. 8, p. 685-700, 1992.

Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T. e Littlefair, G. Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process. **Wear**, vol. 304, p. 20-28, 2013.

Novaski, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** Blücher, São Paulo, 1994.

Oberg, E.V. **Machinery's Handbook.** 29.ed. Industrial Press, New York, 2012.

Oliveira, J. C. A., Diniz, A.E. e Bertazzoli, R. Correlating tool wear, surface roughness and corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 36, p. 775-785, 2014.

Oliveira, J.M. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para Produção de Moldes e Matrizes.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2006.

Outokumpu. **Stainless Steel Handbook.** Outokumpu Oyj, Sweden, 2013.

Ozcelik, B., Kuram, E., Demirbas, E. e Şik, E. Effects of vegetable-based cutting fluids on the wear in drilling. **Sadhana**, vol. 38, p. 687-706, 2013.

Pal, A., Chatha, S. S. e Sidhu, H. S. Performance evaluation of various vegetable oils and distilled water as base fluids using eco-friendly MQL technique in drilling of AISI 321 stainless steel. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, vol. 9, p. 745-764, 2022.

Peckner, D. e Bernstein, I. M. **Handbook of Stainless Steels**. McGraw-Hill, New York, 1977.

Pelikán, L., Slaný, M., Stránský, O., Beránek, L., Pitrmuc, Z., Čepová, L. e Dvořáčková, Š. Novel drill geometries for dry drilling of stainless steel, **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 92, p. 500-520, 2023.

Petropoulos, P. G. N., Pandazaras N. P. e Davim, J. P. Surface texture characterization and evaluation related to machining. In: **Surface Integrity in Machining**, London: Springer, p. 37-66, 2010.

Plaut, R. L., Herrera, C. e Escriba, D. M. A. Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: Processing, microstructure, properties and performance. **Materials Research**, vol. 10, n. 4, p. 453-460, 2007.

Policena, M. R., Garcia, R., F e Souza, A., J. Análise da rugosidade obtida no fresamento frontal de acabamento do aço inoxidável duplex LDX 2101. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, São Carlos, SP, 05-07 agosto, 2019.

Polishetty, A, Alabdullah, M. F. A., Pillay, N. e Littlefair, G. A. Preliminary study on machinability of super austenitic stainless steel. **Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, Houston, USA, November 13-19, 2015.

Pradeep, K. G. e Raj, S. D. Analysis of high speed drilling AISI 304 under MQL condition through a novel tool wear measurement method and surface integrity studies. **Tribology International**, vol. 176, p. 107871, 2022.

Pradeep, K. M. e Shakeel, A. L. Drilling of AISI 304 Stainless steel under liquid nitrogen cooling: a comparison with flood cooling, **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, p. 1518-1524, 2017.

Ramachandran M., Vishal, F. e Ragavendran, U. Parameters optimisation for drilling of austenitic stainless steel by Taguchi method using desirability function analysis. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, vol. 8, n. 11, p. 229-237, 2017.

Ramachandran, M. e Nidhi, A. Identification of most affected parameter for design for remanufacturing of scrap piston by Taguchi desirability function analysis. **Proceedings of the 5th International Conference on Man-Machine Interactions**, Kraków, Poland, October 3-6, 2017.

Roberge, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. McGraw-Hill, New York, 2000.

Sahoo, A. K. e Sahoo, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement**, vol. 45, p. 2153-2165, 2012.

Sandvik. **Modern Metal Cutting**. Sandvik Coromant, Sweden, 1994.

Sankar, M. e Choudhury, S. K. Experimental study and modeling of machining with dry compressed air, flood and minimum quantity cutting fluid cooling techniques. **Procedia CIRP**, vol. 31, p. 228-233, 2015.

Santana, M.I. **Influência da Preparação das Arestas de Corte de Brocas Helicoidais no Processo de Furação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Manufatura, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

Sato, M., Aoki, T., Tanaka, H. e Takeda, S. Variation of temperature at the bottom surface of a hole during drilling and its effect on tool wear, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 68, p. 40-47, 2013.

Schulz, H., Emrich, K., Finzer, T. e Dörr, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, vol. 416, p. 38-45, 2000.

Selvaraj, D. P. e Chandramohan, P. Optimization of surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel in dry turning operation using Taguchi design method. **Journal of Engineering Science and Technology**, vol. 5, n. 3, p. 293-301, 2010.

Sharif, S., Rahim, E.A. e Sasahara H. Machinability of titanium alloys in drilling. In: **Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications**, IntechOpen, 2012.

Siddiquee, A. N., Khan, Z. A., Goel, P., Kumar, M., Agarwal, G. e Khan, N. Z. Optimization of deep drilling process parameters of AISI 321 steel using Taguchi method, **Procedia Materials Science**, vol. 6, p. 1217-1225, 2014.

Silva, L.E., Consalter, L.A., Haupt, W. e Souza, A. J. Efeito da mesogeometria da broca e das condições de lubrificação sobre o acabamento do furo em aço ARBL DIN S700MC. **Revista Matéria**, vol. 24, n. 1, p. 12286, 2019.

Singaravel, B, Saikrupa, Ch e Sandeep, M. Analysis of quality parameters in drilling of titanium alloy. **International Journal of Vehicle Structures & Systems**, vol. 12, n. 2, p. 210-213, 2020.

Smith, T.G. **Cutting Tool Technology: Industrial Handbook**. Springer, London, 2008.

Soares Filho, M. **Estudo da Formação de Rebarbas no Processo de Furação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

Sultan, A. Z., Sharif, S. e Kurniawan, D. Effect of machining parameters on tool wear and hole quality of AISI 316L stainless steel in conventional drilling, **Procedia Manufacturing**, vol. 2, p. 202-207, 2015.

Takatsu, S. Recent development in hard cutting tool materials. **High Temperature Materials and Processes**, vol 9, n. 2-4, p. 175-193, 1990.

Telles, P. C. S. **Materiais para Equipamentos de Processo**, 6.ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Tehovnik, F., Žužek, B., Arh, B., Burja, J. e Podgornik, B. Hot rolling of the superaustenitic stainless steel AISI 904L. **Materials and Technology**, vol. 48, n. 1, p. 137-140, 2014.

Tian, Y., Zou, P., Yang, X. e Kang, D. Study on chip morphology and surface roughness in ultrasonically assisted drilling of 304 stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 108, p. 2079-2090, 2020.

Tolouei-Rad M e Shah A. Development of a methodology for processing of drilling operations. **International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering**, vol. 6, n. 12, p. 2660-2664, 2012.

Tolouei-Rad, M. e Aamir, M. Analysis of the performance of drilling operations for improving productivity. In: **Drilling Technology**, IntechOpen, 2021.

Trent, E. M. e Wright, P.K. **Metal Cutting**. 4.ed, Butterworth-Heineman, Boston, 2000.

Tschätsch, H. **Applied Machining Technology**. Springer, Berlin-Heidelberg, 2009.

Uçak, N. e Çiçek, A. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 662-673, 2018.

Vilanova, A.M., Vaz, G.S., Souza, A.J. e Passari, É.S. Comparative study of drilling super austenitic stainless steel with external applications of reduced quantity nanofluid and flooded bio-lubricant. **Materials Today: Proceedings**, In Press, Corrected Proof, 2023.

Xavior, M.A. e 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**, vol. 209, n. 2, p. 900-909, 2009.

Zeilmann, R. P. **Furação de Liga de Titânio Ti6Al4V com Mínimas Quantidades de Fluido de Corte**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Valores Medidos das Rugosidades, Circularidades e Desvios

A Tabela A.1 contém todos os valores das rugosidades obtidas para cada experimento conforme cada material especificado, a Tabela A.2 todos os valores das médias das rugosidades obtidas para cada experimento, a Tabela A.3 todos os valores das circularidades e a Tabela A.4 todos os valores médios de circularidades.

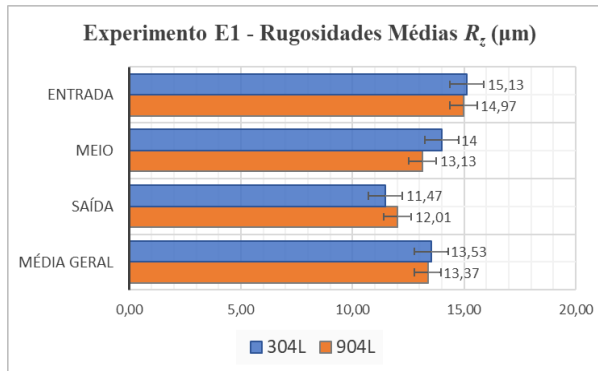
Tabela A.1 – Valores das rugosidades dos experimentos.

Experimento E1									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,54	2,39	1,96	2,30	Ra (µm)	3,40	2,81	2,77	2,99
Rz (µm)	13,83	12,86	10,84	12,51	Rz (µm)	18,05	14,38	13,35	15,26
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,89	2,53	2,30	2,57	Ra (µm)	2,56	2,21	1,88	2,21
Rz (µm)	16,47	16,05	12,64	15,05	Rz (µm)	14,21	13,71	11,64	13,18
Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,81	2,67	1,99	2,49	Ra (µm)	2,31	2,22	2,02	2,18
Rz (µm)	15,09	13,09	10,92	13,03	Rz (µm)	12,65	11,31	11,05	11,67
Experimento E2									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,45	2,17	1,71	2,11	Ra (µm)	2,84	2,54	2,45	2,61
Rz (µm)	15,09	12,37	10,02	12,49	Rz (µm)	14,32	12,08	11,59	12,66
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,96	1,93	1,85	1,91	Ra (µm)	2,22	1,67	1,26	1,72
Rz (µm)	11,19	9,52	10,85	10,52	Rz (µm)	12,26	8,46	7,09	9,27
Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,18	1,87	1,80	1,95	Ra (µm)	3,56	3,41	2,53	3,17
Rz (µm)	12,04	11,05	10,74	11,28	Rz (µm)	16,68	16,48	14,15	15,77
Experimento E3									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,66	1,49	1,44	1,53	Ra (µm)	3,50	3,43	2,52	3,15
Rz (µm)	9,45	9,30	8,23	8,99	Rz (µm)	17,52	16,92	14,17	16,20
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,70	1,58	1,38	1,55	Ra (µm)	2,96	2,85	2,54	2,78
Rz (µm)	9,35	9,20	9,01	9,19	Rz (µm)	16,40	14,70	12,43	14,51
Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,96	1,71	1,42	1,70	Ra (µm)	3,16	2,98	2,88	3,01
Rz (µm)	9,95	9,04	7,10	8,70	Rz (µm)	15,76	15,57	15,24	15,52
Experimento E4									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,09	1,87	1,66	1,87	Ra (µm)	5,13	4,83	3,52	4,49
Rz (µm)	11,08	10,33	8,77	10,06	Rz (µm)	21,96	21,90	18,36	20,74
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,28	1,08	0,88	1,08	Ra (µm)	3,09	2,18	2,06	2,44
Rz (µm)	6,40	6,23	5,57	6,07	Rz (µm)	14,98	12,84	11,83	13,22

Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,96	1,23	1,09	1,43	Ra (µm)	4,07	2,90	2,32	3,10
Rz (µm)	10,44	7,00	6,23	7,89	Rz (µm)	18,39	12,78	12,47	14,55
Experimento E5									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,83	1,25	1,15	1,41	Ra (µm)	3,62	3,07	2,65	3,11
Rz (µm)	10,01	7,42	6,54	7,99	Rz (µm)	20,28	15,53	13,45	16,42
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	3,22	1,94	1,83	2,33	Ra (µm)	2,46	2,36	2,08	2,30
Rz (µm)	17,57	10,98	10,44	13,00	Rz (µm)	15,15	14,53	13,76	14,48
Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	4,03	2,15	1,42	2,53	Ra (µm)	3,00	2,48	2,40	2,63
Rz (µm)	20,98	10,12	8,24	13,11	Rz (µm)	16,57	14,83	13,90	15,10
Experimento E6									
304L					904L				
Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	1,95	1,93	1,92	1,93	Ra (µm)	2,13	1,91	1,56	1,87
Rz (µm)	11,84	10,83	10,71	11,13	Rz (µm)	10,94	9,60	8,44	9,66
Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,87	2,51	2,18	2,52	Ra (µm)	2,40	2,06	1,90	2,12
Rz (µm)	14,55	14,46	14,37	14,46	Rz (µm)	12,94	12,46	11,72	12,37
Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média	Furo 3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra (µm)	2,79	2,28	1,71	2,26	Ra (µm)	3,03	2,46	2,38	2,62
Rz (µm)	12,62	11,10	10,28	11,33	Rz (µm)	18,27	12,82	12,79	14,63

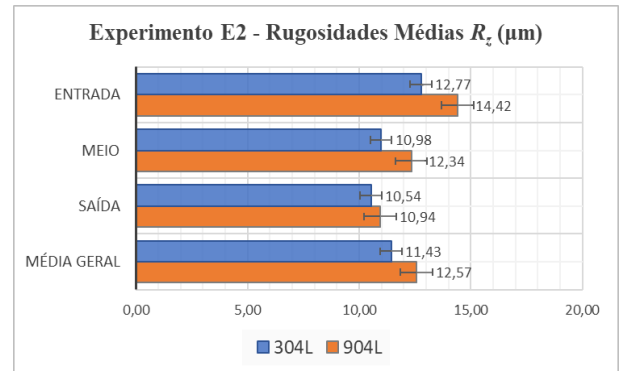
Tabela A.2 – Valores das médias das rugosidades dos experimentos.

Média dos Valores (3 furos) - Rugosidades									
304L					904L				
E1	Entrada	Meio	Saída	Média	E1	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	2,75	2,53	2,08	2,45	Ra	2,76	2,41	2,22	2,46
Rz	15,13	14,00	11,47	13,53	Rz	14,97	13,13	12,01	13,37
E2	Entrada	Meio	Saída	Média	E2	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	2,20	1,99	1,79	1,99	Ra	2,87	2,54	2,08	2,50
Rz	12,77	10,98	10,54	11,43	Rz	14,42	12,34	10,94	12,57
E3	Entrada	Meio	Saída	Média	E3	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	1,77	1,59	1,41	1,59	Ra	3,21	3,09	2,65	2,98
Rz	9,58	9,18	8,11	8,96	Rz	16,56	15,73	13,95	15,41
E4	Entrada	Meio	Saída	Média	E4	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	1,78	1,39	1,21	1,46	Ra	4,10	3,30	2,63	3,34
Rz	9,31	7,85	6,86	8,01	Rz	18,44	15,84	14,22	16,17
E5	Entrada	Meio	Saída	Média	E5	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	3,03	1,78	1,47	2,09	Ra	3,03	2,64	2,38	2,68
Rz	16,19	9,51	8,41	11,37	Rz	17,33	14,96	13,70	15,33
E6	Entrada	Meio	Saída	Média	E6	Entrada	Meio	Saída	Média
Ra	2,54	2,24	1,94	2,24	Ra	2,52	2,14	1,95	2,20
Rz	13,00	12,13	11,79	12,31	Rz	14,05	11,63	10,98	12,22
<b>Média Geral 304L: Ra = 1,97 µm; Rz = 10,94 µm</b>					<b>Média Geral 904L: Ra = 2,69 µm; Rz = 14,18 µm</b>				



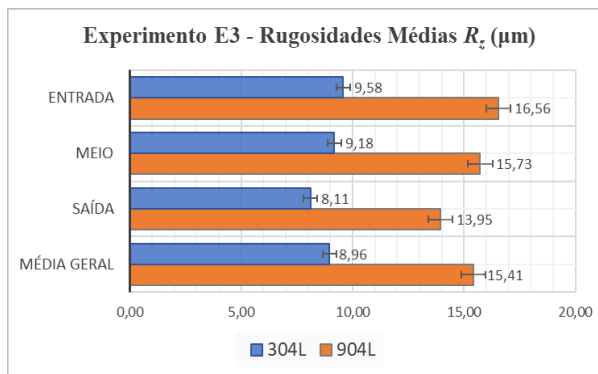
$v_c = 35,62 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(a)



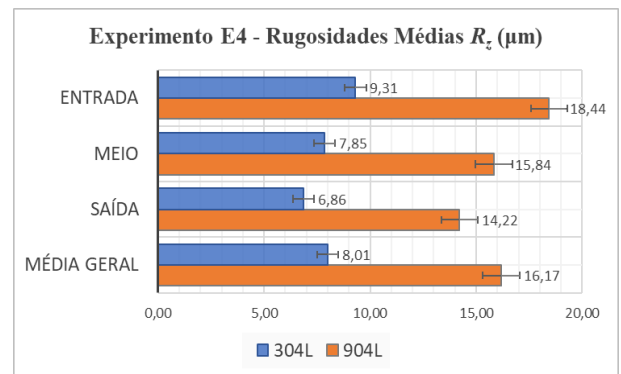
$v_c = 29,69 \text{ m/min}; f = 0,10 \text{ mm/volta}$

(b)



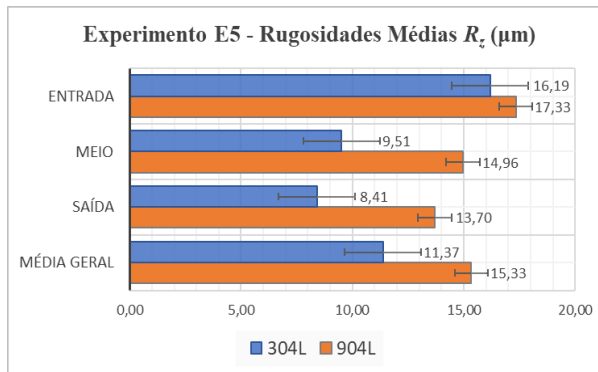
$v_c = 23,75 \text{ m/min}; f = 0,06 \text{ mm/volta}$

(c)



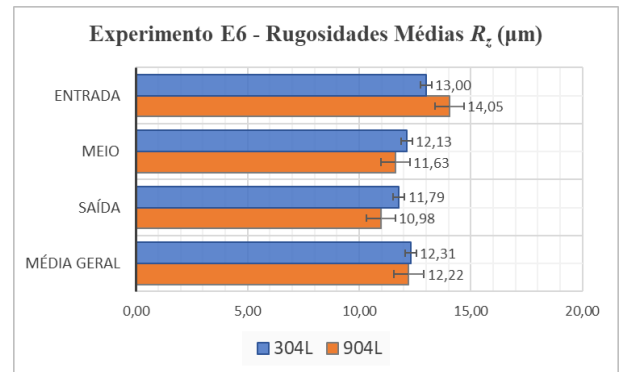
$v_c = 17,82 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(d)



$v_c = 23,75 \text{ m/min}; f = 0,12 \text{ mm/volta}$

(e)



$v_c = 35,62 \text{ m/min}; f = 0,08 \text{ mm/volta}$

(f)

Figura A.1 – Valores das rugosidades médias  $R_z$  de todos os experimentos.

Tabela A.3 – Valores das circularidades dos experimentos.

Core® 304L – Desvios em $\mu\text{m}$				Ultra® 904L – Desvios em $\mu\text{m}$			
Furo	Entrada	Saída	Média	Furo	Entrada	Saída	Média
E1.1	24,7	30,3	27,50	E1.1	16,3	10,1	13,20
E1.2	14,9	10,6	12,75	E1.2	21,8	6,7	14,25
E1.3	9,8	68,4	39,10	E1.3	25,3	11,6	18,45
E2.1	26,0	15,3	20,65	E2.1	9,7	25,3	17,50
E2.2	17,1	12,3	14,70	E2.2	14,4	15,9	15,15
E2.3	12,2	72,8	42,50	E2.3	30,1	25,1	27,60
E3.1	7,5	11,4	9,45	E3.1	21,4	25,8	23,60
E3.2	11,7	14,1	12,90	E3.2	52,2	19,8	36,00
E3.3	12,3	45,1	28,70	E3.3	11,2	22,2	16,70
E4.1	20,3	50,2	35,25	E4.1	9,5	21,2	15,35
E4.2	14,5	29,1	21,80	E4.2	18,9	10,2	14,55
E4.3	13,2	17,7	15,45	E4.3	15,4	9,7	12,55
E5.1	16,8	33,7	25,25	E5.1	22,9	14,8	18,85
E5.2	10,6	125,2	67,90	E5.2	18,4	12,3	15,35
E5.3	7,9	11,0	9,45	E5.3	28,3	11,9	20,10
E6.1	6,9	13,0	9,95	E6.1	6,8	5,1	5,95
E6.2	10,0	18,2	14,10	E6.2	22,4	12,3	17,35
E6.3	13,0	28,4	20,70	E6.3	9,9	7,0	8,45
<b>Média</b>	<b>13,9</b>	<b>33,7</b>	<b>23,78</b>	<b>Média</b>	<b>19,7</b>	<b>14,8</b>	<b>17,28</b>

Tabela A.4 – Valores das médias das circularidades dos experimentos.

Média dos valores (3 furos) 304L				Média dos valores (3 furos) 904L			
E1-304L	Entrada	Saída	Média	E1-904L	Entrada	Saída	Média
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	16,47	36,43	26,45	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	21,13	9,47	15,30
<b>E2-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E2-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	18,43	33,47	25,95	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	18,07	22,10	20,08
<b>E3-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E3-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	10,50	23,53	17,02	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	28,27	22,60	25,43
<b>E4-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E4-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	16,00	32,33	24,17	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	14,60	13,70	14,15
<b>E5-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E5-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	11,77	56,63	34,20	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	23,20	13,00	18,10
<b>E6-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E6-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	9,97	19,87	14,92	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	13,03	8,13	10,58

Tabela A.5 – Valores dos desvios dimensionais dos experimentos.

Core® 304L – Desvios dimensional em $\mu\text{m}$				Ultra® 904L – Desvios dimensional em $\mu\text{m}$			
Furo	Entrada	Saída	Média	Furo	Entrada	Saída	Média
E1.1	50,1	33,6	41,85	E1.1	36,5	31,6	34,05
E1.2	48,2	34,1	41,15	E1.2	37,7	32,5	35,10
E1.3	31,8	33,8	32,80	E1.3	37,1	31,7	34,40
E2.1	35,2	25,1	30,15	E2.1	39,5	38,1	38,80
E2.2	37,6	25,3	31,45	E2.2	40,2	33,5	36,85
E2.3	36,1	23,8	29,95	E2.3	41,9	34,2	38,05
E3.1	16,1	20,5	18,30	E3.1	40,7	35,2	37,95
E3.2	15,5	19,5	17,50	E3.2	36,5	32,1	34,30
E3.3	15,3	21,2	18,25	E3.3	33,9	28,7	31,30
E4.1	18,2	15,2	16,70	E4.1	45,9	26,8	36,35
E4.2	17,5	16,5	17,00	E4.2	37,4	30,2	33,80
E4.3	16,9	18,4	17,65	E4.3	39,7	23,3	31,50
E5.1	26,3	22,1	24,20	E5.1	32,8	20,2	26,50
E5.2	22,2	23,5	22,85	E5.2	35,6	20,8	28,20
E5.3	13,5	21,5	17,50	E5.3	29,5	19,5	24,50
E6.1	26,5	30,2	28,35	E6.1	28,2	19,5	23,85
E6.2	21,9	30,9	26,40	E6.2	28,2	20,2	24,20
E6.3	50,8	29,5	40,15	E6.3	40,5	22,6	31,55
<b>Média</b>	<b>27,76</b>	<b>24,71</b>	<b>26,23</b>	<b>Média</b>	<b>36,77</b>	<b>27,82</b>	<b>32,29</b>

Tabela A.6 – Valores das médias dos desvios dimensionais dos experimentos.

Média dos valores (3 furos) 304L				Média dos valores (3 furos) 904L			
<b>E1-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E1-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	43,37	33,83	38,60	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	37,10	31,93	34,52
<b>E2-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E2-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	36,30	24,73	30,52	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	40,53	35,27	37,90
<b>E3-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E3-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	15,63	20,40	18,02	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	37,03	32,00	34,52
<b>E4-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E4-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	17,53	16,70	17,12	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	41,00	26,77	33,88
<b>E5-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E5-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	20,67	22,37	21,52	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	32,63	20,17	26,40
<b>E6-304L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>	<b>E6-904L</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Média</b>
Desvio ( $\mu\text{m}$ )	33,07	30,20	31,63	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	32,30	20,77	26,53