

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

LUCIANO DE SOUZA

**Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos
tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis
austeníticos**

São Paulo

2006

LUCIANO DE SOUZA

**Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos
tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis
austeníticos**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia
Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientadora: Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado**

São Paulo

2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCIANO DE SOUZA

Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos em três aços inoxidáveis austeníticos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia
Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientadora: Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

Aprovado em: ____ / ____ / ____ .

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por serem os principais responsáveis pelo caminho por mim trilhado, desde o início de minha vida até o dia de hoje. Por terem me amado e me ensinado a amar.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Professora Dra. Izabel Fernanda Machado, por sua paciência, ensinamentos e dedicação.

Ao Professor Dr. João Paulo Marcicano por suas orientações indispensáveis.

Aos técnicos do Instituto Mauá de Tecnologia, especialmente, aos senhores: Adriano Gimenez, Genivaldo Lopes, Júlio César Teruel, Walter Teodoro da Silva; e as senhoras: Margarete Cristina Moreira e Silvia Coutinho pelo suporte sempre eficiente.

Aos técnicos do LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfície).

Ao colega Flávio Namura Macari pela colaboração na realização dos ensaios de torneamento e na análise dos resultados.

Aos meus amigos Fernando Malvezzi e Éd Cláudio Bordinassi pela presença marcante.

À minha esposa Andréia Aparecida Oliveira de Souza pelo apoio e compreensão.

E finalmente a Deus por minha saúde.

RESUMO

SOUZA, L. Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos. 2006. 129f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Este trabalho teve por objetivo estudar o efeito dos parâmetros de corte e dos tratamentos térmicos na usinagem de três aços inoxidáveis austeníticos (ABNT 303, 304 e 310). Estes aços apresentam mesma estrutura cristalina e microestrutura semelhante. O aço ABNT 303 tem composição próxima ao ABNT 304, exceto pelo elevado teor de enxofre. Já o aço ABNT 310 apresenta maiores teores de elementos de ligas. Esses materiais foram tratados termicamente (solubilização ou envelhecimento). Os aços estudados foram caracterizados microestruturalmente e foram realizadas medidas de dureza Vickers. Os aços foram então torneados em várias condições de usinagem, variando principalmente a relação avanço por profundidade de corte. Foram medidas as forças de corte e de avanço em algumas das condições e coletados os cavacos resultantes para análise morfológica, que foram realizadas utilizando-se principalmente microscopia óptica e eletrônica de varredura. Foram também medidas as rugosidades e determinados os perfis das superfícies usinadas para a avaliação do acabamento superficial. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram determinar algumas diferenças no comportamento dos três aços inoxidáveis estudados. As maiores diferenças foram verificadas quando as superfícies foram observadas utilizando microscopia. O aço ABNT 303 apresentou as piores superfícies e os menores esforços de corte em relação aos aços ABNT 304 e 310. A utilização de diferentes ferramentas neste trabalho mostrou influência principalmente na formação do cavaco, não tendo muita influência nos esforços de corte e tão pouco no acabamento superficial. Os tratamentos térmicos realizados propiciaram a formação de outras fases, as quais causaram alterações na microestrutura. No entanto, esses tratamentos térmicos não alteraram de forma significativa o processo de torneamento. Finalmente, a formação de martensitas induzidas por deformação foi identificada no cavaco, mas não pode ser quantificada.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento. Tratamento térmico. Aços inoxidáveis austeníticos

ABSTRACT

SOUZA, L. **Evaluation of cutting parameters and heat treatments in the turning process of three austenitic stainless steels**. 2006. 129f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

The main objective of this work is to study and evaluate the effect of cutting parameters, the cutting tool and the heat treatments in the turning process of three different types of austenitic stainless steels (ABNT 303, 304 e 310). The steels studied are structurally and microstructurally comparable. The chemical composition of the ABNT 303 and the ABNT 304 is similar except for the presence of sulfur in the ABNT 303 steel which allows the manganese sulfide formation. On the other hand, the ABNT 310 steel is richer in alloying elements and has lower tendency to strain induced martensite formation than the other steels studied. The steels studied were also heat treated in different conditions (annealed and aged). The materials were microstructurally characterized and Vickers hardness was also measured. The turning tests were carried out by using different cutting parameters, mainly the feed-cutting depth relations. These relations lead to a plane state of tension or a plane state of deformation. The cutting and feed forces were measured during turning tests. During the tests the chips were also collected for morphological analysis through optical and scanning electron microscopies. The roughness and the surfaces characteristics were also determined to evaluate the surface finishing. The major difference in the steels turned was related to surface finishing observed by using optical and scanning electron microscopies. On the whole, the ABNT 303 steel presented the worst surface and the lowest cutting forces. However, the differences among all results were not significant. The tests carried out also showed there was not considerable difference between the tools used except for the chip morphology. The heat treatments led to precipitation in the steels studied and changes in their microstructure. However, the microstructural changes hardly affected the results of the turning tests. Finally, the martensite formation was detected although this phase could be not quantified.

Keywords: Machining. Turning. Heat treating. Stainless Steels

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Gráfico da produção brasileira de aço inoxidável (NUCLEO INOX, 2005).....	28
Fig. 2.2. Gráfico de consumo aparente de aço inoxidável no Brasil em kg por habitante por ano (NUCLEO INOX, 2005).....	28
Fig. 2.3 Consumo de aço inoxidável no Brasil em toneladas (NUCLEO INOX, 2005).....	29
Fig. 2.4 . Curva típica de tensão – deformação para os aços inoxidáveis ABNT 301 e ABNT 304 (ASM, 1987).....	33
Fig. 2.5. Curvas de precipitação de carbonetos para envelhecimento do aço ABNT 316	37
Fig. 2.6. Peça sendo torneada	38
Fig. 2.7. Movimentos no torneamento. (FERRARESI, 1977)	39
Fig. 2.8. Velocidades durante o torneamento de uma peça. (FERRARESI, 1977).....	40
Fig. 2.9. Nomenclatura de uma ferramenta de barra. (FERRARESI, 1977).....	42
Fig. 2.10. Ferramentas com pastilhas intercambiáveis. (a) fixação rígida, (b) fixação por alavanca, (c) fixação por cunha e grampo, (d) fixação por parafuso e grampo de topo, (e) fixação por parafuso (SANDVIK, 2005).....	43
Fig. 2.11. Pastilha com representação do quebra cavaco feito na forma de canal na superfície (SANDVIK, 2005)	43
Fig. 2.12. Formação de cavaco. (MAEKUUA; ITOU, 1995)	45
Fig. 3.1. (a) Porta ferramentas equipado com uma célula de carga. (b) aparato experimental	60
Fig. 3.2. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 303 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304.....	61
Fig. 3.3. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 304 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304.....	62
Fig. 3.4. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 310 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304.....	62
Fig. 3.5. Pastilhas de metal duro. À esquerda TCMT 160304 e a direita TPGN 160308	64
Fig. 3.6. Representação esquemática do ângulo de posição (χ_r) considerado.....	64

- Fig. 4.1 Microestruturas dos aços ABNT 303 (a), ABNT 304 (b) e ABNT 310(c) na forma como recebidos das seções transversais e longitudinais 71
- Fig. 4.2 Aço ABNT 303 como recebido (solubilizado) (a) e (b) sem ataque seções transversal e longitudinal respectivamente da barra e (c) e (d) com ataque seções transversal e longitudinal respectivamente da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II. As setas indicam alguns dos sulfetos presentes na microestrutura 72
- Fig. 4.3 Microestrutura do ABNT 304. Pontos amarelados são nitretos de titânio 73
- Fig. 4.4. Material aderido sobre superfície da ferramenta. A seta indica o material aderido na ferramenta 75
- Fig. 4.5 (a) Cavacos aderidos na superfície faceada próximo ao centro da peça . (b) Detalhe do cavaco aderido com maior aproximação. Velocidade de corte na região em torno de 25m/min para faceamento do aço ABNT 304. As setas indicam os cavacos aderidos na superfície 75
- Fig. 4.6. Aço ABNT 303 faceado com cavacos aderidos a superfície indicados pelas setas ... 78
- Fig. 4.7 - Superfícies usinadas dos aços ABNT 303, 304 e 310. Microscopia óptica. Primeira linha de imagens $a_p = 0,1\text{mm}$. Segunda linha de imagens $a_p = 0,2\text{ mm}$. Terceira linha de imagens $a_p = 0,4\text{ mm}$. Quarta linha de imagens $a_p = 0,6\text{ mm}$. Todas as superfícies $f = 0,2\text{ mm/rotação}$ e $V_c = 90\text{m/min}$ 86
- Fig. 4.8. Aço ABNT 304 usinado com $f/a_p = 0,3$. Detalhe de uma região onde aparecem deformações em sentido oblíquo indicadas pelas setas deixadas pela ponta da ferramenta 87
- Fig. 4.9. Cavacos produzidos durante a usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310. Primeira linha de imagens $a_p = 0,1\text{mm}$. Segunda linha de imagens $a_p = 0,2\text{mm}$. Terceira linha de imagens $a_p = 0,4\text{mm}$. Quarta linha de imagens $a_p = 0,6\text{mm}$. Todos os cavacos produzidos com $f = 0,2\text{mm/rotação}$ e $V_c = 90\text{m/minuto}$ 88
- Fig. 4.10. Perfis de rugosidade para diferentes relações f/a_p para usinagens dos três diferentes aços ABNT 303, 304 e 310 90
- Fig. 4.11. Representação esquemática em escala proporcional entre a estrutura de grão do aço ABNT 310 e a geometria da ferramenta, o f e a a_p 91
- Fig. 4.12. Seção do cavaco na região do raio de ponta limitada pelo perímetro de dois arcos de circunferência de raio r e com distância entre centros igual ao avanço f 95
- Fig. 4.13. Superfícies torneadas com $f = 0,1\text{mm/rot.}$, $a_p = 0,2\text{mm}$ e $V_c = 90\text{m/min}$. As imagens (a), (b) e (c) são as superfícies torneadas com ferramenta de metal revestida com TiN e com quebra cavacos dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente. As imagens (d), (e) e (f) são imagens das superfícies torneadas com ferramenta de metal duro sem revestimento e sem quebra cavaco dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente. 99
- Fig. 4.14. Cavacos gerados com $f = 0,1\text{mm/rot.}$, $a_p = 0,2\text{mm}$ e $V_c = 90\text{m/min}$. As imagens (a), (b) e (c) são os cavacos gerados com ferramenta de metal revestida com TiN e com quebra

cavacos dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente. As imagens (d), (e) e (f) são os cavacos gerados com ferramenta de metal duro sem revestimento e sem quebra cavaco dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente.	100
Fig. 4.15. Aço 303 solubilizado a 1050°C por 1 hora e resfriado em água. (a) seções transversal e (b) seção longitudinal da barra. Ataque: Behara II.....	102
Fig. 4.16. Aço 310 solubilizado a 1050°C por 1 hora e resfriado em água. Seção transversal da barra, mostrando precipitação. Ataque: Behara II.....	103
Fig. 4.17. Aço 303 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção longitudinal da barra, (c) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II. Seta azul indica sulfeto e seta verde precipitação em contornos de grão.	104
Fig. 4.18. Aço 304 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção e longitudinal da barra e (c) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II. Seta seta verde precipitação em contornos de grão.	105
Fig. 4.19. Aço 310 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção longitudinal da barra, (c) e (d) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II.	106
Fig. 4.20. Difratoograma da superfície usinada do aço 303 como recebido. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês, N indica diferentes nitretos e C diferentes carbonetos.	107
Fig. 4.21. Difratoograma da superfície usinada do aço 304 como recebido. CuK α . A indica austenita.	107
Fig. 4.22. Difratoograma da superfície usinada do aço 310 como recebido. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês e C diferentes carbonetos.	108
Fig. 4.23. Difratoograma da superfície usinada do aço 303 envelhecido a 800°C. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês, N indica diferentes nitretos e C diferentes carbonetos.	108
Fig. 4.24. Difratoograma da superfície usinada do aço 304 envelhecido a 800°C. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês e C diferentes carbonetos.	109
Fig. 4.25. Difratoograma da superfície usinada do aço 310 envelhecido a 800°C. CuK α . A indica austenita, e C diferentes carbonetos.	109
Fig. 4.26. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 303: (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas. MEV elétrons secundários. (e) micrografia do aço ABNT 303 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II.	114
Fig. 4.27. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 304: (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas. MEV elétrons secundários. (e) micrografia	

do aço ABNT 304 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II. 115

Fig. 4.28. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 310 (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas, respectivamente. MEV elétrons secundários. (e) micrografia do aço ABNT 310 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II..... 116

Fig. 4.29. Superfícies após torneamento dos aços ABNT 303, 304 e 310 tratados termicamente 117

Fig. 4.30. Cavacos após torneamento dos aços ABNT 303, 304 e 310 tratados termicamente 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção mundial bruta de aço inoxidável em milhões de toneladas (NUCLEO INOX, 2005).....	27
Tabela 2.2 - Comparação de propriedades mecânicas de alguns materiais (PADILHA; GUEDES, 1994).....	32
Tabela 2.3 – Coeficiente de encruamento de alguns materiais (HERTZBERG, 1995)	33
Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas dos aços ABNT 303, 304 e 310 (ASM, 1987).....	34
Tabela 2.5 - Propriedades físicas dos aços ABNT 303, 304 e 310 (ASM, 1987). Os valores 100, 315 e 538 indicados para os coeficientes médios de expansão térmica indicam as faixas de temperaturas em °C onde os valores desses coeficientes são válidos. Os valores 100 e 500 indicados para a condutividade térmica também indicam as faixas de temperaturas em °C onde os valores da condutividade térmica são válidos	35
Tabela 2.6 - Modelos de planos de cisalhamento (SHAW, 1984). Onde ϕ_0 é o ângulo de cisalhamento, β e μ são parâmetros relacionados com a força de atrito, γ_0 é o ângulo de saída da ferramenta e k é um coeficiente empírico	45
Tabela 2.7 - Velocidades de corte para aços inoxidáveis. (ASM, 1987).....	51
Tabela 3.1 - Composição química do aço ABNT 304 utilizado em ensaios preliminares	57
Tabela 3.2 - Composição química dos aços ABNT 303, 304 e 310.....	57
Tabela 3.3- Calibração do dinamômetro	60
Tabela 3.4 – Tabela de ferramentas utilizadas e posicionamento durante a usinagem	63
Tabela 3.5 – Condições de ensaios realizados. Onde χ_r é o ângulo de posição da ferramenta, γ_0 é o ângulo de saída ortogonal da ferramenta, α_0 é o ângulo de folga ortogonal da ferramenta, Rev. se possui revestimento, Q.C. se possui quebra cavacos, V_c é a velocidade de corte em m/minutos f é o de avanço em mm/rotação e a_p é a profundidade de corte em mm	65
Tabela 4.1 – Dureza Vickers carga de 300 N (HV 30) dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 303, 304 e 310 estudados como recebidos.....	73
Tabela 4.2- Faceamento do aço ABNT 304 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308 . Os parâmetros de rugosidades utilizados foram: média aritmética (Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)	77
Tabela 4.3- Faceamento do aço ABNT 303 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308. Os parâmetros de rugosidades utilizados foram: média aritmética	

(Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)	78
Tabela 4.4- Faceamento do aço ABNT 310 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308. Os parâmetros de rugosidades utilizados foram: média aritmética (Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)	79
Tabela 4.5 – Parâmetros de usinagem utilizados em torneamento nos três aços estudados.....	82
Tabela 4.6 – Influência da relação f/a_p na rugosidade superficial	84
Tabela 4.7- Usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310 com 0,2mm de avanço	85
Tabela 4.8-Resultados das forças de corte para os corpos de prova dos aços ABNT 303, 304 e 310 com diferentes profundidades de corte e avanço de 0,2 mm/volta	92
Tabela 4.9- Pressão específica de corte para os aços ABNT 303, 304 e 310 como recebidos.	93
Tabela 4.10-Usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310 com 0,1mm de avanço	95
Tabela 4.11 – Esforços de corte para torneamento dos três aços estudados com avanço de 0,1mm e profundidade de 0,2mm. MD representa ferramenta plana de metal duro sem quebra cavacos e sem revestimento. TiN representa a ferramenta com quebra cavacos e com revestimento. σ é o desvio padrão Raio de ponta de 0,4mm.....	96
Tabela 4.12 – Pressão específica de corte com duas ferramentas diferentes.	97
Tabela 4.13- Rugosidade Ra para torneamento com $f=0,1\text{mm/rot}$, $a_p = 0,2\text{mm}$ e $V_c = 90\text{mm/min}$ com ferramentas de 0,4mm de raio de ponta. MD é metal duro sem revestimento e sem quebra cavacos e TiN é metal duro com quebra cavacos e com revestimento	98
Tabela 4.14. Dureza Vickers (HV 30) na seção transversal e longitudinal das barras usinadas	110
Tabela 4.15-Parâmetros de corte utilizados para usinagem dos materiais estudados após serem tratados termicamente.....	111
Tabela 4.16- Forças de corte e de avanço nos materiais tratados termicamente. F_c = força de corte, F_f = força de avanço e σ = desvio padrão	112
Tabela 4.17- Rugosidade para torneamento após tratamentos térmicos.	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1. Comparação de rugosidades Ra com a variação da velocidade de corte e do material. Ra é a rugosidade média aritmética.....	81
Gráfico 4-2. Comparação de rugosidades Rp com a variação da velocidade de corte e do material. Rp é a rugosidade altura de pico.	81
Gráfico 4-3. Variação da rugosidade Ra em função do avanço e da profundidade de corte para torneamento do aço ABNT 304 com ferramenta de metal duro e com raio de ponta de 0,8mm com $\chi_r=90^\circ$	84
Gráfico 4-4. Variação da força de corte com o aumento da profundidade de corte para os três aços estudados	92
Gráfico 4-5. Variação da pressão específica de corte para os aços ABNT 303, 304 e 310 como recebido. Para ensaios de torneamento com $f = 0,2\text{mm}$, $V_c = 90 \text{ m/min}$ e $a_p = 0,1 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$, $0,4 \text{ mm}$ e $0,6\text{mm}$	94
Gráfico 4-6. Variação dos esforços de corte devido a existência de quebra cavacos e revestimento de TiN na ferramenta de corte	96
Gráfico 4-7. Variação da pressão específica de corte para duas diferentes ferramentas. Um com quebra cavaco e com revestimento e outra sem ambos.	97
Gráfico 4-8. Rugosidade Rt para os diferentes tratamentos térmicos	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta postiça de corte
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFC	Cúbica de Face Centrada
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Fig.	Figura
JIS	Japanese Industrial Standards
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MD	Metal duro
MDI	Martensitas induzidas por deformações
Min.	Minuto
Mov.	Movimento
Q.C	Quebra cavaco
Rc	Recalque do cavaco
Rev.	Revestimento
RPM	Rotação por minuto
SBMM	Sociedade Brasileira de Metalografia e Microanálise
SPIP	Scanning Probe Image Processor
TTT	Diagrama de Tempo Temperatura Transformação

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}$	Grau
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
Fe	Ferro
Cr	Cromo
Ni	Níquel
O	Oxigênio
γ	Estrutura cúbica de face centrada
Mo	Molibdênio
Ti	Titânio
n	Coefficiente de encruamento
σ	Tensão verdadeira
ε	Deformação plástica
k	Constante do material para uma deformação verdadeira de 1,0
Md10/45 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura na qual ocorre 10% de formação de martensita após uma deformação verdadeira de 45% em compressão
Mn	Manganês
$^{\circ}\text{F}$	Grau Farenhaint
a_p	Profundidade de corte
φ	Ângulo entre a direção da velocidade de corte e a direção da velocidade de avanço
η	Ângulo entre a direção da velocidade de corte e a direção da velocidade efetiva de corte
V_c	Velocidade de corte
V_e	Velocidade efetiva de corte
V_f	Velocidade de avanço
ϕ_0	Ângulo de cisalhamento
β e μ	Coefficiente de atrito
γ_0	Ângulo de saída da ferramenta
HB	Dureza Brinell
Ra	Rugosidade média aritmética
Ry	Rugosidade máxima altura

Rz	Rugosidade máxima altura (5 picos e 5 vales)
Rq	Rugosidade média quadrática
Rt	Rugosidade total
Rp	Rugosidade de altura de pico
r_n	Raio de ponta de ferramenta
A	Austenita
C	Carbono
Si	Silício
S	Enxofre
P	Fósforo
χ_r	Ângulo de posição
α_0	Ângulo de folga
f	Avanço
λ_c	Cut-off
MD largo	Sistema de polimento Struers
MD allegro	Sistema de polimento Struers
HV 30	Dureza Vickers com carga de 300N
Fc	Força de corte
ks	Coefficiente de pressão específica
TiN	Nitreto de titânio
Ff	Força de avanço
ε_0	Deformação por cisalhamento do cavaco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.	26
2.1	Pequeno histórico sobre aços inoxidáveis.....	26
2.1.1	Produção mundial	27
2.1.2	Produção e consumo nacional	28
2.1.3	Aplicação dos aços inoxidáveis.	29
2.1.3.1	Aplicação dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 303, 304 e 310	29
2.2	Aços inoxidáveis austeníticos.....	30
2.2.1	Propriedades	32
2.2.1.1	Propriedades mecânicas.....	34
2.2.1.2	Propriedades físicas.....	35
2.2.2	Algumas transformações de fases em aços inoxidáveis austeníticos.....	36
2.2.2.1	Efeito da deformação	36
2.2.2.2	Efeito da temperatura	37
2.3	Processo de torneamento.....	38
2.3.1	Ferramentas de corte.....	41
2.3.2	Formação de cavaco	44
2.3.3	Esforços de corte.....	46
2.3.3.1	Pressão específica de corte (Ks).....	47
2.3.4	Usinabilidade.....	47
2.4	Usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos	48
2.4.1	Parâmetros de corte recomendados para usinagens de aços inoxidáveis.....	51
2.5	Métodos de avaliar a usinabilidade.....	51
2.5.1	Emissão acústica	52
2.5.2	Características da superfície gerada.....	52
2.5.2.1	Importância da superfície	53
2.5.2.2	Metodologias de avaliação da superfície gerada.....	54
2.5.2.2.1	Rugosidade superficial	54
2.5.2.2.2	Microscopia	55

3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Materiais.....	57
3.2	Metodologia.....	58
3.2.1	Tratamentos térmicos.....	58
3.2.2	Usinagem	59
3.2.2.1	Equipamentos	59
3.2.2.1.1	Esforços de corte.....	59
3.2.2.2	Ferramentas de corte.....	63
3.2.2.3	Parâmetros de usinagem no torneamento e faceamento.....	65
3.2.2.3.1	Torneamento de cilindramento	66
3.2.2.3.2	Torneamento de faceamento	67
3.2.3	Caracterização da superfície	67
3.2.3.1	Rugosidade superficial	68
3.2.3.2	Microscopia	68
3.2.3.3	Difração de raios x.....	69
3.2.3.4	Dureza.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Efeito dos parâmetros de corte.....	70
4.1.1	Caracterização dos materiais como recebido.....	70
4.1.2	Microestrutura.....	70
4.1.3	Microdureza Vickers.....	73
4.1.4	Faceamento - Efeito da velocidade de corte	74
4.1.4.1	Efeito da velocidade de corte no aço ABNT 304 (ensaios preliminares)	74
4.1.4.2	Efeito da velocidade de corte nos aços ABNT 304, 303 e 310	76
4.1.5	Torneamento: efeitos da relação f/a_p e da ferramenta.....	82
4.1.5.1	Efeito da relação f/a_p para o aço ABNT 304 (ensaios preliminares)	82
4.1.5.2	Efeito da relação f/a_p para os aços ABNT 303, 304 e 310.....	85
4.1.5.3	Efeito da ferramenta	95
4.2	Efeito dos tratamentos térmicos.....	101
4.2.1	Caracterização dos materiais após tratamentos térmicos	101
4.2.1.1	Microestrutura após tratamento térmico.....	102
4.2.1.2	Efeito dos tratamentos térmicos na precipitação	106

4.2.1.3	Dureza após tratamento térmico.....	110
4.2.2	Torneamento após tratamento térmico	111
4.2.2.1	Esforços de corte após tratamentos térmicos.....	111
4.2.2.2	Acabamento superficial após tratamentos térmicos.....	112
5	CONCLUSÕES.....	120
6	TRABALHOS FUTUROS.....	122
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

Quando se projeta um componente ou peça, o material do qual ele deverá ser fabricado, assim como os processos de fabricação necessários para sua geração, são fundamentais para o funcionamento do mesmo ao longo de sua vida útil. Assim ao se projetar uma peça espera-se obter requisitos mínimos necessários para sua aplicação em um conjunto, em um sistema ou ainda como um utensílio. Dentre os requisitos necessários podemos citar: a precisão dimensional, a qualidade superficial, a resistência mecânica, a resistência à corrosão, resistência à oxidação e em alguns casos, a condutividade elétrica. Os primeiros requisitos descritos estão ligados aos processos de fabricação e os últimos às propriedades do material.

Dentre os processos de fabricação, os de usinagem estão entre os mais importantes. Os processos de usinagem consistem em operações que ao conferir à peça sua forma, dimensões e acabamento geram cavacos (FERRARESI, 1977). A produtividade e qualidade de um processo de usinagem dependem de vários fatores, tais como: usinabilidade dos materiais, potência e rigidez de equipamentos, ferramentas de corte, morfologia de cavacos, lubrificação e refrigeração. Por esse motivo, inúmeros trabalhos foram e são realizados para melhorar a produtividade e a qualidade dos processos de usinagem. Alguns destes trabalhos estudam: comportamento dos materiais usinados (AKASAWA et al., 2003; CHIEN; CHOU, 2001; CHIEN; TSAI, 2003; GHANI; CHOUDHURY; HUSNI, 2002; HUNG; FU, 2000; JANG et al., 1996a; KOPAC, 2001; MENDEZ, 1999; SAOUBI et al., 1999; SEKER; ÇİFTÇİ; HASIRCI, 2003; SLOCOMBE; LI, 2000; SULLIVAN; COTTERELL, 2002; WANG; CHEN, 2001), rigidez dos equipamentos (THOMAS et al., 1996), desgaste de ferramentas (BONIFÁCIO; DINIZ, 1994; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; QI; MILLS, 2000; ROCHA, 2004; SIKDAR; CHEN, 2002; WANG; HUANG; SONG, 2003), geometria de ferramenta (CHANG, 1998; MESQUITA; SOARES; MARQUES, 1996; THIELE;

MELKOTE, 1999; YEN; JAIN; ALTAN, 2004), forma do cavaco (ASTAKOV; SHVETS; OSMAN, 1997; BOUZAKIS; AICHOUH; EFSTATHIOU, 2003; CHOI; LEE, 2001), força de corte (PARK et al, 1998; RAO; SHIN, 1999), rugosidade superficial (BIGERELLE; NAJJAR; IOST, 2003; JANG et al., 1996b; LIN; LEE; WU, 2001; RISBOOD; DIXIT; SAHASRABUDLHE, 2003; SEKER; ÇIFTÇI; HASIRCI, 2003; THOMAS et al., 1996), condição de lubrificação (MAMALIS; KUNDRASK; GYANI , 2002; XINGZHONG et al., 1999), dispositivos para monitoramento (DIMLA; LISTER, 2000; DIMLA, 2000); DIMLA, 2002; TEKINER; YESILYURT, 2004; STRAFFORD; AUDY, 1997), distribuição de temperatura (MILLER; MULHOLLAND; ANDERSON, 2003), condições econômicas (LIANG; MGWATU; ZUO, 2001), modelos matemáticos (GUO, 2003; KULKARNI; MARIAPPAN, 2003), entre outros. Dentre os diversos fatores que influenciam os processos de usinagem, a usinabilidade é um fator diferenciado, pois apesar de ser uma propriedade tecnológica específica de cada material, sofre influência direta dos processos de usinagem empregados (FERRARESI, 1977; SHAW, 1984). Na medida em que os processos de usinagem apresentam variáveis tais como: parâmetros de corte, ferramentas de corte, equipamentos, lubrificantes e refrigerantes; a indicação da usinabilidade de um determinado material deve ser feita levando-se em consideração a situação sob qual ela foi avaliada. Dessa forma pode-se afirmar se um material é melhor ou pior do que outro de ser usinado.

Os lubrificantes e os refrigerantes, na medida do possível devem ser evitados por serem poluentes e prejudiciais a saúde do operador da máquina. No entanto, existem situações nas quais os lubrificantes são indispensáveis, pois prolongam a vida da ferramenta e garantem a qualidade dos produtos usinados.

As máquinas também devem ser rígidas e potentes o suficiente para garantir a qualidade dos produtos e tempos de fabricação aceitáveis. As ferramentas devem ser escolhidas adequadamente para cada tipo de material usinado e produtividade desejada. Os

parâmetros de corte devem ser selecionados de maneira a satisfazer a produtividade e a qualidade aliado aos custos de fabricação. Dentre os parâmetros de corte pode-se destacar a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte. Essas três grandezas da usinagem estão diretamente ligadas ao volume de material retirado por unidade de tempo, como também com a qualidade do produto gerado. Assim a escolha desses parâmetros é essencial para os processos de usinagens serem eficientes (FERRARESI, 1977; SHAW, 1984).

Além do processo de fabricação empregado na produção de uma peça, os requisitos mecânicos devem ser atendidos, para isso a escolha do material é fundamental. Dentre os diversos materiais utilizados na indústria, existem os aços inoxidáveis austeníticos. Esses materiais possuem propriedades excelentes para aplicação em indústrias químicas, alimentícias e de equipamentos eletrônicos, por serem materiais capazes de suportar solicitações em meios agressivos e por serem não-magnéticos. O aço inoxidável ABNT 303, por exemplo, é um material largamente utilizado na fabricação de peças para indústria eletrônica e automotiva (SULLIVAN; COTTERELL, 2002). Os aços inoxidáveis são divididos em diferentes grupos, os quais estão relacionados com sua microestrutura. Esses grupos são: ferríticos, martensíticos e austeníticos (endurecidos ou não por precipitação) (ASM, 1987). Existem ainda aços inoxidáveis que apresentam uma microestrutura formada por ferrita e austenita, sendo classificados como dúplex (MONLEVADADE, 2002). Os aços inoxidáveis ferríticos são considerados aços de boa usinabilidade; os martensíticos apresentam usinabilidade um pouco pior e os austeníticos são os aços inoxidáveis que apresentam a pior usinabilidade em relação aos anteriores, devido ao seu elevado encruamento durante o processo de corte (ASM, 1987; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; STEEL EXPORT, 1950; SULLIVAN; COTTERELL, 2002).

Os principais problemas relacionados com a usinagem dos aços inoxidáveis são: desgaste de ferramenta, acabamento superficial de baixa qualidade, cavacos longos e utilização de baixas velocidades de corte (ASM, 1987; FANG; ZHANG, 1996; JANG et al., 1996a; JANG et al., 1996b; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; SULLIVAN; COTTERELL, 2002; SAOUBI et al., 1999). Esses problemas são atribuídos à alta taxa de encruamento, baixa condutividade térmica e modificações microestruturais na superfície. (FANG; ZHANG, 1996; JANG et al., 1996a; JANG et al., 1996b; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; SULLIVAN; COTTERELL, 2002; SAOUBI et al., 1999). Por esses aços apresentarem usinabilidade ruim, a melhoria em suas condições de usinagem é uma atividade importante, especialmente nos dias de hoje, quando um volume muito grande de produção é requerido (SULLIVAN; COTTERELL, 2002). A usinabilidade desses aços pode, por exemplo, ser melhorada com adição de enxofre que propicia a formação de inclusões de sulfeto de manganês, o que facilita a quebra do cavaco (MACHADO et al, 2003), além de atuar como lubrificante (LACOMBE; BAROUX; BERANGE, 1993). No entanto, a adição de enxofre altera suas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (MACHADO et al, 2005). Esses aços ainda podem ser tratados termicamente por solubilização ou envelhecimento. A solubilização quando feita em um aço inoxidável austenítico torna sua estrutura mais homogênea e favorece o crescimento de grão, o envelhecimento pode promover a precipitação nos contornos de grãos. Esses tratamentos térmicos podem ou não afetar a usinabilidade desses materiais.

Pelo apresentado anteriormente a respeito da importância dos processos de fabricação e dos materiais utilizados. Esse trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos dos parâmetros de corte e dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento em processo de fabricação por usinagem em torneamento de três diferentes aços inoxidáveis austeníticos (ABNT 303, 304 e 310). O aço ABNT 303 tem composição próxima do ABNT 304 exceto

pelo seu elevado teor de enxofre. Já o aço ABNT 310 apresenta teores mais elevados de elementos de liga como o cromo e o níquel, que melhoram a sua resistência a corrosão e a oxidação.

O trabalho experimental foi dividido em duas partes. Inicialmente, foram avaliados os efeitos dos parâmetros de usinagem. Posteriormente, foram avaliados os efeitos dos tratamentos térmicos (solubilização e envelhecimento). A análise dos resultados foi realizada com base na microestrutura, nos esforços de corte e nas superfícies geradas.

Na seqüência deste texto é apresentada a revisão da literatura focada na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos. Onde é apresentada uma revisão a respeito de aços inoxidáveis auteníticos e sobre processos de usinagem por torneamento. A seguir são apresentados os materiais e os métodos utilizados. Após esses são apresentados os resultados e discussões seguidos das conclusões e sugestões para trabalhos futuros. E por fim são apresentadas as referências utilizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA.

Nas seções seguintes serão abordados assuntos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho, buscando informações necessárias à compreensão dos fenômenos relacionados com a usinagem de aços inoxidáveis austeníticos. No início desta revisão será feita uma abordagem sucinta da importância dos aços inoxidáveis austeníticos em engenharia, além de informações recentes de sua produção e consumo, mundial e nacional, respectivamente. Na seqüência serão abordados aspectos relevantes aos processos de usinagem.

2.1 Pequeno histórico sobre aços inoxidáveis

Foram desenvolvidas ligas na primeira década do século XX que apresentavam comportamento de difícil compreensão, pois se aquecendo duas ligas semelhantes em altas temperaturas (1.000 °C) e resfriando-as rapidamente, eram obtidas duas microestruturas completamente diferentes, uma com alta dureza (ABNT 420) e outra com ótima ductilidade (ABNT 302). Essas ligas foram conhecidas posteriormente como aços inoxidáveis e o grande impulso na produção de aços inoxidáveis ocorreu durante a 2ª guerra mundial, desde então os aços inoxidáveis vêm sendo cada vez mais aprimorados, principalmente em função da sua aplicação na indústria petrolífera, aeronáutica e em criogênia. (PADILHA; GUEDES, 1994); (TEBECHERANI,2004).

Até o início do século XX os produtos fabricados em aço não possuíam resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis ferríticos, que eram muito resistentes à corrosão surgiram em 1911 nos Estados Unidos, quando Christiam Dantsizen inicia seus experimentos com ligas contendo de 14% a 16% de cromo e baixo teor de carbono (PADILHA; GUEDES, 1994). Em 1912 o inglês Harry Brearly, ao estudar uma liga com 12,8% de cromo e 0,24% de carbono na

Inglaterra, verificou durante algumas observações; utilizando microscopia óptica, de uma liga preparada metalograficamente, que ela não reagia com a maior parte dos reagentes utilizados na época. Este trabalho propiciou o desenvolvimento dos aços inoxidáveis martensíticos (PADILHA; GUEDES, 1994). Na mesma época na Alemanha, Eduard Maurer, estudou uma liga Fe-Cr que também continha cerca de 8% de Ni, dando origem aos aços inoxidáveis austeníticos (PADILHA; GUEDES, 1994). Atualmente esses materiais têm sido cada vez mais utilizados, como pode ser verificado a seguir.

2.1.1 Produção mundial

A produção dos aços inoxidáveis tem crescido significativamente nos últimos anos devido à grande aplicação dos mesmos em diferentes segmentos da indústria tais como: a indústria química, a de alimentos e a farmacêutica (ANDRADE, 2004). A Tabela 2.1 apresenta a produção mundial de aço inoxidável em diferentes regiões do mundo entre 2001 e 2004. Nota-se que em 2 (dois) anos a produção aumentou cerca de 19%, passando de 19.185 milhões de toneladas em 2001 para 22.828 milhões de toneladas em 2003 e no último ano avaliado aumentou 6,8%, atingindo a marca de 24.350 milhões de toneladas produzidas no ano de 2004.

Tabela 2.1 – Produção mundial bruta de aço inoxidável em milhões de toneladas (NUCLEO INOX, 2005)

Região	2001	2002	2003	2004	Variação % de 2003 para 2004
Europa Ocidental / África	8 210	8 628	9 055	9 650	6,6
Américas	2 306	2 750	2 851	3 000	6,0
Ásia	8 404	9 049	10 345	11 400	7,1
Europa Leste	265	252	277	300	8,3
Total Mundo	19 185	20 679	22 828	24 350	6,8

Fonte: International Stainless Steel (NUCLEO INOX, 2005)

2.1.2 Produção e consumo nacional

A Fig. 2.1 apresenta a produção brasileira em toneladas de aço inoxidável dos anos de 1998 a 2004, separadas em materiais considerados planos (chapas e bobinas) e longos (tarugos e perfis).

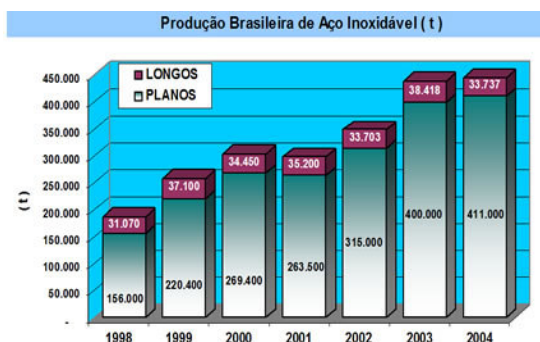


Fig. 2.1. Gráfico da produção brasileira de aço inoxidável (NUCLEO INOX, 2005)

Pelos dados apresentados na Tabela 2.1 e na Fig. 2.1 pode-se verificar que a produção brasileira em 2004 de 411.000 toneladas de produtos planos e 33.737 toneladas de produtos longos representou cerca de um sétimo da produção das Américas de 3.000.000 toneladas. A Fig. 2.2 mostra a relação entre a quantidade de aço consumida no Brasil entre os anos de 1998 e 2004 e a população existente na época de cada avaliação de consumo. Pode ser observado um crescimento do consumo entre 1998 e 2000, uma estabilização com pequenas variações de 2000 a 2003 e um novo crescimento em 2004. A Fig. 2.3 mostra o consumo em toneladas do mercado brasileiro.

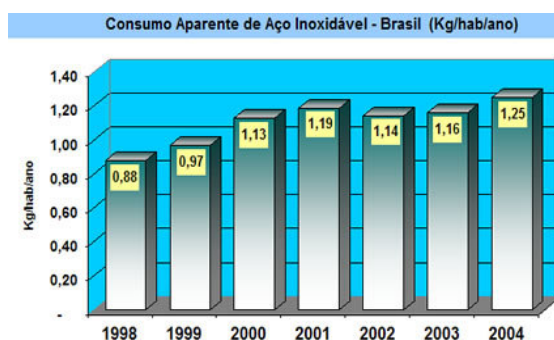


Fig. 2.2. Gráfico de consumo aparente de aço inoxidável no Brasil em kg por habitante por ano (NUCLEO INOX, 2005)

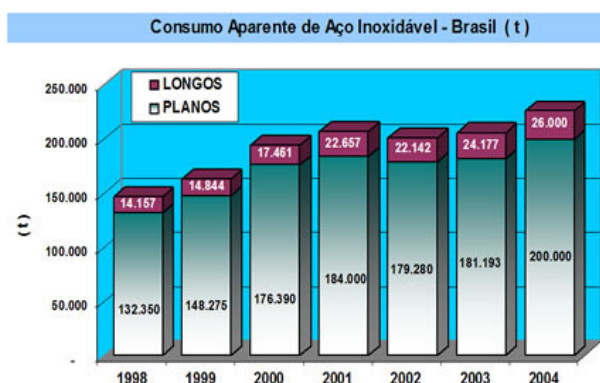


Fig. 2.3 Consumo de aço inoxidável no Brasil em toneladas (NUCLEO INOX, 2005)

2.1.3 Aplicação dos aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis, de maneira geral, são aplicados em locais onde existe a necessidade de resistência à corrosão aliada com resistência mecânica e em casos de temperaturas elevadas. Além disso, os aços inoxidáveis são de fácil limpeza e manutenção, podem ser soldados, reciclados, além de apresentar bom aspecto. Por essas características, que vão além da resistência à corrosão, os aços inoxidáveis são amplamente empregados pela sua aparência e facilidade de higienização em: cutelaria, construção civil, indústria química, indústria alimentícia, móveis, moedas, hospitais e bens de consumo duráveis. Os aços inoxidáveis austeníticos são aplicados também nas indústrias eletrônica e aeronáutica por não apresentarem ferromagnetismo (AKASAWA, 2003).

2.1.3.1 Aplicação dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 303, 304 e 310

As aplicações típicas dos aços ABNT 303, 304 e 310 são as seguintes (TEBECHERERANI, 2004). **ABNT 303**: Ferragens; eixos; cabos; fechaduras; componentes de aeronaves; buchas; parafusos e outros equipamentos de máquina ferramenta. Esses aços

apresentam elevados teores de enxofre e são considerados aços de fácil usinabilidade (MACHADO et al., 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI,2000). **ABNT 304:** Utensílios domésticos; fins estruturais; equipamentos para indústria química e naval; indústria farmacêutica; indústria têxtil; indústria de papel e celulose; refinaria de petróleo; permutadores de calor; válvulas e peças de tubulações; indústria frigorífica, instalações criogênicas; equipamentos para indústria alimentícia; cúpula para casa de reator de usina atômica; equipamentos e recipientes para usinas nucleares; carros ferroviários e calhas. **ABNT 310:** Aquecedores de ar; caixas de recozimento; estufa de secagem; anteparos de caldeira de vapor; caixa de decantação; equipamentos para fábrica de tinta; suportes para abóbada de forno; fornos de fundição; revestimento de fornos; componentes de turbinas a gás; trocadores de calor; equipamentos de refinaria de petróleo; tubulação de soprador de fuligem; chapas para fornalha; chaminés e comportas de chaminés de fornos; conjuntos de diafragmas dos bocais para motores turbo jato; painéis de cristalização de nitratos e equipamentos para usina de papel.

2.2 Aços inoxidáveis austeníticos

A expressão aço inoxidável, como é usualmente conhecida, nos dá uma idéia de um material que não se deteriora mesmo quando utilizado em meios agressivos. Isso não é verdade, pois embora esse material apresente uma maior resistência à corrosão em meio ou agente agressivo em relação aos aços carbono, essa resistência é limitada, por exemplo, em meios ricos em cloro (Van VLACK, 1970). Esse material também possui maior resistência à oxidação em altas temperaturas em relação a outras classes de aços. Neste caso em particular são classificados como: “*heat-resisting alloys*”, ou seja, ligas resistentes em altas temperaturas, ou ligas refratárias (ASM, 1987). A resistência à corrosão e à oxidação dos aços

inoxidáveis se deve à presença de proteção por passivação, onde o oxigênio pode reagir com os íons de cromo do aço inoxidável formando uma camada protetora sobre o material. (Van VLACK, 1970). Essa camada passivadora é resultante da reação (1) (PADILHA; GUEDES, 1994; Van VLACK, 1970) apresentada a seguir.



Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro que contêm teores de cromo acima de 10% (ASM, 1987), sendo necessário no mínimo 12% de cromo para ocorrer uma passivação efetiva (PADILHA; GUEDES, 1994). Eles são, em geral, classificados em função de sua estrutura cristalina e microestrutura, a saber: ferríticos, austeníticos, martensíticos, dúplex (ferríticos-austeníticos) e endurecíveis por precipitação (PECKENER, 1977). Dentre esses tipos, o mais utilizado é o austenítico representando mais de dois terços da produção (MACHADO, 2005). A estrutura presente nos aços inoxidáveis austeníticos é a austenita, ou seja, uma estrutura cúbica de faces centradas CFC também chamada de γ (gama), que é dúctil. A austenita não apresenta ferromagnetismo em nenhuma temperatura (CAVALLO, 2005; VLACK, 1970).

Os aços inoxidáveis austeníticos incluem uma ampla gama de composições químicas. Os teores de cromo nesses aços variam de 15 a 26% e os de níquel de 3,5 a 38% em massa (MACHADO et al., 2005). O níquel é estabilizador da austenita (PADILHA; GUEDES, 1994). Os aços inoxidáveis austeníticos com maiores teores de níquel são requeridos onde há necessidade de melhores propriedades mecânicas e de resistência à oxidação (MACHADO et al., 2005). O manganês também tem efeito austenitizante e tem sido adicionado aos aços inoxidáveis como forma de diminuir os teores de níquel. No entanto, o manganês tem menor efeito austenitizante e na resistência à corrosão do que o níquel (PADILHA; GUEDES, 1994;

PECKENER, 1977). Existe também uma relação entre os elementos de liga, taxa de encruamento e a formação de martensitas induzidas por deformação (LACOMBE, 1993; MACHADO et al., 2005; PADILHA; GUEDES, 1994).

2.2.1 Propriedades

As propriedades mecânicas e físicas dos aços inoxidáveis austeníticos são influenciadas pela sua microestrutura, por exemplo, limite de escoamento, limite à resistência, alongamento, tenacidade, resistência à fadiga, resistência à fluência, resistência ao desgaste, resistência à corrosão e condutividade elétrica (PADILHA; GUEDES, 1994). A Tabela 2.2 apresenta os valores de algumas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, de um aço extra-doce (ABNT 1008) e de um outro de altíssima resistência do tipo maraging (18%Ni – 12%Cr- 4%Mo-1,6%Ti) (PADILHA; GUEDES, 1994). Observa-se que os aços inoxidáveis austeníticos apresentam grande ductilidade.

Tabela 2.2 - Comparação de propriedades mecânicas de alguns materiais (PADILHA; GUEDES, 1994)

Material	Limite de escoamento N/mm²	Limite de resistência N/mm²	Alongamento total %
Aços Inoxidáveis Austeníticos	200 a 250	450 a 750	35 a 45
ABNT 1008	180 a 200	300 a 320	30
18%Ni – 12%Cr- 4%Mo-1,6%Ti	+ 2300	+ 2300	10

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem particularidades do ponto de vista de seu comportamento mecânico. Esses aços têm sua resistência e dureza aumentada principalmente por trabalho a frio, diferentemente dos aços inoxidáveis martensíticos. A influência de tratamentos térmicos de envelhecimento não é marcante (ASM, 1987). Além disso, no mesmo

grupo de aços inoxidáveis austeníticos, o efeito da deformação pode ser bastante diferente nas propriedades mecânicas desses aços. A Fig. 2.4 mostra diferente comportamento de um aço ABNT 301 e 304 em função da deformação. Essa diferença está relacionada com o teor de carbono presente no material. O ABNT 301 possui 0,15% em massa de carbono e o ABNT 304 possui 0,08% em massa de carbono.

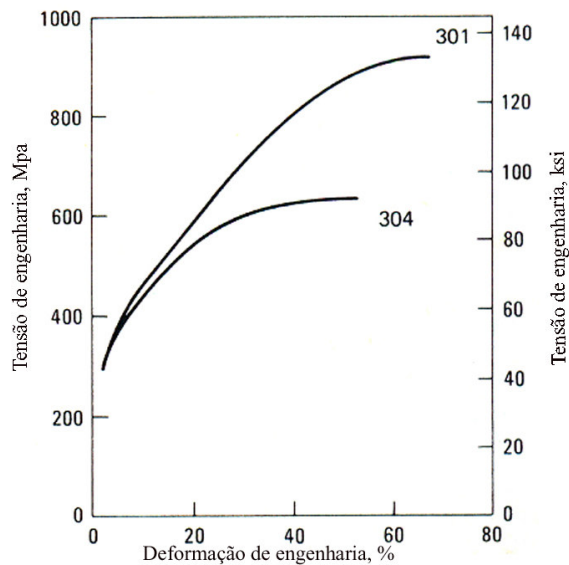


Fig. 2.4 . Curva típica de tensão – deformação para os aços inoxidáveis ABNT 301 e ABNT 304 (ASM, 1987)

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam elevados coeficientes de encruamento. A Tabela 2.3 mostra os coeficientes de encruamento de alguns materiais, entre eles os aços inoxidáveis.

Tabela 2.3 – Coeficiente de encruamento de alguns materiais (HERTZBERG, 1995)

Material	Coeficiente de encruamento, n
Aços Inoxidáveis	0,45 – 0,55
Bronze	0,35 – 0,40
Cobre	0,3 – 0,35
Alumínio	0,15 – 0,25
Ferro	0,05 – 0,15

A relação empírica (2) de Hollomon (HERTZBERG, 1995) mostra o efeito do coeficiente de encruamento (n) na tensão limite de escoamento.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2)$$

Onde σ é a tensão verdadeira, ε é a deformação plástica verdadeira, n é o coeficiente de encruamento e K é a constante do material definida para uma deformação real de 1,0.

Logo, pode-se concluir que o encruamento contribui para a elevação da tensão verdadeira. Esses dados confirmam que os aços inoxidáveis, em geral, são mais difíceis de serem usinados pelo elevado encruamento deste material.

2.2.1.1 Propriedades mecânicas

Dentre as propriedades mecânicas mais importantes estão o limite de resistência e o limite de escoamento. As propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2.4 referem-se aos aços ABNT 303, 304 e 310, na forma de barras redondas e após tratamento térmico de solubilização (ASM, 1987). Observa-se que os aços inoxidáveis austeníticos apresentam alongamento elevado, comprovando a ductilidade desses materiais.

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas dos aços ABNT 303, 304 e 310 (ASM, 1987).

Aço	Limite de resistência (tração)		Limite de escoamento 0,2%		Alongamento %	Redução de área %	Especificação ASTM
	MPa	ksi	MPa	ksi			
ABNT 303	585	85	240	35	50	55	A581
ABNT 304	515	75	205	30	40	50	A276
ABNT 310	515	75	205	30	40	50	A276

2.2.1.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas estão relacionadas com a aplicação dos materiais, bem como com os processos de fabricação. Por exemplo, a densidade é requisito importante em estruturas de grande porte e em veículos onde são desejadas boas relações de peso e potência entre outras. A condutividade térmica também é uma propriedade importante em operações de usinagem, onde a baixa condutividade térmica leva a um maior desgaste de ferramentas (AKASAWA, 2003; KORKUT, 2004; TEKINER, 2004).

As propriedades físicas apresentadas na Tabela 2.5 referem-se aos aços ABNT 303, ABNT 304 e ABNT 310, na forma de barras e após tratamento térmico de solubilização (ASM, 1987). Verificam-se as propriedades diferenciadas para o aço ABNT 310. Essas diferenças estão relacionadas com os maiores teores de elementos de liga presentes nesses aços.

Tabela 2.5 - Propriedades físicas dos aços ABNT 303, 304 e 310 (ASM, 1987). Os valores 100, 315 e 538 indicados para os coeficientes médios de expansão térmica indicam as faixas de temperaturas em °C onde os valores desses coeficientes são válidos. Os valores 100 e 500 indicados para a condutividade térmica também indicam as faixas de temperaturas em °C onde os valores da condutividade térmica são válidos

Aço	Densidade	Módulo de elasticidade	Coeficiente médio de expansão térmica			Condutividade térmica W/m K		Calor específico	Resistividade elétrica	Permeabilidade magnética	Faixa de fusão
	Mg / m ³		GPa	100	315	538	100				
303	8,0	193	17,2	17,8	18,4	16,2	21,5	500	72	1,02	1400 a 1420 1400
304	8,0	193	17,2	17,8	18,4	16,2	21,5	500	72	1,02	1450 1400
310	8,0	193	15,9	16,2	17,0	14,2	18,7	500	78	1,02	a 1450

2.2.2 Algumas transformações de fases em aços inoxidáveis austeníticos

2.2.2.1 Efeito da deformação

A deformação pode provocar transformação de fases nos aços inoxidáveis austeníticos. Podem ser formadas fases duras que podem apresentar magnetismo. São as martensitas induzidas por deformação (MDI). A equação (3) mostra a relação entre a composição química e a temperatura de formação de martensitas induzidas por deformação representada por $Md_{10/45}(^{\circ}C)$. A simbologia $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ representa a temperatura na qual ocorre 10% de formação de martensita após uma deformação verdadeira de 45% em compressão (MURR,1982;KRAUSS, 1989).

$$Md_{10/45}(^{\circ}C) = 433 - 27,6Ni - 7,7Cr - 16,2Mn - 27,2Si - 11,3Mo - 170(C+N) \quad (3)$$

A formação de MDI também depende da quantidade de deformação, da taxa de deformação e da temperatura (HECKER, 1982; HUANG, 1989). Se ocorrer formação de forma acentuada pode ser prejudicial em determinadas aplicações, como exemplo disso, a fabricação de componentes eletrônicos que requerem materiais não magnéticos (AKASAWA, 2003). Além disso, a MDI pode influenciar no acabamento superficial e na formação do cavaco.

2.2.2.2 Efeito da temperatura

Os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico de têmpera. Entretanto, tratamentos térmicos como os de solubilização e de envelhecimento podem alterar a estrutura dos aços inoxidáveis austeníticos. Esses tratamentos são empregados para promover alterações nas propriedades mecânicas principalmente nos níveis de tensões residuais. (ASM, 1987). Esses aços geralmente são tratados termicamente para aumentar sua resistência à corrosão e para recuperarem ductilidade (ASM, 1987). Existe uma faixa de temperatura na qual pode ocorrer precipitação de carbonetos. Essa precipitação compromete a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. As fases que podem ocorrer em aços inoxidáveis austeníticos são apresentadas no diagrama de tempo-temperatura-transformação (TTT) da Fig. 2.5, para o aço ABNT 316 (WEISS; STICKLER, 1972).

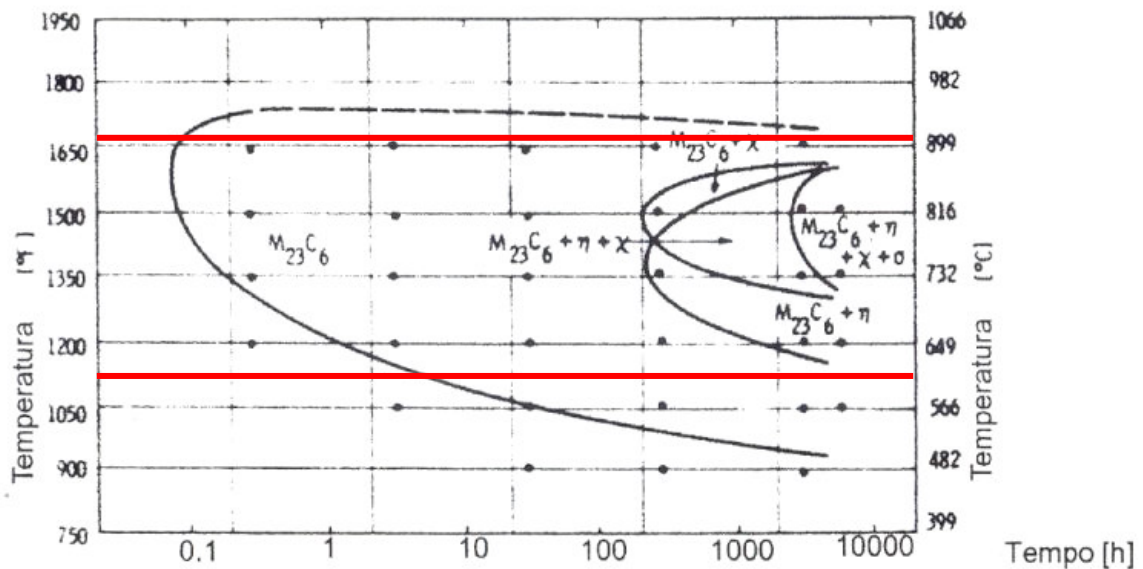


Fig. 2.5. Curvas de precipitação de carbonetos para envelhecimento do aço ABNT 316

Embora a cinética dos aços ABNT 303, 304 e 310 seja um pouco diferente, as faixas de temperatura de ocorrência dos precipitados são bastante próximas em função da composição química desses aços serem semelhantes.

2.3 Processo de torneamento

Torneamento é um dos mais importantes processos de usinagem. A operação de torneamento é caracterizada pelo corte do material, através do movimento de rotação imposto a uma peça e dos movimentos de translação da ferramenta de corte na superfície da peça a ser fabricada. Para essa operação é utilizada uma máquina ferramenta apropriada, denominada torno. A Fig. 2.6 mostra uma peça sofrendo uma operação de torneamento, onde se pode perceber a ferramenta, a peça, a placa de três castanhas e os cavacos sendo formados pela ferramenta de corte.

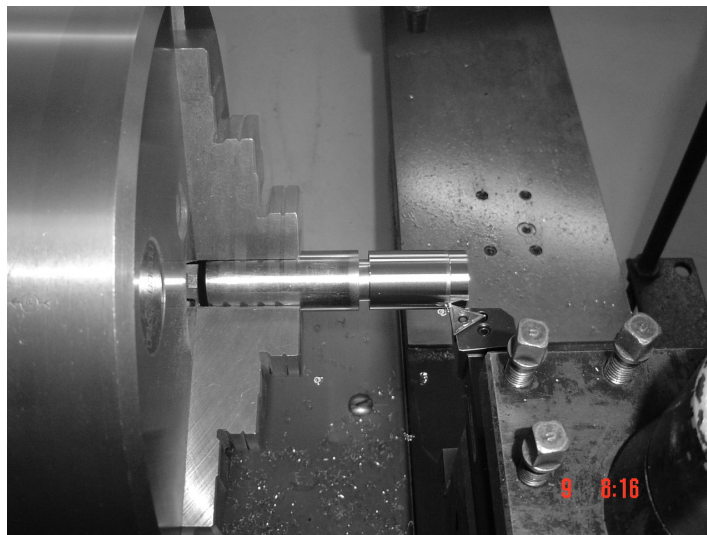


Fig. 2.6. Peça sendo torneada

Durante um processo de torneamento temos movimentos da ferramenta em relação à peça, tais como: movimento de corte, movimento de avanço, movimento efetivo de corte, movimento de ajuste da profundidade (FERRARESI, 1977). Movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, que promoveria uma única remoção de cavaco, se não fosse o movimento de avanço, em uma volta completa da peça (caso de torneamento). Movimento de avanço é o movimento que permite a formação contínua de cavaco em conjunto com o movimento de corte. Movimento efetivo de corte é movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço realizados ao mesmo tempo. Finalmente movimento de ajuste da profundidade é o movimento que permite determinar a retirada desejada de material, isto é, a profundidade de corte (a_p). A Fig. 2.7 representa os movimentos de avanço da ferramenta possíveis durante um torneamento.

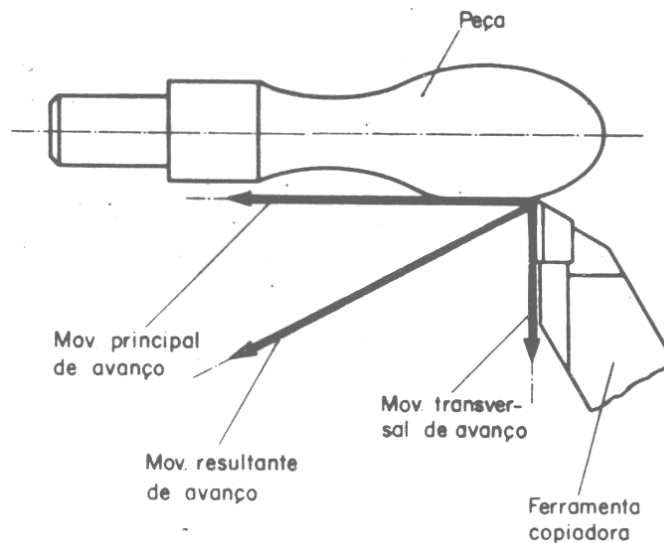


Fig. 2.7. Movimentos no torneamento. (FERRARESI, 1977)

Para se conhecer exatamente os movimentos de torneamento, se faz necessário distinguir as direções de corte, de avanço e efetiva. Onde direção de corte é a direção instantânea do movimento de corte; direção de avanço é a direção instantânea do movimento de avanço e a efetiva é a resultante das anteriores.

Os movimentos entre peça e ferramenta acontecem em determinadas velocidades que são separadas como velocidade de corte, velocidade de avanço e velocidade efetiva de corte. A velocidade de corte é a velocidade instantânea entre um ponto de referência da aresta de corte da ferramenta e a peça na direção e sentido do corte. A velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta na direção e sentido de avanço. A velocidade efetiva de corte é a velocidade instantânea da ferramenta na direção efetiva de corte, que é a resultante das duas anteriores. A Fig. 2.8 apresenta as velocidades de corte, de avanço e efetiva e os ângulos formados entre elas. No caso de operações de torneamento, o ângulo formado entre a velocidade de corte e velocidade de avanço (φ) é constante e igual a 90° . O ângulo formado entre a velocidade de corte e velocidade efetiva de corte (η) está relacionado com os valores da velocidade de corte e da velocidade de avanço, e pode ser obtido pela expressão (4).

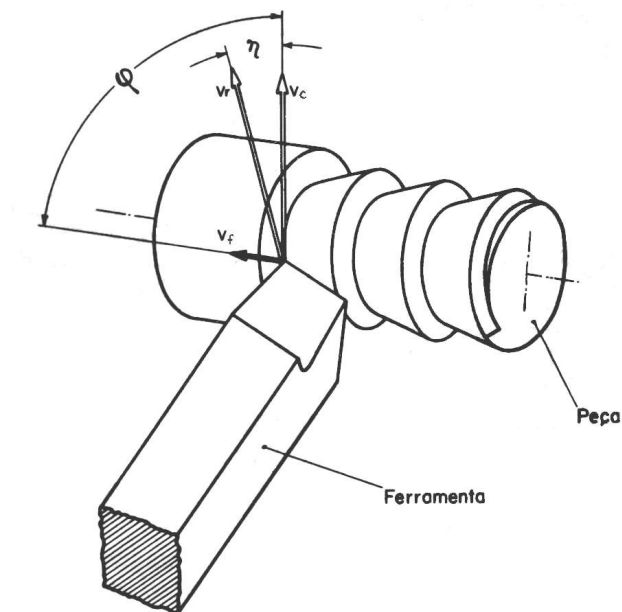


Fig. 2.8. Velocidades durante o torneamento de uma peça.
(FERRARESI, 1977)

$$\tan(\eta) = \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi) \frac{V_c}{V_f}}$$

Onde η é o ângulo formado entre a velocidade de corte e a velocidade de corte efetiva, ϕ é o ângulo formado entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço e igual a 90° , V_c é a velocidade de corte e V_f é a velocidade de avanço. Nas operações de torneamento a velocidade de avanço geralmente é muito pequena em relação à velocidade de corte, o que ocasiona valores desprezíveis do ângulo η . Em casos de operações de roscamento, η não pode ser desconsiderado, porque em geral essas operações são realizadas com condições de velocidade de corte menores e velocidades de avanço maiores (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000; FERRARESI, 1977).

2.3.1 Ferramentas de corte

As ferramentas utilizadas durante um processo de torneamento devem ter propriedades específicas para promover o corte do material e resistir ao desgaste. As ferramentas são caracterizadas por: geometria, material, revestimentos, acabamentos, sistemas de fixação entre outros aspectos. Atualmente os fabricantes dispõem basicamente de 4 grandes grupos de materiais utilizados na fabricação de insertos para ferramentas de corte, que são os metais duros (MD), os cermets, os policristalinos (ultraduros) e as cerâmicas. No caso do MD e de algumas cerâmicas podem ser revestidos ou não (MITSUBISHI, 2002); (SANDVIK, 2002); (TAEGUTEC, 2003). Para os aços inoxidáveis, as ferramentas indicadas são as da classe M de acordo com norma JIS B4053 (MITSUBISHI, 2002). Dentro dessa classe são encontradas as ferramentas de metal duro, com e sem revestimento. Para a obtenção de características melhores em determinadas situações de utilização, variações nos elementos formadores do metal duro dos insertos e nos tipos de revestimentos podem ser realizadas. (MITSUBISHI, 2002; SANDVIK, 2002; TAEGUTEC, 2003).

Duas das maiores preocupações em medidas de desempenho de usinagem são: formação de cavaco e vida de ferramenta. Entender a formação de cavaco e seu fluxo é fundamental para o desenvolvimento de artifícios para o processo de quebra de cavacos (EE, et al., 2003). O cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, que se caracteriza por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977). Grande parte das ferramentas atuais é dotada de quebra-cavacos para melhorar a condição de corte. O controle da forma do cavaco tem como objetivo facilitar seu descarte e expulsá-lo de maneira eficiente da região de corte. Cavacos menores e menos irregulares ocupam menores volumes e facilitam o armazenamento. De um modo geral, em processos onde não existe um bom controle dos cavacos podem ocorrer danos nas ferramentas e peças, além de colocar em risco a integridade física dos operadores. Por esses motivos, em grande parte dos processos de usinagem, é desejável a quebra do cavaco de maneira periódica (CHOI; LEE, 2001). Na ferramenta de barra apresentada na Fig. 2.9 não existe nenhum artifício para quebra de cavacos. Esse tipo de ferramenta praticamente não é mais aplicado em processos de usinagem de grande escala, mas mostram de maneira bastante clara as características das ferramentas de corte como: as diversas arestas, superfícies e o raio de ponta.

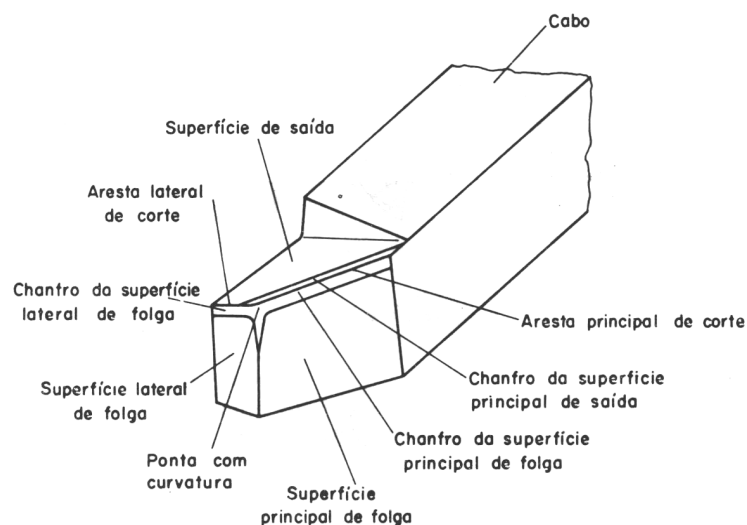


Fig. 2.9. Nomenclatura de uma ferramenta de barra. (FERRARESI, 1977)

Na Fig. 2.10 de (a) a (e) são apresentadas algumas ferramentas com sistema de pastilha intercambiável, onde se podem destacar alguns dos principais componentes de uma ferramenta atual, como: a pastilha ou inserto, o suporte da pastilha conhecido como porta-ferramentas, o calço sob a pastilha e diferentes sistemas de fixação da pastilha no porta-ferramentas. A Fig. 2.11 mostra uma pastilha quadrada, com quebra cavaco na forma de um canal feito na própria pastilha.



Fig. 2.10. Ferramentas com pastilhas intercambiáveis. (a) fixação rígida, (b) fixação por alavanca, (c) fixação por cunha e grampo, (d) fixação por parafuso e grampo de topo, (e) fixação por parafuso (SANDVIK, 2005)

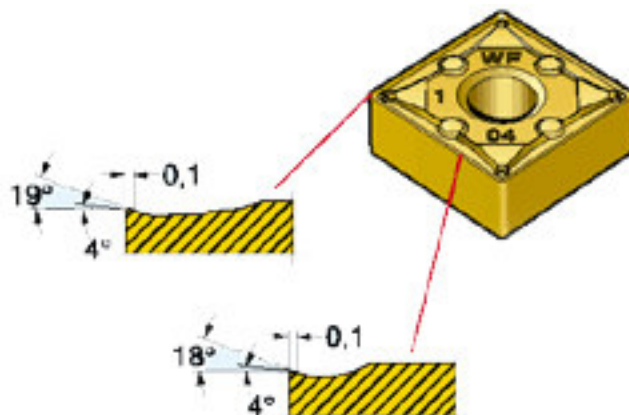


Fig. 2.11. Pastilha com representação do quebra cavaco feito na forma de canal na superfície (SANDVIK, 2005)

Para se fazer bom uso de uma ferramenta é necessário conhecer os diversos fatores que interferem no seu desempenho como o desgaste de ferramentas (BONIFÁCIO; DINIZ,

1994; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; QI; MILLS, 2000; ROCHA, 2004; SIKDAR; CHEN, 2002; WANG; HUANG; SONG, 2003, a influência da geometria de ferramenta nas condições de usinagem (CHANG, 1998; MESQUITA; SOARES; MARQUES, 1996; THIELE; MELKOTE, 1999; YEN; JAIN; ALTAN, 2004), a forma do cavaco (ASTAKOV; SHVETS; OSMAN, 1997; BOUZAKIS; AICHOUH; EFSTATHIOU, 2003; CHOI; LEE, 2001), os esforços de corte (PARK et al, 1998; RAO; SHIN, 1999), a rugosidade superficial desejada (BIGERELLE; NAJJAR; IOST, 2003; JANG et al., 1996b; LIN; LEE; WU, 2001; RISBOOD; DIXIT; SAHASRABUDLHE, 2003; SEKER; ÇİFTÇİ; HASIRCI, 2003; THOMAS et al., 1996), as condições de lubrificação (MAMALIS; KUNDRASK; GYANI, 2002; XINGZHONG et al., 1999), a distribuição de temperatura (MILLER; MULHOLLAND; ANDERSON, 2003) e as condições econômicas (LIANG; MGWATU; ZUO, 2001).

2.3.2 Formação de cavaco

Durante a formação de cavacos a determinação dos mecanismos de corte é muito complexa. Por este motivo ainda não existe um modelo capaz de representar o mecanismo que origina os cavacos em função de grandezas conhecidas, como o ângulo de saída de ferramenta e o coeficiente de atrito entre peça e ferramenta (SHAW, 1984). Alguns modelos são utilizados em estudos de desempenho de usinagem, e para estudar a formação de cavaco. Um modelo clássico é conhecido como Modelo de Cartas de Baralho criado por Piispanen (1937). Esse modelo considera que o fluxo de cavaco se dá de forma semelhantemente ao escorregamento de cartas de um baralho sendo deslocadas uma sobre as outras (SHAW, 1984). Um outro modelo, o de corte ortogonal, pode ser utilizado em estudos desde que sejam satisfeitas as considerações necessárias para a sua aplicação, o que não pode ser conseguido

na maioria dos processos de corte tais como: cavaco contínuo, não formação de aresta postiza de corte (APC) entre outras (FERRARESI, 1977). Uma grandeza necessária para o estudo dos mecanismos de corte é a determinação do ângulo de cisalhamento. Existem alguns modelos criados para a determinação do ângulo de cisalhamento. A Tabela 2.6 trás alguns desses modelos, seus respectivos autores e as hipóteses assumidas para a aplicação de cada modelo.

Tabela 2.6 - Modelos de planos de cisalhamento (SHAW, 1984). Onde ϕ_0 é o ângulo de cisalhamento, β e μ são parâmetros relacionados com a força de atrito, γ_0 é o ângulo de saída da ferramenta e k é um coeficiente empírico

Modelo	Autores	Princípios
$\phi_0 = 45 - 0,5(\beta - \gamma_0)$	Ernst – Merchant (1941)	Mínima força
$\phi_0 = 0,5 \cot^{-1} k - 0,5(\beta - \gamma_0)$	Merchant (1945)	Mínima força e introduz coeficiente empírico k
$\phi_0 = 45 - (\beta - \gamma_0)$	Lee – Shaffer (1951)	Linha de escorregamento teórica
$\phi_0 = 45 - \beta + 0,5\gamma_0$	Stabler (1951)	—————
$\phi_0 = 45 - 0,5 \tan^{-1} 2\mu + 0,5\gamma_0$	Hucks (1952)	—————
$\phi_0 = 0,5 \cot^{-1} k - 0,5 \tan^{-1} 2\mu + 0,5\lambda_0$	Hucks (1952)	—————
$\phi_0 = 50 - 0,8(\beta - \gamma_0)$	Palmer – Oxley (1959)	Adiciona solução para modelo da zona de cisalhamento

Atualmente a busca por modelos que definam a formação de cavaco continua. A Fig. 2.12 foi extraída de um trabalho (MEKAUKA; ITOH, 1995) onde se buscou uma aproximação à escala molecular do processo de formação de cavaco.

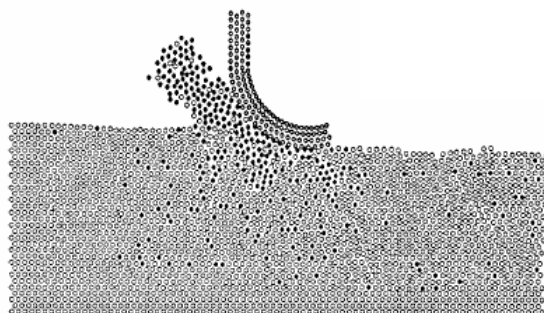


Fig. 2.12. Formação de cavaco. (MAEKAUA; ITOU, 1995)

2.3.3 Esforços de corte

Conhecer os esforços presentes nos processos de corte é fundamental na determinação da potência necessária das máquinas utilizadas, além de sua rigidez e da rigidez das ferramentas de corte. Para avaliar esses esforços e predizê-los são utilizados estudos que levam em conta a formação do cavaco ou são utilizados coeficientes obtidos em experimentos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000; SHAW, 1984; STIPKOVIC, 1986). Os esforços de corte podem ser medidos com auxílio de dinamômetros construídos especialmente para esse fim. Esses instrumentos podem ser construídos utilizando-se diferentes métodos, mas, devem obedecer três conceitos muito importantes para serem confiáveis. Eles devem possuir boa rigidez, sensibilidade e precisão (SHAW, 1984).

O conhecimento dos esforços de corte é de grande importância para os processos de usinagem. Pelos valores desses esforços pode-se monitorar um processo e detectar se há desgaste da ferramenta. O trabalho realizado por Silkdar et al. (2002) avaliou o desgaste de ferramenta e a variação dos esforços de corte em um aço carbono ABNT 4340 com auxílio de um dinamômetro, esse estudo pode ser empregado em situações diárias em processos produtivos na determinação exata para o momento da troca ou afiação da ferramenta. Pode-se também detectar materiais com diferentes condições. O trabalho realizado por Strafford (1997) verificou os esforços em quatro diferentes aços carbono quando usinados sob as mesmas condições e comparou os resultados obtidos relacionando-os com os tipos de aço. Os esforços que surgem durante o processo de corte também podem comprometer a estabilidade do equipamento. Rao et al. (1999) verificou sob qual condição um aço carbono ABNT 4140 usinado em um torno com duas diferentes geometrias de ferramenta apresenta estabilidade ou instabilidade.

2.3.3.1 Pressão específica de corte (K_s)

Pressão específica de corte é a relação entre a força de corte (F_c) e a área da seção de corte (A). Como apresentado na relação (5):

$$K_s = \frac{F_c}{A} \quad (5)$$

Para ferramentas sem raio de arredondamento (r_n) o valor da área A é igual a $a_p \cdot f$.

Para cálculos com ferramentas com raios de arredondamentos é necessário a utilização de modelos que determinem o valor de A considerando além da a_p e do f o r_n .

Existem varias teorias para se determinar o valor de K_s para diferentes tipos de materiais. Uma dessas teorias é a de Kienzle. Onde K_s pode ser estimada pela expressão: $K_s = K_{s1} \cdot h^{-z}$. Onde K_{s1} e z são constantes do material.

2.3.4 Usinabilidade

Diferentemente aos ensaios mecânicos padronizados, por exemplo, o ensaio de tração, onde o número de parâmetros envolvidos é relativamente pequeno, sendo o controle e monitoração desses ensaios fáceis de serem realizados, as operações de usinagem podem ocorrer sob diversas situações e com grande possibilidade de variação de parâmetros. Além disso, as velocidades normalmente empregadas em usinagem levam a elevadas deformações plásticas localizadas na região do corte, bem como taxas de deformações extremamente altas (JANG et al., 1996). Uma propriedade que procura medir e indicar como o material se comporta quando usinado é a usinabilidade. Esse é um termo de difícil definição, pois mesmo sendo a usinabilidade uma propriedade do material, não se podem apenas considerar algumas

de suas propriedades, sejam elas mecânicas, físicas, químicas ou metalúrgicas e afirmar que um determinado material possui melhor ou pior usinabilidade que o outro. Para se medir usinabilidade além do material, todos os outros parâmetros envolvidos no processo de usinagem devem ser considerados (MACHADO; SILVA, 2004).

Em testes para avaliação de usinabilidade, pode-se produzir uma escala de diferentes combinações de pares peças-ferramentas e indicar a variação desta propriedade entre uma configuração e outra. Por exemplo, por meio de um índice de usinagem representado por um valor numérico, pode-se comparar um conjunto de propriedades de usinagem de um dado material com um outro considerado padrão. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000; STIPKOVIC, 1986). Mencionar de forma clara sob quais condições um determinado ensaio de usinabilidade foi realizado é indispensável para que este teste tenha um significado (MACHADO; SILVA, 2004).

A usinabilidade pode ser influenciada pelo material usinado, pela ferramenta, pelo equipamento, pelas condições de lubrificação e pelos parâmetros de corte utilizados. Descobrir e entender melhor a usinabilidade, além dos problemas já solucionados de forma aceitável contribui para o desenvolvimento tecnológico. Atualmente às tecnologias de fabricação de componentes devem ser cada vez mais sofisticadas para acompanhar o desenvolvimento tecnológico das mais diversas áreas do conhecimento (NGOI, 2000). Em determinadas situações pode prevalecer à necessidade de utilizar materiais que não possuam boa usinabilidade. Por exemplo, peças produzidas de materiais resistentes a meios agressivos, como os aços inoxidáveis.

2.4 Usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são materiais que apresentam usinabilidade ruim, e esse comportamento pode ser influenciado por: encruamento, gerando tensões residuais e a

formação de martensita induzida por deformação (MDI) (EL-AXI, 2002; JANG et al., 1996a; LIN, 2002; MACHADO et al., 2003; SAOUBI et al., 1999; SREEJITH; NGOI, 2001; SULLIVAN; COTTERELL, 2002). Os principais problemas causados durante a usinagem que levam a uma usinabilidade ruim dos aços inoxidáveis são: excessivos desgastes de ferramenta, acabamento superficial de baixa qualidade, cavacos longos e baixas velocidades de corte (JANG, 1996; M'SAOBI, 1990; FANG, 1999). Esses problemas são causados principalmente pela alta taxa de encruamento, baixa condutividade térmica e modificações microestruturais na superfície desses materiais que aumentam a força de corte, entre outros fatores (AKASAWA, 2003; TEKINER, 2004; KORKUT, 2004). A usinabilidade desses aços pode ser melhorada pela adição de enxofre. O enxofre propicia a formação de inclusões de sulfeto de manganês, o que facilita a quebra do cavaco. Com esse material pode-se verificar a diferença entre usinabilidade e dureza (propriedade mecânica) tomando-se como exemplo, o aços inoxidáveis ABNT 303, que possuem enxofre adicionado em sua composição, e os aços inoxidáveis ABNT 316 que apresentam mesma dureza, mas quando são usinados se comportam de maneira extremamente diferente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000). Nesse caso, o enxofre também atua como lubrificante (LACOMBE, 1993). Mas em algumas aplicações, determinados elementos não podem estar presentes na composição química do material da peça (NGOI, 2000), pode acontecer de a adição de enxofre causar perda de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão (MACHADO et al., 2005). Assim são freqüentes os casos que não se pode utilizar um aço inoxidável com enxofre adicionado, para garantir propriedades como resistência mecânica e resistência à corrosão.

A usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos, como a dos outros materiais, envolve estudos onde são necessários os conhecimentos de aspectos relacionados com o processo de corte, tais como: os movimentos relativos entre peças e ferramentas, formas e características de ferramentas e equipamentos, mecanismos de formação de cavaco, potências e esforços de

corte, critérios econômicos da usinagem entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000; FERRARESI, 1977; SHAW, 1986; STIPKOVIC, 1986). Devem-se também considerar aspectos relacionados com as propriedades do material usinado. Muitos trabalhos foram e são realizados para o aprimoramento das condições de usinagem, como os estudos envolvendo: comportamento dos materiais usinados (AKASAWA et al., 2003; CHIEN; CHOU, 2001; CHIEN; TSAI, 2003; GHANI; CHOUDHURY; HUSNI, 2002; JANG et al., 1996a; KOPAC, 2001; MENDEZ, 1999; SAOUBI et al., 1999; SEKER; ÇIFTÇI; HASIRCI, 2003; SLOCOMBE; LI, 2000; SULLIVAN; COTTERELL, 2002; WANG; CHEN, 2001), rigidez dos equipamentos (THOMAS et al., 1996), desgaste de ferramentas (BONIFÁCIO; DINIZ, 1994; PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001; QI; MILLS, 2000; ROCHA, 2004; SIKDAR; CHEN, 2002; WANG; HUANG; SONG, 2003), geometria de ferramenta (CHANG, 1998; MESQUITA; SOARES; MARQUES, 1996; THIELE; MELKOTE, 1999; YEN; JAIN; ALTAN, 2004), forma do cavaco (ASTAKOV; SHVETS; OSMAN, 1997; BOUZAKIS; AICHOUH; EFSTATHIOU, 2003; CHOI; LEE, 2001), força de corte (PARK et al, 1998; RAO; SHIN, 1999), rugosidade superficial (BIGERELLE; NAJJAR; IOST, 2003; JANG et al., 1996b; LIN; LEE; WU, 2001; RISBOOD; DIXIT; SAHASRABUDLHE, 2003; SEKER; ÇIFTÇI; HASIRCI, 2003; THOMAS et al., 1996), condição de lubrificação (MAMALIS; KUNDRASK; GYANI, 2002; XINGZHONG et al., 1999), dispositivos para monitoramento (DIMLA; LISTER, 2000; DIMLA, 2000; DIMLA, 2002; TEKINER; YESILYURT, 2004; STRAFFORD; AUDY, 1997), distribuição de temperatura (MILLER; MULHOLLAND; ANDERSON, 2003), condições econômicas (LIANG; MGWATU; ZUO, 2001), modelos matemáticos (GUO, 2003; KULKARNI; MARIAPPAN, 2003), entre outros.

2.4.1 Parâmetros de corte recomendados para usinagens de aços inoxidáveis

Para usinagem de aços inoxidáveis austeníticos com ferramentas de metal duro, normalmente são indicadas, no caso de usinagens leves, profundidades de corte de até 1 mm, avanços de até 0,2 mm por rotação com velocidades de corte variando de 120 a 220 metros por minuto (MITSUBISHI, 2002; SANDVIK, 2002; TAEGUTEC, 2003). Já para usinagem médias de 1 mm a 4 mm são indicados avanços de 0,2 mm a 0,4 mm por rotação com velocidades de corte de 40 a 120 metros por minuto (MITSUBISHI, 2002; SANDVIK, 2002; TAEGUTEC, 2003) com refrigeração (SANDVIK, 2002;) ou sem refrigeração (MITSUBISHI, 2002). Pela variedade de parâmetros de corte que podem ser utilizados, percebe-se que é fundamental o conhecimento de como o material a ser usinado se comportará utilizando determinado tipo de ferramenta em uma determinada condição de usinagem para se melhorar o seu desempenho econômico aliado à qualidade do produto. Para ferramentas de metal duro deve-se empregar fluido de corte para prolongar a vida da ferramenta e melhorar a qualidade da superfície gerada. Na Tabela 2.7 são indicados os valores de velocidades de corte para os aços ABNT 303, ABNT 304 e ABNT 310 (ASM, 1987).

Tabela 2.7 - Velocidades de corte para aços inoxidáveis. (ASM, 1987)

	ABNT 303	ABNT 304	ABNT 410
Torneamento com ferramenta de metal duro	150 a 250	150 a 240	150 a 240
	HB	HB	HB
	m/min	m/min	m/min
Desbaste	45 a 75	39 a 54	39 a 54
Acabamento	60 a 120	45 a 90	45 a 90

2.5 Métodos de avaliar a usinabilidade

A usinabilidade dos materiais pode ser avaliada durante o processo de corte por medidas dos esforços de corte ou outras técnicas como emissão acústica, por exemplo. A usinabilidade também pode ser avaliada após o processo de corte pelas características da superfície gerada. A forma de medir e a utilização dos esforços de corte já foram tratadas no item 2.3.3 em separado. A seguir são comentadas a emissão acústica e a caracterização da superfície

2.5.1 Emissão acústica

Com auxílio da metodologia de emissão acústica, podem-se avaliar grandezas diferenciadas, dependendo de como a técnica for utilizada. Experimentos podem ser realizados com o intuito de caracterizar as condições presentes em um processo de torneamento, utilizando análise dos sons produzidos durante o corte do material (TEKINER, 2004). Para isso é utilizado um dispositivo para captura de sinais sonoros e uma coleção de resultados obtidos em ensaios anteriores. Com os valores obtidos podem-se estimar o contato ferramenta e peça, valores como desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e esforço de corte.

2.5.2 Características da superfície gerada

Para se avaliar as condições finais dos materiais usinados são utilizados instrumentos de medição e metodologias apropriados à obtenção de resultados. Esses resultados são importantes para caracterizar e verificar a conformidade dos componentes fabricados. Além disso, para se compreender a forma que determinado material se comporta quando trabalhado em operações de usinagem. A qualidade e integridade da superfície geralmente são definidas

por suas propriedades superficiais, mecânicas, metalúrgicas, químicas e estados de topologias, como medidas de rugosidade superficial, variação de dureza, mudanças estruturais e tensões residuais, etc. (JANG et al., 1996).

2.5.2.1 Importância da superfície

Componentes fabricados em aço inoxidável geralmente são utilizados em meios agressivos. As superfícies desses componentes ficam diretamente em contato com os agentes corrosivos. Isso exige que essas superfícies possuam boa qualidade superficial para desempenharem sua função. Assim critérios rigorosos durante a fabricação e avaliação dessas superfícies são fundamentais para o sucesso do componente.

Além dos danos causados durante a remoção do cavaco propriamente dita, durante o processo de usinagem pode acontecer de o componente ou peça ser contaminado com parte do material da ferramenta. Isso ocorre quando a ferramenta quebra e libera pequenos pedaços. Esses pedaços ficam presos na superfície usinada. Quando essa superfície é exposta a um meio agressivo, ocorre o efeito galvânico. Essa reação compromete a resistência à corrosão do material. Outro problema que pode comprometer a vida útil do componente é rugosidade da superfície. Superfícies mais polidas geralmente são mais resistentes à corrosão e as mais rugosas são menos. Isso ocorre porque a rugosidade elevada na superfície propicia o alojamento de impurezas como sais e umidade, caracterizando regiões com potencial de ataque corrosivo (ASM, 1987).

Outro fator importante na superfície gerada é o encruamento da mesma. O encruamento na superfície usinada da peça ocorre durante o cisalhamento (SULLIVAN e COTTERELL, 2002). Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam elevados coeficientes de encruamento e ductilidade elevada (Tabela 2.4), que contribuem na geração de cavacos

longos, que além de dificultar seu armazenamento, incorrem em riscos à integridade física dos operadores; podem causar danos nas ferramentas e na superfície da peça. Além disso, o encruamento pode gerar tensões residuais. A tensão residual é definida como a tensão existente em um corpo elástico após todos os carregamentos externos terem sido removidos (JANG et al, 1996). Em componentes usinados, a tensão residual depende dos parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, e também da geometria da ferramenta e das condições de lubrificação (EL-AXI, 2002; JANG et al, 1996; SAOUBI et al., 1999).

Pelos problemas apresentados acima, pode-se notar como a seleção dos parâmetros de usinagem e das ferramentas de corte devem ser adequados. A inspeção da superfície usinada também deve ser controlada para evitar que falhas deixadas durante a usinagem só sejam percebidas durante a utilização do componente.

2.5.2.2 Metodologias de avaliação da superfície gerada

As superfícies obtidas pelos processos de fabricação podem ser avaliadas por diversas técnicas tais como: medidas de rugosidade superficial, microscopia, entre outras.

2.5.2.2.1 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial tem como principal objetivo, descrever o relevo presente em uma superfície. Para representar esse relevo por números, existem parâmetros diferenciados de rugosidades. Alguns desses parâmetros são as rugosidades: média aritmética (R_a), máxima altura (R_y), máxima altura (R_z), média quadrática (R_q), altura total (R_t) e altura de pico (R_p). R_a é o parâmetro mais utilizado nas medidas de rugosidade. Os parâmetros R_y e R_z juntos

permitem um melhor monitoramento da superfície. Valores semelhantes de R_y e R_z indicam superfícies regulares e valores diferenciados representam superfícies irregulares ao longo do comprimento medido. Enquanto R_y é obtida pela soma das alturas do picos mais altos e dos vales mais baixos do comprimento medido, R_z é obtida pela média da soma dos 5 picos mais altos e dos 5 vales mais baixos, essa variação permite perceber a existência de um pico ou de um vale incoerente com os demais, resultando em valores diferentes de R_y e R_z . (FACCIO, 2005; MYSPACE, 2005).

O avanço e a geometria da ferramenta interferem diretamente no acabamento superficial da peça, em especial na rugosidade. Em situações de operações teóricas, ou seja, se a rugosidade fosse influenciada somente pelo raio de ponta da ferramenta e pelo avanço utilizado durante o processo de corte, as expressões (5) e (6) determinam os valores das rugosidades medidas nos parâmetros R_a e R_t para os casos em que o avanço é menor que o raio ponta.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3r_n}} = \frac{f^2}{31,2r_n} \quad (6)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8.r_n} \quad (7)$$

2.5.2.2.2 Microscopia

A microscopia além de outras aplicações pode ser empregada na caracterização de metais e ligas metálicas. Existem técnicas diversificadas de microscopia, algumas delas são:

óptica, de varredura e de tunelamento, (SBMM, 2005). Com auxílio de microscopia é possível visualizar a microestrutura dos materiais e as condições de superfícies. As imagens de superfícies geradas por microscopia podem ser associadas com a medição de rugosidade dessas superfícies. Por exemplo, o programa Scanning Probe Image Processor (SPIP) permite uma avaliação mais eficiente da topografia e possibilita a criação de imagens tridimensionais da superfície, técnica que foi empregada por MACHADO et al. (2005) em um de seus trabalhos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foram realizados ensaios preliminares utilizando-se um aço ABNT 304 cuja composição química é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do aço ABNT 304 utilizado em ensaios preliminares

Aço	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Si	% S	% P
304	18,1	8,54	0,055	1,80	0,58	0,030	0,037

Posteriormente foram adquiridos novos lotes de materiais para a realização do trabalho. A Tabela 3.2 apresenta as composições químicas dos três aços inoxidáveis austeníticos utilizados. Esses três aços foram o ABNT 303, 304 e 310.

Tabela 3.2 - Composição química dos aços ABNT 303, 304 e 310

Aço	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Si	% S	% P
303	17,2	8,21	0,050	1,88	0,48	0,20	0,036
304	18,1	8,54	0,055	1,80	0,58	0,030	0,037
310	24,2	19,6	0,069	2,00	0,62	0,019	0,036

Os corpos de prova foram obtidos a partir de barras redondas dos três diferentes aços estudados de 25,4 mm de diâmetro. Foi também utilizada uma barra redonda de 50,8 mm de diâmetro que tem composição química nominal de um aço ABNT 304. Todos os corpos de prova foram confeccionados com comprimentos de aproximadamente 80 mm.

3.2 Metodologia

Este trabalho foi realizado em duas fases. Os aços inoxidáveis ABNT 303, 304 e 310 foram usinados em diferentes condições (como recebidos e tratados termicamente). Foram realizados primeiramente ensaios onde foram variados os parâmetros de corte e ferramenta. Neste caso esses materiais foram usinados na condição de como recebido do fornecedor, os quais se encontravam solubilizados. Após a realização desses ensaios foram definidas condições de usinagem fixas e diferentes condições para os materiais estudados. Essas condições diferenciadas nos materiais foram conseguidas pela realização de tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento.

3.2.1 Tratamentos térmicos

Foram realizados tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento nos três diferentes tipos de aços inoxidáveis estudados. As amostras solubilizadas foram tratadas a 1050°C por 1 hora e em seguida foram resfriadas em água. Já as amostras envelhecidas foram tratadas termicamente em quatro diferentes temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900° C por 5 horas. Durante o resfriamento manteve-se o material no interior da mufla até atingir a temperatura ambiente. A taxa de aquecimento da mufla foi de aproximadamente 10°C/minuto e a taxa de resfriamento foi de aproximadamente 1° C/minuto. A escolha de diferentes temperaturas para os tratamentos de envelhecimento foi realizada com base na curva cinética da Fig. 2.5 na quais as linhas vermelhas limitam as faixas de temperaturas utilizadas.

3.2.2 Usinagem

Os três diferentes aços inoxidáveis austeníticos foram usinados em operações de torneamento de cilindramento e de faceamento. Para isso foram utilizados os equipamentos, ferramentas e parâmetros de corte descritos a seguir.

3.2.2.1 Equipamentos

Um torno universal de 10 HP de potência da marca Romi foi utilizado para realização dos ensaios de usinagem. As amostras foram fixadas em placa de três castanhas. Não foi utilizado o contraponto e também não foi utilizado fluido de corte durante a realização dos ensaios. Os esforços de corte foram avaliados com o aparato experimental a seguir.

3.2.2.1.1 Esforços de corte

Para medir os esforços de corte, foi utilizado um porta-ferramentas instrumentado com extensômetros (dinamômetro) (GUIMARÃES, 2000). O porta-ferramentas instrumentado foi ligado ao sistema de aquisição e a um microcomputador para serem medidas as forças de corte e de avanço. A força passiva é muito pequena em relação às outras sendo difícil de ser medida utilizando o mesmo dispositivo. A Fig. 3.1 (a) e (b) mostram respectivamente os o porta ferramentas instrumentado com extensômetros e o aparato experimental, utilizados para realização dos ensaios.

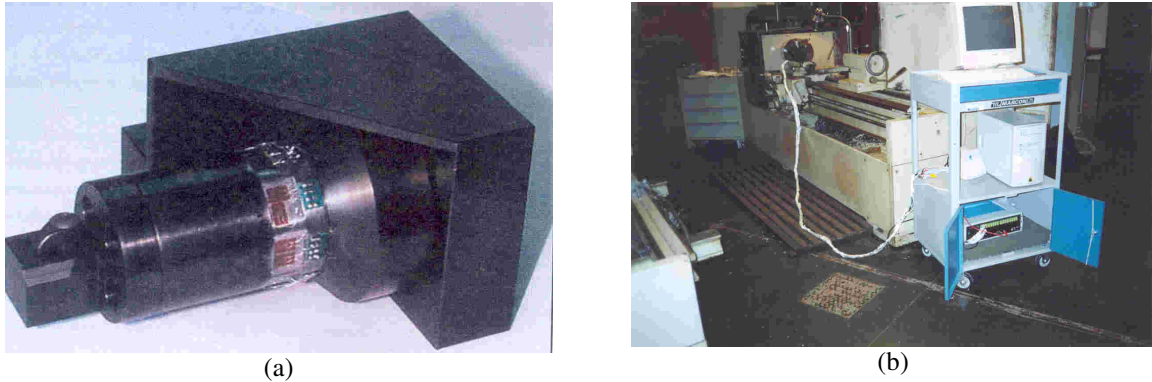


Fig. 3.1. (a) Porta ferramentas equipado com uma célula de carga. (b) aparato experimental

Para a aquisição dos dados foi utilizado o sistema ADS 2000 da Lynx e um microcomputador para armazenamento e tratamento dos dados. Foi utilizado um filtro passa baixa de 5 Hz e ganho automático. O dinamômetro utilizado nos ensaios de usinagem foi calibrado aplicando-se diferentes cargas conhecidas. Para isso foram aplicadas forças na célula de carga utilizando um fuso ligado a um dinamômetro mecânico e com isso pode-se estabelecer uma relação entre a carga aplicada e a variação em mV, obtendo-se uma constante de calibração. As cargas aplicadas bem como as respostas em mV utilizadas durante a calibração foram as a da Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Calibração do dinamômetro

Ajuste	Varição na tensão [V]	Carga aplicada [N]
1	0,007	0
2	0,3098	100
3	0,4565	150
4	0,6024	200
5	0,7535	250
6	0,899	300
7	1,0583	350
8	1,2003	400

Durante os testes foram utilizadas duas configurações de aquisição. A configuração inicial foi com taxa de aquisição de 100 Hz e o tempo de aquisição foi de 20 segundos. A

segunda configuração foi com taxa da amostragem de 5000 Hz e os resultados foram registrados durante 60 segundos. A aquisição com maior frequência permite maior quantidade de pontos e melhora a confiança do resultado. Os valores das forças de corte e de avanço foram determinados em períodos de realização do ensaio onde os valores dos esforços de usinagem permaneceram estáveis. O software permite determinar as médias e desvios dos resultados obtidos. As Fig. 3.2, Fig. 3.3 e Fig. 3.4 são exemplo das medidas fornecidas pelo software. Esse valores são determinados utilizando os dados de ensaios no programa AqDAnalysis (Lynx). Pode ser observado na Fig. 3.4, que nem sempre os ensaios indicavam a referencia zero. Portanto, essa diferença deve ser descontada do valor final. Esses problemas estão associados a ruídos, difícil de serem eliminados.

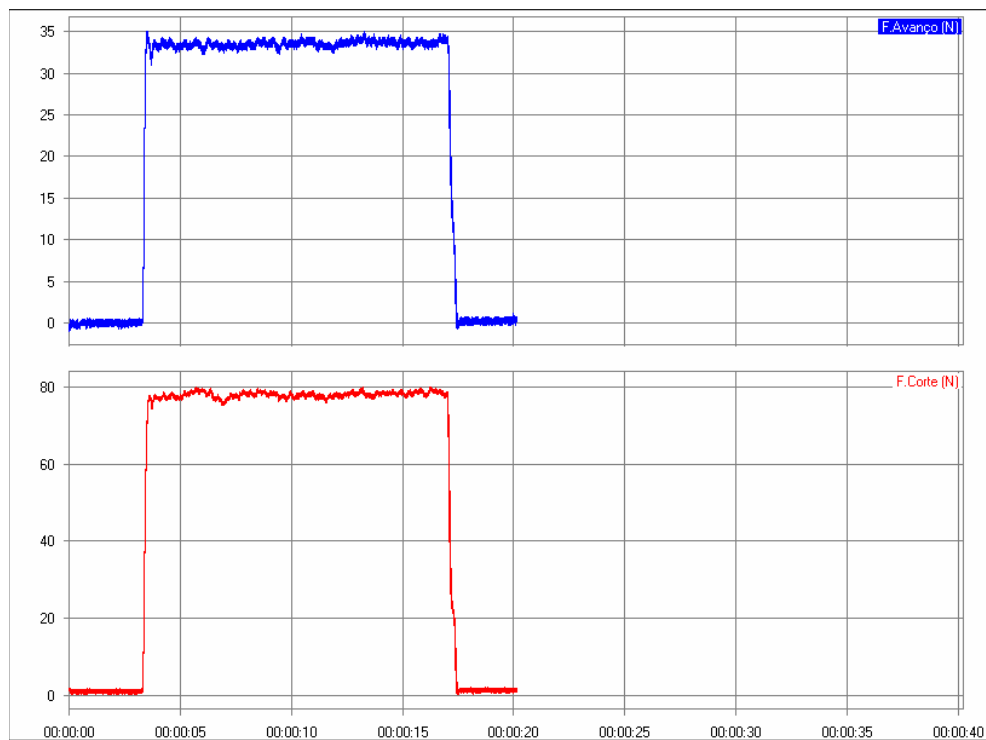


Fig. 3.2. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 303 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304

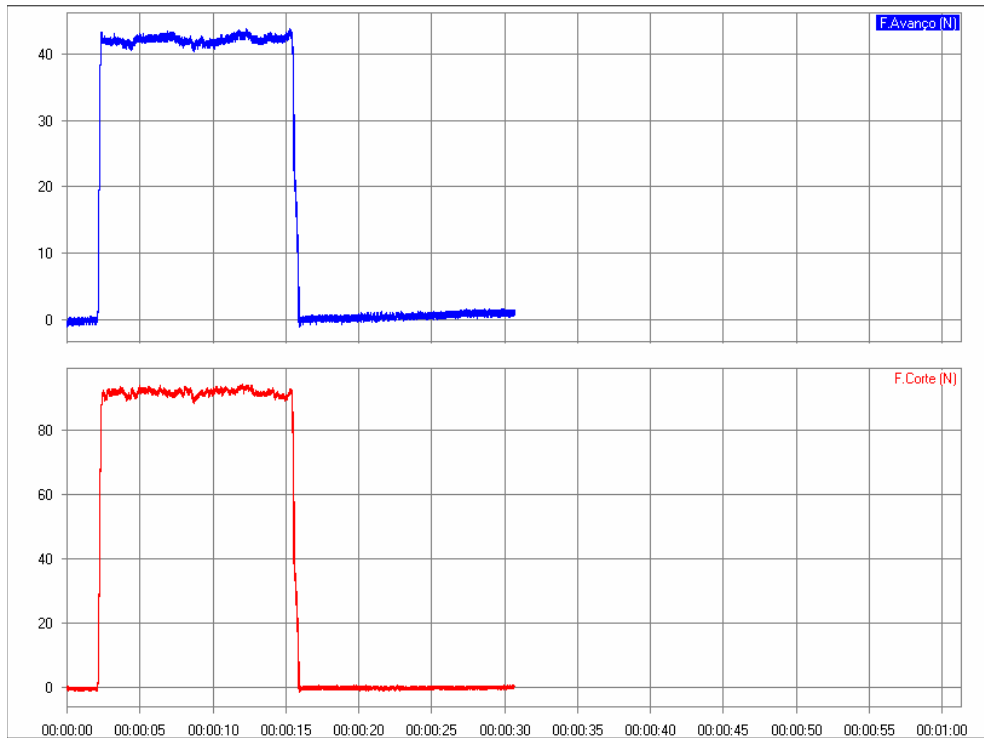


Fig. 3.3. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 304 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304

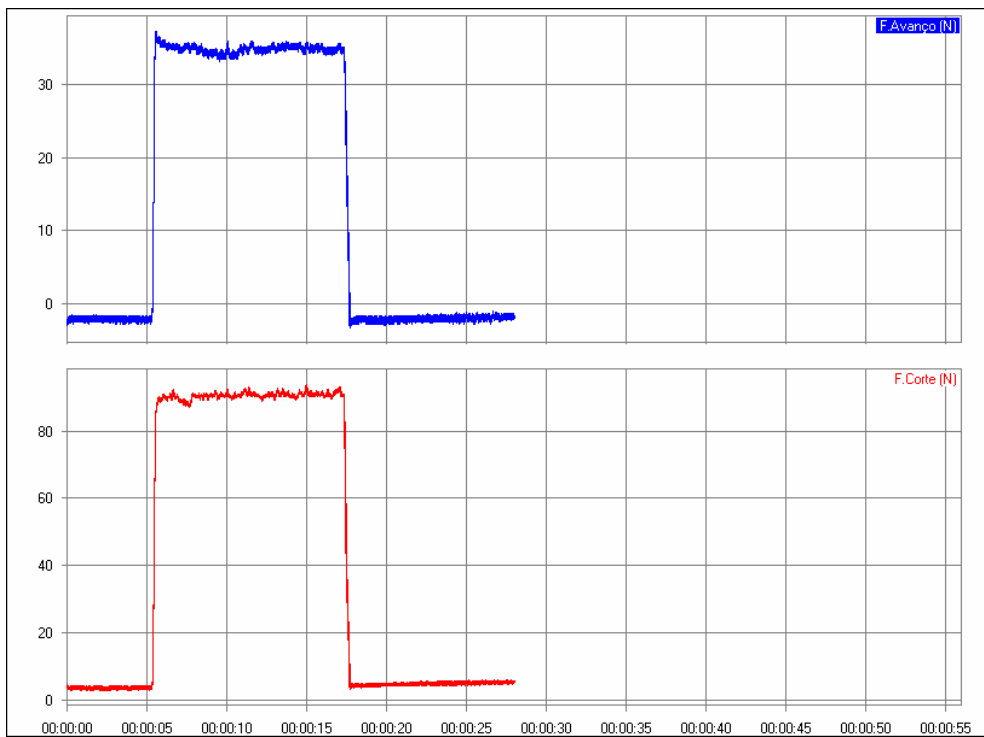


Fig. 3.4. Exemplo de medidas de esforços de corte e de avanço para o aço ABNT 310 como recebido. $V_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 0,2$ mm e ferramenta TPGN 160304

3.2.2.2 Ferramentas de corte

Nos ensaios de usinagem foram utilizadas ferramentas de metal duro. Essas ferramentas foram fixadas no porta-ferramenta instrumentado. No caso do faceamento (como será visto a frente), foi utilizado um porta-ferramenta convencional sem instrumentação. Na Tabela 3.4 estão relacionadas às ferramentas utilizadas e o posicionamento dessas ferramentas durante a usinagem dos materiais ensaiados.

Tabela 3.4 – Tabela de ferramentas utilizadas e posicionamento durante a usinagem

Ferramenta	Ângulo de posição (χ_r)	Ângulo de saída (γ_0)	Ângulo de folga (α_0)	Revestimento	Operação	Quebra Cavacos
CLASSE M						
TPGN 160308	90°	6°	8°	Sem	Torneamento	Sem
TPGN 160308	74°	6°	8°	Sem	Faceamento	Sem
TCMT 160304	90°	4°	7°	TiN	Tornemeanto	Com
TPGN 160304	90	4°	8	sem	Torneamento	Sem

A Fig. 3.5 mostra duas ferramentas utilizadas durante os ensaios de usinagem. À esquerda TCMT 160304 e a direita TPGN 160308. A ferramenta TPGN 160304 não é apresentada, mas é bastante semelhante à TPGN 160308 sendo a diferença o raio de arredondamento da ponta. Uma possui 0,8mm e a outra 0,4mm. Esses valores correspondem aos dois últimos números da designação. A escolha da ferramenta TCMT 160304 foi pela indicação de fabricantes já as outras duas foi pelo fato de não possuírem quebra cavacos e portanto deformarem menos os cavacos gerados, o que pode facilitar em análises futuras desses cavacos.

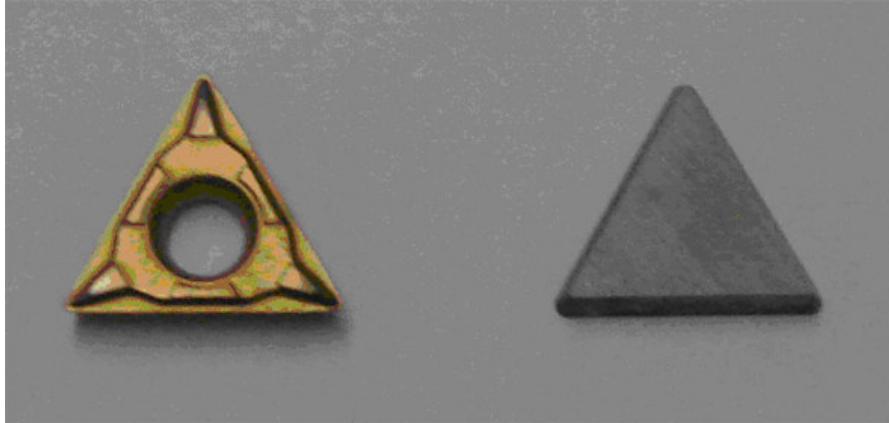


Fig. 3.5. Pastilhas de metal duro. À esquerda TCMT 160304 e a direita TPGN 160308

O ângulo de posição da ferramenta (χ_r) foi considerado como mostrado na Fig. 3.6 (ABNT NBR 6163, 1990).

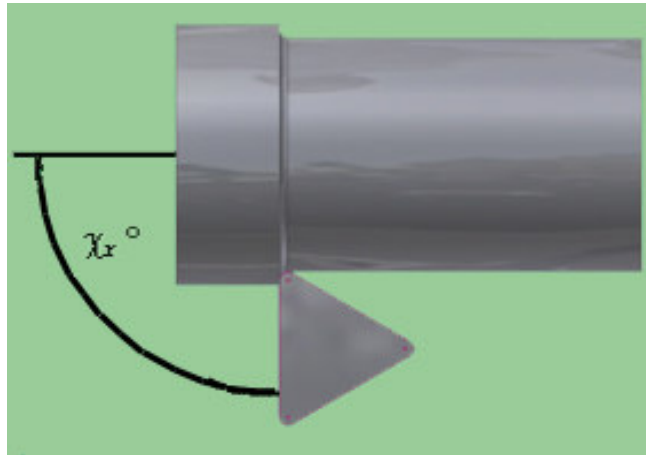


Fig. 3.6. Representação esquemática do ângulo de posição (χ_r) considerado

3.2.2.3 Parâmetros de usinagem no torneamento e faceamento

A Tabela 3.5 sumariza as condições de ensaios realizadas neste trabalho.

Tabela 3.5 – Condições de ensaios realizados. Onde χ_r é o ângulo de posição da ferramenta, γ_0 é o ângulo de saída ortogonal da ferramenta, α_0 é o ângulo de folga ortogonal da ferramenta, Rev. se possui revestimento, Q.C. se possui quebra cavacos, V_c é a velocidade de corte em m/minutos f é o de avanço em mm/rotação e a_p é a profundidade de corte em mm

Torneamento	Aço ABNT	Tratamento Térmico	Ferramentas					Parâmetros de corte			
			χ_r	γ_0	α_0	Rev.	Q.C	V_c	f	a_p	
Cilindramento(1) (Ensaio Preliminares)	304	Como recebido e Solubilizado 1050°	TPGN 160308	90°	6°	8°	sem	sem	90		0,05
											0,10
											0,14
											0,19
											0,24
											0,34
											0,68
											1,02
											1,36
											1,70
Faceamento	304	Como recebido	TPGN 160308	74°	6°	8°	sem	sem	2,5	0,048	0,1
	303								392		
	304								2,5		
	310								a 196		
Cilindramento(2)	303	Como recebido	TPGN 160304	90°	4°	7°	TiN	com	90	0,100	0,2
	304		TCMT 160304								
	310		TCMT 160304								
Cilindramento(3)	303	Como recebido Solubilizado 1050°C Envelhecido 600° C Envelhecido 700° C Envelhecido 800° C Envelhecido 900° C	TPGN 160304	90°	4°	8°	sem	sem	90	0,100	0,2
	304										
	310										

Os parâmetros selecionados foram os mais compatíveis com a rigidez dos equipamentos utilizados. Foram realizados ensaios de torneamento de faceamento e cilindramento. Os ensaios de faceamento visaram avaliar o efeito da velocidade de corte na superfície usinada. Este é um método que pode ser considerado qualitativo. Ele permite comparar os resultados nos diferentes materiais. Os ensaios de cilindramento visaram à obtenção de esforços de corte, bem como avaliar o efeito dos parâmetros de corte e do tipo de ferramenta na usinagem dos materiais estudados. No torneamento de cilindramento foram sempre utilizadas velocidades de corte de aproximadamente 90 m/minuto. Essa velocidade teve pequenas variações devido às pequenas diferenças existentes entre os diâmetros dos diversos corpos-de-prova, uma vez que rotação utilizada sempre foi de 1120 rpm.

3.2.2.3.1 Torneamento de cilindramento

Foram feitos três diferentes ensaios de torneamento de cilindramento como pode ser verificado na Tabela 3.5. Nos ensaios preliminares foram utilizadas duas velocidades de avanço uma de 0,048 mm/rotação e outra de 0,340 mm/rotação com velocidade de corte de 90 m/min e ainda 5 profundidades de corte diferentes para cada um dos avanços. Foi feito um passe de regularização da superfície, um passe com os parâmetros esperados e em seguida repetia-se as mesmas condições para um segundo passe. Nesse segundo passe usinavam-se desde a face do corpo de prova até cerca da metade do comprimento, entre a face e um rasgo existente nos corpos de prova. Esse segundo passe sobre o primeiro foi feito para verificar a influência do passe inicial nas condições da superfície gerada num segundo passe. Neste caso foi utilizada uma aresta de corte para cada um dos dois diferentes avanços.

Nos ensaios realizados posteriormente (torneamento de cilindramento (2) da Tabela 3.5) foram utilizadas diferentes relações entre o avanço e a profundidade de corte, obtidas

com utilização de diferentes profundidades de corte ($f/a_p = 2$, $f/a_p = 1$, $f/a_p = 0,5$ e $f/a_p = 0,3$). O objetivo foi produzir resultados que indicassem a influência desses parâmetros e buscar uma condição para realizar os próximos ensaios obtendo diferentes estados de tensões, o que pode influenciar o processo de corte. Nesses ensaios ainda foram utilizadas duas ferramentas diferentes para $f = 0,1$ mm/rotação e $a_p = 0,2$ mm, com objetivo de fornecer resultados para avaliar influência da ferramenta. Neste caso foi utilizada uma nova aresta de corte para cada ensaio.

Nos últimos ensaios de torneamento (cilindramento (3) da Tabela 3.5) foram utilizados os mesmos parâmetros de corte para os três diferentes aços estudados em diferentes condições de tratamento térmico. Esse ensaio teve como objetivo produzir resultados para verificar a influência dos tratamentos térmicos. Neste caso foi utilizada uma única aresta de corte para todos os ensaios.

3.2.2.3.2 Torneamento de faceamento

Nos ensaios de faceamento (faceamento da Tabela 3.5) em amostras dos três diferentes aços estudados foi utilizado o avanço de 0,054 mm/rotação e profundidade de corte foi de 0,1 mm. A velocidade de corte variou em função dos diâmetros e das quatro rotações utilizadas 400, 1000, 1600 e 2500. Esse ensaio foi utilizado com objetivo de avaliar diferentes velocidades de corte. Abrangendo uma faixa de velocidades de corte desde 2,5 m/min para diâmetro de 2 mm (correspondente ao furo de centro existente nos corpos de prova) e rotação de 400 rpm até 392 m/minuto para diâmetro de 50 mm e rotação de 2500 rpm. Neste caso foram utilizadas arestas de corte novas para cada um dos faceamentos.

3.2.3 Caracterização da superfície

Após a usinagem a rugosidade superficial foi avaliada por medições de rugosidade e por microscopia. Além disso, a dureza Vickers dos corpos de prova também foi verificada.

3.2.3.1 Rugosidade superficial

A rugosidade foi avaliada na superfície torneada utilizando-se o rugosímetro Surfcomer da Kosakalab e também um rugosímetro Mitutoyo SJ 201P. O cut-off (λ_c) utilizado foi o recomendado pela norma ASTM 95 (neste caso, 0,8 mm ou 2,5 mm, selecionado com base na rugosidade média observada). A rugosidade foi avaliada pelo menos duas vezes em cada corpo de prova para confirmação dos resultados e escolhida uma das leituras para ser avaliada. Foram também obtidos os perfis de rugosidade dos corpos de prova usinados.

3.2.3.2 Microscopia

Os materiais estudados foram preparados para serem observados em um microscópio óptico Olympus do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. A preparação metalográfica desses materiais não é trivial. Eles encruam muito durante a preparação metalográfica. Para diminuir esse problema foi empregada uma preparação desenvolvida pela Struers, onde após o lixamento até lixa de grana 600 as amostras são polidas em panos especiais (MD largo e allegro – designação Struers). Após essa preparação as amostras foram atacadas com diferentes reagentes. Um dos reagentes que apresentou um resultado aceitável foi o ataque metalográfico conhecido como Behara II . Esse reagente consiste em uma solução de 48g de bissulfeto de amônia, 400 ml de

ácido clorídrico, 800 ml de água destilada e 1g de metabissulfito de potássio para cada 100 ml desta solução. O ataque é feito por imersão durante 15 segundos

As superfícies usinadas e a morfologia dos cavacos foram observadas utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV – LEO 440 Stereoscan). Essa observação utilizando MEV é mais detalhada e precisa. O material aderido ou arrancado da superfície usinada pode ser observado com maior detalhe. A deformação do cavado e a formação de cavacos secundários também podem ser observadas. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP.

3.2.3.3 Difração de raios x

Foram determinados difratogramas, utilizando difração de raios X em superfícies usinadas para tentar se obter picos de martensita induzida por deformação. Os equipamentos difratômetros utilizados são do Laboratório do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP. Foi utilizada radiação $\text{CuK}\alpha$ e foram varridos ângulos de 20 a 130°.

3.2.3.4 Dureza

A dureza Vickers foi medida utilizando 300N de carga (HV 30) em todos os aços inoxidáveis austeníticos estudados. Foram feitas medições nas secções transversais e longitudinais das barras. Três medições foram feitas em cada amostra. A dureza média e os desvios padrão foram calculados. Os equipamentos utilizados são da marca Buehler.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados em duas partes. A primeira apresenta o efeito dos parâmetros de corte e a segunda o efeito dos tratamentos térmicos no processo de usinagem.

4.1 Efeito dos parâmetros de corte

Os efeitos dos parâmetros de corte foram avaliados em operações de torneamento de faceamento e de torneamento de cilindramento externo.

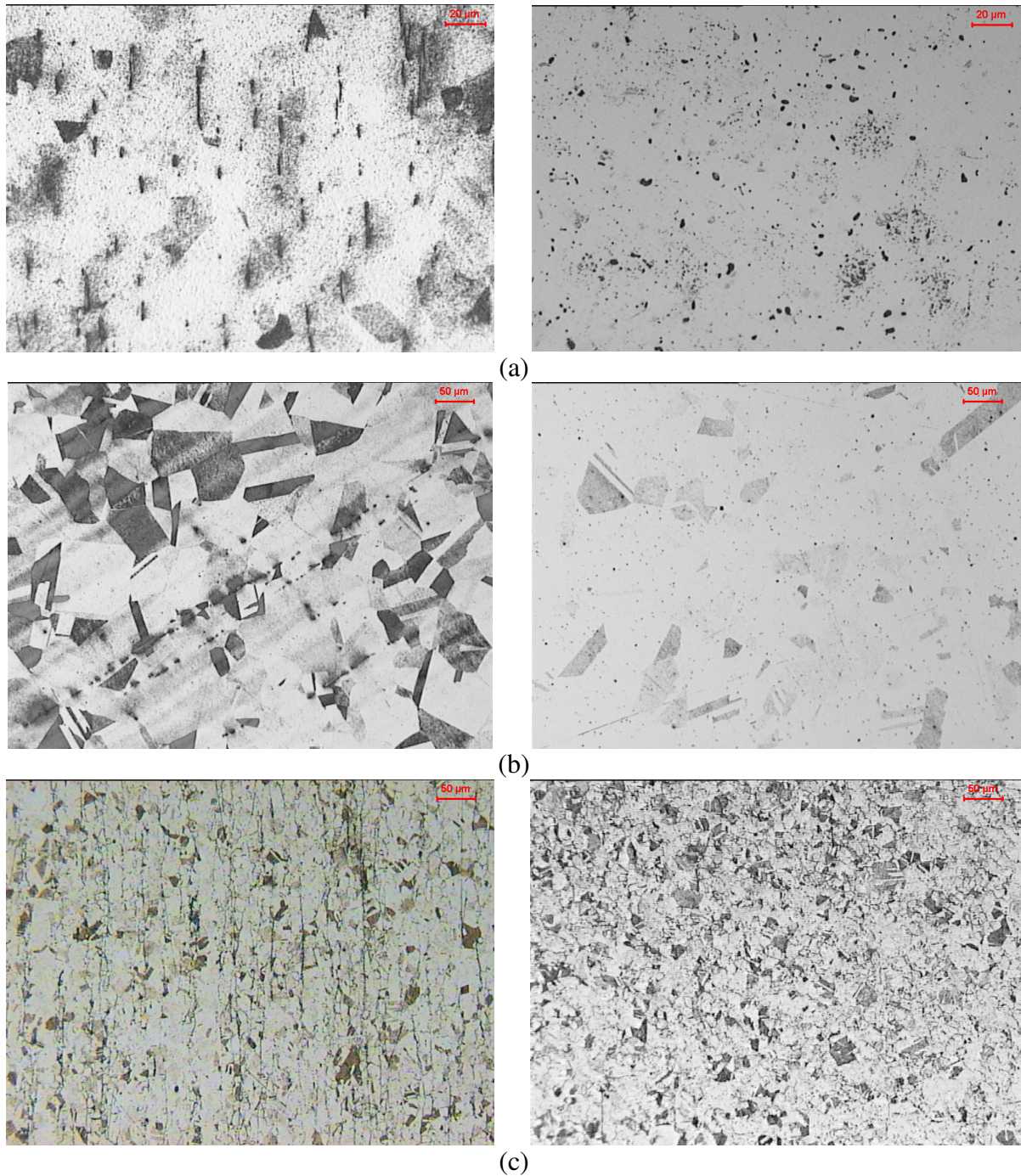
4.1.1 Caracterização dos materiais como recebido

A caracterização dos materiais foi feita utilizando-se microscopia óptica e dureza Vickers. Os três diferentes aços inoxidáveis austeníticos foram caracterizados na condição como recebido e nas diferentes condições de tratamentos térmicos. A caracterização dos aços como recebido é apresentada a seguir e as caracterizações dos materiais em diferentes condições de tratamentos térmicos são apresentadas no item 4.2.1, onde é analisada a influência dos tratamentos térmicos na usinabilidade dos aços estudados.

4.1.2 Microestrutura

As Fig. 4.1 (a), (b) e (c) mostram as microestruturas dos aços ABNT 303, 304 e 310, respectivamente das seções longitudinais e transversais. Essas microestruturas são de amostras preparadas dos materiais como recebido. Os corpos de prova como recebido foram de difícil preparação e ataque metalográfico. As amostras do aço ABNT 303, em especial, não

apresentaram bons resultados, mesmo assim pode-se constatar a presença de inclusões de sulfetos de manganês, que são os pontos escuros presentes na Fig. 4.1 (a) e na Fig. 4.2 de (a) a (d) onde alguns destes pontos estão indicados por setas.



Seções Longitudinais

Seções Transversais

Fig. 4.1 Microestruturas dos aços ABNT 303 (a), ABNT 304 (b) e ABNT 310(c) na forma como recebidos das seções transversais e longitudinais

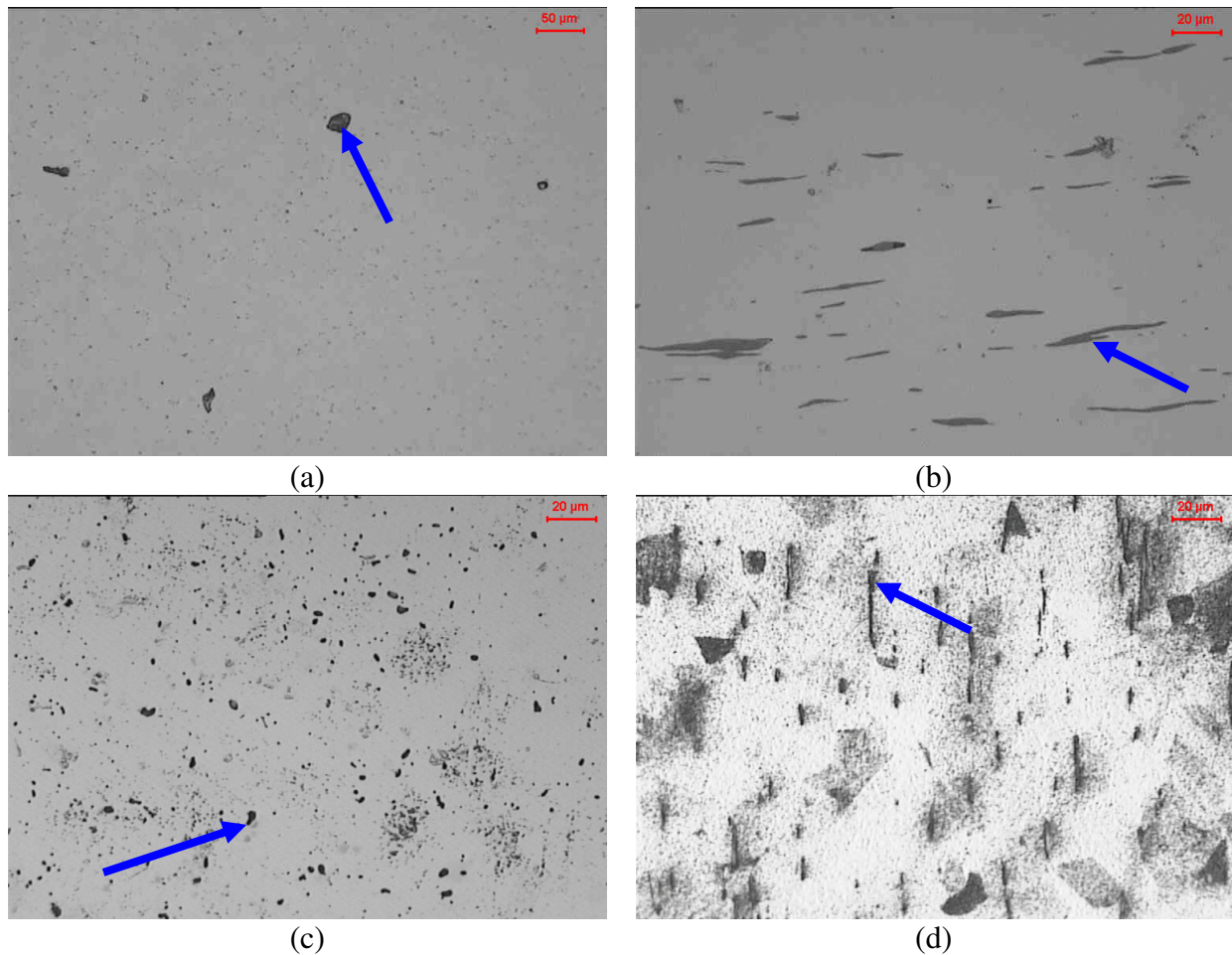


Fig. 4.2 Aço ABNT 303 como recebido (solubilizado) (a) e (b) sem ataque seções transversal e longitudinal respectivamente da barra e (c) e (d) com ataque seções transversal e longitudinal respectivamente da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II. As setas indicam alguns dos sulfetos presentes na microestrutura

No aço ABNT 310 a microestrutura pode ser melhor observada. Nota-se que os grãos apresentam tamanho bastante inferior em relação aos outros aços estudados e também se verifica a presença de nitreto de titânio (TiN), o qual não aparece na Tabela 3.2 de composição química. O titânio não foi evidenciado na análise química porque normalmente quando os teores presentes na composição são muito baixos, o elemento não é percebido. Como pode ser verificado na Tabela 3.2, o aço ABNT 310 possui maiores teores de carbono e provavelmente maiores teores de nitrogênio. O titânio reage com esses elementos e precipita o TiN. O nitreto de titânio está mais visível na Fig. 4.3. Os pontos amarelados indicados pelas setas são esses nitretos.

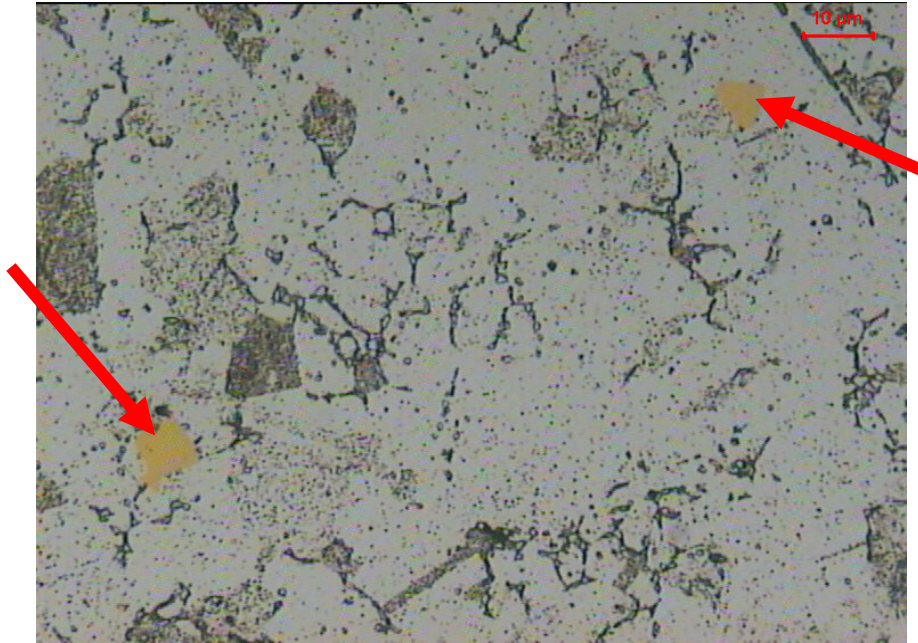


Fig. 4.3 Microestrutura do ABNT 304. Pontos amarelados são nitretos de titânio

4.1.3 Microdureza Vickers

As durezas Vickers dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 303, 304 e 310 como recebido estão indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dureza Vickers carga de 300 N (HV 30) dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 303, 304 e 310 estudados como recebidos.

Aço	ABNT 303	ABNT 304	ABNT 310
Seção da barra	Microdureza Vickers (HV 30)		
Transversal	256±32	243±17	237±18
Longitudinal	321±58	208±22	236±15

A microdureza dos diferentes tipos de aço inoxidável austenítico apresentam variações quando medidas em planos paralelos (seção longitudinal da barra) ou perpendiculares ao sentido de laminação das barras (seção transversal da barra) apesar das dispersões. É importante ressaltar que os desvios da média são elevados, principalmente no caso do aço

ABNT 303. Isso evidencia uma heterogeneidade na microestrutura. O caso do aço ABNT 303 a dureza é maior no sentido de laminação e menor no plano perpendicular a laminação. No caso do aço ABNT 304 a dureza é menor na seção longitudinal e maior na seção transversal da barra. Já o aço ABNT 310 não apresenta diferença nos valores de dureza nas diferentes seções.

4.1.4 Faceamento - Efeito da velocidade de corte

4.1.4.1 Efeito da velocidade de corte no aço ABNT 304 (ensaios preliminares)

Para os ensaios de faceamento como apresentado na Tabela 3.5 foram utilizados como parâmetros de corte: $f = 0,05$ mm/rotação, $a_p = 0,1$ mm, V_c variando de 2,5 a 392 m/min. A ferramenta utilizada foi de metal duro sem quebra cavacos com raio de ponta de 0,8 mm com ângulo de posição da ferramenta (χ_r) igual a 72° . Esses ensaios de faceamento iniciaram-se com amostras de aço ABNT 304 de 50 mm de diâmetro por 80 mm de comprimento. A rotação utilizada foi de 400 rpm e a superfície usinada foi observada durante e após do faceamento do material. Pode-se observar na amostra faceada que para esta rotação, ao passar pela região na qual a velocidade de corte era em torno de 25 m/min, a formação de aresta postiça de corte (APC) foi observada. Esta velocidade foi obtida com raio de 10 mm a partir do centro da peça. A formação de APC propiciou a quebra do cavaco, entretanto o acabamento superficial piorou. A figura Fig. 4.4 mostra o material aderido sobre a superfície da ferramenta utilizada, característico da usinagem de materiais dúcteis e baixa velocidade de corte. A Fig. 4.5 apresenta cavacos que ficaram aderidos na superfície do aço ABNT 304 nas regiões centrais, onde a usinagem foi realizada com menores velocidades de corte.

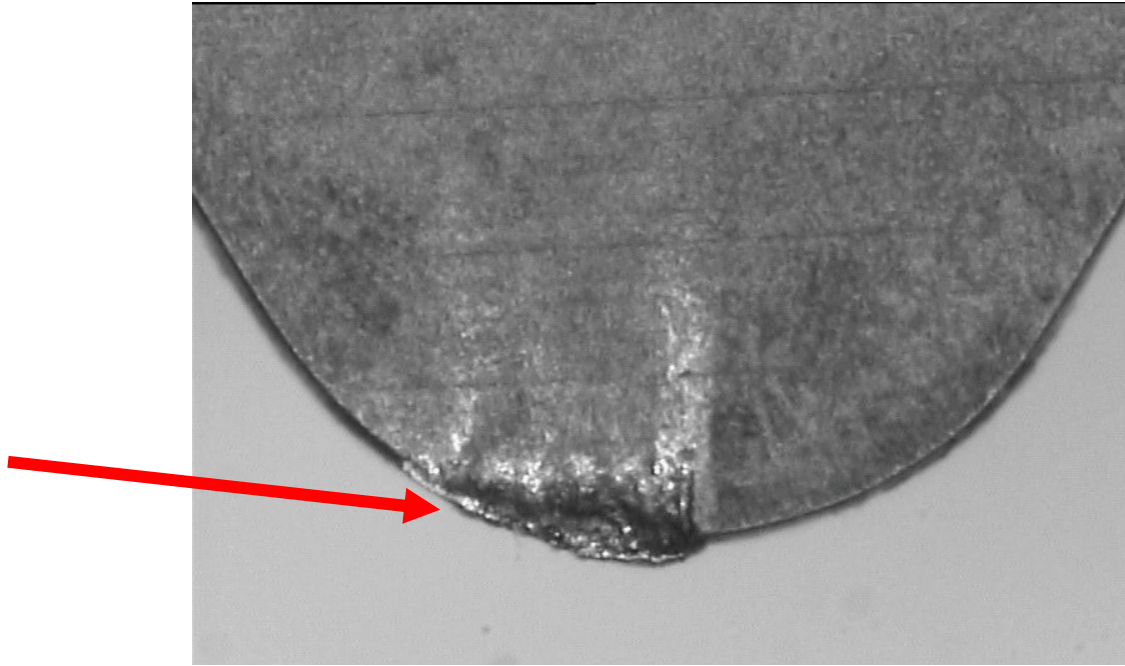


Fig. 4.4. Material aderido sobre superfície da ferramenta. A seta indica o material aderido na ferramenta

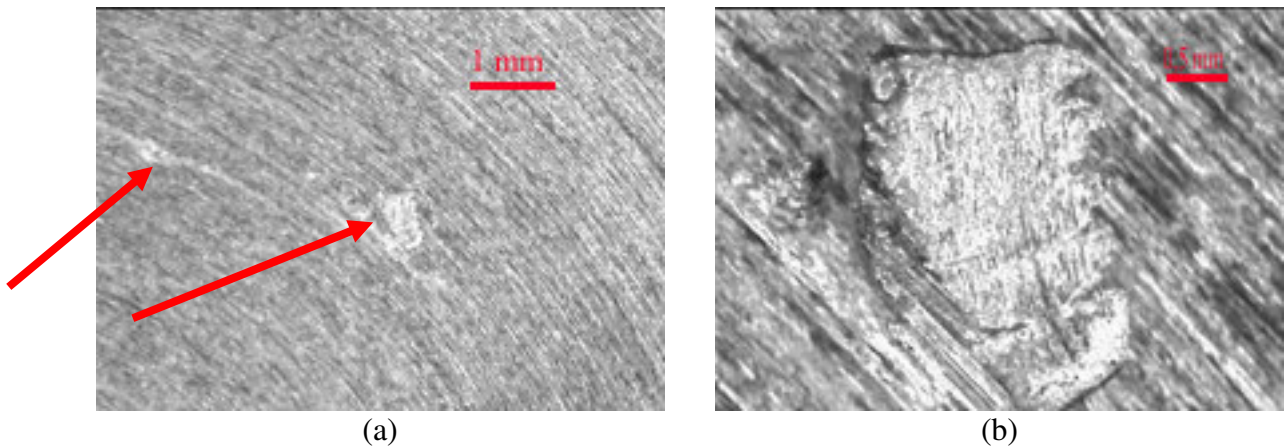


Fig. 4.5 (a) Cavacos aderidos na superfície faceada próximo ao centro da peça . (b) Detalhe do cavaco aderido com maior aproximação. Velocidade de corte na região em torno de 25m/min para faceamento do aço ABNT 304. As setas indicam os cavacos aderidos na superfície

O mesmo comportamento não pode ser observado claramente utilizando-se maiores rotações (1000 e 2500 rpm). A explicação para este fato está relacionada com a formação de APC ser esperada numa região muito próxima ao centro da peça.

4.1.4.2 Efeito da velocidade de corte nos aços ABNT 304, 303 e 310

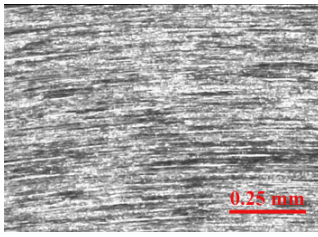
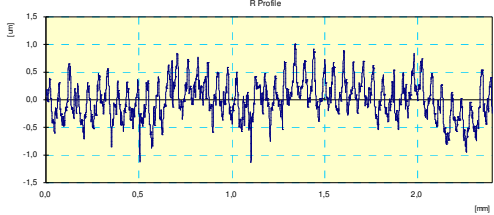
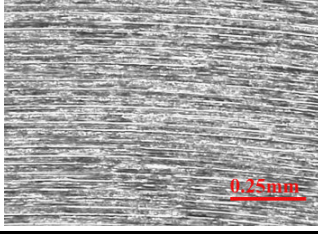
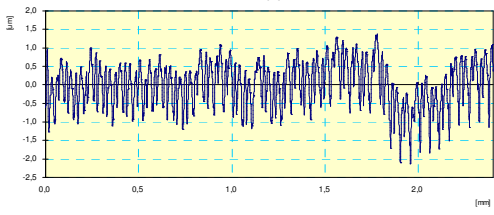
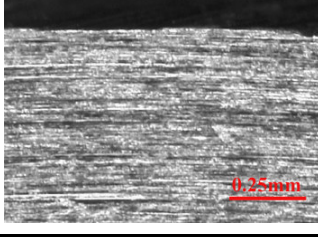
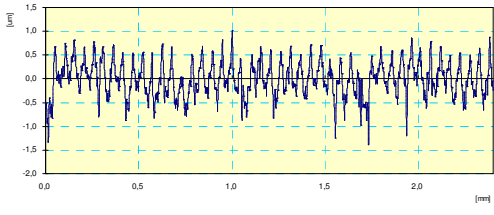
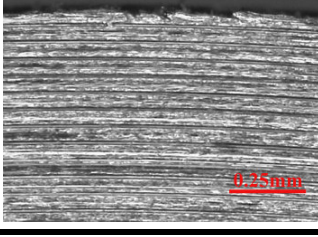
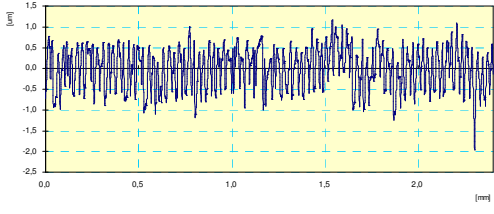
Para verificar o efeito da velocidade de corte no acabamento superficial dos três aços estudados na condição como recebido, foram faceados corpos de prova de 25 mm de diâmetro dos aços ABNT 304, ABNT 303 e ABNT 310. A composição química desses materiais foi apresentada na Tabela 3.2. Esses materiais foram faceados com rotações que variaram de 1600 rpm e 2500 rpm, com avanço de 0,05 mm/rotação e profundidade de corte de 0,1 mm. A ferramenta utilizada foi de metal duro sem quebra cavacos com raio de ponta de 0,8 mm e ângulo de posição de 72°. Na Tabela 4.2 são apresentadas as superfícies, rugosidades e perfis de rugosidades obtidos em diferentes regiões da superfície faceada do aço ABNT 304 de 25mm de diâmetro, onde cada região corresponde a uma velocidade de corte diferente. As superfícies geradas no aço ABNT 304 com diferentes velocidades de corte não apresentaram diferenças significativas com relação à rugosidade superficial. Pode-se observar que para uma velocidade de corte aproximada de 94 m/min esse material apresentou uma rugosidade um pouco pior que as obtidas nas velocidades de corte aproximadas de 60 m/min, 126 m/min e de 196 m/min.

Na Tabela 4.3 são mostradas as superfícies, rugosidades e perfis de rugosidade dos aços ABNT 303. As superfícies geradas no aço ABNT 303, apresentou-se pior em relação à verificada no aço ABNT 304 para todas as faixas de velocidade corte. Foi obtido pior valor de rugosidade para uma velocidade de corte média de 126m/min. As outras três faixas de velocidades de corte avaliadas apresentaram valores mais próximos para a rugosidade.

Nesse material, pequenos cavacos ficaram aderidos na superfície e isso contribuiu para piorar o acabamento superficial. Esses cavacos podem ser vistos na Fig. 4.6. No aço ABNT 303 existe enxofre, que forma sulfetos os quais atuam no sentido de melhorar a usinabilidade deste material. Essa modificação pode melhorar os custos de usinagem em termos de

economia de ferramentas e em menores potências necessárias. No entanto, do ponto de vista de qualidade de superfície, esse aço apresenta desvantagem em relação aos ABNT 304 e ao ABNT 310, como será constatado na seqüência.

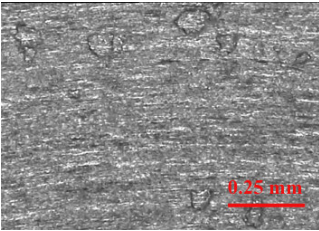
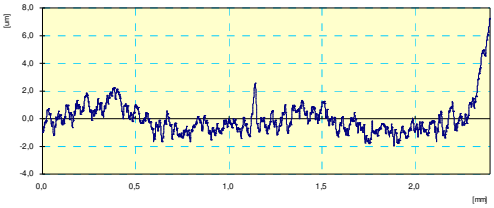
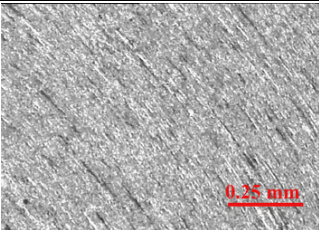
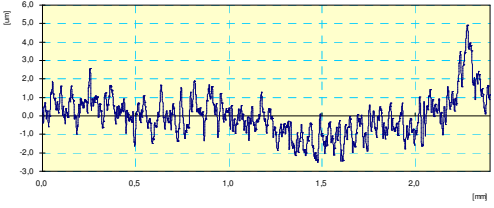
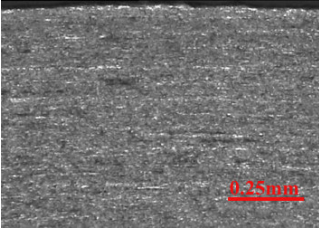
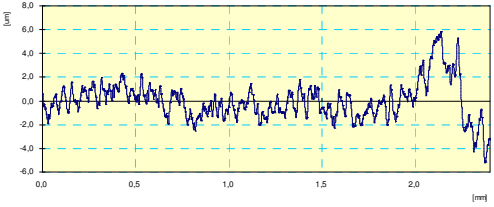
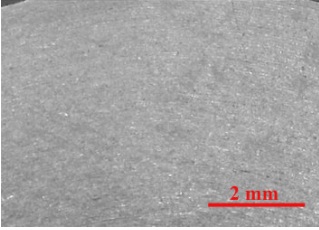
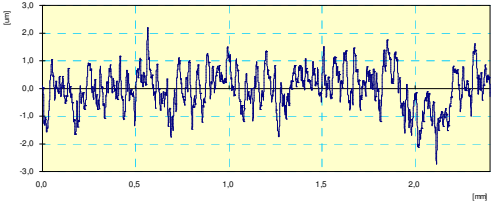
Tabela 4.2- Faceamento do aço ABNT 304 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308 . Os parâmetros de rugosidade utilizados foram: média aritmética (Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)

Vc	Superfície	Rugosidade	Perfil de Rugosidade
60		Ra [μm] 0,27 Ry [μm] 1,98 Rz [μm] 1,98 Rq [μm] 0,34 Rt [μm] 2,14 Rp [μm] 0,91	
94		Ra [μm] 0,50 Ry [μm] 2,75 Rz [μm] 2,75 Rq [μm] 0,60 Rt [μm] 3,51 Rp [μm] 1,22	
126		Ra [μm] 0,29 Ry [μm] 2,23 Rz [μm] 2,23 Rq [μm] 0,37 Rt [μm] 2,41 Rp [μm] 0,90	
196		Ra [μm] 0,40 Ry [μm] 2,51 Rz [μm] 2,51 Rq [μm] 0,48 Rt [μm] 3,15 Rp [μm] 1,09	

Na Tabela 4.4 são mostradas as superfícies, rugosidades e perfis de rugosidade dos aços ABNT 310. As superfícies geradas neste aço apresentaram-se ligeiramente piores as do aço ABNT 304 e melhores as do aço ABNT 303. A pior rugosidade foi observada para a velocidade de corte em torno de 60 m/min e a melhor para a velocidade de corte em torno de

94 m/min. Para as outras duas velocidades de corte o acabamento superficial ficou muito semelhante.

Tabela 4.3- Faceamento do aço ABNT 303 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308. Os parâmetros de rugosidade utilizados foram: média aritmética (Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)

Vc	Superfície	Rugosidade	Perfil de Rugosidade
60		Ra [μm] 0,80 Ry [μm] 5,75 Rz [μm] 5,75 Rq [μm] 1,09 Rt [μm] 9,25 Rp [μm] 4,03	
94		Ra [μm] 0,83 Ry [μm] 5,32 Rz [μm] 5,32 Rq [μm] 1,08 Rt [μm] 7,42 Rp [μm] 3,12	
126		Ra [μm] 1,17 Ry [μm] 6,57 Rz [μm] 6,57 Rq [μm] 1,45 Rt [μm] 11,03 Rp [μm] 3,32	
196		Ra [μm] 0,57 Ry [μm] 3,89 Rz [μm] 3,89 Rq [μm] 0,71 Rt [μm] 4,93 Rp [μm] 1,82	

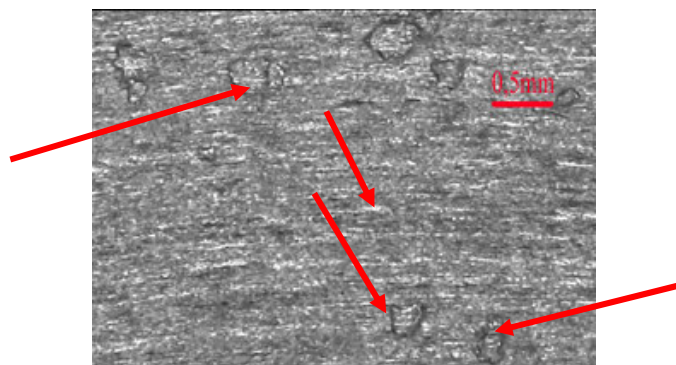
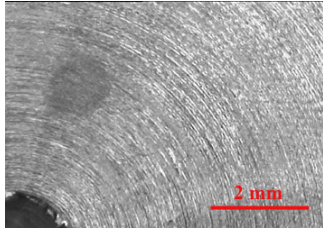
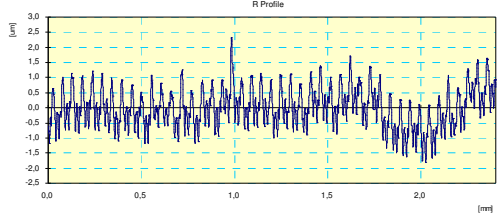
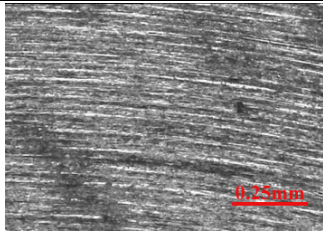
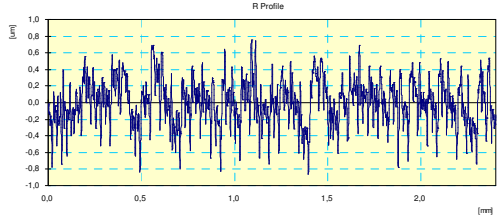
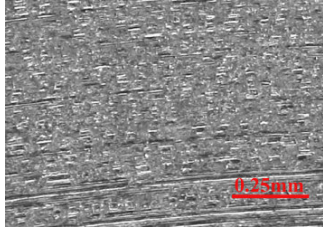
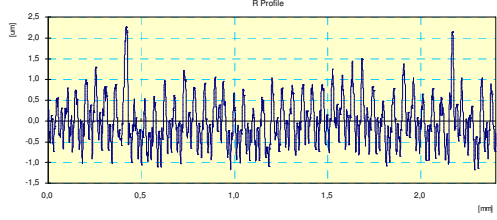
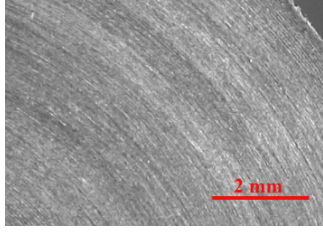
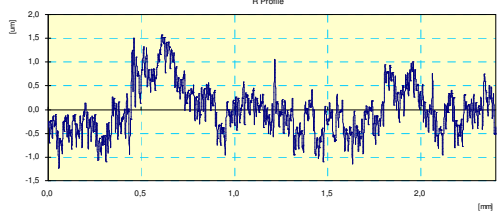


Fig. 4.6. Aço ABNT 303 faceado com cavacos aderidos a superfície indicados pelas setas

Tabela 4.4- Faceamento do aço ABNT 310 como recebido. $f = 0,05\text{mm/rotação}$ e $a_p = 0,1\text{mm}$ e ferramenta TPGN 160308. Os parâmetros de rugosidade utilizados foram: média aritmética (Ra), máxima altura (Ry), máxima altura (Rz), média quadrática (Rq), altura total (Rt) e altura de pico (Rp)

Vc	Superfície	Rugosidade	Perfil de Rugosidade
60		Ra [μm] 0,51 Ry [μm] 3,13 Rz [μm] 3,13 Rq [μm] 0,63 Rt [μm] 4,12 Rp [μm] 1,76	
94		Ra [μm] 0,22 Ry [μm] 1,54 Rz [μm] 1,54 Rq [μm] 0,27 Rt [μm] 1,62 Rp [μm] 0,71	
126		Ra [μm] 0,44 Ry [μm] 3,04 Rz [μm] 3,04 Rq [μm] 0,56 Rt [μm] 3,44 Rp [μm] 1,89	
196		Ra [μm] 0,40 Ry [μm] 2,38 Rz [μm] 2,38 Rq [μm] 0,49 Rt [μm] 2,83 Rp [μm] 1,22	

A variação da velocidade de corte provoca uma variação na taxa de deformação. A variação na taxa de deformação por sua vez, causa um encruamento diferente e a formação de cavaco é alterada. Para as velocidades maiores, as taxas de deformação são maiores e isso tem um efeito semelhante a um aumento de resistência do material. Esse “aumento de resistência” tem como consequência uma diminuição de ductilidade. Um outro fator que pode ser considerado é a transferência de calor. Em usinagens utilizando maiores velocidades a extração de calor pelo cavaco também pode ser maior. Assim o material usinado deve atingir menores temperaturas e, portanto apresentar menor tenacidade. Além desses fatores, também

pode estar associado com velocidade de corte e mais diretamente com o encruamento provocado no material durante o processo de usinagem em aços inoxidáveis austeníticos, a possibilidade de formação de martensitas induzidas por deformação (MDI). Os três aços estudados possuem diferentes tendências à formação de MDI. Em uma seqüência, o ABNT 303 apresenta maior tendência, o ABNT 304 apresenta uma tendência intermediária e o ABNT 310 praticamente não apresenta nenhuma tendência à formação das MDI. Deste modo, provavelmente, no ABNT 303 ocorre maior formação de MDI que no ABNT 304, ao passo que no ABNT 310 provavelmente a influência é muito pequena.

No caso do ABNT 310, além da menor tendência a formação de MDI, os resultados de rugosidade foram mais próximos nas diferentes velocidades. Provavelmente, isso também está ligado ao fato desse material apresentar uma estrutura de grãos mais refinada e homogênea como pode ser verificado na Fig. 4.1. Ao cortar um material com estrutura mais homogênea, provavelmente, os outros fatores que influenciam no acabamento da superfície, além do avanço e do raio da ferramenta, atuam de maneira mais constante. Isso pode ser uma explicação para a semelhança de rugosidade nas diferentes velocidades de corte. Outra explicação que pode ser associada às características da superfície do aço ABNT 310 é o fato deste apresentar menores coeficientes de dilatação térmica, como pode ser verificado pela Tabela 2.5. Essa propriedade pode colaborar no sentido de diminuir possíveis variações dimensionais em diferentes velocidades de corte. Admitindo-se que ocorram diferentes temperaturas com a variação da velocidade de corte.

Pelos Gráfico 4-1 e Gráfico 4-2 pode-se notar que cada um dos três aços apresentou diferentes valores de rugosidades R_a para as mesmas condições de usinagem. Na velocidade de corte maior, ou seja, aproximadamente 195 m/min os três materiais apresentam acabamento superficial semelhante do ponto de vista de rugosidade superficial. Entretanto, para trabalhar com essa velocidade de corte em peças de diâmetros inferiores a 25 mm seria

necessário a utilização de uma máquina capaz de atingir maiores rotações. O equipamento disponível para realizar os demais ensaios de torneamento não possuía a estabilidade necessária quando eram utilizadas rotações superiores a 1120 rpm. Para essa rotação, a velocidade de corte em torneamento para corpos de prova com 25 mm de diâmetro está em torno de 90 m/min. Além disso, nas regiões faceadas com velocidade de corte próximas a 90 m/min também ocorreu uma semelhança nos valores de rugosidade para os três aços. Em função dos resultados obtidos e das limitações dos equipamentos disponíveis, a velocidade de corte de 90 m/min foi fixada nos demais ensaios para facilitar a verificação dos efeitos dos demais parâmetros de usinagem.

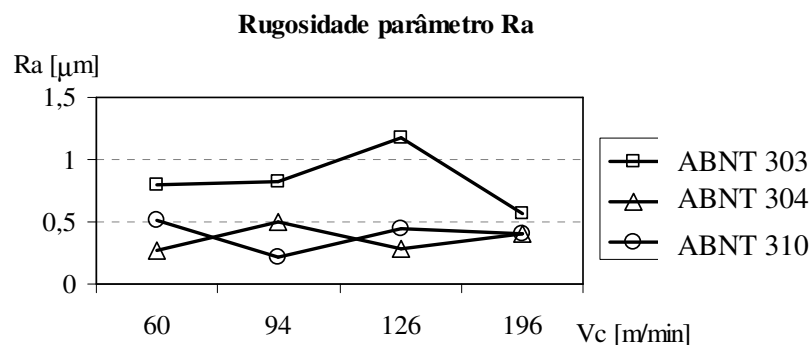


Gráfico 4-1. Comparação de rugosidades Ra com a variação da velocidade de corte e do material. Ra é a rugosidade média aritmética

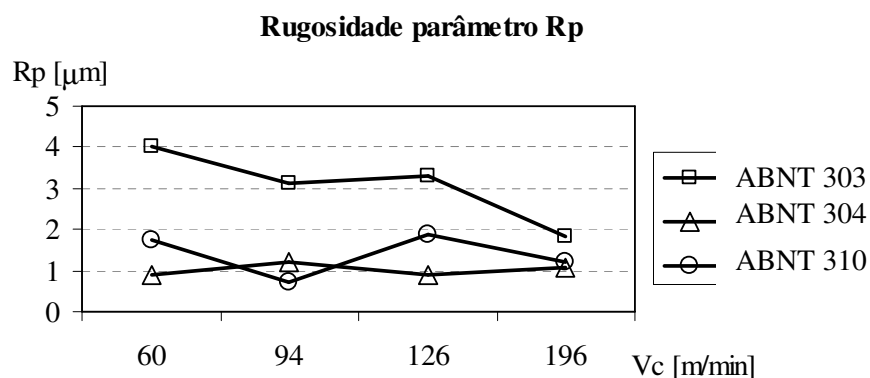


Gráfico 4-2. Comparação de rugosidades Rp com a variação da velocidade de corte e do material. Rp é a rugosidade altura de pico.

4.1.5 Torneamento: efeitos da relação f/a_p e da ferramenta

As próximas análises foram feitas utilizando os parâmetros de corte indicado na Tabela 4.5 (que é uma parte da Tabela 3.5 apresentada anteriormente) para usinagem por torneamento externo dos três materiais como recebidos.

Tabela 4.5 – Parâmetros de usinagem utilizados em torneamento nos três aços estudados

Operação de torneamento	Aço ABNT	Tratamento Térmico	Ferramentas	Parâmetros de corte							
				χ_r	γ_0	α_0	Rev.	Q.C	Vc	f (mm/volta)	a_p (mm)
Cilindramento (1)	304	Como recebido	TPGN 160308	90°	6°	8°	sem	sem	90	0,048	0,05
											0,10
											0,14
											0,24
											0,19
											0,34
											0,68
											1,02
Cilindramento (2)	303 304 310	Como recebido	TCMT 160304	90°	4°	7°	TiN	co m	90	0,200	1,36
											1,70
											0,1
											0,2
											0,4
0,6											
Cilindramento (3)	303 304 310	Como recebido	TPGN 160304	90°	6°	8°	sem	sem	90	0,100	0,2
Cilindramento (4)	303 304 310	Como recebido	TCMT 160304	90°	4°	7°	TiN	co m	90	0,100	0,2

4.1.5.1 Efeito da relação f/a_p para o aço ABNT 304 (ensaios preliminares)

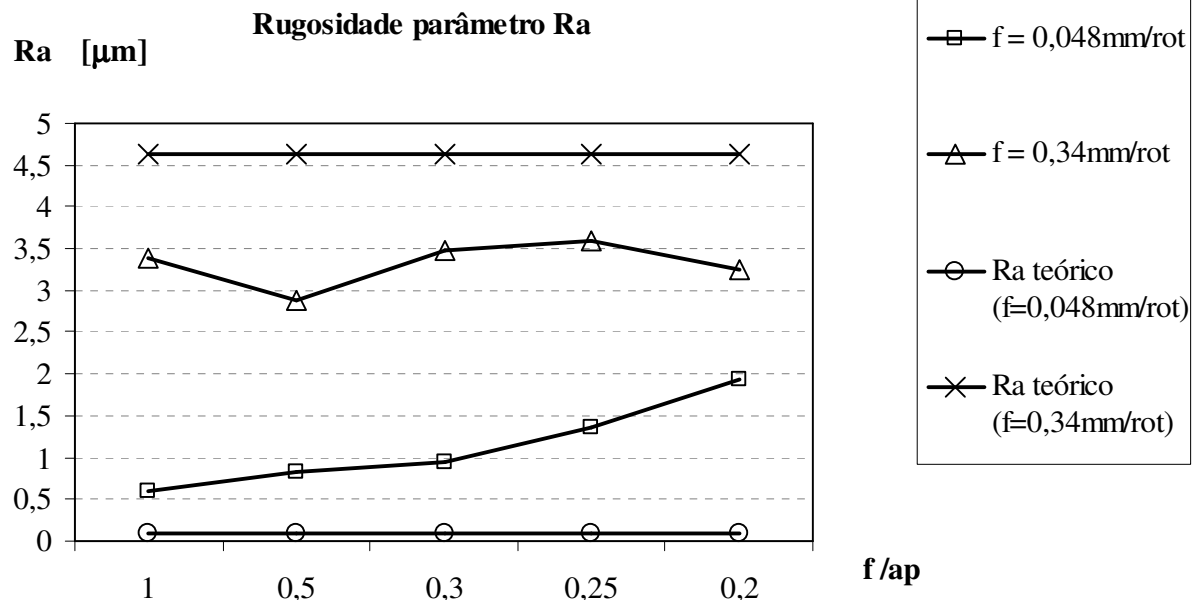
A relação f/a_p é importante, pois ela está relacionada com o estado de tensões durante o processo de corte da formação do cavaco (MACHADO et al., 2003). Os resultados

apresentados a seguir indicam que a rugosidade é influenciada por outros fatores além da geometria da ferramenta e do avanço. A rugosidade também é influenciada pela profundidade de corte.

As rugosidades medidas em parâmetros Ra indicadas na Tabela 4.6 são resultados das superfícies geradas com ferramenta de raio de ponta 0,8mm. Foram utilizados avanços de 0,048 mm/rotação e de 0,034 mm/rotação para diferentes profundidades de corte. No Gráfico 4-3 estão indicados os valores das rugosidades medidas e das rugosidades teóricas. Para o avanço de 0,048 mm/rotação, os valores medidos ficaram bastante acima do valor calculado. Isso está associado à influência dos demais fatores que interferem no acabamento superficial além do avanço e do raio de ponta da ferramenta. Neste caso também se observa uma tendência ao aumento de rugosidade com o aumento da profundidade de corte. Provavelmente, isso foi causado pela falta de rigidez do equipamento. Ou seja, na medida em que a profundidade de corte aumenta a força corte aumenta e pode ocorrer um aumento de vibração. Essa vibração contribui para que a rugosidade superficial fique pior. Para o avanço de 0,34 mm/rotação a rugosidade medida ficou abaixo da rugosidade calculada. Isso pode ter ocorrido devido ao preenchimento dos espaços dos vales por partículas provenientes de arestas postiças, levando a uma diminuição do valor da rugosidade (REIS, 2001 apud MACHADO; SILVA, 2004). Pode ainda acontecer esmagamento dos picos, diminuindo dessa forma os valores da rugosidade. Neste caso não ocorreu aumento de rugosidade com a profundidade de corte. Portanto, com a utilização do avanço de 0,34 mm/rotação, se houve alguma influência da falta da rigidez do equipamento, esta ocorreu em todos os ensaios e de forma semelhante.

Tabela 4.6 – Influência da relação f/a_p na rugosidade superficial

Relação f/a_p	Avanço (f) em mm/rotação	Profundidade de corte (a_p) mm	Rugosidade Ra [μm]
1,00	0,048	0,05	0,61
0,50		0,10	0,82
0,30		0,14	0,94
0,25		0,19	1,36
0,20		0,24	1,94
1,00	0,340	0,34	3,38
0,50		0,68	2,88
0,30		1,02	3,48
0,25		1,36	3,60
0,20		1,70	3,26

Gráfico 4-3. Variação da rugosidade Ra em função do avanço e da profundidade de corte para torneamento do aço ABNT 304 com ferramenta de metal duro e com raio de ponta de 0,8mm com $\chi_r=90^\circ$

Um outro ponto importante a ser observado com esses ensaios é a provável ocorrência de diferentes estados de tensão. Em casos onde o avanço é bem menor que a profundidade de corte pode ocorrer estado plano de tensão. Ou seja, a espessura do material retirado é muito menor que a largura. Dessa forma as tensões existentes atuam somente em um plano. Para

verificar melhor essa ocorrência de estado plano de tensão foi realizado o experimento que se segue com os três diferentes aços estudados. Há uma indicação que para avanços menores a relação f/a_p , ou seja, o estado de tensões parece ser mais relevante do que quando os avanços são maiores.

4.1.5.2 Efeito da relação f/a_p para os aços ABNT 303, 304 e 310.

Os próximos resultados foram obtidos em ensaios de usinagem dos aços ABNT 303 ABNT 304 e ABNT 310 com os parâmetros de corte indicados na Tabela 4.7, que é uma parte da Tabela 3.5.

Tabela 4.7- Usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310 com 0,2mm de avanço

Operação	Aço ABNT	Tratamento Térmico	Ferramentas	Parâmetros de corte							
				χ_r	γ_0	α_0	Rev.	Q.C	Vc	f	a_p
Torneamento cilindramento	303	Como recebido	TCMT 160304	90°	4°	7°	TiN	com	90	0,2	0,1
	304										0,2
	310										0,4
											0,6

As fotografias obtidas utilizando microscopia óptica apresentadas nas Fig. 4.7 são as superfícies dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente, obtidas para profundidades de corte 0,1 mm; 0,2 mm; 0,4 mm e 0,6 mm. Por estas fotografias pode-se observar que no aço ABNT 303 aparecem vários sinais “arredondados” ou “ falhas” na superfície. Isto pode ser explicado pela presença de enxofre. A usinabilidade desses aços é melhorada pela adição de enxofre. O enxofre propicia a formação de inclusões de sulfeto de manganês, o que facilita a quebra do cavaco. Esses sulfetos são arrancados durante a usinagem e deixam falhas nas superfícies, que podem ser os sinais arredondados mostrados nas quatro superfícies da

primeira coluna da Fig. 4.7. Verifica-se também que para esse aço a superfície mostra-se muito semelhante para as diferentes relações de f/a_p .

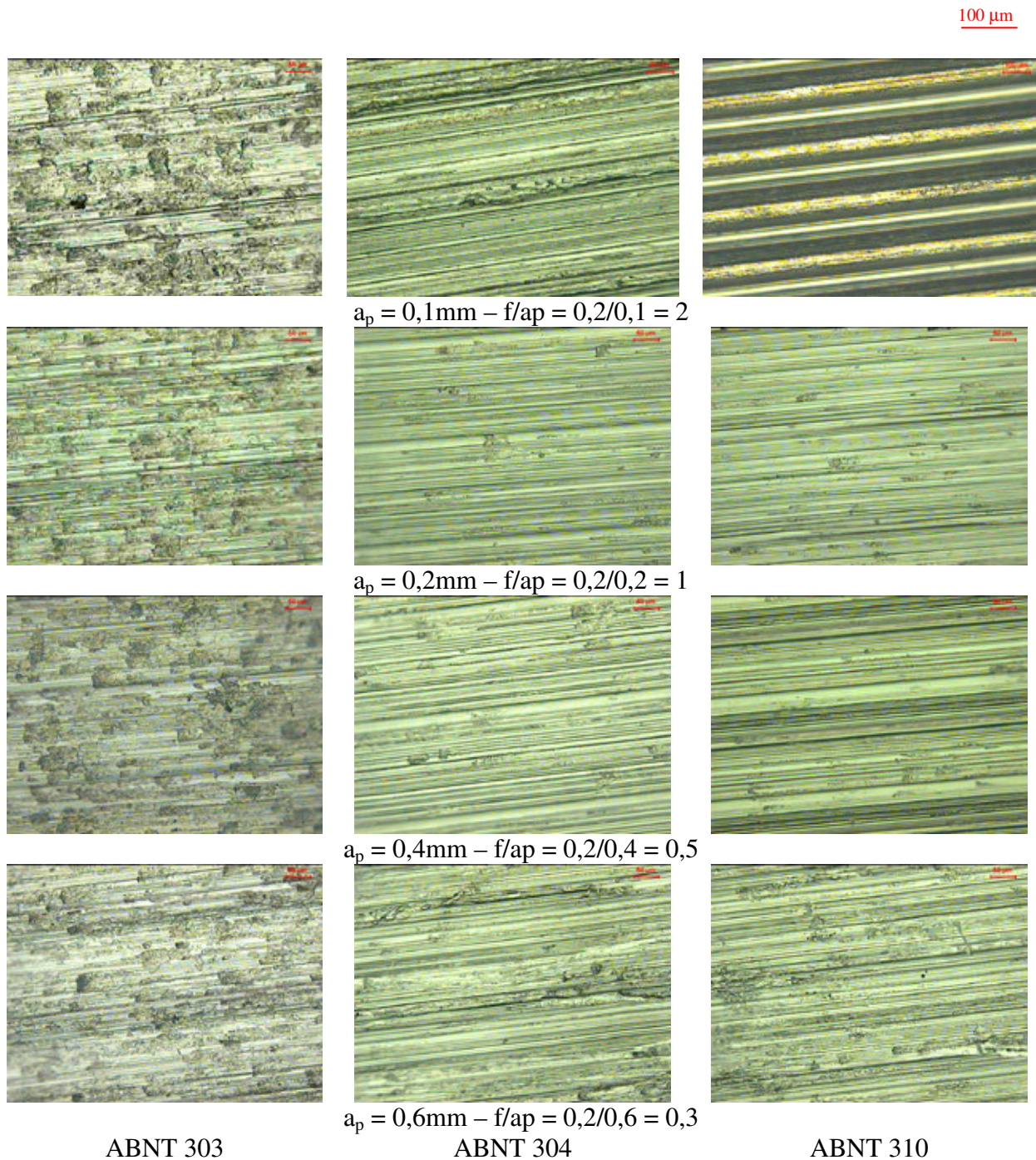


Fig. 4.7 - Superfícies usinadas dos aços ABNT 303, 304 e 310. Microscopia óptica. Primeira linha de imagens $a_p = 0,1\text{mm}$. Segunda linha de imagens $a_p = 0,2\text{ mm}$. Terceira linha de imagens $a_p = 0,4\text{ mm}$. Quarta linha de imagens $a_p = 0,6\text{ mm}$. Todas as superfícies $f = 0,2\text{ mm/rotação}$ e $V_c = 90\text{m/min}$

Para o aço ABNT 304, quando a relação f/a_p diminui pode-se observar pelas fotografias que além das marcas deixadas pela ferramenta, existem porções de materiais dispostos de maneira oblíqua entre um passo e outro do avanço de forma mais acentuada do que na superfície usinada obtida com a relação $f/a_p = 1$ e 2. Isso pode ser uma indicação que durante a formação do cavaco existe influência do estado de tensão. Quando o estado de tensões é próximo do plano, isto é, $f/a_p \approx 0,2$, as tensões devem causar deformações em sentidos oblíquos às deformações deixadas pela ferramenta. A Fig. 4.8 apresenta uma região da superfície do aço ABNT 304 usinado com $f/a_p = 0,3$, onde pode-se notar as deformações oblíquas indicadas pelas setas deixadas pela ponta da ferramenta.

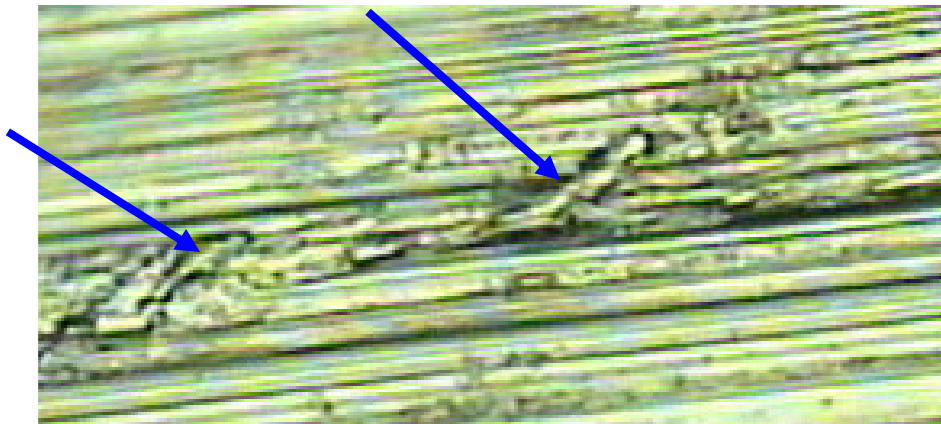


Fig. 4.8. Aço ABNT 304 usinado com $f/a_p = 0,3$. Detalhe de uma região onde aparecem deformações em sentido oblíquo indicadas pelas setas deixadas pela ponta da ferramenta

No aço ABNT 310 as superfícies obtidas com a relação $f/a_p = 1$ e 2 são mais homogênea. Observam-se apenas as marcas da ferramenta e também para a relação $f/a_p = 0,5$ e 0,3 aparecem sinais de deformações oblíquos aos deixados pela ferramenta de forma semelhante ao ABNT 304.

Os cavacos formados apresentaram-se sempre contínuos e serrilhados como apresentado na Fig. 4.9, mesmo utilizando-se uma ferramenta com quebra-cavacos. Isso ocorre por esses materiais serem extremamente dúcteis.

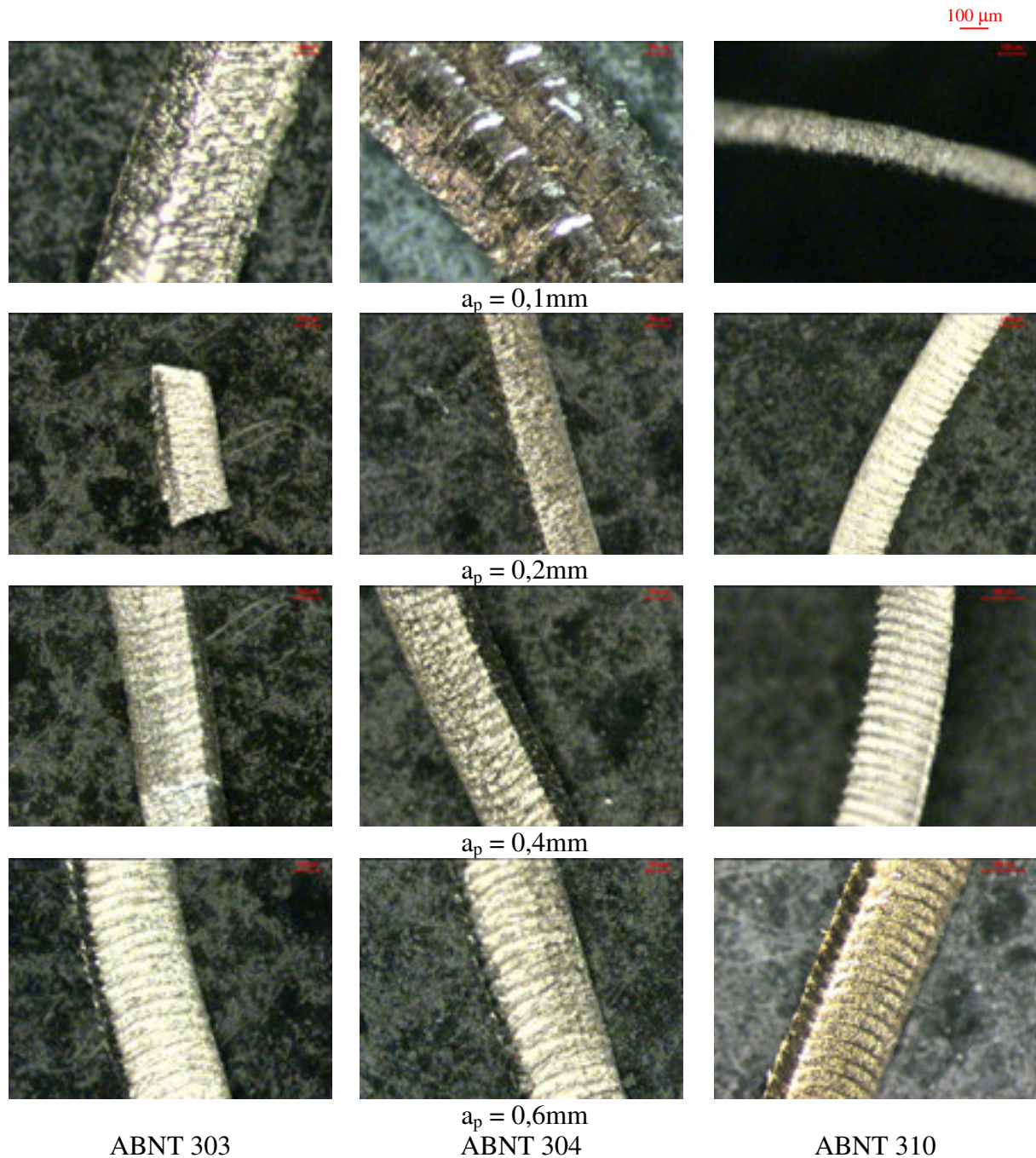


Fig. 4.9. Cavacos produzidos durante a usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310. Primeira linha de imagens $a_p = 0,1\text{mm}$. Segunda linha de imagens $a_p = 0,2\text{mm}$. Terceira linha de imagens $a_p = 0,4\text{mm}$. Quarta linha de imagens $a_p = 0,6\text{mm}$. Todos os cavacos produzidos com $f = 0,2\text{mm}/\text{rotação}$ e $V_c = 90\text{m}/\text{minuto}$

Pelo pequeno magnetismo dos cavacos produzidos pode-se perceber que os aços inoxidáveis utilizados neste trabalho apresentam tendências à formação de martensitas induzidas por deformação. A influência da composição na formação de martensitas induzidas por deformação também pode ser expressa com auxílio de fórmulas empíricas como a apresentada na revisão da literatura, para a determinação de $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ equação (3). A utilização de um ímã permanente de ferro – neodímio – boro nos cavacos, mostrou a existência de uma fase magnética nos cavacos dos aços ABNT 303 e 304. Os cavacos eram facilmente atraídos pelo ímã. Já no caso do aço ABNT 310 não foi observado mudanças no magnetismo. Ao calcular $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ para os três diferentes aços temos os seguintes resultado, que já foram discutidos anteriormente: $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ para o ABNT 303 = $21,9^{\circ}C$; $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ para o ABNT 304 = $3,64^{\circ}C$ e $Md_{10/45}(^{\circ}C)$ para o ABNT 310 = $-355,3^{\circ}C$.

Por esses valores pode-se observar que o aço ABNT 303 tem maior tendência à formar martensitas induzidas por deformação que os outros dois aços. Também se pode perceber que a tendência de ocorrer à formação de martensita induzida por deformação no ABNT 310 é muito baixa, pois o resultado calculado forneceu um valor menor que 0 (zero) Kelvin.

As superfícies também foram avaliadas com medidas de rugosidade. Os perfis de rugosidade R_t encontrados estão apresentados a seguir na Fig. 4.10. Pelos perfis de rugosidades o aço ABNT 303 apresentou comportamento semelhante para as diferentes relações de f/a_p , apresentando um ligeiro aumento no valor da rugosidade total para a condição de $a_p = 0,6$ mm, ($f/a_p = 0,3$) uma vez que o f utilizado foi de $0,2$ mm/rotação. O aço ABNT 304 comportou-se de maneira semelhante para $f/a_p = 0,5$ e $Vf/a_p = 0,3$. No entanto, apresentaram resultados diferenciados para relações $f/a_p = 1$ e $f/a_p = 2$. O aço ABNT 310 apresentou um valor de rugosidade total cerca de 5 vezes maior que as demais condições para uma relação de $f/a_p = 2$. Nas demais condições de f/a_p os valores de rugosidades foram semelhantes. Quando se compara a rugosidade dos diferentes aços, nota-se grande semelhança

entre os valores medidos. Isso indica que para a condição da superfície com relação à medida de rugosidade os três materiais apresentam comportamento semelhante. Portanto, há indicações que para as condições estudadas a relação de f/a_p não afeta de forma significativa a rugosidade da superfície. No caso de $f/a_p = 2$ para o aço ABNT 310 apresentar maior rugosidade a explicação pode estar relacionada com uma quebra na ferramenta, ou ainda um aumento de vibração, provocado por falta de estabilidade, devido a pouca profundidade de corte utilizada. Outra explicação para isso pode estar associada com o tamanho de grão bastante reduzido deste material em relação aos demais. Como se utilizou a_p menor que f pode ser que mesmo a ferramenta possuindo raio de ponta de 0,4 mm o avanço tenha sido muito grande para esta estrutura de grãos.

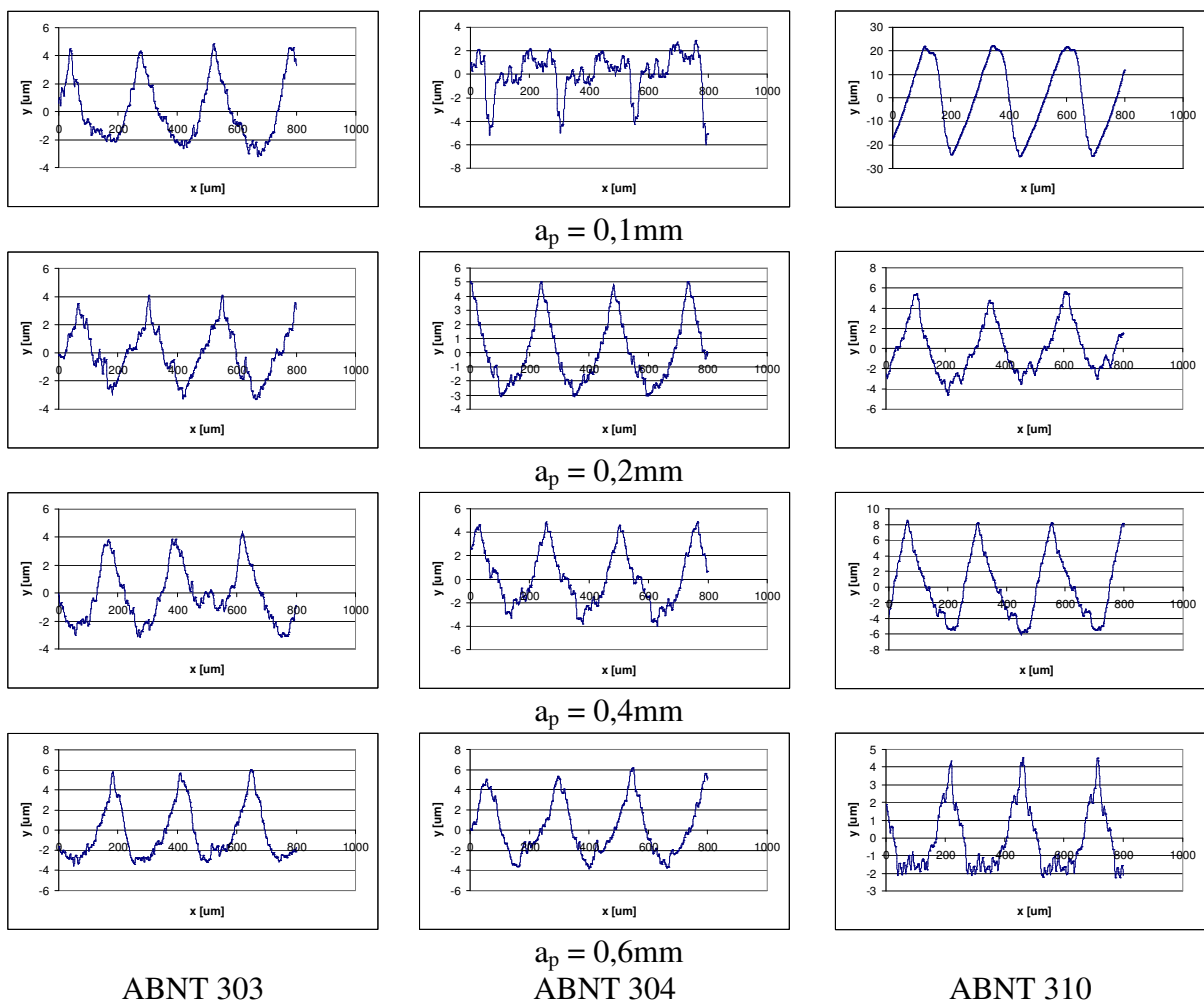


Fig. 4.10. Perfis de rugosidade para diferentes relações f/a_p para usinagens dos três diferentes aços ABNT 303, 304 e 310

A Fig. 4.11 é uma representação esquemática em escala proporcional entre a estrutura de grãos do aço ABNT 310 e a geometria da ferramenta, f e a_p .

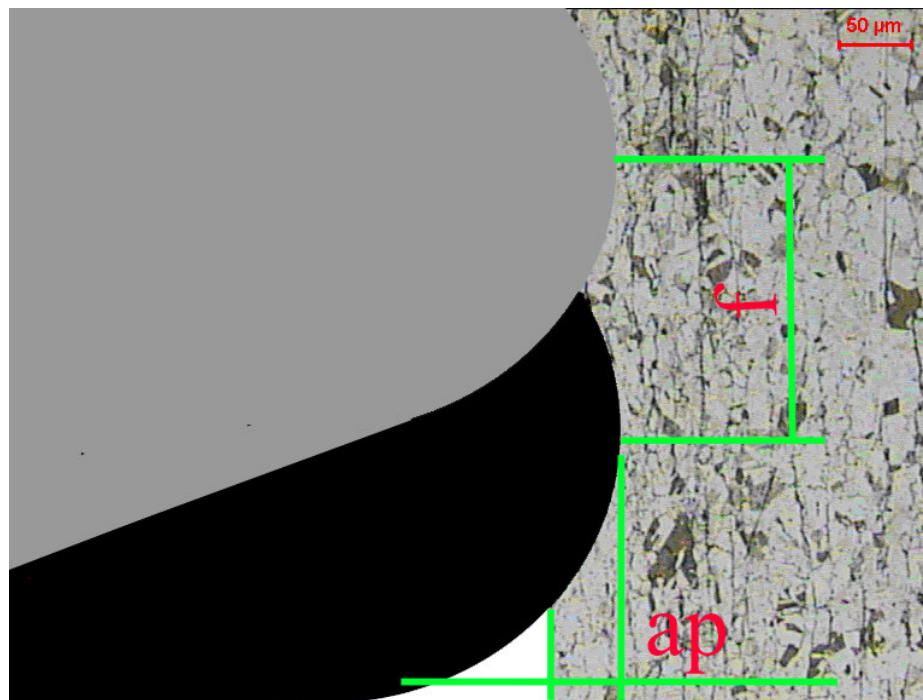


Fig. 4.11. Representação esquemática em escala proporcional entre a estrutura de grão do aço ABNT 310 e a geometria da ferramenta, o f e a_p

Os resultados na Tabela 4.8 são referentes aos esforços de corte medidos durante a usinagem dos três aços estudados com velocidade de corte de 90m/min e avanço de 0,2 mm/rotação, para os diferentes valores de a_p .

Pelos resultados se pode notar que as forças de corte aumentam com aumento da profundidade de corte. Isso está associado ao aumento de volume de material retirado, mas também está associado com as composições químicas e microestrutura dos materiais. O ABNT 303 se mostrou mais fácil de ser cortado (como esperado) que os demais. Já o ABNT 310 ofereceu maior resistência.

Tabela 4.8-Resultados das forças de corte para os corpos de prova dos aços ABNT 303, 304 e 310 com diferentes profundidades de corte e avanço de 0,2 mm/volta *

Aço	Força de corte (N)			
	$a_p = 0,1\text{mm}$	$a_p = 0,2\text{mm}$	$a_p = 0,4\text{mm}$	$a_p = 0,6\text{mm}$
ABNT 303	50	100	150	300
ABNT 304	100	150	200	300
ABNT 310	50	200	250	350

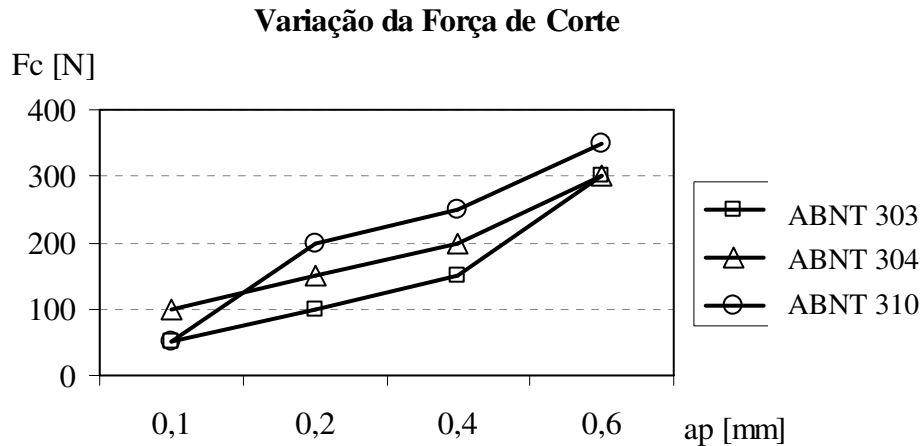


Gráfico 4-4. Variação da força de corte com o aumento da profundidade de corte para os três aços estudados

Para elucidar melhor o comportamento dos três diferentes aços estudados, os esforços medidos foram associados com pressão específica de corte (k_s) dada em N/mm^2 . Ou seja, a força de corte por unidade de área da secção de corte. A pressão específica de corte (k_s) depende de fatores como: material da peça, secção de corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição da ferramenta, estado de desgaste da ferramenta, velocidade de corte, condição de

* Os resultados apresentados na tabela 4.8 foram obtidos utilizando uma taxa de aquisição de 100Hz, isso fez com que os resultados de um modo geral apresentassem valores elevados de desvios padrões (+- 25 N). No entanto, podem-se comparar qualitativamente as diferentes condições de profundidade de corte e os três materiais. Verificou-se que o ABNT 303 apresentou os menores esforços e o ABNT 310 os maiores. Ainda ficou evidente que os esforços aumentam com o aumento da profundidade de corte.

lubrificação, refrigeração e rigidez da ferramenta (FERRARESI, 1977). Dentre os fatores citados anteriormente, foram estudados o efeito da profundidade de corte (a_p) que está diretamente relacionada com a secção de corte. Os demais fatores foram mantidos constantes durante os ensaios, pois o objetivo maior deste ensaio foi verificar o efeito da relação f/a_p , para os três materiais. Além disto, no cálculo da secção de corte foi feita uma simplificação, não sendo levado em conta o raio de ponta da ferramenta. Assim os valores de k_s são aproximações, mas que serviram para comparar as diferenças entre uma condição e outra para os três aços.

Tabela 4.9- Pressão específica de corte para os aços ABNT 303, 304 e 310 como recebidos

Aço	Pressão específica de corte (k_s) [N/mm^2]			
	$a_p = 0,1mm$	$a_p = 0,2mm$	$a_p = 0,4mm$	$a_p = 0,6mm$
ABNT 303	2500	2500	1875	2500
ABNT 304	5000	3750	2500	2500
ABNT 310	2500	5000	3125	2917

O Gráfico 4-5 compara os valores da Tabela 4.9. Com seu auxílio nota-se que o ABNT 303 se comportou de maneira semelhante quanto à pressão específica de corte. Isso mostra que esse material não foi influenciado pelas diferentes relações de f/a_p utilizadas. Já o aço ABNT 304 apresenta maiores valores de k_s para relações f/a_p maiores que 1 e menores valores de k_s para relações f/a_p menores que 0,5. Por fim, o aço ABNT 310 apresentou k_s maior para a relação $f/a_p = 1$; k_s semelhantes para as relações $f/a_p = 0,5$ e $0,3$ e k_s menor para a relação $f/a_p = 2$. Esses resultados confirmam que os valores de k_s são influenciados pela profundidade de corte e também pelo material usinado. Esta variação parece estar mais associada com a composição química do que com a microestrutura do material. No caso do ABNT 303 a presença dos sulfetos de manganês faz com que menores esforços de corte fossem necessários. Além disso, o estado de tensão, também não influenciou no valor de k_s . Já os

aços ABNT 304 e 310 apresentaram variações semelhantes, ainda que o ABNT 310 apresentasse valores maiores. Neste caso, o estado de tensão influenciou no valor de k_s . De modo que para relações de f/a_p menor que 0,5 a k_s apresentou valores semelhantes para os três aços. Esses resultados permitiram definir a relação f/a_p menor que 0,5, a qual foi empregada nos demais ensaios, onde foram avaliados o papel do material e dos tratamentos térmicos na usinagem por torneamento do três aços inoxidáveis austeníticos estudados.

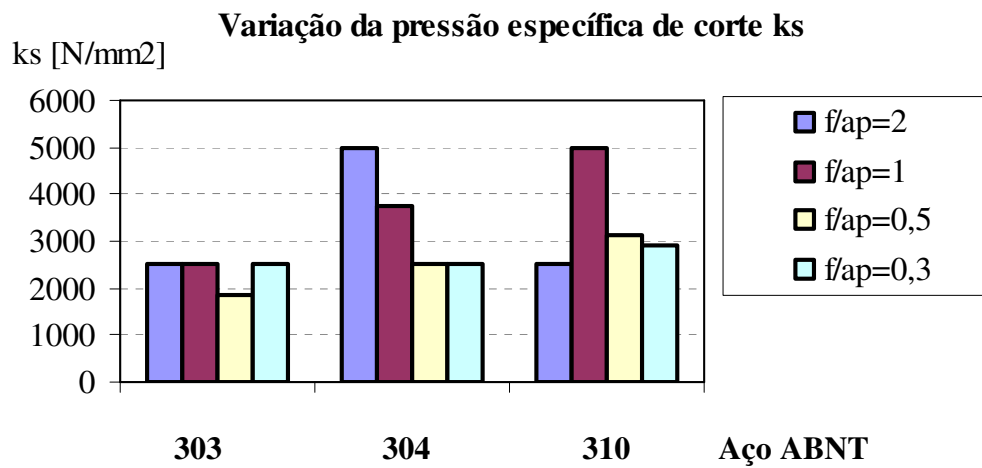


Gráfico 4-5. Variação da pressão específica de corte para os aços ABNT 303, 304 e 310 como recebido. Para ensaios de torneamento com $f = 0,2\text{mm}$, $V_c = 90\text{ m/min}$ e $a_p = 0,1\text{ mm}, 0,2\text{ mm}, 0,4\text{ mm}$ e $0,6\text{mm}$

Para levar em consideração o raio de arredondamento da ferramenta na espessura do cavaco para determinação da área necessária no cálculo de k_s pode-se recorrer a modelos que fazem a correção da espessura do cavaco em função do raio de arredondamento. A equação (8) baseada na Fig. 4.12 proposta por Altintas (2000) é um destes modelos.

$$h(\phi) = r - \sqrt{f^2 + r^2 - 2fr \cos\left(\theta - \arcsen\left(\frac{f}{r} \sin(\theta)\right)\right)} \quad (8)$$

Onde, f é o avanço, r o raio de arredondamento e ϕ é calculado com base em ϕ_1 e ϕ_0 .

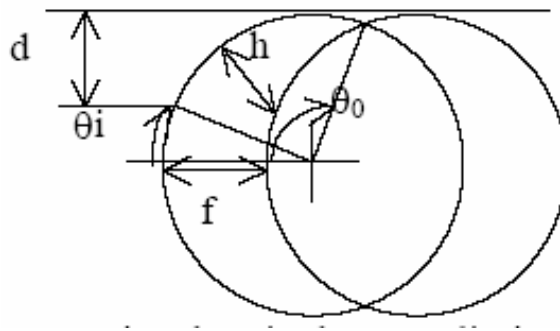


Fig. 4.12. Seção do cavaco na região do raio de ponta limitada pelo perímetro de dois arcos de circunferência de raio r e com distância entre centros igual ao avanço f .

4.1.5.3 Efeito da ferramenta

Os próximos resultados foram obtidos para a usinagem dos três diferentes aços estudados com os parâmetros de corte da Tabela 4.10, que é uma parte da Tabela 3.5. Neste item o objetivo foi comparar o efeito de duas diferentes ferramentas de corte.

Tabela 4.10-Usinagem dos aços ABNT 303, 304 e 310 com 0,1mm de avanço

Operação	Aço ABNT	Tratamento Térmico	Ferramentas				Parâmetros de corte				
			χ_r	γ_0	α_0	Rev.	Q.C	Vc	f	a_p	
Torneamento de Cilindramento	303	Como recebido	TPGN	90°	6°	8°	sem	sem	90	0,1	0,2
	304		160304		7°	7°	TiN	com			
310	TCMT 160304										

A primeira comparação feita foi o valor dos esforços medidos durante a usinagem. Esses valores de esforços estão relacionados na Tabela 4.11 e representados no gráfico Gráfico 4-6.

Tabela 4.11 – Esforços de corte para torneamento dos três aços estudados com avanço de 0,1mm e profundidade de 0,2mm. MD representa ferramenta plana de metal duro sem quebra cavacos e sem revestimento. TiN representa a ferramenta com quebra cavacos e com revestimento. σ é o desvio padrão Raio de ponta de 0,4mm

Aço	Força de corte [N]		Força de avanço [N]	
	MD / σ	TiN / σ	MD / σ	TiN / σ
ABNT 303	78 ± 1	88 ± 1	34 ± 1	39 ± 1
ABNT 304	93 ± 1	86 ± 1	43 ± 1	40 ± 1
ABNT 310	90 ± 1	98 ± 2	36 ± 1	44 ± 2

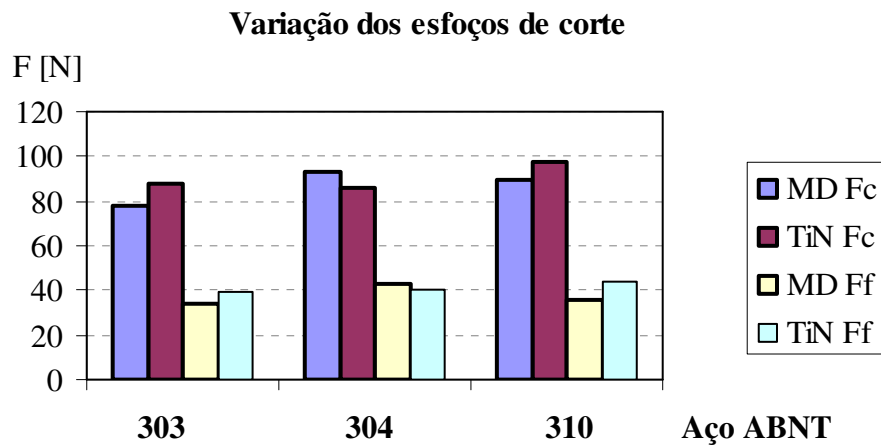


Gráfico 4-6. Variação dos esforços de corte devido a existência de quebra cavacos e revestimento de TiN na ferramenta de corte

Pelos valores de esforços de corte e pela representação gráfica acima nota-se que, como já verificado no Gráfico 4-4, o aço ABNT 303 oferece menor resistência durante a usinagem e o aço ABNT 310 oferece maior. Um comportamento diferenciado do aço ABNT 304 em relação aos outros dois foi verificado. Pôde ser verificado que ao torneá-lo, com a ferramenta com quebra cavacos e com revestimento, os valores das forças de corte e de avanço diminuiriam, ao passo que nos outros dois materiais esses esforços aumentaram com a utilização do quebra cavaco. É importante dizer que a variação percebida foi muito pequena, o que sugere que o esforço de corte não foi influenciado significativamente pela presença de revestimento e de quebra cavacos. Além disto, existe uma pequena diferença nos ângulos γ_0 e

α_0 para as duas diferentes ferramentas utilizadas. Essa variação da geometria também interfere nos valores dos esforços de corte.

Para os esforços medidos também se pode calcular a k_s , como já feito anteriormente de maneira simplificada, apenas para comparar os dois tipos de ferramentas. A Tabela 4.12 e o Gráfico 4-7 apresentam esses resultados.

Tabela 4.12 – Pressão específica de corte com duas ferramentas diferentes.

Aço	Pressão específica de corte k_s	
	MD / σ	TiN / σ
ABNT 303	3900 \pm 50	4400 \pm 50
ABNT 304	4650 \pm 50	4300 \pm 50
ABNT 310	4500 \pm 50	4900 \pm 100

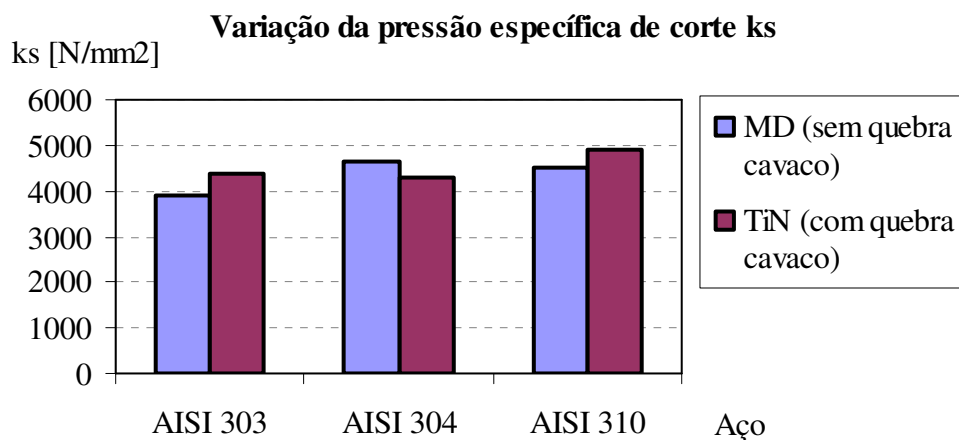


Gráfico 4-7. Variação da pressão específica de corte para duas diferentes ferramentas. Um com quebra cavaco e com revestimento e outra sem ambos.

Percebe-se que a presença de quebra cavaco e de revestimento nos aços ABNT 303 e 310 aumentaram o valor de k_s e para o aço ABNT 304 diminuiu. Essa variação foi pequena o sugere que não houve variação significativa de k_s para as condições ensaiadas.

Por outro lado, a presença de quebra cavaco influenciou o acabamento superficial e a morfologia do cavaco sensivelmente, como se pode notar pelos valores de rugosidade Ra relacionados na Tabela 4.13 e também pelas imagens das superfícies e cavacos mostradas na Fig. 4.13 e Fig. 4.14. Essas imagens foram obtidas utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV).

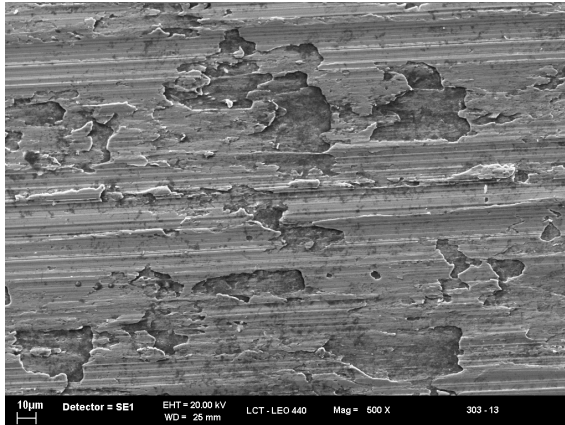
Pode ser observado que a ferramenta influencia na formação de aresta postiça de corte (arrancamentos na superfície e no cavaco) e também na morfologia do cavaco. Os cavacos tendem a formar uma espiral com o quebra-cavacos. No que se refere a superfície usinada, o aço ABNT 303 é o que apresenta a pior superfície, fato já observado utilizando microscopia óptica. Também pode ser observada a formação de cavacos secundários nos cavacos formados utilizando a ferramenta com revestimento e quebra cavaco.

A deformação no cavaco é intensa em todos os casos e não é uniforme. Existem regiões mais deformadas do que outras. Observa-se também linha de deformação na direção do corte. Não foram observadas grandes diferenças na deformação dos cavacos dos diferentes materiais. Apenas o aço ABNT 303 que apresenta a superfície que esteve em contato com a ferramenta com pior qualidade. Isso pode ser atribuído à deformação plástica do material na superfície e ao arrancamento de material. Os sulfetos certamente influenciam nisso.

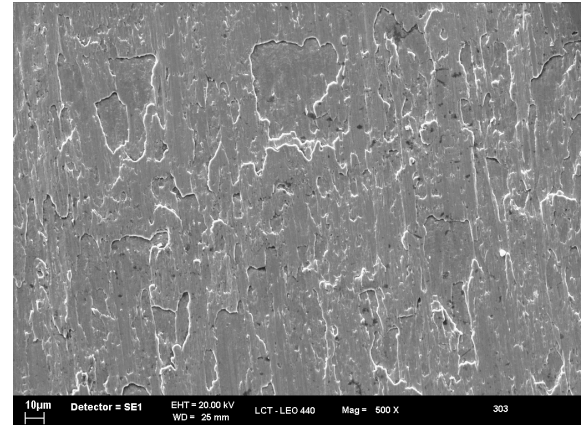
Tabela 4.13- Rugosidade Ra para torneamento com $f=0,1\text{mm/rot}$, $a_p = 0,2\text{mm}$ e $V_c = 90\text{mm/min}$ com ferramentas de 0,4mm de raio de ponta. MD é metal duro sem revestimento e sem quebra cavacos e TiN é metal duro com quebra cavacos e com revestimento

Aço	Rugosidade Ra [μm]	
	MD (sem quebra cavaco)	TiN (com quebra cavaco)
ABNT 303	1,97	0,79
ABNT 304	2,36	1,08
ABNT 310	2,09	1,55

ABNT
303

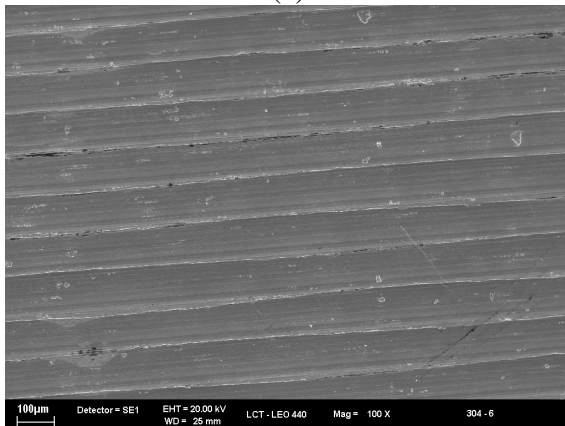


(a)

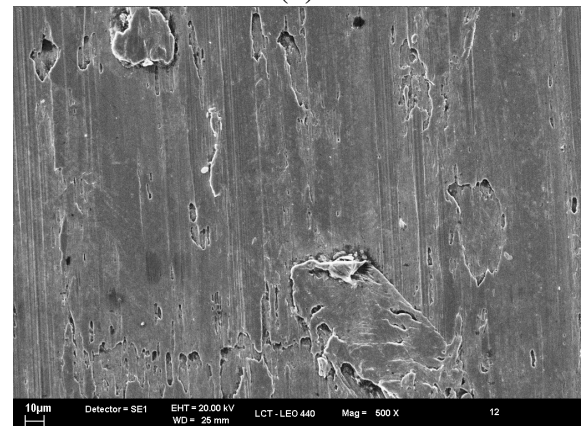


(d)

ABNT
304

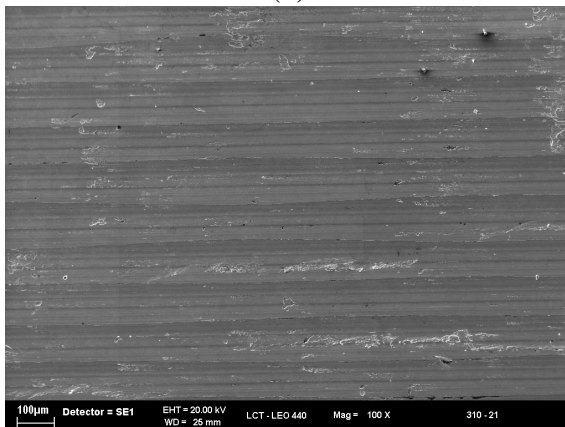


(b)

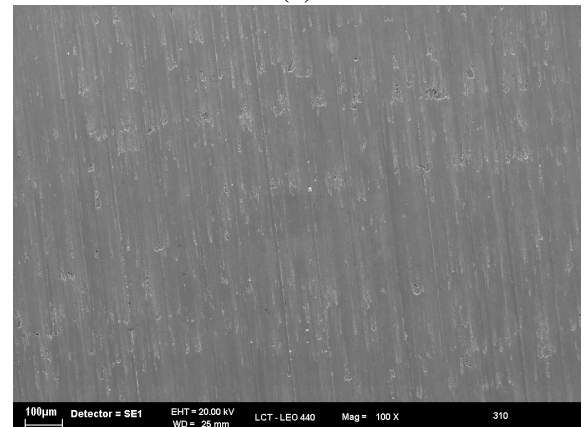


(e)

ABNT
310



(c)



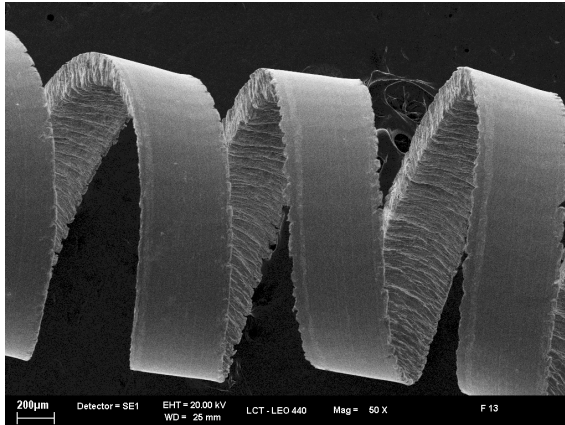
(f)

TiN (com quebra cavacos)

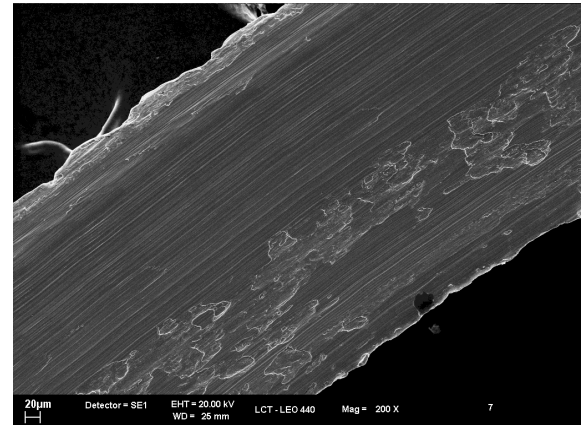
MD (sem quebra cavacos)

Fig. 4.13. Superfícies torneadas com $f=0,1\text{mm/rot.}$, $a_p=0,2\text{mm}$ e $V_c=90\text{m/min}$. As imagens (a), (b) e (c) são as superfícies torneadas com ferramenta de metal revestida com TiN e com quebra cavacos dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente. As imagens (d), (e) e (f) são imagens das superfícies torneadas com ferramenta de metal duro sem revestimento e sem quebra cavaco dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente.

ABNT
303

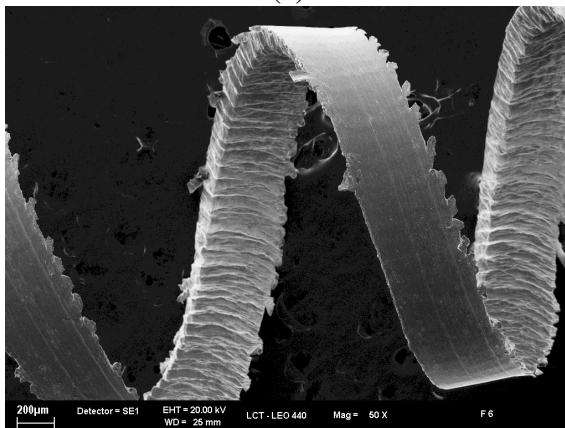


(a)

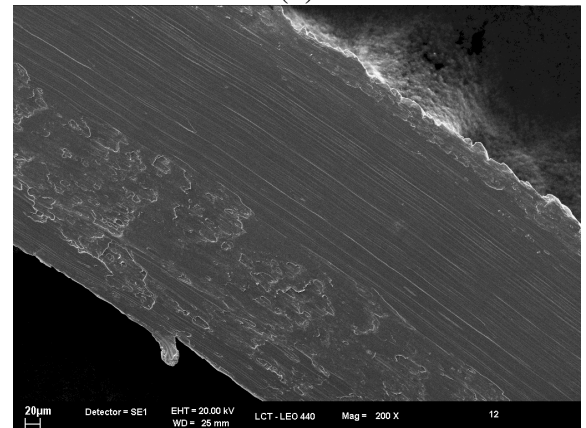


(d)

ABNT
304

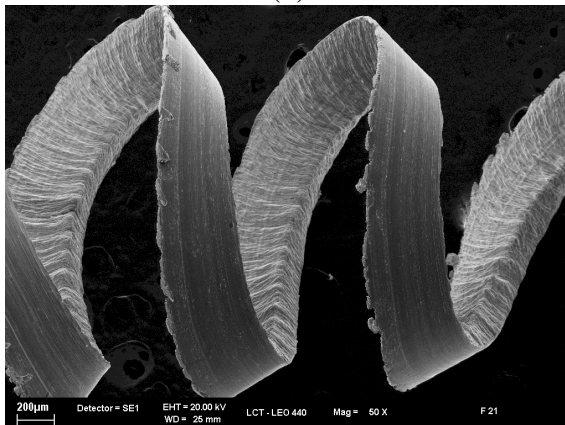


(b)

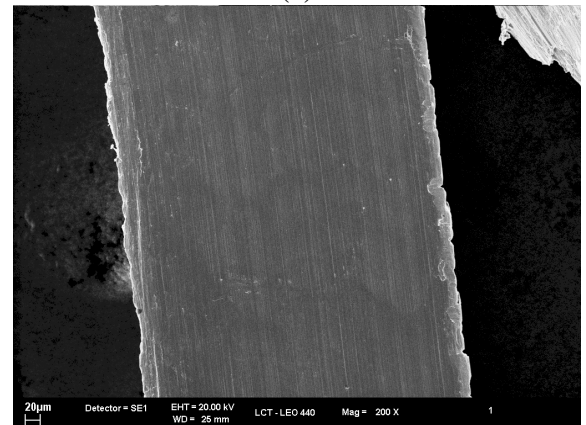


(e)

ABNT
310



(c)



(f)

TiN (com quebra cavacos)

MD (sem quebra cavacos)

Fig. 4.14. Cavacos gerados com $f = 0,1\text{mm/rot.}$ $a_p = 0,2\text{mm}$ e $V_c = 90\text{m/min.}$ As imagens (a), (b) e (c) são os cavacos gerados com ferramenta de metal revestida com TiN e com quebra cavacos dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente. As imagens (d), (e) e (f) são os cavacos gerados com ferramenta de metal duro sem revestimento e sem quebra cavaco dos aços ABNT 303, 304 e 310 respectivamente.

O grau de encruamento do material removido durante o processo de usinagem (cavaco) pode ser estimado usando a deformação por cisalhamento do cavaco (ϵ_o), que é dada

por: $\epsilon_o = \frac{1 + R_c^2 - 2R_c \sen \gamma}{R_c \cos \gamma}$, onde R_c é o recalque, γ é o ângulo de saída. O recalque é

calculado pela relação entre a espessura do cavaco não deformado, que corresponde a um valor teórico dado pelo avanço e pela espessura do cavaco deformado, a qual corresponde ao valor medido da espessura do cavaco após a usinagem. Resultados preliminares mostraram, que para o aço ABNT 304 os valores obtidos de deformação por cisalhamento do cavaco estão em torno de 1,9 para a relação $f/a_p = 1$ e em torno 2,2 para a relação $f/a_p = 0,2$. Os valores de ângulo de cisalhamento obtidos estão em torno de 35° . A avaliação do recalque é limitada a ensaios que foram realizados com ferramentas sem quebra cavaco. O quebra cavaco aumenta muito a deformação do material removido, influenciando nos resultados obtidos. Isso contribuiu na escolha da ferramenta sem quebra cavacos para avaliar o efeito do material e do tratamento térmico nos ensaios de torneamento apresentados a seguir.

4.2 Efeito dos tratamentos térmicos

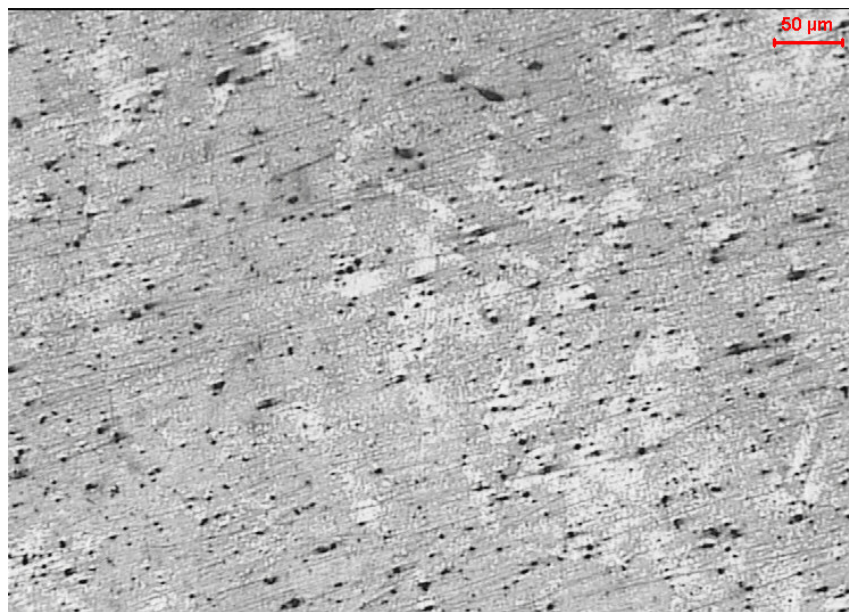
Após a realização dos tratamentos os térmicos, os materiais estudados passaram a apresentar as seguintes características e se comportaram em usinagem de torneamento conforme os próximos resultados.

4.2.1 Caracterização dos materiais após tratamentos térmicos

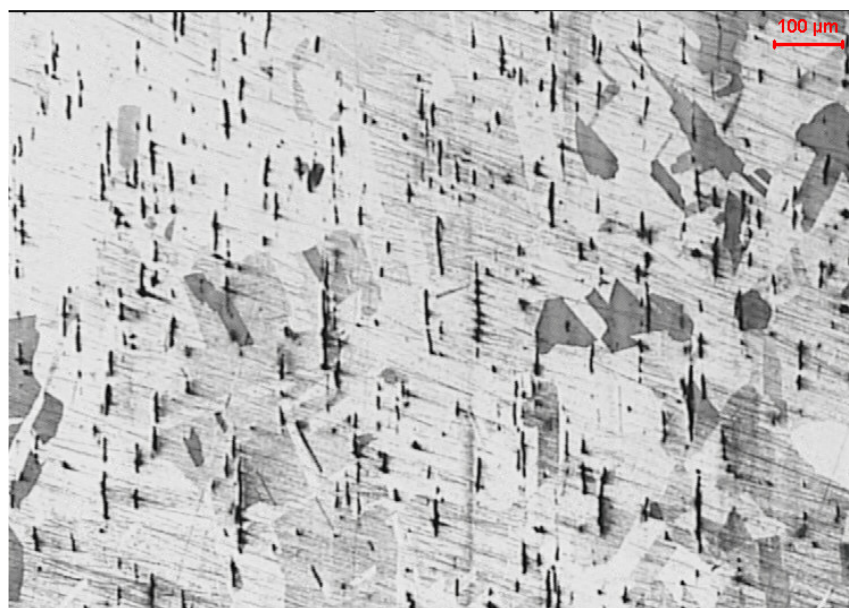
A microestrutura e a dureza dos materiais estudados após a realização dos tratamentos térmicos são apresentadas a seguir.

4.2.1.1 Microestrutura após tratamento térmico

As Fig. 4.15 a Fig. 4.19 mostram as microestruturas dos aços estudados após os tratamentos térmicos. A Fig. 4.15 mostra a microestrutura do aço ABNT 303 solubilizado a 1050°C por 1 hora e resfriado em água.



(a)



(b)

Fig. 4.15. Aço 303 solubilizado a 1050°C por 1 hora e resfriado em água. (a) seções transversal e (b) seção longitudinal da barra. Ataque: Behara II

O ataque no corpo-de-prova do aço ABNT 303 é difícil, não sendo sequer observada a estrutura dos grãos. No aço ABNT 304 também não pode ser observada a microestrutura do mesmo. Em função dos resultados essa micrografia não é apresentada. Já o aço ABNT 310 foi atacado, e essa micrografia é apresentada na Fig. 4.16. Observa-se um ligeiro aumento do tamanho de grão em relação ao aço como recebido. Provavelmente o mesmo aconteceu aos outros aços. Embora o ataque não tenha evidenciado isso.

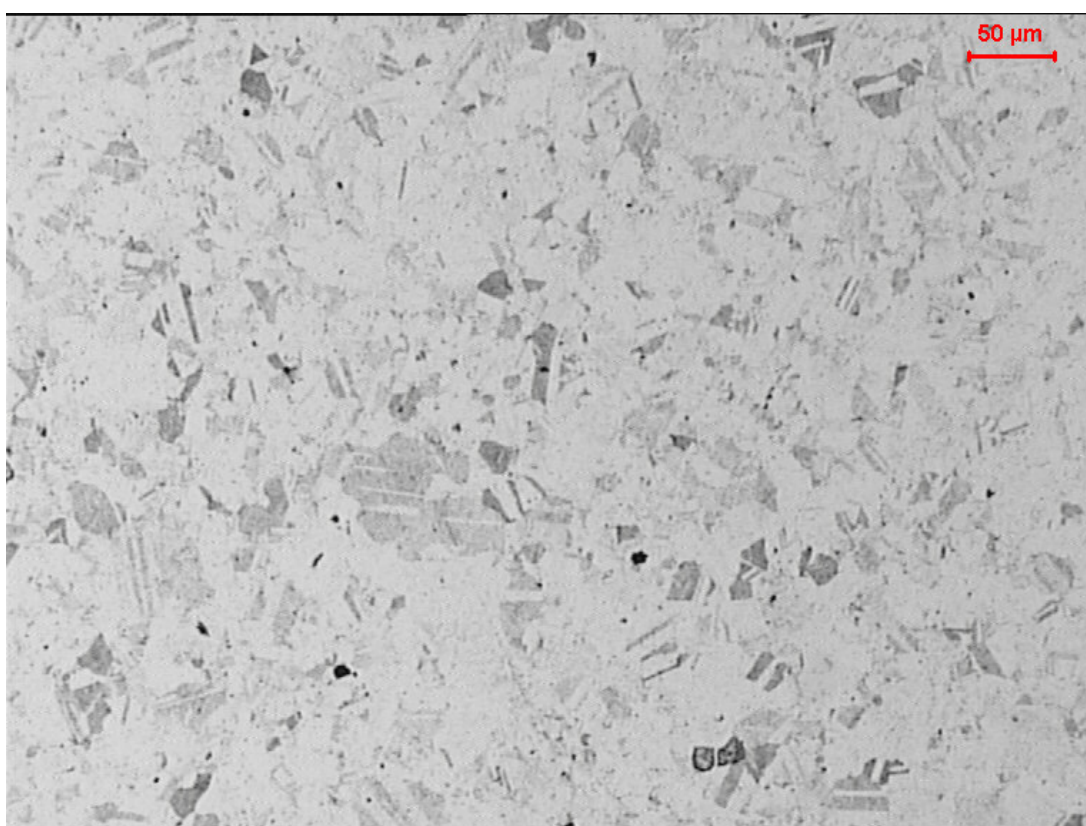


Fig. 4.16. Aço 310 solubilizado a 1050°C por 1 hora e resfriado em água. Seção transversal da barra, mostrando precipitação. Ataque: Behara II

As Fig. 4.17 a Fig. 4.19 mostram a ocorrência de precipitação nos aços envelhecidos a 900°C por 5 horas. A precipitação é verificada até durante a preparação metalográfica, que fica facilitada e o ataque metalográfico mais nítido. Nos demais tratamentos térmicos de

envelhecimento os resultados obtidos foram aproximadamente os mesmos, mudando apenas a quantidade de precipitados observada para as temperaturas mais baixas.

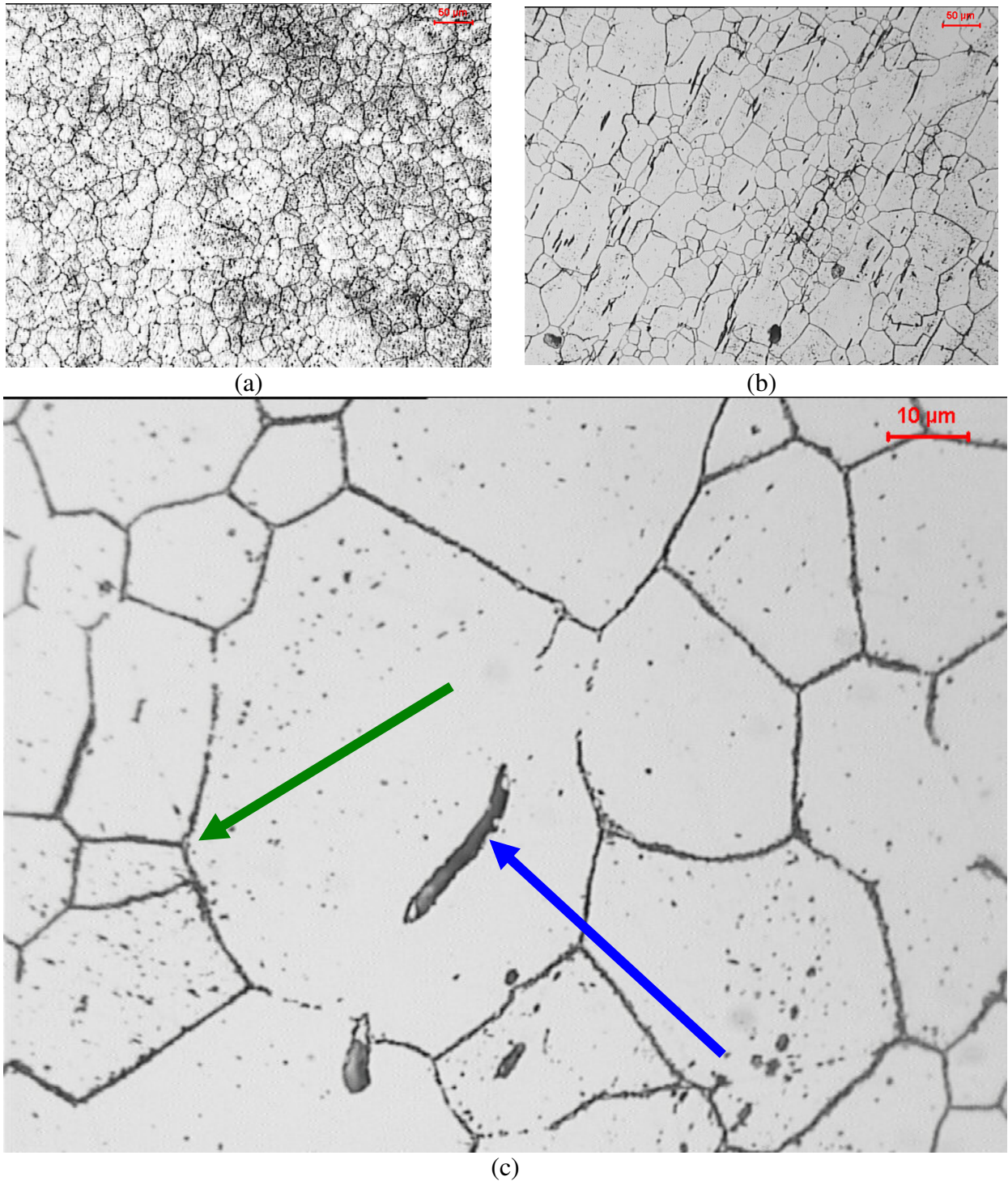


Fig. 4.17. Aço 303 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção longitudinal da barra, (c) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II. Seta azul indica sulfeto e seta verde precipitação em contornos de grão.

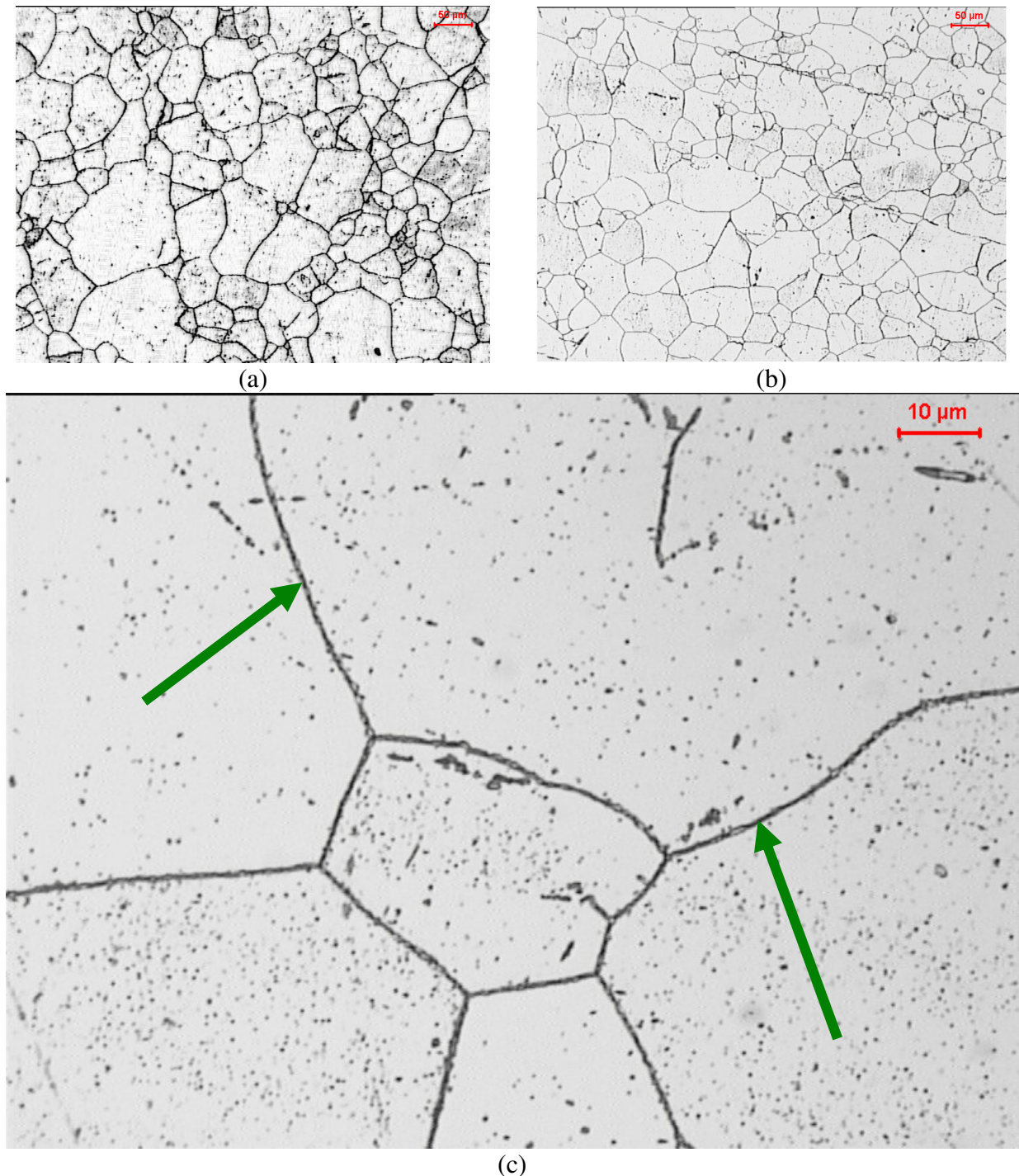


Fig. 4.18. Aço 304 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção e longitudinal da barra e (c) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II. Seta seta verde precipitação em contornos de grão.

Como pode ser observado na Fig. 4.19, o aço ABNT 310 apresenta grande homogeneidade na microestrutura da seção longitudinal, apresentando essa peculiaridade em relação aos outros aços estudados. O aço ABNT 310 também apresentou uma estrutura de grãos mais refinada em relação ao outros tipos de aços. Foi observada intensa precipitação em

contornos de grão. No interior dos grãos a ocorrência de precipitação não está bem definida e se confunde com a ocorrência de pites, resultantes do ataque metalográfico.

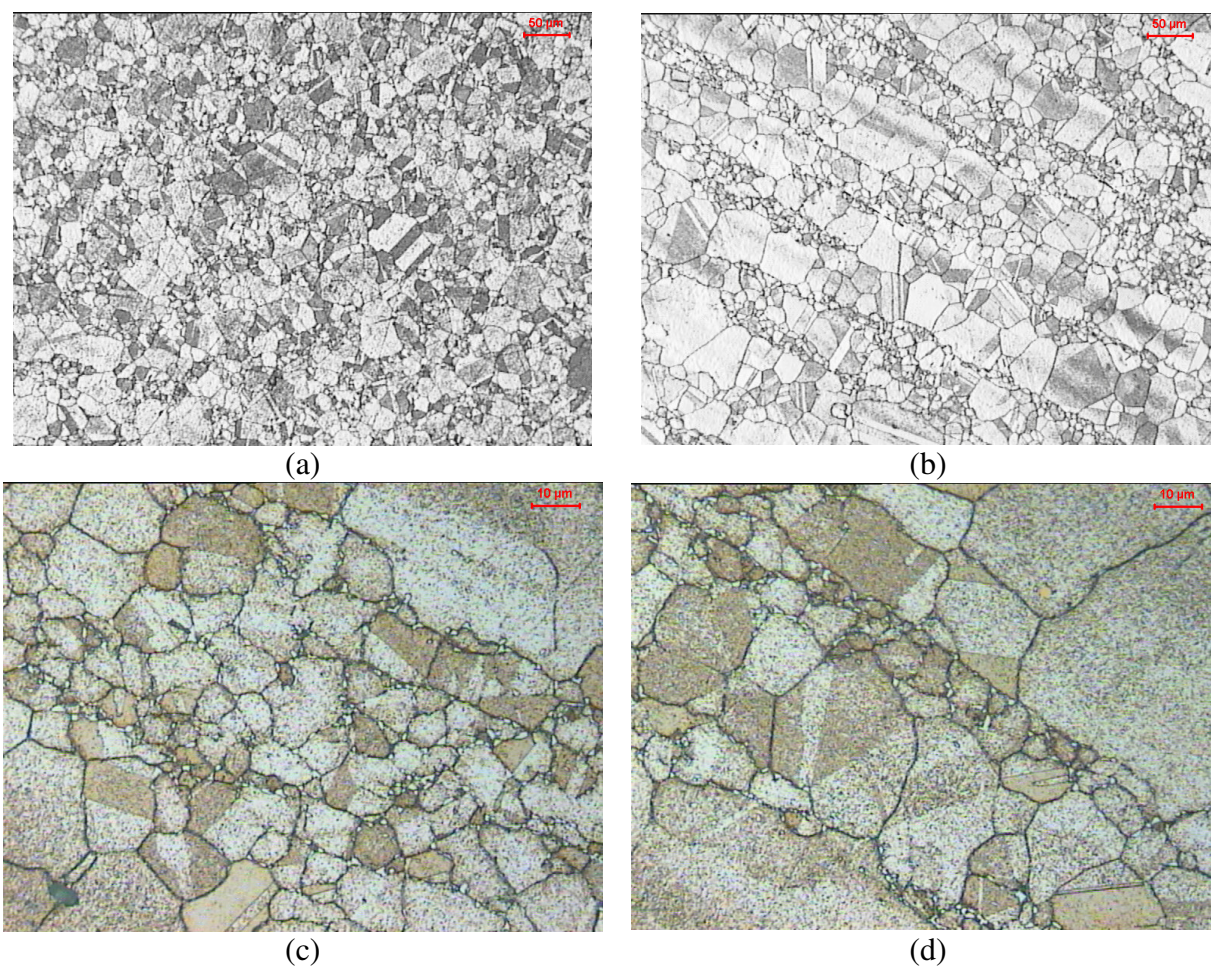


Fig. 4.19. Aço 316 envelhecido a 900°C por 5 horas. (a) seção transversal, (b) seção longitudinal da barra, (c) e (d) detalhe da seção longitudinal, mostrando precipitação. Ataque: Behara II.

4.2.1.2 Efeito dos tratamentos térmicos na precipitação

O objetivo inicial de se utilizar difração de raios X era identificar a formação de martensitas induzidas por deformação na superfície usinada. No entanto, os resultados de difração de raios X dessas superfícies, apresentados nas Fig. 4.20 a Fig. 4.25 mostraram

apenas ocorrência de precipitação de carbonetos e nitretos nas amostras envelhecidas. As fases encontradas são identificadas nos picos de difração das figuras a seguir.

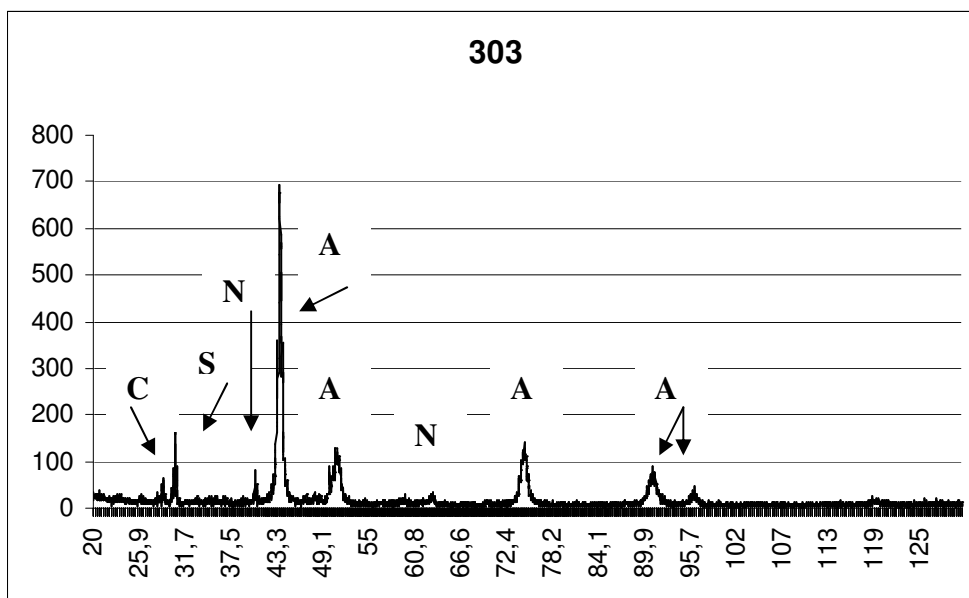


Fig. 4.20. Difratoograma da superfície usinada do aço 303 como recebido. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês, N indica diferentes nitretos e C diferentes carbonetos.

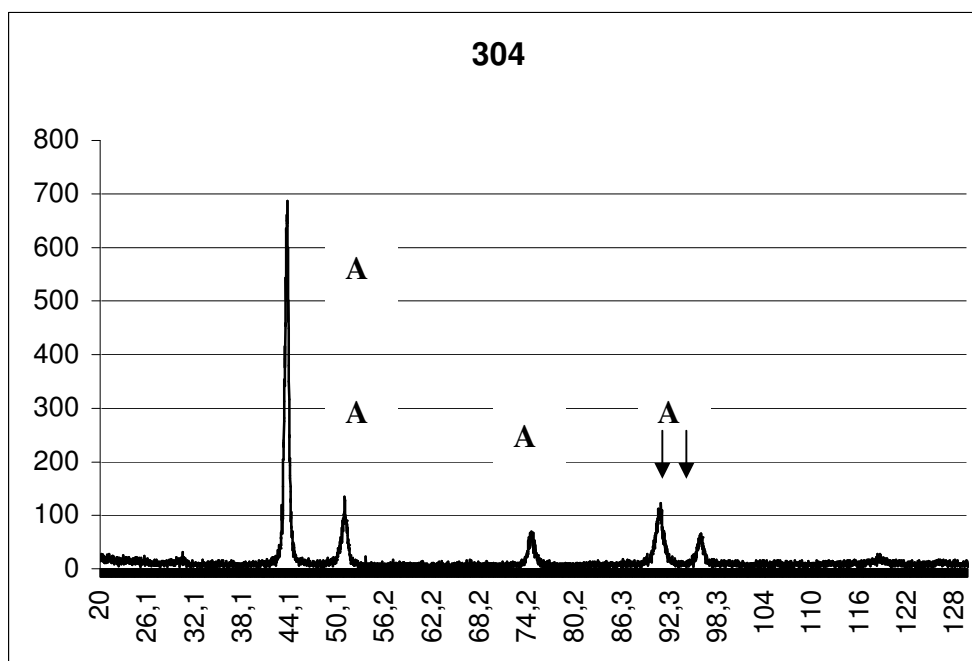


Fig. 4.21. Difratoograma da superfície usinada do aço 304 como recebido. CuK α . A indica austenita.

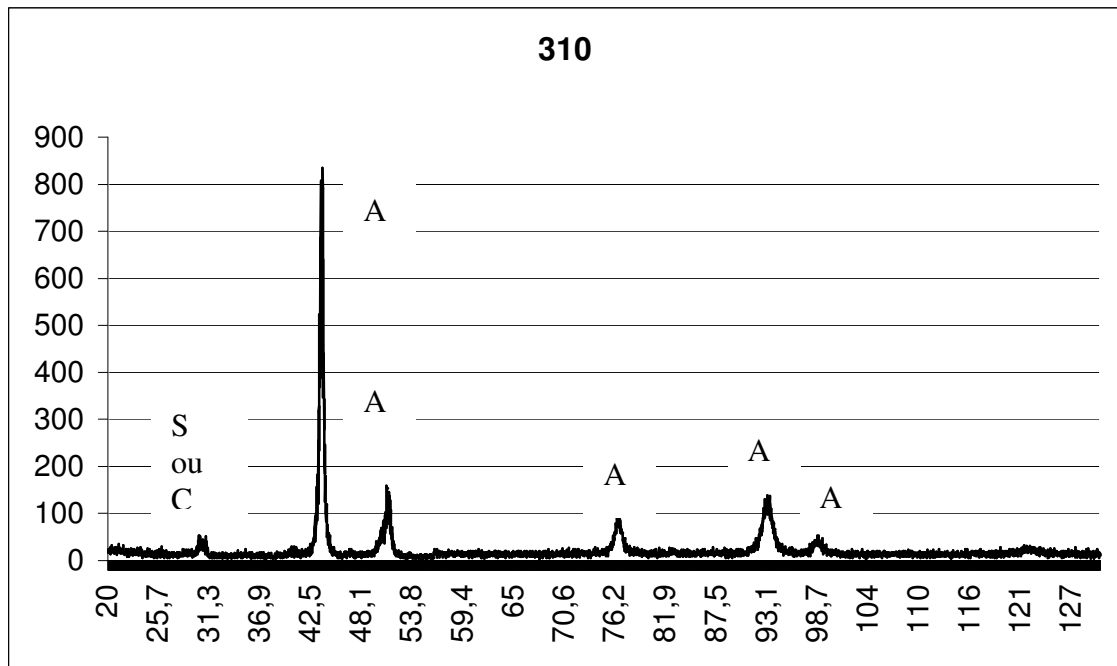


Fig. 4.22. Difratoograma da superfície usinada do aço 310 como recebido. $\text{CuK}\alpha$. A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês e C diferentes carbonetos.

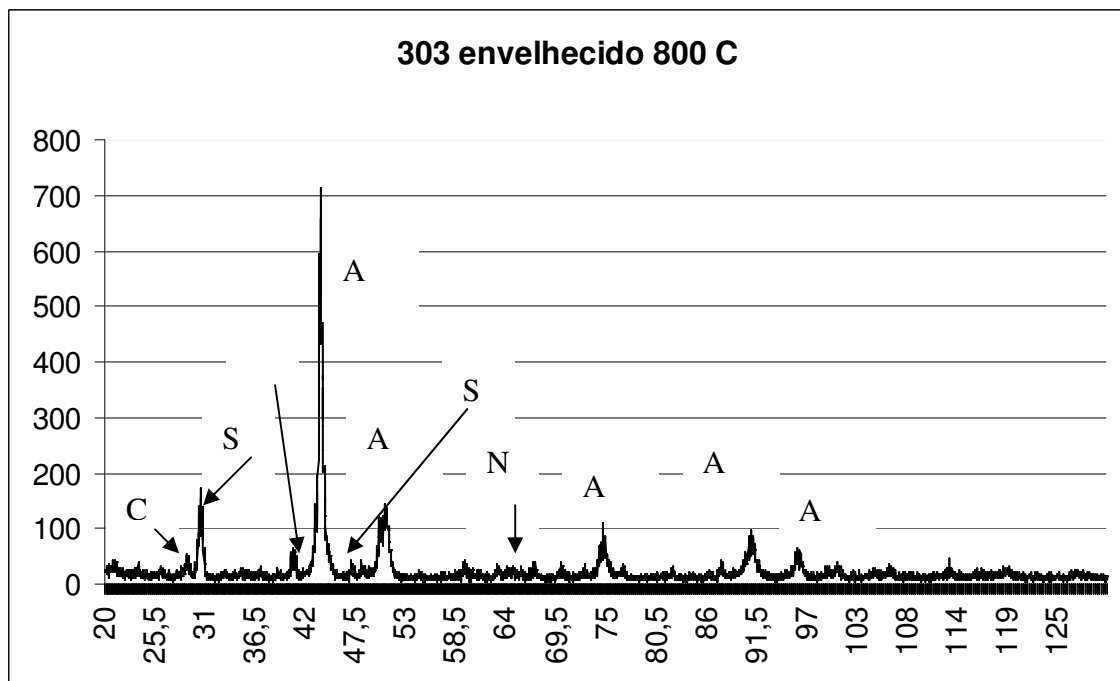


Fig. 4.23. Difratoograma da superfície usinada do aço 303 envelhecido a 800°C . $\text{CuK}\alpha$. A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês, N indica diferentes nitretos e C diferentes carbonetos.

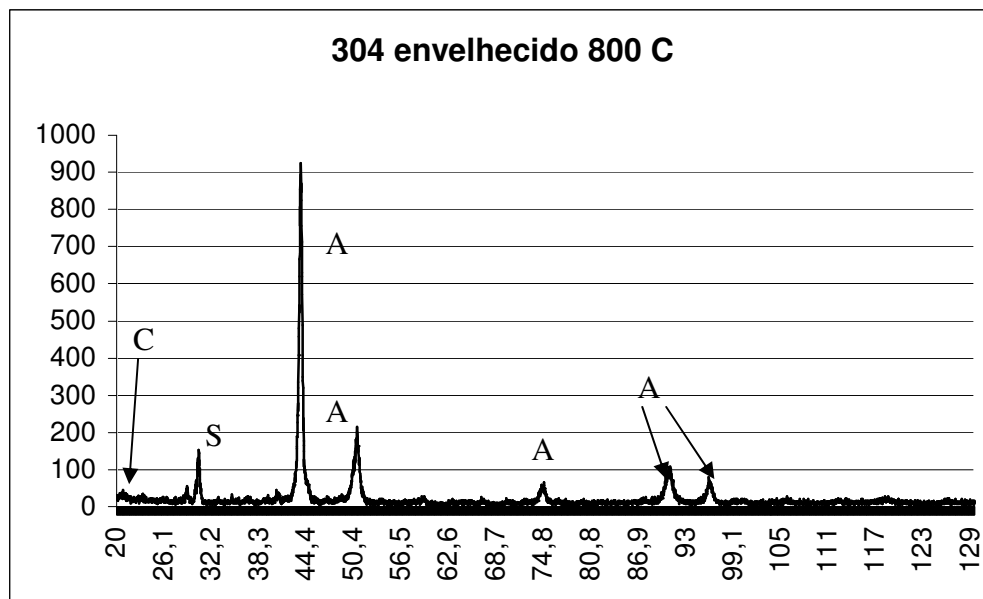


Fig. 4.24. Difratograma da superfície usinada do aço 304 envelhecido a 800°C. CuK α . A indica austenita, S sulfeto de ferro ou manganês e C diferentes carbonetos.

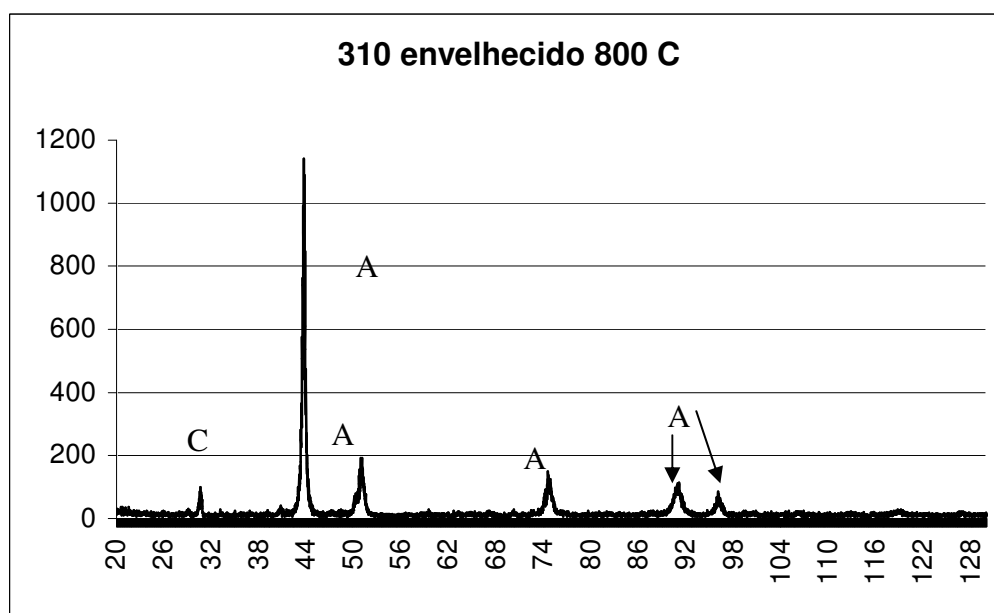


Fig. 4.25. Difratograma da superfície usinada do aço 310 envelhecido a 800°C. CuK α . A indica austenita, e C diferentes carbonetos.

A influência da precipitação dessas fases será discutida posteriormente e não foi obtida nenhuma relação direta entre os esforços de corte, acabamento superficial e tratamentos térmicos.

4.2.1.3 Dureza após tratamento térmico

Na Tabela 4.14 são apresentadas as durezas Vickers das seções transversais e longitudinais das barras utilizadas nos ensaios. Foi observada, de um modo geral, uma queda de dureza nos materiais tratados termicamente, principalmente nos aços que sofreram novo tratamento térmico de solubilização. Outro resultado interessante é que as durezas máximas foram obtidas nos aços envelhecidos a 600°C. Isto é uma indicação da ocorrência de precipitação no interior dos grãos. O maior valor de dureza obtido foi no aço ABNT 304 após envelhecimento a 600°C. A diferença de dureza entre a seção longitudinal e a transversal da barra foi reduzida com os tratamentos térmicos. Essas diferenças deveriam estar relacionadas com um encruamento residual do processo de fabricação das barras e com heterogeneidades na microestrutura inicial.

Tabela 4.14. Dureza Vickers (HV 30) na seção transversal e logitudinal das barras usinadas

Aço	Dureza Vickers	
	Secção Transversal	Secção Longitudinal
303 como recebido	256±32	321±58
303 solubilizado (1050°C)	185±5	185±11
303 envelhecido a 900°C	222±9	190±9
303 envelhecido a 800°C	221±11	189±9
303 envelhecido a 700°C	208±27	210±23
303 envelhecido a 600°C	243±47	270±55
304 como recebido	243±17	208±22
304 solubilizado (1050°C)	178±6	170±7
304 envelhecido a 900°C	203±16	190±4
304envelhecido a 800°C	226±19	296±45
304 envelhecido a 700°C	241±24	234±35
304envelhecido a 600°C	281±41	211±10
310 como recebido	237±18	236±15
310 solubilizado (1050°C)	207±5	203±8
310 envelhecido a 900°C	238±7	233±12
310 envelhecido a 800°C	222±7	215±12
310 envelhecido a 700°C	233±15	208±4
310 envelhecido a 600°C	265±22	212±15

4.2.2 Torneamento após tratamento térmico

As amostras tratadas termicamente foram ensaiadas com as condições de usinagem indicadas na Tabela 4.15 que é uma parte da Tabela 3.5. Nos resultados obtidos durante e após o torneamento desses corpos de prova estão apresentados a seguir.

Tabela 4.15-Parâmetros de corte utilizados para usinagem dos materiais estudados após serem tratados termicamente

Operação	Aço ABNT	Tratamento Térmico	Ferramentas				Parâmetros de corte				
			χ_r	γ_0	α_0	Rev.	Q.C	Vc	f	a_p	
Torneamento de cilindramento	303 304 310	Como recebido	TPGN 160304	90°	6°	8°	sem	sem	90	0,1	0,2
		Solubilizado 1050°C									
		Envelhecido 600° C									
		Envelhecido 700° C									
		Envelhecido 800° C									
Envelhecido 900° C											

4.2.2.1 Esforços de corte após tratamentos térmicos

A Tabela 4.16 com forças de corte e de avanço para os materiais tratados termicamente é apresentada a seguir. Os valores de k_s não foram calculados, pois foram utilizados os mesmos parâmetros de corte, logo os valores de força podem ser comparados diretamente. Os parâmetros de usinagem escolhidos para esses ensaios favorecem a ocorrência de estado plano de tensão. Os resultados das forças de corte e de avanço não

apresentaram diferenças significativas, embora o aço ABNT 303 tenha apresentado os menores valores.

As relações entre as forças de corte e de avanço apresentaram relações semelhantes às encontradas em outros ensaios. Por outro lado, a relação com a dureza do material é difícil de ser estabelecida. Tentando-se estabelecer uma relação entre a força de corte que é perpendicular à seção longitudinal da barra e a força de avanço que é paralela à seção longitudinal da barra e a dureza do material também não se chegou a nenhuma conclusão que evidenciasse o efeito médio da dureza na usinabilidade desses materiais.

Tabela 4.16- Forças de corte e de avanço nos materiais tratados termicamente. Fc = força de corte, Ff = força de avanço e σ = desvio padrão

Aço	Fc [N] / σ	Ff [N] / σ
303 como recebido	78 ± 1	34 ± 1
303 solubilizado (1050°C)	78 ± 1	29 ± 1
303 envelhecido a 900°C	80 ± 1	31 ± 1
303 envelhecido a 800°C	78 ± 1	31 ± 1
303 envelhecido a 700°C	75 ± 1	30 ± 1
303 envelhecido a 600°C	83 ± 1	34 ± 1
304 como recebido	93 ± 1	43 ± 1
304 solubilizado (1050°C)	90 ± 1	38 ± 1
304 envelhecido a 900°C	90 ± 1	37 ± 1
304envelhecido a 800°C	88 ± 1	39 ± 1
304 envelhecido a 700°C	93 ± 2	43 ± 1
304envelhecido a 600°C	92 ± 2	43 ± 1
310 como recebido	88 ± 1	37 ± 1
310 solubilizado (1050°C)	95 ± 2	39 ± 1
310 envelhecido a 900°C	85 ± 1	34 ± 1
310 envelhecido a 800°C	95 ± 1	40 ± 1
310 envelhecido a 700°C	91 ± 2	37 ± 1
310 envelhecido a 600°C	87 ± 2	36 ± 2

4.2.2.2 Acabamento superficial após tratamentos térmicos

Os valores da rugosidade Ra e Rt medidos após o torneamento dos corpos de prova tratados termicamente são apresentados na Tabela 4.17. Pelos valores se percebe que os

tratamentos térmicos não influenciaram de maneira significativa a rugosidade das peças. O parâmetro Ra é praticamente o mesmo para os três aços nas diferentes condições de tratamento. Já o parâmetro Rt, apresentou valores maiores para o aço ABNT 303 e para o ABNT 304 com variações em seus valores para diferentes tratamentos térmicos. No caso do ABNT 310, os valores de Rt foram mais constantes e menores. Isto deve estar ligado com a maior homogeneidade deste material.

Tabela 4.17- Rugosidade para torneamento após tratamentos térmicos.

Aço	303		304		310	
	Ra [μm]	Rt [μm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Ra [μm]	Rt [μm]
Como recebido 1050°C	1,33	6,56	1,36	12,23	1,33	5,1
Envelhecido 900°C	1,36	8,97	1,61	7,39	1,2	5,09
Envelhecido 800°C	1,81	11,16	1,37	8,56	1,19	6,41
Envelhecido 700°C	1,73	10,47	1,28	6,3	1,2	6,01
Envelhecido 600°C	1,19	8,41	1,36	6,92	1,29	5,77
Envelhecido 500°C	1,32	9,26	1,63	9,22	1,71	7,8

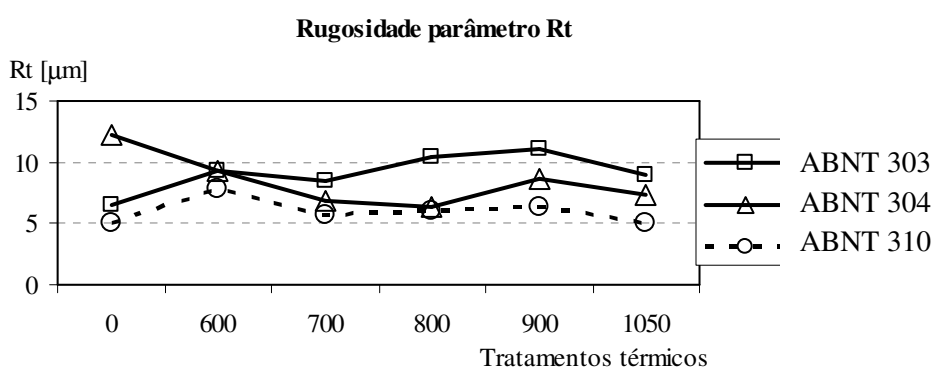


Gráfico 4-8. Rugosidade Rt para os diferentes tratamentos térmicos

As Fig. 4.26 a Fig. 4.28 a seguir mostram o acabamento superficial observado utilizando-se microscopia eletrônica de varredura das amostras solubilizada e envelhecida a 800°C, esta última é representativa em relação aos outros tratamentos térmicos de envelhecimento. Os parâmetros de usinagem utilizados foram: $f = 0,104$ mm/rotação; $a_p = 0,2$ mm; $V_c = 90$ m/min e ferramenta de metal duro sem quebra cavaco com raio de ponta de 0,4

mm. As maiores diferenças entre as superfícies são observadas no aço ABNT 303. No entanto, os corpos-de-prova envelhecidos, apresentaram de um modo geral, cavacos mais curtos.

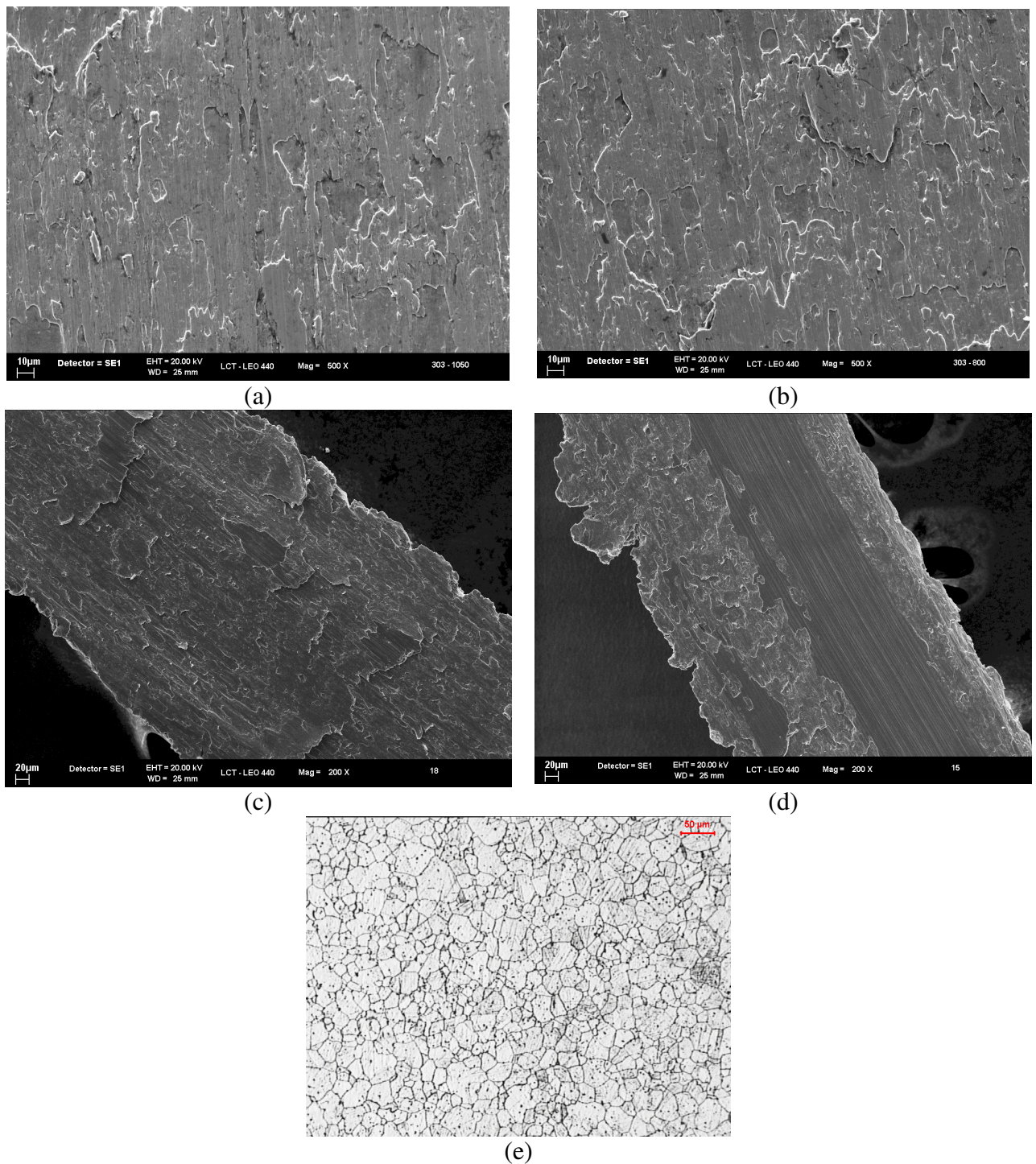


Fig. 4.26. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 303: (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas. MEV elétrons secundários. (e) micrografia do aço ABNT 303 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II.

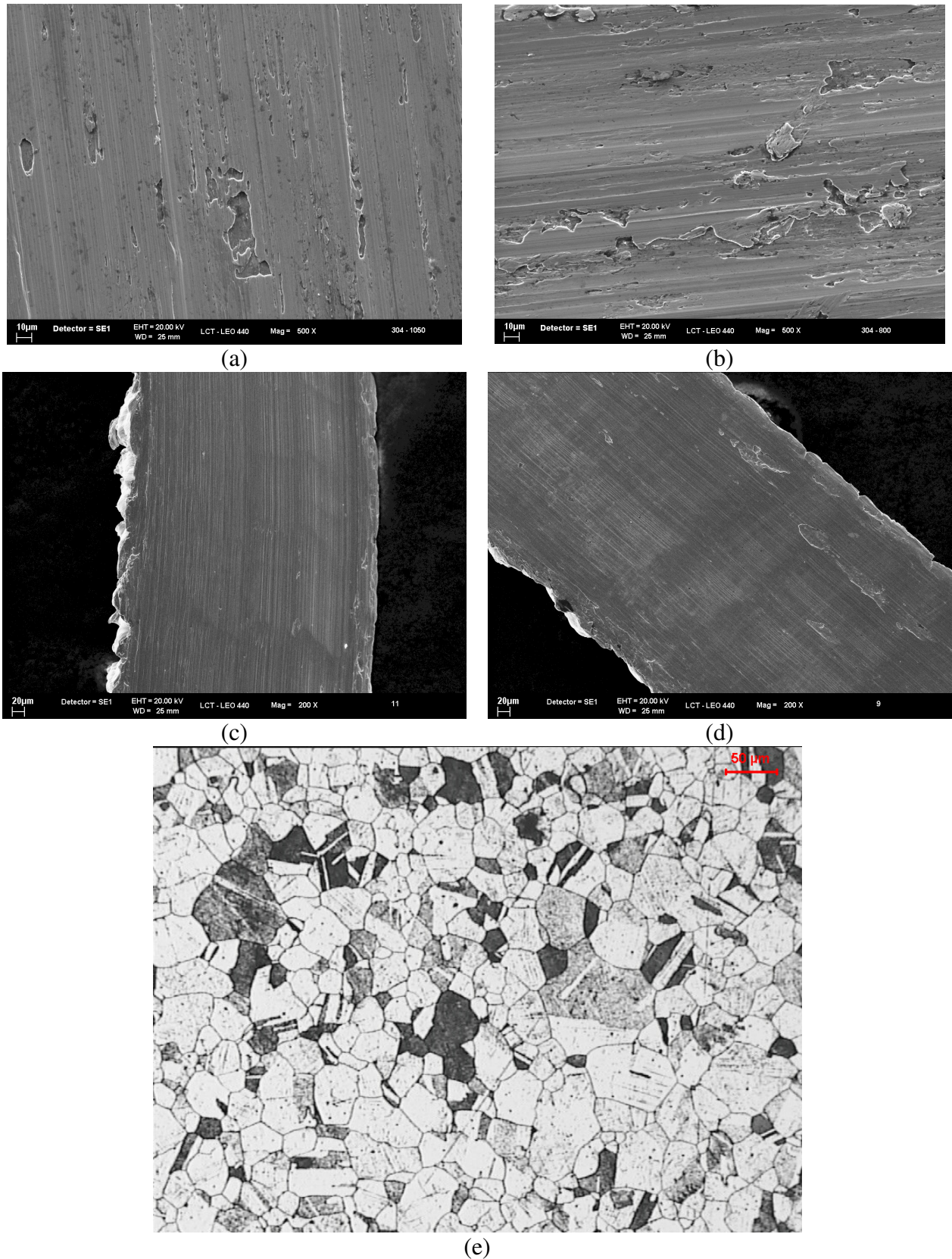


Fig. 4.27. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 304: (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas. MEV elétrons secundários. (e) micrografia do aço ABNT 304 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II.

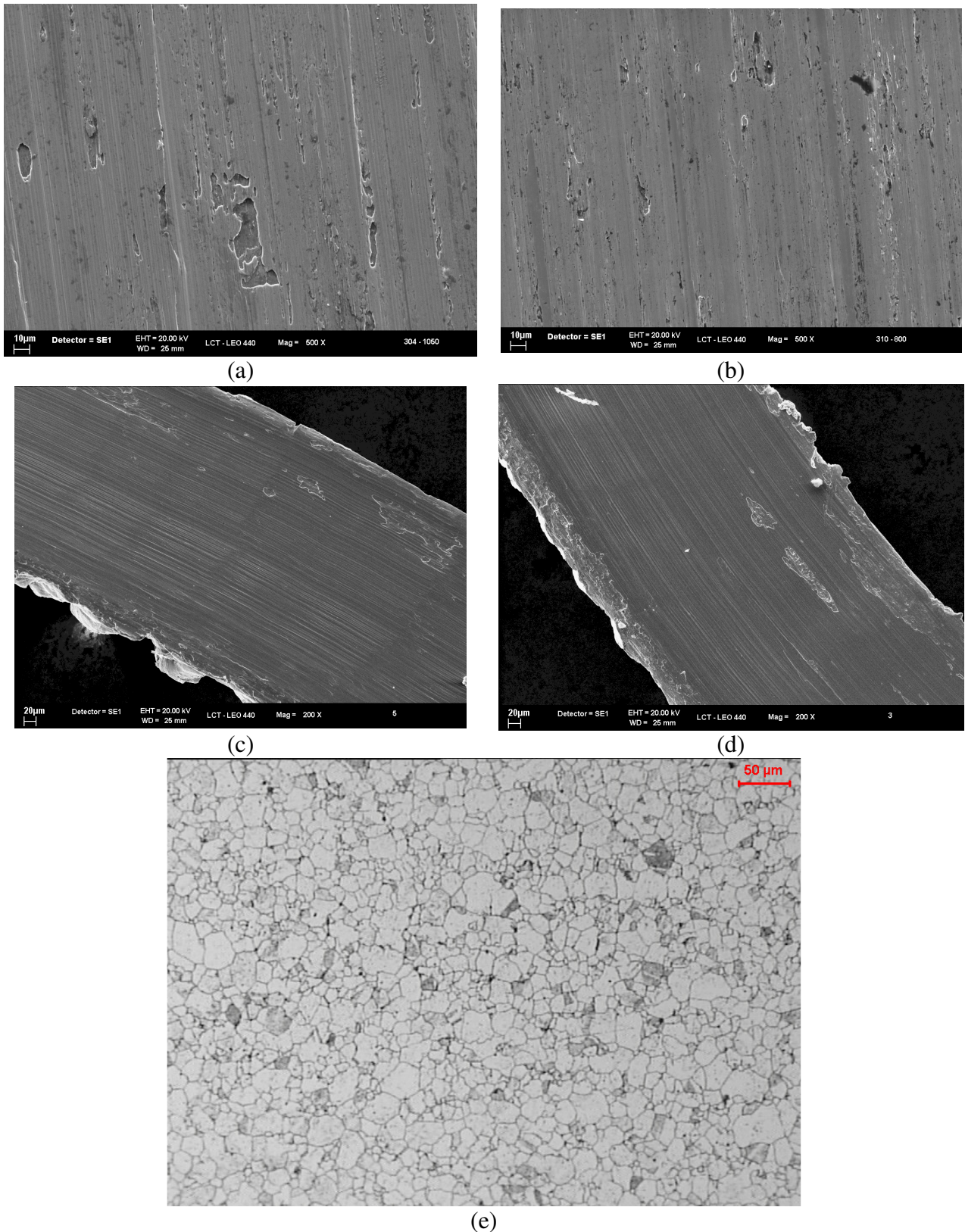


Fig. 4.28. Superfície usinada e cavaco do aço ABNT 310 (a) e (c) solubilizado a 1050°C por 1 hora e (b) e (d) envelhecido a 800°C por 5 horas, respectivamente. MEV elétrons secundários. (e) micrografia do aço ABNT 310 envelhecido seção transversal da barra. Microscopia óptica. Ataque: Behara II

A Fig. 4.29 e Fig. 4.30 mostram todas superfícies obtidas e cavacos respectivamente.

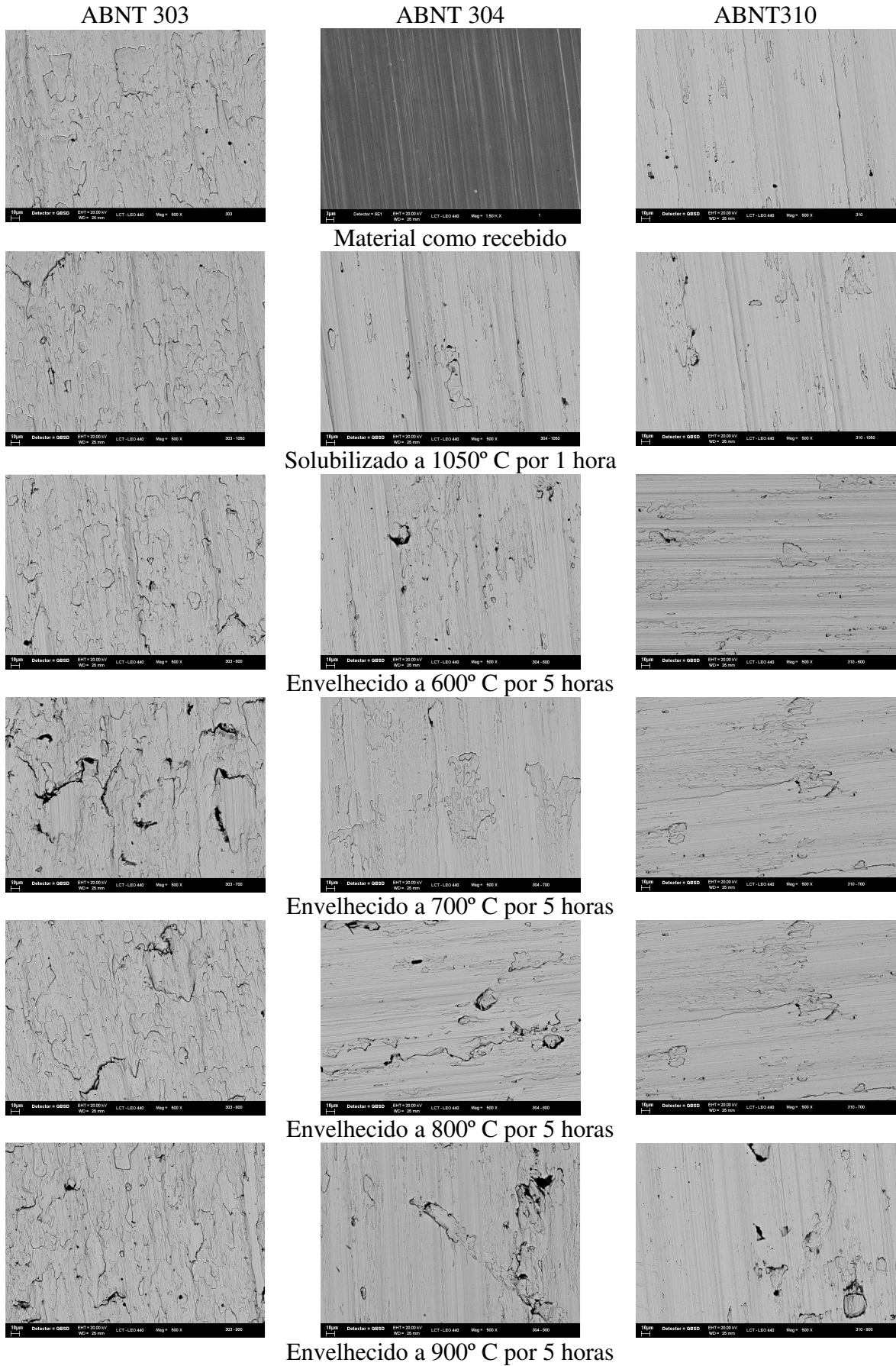


Fig. 4.29. Superfícies após torneamento dos aços ABNT 303, 304 e 310 tratados termicamente

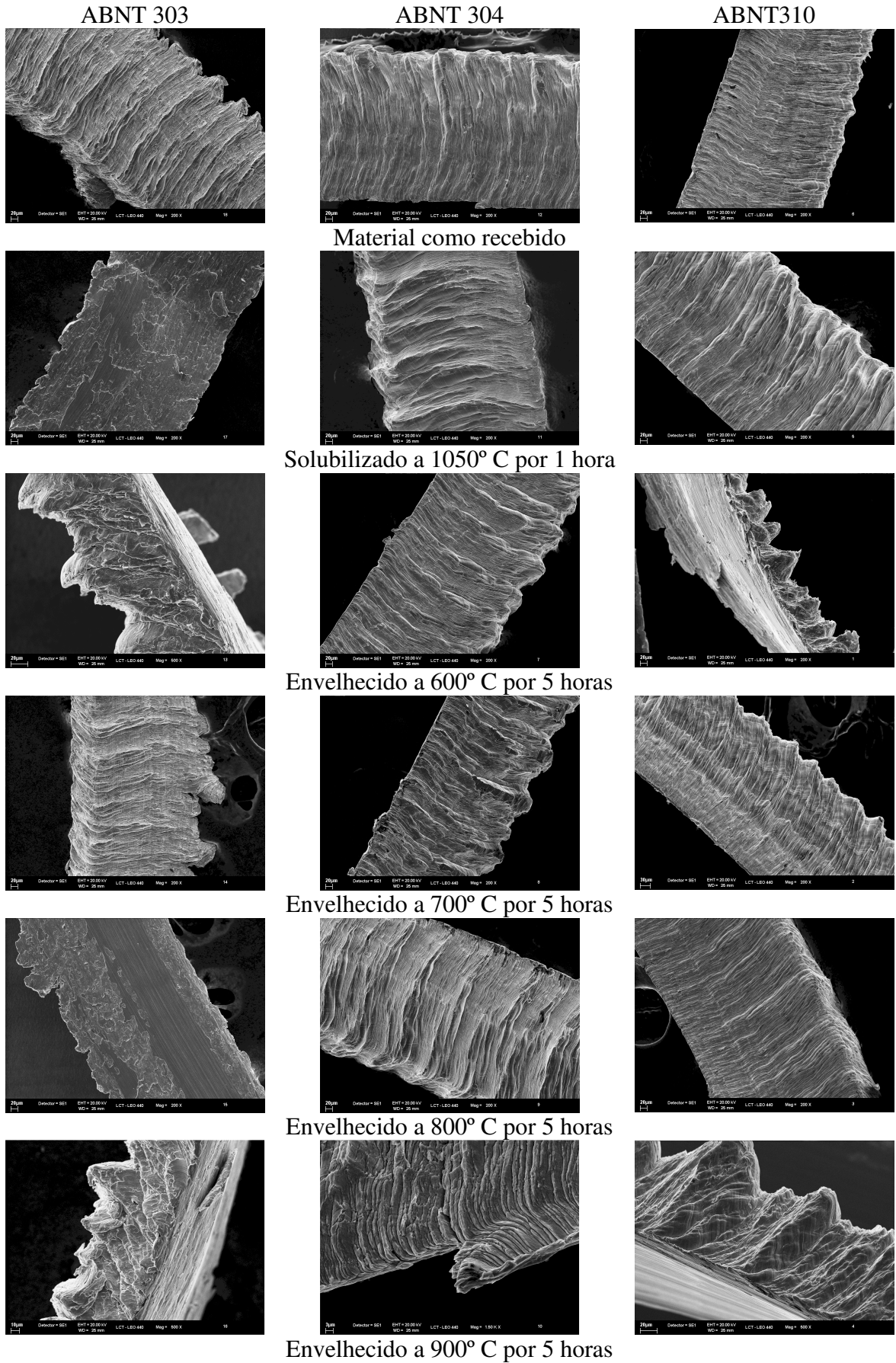


Fig. 4.30. Cavacos após torneamento dos aços ABNT 303, 304 e 310 tratados termicamente

Após a serie de análises realizadas com os três aços estudados nas diferentes condições de tratamentos térmicos, verificou-se que os tratamentos térmicos alteraram a microestrutura e promoveram a precipitação em contornos de grão. A estrutura passou a ser mais homogênea quanto o tamanho dos grãos, após a solubilização, tanto na seção transversal como na longitudinal e também ocorreu precipitação nos contornos de grãos após o envelhecimento. No entanto, essas mudanças não influenciaram de forma significativa a usinabilidade desses aços. Eles continuaram a apresentar comportamento semelhante ao verificado nos materiais como recebido.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram determinar algumas diferenças no comportamento dos três aços inoxidáveis estudados. As maiores diferenças foram verificadas quando as superfícies foram observadas utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura. De um modo geral, o aço ABNT 303 apresentou as piores superfícies e os menores esforços de corte em relação aos aços ABNT 304 e 310. No que se refere aos esforços de corte, os aços inoxidáveis estudados apresentaram comportamento semelhante durante os ensaios para medição dos esforços de corte e de avanço. A seguir é apresentado um maior detalhamento das conclusões obtidas:

1. Os experimentos realizados mostraram que as medidas de força de corte são diferentes nos aços estudados, principalmente nos aços no estado como recebido. No entanto, essas diferenças não são muito grandes, principalmente quando são utilizados parâmetros de corte que causem estado plano de tensões. De um modo geral, o aço ABNT 303 apresentou os menores esforços de corte.

2. Os resultados preliminares mostraram que algumas das condições críticas na usinagem são obtidas quando são utilizados avanços muito pequenos. A relação entre os parâmetros de avanço (f) e de profundidade de corte (a_p) deve ser levada em conta na análise dos resultados.

3. Foram obtidos resultados significativos com relação à otimização de variáveis utilizando os ensaios de faceamento. A velocidade de corte, associada à taxa de deformação, também influencia o processo de corte nos aços inoxidáveis austeníticos. Em velocidades de corte mais baixas forma-se aresta postiça, o que piora muito o acabamento superficial. Pôde-se observar arrancamento de material da superfície do corpo-de-prova e do cavaco.

4. Os resultados de rugosidade e os perfis de rugosidade obtidos foram comparados e relacionados com as forças de corte e microestrutura do material. Não foi observada nenhuma mudança significativa nos diferentes aços e com diferentes tratamentos térmicos. Embora a observação da superfície tivesse mostrado uma grande diferença, em especial, como relação ao aço ABNT 303. Outro aspecto importante foi a observação dos cavacos e de sua morfologia. No caso do aço 310, sua alta ductilidade foi um fator de diferenciação durante avaliação do efeito das velocidades de corte no faceamento.

5. Os resultados obtidos, nos diferentes aços, mostraram que a dureza não é um bom método para avaliar a usinabilidade dos aços estudados. A microestrutura dos diferentes aços não alteraram significativamente a superfície usinada.

6. A utilização de diferentes ferramentas neste trabalho, mostrou influência apenas na formação do cavaco, não influenciando nos esforços de corte e tão pouco no acabamento superficial.

7. Os tratamentos térmicos realizados propiciaram a formação de outras fases, as quais causaram alterações na microestrutura. No entanto, esses tratamentos térmicos não alteraram de forma significativa o processo de torneamento.

8. A formação de martensitas induzidas por deformação foi identificada no cavaco, mas não foi possível ser quantificada.

6 TRABALHOS FUTUROS

1. Identificar e quantificar as martensitas induzidas por deformação.
2. Estudar materiais com maior homogeneidade microestrutural de forma a definir com maior precisão o efeito de cada variável.
3. Quantificar o dano superficial causado pelo processo de usinagem.
4. Utilizar velocidades de corte, velocidades de avanço e profundidades de corte mais elevadas para análise mais completa de mecanismos de corte e efeito da microestrutura.
5. Avaliar desgaste de ferramenta para diferentes condições de tratamentos térmicos

REFERÊNCIAS*

ALTINTAS Y. **Manufacturing Automation**. USA: Cambridge Press, 2000, p. 30-33.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6163**. Geometria da cunha cortante. Rio de Janeiro, 1990.

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO, K.. Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v.43, p. 66-71, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Metals handbook. **Properties and selection: stainless steels tool materials and specials purpose metals**. 9.ed. v.3 Ohio: ASM, 1987, 882p.

ANDRADE, M. S. et al. Formability evaluation of two austenitic stainless steels. **Mechanical Sciences and Engineering**, v. 26, n. 1, p. 47-55, 2004.

ASTAKOV, V. P.; SHVETS, S. V.; OSMAN, M. O. M.. Chip structure classification based on mechanics of its formation. **Journal of Materials Processing Technology**. v.71, p. 247-257, 1997.

BIGERELLE, M.; NAJJAR, D.; IOST, A.. Relevance of roughness parameters for describing and modeling machined surfaces. **Journal of materials science**, v. 38, p. 2525-2536, 2003.

BONIFÁCIO, M. E. R.; DINIZ, A. E.. Monitoring the tool life in finish turning using vibration signals. **RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Science**, v. 16, p. 58-71, 1994.

BOUZAKIS, K. D.; AICHOUH, P.; EFSTATHIOU, K.. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 43, p. 499-514, 2003.

CAVALLO aços especiais Ltda. Rio de Janeiro. **Apresenta informações técnicas de aços inoxidáveis que comercializa**. Disponível: <<http://www.cavalloacos.com.br>>. Acesso em: 21 de jun.2005.

CHANG, C. S. Turning of stainless steel with worn tools having chamfered main cutting edges. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 38, p. 291-313, 1998.

CHIEN, W. T.; CHOU, C. Y.; The predictive model for machinability of 304 stainless steel. **Journal of materials processing technology**, v.118, p.442-447, 2001.

* De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

CHIEN, W. T.; TSAI, C. S.. The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH stainless steel. **Journal of materials processing technology**, v.140, p.340-345, 2003.

CHOI, J.P.; LEE, S. J. Efficient chip breaker design by predicting the chip breaking performance. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v. 17, p.489-497, 2001.

DIMLA, E. D. S.; LISTER, P. M.. On-line metal cutting tool condition monitoring I: force and vibration analyses. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 40, p. 739-768. 2000.

DIMLA, E. D. S. The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v. 19, p.705-716, 2002.

DIMLA, E. D. S.. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 40, p. 1073-1098. 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2000. 244p.

EL-AXI, M.H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, p. 1055 – 1063, 2002.

EE, K., C.; BALAJI, A.,K.; JAWAHIR, I.S. Progressive tool-wear mechanisms and their effects on chip-curl/chip-form in machining with grooved tools: an extend application of the equivalent toolface (ET) model. **Wear**, v.255, p.1404-1413,2003[5].

FACCIO, I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssimas velocidades de corte**. 2003. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

FANG, X. D.; ZHANG, D.. An investigation of adhering layer formation during tool wear progression in turning of free-cutting stainless steels. **Wear**, v. 197, p. 169-178, 1996.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.

GHANI, A. K.; CHOUDHURY, I.A.; HUSNI. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. **Journal of materials processing technology**, v.127, p.17-22, 2002.

GUIMARÃES, A. R. **Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento**. 2000. 55p. Monografia (Trabalho de Graduação)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

GUO, Y. B. An integral method to determine the mechanical behavior of material in metal cutting. **Journal of materials processing technology**, v.142, p.72-81, 2003.

HECKER, S. S. Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel: Part I. Magnetic measurements and mechanical behavior. **Metallurgical Transactions**, v. 13, p.619-626, 1982.

HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering material**. New York, 1995. 786p.

HUANG, G.L. et al. Martensite formation, strain rate sensitivity, and deformation behavior of type 304 stainless steel sheet. **Metallurgical Transactions**, v. 20, p.1239-1246, 1989.

HUNG, N. P; FU, Y. Q.. Effect of crystalline orientation in the ductile-regime machining of silicon. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v. 16, p.871-876, 2000.

JANG, D. Y.; WATKINS, T. R.; KOZACZEK, K. J.; HUBBARD, C. R.; CAVIN, O. B.. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. **Wear**, v. 194, p. 168-173. 1996a.

JANG, D. Y. et al. A. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop on line roughness measuring technique in hard turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 36, p. 453-464. 1996b.

KOPAC, J.. Hardening phenomena of Mn-austenite steel in the cutting process. **Journal of materials processing technology**, v.109, p.96-104, 2001.

KORKUT, I et al. Determination of optimum cutting parameters during machining of ABNT 304 austenitic stainless steel. **Materials & Design**. v. 25, p.303-305, 2004.

KRAUSS, G. Steels: **Heat treatment and processing principles**. USA: ASM International, 1989.

KULKARNI, M.S.; MARIAPPAN, V. Multiple response optimization for improved machined surface quality. **Journal of materials processing technology**, v.141, p.174-180, 2004.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGE, G. **Stainless Steels**. France: Les Editions de Physique Les Ulis, 1993.

LIANG, M.; MGWATU, M.; ZUO, M. Integration of cutting parameters selection and tool adjustment decision for multipass turning. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v.17, p.861-869, 2001.

LIN, T. R. Cutting behaviour using variable feed and variable speed when drilling stainless steel with TiN-coated carbide drills. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v.19, p.629-636, 2002.

LIN, W. S.; LEE, B. Y.; WU, C.L.. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. **Journal of Materials Processing Technology**. v.108, p. 283-293, 2001.

MAMALIS, A.G.; KUNDRASK, J. ; GYANI, K. On the dry machining of steel surfaces using superhard tools. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v.19, p.157-162, 2002.

MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P.; DRIEMEIR, L.; DIAS, C. A. N. An investigation of the effect of machining parameters on the strain induced martensite formation during turning in na austenitic stainless steel In: **INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**, 17.,2003, São Paulo.

MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P.; SOUZA, L.; HASSUI; A. Relação existente entre a microestrutura de alguns aços inoxidáveis austeníticos, formação de cavaco, força de corte e o acabamento superficial no processo de torneamento In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 3.,2005, Joinville.

MACHADO, Á. R; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica. LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, 2004. 257p.

MAEKAWA, K.; ITOU, A. Friction and tool wear in nano-scale machining – a molecular dynamics approach. **Wear**, v. 188, p. 115-122. 1995.

MENDEZ, J.. On the effects of temperature and environment on fatigue damage processes in Ti alloys and in stainless steel. **Materials science and engineering**, v.A263, p.187-192, 1999.

MESQUITA, R. M. D.; SOARES, F. A. M.; MARQUES, M. J. M. M. An experimental study of the effect of cutting speed on chip breaking. **Journal of Materials Processing Technology**. v.56, p. 313-320, 1996.

MILLER, R. M.; MULHOLLAND, G.; ANDERSON, C.. Experimental cutting tool temperature distributions. **Journal of manufacturing science and engineering**, v.125, p.667-673, 2003.

MITSUBISHI CARBIDE. **Ferramentas de metal duro para usinagem**, Mitsubish materials corporation, 2001-2002. (catálogo CB005PB).

MONLEVADADE, E. F. **Relação de orientação resultantes na precipitação de austenita em ferrita em aços inoxidáveis dúplex**. 2002. 93p. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

MURR, L.E. et al. Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel: Part I. Microstructural study. **Metallurgical Transactions**, v. 13, p.627-635, 1982.

MYSPACE. Páginas com artigos e informações nas áreas de engenharia e tecnologia (mecânica, elétrica, eletrônica, química, informática). Também inclui alguns artigos de Física

e Matemática. Disponível em: <<http://myspace.eng.br/eng/rugosid.asp#ra>>. Acesso em 17 de ago. 2005.

NGOI, B. K. A.; SEEJITH, P. S. Ductile regime finish machining – a review. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v.16, p.547-550, 2000.

NUCLEO INOX Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável. Brasil: Associação formada por fornecedores de insumos, produtores, reprocessadores, distribuidores, fabricantes e entidades de classe, todos ligados ao **aço inoxidável** e interessados no desenvolvimento do produto como matéria-prima de tecnologia de ponta. Disponível em: <<http://www.nucleoinox.com.br>>. Acesso em 05 de jul. 2005.

PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos**: microestrutura e propriedades. São Paulo: Hemus, 1994. 170p.

PARK, Y.; KIM, T. Y.; WOO, J.; SHIN, D.; KIM, J.. Sliding mode cutting force regular for turning processes. **International journal of machine tools & manufacture**, v.38, p.911-930, 1998.

PARO, J.; HÄNNINEN, H.; KAUPPINEN. Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels. **Journal of materials processing technology**, v.119, p.14-20, 2001.

PECKENER, D. et al. **Handbook of Stainless Steels**. USA: McGraw Hill, 1977. Cap. 24.

QI, H.S.; MILLS, B. Formation of transfer layer at the tool-chip interface during machining. **Wear**, v. 245, p. 136 – 147, 2000.

RAO, B. C.; SHIN, Y. C. A comprehensive dynamic cutting force model for chatter prediction in turning. **International journal of machine tools & manufacture**, v.39, p.1631-1654, 1999.

RISBOOD, K. A.; DIXIT, U.S.; SAHASRABUDLHE, A. D.. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting force and vibrations in turning process. **Journal of materials processing technology**, v.132, p.203-214, 2003.

ROCHA, C.A.; SALES, W. F.; BARCELLOS, C. S.; ABRÃO, A. M. Evaluation of wear mechanisms and surface parameters when machining internal combustion engine valve seats using PCBN tools. **Journal of materials processing technology**, v.145, p.397-406, 2004.

SAOUBI, R. M.; OUTEIRO, B.; CHANGEUX, B.; LEBRUN, J. L.; MORÃO DIAS, A.. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized ABNT 316L steels. **Journal of materials processing technology**, v.96, p.225-233, 1999.

SBMM Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise. Disponível em: <<http://www.sbmm.org.br>>. Acesso em 17 de ago. 2005.

SEKER, U.; ÇİFTÇİ, I.; HASIRCI, H.. The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron. **Materials & Design**. v. 24, p.47-51, 2003.

SHAW, M.C. **Metal cutting principles**. Clarendon Press – Oxford, 1986. 594p.

SIKDAR, S. K.; CHEN, M. Relationship between tool flank wear and component forces in single point turnig. **Journal of materials processing technology**, v.128, p.210-215, 2002.

SLOCOMBE, A.; LI, A.T. Diode laser ablation machining of 316L stainless steel powder/polymer composite material effect of powder geometry, **Applied surface science** v.168, p.17 – 20, 2000.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. New material and their machining. **Institute journal advanced manufacturing technology**, v.18, p.537-544, 2001.

STEEL EXPORT. **Fabricação dos aços USS inoxidáveis e resistentes ao calor**. New York: 1950. 135p.

STIPKOVIC Filho, M. **Usinagem**. São Paulo, 1986.

STRAFFORD, K. N.; AUDY, J. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting force. **Journal of materials processing technology**, v.67, p.150-156, 1997.

SULLIVAN, D.O.; COTTERELL, M. Machinability of austenitic stainless steel SS 303. **Journal of materials processing technology**, v.124, p.153-159, 2002.

TEBECHERANI, C. T. P. **Aços inoxidáveis**. Disponível em:
<http://www.pipesystem.com.br / Artigos_Tecnicos/artigos_tecnicos.html>. Acesso em:29 de nov. 2004.

TEKINER,Z; YESILYURT, S. Investigation of cutting parameters depending on process sound during turning of ABNT 304 austenitic stainless steel. **Materials and design**. v. 25, p.507-513, 2004.

THIELE, J. D., MELKOTE, S. N.. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of ABNT 52100 steel. **Journal of materials processing technology**, v.94, p.216-226, 1999.

THOMAS, M.; BEAUCHAMP, Y.; YOUSSEF, A. Y.; MAUSOUNAVE, J.. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process. **Computers ind. engng**. v.31, p. 637-644, 1996.

VLACK, L.H.V. **Princípios de ciências dos materiais**. São Paulo: Edgar Blücher, 1970. 427p.

WANG, J.; HUANG, C.Z.; SONG, W. G.. The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process. **Journal of materials processing technology**, v.142, p.338-346, 2003.

WANG, S. H.; CHEN, W.. Room temperature creep deformation and its effect on yielding behaviour of a line pipe steel with discontinuous yielding. **Materials science and engineering**. v. A301, p.147-153, 2001.

WEISS, B.; STICKLER, R. Phase instabilities during high temperature exposure of 316 austenitic stainless steel. **Metallurgical transactions**, v. 3a, p.851-866, 1972.

XINGZHONG, Z.; JIAJUN, L.; BAOLIANG, Z.; HEZHOU, M.; ZHNENBI, L. Wear behavior of Si₃N₄ ceramic cutting tool material against stainless steel in dry and water-lubricated conditions. **Ceramics International**, v. 25, p. 309 – 315, 1999.

YEN, Y.C; JAIN, A.; ALTAN, T. A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v.146, p.72-81, 2004.