



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Guilherme Ramos Righi

**EFEITOS DA SOLDAGEM E DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES NA
USABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

**Belo Horizonte
Dezembro de 2018**

Guilherme Ramos Righi

Efeitos da Soldagem e do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões na Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Sandro Cardoso Santos

Belo Horizonte
Dezembro de 2018

R571e Righi, Guilherme Ramos.
Efeitos da soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões na usinabilidade do aço inoxidável austenítico / Guilherme Ramos Righi. - 2018.
101 f. : il., fotos, grafs., tabs.
Orientador: Sandro Cardoso Santos.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Aço inoxidável. 2. Usinagem. 3. Soldagem. 4. Aço – tratamento térmico. 5. Resistência de materiais. 6. Materiais – Fadiga. 7. Deformações e tensões. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Título.

CDD: 620.11241



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“EFEITOS DA SOLDAGEM E DO TRATAMENTO
TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES NA USINABILIDADE
DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO”

Autor: Guilherme Ramos Righi

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Wagner Sade
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC MINAS)

Belo Horizonte, 14 de Dezembro de 2018.

Agradecimentos

Agradeço ao CEFET-MG pelo apoio financeiro para a obtenção dos materiais que foram analisados neste estudo.

Agradeço à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a construção do equipamento de ensaio de usinabilidade.

Agradeço às empresas Metalmar, Master Soldas, Aero Soldas Especiais pela confiança e assim colaborarem para a obtenção dos materiais e preparação das amostras. Além destas, agradeço à empresa Aperam South American pelo compartilhamento de informações técnicas que contribuíram para este estudo.

Agradeço a Deus por renovar a cada dia a minha força e disposição e assim poder chegar ao final desta jornada.

Agradeço aos meus pais, Mauro Righi e Maria das Graças Ramos Righi, além de minha namorada Isabella Lamas Reis pelo incentivo, ajuda e exemplo de perseverança que me motivaram mesmo com obstáculos encontrados.

Agradeço ao meu orientador, professor Sandro Cardoso Santos, que acreditou em mim, compartilhou comigo suas idéias, conhecimentos e experiências e que sempre prezou pela qualidade, seja neste trabalho ou em qualquer feito na minha carreira na área da engenharia.

Agradeço ao técnico mecânico Itamar Herculano Gonçalves pelo aprendizado e suporte técnico para a realização dos ensaios de usinabilidade e ao professor Wagner Sade pelo aprendizado e paciência para a preparação das amostras.

Agradeço ao professor José Rubens pelo aprendizado e por ceder os laboratórios da PUC-MG para a conclusão das etapas experimentais deste trabalho.

Resumo

A usinagem em campo é uma operação aplicada em peças que passaram por diferentes processos durante a sua fabricação como conformação mecânica, soldagem e tratamento térmico, de modo que a usinabilidade de peças fabricadas em aço inoxidável austenítico – material amplamente submetido a esta operação – pode ser alterada (prejudicada) por mudanças ocorridas na microestrutura do material, alterando certas propriedades. Portanto, este trabalho envolve a avaliação da influência dos processos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões – processos típicos de fabricação – sobre a usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 304, material de resistência à corrosão e soldabilidade satisfatória e que possui amplas aplicações na indústria.

Foi analisado o comportamento das regiões de metal base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA) da solda feita em tarugos de aço inoxidável austenítico AISI 304 por processo TIG manual e posteriormente tratados termicamente para alívio parcial de tensão em patamar de temperatura de 350°C por 30 minutos, além de análise da região de metal base de um tarugo do material como recebido (CR) utilizado para referência. Para tal análise, foram feitos ensaios de usinabilidade por furação com pressão constante a seco e aplicando-se fluido de corte, medindo-se o tempo de furação em um percurso de 20mm, além de ensaios de microdureza Vickers e análise metalográfica para avaliar as transformações microestruturais.

Os resultados obtidos permitiram verificar que na condição como soldado e tratado termicamente, o material apresentou melhor usinabilidade nas regiões de MB e ZTA quando foi aplicado o fluido de corte. Na mesma condição de processamento, a usinabilidade na ZTA é inferior à da região de MB independente do uso de fluido de corte e tal resultado é causado pela ocorrência do aumento de dureza na ZTA, evidenciado pelos refinamentos de grãos austeníticos. Portanto, os resultados permitem concluir que o ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante é um método eficaz para análise da usinabilidade do AISI 304 processado e como recebido, de tal modo que este material teve sua menor usinabilidade na ZTA sob condição de processado e ensaiado a seco.

Palavras chave: aço inoxidável austenítico, usinabilidade, soldagem TIG, tratamento térmico de alívio de tensões, furação.

Abstract

Field machining is an operation applied to parts that have passed through different processes during their manufacture as mechanical forming, welding and heat treatment, so that the machinability of parts made from austenitic stainless steel – material widely submitted to this operation – can be modified (impaired) by changes in the material microstructure, amending certain properties. Therefore, this work involves the evaluation of the influence of welding processes and stress relief heat treatment – typical manufacturing processes – on the machinability of AISI 304 austenitic stainless steel, a material with satisfactory corrosion resistance and weldability and that has broad applications in the industry.

It was observed the behavior of the parent metal (PM) and heat affected zone (HAZ) regions of the AISI 304 austenitic stainless steel bars by manual TIG process and subsequently heat treated for partial stress relief at a temperature of 350°C for 30 minutes, in addition to analysis of the parent metal region of a as received material bar used to reference. For this analysis, dry and cutting fluid drilling machinability tests were performed with constant pressure and was applied by measuring the drilling time in a path of 20mm, as well as Vickers microhardness tests and metallographic analysis to evaluate the microstructural transformations.

The results showed that in the condition as welded and thermally treated, the material showed better machinability in the PM and HAZ regions when the cutting fluid was applied. In the same processing conditions, the machinability in the HAZ is lower than in the PM region independent of the use of cutting fluid, and such result is caused by the occurrence of hardness increase in the HAZ, evidenced by austenitic grain refining. Therefore, the results allow concluding that the constant pressure drilling machinability test is an effective method for analyzing the machinability of the processed and as received AISI 304 such that this material had its lowest machinability in the HAZ under the condition of being processed and dry tested.

Key words: austenitic stainless steel, machinability, TIG welding, stress relief heat treatment, drilling.

Lista de Figuras

Figura 1 – Sensitização nos aços inoxidáveis.....	23
Figura 2 – Foto feita a partir de ensaio por líquido penetrante evidenciando corrosão intergranular no aço inoxidável austenítico.....	24
Figura 3 – Micrografia de corrosão intergranular no aço inoxidável austenítico.....	24
Figura 4 – Circuito de soldagem TIG.....	26
Figura 5 – Repartição térmica em uma solda A - ZF, B – ZTA e C - Metal de Base.....	27
Figura 6 – Diagrama de Schaeffler.....	30
Figura 7 – Diagrama pseudobinário do sistema Fe-Cr-Ni com 70% de ferro associado à repartição térmica de uma solda.....	31
Figura 8 – Variantes do processo de furação.....	35
Figura 9 – Desenho esquemático da broca helicoidal. (a) Broca helicoidal com haste cilíndrica e (b) Broca helicoidal com haste cônica.....	36
Figura 10 – Elementos de cunha de corte de uma broca helicoidal.....	36
Figura 11 – Mecanismo de formação de cavacos.....	39
Figura 12 – Fontes de calor no processo de formação do cavaco.....	45
Figura 13 – Influência do fluido de corte sobre a temperatura de corte no torneamento de um aço de médio carbono.....	45
Figura 14 – Melhoria no acabamento superficial da peça com a redução do grau de recalque devido ao uso de fluido de corte.....	46
Figura 15 – Fluxograma de metodologia.....	49
Figura 16 – Tarugos cortados.....	51
Figura 17 – Diagrama de Schaeffler para metal de adição AWS ER308L e metal base AISI 304.....	53
Figura 18 – Desenho esquemático para procedimento de soldagem dos tarugos.....	54
Figura 19 – Tarugos soldados.....	54

Figura 20 – Superfícies dos tarugos após fresamento das faces.....	56
Figura 21 – Furadeira de coluna Manrod Quality Machines adaptada para ensaio de usinabilidade.....	57
Figura 22 – PLC Eaton Easy 819-DC-RC.....	58
Figura 23 – Sistema de deposição de fluido de corte por bombeamento.....	58
Figura 24 – Critérios de PLC para furação de modo sequencial.....	59
Figura 25 – Brocas utilizadas no teste de usinabilidade.....	60
Figura 26 – Desenho esquemático com especificação dos procedimentos para o ensaio de usinabilidade.....	61
Figura 27 – Fluido de corte semi-sintético utilizado no ensaio de usinabilidade.....	62
Figura 28 – Croqui para o corte das amostras a serem embutidas.....	64
Figura 29 – Mapeamento das amostras para ensaio de microdureza Vickers.....	67
Figura 30 – Mapeamento da broca desgastada e identificação das duas pontas de corte para procedimentos de MEV e EDS.....	69
Figura 31 – Micrografia óptica do aço inoxidável AISI 304 como recebido. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.....	70
Figura 32 – Micrografia óptica da zona fundida do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: água régia. Aumento: 400X.....	71
Figura 33 – Micrografia óptica da região de transição da zona fundida para a zona termicamente afetada do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.....	72
Figura 34 – Micrografia óptica da zona termicamente afetada na região de transição dos grãos grosseiros para os finos do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.....	73
Figura 35 – Micrografia óptica da região de metal base do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico. Aumento: 200X.....	74

Figura 36 – Perfil de microdureza Vickers medida na amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade na presença de fluido de corte.....	76
Figura 37 – Perfil de microdureza Vickers medida na amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade a seco.....	76
Figura 38 – Broca com perda da ponta de corte ocorrida durante o ensaio de usinabilidade envolvendo o AISI 304 como recebido e com o uso de fluido de corte.....	77
Figura 39 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade quanto ao uso de fluido de corte.....	78
Figura 40 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade a seco para materiais processados e não processados.....	79
Figura 41 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade com fluido de corte referente aos materiais processados e como recebido.....	80
Figura 42 – Comparativo da microdureza Vickers com os tempos medidos no ensaio de usinabilidade. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.....	81
Figura 43 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade para o AISI 304 como recebido. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.....	82
Figura 44 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade realizados na zona termicamente afetada (ZTA) para o AISI 304 soldado e tratado termicamente. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.....	83
Figura 45 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade realizados na região de metal base (MB) para o AISI 304 soldado e tratado termicamente. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.....	83
Figura 46 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte direita desgastada e (b) Espectroscopia na região de formação de material aderido. Aumento: 60X.....	85
Figura 47 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte direita desgastada e (b) Espectroscopia na região desgastada. Aumento: 60X.....	86
Figura 48 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte esquerda desgastada e (b) Espectroscopia na região de formação de material aderido. Aumento: 60X.....	87
Figura 49 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte esquerda desgastada e (b) Espectroscopia na região desgastada. Aumento: 60X.....	88

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável AISI 304.....	50
Tabela 2 – Composição química do metal depositado pela vareta AWS ER308L.....	52
Tabela 3 – Composição química da broca Dormer A108.....	61
Tabela 4 – Procedimentos para operação do ensaio de usinabilidade.....	63
Tabela 5 – Parâmetros técnicos para operação do ensaio de usinabilidade.....	63

Lista de Abreviaturas e Siglas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

APC – Aresta Postiça de Corte

AWS – *American Welding Society*

CA – Corrente Alternada

CE – Carbono Equivalente

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CLP – Controlador Lógico Programável

CR – Como Recebido

CVD – *Chemical Vapor Deposition*

EDS – Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia

FZ – *Fusion Zone*

GTAW – *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*

HAZ – *Heat Affected Zone*

HSS – *High Speed Steel*

MB – Metal Base

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscopia Óptica

PLC – *Programmable Logic Controller*

PUC-MG – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

TIG – *Tungsten Inert Gas*

TTAT – Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

Lista de Símbolos

A – Ampérie (Unidade de Corrente Elétrica)

A – Austenita (Diagrama de Schaeffler)

C – Carbono

CC- – Corrente Contínua Direta

$C_{máx}$ – Percentual Máximo de Carbono

cps – Contagens por Segundo (Unidade de Radiação Ionizante)

Cr – Cromo

$Cr_{23}C_6$ – Carboneto de Cromo

Cr_{eq} – Cromo Equivalente

Cu – Cobre

d – Diâmetro da Peça ou Ferramenta

d_i – Desvio

$d_{máx}$ – Maior Desvio

E – Aporte Térmico

eV – Elétron-volt (Unidade de Energia)

f – Avanço

F – Ferrita (Diagrama de Schaeffler)

Fe – Ferro

Fe_3C – Cementita

f_z – Avanço por Dente

HCl – Ácido Clorídrico

HNO_3 – Ácido Nítrico

HV – *Hardness Vickers* (Unidade de Dureza em kg/mm^2)

I – Corrente de Soldagem

kg – Quilograma (Unidade de Massa)

L – Fase Líquida (Diagrama Pseudobinário do Sistema Fe-Cr-Ni)

L_c – Percurso de Corte

L_e – Percurso Efetivo

L_f – Percurso de Avanço

m – Metro (Unidade de Comprimento)

M – Martensita (Diagrama de Schaeffler)

min – Minuto (Unidade de Tempo)

ml – Mililitro (Unidade de Volume)

mm – Milímetro (Unidade de Comprimento)

Mn – Manganês

$Mn_{m\acute{a}x}$ – Percentual Máximo de Manganês

Mo – Molibdênio

$Mo_{m\acute{a}x}$ – Percentual Máximo de Molibdênio

ms – Milissegundo (Unidade de Tempo)

n – Número de Rotações por Minuto

N – Nitrogênio

N – Newton (Unidade de Força)

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

Ni_{eq} – Níquel Equivalente

P – Fósforo

$P_{m\acute{a}x}$ – Percentual Máximo de Fósforo

R_c – Grau de Recalque

rms – *Root Mean Square* (Unidade de Acabamento Superficial)

Si – Silício

Si_{máx} – Percentual Máximo de Silício

S_{máx} – Percentual Máximo de Enxofre

rot – Número de Rotações

rpm – Rotações por Minuto (Unidade de Velocidade)

t – Tempo

t_{máx} – Tempo Máximo

t_{mín} – Tempo Mínimo

V – Vanádio

V – Volts (Unidade de Tensão Elétrica)

v_c – Velocidade de Corte

v_e – Velocidade Efetiva de Corte

v_f – Velocidade de Avanço

W – Tungstênio

z – Número de Dentes

°C – Grau Celsius (Unidade de Temperatura)

μm – Micrometro (Unidade de Comprimento)

μin – *Microinch* (Unidade de Acabamento Superficial)

∅ – Diâmetro

φ – Ângulo entre Plano de Cisalhamento e Direção da Velocidade de Corte

α – Fase Alfa (Diagrama Pseudobinário do Sistema Fe-Cr-Ni)

γ – Fase Gama (Diagrama Pseudobinário do Sistema Fe-Cr-Ni)

σ – Fase Sigma (Diagrama Pseudobinário do Sistema Fe-Cr-Ni)

Sumário

1. Introdução	16
2. Objetivos	18
2.1 Objetivos gerais	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. Revisão Bibliográfica	20
3.1 Aços inoxidáveis	20
3.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos	21
3.1.2 Sensitização e corrosão intergranular dos aços inoxidáveis	23
3.2 Soldagem.....	24
3.2.1 Soldagem TIG.....	25
3.2.2 Zona termicamente afetada e zona fundida	27
3.2.3 Soldagem de aços inoxidáveis e diagrama de Schaeffler	29
3.2.4 Zona fundida e zona termicamente afetada na soldagem de aços inoxidáveis. 31	
3.3 Tratamento térmico de alívio de tensões	32
3.3.1 Tensões residuais e distorções	32
3.3.2 Tratamento térmico de alívio de tensões em aços inoxidáveis.....	32
3.3.3 Métodos de tratamento térmico de alívio de tensões	33
3.4 Usinagem.....	34
3.4.1 Processo de furação.....	34
3.4.2 Movimentos de usinagem.....	37
3.4.3 Percursos da ferramenta na peça.....	37
3.4.4 Velocidades de usinagem.....	38
3.4.5 Avanços de usinagem	38
3.4.6 Formação do cavaco	39
3.4.7 Usinabilidade.....	41

3.4.8 Fluido de corte.....	48
4. Metodologia	49
5. Desenvolvimento Prático	50
5.1 Experimento.....	50
5.1.1 Escolha e preparação do metal de base para a soldagem.....	50
5.1.2 Escolha do metal de adição para a soldagem	51
5.1.3 Soldagem TIG	53
5.1.4 Tratamento térmico de alívio de tensões.....	55
5.1.5 Fresamento das faces dos tarugos para ensaio de usinabilidade for furação ...	55
5.1.6 Ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante.....	56
5.1.7 Metalografia.....	63
5.1.8 Ensaio de microdureza Vickers	66
5.1.9 Análise do desgaste nas pontas de corte da broca utilizada no ensaio de usinabilidade.....	68
6. Resultados e Discussões	70
6.1 Análise metalográfica.....	70
6.2 Análise do ensaio de microdureza Vickers	75
6.3 Análise do ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante	77
6.4 Análise da formação de cavacos	81
6.5 Análise do desgaste nas pontas de corte da broca utilizada no ensaio de usinabilidade	84
7 Conclusão.....	90
8 Futuras Linhas de Pesquisa.....	92
Referências Bibliográficas	93
ANEXO A Tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade.....	99
ANEXO B Microdureza Vickers medida nas amostras dos materiais ensaiados.....	100
ANEXO C Média da microdureza Vickers por região microestrutural.....	101

1. Introdução

Os aços inoxidáveis austeníticos são os materiais que apresentam uma das mais elevadas resistências à corrosão dentre os tipos de aços inoxidáveis presentes no mercado, apresentando ampla aplicação industrial em diversos segmentos como Óleo & Gás (SHACKENFORD, 2008, p. 258).

Conforme Ferraresi (2013, p. 2), este material apresenta soldabilidade satisfatória devido à ausência de transformação martensítica durante a soldagem e boa tenacidade, implicando em insensibilidade à fissuração pelo hidrogênio. Além disso, o elevado coeficiente de dilatação térmica e a baixa difusividade térmica do aço inoxidável austenítico proporcionam certa tendência à distorção no processo de soldagem, sendo aplicável o tratamento térmico de alívio de tensões, que visa à atenuação das tensões residuais geradas pela distorção das peças na soldagem (LIMA, 2011, p. 57).

Equipamentos de grande porte fabricados com este material, sendo já instalados e operantes podem ser submetidos à usinagem em campo, operação de manutenção realizada frequentemente em instalações industriais de variados segmentos da engenharia como Óleo & Gás, Mineração, Papel e Celulose, Forjamento e Estamparia, Siderurgia, Metalurgia e Alimentos (CARVALHO et al, 2014, p. 15). A necessidade de tal procedimento de reparo é devido à ocorrência de desgaste ou corrosão superficial de um componente mecânico, mesmo este sendo fabricado em um material de elevada resistência à corrosão (COSTA, 2012, p. 22).

Visto que as peças a serem usinadas em campo já passaram por diferentes processos durante a sua fabricação como conformação mecânica, soldagem e tratamento térmico, a usinabilidade do aço inoxidável austenítico pode ser alterada por mudanças ocorridas na microestrutura do material, alterando certas propriedades. Portanto, este trabalho envolveu a avaliação da influência da soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), processos usuais de fabricação de equipamentos, sobre a usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 304.

Para tal análise, tarugos quadrados de aço inoxidável austenítico AISI 304 com 1 1/4" de lado e 150mm de comprimento foram soldados por meio do processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), tratados termicamente para alívio de tensões à temperatura de 350°C durante 30 minutos, submetidos aos ensaios de usinabilidade com aplicação

de pressão constante por processo de furação (a seco e com aplicação de fluido de corte), ensaiados por microdureza Vickers para formação de um perfil de dureza da solda, e por fim, analisados metalograficamente. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) das regiões desgastadas da broca também foram realizadas. Assim, os resultados foram comparados entre um tarugo do material como recebido (sem soldagem e tratamento térmico) e os dois tarugos do material processado (soldados e tratados termicamente).

2. Objetivos

2.1 Objetivos gerais

Para o presente estudo, teve-se como objetivo geral a avaliação da influência dos processos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões sobre a usinabilidade de peças de aço inoxidável austenítico AISI 304, aplicando-se ou não fluido de corte nos ensaios de usinabilidade por furação com pressão constante.

2.2 Objetivos específicos

Considerando tal avaliação, definiram-se os objetivos específicos que envolveram:

- Análise da usinabilidade nas regiões de metal base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA) do aço inoxidável austenítico AISI 304 processado e como recebido, avaliando-se a influência das transformações microestruturais em tais regiões sobre os parâmetros de usinabilidade determinados pelo ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante em condições a seco a com fluido de corte;
- Análise da formação de cavacos gerados nas regiões de metal base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA) do aço inoxidável austenítico AISI 304 processado e como recebido durante o ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante em condições a seco a com fluido de corte;
- Análise da metalográfica das regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) do aço inoxidável austenítico AISI 304 processado e como recebido utilizados no ensaio de usinabilidade para evidenciação das transformações microestruturais em tais regiões;
- Análise do mecanismo de desgaste das pontas de corte danificadas de uma das brocas utilizadas no ensaio de usinabilidade;
- Análise da microdureza nas regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) do aço inoxidável austenítico AISI 304 processado e como recebido utilizados no ensaio

de usinabilidade, avaliando-se sua influência sobre os parâmetros de usinabilidade determinados pelo ensaio.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Aços inoxidáveis

Conforme Shackenford (2008, p. 257), dentre os diferentes tipos de aço, existem os aços inoxidáveis que são materiais com elevada resistência ao fenômeno de corrosão e ferrugem, que corresponde a um ataque gradual e contínuo do material quando inserido em um determinado meio circunvizinho que pode ser líquido ou gasoso. O principal elemento de liga presente é o cromo, cuja concentração é normalmente superior a 10%, podendo chegar a concentrações com níveis de até 30%. Esse elemento é responsável pela formação de um fino e invisível filme de óxido de cromo que se adere à superfície protegendo contra os efeitos da corrosão.

A formação desta camada de óxido em aços inoxidáveis ocorre devido à absorção de gás oxigênio por átomos de cromo na camada superficial do aço. Assim, a concentração de cromo nesta película é mais elevada que a do metal (MARTINS, 2017, p. 16).

Este tipo de aço apresenta uma combinação satisfatória em termos de ductilidade e resistência mecânica, além da resistência à corrosão. Portanto, são muito atrativos para diversas aplicações, mesmo que apresente um preço mais caro que os aços carbono e de baixa liga (BRANT et al, 2017, p. 3).

Chiaverini (2005, p. 371) classifica os aços inoxidáveis de acordo com a fase predominante à temperatura ambiente. Assim, eles podem ser austeníticos (composição típica de 18% de cromo e 8% de níquel), ferríticos (composição de 15 a 20% de cromo, baixo teor de carbono e sem a presença de níquel) e martensíticos (composição de no máximo 18% de cromo, sem a presença de níquel e com um teor de carbono maior que o encontrado nos aços inoxidáveis ferríticos).

Silva e Mei (2010, p. 26) classificam os microconstituintes que são responsáveis pela formação dos aços inoxidáveis:

- Austenita: composta por ferro gama. É não magnética e apresenta elevados valores de tenacidade, ductilidade e resistência ao desgaste;
- Ferrita: corresponde ao ferro alfa e pode apresentar em sua composição pequenas porcentagens de silício, fósforo e outras impurezas. Sua formação se dá por difusão e sua morfologia varia

conforme a taxa de resfriamento. É magnética, possui elevada maleabilidade e ductilidade;

- Martensita: corresponde a uma solução sólida supersaturada de carbono ou carboneto de ferro em ferro alfa, sendo uma fase metaestável formada pelo resfriamento brusco da austenita e cuja transformação ocorre por cisalhamento (não por difusão). Sua composição química pode conter até 1% de carbono e propriedades como dureza, fragilidade e resistência são aumentadas conforme se eleva a porcentagem de carbono.

Barreiro (2002, p. 117) complementa a classificação dos microconstituintes dos aços inoxidáveis com os carbonetos, que são constituintes de elevada dureza provenientes da combinação de elementos especiais (cromo, tungstênio, molibdênio e vanádio) com o carbono.

Conforme Carbó (2008, p. 28), a combinação das diferentes propriedades do material como brilho, elevada resistência mecânica, à corrosão e à elevadas temperaturas proporciona sua ampla aplicação na fabricação de tubulações, componentes de equipamentos, equipamentos para processamento de produtos alimentícios e farmacêuticos, de papel e celulose, de produtos de petróleo e químicos em geral, fornos, câmaras de combustão, trocadores de calor, motores térmicos, componentes de máquinas e equipamentos aeroespaciais, vasos de pressão, tanques e componentes estruturais menores, como hastes e parafusos.

3.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Baddoo (2008, p. 1) afirma que os aços inoxidáveis austeníticos possuem a estrutura da austenita retida em temperatura ambiente, cuja estabilização de tal estrutura a esta temperatura ocorre devido ao acréscimo de elementos de liga, como por exemplo, o níquel. Estes aços não são magnéticos e não endurecíveis por têmpera. Podem ter sua dureza aumentada por encruamento, pois a austenita se transforma parcialmente e paulatinamente em ferrita. Tal transformação pode ser revertida por aquecimento a temperaturas moderadas do aço encruado. Por causa desse efeito, costuma-se classificar os aços inoxidáveis austeníticos pelos níveis de resistência nos quais são obtidos por encruamento. Além disso, tal tipo de aço pode estar sujeito à ocorrência da corrosão intergranular.

De acordo com Chiaverini (2005, p. 412) suas principais classificações são:

- 301: apresentam boa trabalhabilidade, podendo ser aplicados em ornamentações, fins estruturais, indústria química, entre outros;
- 302: são equivalentes ao aço 301;
- 302B: apresentam adição de silício, o que os tornam mais resistentes à formação de casca de óxido a altas temperaturas. São utilizados em peças de fornos;
- 303: apresentam boa usinabilidade. Aplicados em eixos, parafusos, porcas, buchas, válvulas, entre outros;
- 304: possuem teor mais baixo de carbono e por isso são menos suscetíveis à corrosão intercrystalina;
- 308: apresentam alta resistência à corrosão. Aplicados em eletrodos de solda, fornos industriais, entre outros;
- 309: possuem boa resistência mecânica e à oxidação a altas temperaturas. Utilizados na indústria química, estufas, peças de bomba, entre outros;
- 309S: apresentam baixo teor de carbono, o que os tornam mais resistente à corrosão intercrystalina causada por soldagem;
- 310: possuem estabilidade à temperatura de soldagem. São utilizados na indústria química, estufas, peças de fornos;
- 316: apresentam resistência à corrosão química. Podem ser aplicados na indústria química, de papel, entre outras;
- 317: são parecidos com o aço 316, mas possuem maior resistência à corrosão;
- 321: possuem adição de estabilizantes que os tornam resistentes à corrosão intercrystalina a temperaturas altas. São usados em vasos de pressão, juntas de expansão, entre outros;
- 347: são parecidos com o aço 321;
- 201/202: apresentam resistência à corrosão inferior a dos tipos Cr-Ni além de alta resistência mecânica a altas temperaturas;
- 304N/306N: possuem nitrogênio adicionado em sua composição proporcionando a este, valores maiores de limite de escoamento. São usados em aparelhos de pressão na indústria química.

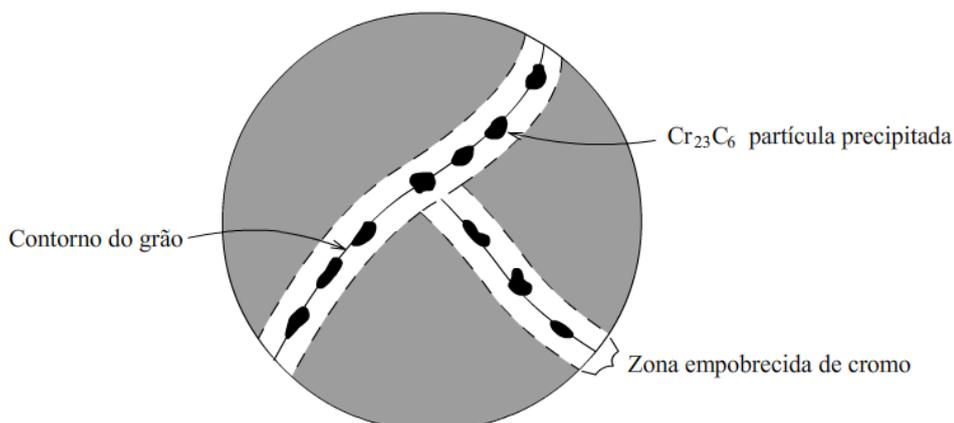
3.1.2 Sensitização e corrosão intergranular dos aços inoxidáveis

Gentil (2011, p. 41) afirma que os contornos dos grãos correspondem a regiões em que os átomos possuem certo desarranjo devido ao encontro de tais grãos cristalinos. Portanto, podem ocorrer imperfeições no interior dos cristais.

Esta região de contorno apresenta certa heterogeneidade em relação ao grão na qual ocorre variação da orientação dos átomos em grãos adjacentes e em pequenas partículas. Além disso, foi mostrado que os contornos dos grãos são como uma área anódica em relação ao grão, que funciona como uma área catódica (ASLAM et al, 2017, p. 74).

A aplicação de soldagem ou diferentes tratamentos térmicos (como o de alívio de tensões), aquecendo-se inadequadamente peças fabricadas em aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, os tornam passíveis de sofrerem corrosão intergranular, podendo se transformar em aços sensibilizados ou sensibilizados. Nascimento et al (2005, p. 139) concluiu que o resultado desta sensitização é o empobrecimento de cromo no contorno dos grãos pela precipitação do composto carboneto de cromo (Cr_{23}C_6). Para aços inoxidáveis austeníticos as temperaturas de sensitização estão entre 400 e 900°C e para os aços inoxidáveis ferríticos, entre 400 e 925°C. Quando expostos em meio corrosivo, ocorre a corrosão ao longo dos contornos dos grãos de modo que a velocidade está relacionada ao poder corrosivo do meio e à extensão da sensitização. Na Figura 1 é mostrado um desenho esquemático representando este fenômeno, no qual se pode observar a precipitação de carbonetos de cromo Cr_{23}C_6 nos contornos de grão e conseqüente formação de zonas empobrecidas de cromo, tornando o material propenso à corrosão intergranular.

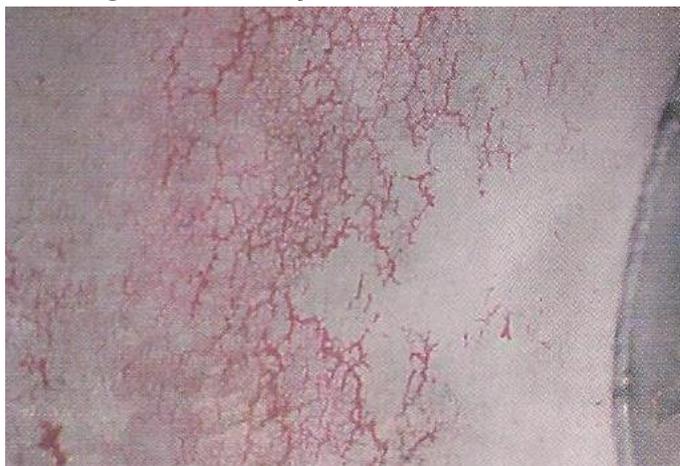
Figura 1 – Sensitização nos aços inoxidáveis.



Fonte: EPUSP (2007, p.21).

Jambo e Fófano (2008, p. 25) apresentam, por meio da Figura 2, o fenômeno de corrosão intergranular na superfície da chaparia de um equipamento fabricado em aço inoxidável austenítico e que foi evidenciado por meio do ensaio não destrutivo por líquido penetrante.

Figura 2 – Foto feita a partir de ensaio por líquido penetrante evidenciando corrosão intergranular no aço inoxidável austenítico.



Fonte: Jambo; Fófano (2008, p. 25).

Chiaverini (2005, p. 414) apresenta o aspecto micrográfico da corrosão intergranular no aço inoxidável austenítico por meio da Figura 3.

Figura 3 – Micrografia de corrosão intergranular no aço inoxidável austenítico.



Fonte: Chiaverini (2005, p. 414).

3.2 Soldagem

Segundo a *American Welding Society* (2010, p. 1) a soldagem corresponde um processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de

metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição. Este processo é realizado por diferentes maneiras e para este estudo será tratado com maior detalhamento a soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*).

3.2.1 Soldagem TIG

Veiga (2011, p. 11) define a soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*) como um processo de soldagem por fusão que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível para estabelecimento e manutenção do arco elétrico, podendo suportar elevadas temperaturas. Assim, o eletrodo, o arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça de soldagem, além da área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte.

Conforme Veiga (2011, p. 11), a atmosfera gasosa inerte é composta por gases quimicamente não ativos, como o argônio e o hélio, de forma que não se combinam com outros elementos e protegem a poça de fusão, a zona de solda e o eletrodo não consumível da atmosfera ambiente.

Godinho (2017, p. 35) afirma que as soldas TIG podem ser realizadas com o uso de material de adição de forma manual (com o uso de vareta) ou com a automatização da solda (enviando o material de deposição automaticamente por meio do cabeçote alimentador) e sem o uso do material de adição (fundição das bordas das peças de soldagem pelo calor do arco elétrico). Se a adição de metal na junta é necessária, ele é adicionado no limite da poça de fusão por meio de varetas e sem a aplicação de fluxos ou pastas. A solda formada é limpa e de alta qualidade, não havendo inclusão de escória no metal de solda.

3.2.1.1 Vantagens e limitações do processo TIG

De acordo Veiga (2011, p. 12), as principais vantagens deste processo de soldagem são:

- Distorção do material muito baixa;

- Processo aplicável à maioria dos materiais metálicos industrialmente usados;
- Versatilidade do processo e constante visibilidade da poça de fusão, simplificando a operação, o controle e a inspeção da solda;
- Soldas mais fortes, dúcteis e resistentes à corrosão pela proteção de gás inerte;
- Poucos respingos e faíscas;
- Não necessita do uso de fluxo sólido de decapagem;
- Reduzida perda de elemento de liga durante a fase de fusão;
- Satisfatório controle da solda;
- Permite a junção de materiais de difícil soldabilidade;
- Permite a solda em todas as posições.

As limitações se encontram em uma quantidade menor comparadas às vantagens deste processo e são mencionadas a seguir:

- Baixas taxas de deposição;
- Necessidade de maior coordenação e experiência do soldador no controle da poça de fusão;
- Dificuldade de manter proteção adequada em ambientes com vento;
- Baixa tolerância a contaminantes.

3.2.1.2 Equipamentos para a soldagem TIG

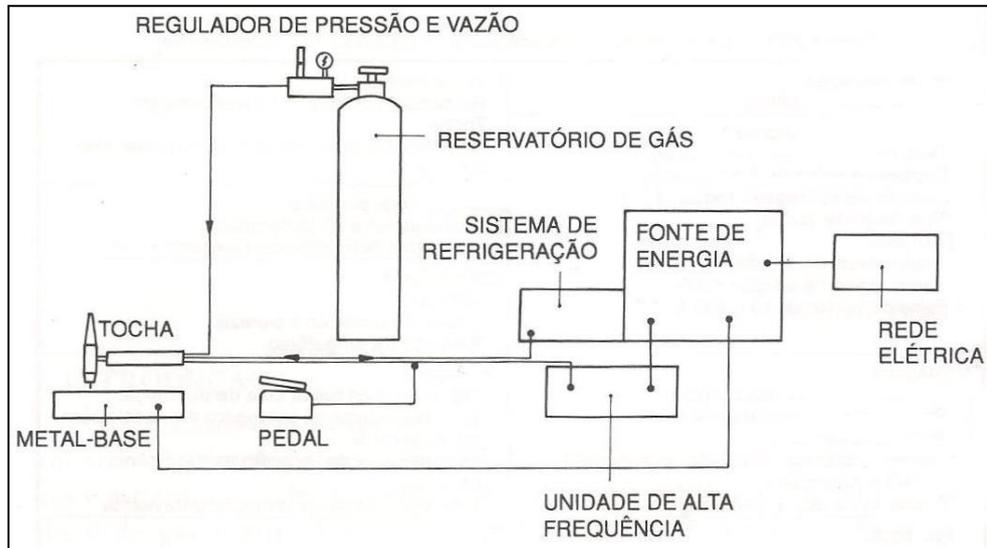
Veiga (2011, p. 31) apresenta os equipamentos requeridos para soldagem pelo processo TIG:

- Fonte de energia elétrica que pode ser ao mesmo tempo um transformador, no caso de corrente alternada, ou um retificador ou gerador, no caso de corrente contínua;
- Tocha com suporte para o eletrodo;
- Cabo de condução para o gás de proteção;
- Cabos para o sistema de refrigeração e fonte de energia;
- Fonte de gás, que pode ser um cilindro e um regulador de pressão, ou um conjunto de cilindros com canalização para alimentar a rede de distribuição, no caso de soldagem com operação em vários postos de trabalho;

- Regulador de vazão de gás.

Para melhor entendimento, na Figura 4 é ilustrado o circuito deste tipo de soldagem.

Figura 4 – Circuito de soldagem TIG.

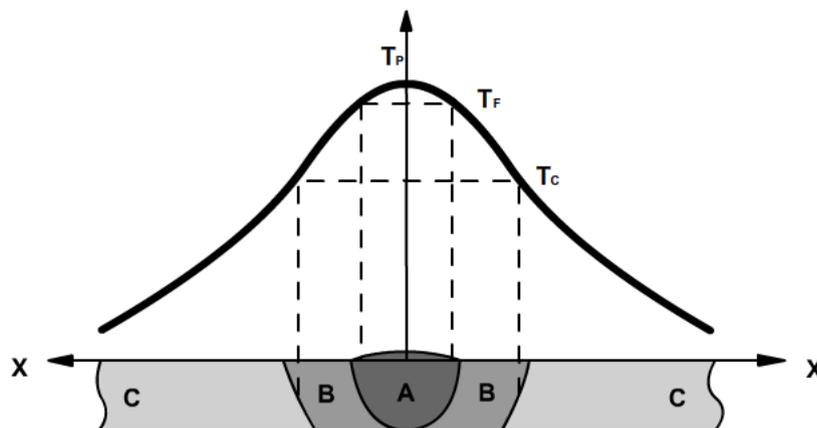


Fonte: Wainer (2010, p.62).

3.2.2 Zona termicamente afetada e zona fundida

De acordo com Marques et al (2011, p. 93), durante a realização do processo de soldagem ocorre a formação de duas regiões denominadas zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Essas estão esquematizadas na Figura 5 por meio da repartição térmica em uma solda e serão explicadas com maior detalhamento a seguir.

Figura 5 – Repartição térmica em uma solda A - ZF, B - ZTA e C - Metal de Base.



Fonte: Marques (2011, p.93).

3.2.2.1 Características da zona fundida

Marques et al (2011, p. 93) afirmam que a zona fundida (ZF) é caracterizada por uma estrutura primária de grãos colunares e grosseiros que confere baixa tenacidade ao material.

Em processos de soldagem a arco elétrico com o uso de eletrodo consumível, ocorre a transferência de metal de adição fundido para a poça de fusão sob a forma de gotas aquecidas a temperaturas que podem superar 2000°C. A região logo abaixo do arco elétrico é considerada a mais quente do ponto de fusão e nela ocorre a mistura do metal de adição com o metal de base fundido. Na região posterior da poça de fusão acontece solidificação devido à redução de temperatura. Nas regiões superaquecidas ocorre a interação do metal fundido com as escórias e gases presentes na região do arco elétrico (MARQUES et al, 2011, p. 93).

Conforme Wainer et al (2010, p. 403), a composição química resultante da zona fundida depende da intensidade dessas interações, das composições químicas dos metais de adição e de base, microestrutura de solidificação, tamanho de grão da austenita anterior e ciclo térmico de soldagem. Portanto, a participação destes é determinada pelo coeficiente de diluição, medido em macrografias da seção transversal da solda.

Na parte posterior da poça de fusão ocorrem reações que podem resultar em um material saturado de gases em solução, consequência pela redução da sua solubilidade devido à queda da temperatura e à solidificação. Em situações mais evoluídas pode ocorrer a porosidade na solda devido às reações do carbono com o oxigênio (ÁQUILA, 2012, p. 9).

Até o resfriamento final à temperatura ambiente, a zona fundida pode sofrer alterações como o crescimento do grão, formação de carbonetos, nitretos, fases intermetálicas e transformação de uma fase em outra(s). Assim as propriedades finais dessa zona dependerão da sua estrutura final, incluindo as microestruturas de solidificação e a secundária, além da presença de descontinuidades (ROCHA et al, 2017, p. 13).

3.2.2.2 Características da zona termicamente afetada

Conforme Marques et al (2011, p. 98), fatores como o tipo do metal de base, o

processo e procedimento de soldagem determinam as características da zona termicamente afetada (ZTA). Assim, tanto o ciclo térmico quanto a repartição térmica contribuem para que as propriedades dessa região sejam estabelecidas. Marques et al (2011, p. 98) subdivide a ZTA em três regiões: de crescimento do grão, de refino do grão e intercrítica.

Marques et al (2011, p. 99) afirma que a região de crescimento do grão se encontra localizada no metal de base em uma região próxima da solda, submetida a valores próximos da temperatura de fusão. Sua estrutura final será definida pela energia de soldagem, teor de carbono, elementos de liga, tamanho do grão austenítico formado e velocidade de resfriamento. Como propriedades indesejáveis dessa região têm-se a baixa tenacidade e os problemas de fissuração que correspondem à formação de trincas causadas pela grande quantidade de hidrogênio absorvida durante a soldagem, pelas tensões residuais e pela temperatura. O controle deste problema envolve a seleção do material, estimando-se a sua temperabilidade por meio da determinação do “Carbono Equivalente” com a equação 1:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (\% \text{ em peso}) \quad (1)$$

Assim, para C.E. < 0,40, o material apresenta insensibilidade ao problema de fissuração. Porém, para C.E. < 0,60, o material possui uma sensibilidade significativa de modo que é exigida a realização de soldagem com processos de “baixo-hidrogênio” (DURANT, 2007, p. 36).

Marques et al (2011, p. 99) cita outra região, denominada região de refino do grão é caracterizada por uma estrutura fina de ferrita e perlita. Corresponde a uma região da junta que foi submetida a temperaturas no intervalo de 900 a 1000°C. Finalmente, a região intercrítica é caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base. Sua temperatura de pico é 727°C e em regiões mais afastadas do cordão de solda são atingidos valores inferiores à temperatura de pico.

3.2.3 Soldagem de aços inoxidáveis e diagrama de Schaeffler

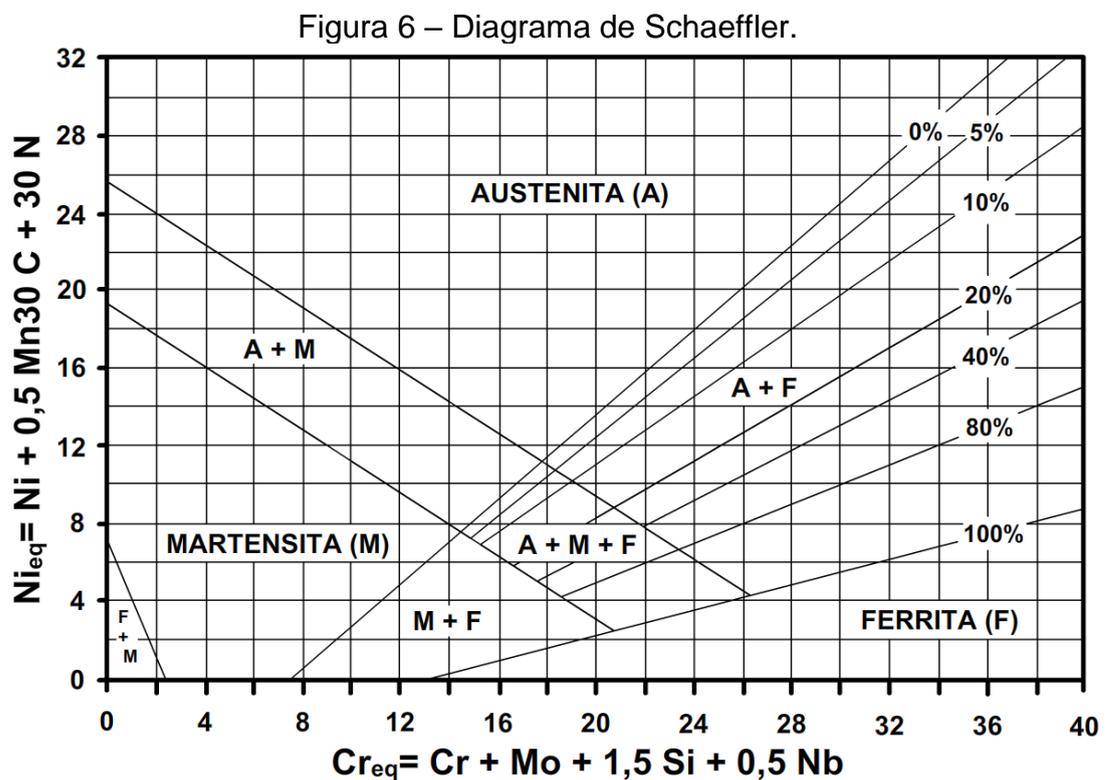
De acordo com Barbosa (2007, p. 21), o diagrama de Schaeffler, apresentado

pela Figura 6, foi criado na década de 1940 e permite prever a microestrutura da zona fundida (ZF) com base na sua composição química e é utilizado não somente para os aços inoxidáveis austeníticos, mas também para aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Para utilizá-lo, os equivalentes de Cr e Ni devem ser calculados pela composição química da solda e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama do campo em que o ponto (Cr_{eq} , Ni_{eq}) se localiza. Assim, estes fatores são determinados pela equação 2 e equação 3:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb \quad (2)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn + 30 \times \%N \quad (3)$$

Guiraldenq e Duparc (2017, p. 3) afirmam que em aplicações nas quais as composições dos metais base e de adição sejam diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda (que corresponde à quantidade percentual de metal de base que entra na composição do metal de solda), ficando mais próximo do metal de adição para soldas nas quais se encontra pequena diluição.



Fonte: Assumpção et al (2014, p. 5918).

Assim, esse diagrama permite compreender com melhor clareza quais os constituintes microscópicos presentes em cada região de uma peça de aço inoxidável soldada.

3.3 Tratamento térmico de alívio de tensões

De acordo com Trindade et al (2005, p. 165), o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) é um processo que envolve a operação de aquecimento pós soldagem de uma peça trabalhada para minimizar as tensões residuais formadas durante o aquecimento e resfriamento da peça ao ser soldada, de modo que tais tensões, se mantidas, podem causar distorções e falhas prematuras na peça.

3.3.1 Tensões residuais e distorções

A *American Society of Materials* (2005, p. 417) afirma que as tensões residuais e distorções estão relacionadas aos resultados obtidos da fabricação de peças que foram submetidas a certa deformação ou a um gradiente de temperatura através das seções macroscópicas. As distorções podem estar relacionadas tanto ao tamanho quanto à forma da peça. A distorção de tamanho é causada pela expansão ou contração térmica de microestrutura durante o aquecimento ou resfriamento de uma peça. A distorção de forma ocorre devido às variações de temperatura ao longo de peças com formato complexo, resultando na formação de tensões residuais não uniformes. Assim, as principais causas da ocorrência de tensões residuais podem ser resfriamento desigual após fundição, usinagem, conformação a quente ou a frio, tratamento térmico e soldagem.

Portando, uma das maneiras de se minimizar essas tensões residuais, ou seja, aliviá-las, é por meio da aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) que consiste na operação de aquecimento da peça de trabalho após as operações causadoras de tais tensões e distorções (GHOSH et al, 2017, p. 232).

3.3.2 Tratamento térmico de alívio de tensões em aços inoxidáveis

Chiaverini (2005, p. 413) cita alguns tipos de tratamento para aços inoxidáveis

que podem ser feitos:

- Redistribuição de tensões: destinado a peças deformadas em até 30% ou soldadas. É realizado entre as faixas de temperatura de 290 a 425°C e resulta na distribuição dos picos de tensões e um aumento do limites de tensão e escoamento;
- Alívio de tensões total ou parcial: aquecimento feito a uma temperatura inferior a responsável pela precipitação de carboneto de cromo nos contornos de grão. A temperatura no tratamento deve estar na faixa de 350 a 430°C de 30 minutos a 2 horas (conforme dimensão da peça), seguido de resfriamento a ar;
- Solubilização: destinado a peças soldadas com sua utilização em trabalho na faixa entre 400 e 900°C. A temperatura no tratamento deve apresentar valor mínimo de 900°C de 1 a 10 horas, resultando no alívio pleno das tensões e na aglomeração dos carbonetos de forma a evitar a ocorrência da corrosão intergranular.

3.3.3 Métodos de tratamento térmico de alívio de tensões

Gimenes (2007, p. 19) cita os principais tratamentos térmicos de alívio de tensões que podem ser realizados para diferentes aplicações:

- Fornos fechados: corresponde a uma estrutura de aço revestida com placas de material refratário que suportam elevadas temperaturas. Suas dimensões são variadas e apresentam como fonte de energia, óleo, gás ou resistências elétricas. Sua atmosfera é geralmente redutora e o equipamento sofre uma pequena oxidação com o passar dos tempos de funcionamento;
- Aquecimento resistivo: composto por elementos resistivos protegidos por material cerâmico e é ajustado em torno da peça a ser tratada. Como fonte de energia utiliza-se fonte de corrente contínua de baixa tensão;
- Aquecimento indutivo: composto por um transformador ligado a um cabo indutor que envolve a peça que se encontra isolada termicamente. Como fonte de energia utiliza-se geradores ou retificadores de frequência adequada;

- Gases quentes: corresponde à injeção dos produtos da queima de um determinado combustível (óleo ou gás) no interior da peça que se encontra isolada termicamente. Para este processo, utilizam-se queimadores;
- Queimadores a gás: utiliza queimadores a chama combustível que transferem calor a uma peça na qual não se encontra isolada termicamente. Apresenta baixa eficiência e tem adaptação satisfatória a temperaturas abaixo de 450°C.

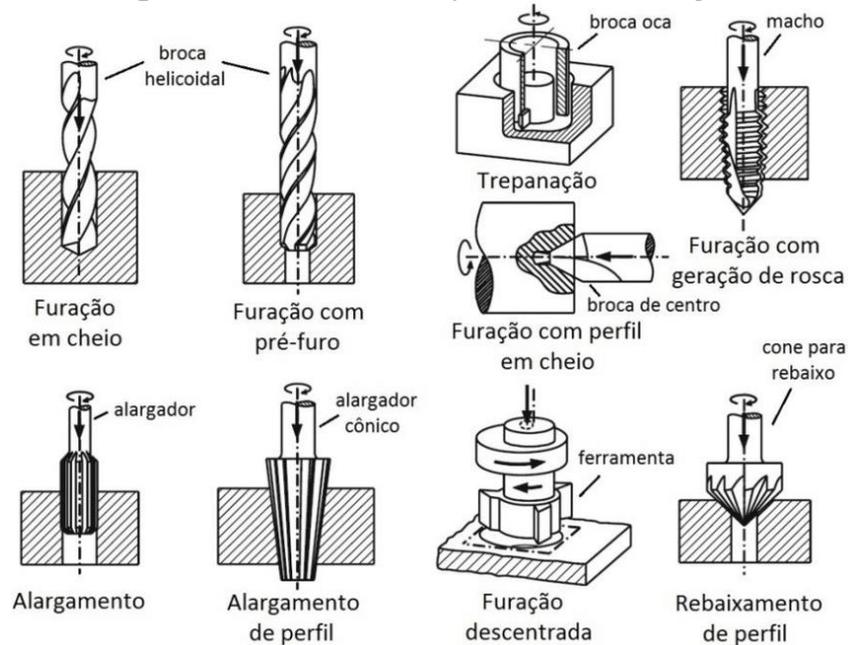
3.4 Usinagem

Conforme definido por Liang et al (2017, p. 3), a usinagem corresponde a um processo de fabricação que resulta na remoção de material da peça por cisalhamento. A fração de material retirada por esse processo é chamado de cavaco. As principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida são apresentadas e agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada, além de poderem ser subdivididas em desbaste (garante elevada taxa de remoção de material) e acabamento (garante a qualidade final do componente).

3.4.1 Processo de furação

Conforme Blödorn (2014, p. 68), o processo de furação corresponde a uma operação de usinagem com remoção de cavaco, onde o movimento de corte é circular e o movimento de avanço é linear na direção do eixo de rotação da ferramenta de corte (conhecida como broca). No segmento industrial manufatureiro, este é um dos processos mais utilizados, já que a grande maioria das peças produzidas necessita ter pelo menos um furo. Além disso, 30% de todas as operações de usinagem de metal e 75% do volume de material removido na usinagem ocorrem devido ao processo de furação. Este processo possui uma grande aplicabilidade dentre os processos de usinagem e apresenta significativas variações em termos de broca e geometria do furo projetado. A Figura 8 apresenta estas variantes.

Figura 8 – Variantes do processo de furação.



Fonte: Blödmern (2014, p. 68).

Devido à existência de diferentes tipos de brocas para auxiliar na furação, a escolha da broca deve ser analisada com base nos seguintes parâmetros (AGAPIOU; STEPHENSON, 1997 apud LOPES, 2017):

- Tipo de furo (cego ou passante);
- Relação entre o diâmetro e a profundidade do furo;
- Qualidade do furo (tolerâncias dimensionais e o acabamento);
- Quantidade de furos a serem realizados;
- Características do material a ser usinado.

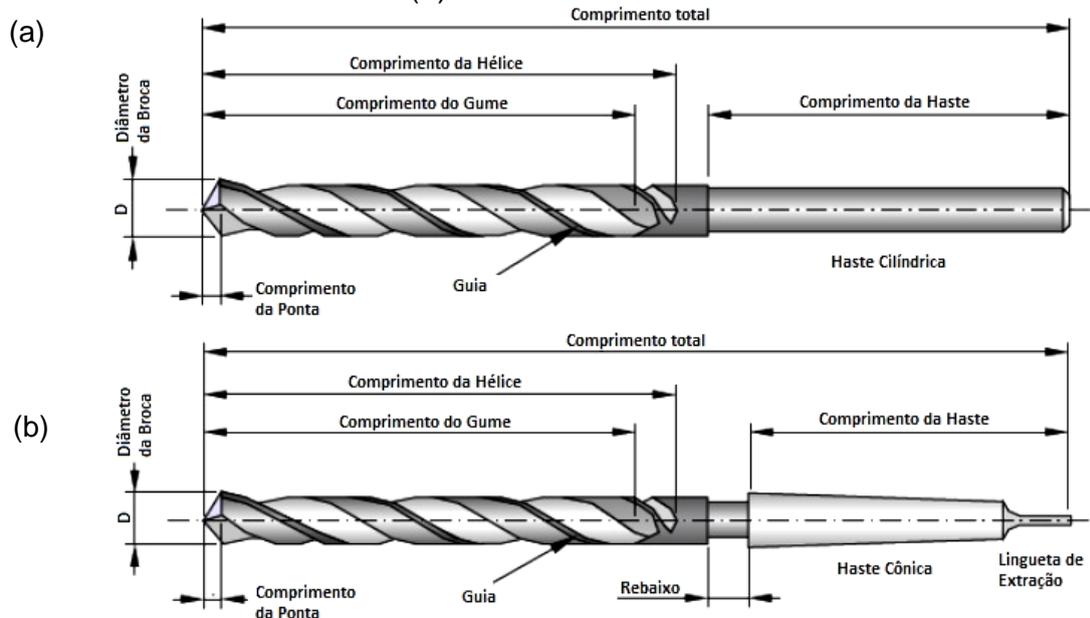
Dentre os diferentes tipos de broca, o presente estudo utilizará no ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante, a broca helicoidal, uma das ferramentas de corte mais utilizadas na furação e aplicadas, principalmente, para furos curtos com diâmetros pequenos e médios (DOS SANTOS et al, 2013, p. 68).

3.4.1.1 Broca helicoidal

A broca helicoidal corresponde a um tipo de ferramenta de corte composto por uma haste cilíndrica ou cônica juntamente com uma parte cortante que pode ser afiada de diferentes maneiras dependendo do material que será usinado. Geralmente apresenta dois gumes principais ligados através da aresta transversal, contudo podem ter três ou mais gumes cortantes, a fim de reduzir os erros de

posicionamento, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir as forças de corte e avanço (SÓRIA et al, 2016). Este tipo de ferramenta é mostrado na Figura 9.

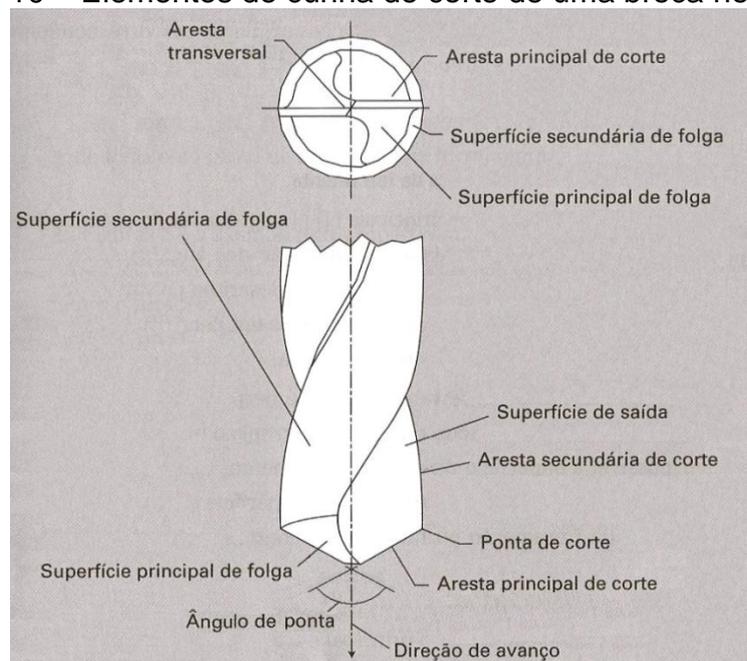
Figura 9 – Desenho esquemático da broca helicoidal. (a) Broca helicoidal com haste cilíndrica e (b) Broca helicoidal com haste cônica.



Fonte: Tecmecanico (2018).

O desempenho de ferramentas com este formato, assim como ocorre com outras, é influenciado pela sua geometria. Na Figura 10, são apresentados alguns dos principais elementos da cunha de corte das brocas helicoidais.

Figura 10 – Elementos de cunha de corte de uma broca helicoidal.



Fonte: Adaptado de Machado et al (2015, p. 41).

3.4.2 Movimentos de usinagem

Machado et al (2015, p. 27) definem que os movimentos nas operações de usinagem são considerados movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante e a peça considerada estacionária. Assim, existem dois tipos de movimentos: os que causam a saída de cavaco de modo direto e os que não tomam parte diretamente na sua retirada. As classificações dos movimentos que provocam diretamente a saída do cavaco estão citadas a seguir:

- Movimento de corte: feito entre a peça e a aresta de corte (única retirada de cavaco);
- Movimento de avanço: feito entre a peça e a aresta de corte (retirada contínua de cavaco);
- Movimento efetivo: resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados simultaneamente.

Conforme Machado et al (2015, p. 28), os movimentos que não provocam a formação do cavaco de modo direto são:

- Movimento de aproximação: feito entre a peça e a aresta de corte (ambas se aproximam antes da usinagem);
- Movimento de ajuste: feito entre a peça e a aresta de corte (determina a espessura de material a ser removido);
- Movimento de correção: feito entre a peça e a aresta de corte (compensa o desgaste da ferramenta);
- Movimento de recuo: feito entre a peça e a aresta de corte (afastamento da ferramenta da peça após o processo de usinagem).

3.4.3 Percursos da ferramenta na peça

De acordo com Machado et al (2015, p. 30), os percursos da ferramenta na peça são:

- Percurso de corte (L_c): espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de corte;
- Percurso de avanço (L_f): espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de avanço;

- Percurso efetivo (L_e): é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção efetiva do corte.

3.4.4 Velocidades de usinagem

Machado et al (2015, p. 30) definem velocidade de corte (v_c) como sendo a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Assim, para processos de usinagem com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada por meio da seguinte equação 4:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (4)$$

Onde “d” é diâmetro da peça ou ferramenta (mm) e “n” o número de rotações por minuto (rpm).

A velocidade de avanço (v_f) corresponde à velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. Esta é calculada por meio da relação equação 5:

$$v_f = f \cdot n \quad (5)$$

Onde “f” é o avanço (mm/rev) e “n” o número de rotações por minuto (rpm).

A velocidade efetiva de corte (v_e) se refere à velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. Seu cálculo é dado pela equação 6:

$$v_e = v_c + v_f \quad (6)$$

3.4.5 Avanços de usinagem

De acordo com Machado et al (2015, p. 34), o avanço (f) corresponde percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). Se tratando de ferramentas que apresentam mais de um dente, como a fresa, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z), que se refere ao percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta (ocorre a geração de duas superfícies consecutivas em usinagem). Ambas as grandezas podem ser relacionadas pela equação 7:

$$f = f_z \cdot z \quad (7)$$

Onde “z” é o número de dentes.

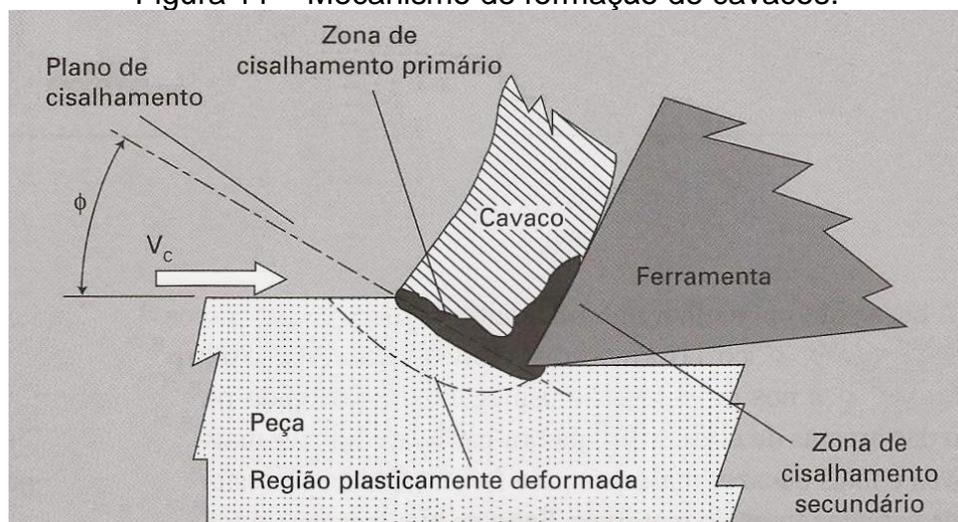
3.4.6 Formação de cavaco

O cavaco formado durante o processo de usinagem provém de elevadas velocidades de deformação, seguidas de ruptura do material da peça trabalhada (BARBOSA et al, 2013, p. 1).

Conforme Machado et al (2015, p. 57), tal processo de formação envolve os fenômenos:

- Recalque inicial: ocasionado pela penetração da cunha de corte no material da peça, resultando no pressionamento de uma pequena parte deste material (que se mantém unida à peça) contra a superfície de saída da ferramenta;
- Deformação e ruptura: o material recalcado sofre deformação elástica seguida de deformação plástica, na qual esta última aumenta progressivamente até atingir a tensão de cisalhamento necessária ao deslizamento. Inicia-se o deslizamento do material recalcado segundo os planos de cisalhamento, de modo que os planos instantâneos de ruptura e propagação de trincas definem certa região entre peça e cavaco, chamada zona primária de cisalhamento. Na Figura 11 é apresentado o desenho esquemático deste plano;

Figura 11 – Mecanismo de formação de cavacos.



Fonte: Machado et al (2015, p. 58).

- Deslizamento das lamelas: a continuidade da penetração da ferramenta na peça resulta na ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo das condições de usinagem e das propriedades do material. Assim, tais características vão determinar quanto o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado;
- Saída do cavaco: a continuidade do movimento peça/ferramenta resulta no escorregamento da porção de material deformado e cisalhado (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta, surgindo uma região chamada de zona de cisalhamento secundário. O processo se repete, sucessivamente, com o material adjacente, caracterizando o fenômeno da formação do cavaco como periódico.

3.4.6.1 Tipos de cavacos

Raymundo et al (2014, p. 19) afirmam que fatores como ductilidade, fragilidade e condutividade térmica do material da peça trabalhada, além dos parâmetros de corte, apresentam significativa influência em relação aos tipos de cavaco formados.

Estes tipos são citados a seguir (MACHADO et al, 2015, p. 66):

- Contínuos: são formados em processos de usinagem envolvendo materiais dúcteis. Assim, o material cisalha na zona primária de cisalhamento com elevadas deformações e mantém sua morfologia homogênea, não havendo fragmentação;
- Descontínuos: são formados em processos de usinagem envolvendo materiais frágeis que não possuem capacidade para suportar grandes deformações sem se romper. Além desta condição, a aplicação de baixas velocidades de corte, ângulos de saída pequenos e altos avanços também contribuem para formar cavacos descontínuos em materiais com ductilidade baixa;
- Segmentados: caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muito pouca, ou quase nenhuma deformação no interior de tais segmentos. No processo de cisalhamento o calor gerado proporciona uma taxa de amolecimento localizado maior que a taxa de encruamento. Por este motivo, a

deformação continua acontecendo no mesmo plano primário de cisalhamento, até que se afasta da aresta o suficiente para as tensões cisalhantes não mais serem capazes de continuar a deformação. Neste momento, uma nova banda de cisalhamento começa a se deformar, caracterizando um processo cíclico de produção de cavacos na forma de dentes de serra.

3.4.7 Usinabilidade

Baptista (2002, p. 104) afirma que a usinabilidade de um material pode ser definida por um valor numérico comparativo, que representa um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material em relação a outro definido como padrão. Tais propriedades são: vida da ferramenta de corte; força de usinagem; acabamento superficial da peça; temperatura de corte; produtividade da máquina operatriz; e as características do cavaco.

No setor industrial, a avaliação mais significativa da usinabilidade ocorre por meio do custo necessário para produzir um grupo de peças em máquina operatriz. As peças são submetidas a uma avaliação de qualidade que envolve tolerância dimensional, acabamento superficial e integridade funcional. Considerados esses fatores como essenciais, o custo mínimo das peças somente pode ser obtido por meio de uma alta produtividade através de elevadas velocidades de corte e baixo desgaste das ferramentas. Desta forma, a usinabilidade não é uma propriedade específica do material, mas sim, um resultado da relação do material a ser usinado com a operação de usinagem, e para que a avaliação da usinabilidade seja realizada, são aplicados certos critérios, utilizados de modo isolado ou em conjunto. (BAPTISTA, 2002, p. 104).

Conforme definido por Ferraresi (2006, p. 566), a usinabilidade referente a um metal corresponde a uma grandeza tecnológica (não é uma grandeza específica do material), indicada por meio de um valor numérico, podendo ser índice ou porcentagem. Assim, avalia-se um conjunto de propriedades de usinagem do material, em relação a outro material definido como padrão. Tais propriedades de usinagem apresentam efeito sobre grandezas mensuráveis relacionadas ao processo, citando-se as características do cavaco, a temperatura de corte, a produtividade, a força de usinagem, a vida da ferramenta e o acabamento

superficial da peça trabalhada.

Ferraresi (2006, p. 566) afirma que vários segmentos industriais possuem grande interesse pela usinabilidade, visto que está amplamente ligada a produtividade da empresa, envolvendo aspectos como custos, controle de qualidade e inspeção do produto. Apesar disso, a usinabilidade ainda se encontra em processo de pesquisa por não ser possível atribuir uma unidade bem definida a ela e isto se deve aos fatos de não ser considerada uma propriedade de um único material, da dificuldade em se analisar e interpretar os resultados de medidas envolvendo uma operação de usinagem, da dificuldade e demora de certos ensaios de usinagem, além de se vincular às considerações econômicas (custo de fabricação por peça).

Ferraresi (2006, p. 568) menciona três componentes que exercem influência sobre o índice de usinabilidade de certo material. São eles:

- Material da peça a ser usinada (sua composição química, dureza, rigidez da peça, microestrutura e propriedades de tensões e deformações);
- Processo mecânico aplicado;
- Condições de usinagem (material da ferramenta, condições de usinagem, fluidos de corte, rigidez envolvendo o conjunto máquina/ferramenta/sistema de fixação da peça e tipos de trabalhos executados pela ferramenta).

De acordo com Ferraresi (2006, p. 570) os ensaios de usinabilidade podem ser associados conforme critérios básicos ou específicos.

Critérios básicos:

- Baseados na vida da ferramenta;
- Baseados na força de usinagem;
- Baseados no acabamento superficial;
- Baseados na produtividade.

Critérios específicos:

- Baseados na análise dimensional;
- Baseados na temperatura de corte;
- Baseados nas características do cavaco;
- Baseados na energia fornecida pelo pêndulo.

3.4.7.1 Ensaios de usinabilidade

Os ensaios para determinação da usinabilidade dos materiais podem ser classificados em (MILLS; REDFORD, 1983 apud SANTOS; SALES, 2007, p. 223):

- Requerem a realização do processo de usinagem;
- Não requerem a realização do processo de usinagem (análise de composição química, propriedades físicas e microestrutura do material da peça usinada).

A classificação pode estar relacionada à natureza dos resultados:

- Testes de ranqueamento (usinabilidade relativa entre duas ou mais combinações de peça-ferramenta, em condições de corte estabelecidas);
- Testes absolutos (usinabilidade relativa em faixas de condições de corte).

Além das mencionadas anteriormente, a classificação pode estar relacionada ao tempo de duração dos ensaios:

- Longa duração;
- Curta duração.

Os ensaios para análise da usinabilidade foram sendo desenvolvidos ao longo das últimas décadas, apresentando certa variedade de opções de procedimentos experimentais (SANTOS; SALES, 2007, p. 223). Os principais tipos são citados abaixo:

- Ensaio de vida da ferramenta: determinação da vida da ferramenta de corte em função da velocidade por meio de levantamentos em relação às curvas de evolução do desgaste;
- Ensaio com aplicação de pressão constante envolvendo processos de torneamento ou furação: força constante aplicada na direção de avanço e na medição do intervalo de tempo para a ferramenta realizar um determinado deslocamento. Este ensaio foi escolhido para o presente estudo e será tratado de modo detalhado em seu desenvolvimento prático;
- Ensaio de faceamento rápido: disco com diâmetro aproximado de 500mm fixado na placa de um torno, girando em rotação constante e com uma ferramenta de corte posicionada próxima ao centro do disco

se deslocando na direção radial. Assim, a velocidade de corte é elevada conforme aumento do diâmetro torneado, definindo uma posição de falha da ferramenta, na qual ocorrerá um desgaste acentuado após certo tempo;

- Ensaio de torneamento cônico: apresenta o mesmo princípio de funcionamento do ensaio de faceamento rápido, porém a elevação da velocidade de corte ocorre com o crescimento da seção transversal de uma peça de geometria cônica, de modo que a falha é definida ao longo da face do cone.

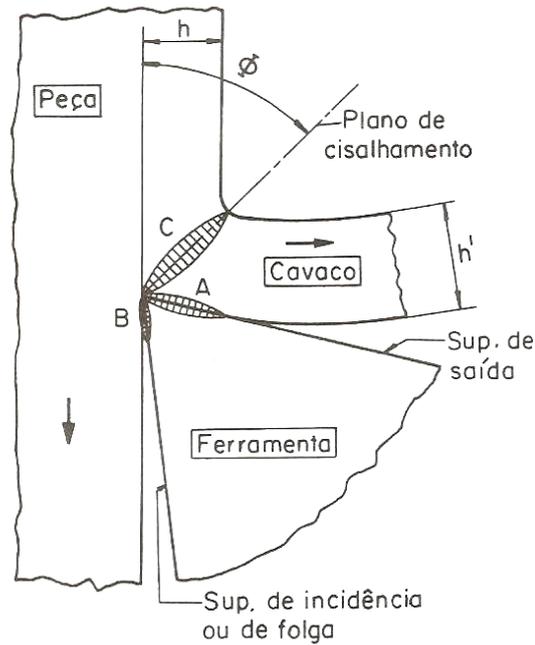
3.4.8 Fluido de corte

Conforme Tebaldo et al (2015, p. 341), os fluidos de corte correspondem a compostos utilizados na usinagem dos metais que conferem alguma melhoria ao processo. Tal melhoria desse elemento pode ter caráter funcional (melhor desempenho do mecanismo da formação do cavaco por redução do coeficiente de atrito entre ferramenta e cavaco, facilidade de remoção do cavaco, refrigeração da ferramenta, refrigeração da peça, refrigeração da máquina-ferramenta e melhor precisão dimensional da peça trabalhada) ou econômico (menor consumo de energia de corte, menor desgaste da ferramenta em operação, impedimento da corrosão da peça em usinagem e menor custo da ferramenta por peça usinada, aumentando o faturamento da indústria).

Ferraresi (2006, p. 514) afirma que o processo de formação do cavaco envolve três fontes distintas de calor conforme Figura 12:

- Zona A (região de interface cavaco/ferramenta onde ocorre atrito entre cavaco e ferramenta);
- Zona B (região de interface superfície usinada da peça/ferramenta onde ocorre atrito entre superfície usinada e ferramenta);
- Zona C (região de cisalhamento onde ocorre a deformação plástica do material usinado).

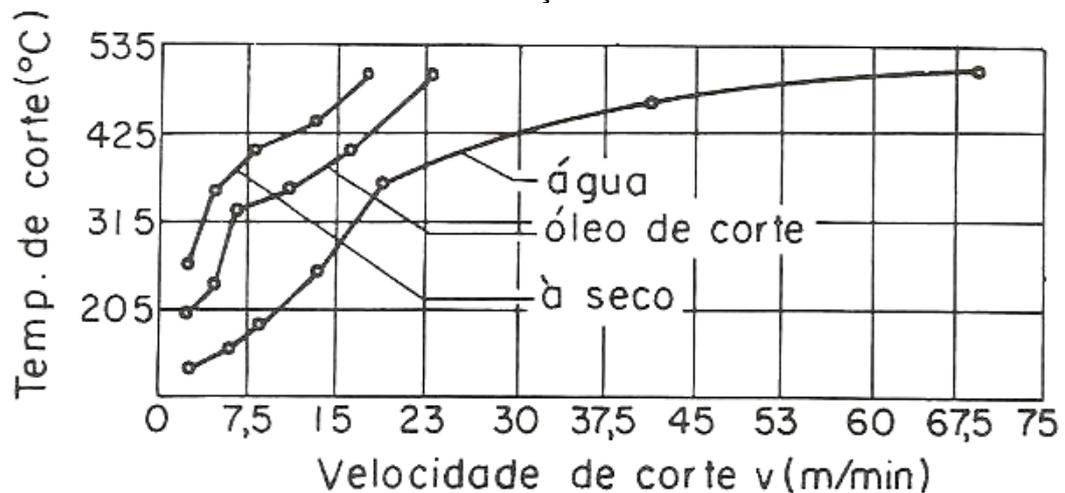
Figura 12 – Fontes de calor no processo de formação do cavaco.



Fonte: Ferraresi (2006, p. 514).

Assim, Espindola e Klafke (2014, p. 1) explicam que o uso de um fluido de corte com caráter predominantemente lubrificante resulta na redução da intensidade de tais fontes de calor, de forma a evitar com que altas temperaturas proporcionadas durante o processo influenciem sobre as propriedades da ferramenta. Na Figura 13 é apresentado o gráfico de influência do fluido de corte sobre a temperatura de corte no torneamento.

Figura 13 – Influência do fluido de corte sobre a temperatura de corte no torneamento de um aço de médio carbono.

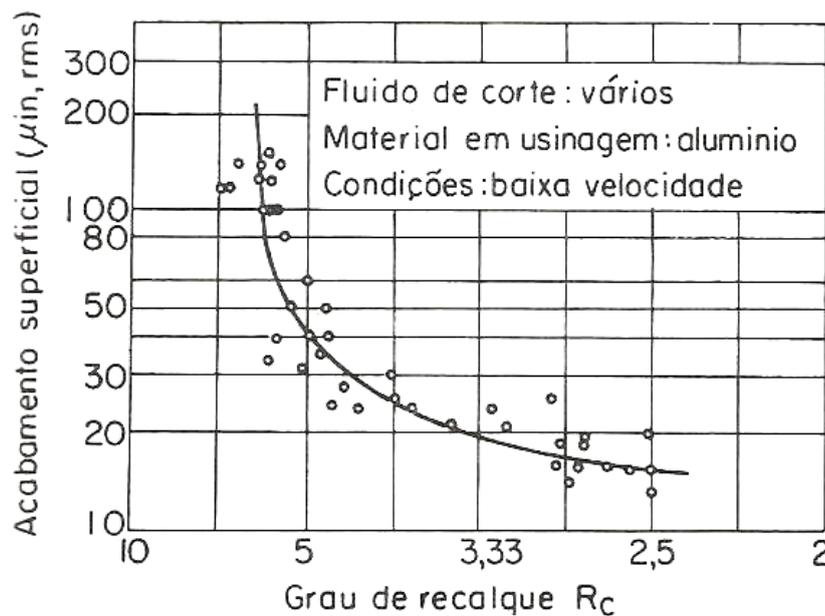


Fonte: Ferraresi (2006, p. 517).

Além desta função, a presença do fluido na região do corte facilita a expulsão do cavaco em alguns processos como de usinagem como torneamento, furação, serramento e operações de super-acabamento, visto que a presença do cavaco na região do corte pode levar à danificações na ferramenta ou na superfície da peça usinada (FERRARESI, 2006, p. 514).

Ferraresi (2006, p. 518) também vincula o uso de fluido de corte à melhoria do acabamento superficial da peça usinada evitando a formação de aresta postiça de corte (APC), que é um modo de desgaste causado por solda por pressão do cavaco na ferramenta. É mais comum ocorrer na usinagem de materiais considerados pastosos, como aços baixo carbono, aços inoxidáveis e alumínio. A aplicação de baixa velocidade de corte também contribui para o aumento da formação de aresta postiça. Logo, a utilização de lubrificante leva à redução do coeficiente de atrito entre cavaco formado e ferramenta, que mantém uma relação direta com o grau de recalque do cavaco (relação entre o comprimento de corte e o comprimento do cavaco). Na Figura 14 é mostrada a melhoria no acabamento superficial da peça com a redução do grau de recalque (e redução, também, do coeficiente de atrito) devido ao uso de fluido de corte.

Figura 14 – Melhoria no acabamento superficial da peça com a redução do grau de recalque devido ao uso de fluido de corte.



Fonte: Ferraresi (2006, p. 519).

3.4.8.1 Classificação dos fluidos de corte

Conforme Machado et al (2009, p. 161), os fluidos de corte são classificados em três grupos, segundo seu estado físico: sólido, líquido ou gasoso. Os fluidos sólidos, por exemplo, o grafite e o bissulfeto de molibdênio, visam à lubrificação, sendo aplicados diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes do processo de usinagem. Por sua vez, os fluidos gasosos visam principalmente à refrigeração e a expulsão do cavaco na operação de usinagem, sendo mais efetivos na penetrabilidade até a zona ativa da ferramenta de corte, e se têm como exemplos, o ar e o dióxido de carbono. Já os fluidos líquidos compõe o maior grupo, sendo considerado os mais importantes e, conseqüentemente, os mais empregados.

Santos e Sales (2007, p. 177) subdividem os fluidos de corte líquidos em:

- Semissintéticos: são também formadores de emulsões. Apresentam de 5 a 50% de óleo mineral no fluido concentrado, além de aditivos e compostos químicos que dissolvem na água formando moléculas individuais. A presença de grande quantidade de emulsificadores propicia uma coloração menos leitosa e mais transparente. A menor quantidade de óleo mineral e a presença de biocidas elevam a vida do fluido e reduzem os riscos à saúde;
- Sintéticos: não possuem óleo mineral em sua composição, sendo baseados em substâncias químicas que formam uma solução com água. Consistem em sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas e inibidores de corrosão adicionados à água. Apresentam vida maior, pois são menos atacados por bactérias, reduzindo, assim, o número de trocas da máquina. Formam soluções transparentes, resultando em boa visibilidade do processo de corte. Além disso, possuem agentes umectantes que melhoram as propriedades refrigerantes. As soluções são estáveis mesmo em água dura;
- Integrais: são óleos minerais (hidrocarbonetos obtidos no refinamento do petróleo cru) puros ou com aditivos, normalmente de alta pressão. Além do preço elevado, tem perdido espaço para os óleos solúveis em água devido a riscos de incêndio, ineficiência a altas velocidades de corte, baixo poder calorífico, formação de fumos e por oferecerem

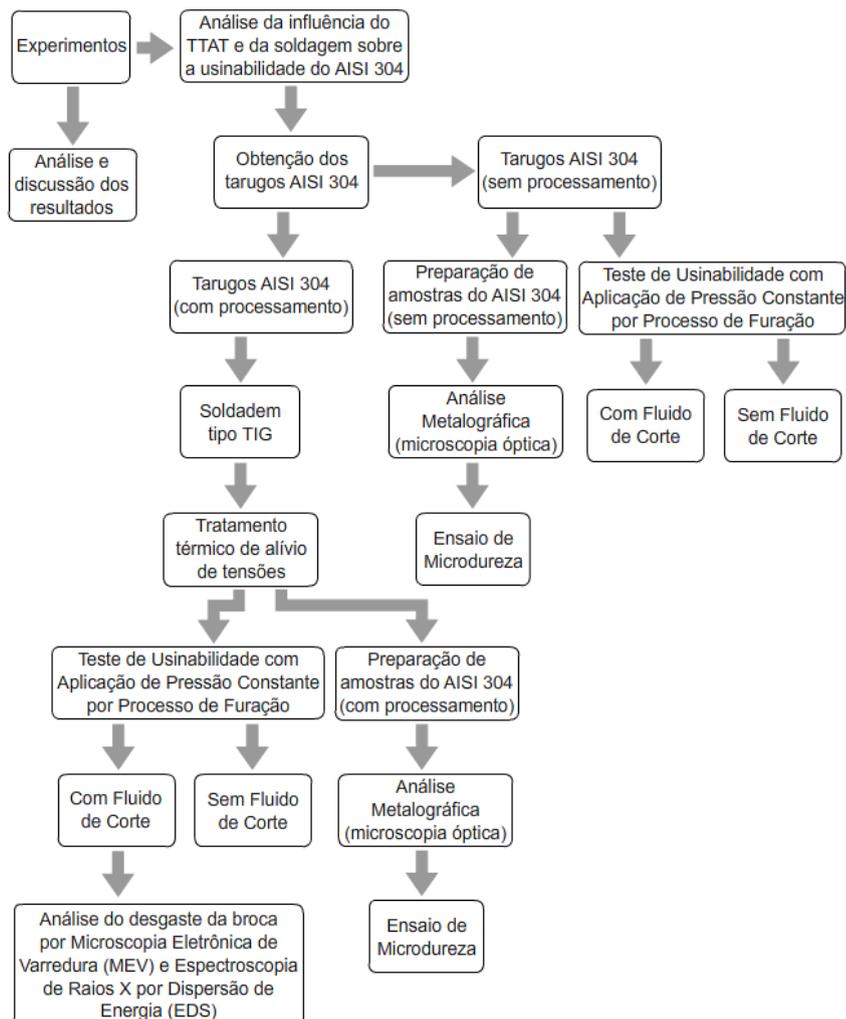
riscos à saúde do operador. Os aditivos são à base de cloro e/ou enxofre, dando características de extrema pressão ao fluido. Fósforos e matérias graxas também são utilizados, atuando como elementos que evitam o desgaste.

4. Metodologia

Primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os temas que envolvem esse estudo como aços inoxidáveis e seus tipos, fenômeno de corrosão intergranular em aços inoxidáveis, tensões residuais internas, tratamento térmico de alívio de tensões, processo de soldagem TIG, usinagem, além de usinabilidade dos materiais. Para a coleta de informações a respeito dos assuntos anteriormente citados, foram pesquisados artigos, livros e apostilas, além de contato direto com profissionais de empresas com significativo *know how* sobre os assuntos abordados.

Para analisar a influência do tratamento térmico de alívio de tensões e da soldagem sobre a usinabilidade do aço inoxidável austenítico, foram feitas várias etapas experimentais para posterior discussão dos resultados, conforme fluxograma (Figura 15) a seguir:

Figura 15 – Fluxograma de metodologia.



Fonte: Autor (2018).

5. Desenvolvimento Prático

5.1 Experimento

Os procedimentos necessários para a realização deste estudo envolveram usinagem (serramento, fresamento e furação), soldagem TIG manual, tratamento térmico de alívio de tensões, ensaio de microdureza Vickers, análise metalográfica por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). Tais procedimentos são explicados detalhadamente a seguir.

5.1.1 Escolha e preparação do metal de base para a soldagem

Para a realização do experimento foram utilizados três tarugos quadrados de aço inoxidável austenítico AISI 304 com 1 1/4" de lado (visto que o ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante exige uma espessura mínima de 25mm) e 150mm de comprimento. Dois deles foram destinados à prática dos procedimentos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões e um em estado como recebido para ser utilizado como referência. Sua composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química em peso do aço inoxidável AISI 304.

AISI	Composição Química (%)							
	C _{máx.}	Mn _{máx.}	P _{máx.}	S _{máx.}	Si _{máx.}	Ni	Cr	Mo _{máx.}
304	0,05	1,46	0,036	0,023	0,46	8,13	18,3	0,49

FONTE – Arinox, 2018.

Com o objetivo de obter tarugos com as dimensões de comprimento desejadas, foi utilizada uma serra de fita horizontal Franho FM500. Os tarugos cortados são mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Tarugos cortados.



Fonte: Autor (2018).

Com o objetivo de submeter o aço inoxidável austenítico AISI 304 aos efeitos do calor da solda e assim gerar uma zona fundida e uma zona termicamente afetada, dois tarugos foram soldados em uma das faces da seção longitudinal de cada tarugo.

5.1.2 Escolha do metal de adição para a soldagem

Os tarugos foram soldados por meio do processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) manual e para tal tipo de aço inoxidável foi especificada, conforme a ESAB (2005, p. 22), a vareta AWS ER308L que é indicada para soldagem dos aços tipo AISI 201, 202, 301, 302, 303, 304, 304L, 305, 308, 308L, bem como aços 1.4300, 1.4301, 1.4312 e 1.4371. Sua composição química apresenta baixo teor de carbono de modo a aumentar sua resistência contra a corrosão intercrystalina por soluções oxidantes até 350°C e a formação de carepa até 800°C. Os cordões de solda formados durante a operação são suaves e sem respingos, isentos de poros, trincas ou fissuras. Além disso, apresentam um acabamento liso, homogêneo e uniforme, possibilitando a realização dos procedimentos de polimento e espelhamento (WANG et al, 2018, p. 47).

Em meio à análise de todos os parâmetros citados anteriormente, a escolha da vareta inoxidável AWS ER308L atendeu todas as exigências. Sua composição química é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química em peso do metal depositado pela vareta AWS ER308L.

AWS	Composição Química (%)							
	C	Cr	Cu	Ni	N	Mo	Mn	Si
ER 308L	0,02	19,80	0,15	9,80	0,05	0,20	1,90	0,40

FONTE – ESAB. 2005, p.22.

Com o objetivo de prever a microestrutura da zona fundida (ZF) com base na sua composição química, o diagrama de Schaeffler foi utilizado e os equivalentes de Cr e Ni foram calculados tanto para o metal de solda (AWS ER308L) quanto para o metal de base (AISI 304). Estes fatores foram determinados pelas equações 10 e 11.

Para o metal de adição:

$$Cr_{eq} = 19,80 + 0,20 + 1,5 \times 0,40 = 20,60\% \quad (8)$$

$$Ni_{eq} = 9,80 + 30 \times 0,02 + 0,5 \times 1,90 + 30 \times 0,05 = 12,85\% \quad (9)$$

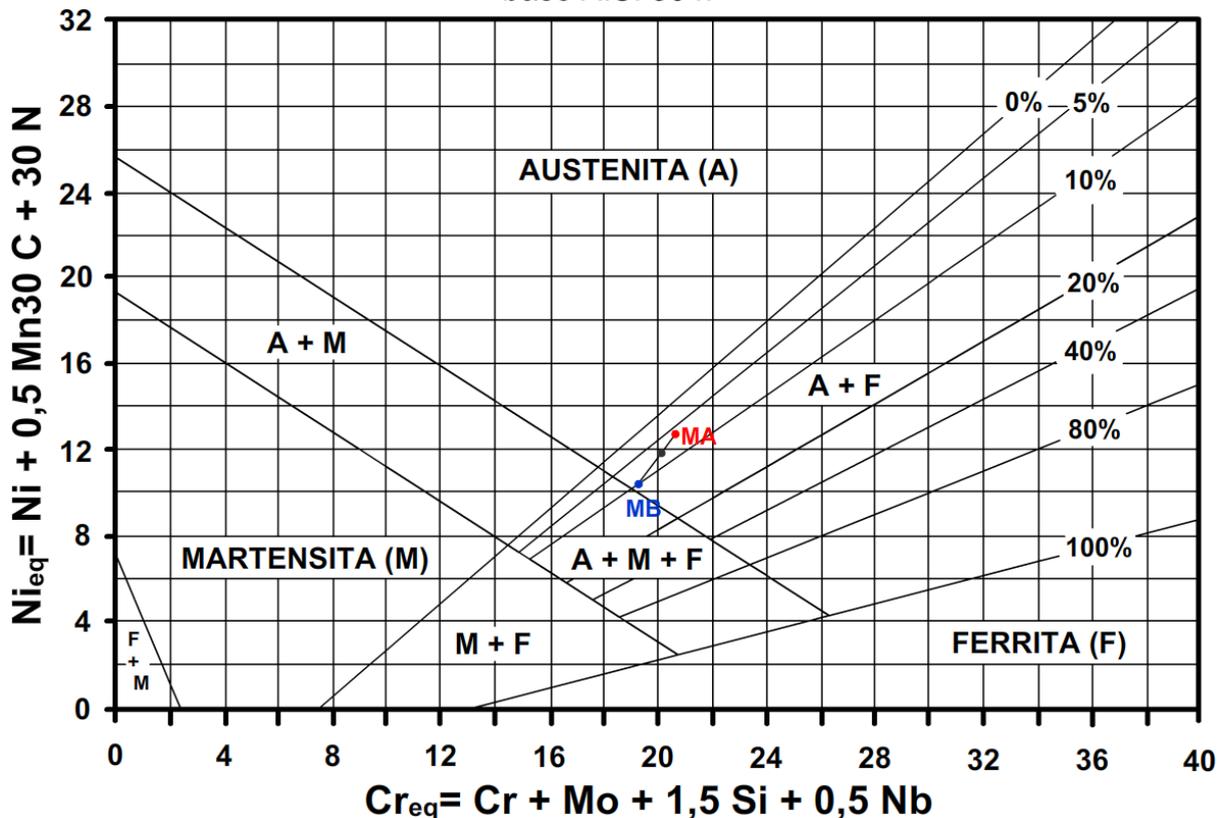
Para o metal de base, foram calculadas as equações 12 e 13:

$$Cr_{eq} = 18,30 + 0,49 + 1,5 \times 0,46 = 19,48\% \quad (10)$$

$$Ni_{eq} = 8,13 + 30 \times 0,05 + 0,5 \times 1,46 = 10,36\% \quad (11)$$

Localizando no diagrama de Schaeffler (Figura 17) as composições químicas relativas ao metal de base e ao eletrodo, foram encontrados dois pontos equivalentes ao metal depositado e metal de base. Assim, foi observado que a zona fundida (considerando uma diluição de 30%, conforme Silva (2016, p. 20)) será formada por austenita e ferrita, com o teor desta última da ordem de 7,5%. Nessa região, a liga está livre de defeitos como formação de trincas a quente, fragilização por formação de fases intermetálicas, por crescimento de grão e por formação de martensita e portanto, a soldagem pôde ser executada sem problemas.

Figura 17 – Diagrama de Schaeffler para metal de adição AWS ER308L e metal base AISI 304.



Fonte: Adaptado de Assumpção et al (2011, p.5918).

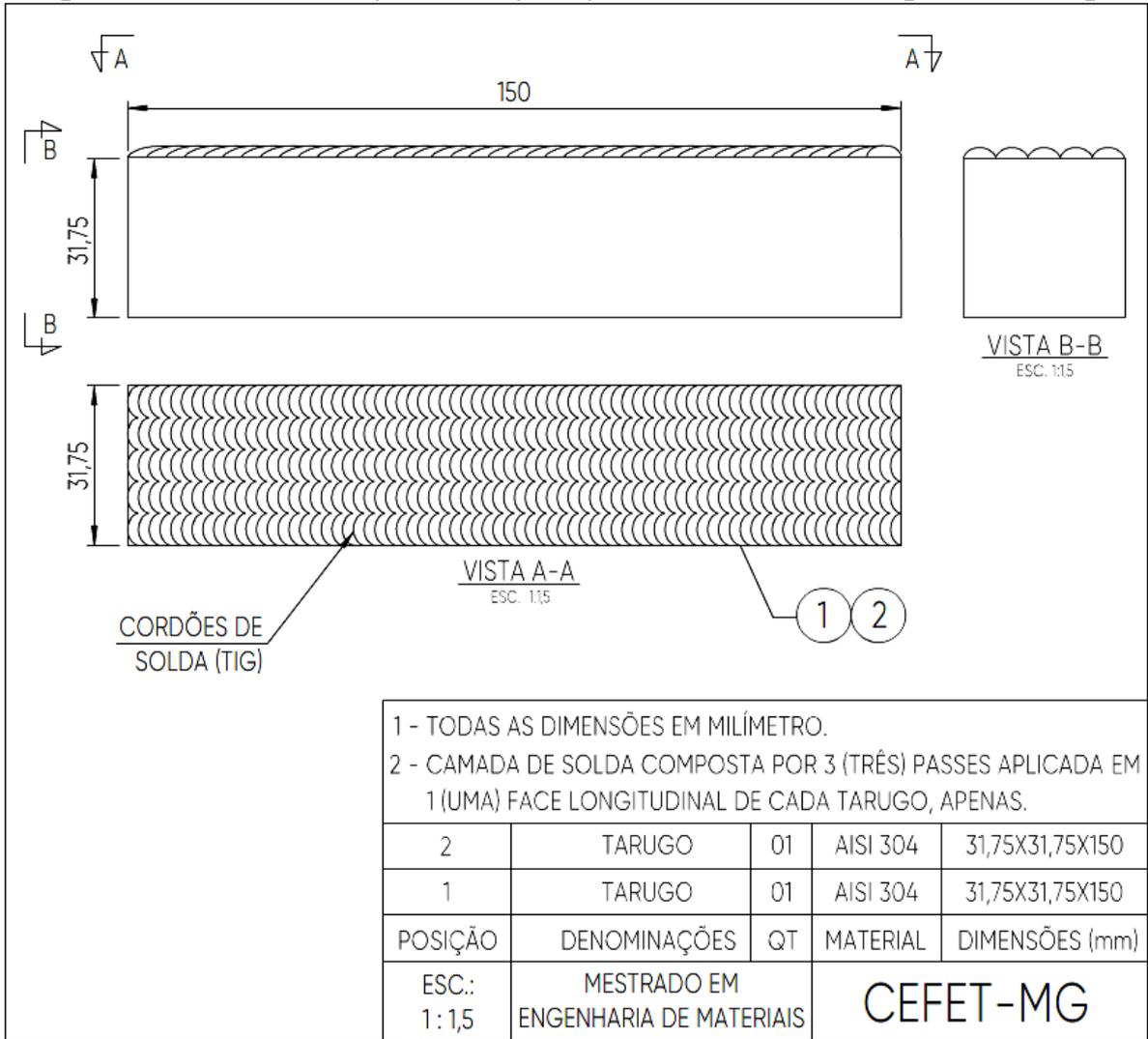
5.1.3 Soldagem TIG

Para a execução do processo de soldagem TIG manual dos tarugos, foi utilizada a máquina de solda Hobart Cyber Wave 300S.

Normalmente, os aços inoxidáveis são soldados com tensões mais baixas do que os aços carbono de mesma espessura. Portanto, a soldagem dos tarugos foi feita conforme especificação mostrada na Figura 18 e seguindo os seguintes parâmetros:

- Corrente contínua (CC-) devido à possibilidade de um melhor ajuste de fontes de energia, além de apresentar melhor desempenho, alta penetração e gerar menos respingos que com corrente alternada (CA);
- Vareta AWS ER308L com diâmetro comercial de 2,4mm;
- Amperagem de 80A, dentro da faixa de corrente especificada para tal tipo de vareta com diâmetro comercial correspondente a 2,4mm (FONSECA, 2004, p. 13).

Figura 18 – Desenho esquemático para procedimento de soldagem dos tarugos.



Fonte: Autor (2018).

Figura 19 – Tarugos soldados.



Fonte: Autor (2018).

Os tarugos soldados (mostrados na Figura 19) foram submetidos à aplicação de gel decapante/passivante na área soldada para limpeza e proteção da superfície dos cordões de solda.

5.1.4 Tratamento térmico de alívio de tensões

Com o objetivo de especificar tais parâmetros de modo correto e evitar uma possível sensitização do aço inoxidável durante o processo, a empresa Aperam South America foi consultada e definiram-se com o auxílio da literatura de Chiaverini (2005, p. 413), tais procedimentos.

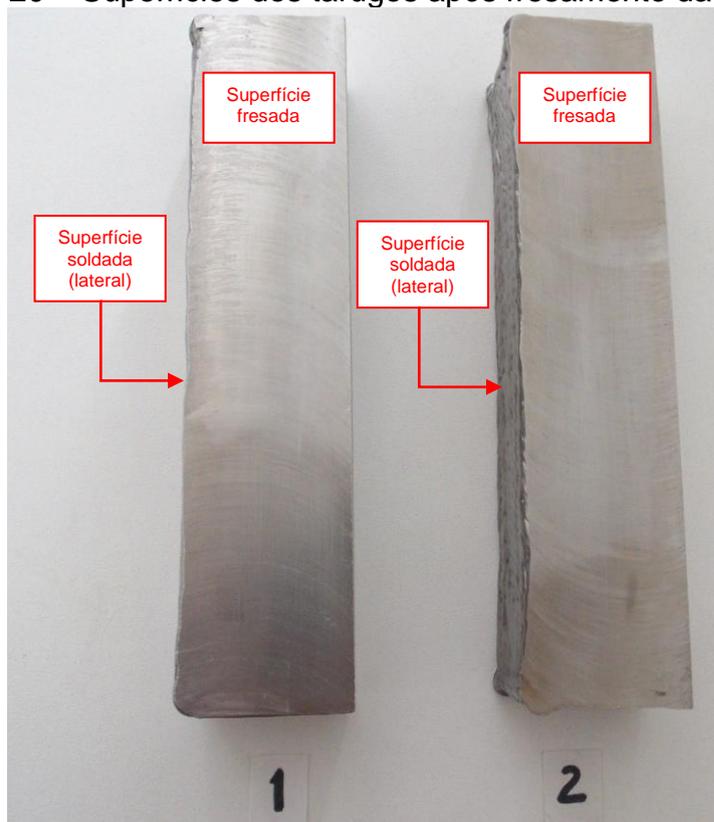
Logo, os tarugos soldados foram submetidos ao tratamento térmico parcial de alívio de tensões em patamar de temperatura determinado abaixo da faixa crítica referente aos aços inoxidáveis austeníticos (temperaturas entre 400 e 900°C), cujo valor foi de 350°C. Assim, ambos os tarugos soldados foram submetidos ao aquecimento à temperatura de 350°C durante o intervalo de tempo de 30 minutos, seguido de resfriamento em água. O forno Brasimet KRI70 foi utilizado para o tratamento térmico.

5.1.5 Fresamento das faces dos tarugos para ensaio de usinabilidade por furação

Para a preparação das superfícies a serem submetidas ao ensaio de usinabilidade, foi utilizada uma fresadora Diplomat 3001 para o faceamento de superfícies opostas de cada um dos tarugos processados com o objetivo de garantir o paralelismo entre estas, de modo que a broca perfure o material exatamente a 90° em relação à superfície.

Este procedimento contribuiu para a confiabilidade do ensaio de usinabilidade. O resultado da operação de fresamento é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Superfícies dos tarugos após fresamento das faces.



Fonte: Autor (2018).

As superfícies escolhidas para o faceamento correspondem àquelas que não foram submetidas diretamente ao processo de soldagem TIG, para que se preservassem os cordões de solda e, principalmente, para que o ensaio de usinabilidade fosse realizado nas regiões próximas à zona termicamente afetada e de metal base. Logo, a superfície lateral à superfície soldada foi escolhida.

5.1.6 Ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante

5.1.6.1 Equipamento

O equipamento (Figura 21) utilizado para o ensaio foi uma furadeira de coluna do fabricante Manrod Quality Machines, adaptada a um mecanismo contendo um eixo, um volante e uma coroa ligados ao eixo do mandril da furadeira. Um corpo com massa de 11,8kg garante a realização dos testes com pressão constante por meio de um cabo de aço direcionado e ligado ao volante. Um cilindro alimentado por ar comprimido foi incorporado ao mecanismo, que por meio de uma corrente, tem ação direta na suspensão do peso.

Figura 21 – Furadeira de coluna Manrod Quality Machines adaptada para ensaio de usinabilidade.

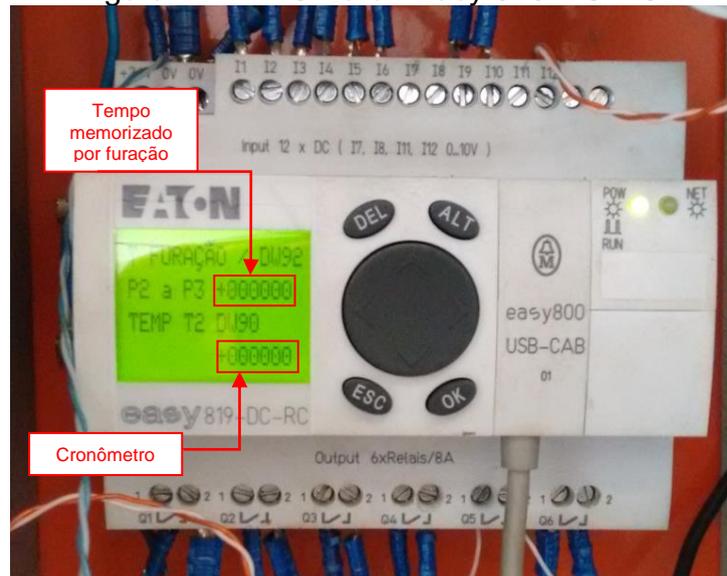


Fonte: Autor (2018).

Também faz parte da montagem, um inversor de frequência instalado no equipamento visando o controle da velocidade de rotação da broca. Assim, foi estabelecida a velocidade de rotação mínima do equipamento de 762rpm (para garantir a integridade da ferramenta) por meio de um tacômetro do fabricante Mimipa MTD-2238A.

Foi adaptado à furadeira de coluna um *Programmable Logic Controller* (PLC) ou Controlador Lógico Programável (CLP) Eaton Easy 819-DC-RC, situado na parte interna do painel de controle, com o objetivo de controlar, medir e memorizar os parâmetros referentes ao ensaio de furação sob pressão constante, como tempo e percurso. Na Figura 22 é mostrado tal componente da montagem.

Figura 22 – PLC Eaton Easy 819-DC-RC.



Fonte: Autor (2018).

O equipamento possui, também, um sistema de deposição de fluido de corte por bombeamento (bomba centrífuga com escorva semi-submersa) fixado próximo ao mandril da furadeira (mostrado na Figura 23), de forma que ao acionar a máquina, o mecanismo é acionado e garante que haja fluido com vazão constante durante o processo de furação.

Figura 23 – Sistema de deposição de fluido de corte por bombeamento.



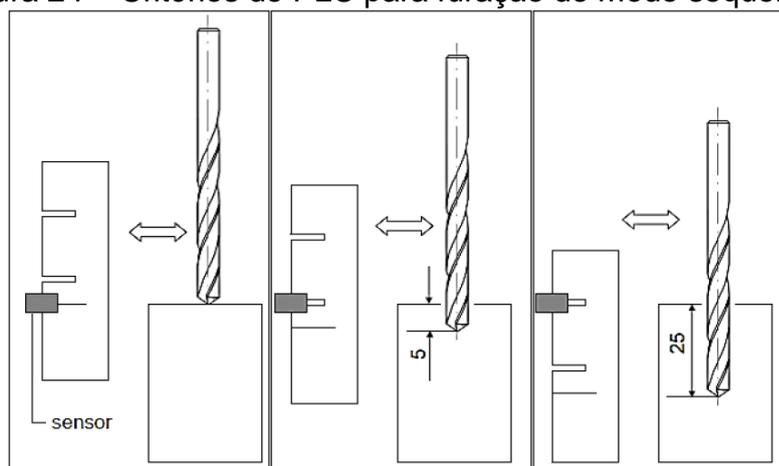
Fonte: Autor (2018).

5.1.6.2 Princípio de funcionamento do equipamento

Para a avaliação da usinabilidade, o parâmetro mensurado corresponde ao intervalo de tempo que a ferramenta gasta para realizar um percurso pré-estabelecido. Visando tal medida, o PLC acoplado ao equipamento desempenha importantes funções para o controle da operação e obtenção dos resultados, de modo que todo o funcionamento do equipamento é direcionado para a informação dos tempos por furação memorizados.

O peso, que tem por objetivo promover uma força constante durante o ensaio de furação, é fixado a um cabo de aço, de um lado, e à polia de acionamento da máquina, de outro. Portanto, ao acionar a máquina, ela estará apenas sob influência de tal peso, até o fim do percurso da broca que corresponde a 25mm (percurso padronizado e configurado na memória do PLC). O PLC permite que a broca perfure 5mm iniciais para eliminar erros decorrentes de deformações, irregularidades e/ou óxidos que possam conter na superfície do corpo de prova, e em seguida o cronômetro do PLC começa a marcar o tempo em milésimos de segundo. O cronômetro pausa tão logo a broca perfure mais 20mm e grava o tempo gasto referente ao percurso dos últimos 20mm na memória do PLC (OLIVEIRA, 2015, p. 32). Na Figura 24 é ilustrado o princípio de funcionamento.

Figura 24 – Critérios de PLC para furação de modo sequencial.



Fonte: Autor (2018).

Quando a broca chega ao fim do percurso, o PLC envia um comando para o cilindro pneumático acoplado no mesmo eixo da polia de acionamento por uma coroa (através de uma corrente). Durante o processo de furação, o cilindro não tem influência sobre a força de corte, pois o PLC manda um comando, de forma que não

haja ação pneumática em nenhum sentido, tanto no avanço quanto na retração. Somente após a broca furar 25mm, o cilindro recebe um comando do PLC, o qual é responsável pela suspensão do peso e, conseqüentemente, o recuo da broca em relação ao corpo de prova. Concomitantemente, o PLC gera o tempo medido para tal furação e o informa em seu *display*.

5.1.6.3 Procedimentos para o ensaio de usinabilidade

O ensaio de usinabilidade por pressão constante envolvendo o processo de furação foi aplicado executando-se 10 furos por broca de aço rápido Dormer A108 revestida de óxido azul pelo processo CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e com diâmetro nominal de 8mm (Figura 25). Foram utilizadas 6 brocas para cada condição de ensaio.

A deposição química a vapor proporciona uma superfície de elevada aderência de óxido azul que retém o fluido de corte e evita a adesão de cavacos à ferramenta, evitando a formação de aresta postiça de corte.

O ângulo de ponta da broca de 135° combinada com afiação cruzada tipo *split point* confere as vantagens de autocentragem da broca no início do furo, rápida dispersão do calor gerado pelo processo (aumentando a eficácia do fluido de corte) e menor geração de rebarbas na saída do furo. Assim, esta geometria da ponta proporciona um eficiente corte no aço inoxidável.

Figura 25 – Brocas utilizadas no teste de usinabilidade.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 3 apresenta a composição química do aço rápido HSS (*High Speed Steel*) e seu revestimento em óxido azul.

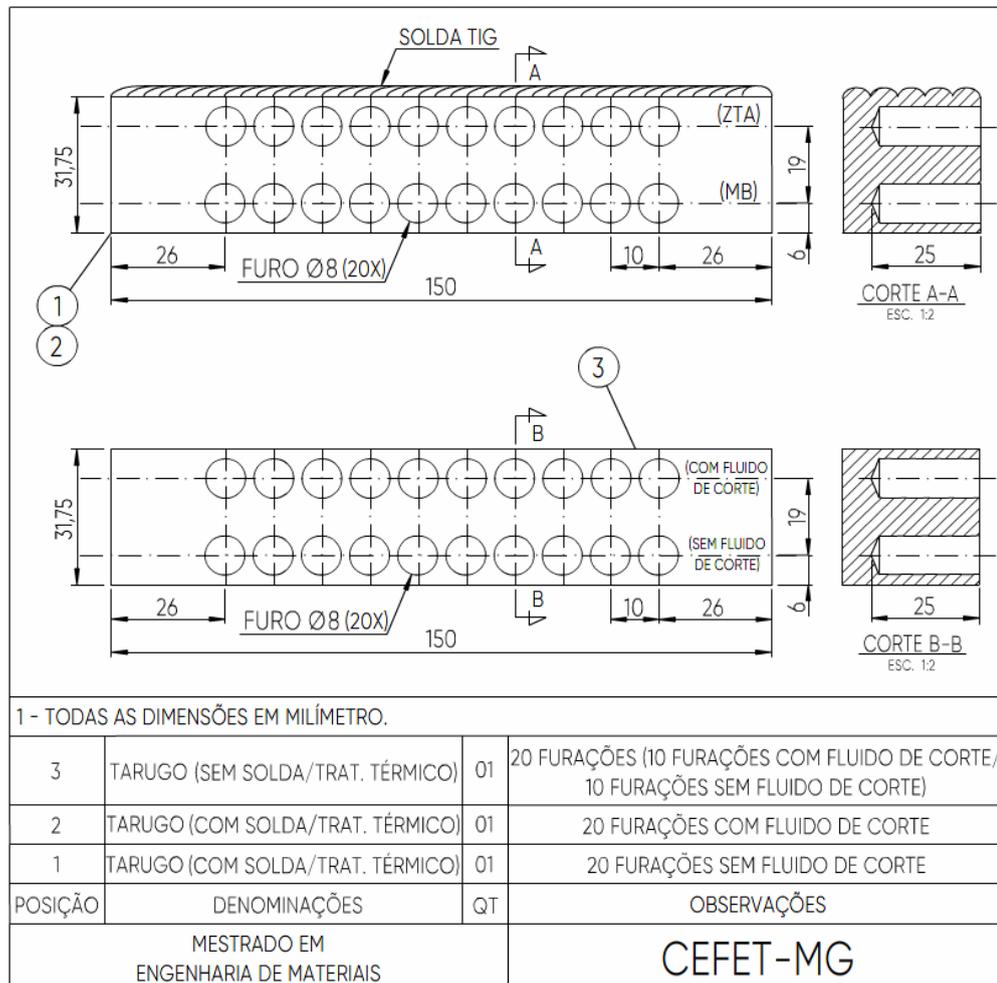
Tabela 3 – Composição química da broca Dormer A108.

Composição Química (%)					
Revestimento	Aço Rápido HSS				
Óxido Azul	C	W	Mo	Cr	V
	0,9	6,4	5,0	4,2	1,8

FONTE – Dormer. 2015, p.10.

Os furos foram distribuídos no tarugo com o objetivo de se proporcionar um maior aproveitamento da sua área útil. O diâmetro dos furos foi de 8mm e a distância entre eles foi de 10mm, medida de centro a centro dos furos. Esta distância utilizada garante a não interferência desta operação de usinagem sobre os furos vizinhos com relação às propriedades microestruturais do material, visto que a furação poderia gerar elevadas taxas de encruamento localizado na região periférica ao furo (SIMÕES et al, 2010, p. 51). O desenho esquemático para a realização dos ensaios é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Desenho esquemático com especificação dos procedimentos para o ensaio de usinabilidade.



Fonte: Autor (2018).

O fluido de corte especificado para o ensaio foi o semi-sintético à base de água com diluição de 10%, conforme orientação do fabricante (Figura 27). Sua composição contém anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos e alcanolomidas, de modo que sua aplicação pode ser indicada para todas as máquinas operatrizes que trabalham com fluidos recirculantes à base de água e para todos os tipos de metais (FRAGOSO et al, 2016, p. 760).

Figura 27 – Fluido de corte semi-sintético utilizado no ensaio de usinabilidade.



Fonte: Autor (2018).

Como o objetivo do estudo foi avaliar os efeitos da soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões sobre a usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 304, foram realizados ensaios de furação a seco e com fluido de corte em um tarugo do material como recebido, ensaios de furação a seco em um tarugo do material submetido aos processos de soldagem e TTAT e ensaios de furação com fluido de corte em um tarugo do material submetido aos processos de soldagem e TTAT.

Na Tabela 4 são apresentadas de modo detalhado as etapas do ensaio de furação por pressão constante para a avaliação da usinabilidade. É importante ressaltar que todas as etapas do ensaio não envolvendo a aplicação de fluido de corte foram executadas antes da realização das etapas envolvendo a aplicação de fluido de corte para evitar a contaminação dos materiais pelo líquido, fato que poderia alterar os resultados durante o ensaio.

Tabela 4 – Procedimentos para operação do ensaio de usinabilidade.

Etapa	Broca	Tarugo	Processamento	Número de furações	Condição de ensaio	Região do Tarugo
1	1	1	Não aplicável (como recebido)	10	A seco	Metal de base
2	2			10	Com fluido de corte	Metal de base
3	3	2	Soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões	10	A seco	Metal de base
4	4			10	A seco	ZTA
5	5	3	Soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões	10	Com fluido de corte	Metal de base
6	6			10	Com fluido de corte	ZTA

Fonte: Autor (2018).

Para execução do ensaio, definiram-se os parâmetros de usinagem e a ferramenta, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros técnicos para operação do ensaio de usinabilidade.

Parâmetros	Valores/descrição
Rotação da broca	762rpm
Avanço de corte	0,16mm/rot
Velocidade de corte	20m/min
Fluido de corte (quando aplicável)	Semi-sintético (à base d'água com diluição de 10%)
Broca	Dormer A108 Ø8mm (6 unidades)

Fonte: Autor (2018).

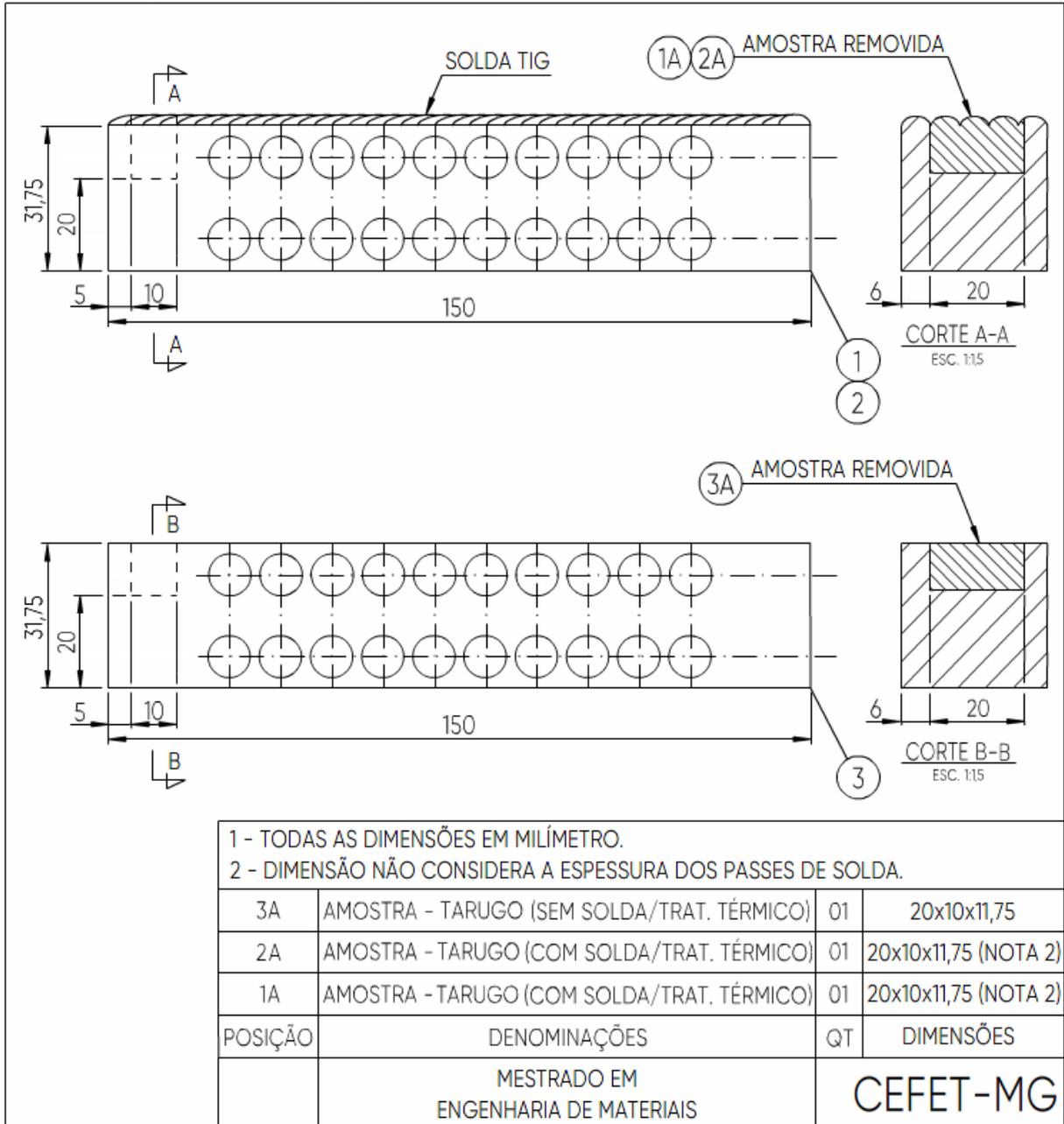
5.1.7 Metalografia

De acordo com Cunha e Coelho (2014, p. 22), a metalografia corresponde ao estudo da morfologia e estrutura dos metais. Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal por meio da análise microestrutural realizada com técnicas de microscopia óptica. A preparação metalográfica obteve dificuldades durante a realização dos ataques químicos devido à intensa ação corrosiva dos reagentes para a revelação das microestruturas, de modo que foram especificadas aplicações de diferentes reagentes para garantia de obtenção das imagens por microscopia óptica.

As etapas para a metalografia estão mencionadas a seguir:

- Corte de uma seção escolhida para análise de cada um dos três tarugos. Nessa etapa foi utilizada uma serra de fita horizontal Manrod MR 122 com aplicação de água como fluido de corte. O croqui para o projeto do corte é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Croqui para o corte das amostras a serem embutidas.



Fonte: Autor (2018).

- Embutimento metalográfico. O processo de embutimento metalográfico para este estudo foi o de embutimento a quente no qual foi utilizada a

resina sintética baquelite granulada na cor preta, obtendo amostras embutidas para conseguir um resultado satisfatório na preparação metalográfica;

- Desbaste por uma sequência de lixamento. Foram utilizadas lixas do tipo "lixa d'água", fixadas na lixadeira metalográfica manual Teclago LM04. Iniciou-se o lixamento com a lixa de 40 mesh, seguida pelas lixas 80, 150, 320, 400 e 600 mesh, respectivamente;
- Polimento superficial por uma sequência de polimento. A etapa do polimento foi executada com panos especiais, colados a pratos giratórios na politriz lixadeira metalográfica Teclago PL02ED com pequenas quantidades de abrasivos depositadas (pasta de alumina $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$);
- Ataque controlado da superfície para revelação de grãos austeníticos, fase delta, fase sigma, carbonetos e martensita, além de contorno dos grãos. O primeiro ataque foi feito por aplicação do reagente Água Régia (COLPAERT, 2008, p. 530) nas amostras por imersão inicial por 1 segundo, remoção da imersão por 1 segundo e imersão por mais 1 segundo, sendo, em seguida, removidas da imersão em definitivo e limpas com água e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), seguido de secagem forçada a quente; o segundo ataque por aplicação do reagente Vilella (CINTHO; VUROBI JÚNIOR, 2006, p. 1) nas amostras por imersão de 40 a 60 segundos, sendo, em seguida, removidas da imersão em definitivo e limpas com água e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), seguido de secagem forçada a quente; e o terceiro por ataque eletrolítico a 2V com Ácido Oxálico 10% (GONÇALVES et al, 2017, p. 3) nas amostras por imersão durante 60 segundos, sendo, em seguida, removidas da imersão em definitivo e limpas com água e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), seguido de secagem forçada a quente. Assim, foram reveladas suas microestruturas e a possível ocorrência de precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão que podem ocorrer durante os processos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões, fenômeno não desejável para este presente estudo. A composição química do reagente Água Régia foi de 210ml de ácido clorídrico (HCl) e 70ml de ácido nítrico (HNO_3), totalizando uma solução com 280ml. Já

a composição química do reagente Vilella foi de 0,5ml de ácido pícrico ($C_6H_3N_3O_7$), 2,5ml de ácido clorídrico (HCl) e 50ml de álcool etílico (C_2H_5OH), totalizando uma solução com 53ml. E por fim, a composição química do reagente Ácido Oxálico foi de 20ml do mesmo para 20 de água (H_2O), totalizando uma solução de 200ml. Assim, as melhores imagens captadas pelo microscópio óptico (após o ataque químico de cada reagente) foram avaliadas e escolhidas;

- Manuseio e armazenamento adequados para preservação da amostra preparada.

O equipamento utilizado para a visualização das estruturas microscópicas analisadas foi o microscópio óptico Bel Photonics MTM-17T que corresponde a uma ferramenta usada para ampliar e regular, com uma série de lentes multicoloridas e ultravioleta, capazes de enxergar através da luz, estruturas pequenas e grandes, impossíveis de serem visualizadas a olho nu. As imagens foram captadas pelo computador por meio do *software* ToupView 3.7.

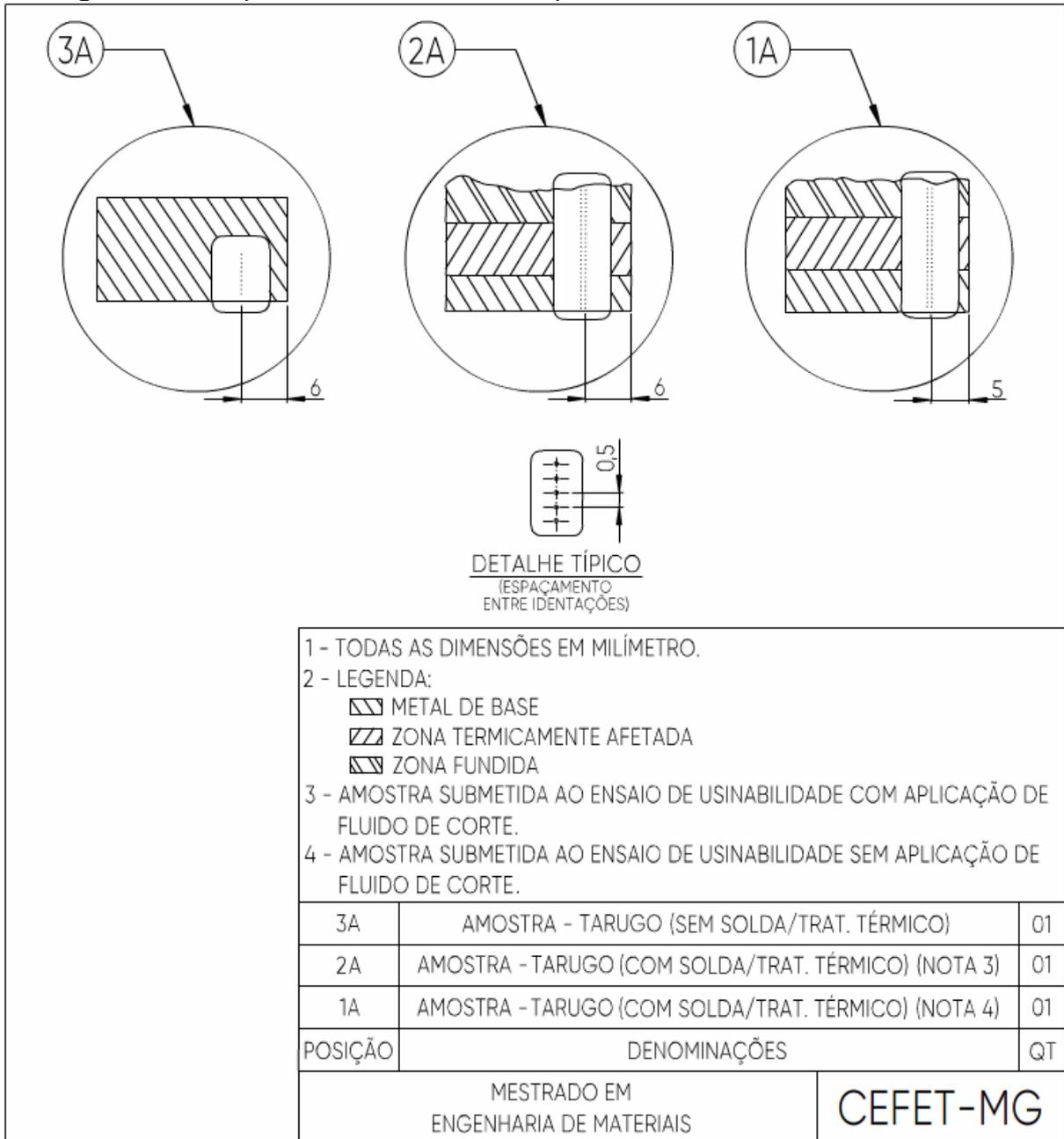
5.1.8 Ensaio de microdureza Vickers

Conforme Alves et al (2014, p. 2), o método de microdureza Vickers é um processo de medição direta, apresentando grande utilização em pesquisas acadêmicas e na indústria. Este é um método simples e que não exige habilidades especiais do operador, visto ser automatizado. Sua unidade é HV, que corresponde a kg/mm^2 e é feito em uma escala microscópica, proporcionando uma precisão mais alta, deixando pequenas impressões e permitindo o uso deste ensaio em vários materiais como ligas metálicas, cerâmicos e compósitos. Portanto, este método foi escolhido e utilizou-se como penetrador, uma pirâmide de diamante Vickers com ângulo de diedro de 136° .

Antes da execução do ensaio de microdureza, foi feito, com o auxílio do microscópio óptico, um mapeamento (conforme Figura 29) de cada uma das três amostras para a obtenção do perfil de microdureza envolvendo as regiões de metal de base, zonas termicamente afetadas e zonas fundidas. Logo, a extensão das duas amostras de AISI 304 processado envolvendo as regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) permitiram 28 medições duplicadas (48 medições no total para cada amostra) e na amostra de AISI 304 como recebido,

foram feitas 10 medidas, quantidade considerada suficiente para a confiabilidade dos resultados visto se tratar de uma mesma microestrutura ao longo de toda a amostra.

Figura 29 – Mapeamento das amostras para ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: Autor (2018).

Após a realização do mapeamento das amostras para a realização do ensaio, as etapas necessárias efetuadas para o procedimento de medição de microdureza por meio do microdurômetro Shimadzu HMV-2T-E foram:

- Aproximar a superfície do corpo de prova do penetrador;
- Submeter o corpo de prova a uma pré-carga (carga menor);

- Aplicar a carga de 245,2 mN;
- Retirar a carga maior e fazer a leitura do valor indicado no *software* do fabricante do microdurômetro no computador conectado ao equipamento.

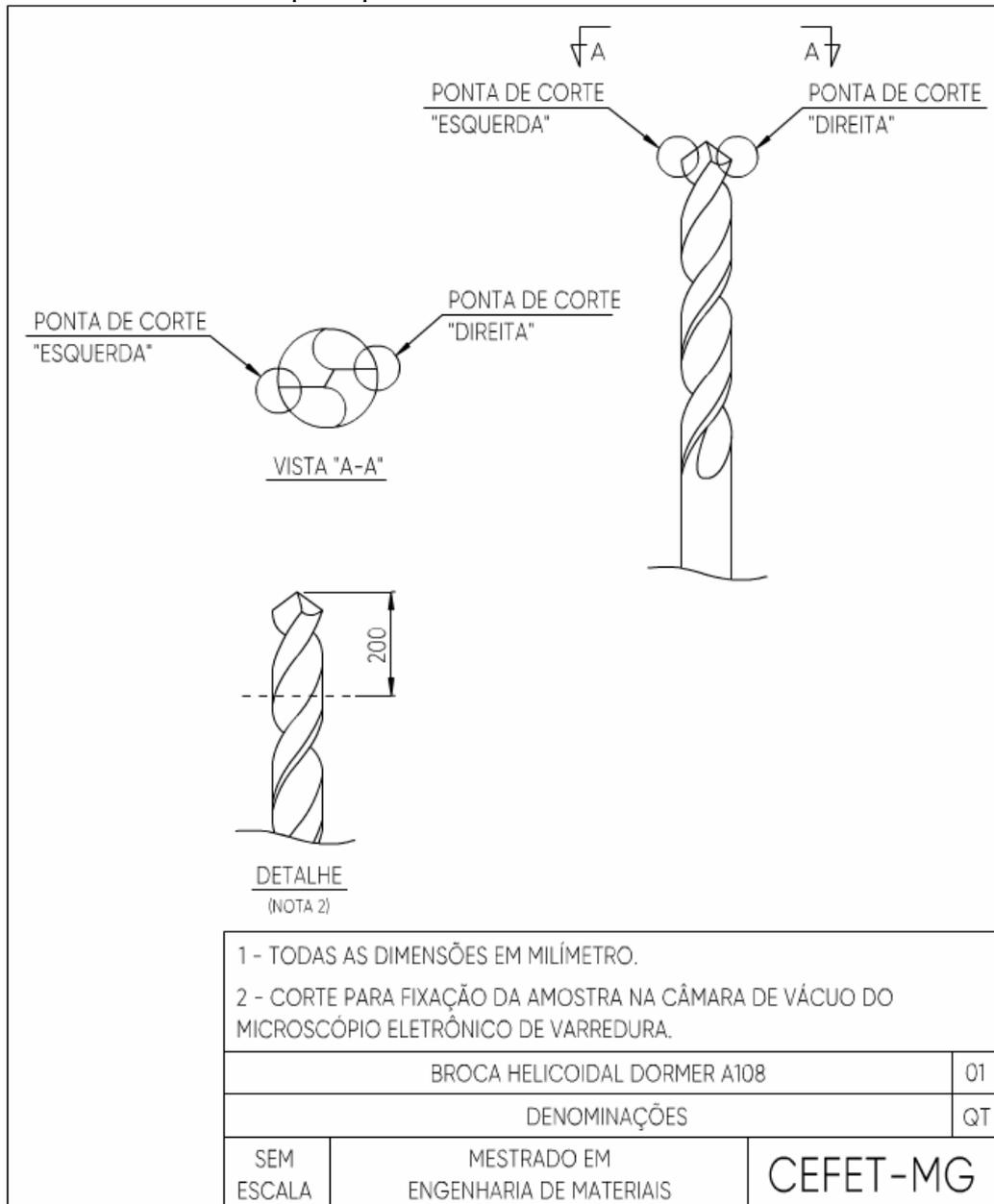
5.1.9 Análise do desgaste nas pontas de corte da broca utilizada no ensaio de usinabilidade

Durante o ensaio de usinabilidade do AISI 304 como recebido e com o uso de fluido de corte houve o desgaste das pontas de corte da broca na 9ª furação. Como se trata de uma ferramenta própria para usinagem de aços inoxidáveis devido ao seu revestimento de óxido azul que age retendo o fluido de corte e evita a solda de cavacos à ferramenta, assim eliminando a formação de arestas postiças, foi realizada uma análise do desgaste nas pontas de corte da broca por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). O equipamento utilizado para estas análises foi o microscópio da fabricante JEOL modelo JSM-IT300LV.

Primeiramente, foi realizado um mapeamento simplificado da ponta da broca para identificação das pontas de corte desgastadas conforme mostrado no desenho esquemático da Figura 45. Assim, foram identificadas que as duas pontas de corte laterais da broca sofreram dano, o que resultou no fim de vida útil da ferramenta.

Posteriormente, a ferramenta foi submetida à operação de corte (conforme orientação no desenho esquemático da Figura 30) por uma serra de fita para a remoção da ponta, objetivando-se uma geometria favorável da amostra para a sua fixação no interior da câmara de vácuo.

Figura 30 – Mapeamento da broca desgastada e identificação das duas pontas de corte para procedimentos de MEV e EDS.



Fonte: Autor (2018).

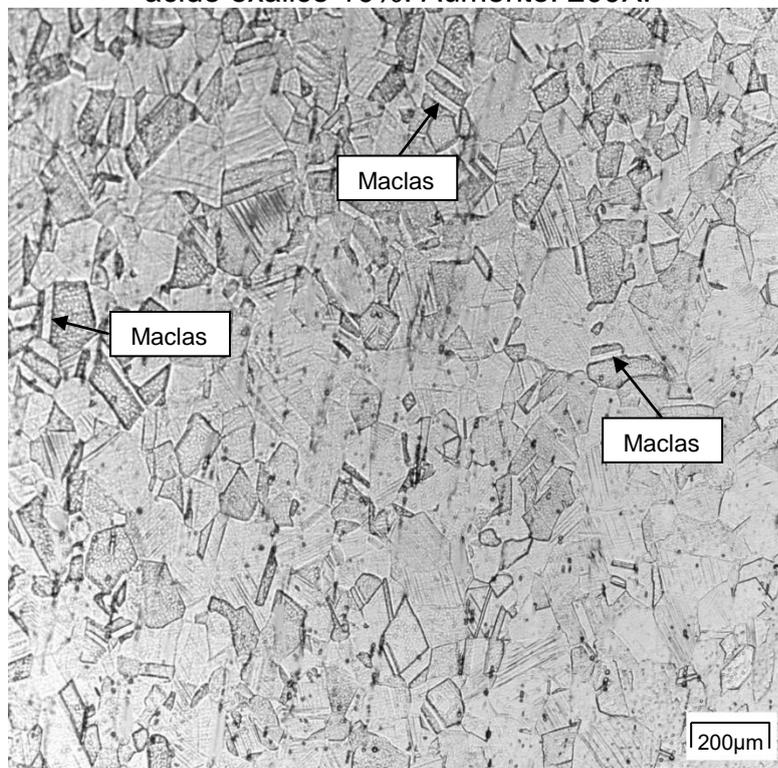
6. Resultados e Discussões

6.1 Análise metalográfica

Por meio da análise metalográfica das três amostras, foram obtidas imagens da microestrutura do material nas regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).

Na Figura 31, referente à amostra do aço inoxidável AISI 304 como recebido, foi observada uma microestrutura com a presença de grãos austeníticos maclados, estrutura típica deste material (REZENDE et al, 2015, p. 57).

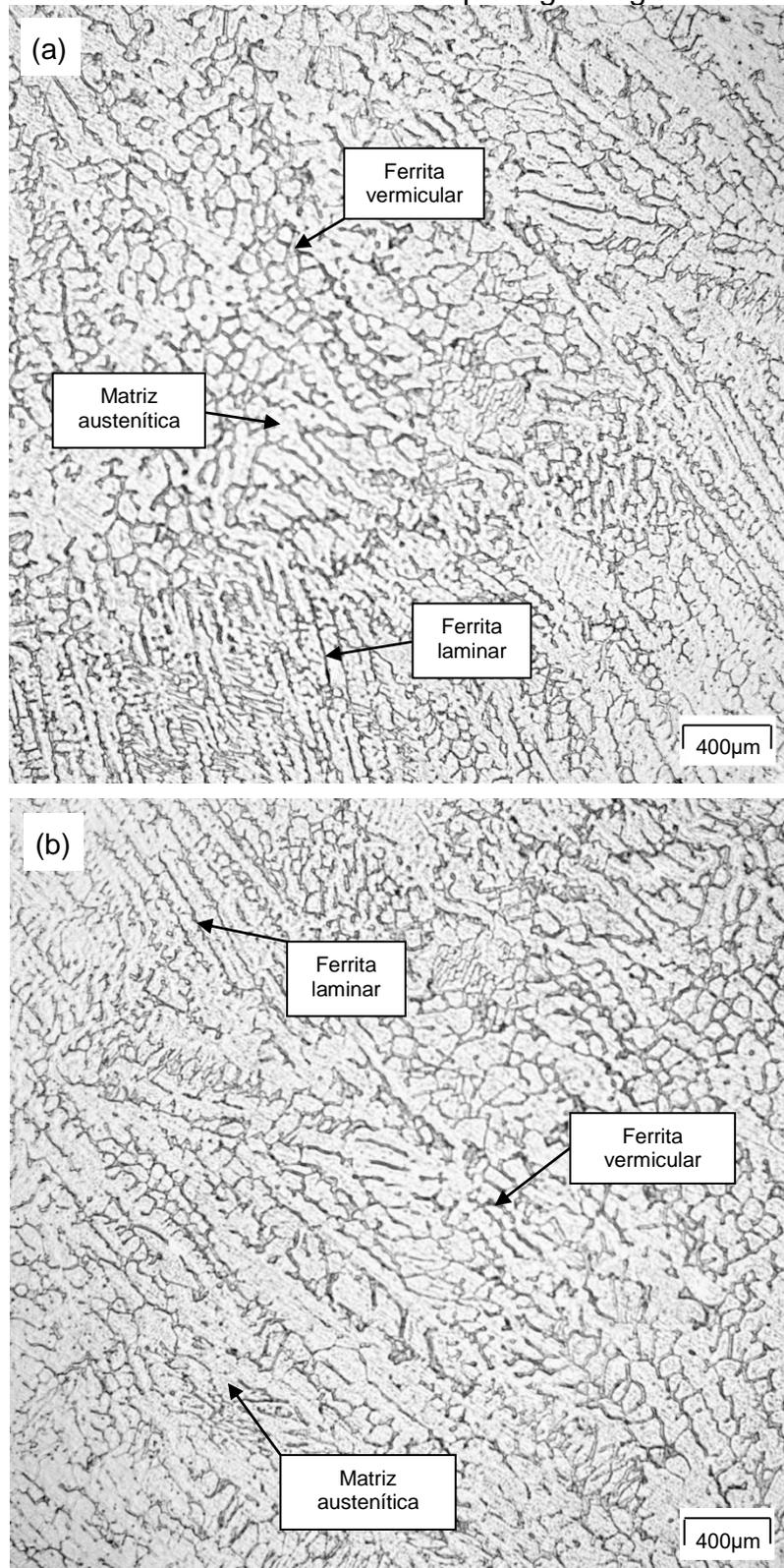
Figura 31 – Micrografia óptica do aço inoxidável AISI 304 como recebido. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 32 é mostrada a zona fundida das duas amostras do aço inoxidável AISI 304 processadas e foi observada uma microestrutura caracterizada pela presença de uma matriz austenítica (fase de coloração mais clara) com a ferrita em morfologia vermicular e laminar (fase de coloração mais escura). Tal resultado provém da solidificação da ferrita primária com formação de austenita nas etapas finais desta solidificação e já no estado sólido. Além disso, a ferrita remanescente é localizada ao longo do centro das dendritas formadas (ÁVILA et al, 2013, p. 4).

Figura 32 – Micrografia óptica da zona fundida do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: água régia. Aumento: 400X.

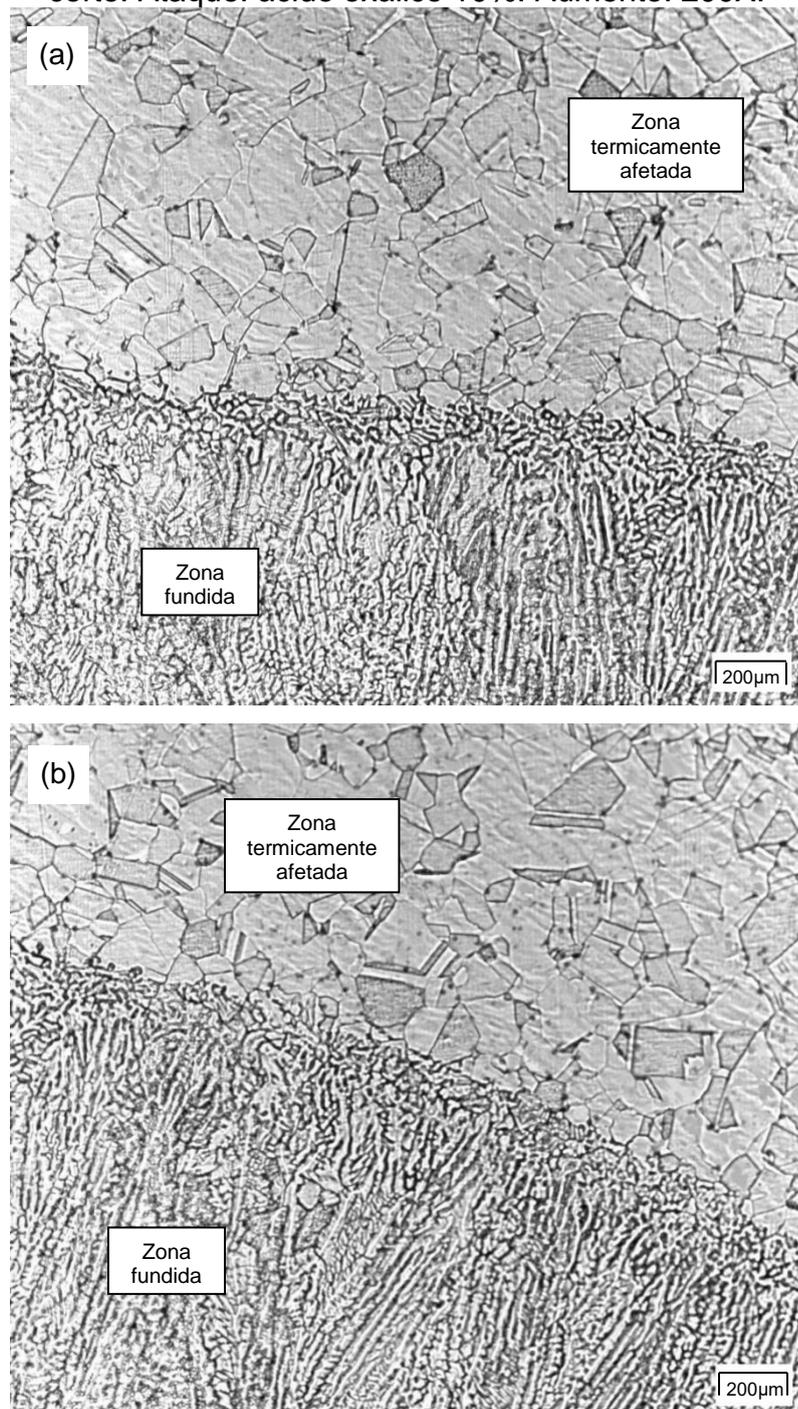


Fonte: Autor (2018).

Na Figura 33, referente à amostra do aço inoxidável AISI 304 processado, foi

observada a microestrutura da região de transição da zona fundida para a região de grãos grosseiros da zona termicamente afetada, compreendida como a região do tarugo de AISI 304 mais próxima da solda, que foi submetida a temperaturas próximas da temperatura de fusão.

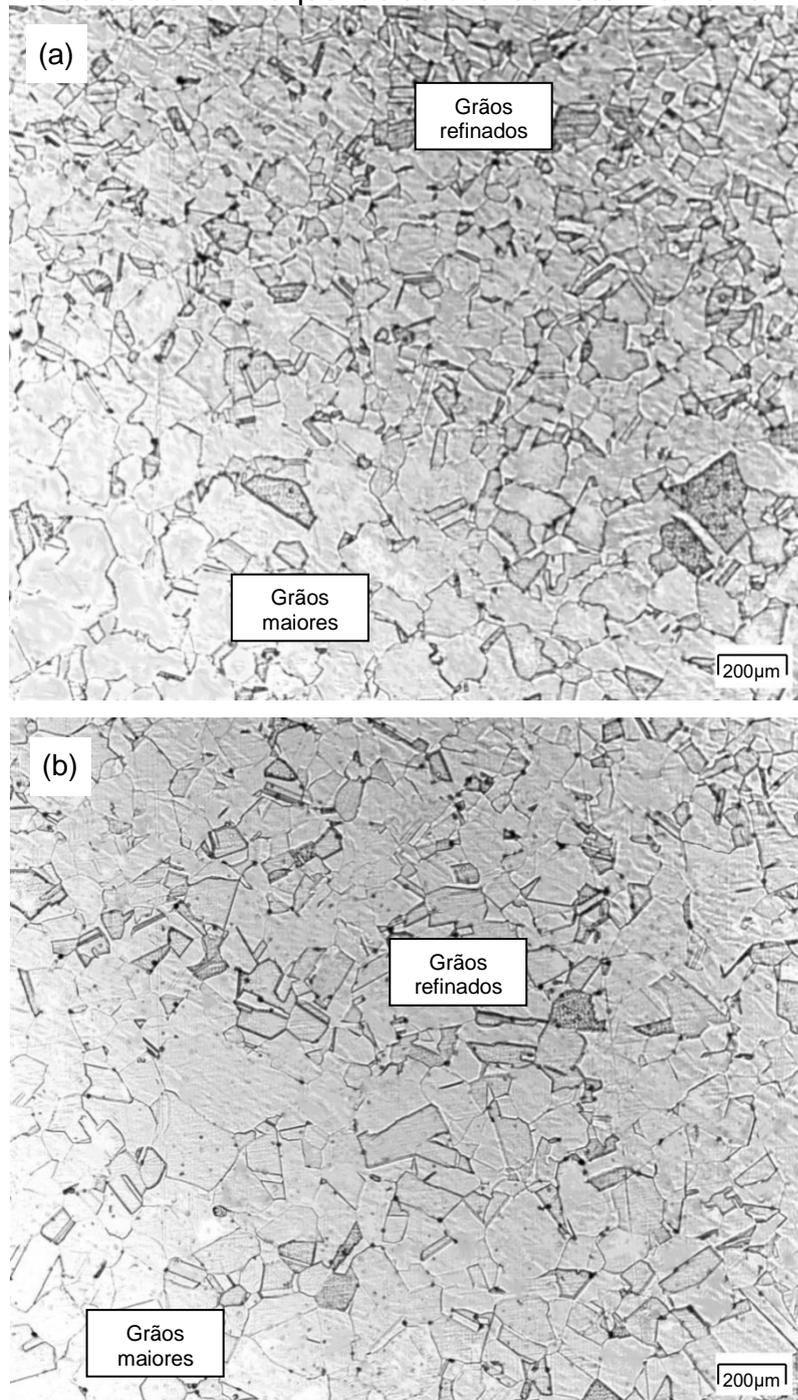
Figura 33 – Micrografia óptica da região de transição da zona fundida para a zona termicamente afetada do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.



Fonte: Autor (2018).

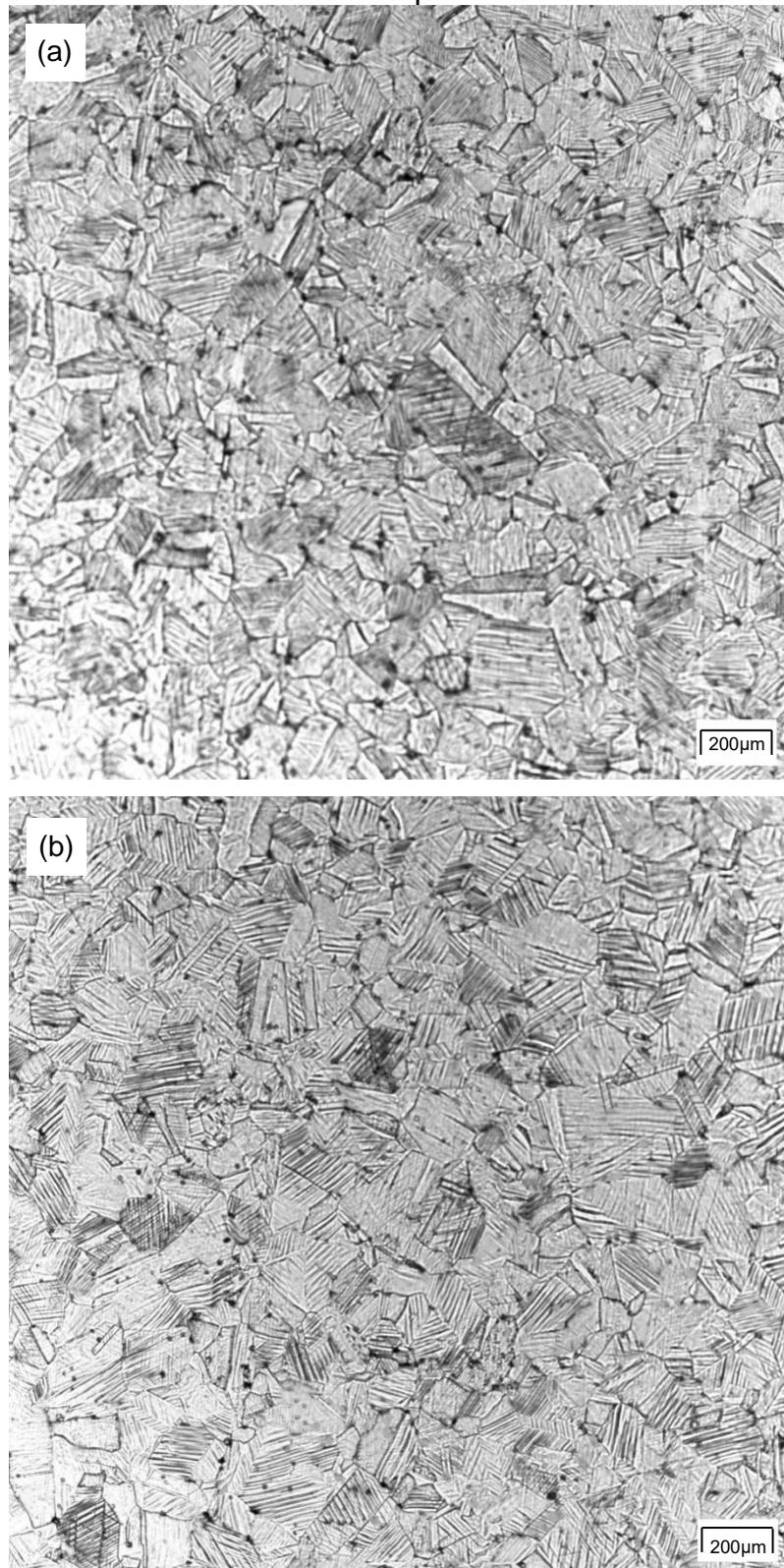
Observou-se por inspeção visual das imagens anteriores que a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grão, de modo que tal crescimento depende de fatores como o tipo de material e a energia de soldagem (ALBUQUERQUE et al, 2013, p. 141).

Figura 34 – Micrografia óptica da zona termicamente afetada na região de transição dos grãos grosseiros para os finos do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico 10%. Aumento: 200X.



Fonte: Autor (2018).

Figura 35 – Micrografia óptica da região de metal base do aço inoxidável AISI 304 processado. (a) Aplicado ao ensaio de usinabilidade a seco e (b) Aplicado ao ensaio de usinabilidade com fluido de corte. Ataque: ácido oxálico 10% Aumento: 200X.



Fonte: Autor (2018).

Também foi observado por inspeção visual das imagens, conforme Figura 34,

que estes grãos grosseiros passam a se tornar grãos finos conforme a região analisada se afastava da zona fundida, formando uma região de refino. Esta zona de refino do grão é submetida a temperaturas que variam entre o intervalo de 900 e 1100°C e o crescimento do grão austenítico é relativamente lento, além do fato de elementos de liga se tornarem elementos de ancoragem e impedirem o movimento do contorno de grão austenítico, se obtendo tamanho de grão pequeno (SOEIRO JÚNIOR et al, 2013, p. 179).

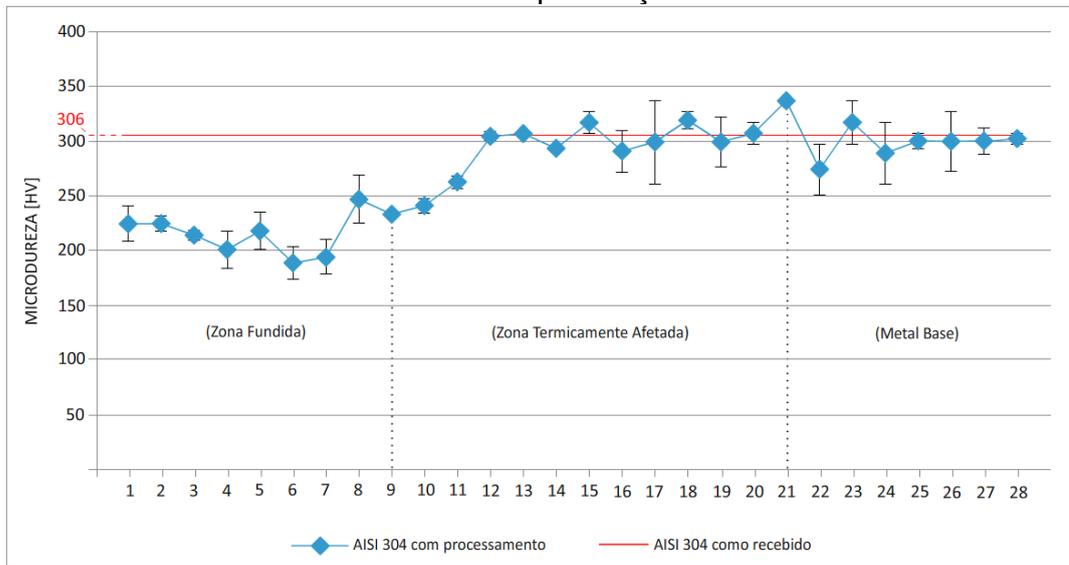
Na Figura 35, referente à região de metal base da amostra do aço inoxidável AISI 304 processado, foi observada uma microestrutura composta por grãos austeníticos com linhas de escorregamento, característica diferente da constatada na microestrutura do AISI 304 como recebido. Estas imagens mostraram que tais linhas de escorregamento, que correspondem a degraus resultantes do movimento de um grande número de discordâncias ao longo do mesmo plano de escorregamento, mudam a sua direção na região referente aos contornos dos grãos (SMITH; HASHEMI, 2010, p. 180). Assim, foi evidenciado um rearranjo dos cristais que compõem o material AISI 304 após a execução do tratamento térmico de alívio de tensões.

6.2 Análise do ensaio de microdureza Vickers

Por meio dos ensaios de microdureza Vickers, pôde-se definir um perfil de microdureza da solda das amostras do material AISI 304 submetido ao ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante na presença e ausência do fluido de corte, envolvendo as regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) de modo que os valores obtidos nos dois perfis foram comparados ao valor médio de dureza medido na amostra de AISI 304 como recebido.

Conforme observado nas Figuras 36 e 37, a zona fundida (ZF) apresentou valores de microdureza inferiores comparados à zona termicamente afetada (ZTA) e região de metal base (MB). Este fato pode ser explicado pela utilização de um metal de adição com baixa concentração de carbono e ausência de fósforo (quando comparado ao AISI 304), elementos de liga que influenciam significativamente sobre a propriedade de dureza (PAVANATI; COELHO, 2014, p.).

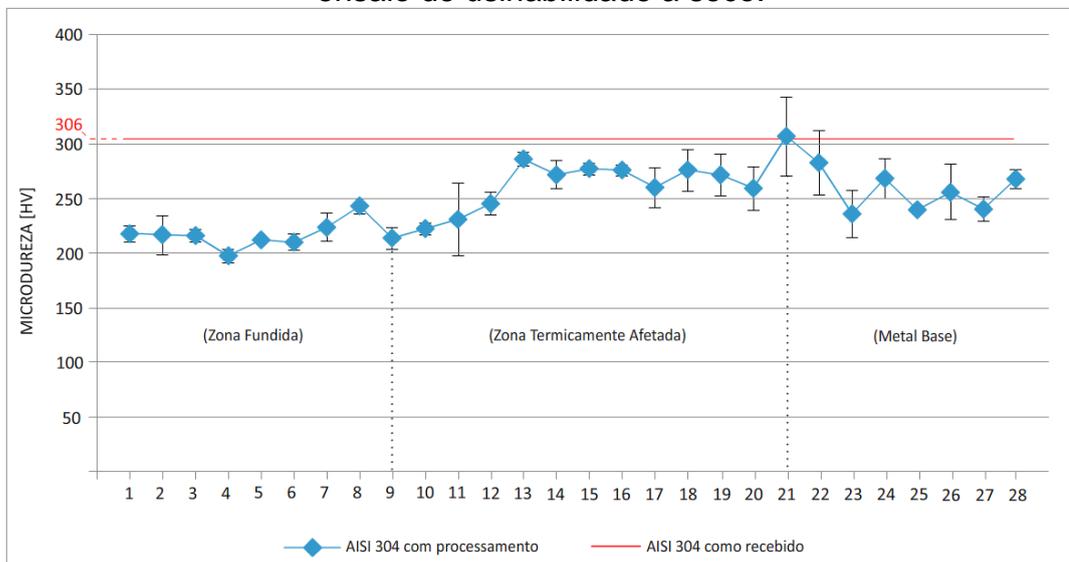
Figura 36 – Perfil de microdureza Vickers medida na amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade na presença de fluido de corte.



Fonte: Autor (2018).

A zona termicamente afetada (ZTA) de ambas as amostras apresentou os maiores picos de microdureza, sendo assim, a região mais dura quando comparada à zona fundida (ZF) e à região de metal base (MB). Tais resultados medidos podem ser evidenciados pela formação de regiões de refino de grão na ZTA, caracterizada pelo aumento da quantidade de contornos de grão, considerados “barreiras” à continuação do movimento das discordâncias devido a diferentes orientações cristalográficas presentes e às descontinuidades encontradas no próprio contorno de grão (CALADO, 2012, p. 7). Por consequência, a dureza do material é aumentada.

Figura 37 – Perfil de microdureza Vickers medida na amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade a seco.



Fonte: Autor (2018)

A região de metal base (MB) de ambas as amostras apresentou valores de microdureza inferiores quando comparados ao valor de microdureza medido no material AISI 304 como recebido, que foi de 306HV. O mesmo pôde ser observado em algumas regiões da ZTA da amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade na presença de fluido de corte, e foi notado em toda a ZTA da amostra soldada submetida ao ensaio de usinabilidade na ausência de fluido de corte. Portanto, estes resultados mostraram que a aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem proporcionou a diminuição da microdureza do material soldado de um modo geral (FERNANDES et al, 2016, p. 358).

6.3 Análise do ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante

O intervalo de tempo transcorrido (Anexo A), em milésimos de segundo, foi medido para cada furo, seguindo a condição imposta no desenvolvimento do ensaio, aplicando-se ou não fluido de corte e variando-se as regiões de furação (metal base e zona termicamente afetada). Por fim, foi calculada a média aritmética do intervalo de tempo transcorrido para cada condição juntamente com o respectivo desvio padrão, para que fosse feita uma análise quantitativa dos dados por meio de gráficos.

Conforme mencionado anteriormente na metodologia prática deste trabalho, durante a 9ª furação do ensaio de usinabilidade envolvendo o AISI 304 como recebido e com o uso de fluido de corte, ocorreu a perda da vida útil da broca pelo desgaste das pontas de corte (Figura 38), fazendo com que esta etapa obtivesse apenas 8 tempos mensurados.

Figura 38 – Broca com perda das pontas de corte ocorrida durante o ensaio de usinabilidade envolvendo o AISI 304 como recebido e com o uso de fluido de corte.

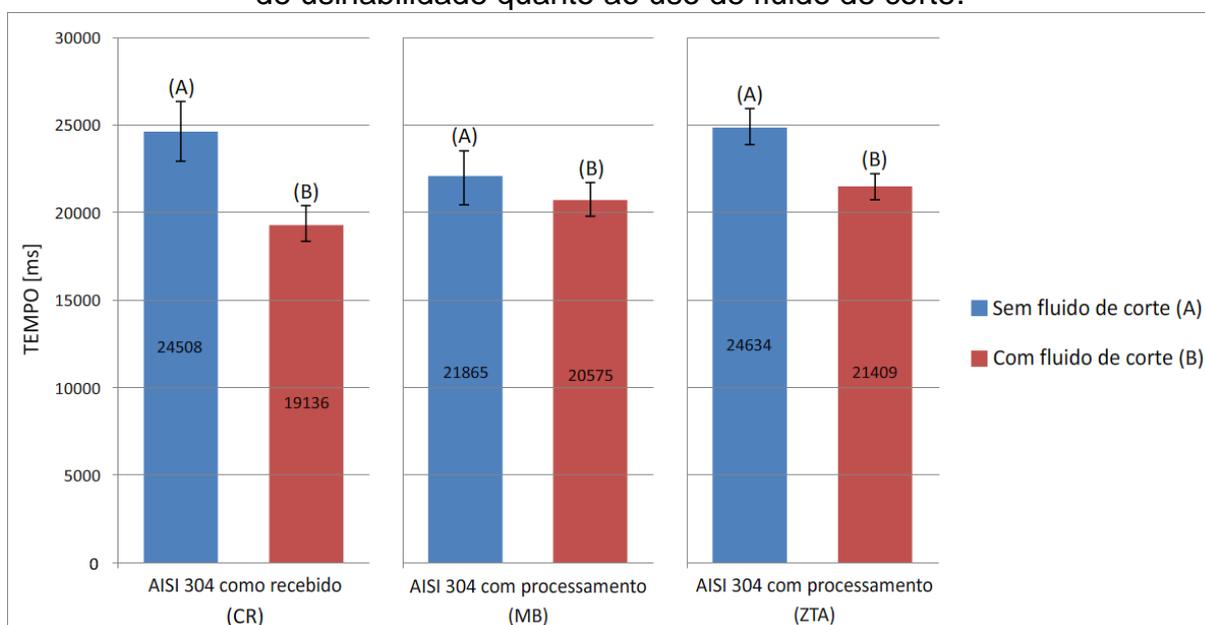


Fonte: Autor (2018).

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 39, houve redução da média do tempo mensurado para todas as condições de ensaio quando se aplicou o fluido de corte durante a operação de furação a pressão constante.

Para o AISI 304 como recebido, as operações de furação a seco indicaram uma média de 24508ms, enquanto as que envolveram uso de fluido de corte tiveram uma média de 19136ms. Para o AISI 304 processado envolvendo ensaios de usinabilidade apenas na região de metal base (MB), as operações de furação a seco indicaram uma média de 21865ms, enquanto as que envolveram uso de fluido de corte obtiveram uma média de 20575ms. Para o AISI 304 processado abrangendo ensaios de usinabilidade apenas na zona termicamente afetada (ZTA), as operações de furação a seco indicaram uma média de 24634ms, enquanto as que envolveram uso de fluido de corte obtiveram uma média de 21409ms. Assim, foi comprovada a eficiência do fluido de corte quanto à sua propriedade de lubrificação nas operações de usinagem referentes ao ensaio de usinabilidade.

Figura 39 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade quanto ao uso de fluido de corte.

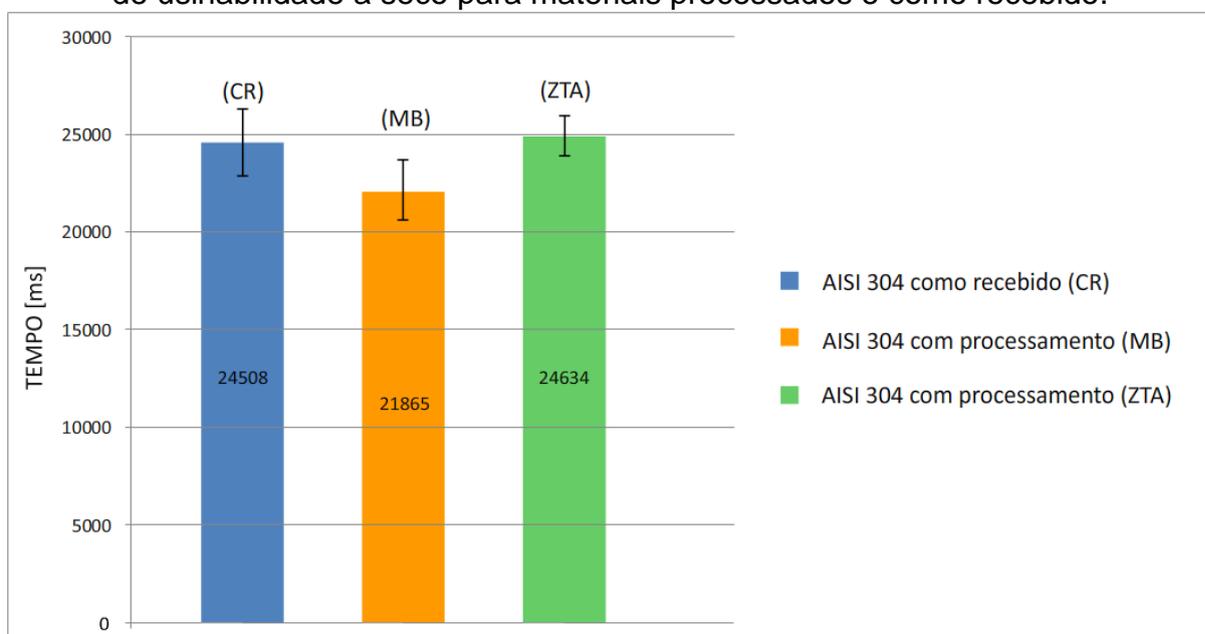


Fonte: Autor (2018).

Com base no gráfico da Figura 40, pode-se observar que houve variação na média do tempo mensurado entre cada uma das condições de ensaio a seco, de modo que os ensaios que envolveram o material AISI 304 como recebido com tempo de furação de 24508ms e a zona termicamente afetada (ZTA) do AISI 304 processado com tempo de furação de 24634ms apresentaram tempos relativamente

próximos e superiores ao tempo médio de 21865ms referente ao ensaio realizado na região de metal base (MB) do AISI 304 como recebido, indicando uma melhora da usinabilidade do AISI 304 pós tratamento térmico de alívio de tensões para esta região analisada. Tais resultados obtidos indicam a ocorrência de transformações na microestrutura dos materiais devido aos processos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões executados, de forma que a zona termicamente afetada (ZTA) do AISI 304 com processamento apresentou a pior usinabilidade, fato comprovado pelo refino do grão em tal região e consequente aumento de sua microdureza Vickers.

Figura 40 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade a seco para materiais processados e como recebido.

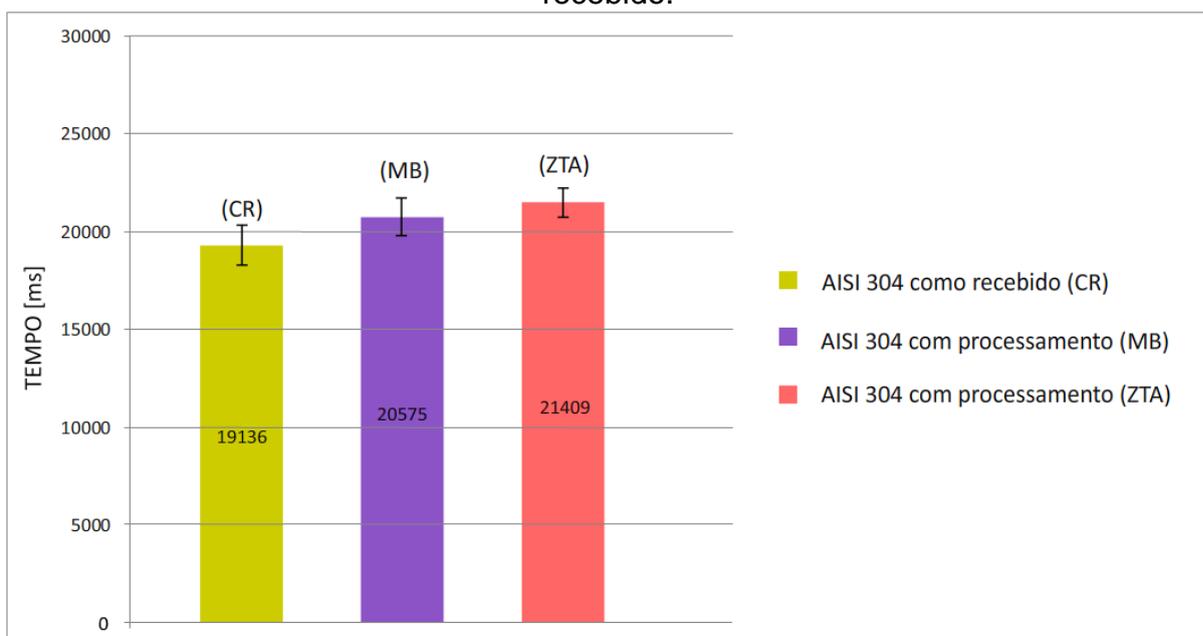


Fonte: Autor (2018).

Assim como apresentado no gráfico da Figura 40, na Figura 41 é mostrado que houve, também, uma variação na média do tempo mensurado entre cada uma das condições de ensaio que envolveram a aplicação de fluido de corte de modo que o ensaio que envolveu o material AISI 304 como recebido apresentou o menor tempo de furação com 19136ms, seguido do ensaio realizado na região de metal base (MB) do AISI 304 processado com tempo de 20575ms e por fim, o ensaio realizado na zona termicamente afetada (ZTA) do AISI 304 com processamento que apresentou o maior valor de tempo de furação com 21409ms. Tais resultados também indicam a ocorrência de transformações na microestrutura dos materiais devido aos processos de soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões executados, sendo a zona

termicamente afetada (ZTA) do AISI 304 com processamento a região analisada com pior usinabilidade, fato evidenciado pelo refino do grão e consequente aumento de sua microdureza Vickers.

Figura 41 – Comparação entre a média dos tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade com fluido de corte referente aos materiais processados e como recebido.

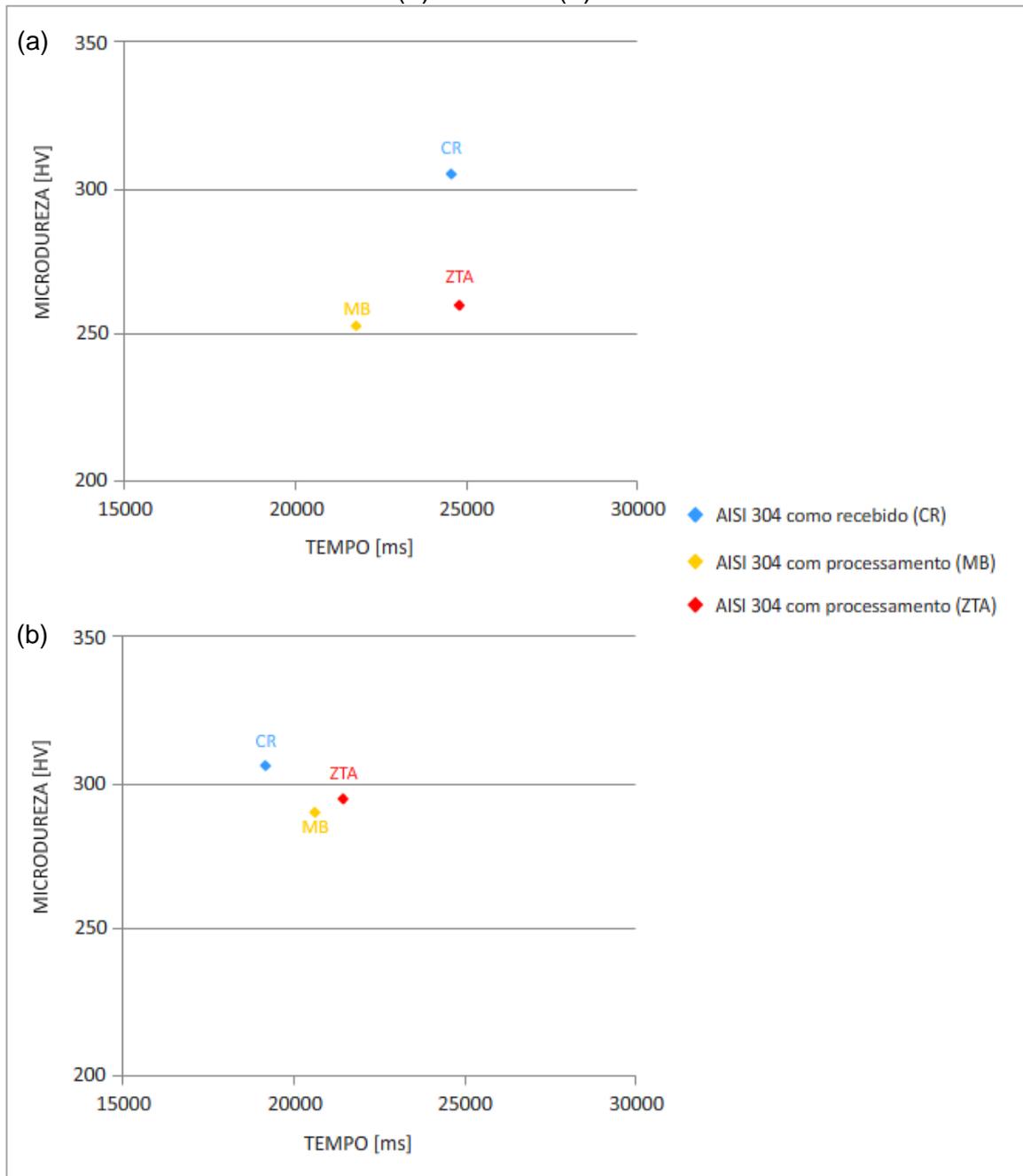


Fonte: Autor (2018).

Na Figura 42 (a) é apresentado o gráfico comparativo da microdureza Vickers média (Anexo C) de cada região microestrutural (CR, MB e ZTA) da amostra submetida ao ensaio de usinabilidade a seco com os tempos medidos neste respectivo ensaio. Assim, foi observado que quanto maior a microdureza, maior o tempo de furação e pior é a usinabilidade do AISI 304, que ocorre de modo mais crítico na ZTA, apesar da microdureza ser maior no material como recebido.

Na Figura 42 (b) é apresentado o gráfico comparativo da microdureza Vickers média de cada região microestrutural (CR, MB e ZTA) da amostra submetida ao ensaio de usinabilidade aplicando-se fluido de corte com os tempos medidos em tal ensaio. Logo, foi analisado, também, que o aumento da microdureza apresentou significativa influência sobre o aumento do tempo, piorando a usinabilidade do AISI 304, que ocorreu de modo mais crítico na ZTA, apesar da microdureza ter sido maior no material como recebido. Além disso, foi constatado que o uso do fluido de corte possuiu significativa influência sobre a diminuição do tempo de furação, de um modo geral.

Figura 42 – Comparativo da microdureza Vickers com os tempos medidos no ensaio de usinabilidade. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.



Fonte: Autor (2018)

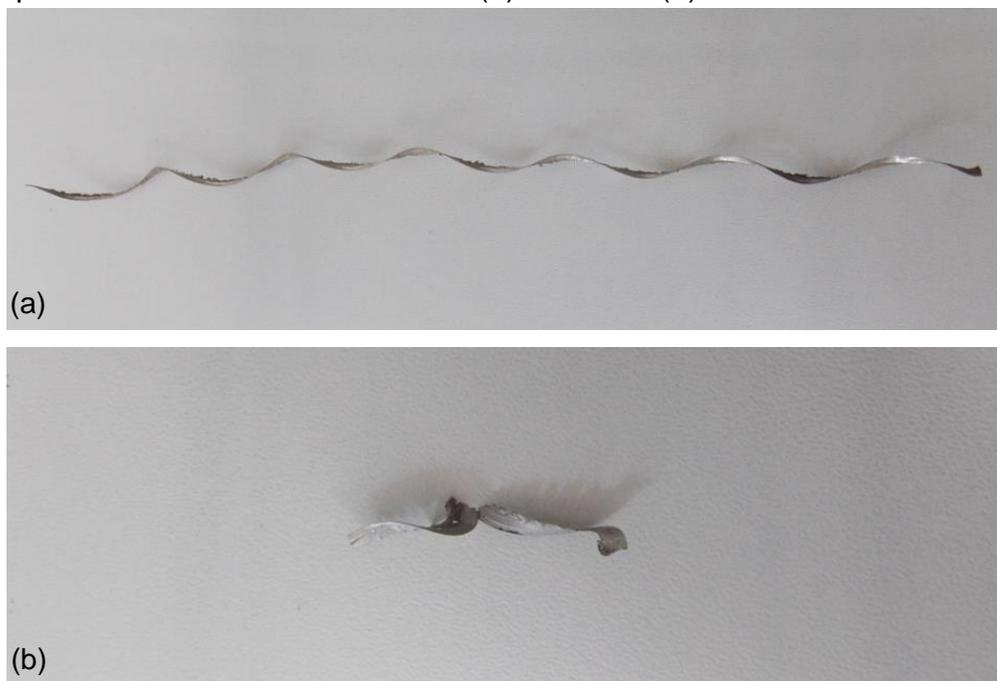
6.4 Análise da formação de cavacos

Conforme informado por Silva et al (2007, p. 1), o aço inoxidável austenítico AISI 304, comumente apresenta cavaco contínuo, pois apresenta estrutura austenítica. Porém, alguns aços inoxidáveis austeníticos, sob determinadas condições de usinagem, podem produzir cavacos segmentados.

As morfologias dos cavacos obtidos para as diferentes condições executadas

nos ensaios de usinabilidade são mostradas a seguir.

Figura 43 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade para o AISI 304 como recebido. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.

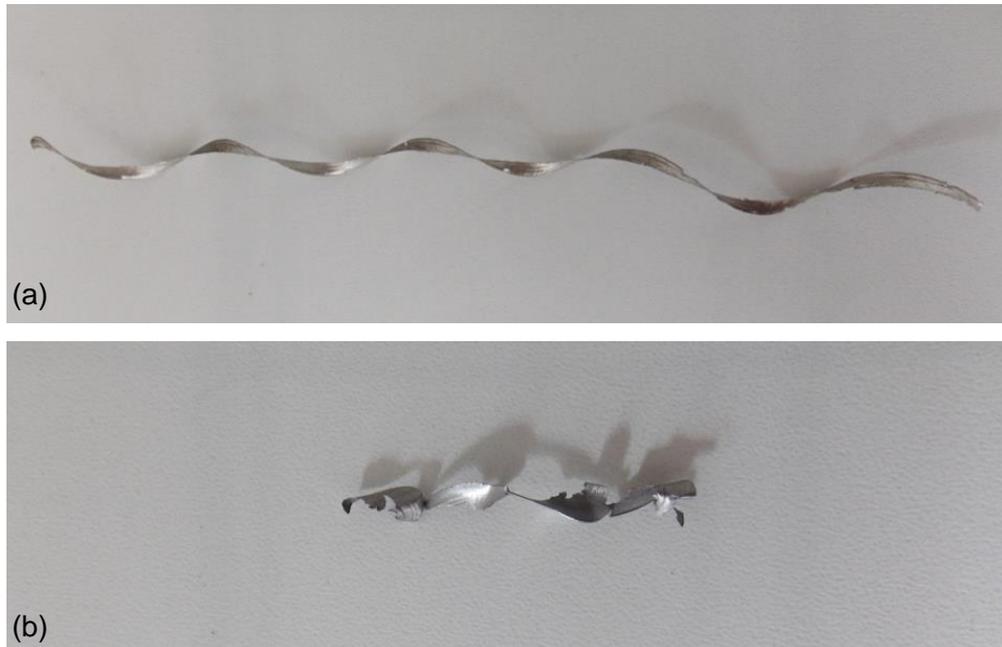


Fonte: Autor (2018).

Como pode ser observado na Figura 43, o cavaco gerado durante o ensaio de usinabilidade do material AISI 304 como recebido ensaiado a seco apresentou formato contínuo e o cavaco gerado durante o ensaio de usinabilidade do mesmo material e com aplicação de fluido de corte apresentou formato descontínuo. A modificação do tipo de cavaco com o uso de fluido de corte pode ser justificada pelo fato de o fluido proporcionar o resfriamento da zona de cisalhamento do cavaco, que juntamente com a ação das tensões de compressão, facilita sua quebra ou fragmentação (SILVA et al, 2011, p. 2). Tal acontecimento comprova a eficiência do fluido de corte quanto à propriedade de refrigeração durante as operações de usinagem.

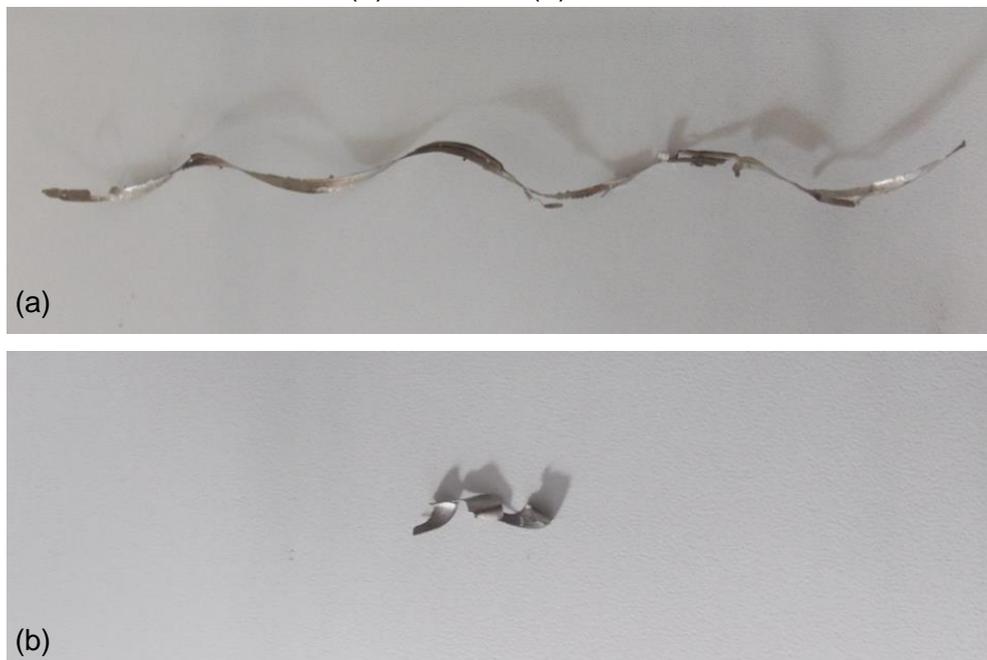
Na Figura 44 é mostrado que o cavaco gerado durante o ensaio de usinabilidade na zona termicamente afetada do material AISI 304 com processamento e ensaiado a seco apresentou formato contínuo e o cavaco gerado durante o ensaio de usinabilidade na mesma região do material AISI 304 com processamento e com aplicação de fluido de corte apresentou formato descontínuo. Desta forma, tal fenômeno se assemelha ao ocorrido no ensaio com o material como recebido.

Figura 44 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade realizados na zona termicamente afetada (ZTA) para o AISI 304 soldado e tratado termicamente. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.



Fonte: Autor (2018).

Figura 45 – Comparação do tipo de cavaco gerado entre os ensaios de usinabilidade realizados na região de metal base (MB) para o AISI 304 soldado e tratado termicamente. (a) A seco e (b) Com fluido de corte.



Fonte: Autor (2018).

O cavaco gerado durante o ensaio de usinabilidade na região de metal base (MB) do material AISI 304 com processamento e ensaiado a seco (conforme mostrado na Figura 45) apresentou formato contínuo e o cavaco gerado durante o

ensaio de usinabilidade na mesma região do material AISI 304 com processamento e com aplicação de fluido de corte apresentou formato descontínuo. Logo, a alteração do formato do cavaco se assemelha ao ocorrido no ensaio com o material como recebido e no ensaio envolvendo a zona termicamente afetada do material processado.

Portanto, para todas as situações, o uso de fluido de corte durante os ensaios de usinabilidade resultou na fragmentação do cavaco do aço inoxidável austenítico, exigindo menor energia durante o processo para deformação do material e posterior ruptura durante a formação do cavaco.

6.5 Análise do desgaste nas pontas de corte da broca utilizada no ensaio de usinabilidade

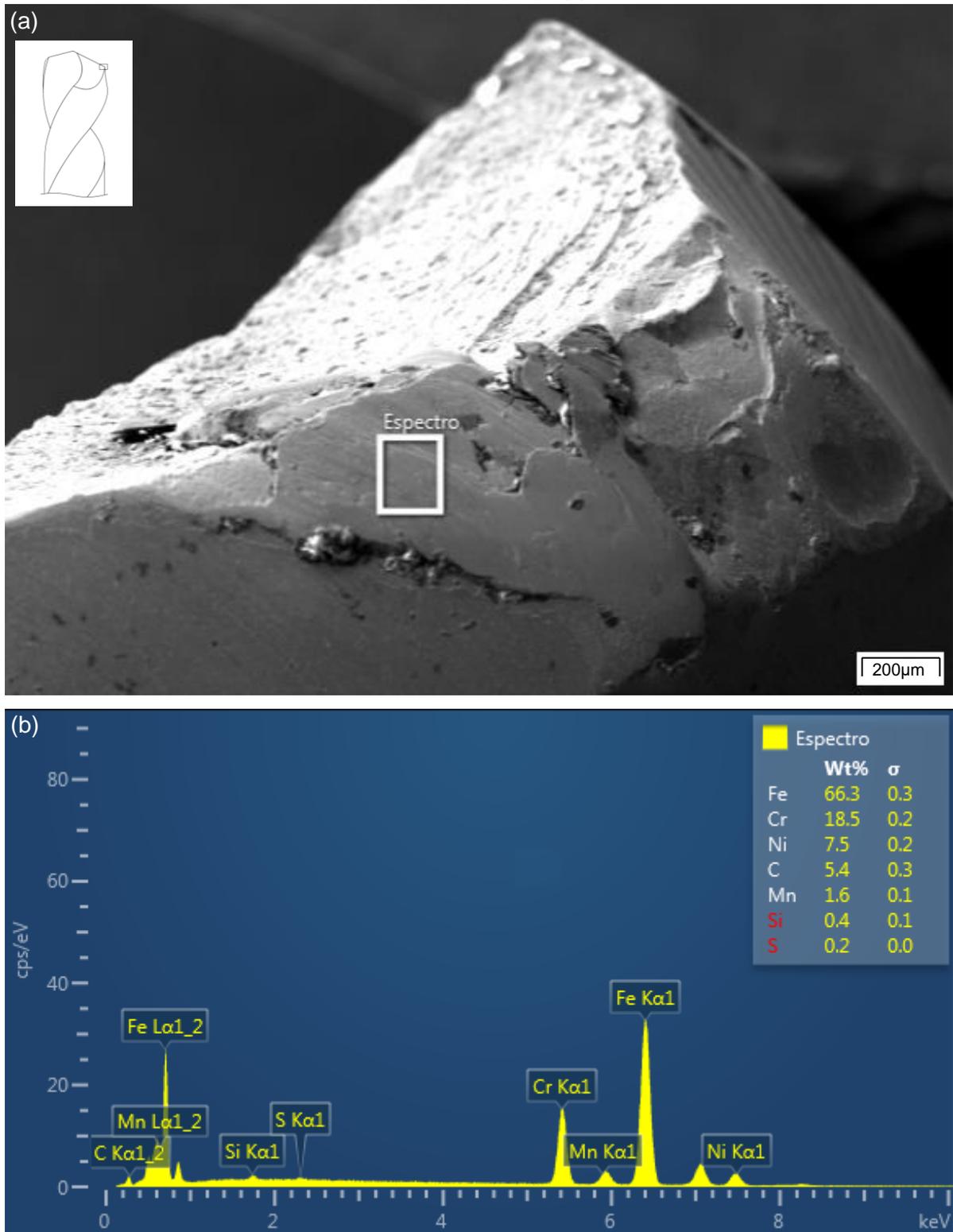
Por meio da análise do desgaste nas pontas de corte da broca, foram obtidas imagens e gráficos de espectroscopia relativos à região afetada pelo fenômeno.

Na Figura 46 (a), foi observada, na região demarcada, a adesão de material usinado (AISI 304) na ponta de corte direita da broca. A ocorrência de tal fenômeno se deve à fraca ação de corte aplicada durante o processo de usinagem ou em determinados materiais, à afinidade com a composição do metal duro da ferramenta ou do próprio revestimento (DIAS et al, 2012, p. 29).

Como evidência da adesão de material aderido à broca foi realizada uma espectroscopia, apresentada na Figura 46 (b), para identificar a presença de elementos químicos referentes à composição química do AISI 304, conforme Tabela 2, aderidos na superfície da ferramenta e este acontecimento foi comprovado pelos elementos Fe, Cr, Ni, C, Mn, Si e S.

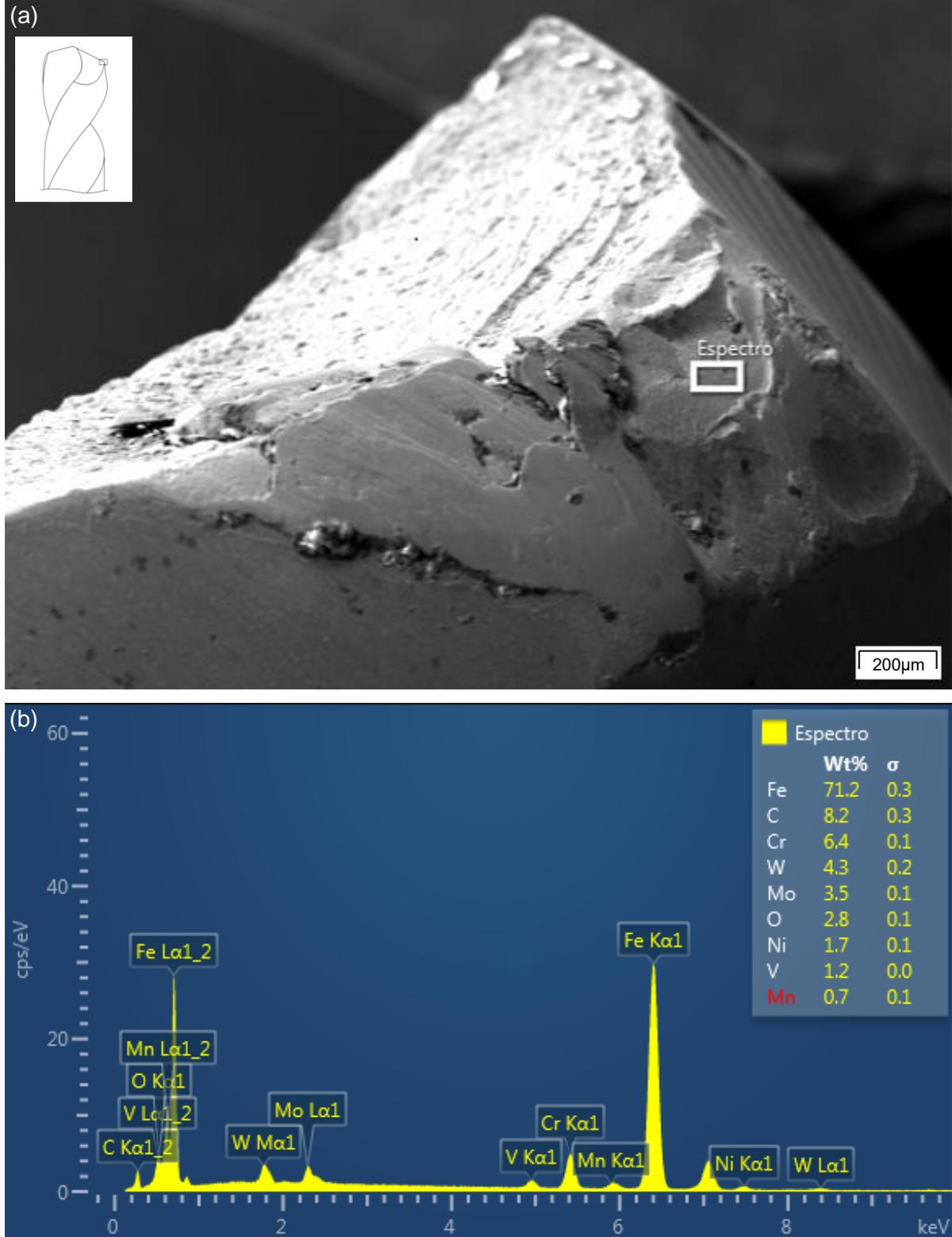
Na Figura 47 (a), foi observada na região demarcada a ocorrência de fragmentação e desgaste irregular da ponta de corte direita. Este desgaste é classificado como adesivo e consiste na perda progressiva de material (substrato e revestimento da ferramenta) na superfície em movimentos relativos e inicialmente se dá pela formação de ligações localizadas entre as superfícies de contato, de modo que as forças que produzem tal ligação são as mesmas que mantêm unidos os átomos dos sólidos (GOETTEMS; FERREIRA, 2017, p. 269).

Figura 46 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte direita desgastada e (b) Espectroscopia na região de formação de material aderido. Aumento: 60X.



Fonte: Autor (2018).

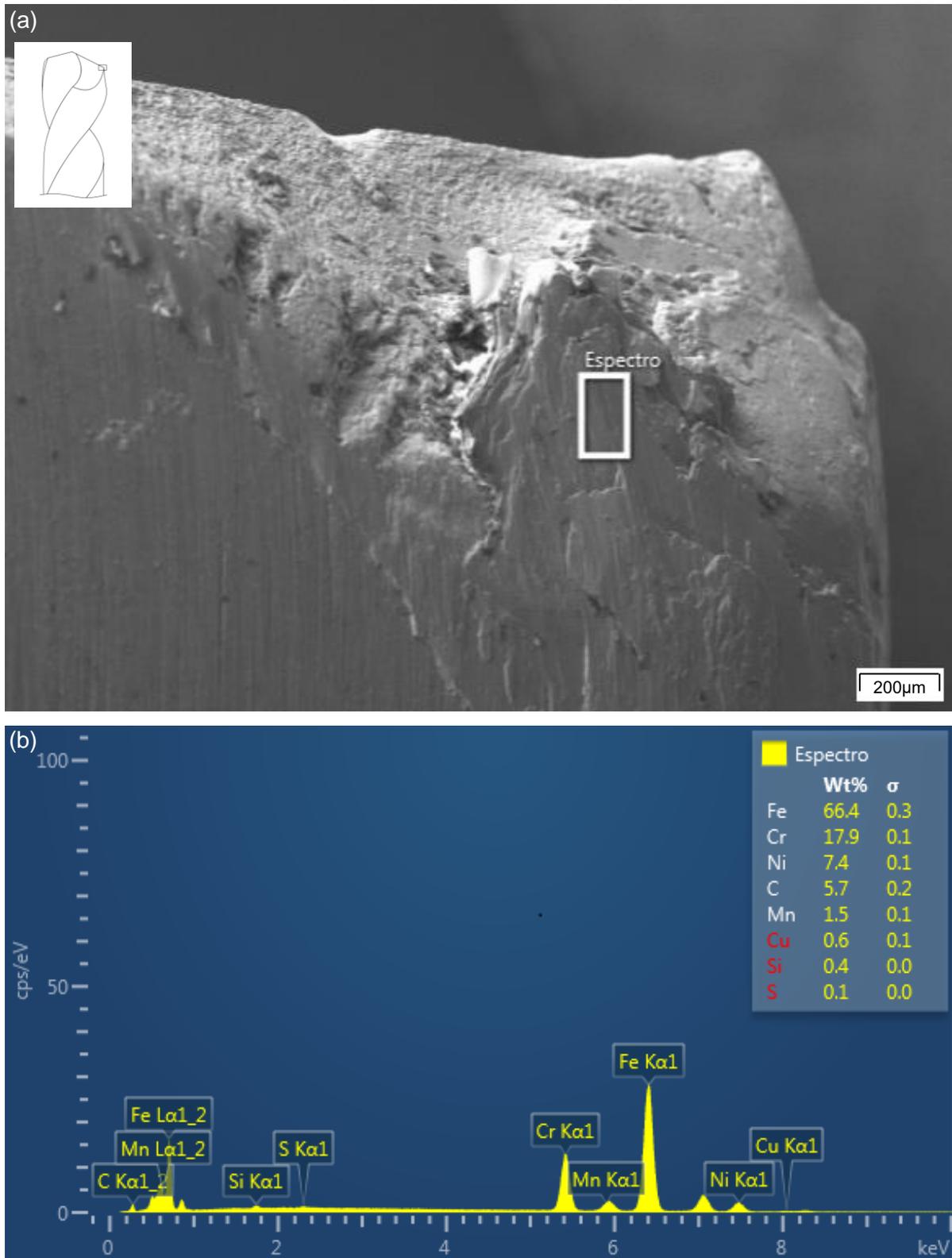
Figura 47 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte direita desgastada e (b) Espectroscopia na região desgastada. Aumento: 60X.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 47 (b) foi observada a presença dos elementos químicos Fe, C, Cr, W, Mo e V pertencentes ao aço rápido HSS, substrato da broca.

Figura 48 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte esquerda desgastada e (b) Espectroscopia na região de formação de aresta material aderido. Aumento: 60X.

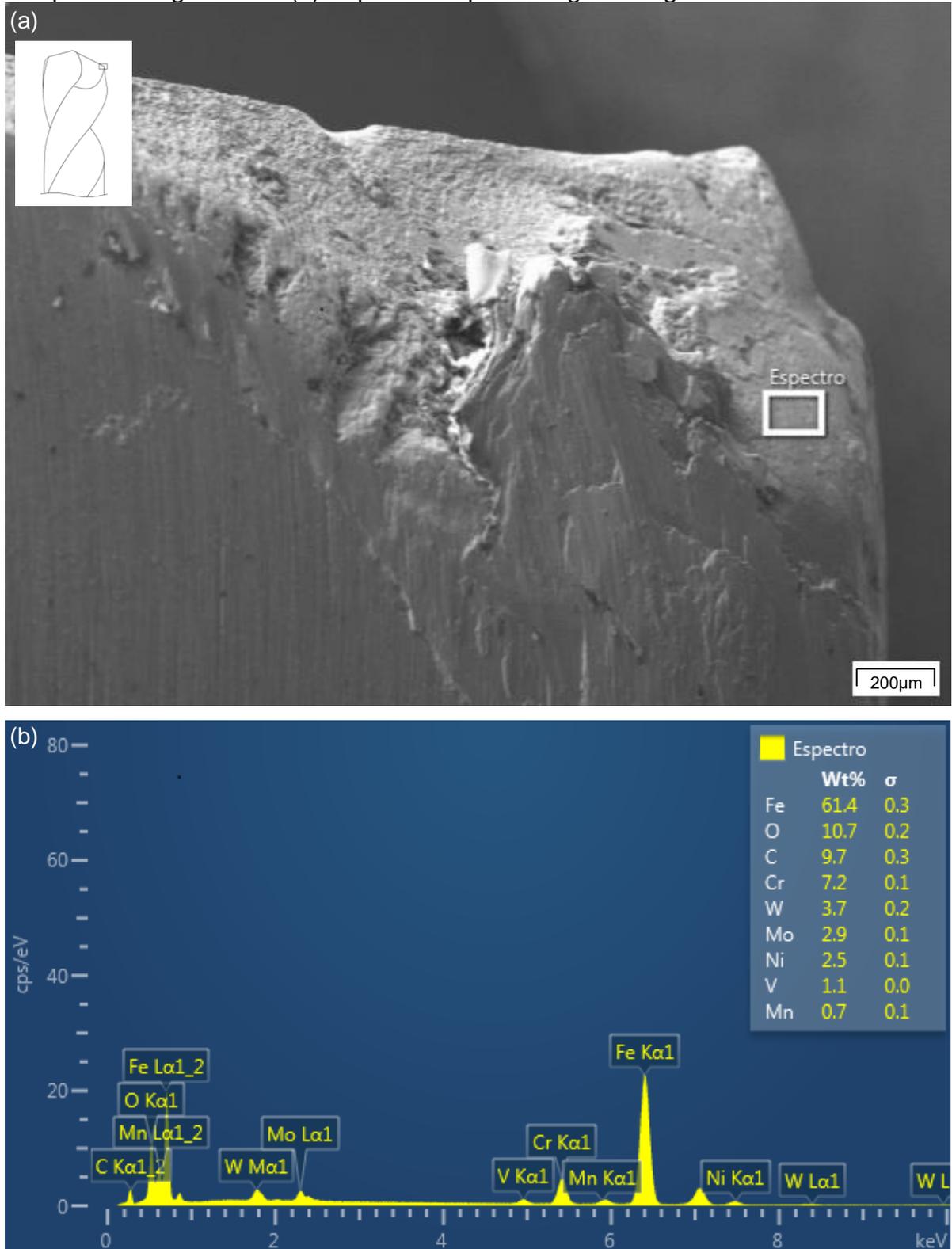


Fonte: Autor (2018).

Na Figura 48 (a) é mostrada a adesão de material usinado (AISI 304) na ponta

de corte esquerda da ferramenta, evidenciada pelos elementos Fe, Cr, Ni, C, Mn, Si e S conforme gráfico de espectroscopia apresentado pela Figura 48 (b).

Figura 49 – Microscopia de varredura eletrônica da ponta da broca. (a) Ponta de corte esquerda desgastada e (b) Espectroscopia na região desgastada. Aumento: 60X.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 49 (a), foi observada a ocorrência de fragmentação e desgaste irregular da ponta de corte esquerda (região demarcada) e por meio da espectroscopia (Figura 49 (b)) em tal região, foi observada a presença dos elementos químicos Fe, C, Cr, W, Mo e V pertencentes ao substrato da ferramenta.

7. Conclusão

Por meio dos resultados obtidos no ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante envolvendo amostras do material AISI 304 soldado e tratado termicamente para alívio de tensões e AISI 304 como recebido, concluiu-se que as operações utilizando-se fluido de corte proporcionaram uma melhor usinabilidade do material pelo menor tempo de furação do percurso padronizado pelo ensaio, quando comparado aos tempos medidos nas operações a seco com reduções no tempo de 22,0% do tempo para o material como recebido, 5,9% para o processado no metal base (MB) e 13,0% para o processado na zona termicamente afetada (ZTA).

Além disso, foi constatado que os tempos de furação na zona termicamente afetada (ZTA) foram maiores que na região de metal base (MB) das amostras soldadas e tratadas termicamente para alívio de tensões com aumentos no tempo de 12,7% para o material ensaiado a seco e 4,0% para o material ensaiado com fluido de corte, de modo que a região do AISI 304 afetada pelo calor da solda teve sua usinabilidade prejudicada pelas modificações em sua microestrutura.

Utilizando-se os recursos de inspeção visual por análise metalográfica e de microdureza Vickers, foi concluído que a zona termicamente afetada (ZTA) apresentou maiores valores de microdureza em relação à zona fundida (ZF) com aumentos médios de 19,7% para o material ensaiado a seco e 31,8% para o material ensaiado com fluido de corte, visto que a ZF apresentou formação de material dissimilar ao AISI 304 devido à adição da vareta ER308L, contendo menor concentração de elementos de liga contribuintes para aumento a microdureza. Além disso, ocorreu o aumento da microdureza na ZTA em relação às regiões de metal base (MB) não afetadas pelo calor de soldagem, fato evidenciado pela ocorrência de refino de grão na zona afetada e seu conseqüente aumento de contornos de grão.

Na amostra referente à realização do ensaio de usinabilidade a seco houve uma redução dos valores de microdureza (ao longo de praticamente toda a extensão da ZTA e MB) quando relacionados ao valor médio de 306HV da amostra do material como recebido, sendo concluído que o tratamento térmico de alívio de tensões aplicado pós soldagem proporcionou uma redução da microdureza ao longo de toda a microestrutura do material processado. Esta redução de microdureza por aplicação do tratamento térmico também foi constatada, mas de modo mais discreto, na amostra submetida ao ensaio de usinabilidade com uso de fluido de corte que

inclusive, apresentou alguns valores de microdureza na ZTA e MB maiores que em relação ao AISI 304 como recebido.

Portanto, conclui-se para os ensaios de usinabilidade a seco e com fluido de corte, que o aumento da microdureza na ZTA apresentou significativa influência sobre o aumento do tempo de furação, piorando a usinabilidade desta região.

Concluiu-se também, que os cavacos formados durante o ensaio de usinabilidade do material AISI 304 como recebido e ensaiado a seco apresentaram formato contínuo, ao passo que os cavacos formados durante o ensaio de usinabilidade do mesmo material e com aplicação de fluido de corte apresentaram formato descontínuo, morfologia ocorrida devido ao fluido de corte proporcionar o resfriamento da zona de cisalhamento do cavaco, que juntamente com a ação das tensões de compressão, facilita sua fragmentação, exigindo menor energia durante o processo para deformação do material e posterior ruptura durante a formação do cavaco.

A broca especificada para o teste de usinabilidade e própria para operações com aços inoxidáveis (austenítico, ferrítico ou martensítico) sofreu adesão de material usinado nas pontas de corte da ferramenta e conseqüente desgaste adesivo, quando realizadas as furações do AISI 304 como recebido e aplicando-se o fluido de corte. Por se tratar de um fenômeno não previsto, houve dificuldade em se quantificar o desgaste da broca, sendo possível apenas uma análise qualitativa. Assim, concluiu-se que o revestimento de óxido azul, mesmo com refrigeração e lubrificação proporcionados pelo fluido de corte, foi ineficiente nesta etapa de furação e tal fato pode ser justificado ou pelo acabamento superficial do revestimento, ou pela baixa velocidade de corte usada no ensaio.

De um modo geral, o ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante apresentou eficiência satisfatória de seus resultados de tempo medidos em meio às variações de microdureza Vickers nas amostras analisadas e a melhoria da usinabilidade do aço inoxidável austenítico pode ser obtida pela combinação de parâmetros de usinagem como uso de fluido de corte, tratamento térmico de alívio de tensões após processamento e evitando-se velocidades de corte baixas.

8. Futuras Linhas de Pesquisa

O presente trabalho pode ser prosseguido por meio das linhas de pesquisa citadas a seguir:

- Estudo dos efeitos da soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões na usinabilidade do aço inoxidável ferrítico;
- Estudo dos efeitos da soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões na usinabilidade do aço inoxidável martensítico;
- Estudo de melhorias no equipamento para execução do ensaio de usinabilidade por furação com aplicação de pressão constante com a implantação de novos componentes mecânicos/eletrônicos para aumento da confiabilidade dos resultados;
- Estudo de desempenho do ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante com a variação de diferentes diâmetros de broca;
- Estudo do desgaste progressivo sofrido pela ferramenta ao longo do ensaio de usinabilidade por furação com pressão constante em aços inoxidáveis austeníticos;
- Estudo do fluxo de calor durante o processo de soldagem sobre a zona termicamente afetada do aço inoxidável austenítico.

Referências Bibliográficas

- ASSUMPÇÃO, R. L.; BORGES, P. C.; MAFRA, M. Martensita de nitrogênio obtida pelo processo de SHTPN em aços inoxidáveis ferríticos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. 21. 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: CBCIMAT, 2014. p.5916-5923.
- ALBUQUERQUE, S. F. et al. Estudo do Comportamento do Aço API 5L X80 quando submetido à Soldagem por Processo Automatizado. **Revista Soldagem e Inspeção**. v. 17, n. 2, 2012, p. 137-146, Jun. 2012.
- ALVES, M. O. et al. Alterações microestruturais e de microdureza causadas por tratamento térmico e deformação plástica em aço para tubos API 5CT. **Revista Janus**. v.11, n. 19, 2014, p. 107-117, Jun. 2014.
- American Society of Materials. **Steels: processing, structure, and performance**. Ohio: ASM, 2005. 614 p.
- ASLAM S. et al. Effect of Surface Finish on the Pitting Corrosion Behavior of Sensitized AISI 304 Austenitic Stainless Steel Alloys in 3.5% NaCl Solutions. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**. v. 54, n. 1, 2017, p. 73-80, July 2017.
- ÁQUILA, V. **Processo de soldagem TIG**. Salvador: Escola de Soldagem L&A – Centro de Formação de Soldadores, 2012. 41p. (Apostila)
- Arinox. **Composição química do aço inox**. Disponível em < http://www.arinox.com.br/imagens/download_pdf/32_imagem_site_pdf.pdf >. Acesso em: 23 jan. 2018.
- ÁVILA, T. L. D. et al. Influência do aporte térmico na quantidade de ferrita em soldas inoxidáveis com os eletrodos ER308LSi ER312. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 7. 2013, Penedo, Itatiaia. **Anais...** Penedo, Itatiaia: COBEF, 2013. p.1-9.
- BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 64, n. 11, 2007, p. 1199-1206, July 2008.
- BAPTISTA, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Revista Escola de Minas**. v. 55, n. 2, p. 103-109, Abr. 2002.
- BARBOSA, P. A. et al. Análise de parâmetros de usinagem nas tensões atuantes na zona de cisalhamento primária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 7. 2013, Penedo. **Anais...** Penedo: COBEF, 2013. p.1-9.
- BARBOSA, R. P. **Tecnologia mecânica: metalurgia da soldagem e soldagem dos materiais**. Coronel Fabriciano, 2007. (Apostila)

BARREIRO, J. A. **Tratamientos térmicos de los aceros**. 10. ed. Madrid: Dossat, 2002. 739 p.

BLÖDORN, R. **Estudo do furo e do processo de furação empregado no método do furo cego para medição de tensões residuais**. 2014. 177 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

BRANT, C. S. G. et al. Influência do aporte térmico sobre a microestrutura em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304. **Engevista**. v. 19, n. 1, p. 1-8, 2017.

CALADO, W. R. **Ultra-refino de grão através de deformação plástica severa por ensaios de torção: simulação do processo ARB**. 2012. 234 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: Acelor Mittal Inox Brasil, 2008. 56 p. (Apostila)

CARVALHO, A. L. et al. Desenvolvimento de uma máquina-ferramenta para usinagem em campo de equipamentos de grandes diâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS. 29. 2014, Santos. **Anais eletrônicos...** Santos: CBMGA, 2014. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/newsletters/29cbmga/TT/TT%20043.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2018.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005. 599 p.

CINTHO O. M.; VUROBI JÚNIOR, S. Técnicas metalográficas para caracterização microestrutural dos aços. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS. 2. 2006, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: EETCG, 2006. p.1-9.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p.

COSTA, R. S. **Estudo da corrosão do aço inox AISI 304 em álcool etílico hidratado combustível**. 2012. 101 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CUNHA, C. C. O.; COELHO, L. A. Metalografia: da tecnologia à arte como divulgação da ciência. **Revista Academus**. v. 2, n. 1, p. 22-25, 2014.

DIAS, A. P. et al. Análise de parâmetros de usinagem do aço inox austenítico abnt 304. **Cadernos UniFOA**. 2012, p. 29-36, Jun. 2012.

DOS SANTOS; KIECKOW, F.; CASARIM, J. J. Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço-rápido (HSS) modificadas superficialmente por nitretação a plasma. **Revista Vivências**. v. 9, n. 16, 2013, p. 68-76, Maio 2013.

Dormer. **Manual Técnico**. 2015. 145p.

DURANT, R. Z. S. **Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas da soldagem circunferencial do aço API 5L X80 por processos de soldagem semi-automáticos com proteção gasosa**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

EPUSP. **Corrosão e degradação dos materiais**. 2007. 30 p. (Apostila)

ESAB. **Eletrodos inoxidáveis**. 2005. 28 p. (Apostila)

ESPINDOLA, E. S. C.; KLAFKE, A. L. análise comparativa da utilização de fluidos de corte na usinagem do aço abnt 1045 em operação de desbaste. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 8. 2014, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: CONEM, 2014. p.1-10.

FERNANDES, J. R. et al. Efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na microestrutura e propriedades de um tubo API 5L X65MS. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. v. 13, n. 4, 2016, p. 356-364, Dez. 2016.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 2006. 751 p.

FERRARESI, V. A. **Soldagem dos aços inoxidáveis austenísticos**. FEMEC/UFU, 2013. 25 p. (Apostila)

FONSECA, A. S. **Soldagem TIG**. Varginha: SENAI, 2004. 29 p. (Apostila)

FRAGOSO, K. M. et al. Retificação cilíndrica do aço VP50 utilizando o rebolo de carbetto de silício verde com a técnica de MQL. **Revista Matéria**. v. 21, n. 2, 2015, p. 756-766, Jan. 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 376 p.

GHOSH, M. et al. Effect of stress relief annealing on microstructure & mechanical properties of welded joints between low alloy carbon steel and stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions**. v. 48, n. 1, 2016, p. 230-245, Jan. 2017.

GIMENES, L. **Tratamento térmico em juntas soldadas**. 2. ed. Florianópolis: CIMM, 2007.

GODINHO, C. **Avaliação experimental do processo de soldagem TIG automatizado alimentado com reduzidos ângulos de inserção de arame em relação ao eletrodo**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

GOETTEMS, F. S.; FERREIRA, J. Z. Influência do tratamento térmico na resistência ao desgaste de revestimentos de níquel químico com alto teor de fósforo.

Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. v. 14, n. 3, 2017, p. 264-272, Set. 2017.

GONÇALVES, R. B.; TERRONES, L. A. H.; ROCHA, R. P. Efeito do tratamento térmico de solubilização e estabilização na microestrutura de uma junta soldada com aço inox 347. **Revista Matéria**. v. 22, n. 1, 2016, p. 1-14, Set. 2016.

GUIRALDENQ, P.; DUPARC, O. H. The genesis of the Schaeffler diagram in the history of stainless steel. **Metallurgical Research and Technology**. v. 114, 2017, p. 1-9, July. 2017.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008. 342 p.

LIANG, S. Y.; FENG, Y.; PAN Z. Material microstructure affected machine: a review. **EDP Sciences**. v. 4, n. 5, 2017, p. 1-12, Apr. 2017.

LIMA, C. A. S. **Influência do tratamento térmico de alívio de tensões associado à elevada energia de soldagem na tenacidade da zona termicamente afetada de um aço TMCP microligado aplicado em estruturas off-shore**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, UNESP, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2011.

LOPES, A. C. O. **Otimização dos parâmetros de furação utilizando o método de Taguchi**. 2017. 66 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Industrial com Especialização em Engenharia Mecânica, IPB – ESTG, Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2017.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015. 407 p.

MARQUES, P. V.; MODENESE, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Fundamentos e tecnologia da soldagem**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 392 p.

MARTINS, M. A. **Influência de tratamentos térmicos de recozimento na precipitação de fase sigma e nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável duplex UNS S31803**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, REDEMAT – UFOP/UEMG, Universidade Federal de Ouro Preto / Universidade Estadual de Minas Gerais. Ouro Preto, 2017.

OLIVEIRA, P. R. **Aplicabilidade do ensaio de furação com pressão constante ao estudo dos fluídos de corte**. 2015. 47 f. Monografia (Graduação) – Engenharia Mecânica, CEFET-MG – DEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

PAVANATI, H. C.; COELHO, D. X. R. Cementação de aço baixo carbono enriquecido superficialmente com molibdênio em plasma DC. **Revista Tecnológica do IFSC**. n. 4, p. 1-10, Dez. 2014.

- RAYMUNDO, E. A. et al. Análises dos cavacos gerados no processo de fresamento do aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205), como recebido. **Revista de Gestão & Tecnologia**. v. 1, n. 2, 2013, p. 13-20, Dez. 2013.
- REZENDE, A. C. L. et al. Identificação das condições de sensitização em um aço inoxidável austenítico aisi 304 através da análise microestrutural. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**. v. 3, n. 3, 2015, p. 156-162, Dez. 2016.
- ROCHA, R. P.; GONÇALVES, R. B.; TERRONES, L. A. H. Efeito do tratamento térmico de solubilização e estabilização na microestrutura de uma junta soldada com aço inox 347. **Revista Matéria**. v. 2, n. 1, 2017, p. 1-14, Set. 2017.
- SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. Belo Horizonte: Artliber, 2007. 248 p.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 705 p.
- SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 246 p.
- SILVA, M. B.; SILVA, F. C. S.; MAROBIN D. S. Efeito do desgaste da ferramenta na morfologia do cavaco no torneamento de aço inoxidável ABNT 304. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 4. 2007, Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro: COBEF, 2007.p.1-8.
- SILVA, S. L. **Análise de juntas soldadas de aços dissimilares AISI 304 e SAE 1020 com metais de adição ER 309L e ER 70S3 pelo processo GTAW**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, UNESP, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2016.
- SIMÕES, R. P.; CASTRO, A. L. R.; ANDRADE, M. S. Atrito interno em aços inoxidáveis austeníticos contendo cobre. **Revista Escola de Minas**. v. 63, n. 1, 2010, p. 51-55, Mar. 2010.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciências dos materiais**. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2012. 734 p.
- SOEIRO JR. J. C. et al. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Revista Soldagem e Inspeção**. v. 18, n. 2, p. 176-195, Jun. 2013.
- SÓRIA, B. S. et al. Influência da geometria da broca de metal-duro na qualidade do furo realizado em ferro fundido DIN GGG50. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 9. 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CONEM, 2016. p.1-10.
- TECMECANICO. Brocas. Disponível em < <https://tecmechanico.blogspot.com/2016/02/brocas.html>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

TRINDADE, V. B.; PARANHOS, R. P. R.; PAYÃO, J. C.; SOUZA, L. F. G. Influência da adição de níquel na tenacidade de metais de solda de aços C-Mn antes e após tratamento térmico de alívio de tensões. **Revista Soldagem e Inspeção**. v. 10, n. 4, p. 164-171, Dez. 2005.

VASCONCELOS, R. C.; MACIEL, T. M.; GURGEL, J. M. A. M. Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 4, n. 1, 2008, p. 1-13, Abril 2009.

VEIGA, E. **Processo de soldagem TIG**. São Paulo: Globus, 2011. 186 p.
WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. 7. ed. São Paulo: Bluscher, 2010. 494 p.

WANG, Z.; LI, Y.; CHANG, C. Application of Automatic TIG Welding for Yamal LNG Process Piping Fabrication. **International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering**. v. 6, n. 4, 2018, p. 44-49, July 2018.

ANEXO A – Tempos de furação medidos no ensaio de usinabilidade

TEMPO DE USINABILIDADE (ms)						
Item	A seco			Fluido de corte semi-sintético		
	AISI 304 como recebido	AISI 304 com processamento (MB)	AISI 304 com processamento (ZTA)	AISI 304 como recebido	AISI 304 com processamento (MB)	AISI 304 com processamento (ZTA)
	t	t	t	t	t	t
1	22205	18065	22170	18105	20040	22895
2	21725	20140	25250	20325	19905	21895
3	25960	23195	26690	18330	19475	21510
4	25520	20070	24865	19450	18325	21115
5	24085	22305	25800	20300	21735	22345
6	25980	23285	24005	18855	21260	21440
7	26080	23105	24680	18795	20520	20885
8	23570	23185	24105	18930	21225	20185
9	24685	22185	24360	-	21415	21310
10	25265	23110	24410	-	21850	20505
Média	24508	21865	24634	19136	20575	21409
Desvio Padrão	1581	1811	1197	830	1134	818
t (mín.)	21725	18065	24005	18105	18325	20185
t (máx.)	26080	23285	26690	20325	21850	22895

ANEXO C – Média da microdureza Vickers por região microestrutural

MÉDIAS DE MICRODUREZA (HV)						
Região	AISI 304 com processamento (ensaio de usinabilidade a seco)		AISI 304 com processamento (ensaio de usinabilidade com fluido de corte)		AISI 304 Como recebido	
	Medida	Média por Região	Medida	Média por Região	Medida	Média por Região
ZTA	247,5	261,0	243,0	294,0	-	-
	233,5		213,5		-	
	241,5		222,0		-	
	263,5		231,0		-	
	305,0		245,0		-	
	307,0		285,5		-	
	294,0		271,5		-	
	317,0		277,0		-	
	291,5		275,5		-	
	299,5		260,0		-	
	319,5		275,5		-	
	299,5		271,5		-	
	307,5		259,0		-	
	337,0		306,5		-	
MB	274,5	254,0	282,5	292,0	294,0	306,0
	317,5		236,0		303,0	
	289,5		268,0		307,0	
	300,5		239,5		312,0	
	300,0		255,5		317,0	
	300,5		240,0		307,0	
	302,5		267,5		294,0	
	-		-		307,0	
	-		-		312,0	
	-		-		307,0	