

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais

GUILHERME ROBERTO DOS SANTOS BIASIBETTI

**INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NO TORNEAMENTO DE
BARRAS DE AÇO ABNT 1045**

Porto Alegre
2018

GUILHERME ROBERTO DOS SANTOS BIASIBETTI

**INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NO TORNEAMENTO DE
BARRAS DE AÇO ABNT 1045**

Dissertação submetida ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia, modalidade acadêmica.

Orientador: *Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha*

Co-orientador: *Prof. Dr. Eng. Rafael Menezes Nunes*

Porto Alegre
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Biasibetti, Guilherme Roberto dos Santos

Integridade da superfície usinada no torneamento de barras de aço ABNT 1045 / Guilherme Roberto dos Santos Biasibetti. -- 2018.

119 f.

Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

Coorientador: Rafael Menezes Nunes.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Torneamento. 2. Rugosidade. 3. Tensões residuais. I. Rocha, Alexandre da Silva, orient. II. Nunes, Rafael Menezes, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GUILHERME ROBERTO DOS SANTOS BIASIBETTI

**INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NO TORNEAMENTO DE
BARRAS DE AÇO ABNT 1045**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de mestre em engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: *Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha*

Co-orientador: *Prof. Dr. Eng. Rafael Menezes Nunes*

Aprovado em: 16 / 04 / 2019

BANCA EXAMINADORA

Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler – SATC

Dr. Mario Wolfart Junior – IFC

Dr. Guilherme Vieira Braga Lemos – UFRGS

AGRADECIMENTOS

A UFRGS e todos seus colaboradores por prover os recursos necessários para o desenvolvimento dessa dissertação.

Ao Prof. Alexandre da Silva Rocha pela orientação e generosidade em compartilhar seus conhecimentos ao longo de todo o período de mestrado e suas interrupções e recomeços.

Ao Prof. Rafael Menezes Nunes pela co-orientação desde minha chegada ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM).

A todos os colaboradores do LdTM, em especial aos membros do GES que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir com este trabalho: Vinicius Waechter Dias, Carla Adriana Theis Soares, Juliana Zottis, Adão Felipe Oliveira Skonieski, Giovanni Rocha dos Santos, Leonardo Fonseca Oliveira, Rodrigo Afonso Hatwig, Angela Selau Marques, Gilceu dos Santos Cardoso e Luciano Kempiski.

Ao Prof. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler, do SATC/SC pela contribuição na área de usinagem, essencial em diversas etapas deste trabalho. Aos demais membros do curso de Engenharia Mecânica do SATC/SC, em especial ao Fernando Michelin Marques.

Aos colaboradores do LAMEF, professores Afonso Reguly, Thomas Clarke e Carlos Fortis, que auxiliaram na condução dos ensaios de tensões residuais, especialmente ao Igor Luis Diehl pelo auxílio na execução das análises.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais da UFRGS, em especial, ao Prof. Altair Soria Pereira que, apesar de não ter participado diretamente deste trabalho, teve um papel fundamental em minha formação profissional.

A minha família por ter prestado total apoio em todas as etapas do trabalho, especialmente a minha esposa, Ana, pelo carinho e palavras de incentivo.

A CAPES e ao CNPQ, pelo apoio financeiro durante o projeto.

E, por fim, a banca de avaliação da dissertação pela disponibilidade e contribuições.

RESUMO

Neste trabalho foram investigadas as influências de alguns dos principais fatores do torneamento sobre o acabamento da superfície, rugosidade, tensões residuais e microdureza em um conjunto de amostras. Foram analisadas barras de aço ABNT 1045 torneadas e utilizou-se a técnica de planejamento de experimentos (DoE) para formar trinta e duas diferentes combinações de fatores, analisar suas interações e sua influência no acabamento de cada amostra. Os fatores de usinagem investigados foram: (1) avanço, (2) velocidade de corte, (3) raio de quina, (4) ângulo de saída e (5) posição axial. Análises fatoriais foram avaliadas a influência dos cinco fatores na rugosidade média (R_a) e a eficácia de cada conjunto de fatores em obter o acabamento alvo (I_r). Utilizou-se a técnica de difração de raios-X para medir as tensões residuais em sete das dezesseis amostras. As tensões foram medidas na superfície e em profundidades de 5, 10, 20, 50 e 75 μm com auxílio de ataque eletrolítico. Por fim foi realizada análise metalográfica da superfície usinada e perfil de microdureza. Os resultados mostraram que o avanço e o raio de quina possuem elevado efeito padronizado em ambas as análises. Porém, para ambos, enquanto que a aplicação de um menor avanço (ou maior raio de quina) produziu superfícies com baixo R_a , por outro lado também prejudicou a eficácia do torneamento pois contribuiu para obtenção de rugosidade significativamente maior que a teórica. Já o fator velocidade de corte quando teve seu valor elevado foi benéfico ao processo em ambas as análises. Não foi encontrada relevância da região de medição da rugosidade sobre R_a . As tensões residuais sofreram elevada influência dos fatores avanço e velocidade de corte, enquanto o ângulo de saída e o raio de quina mostraram pequeno efeito. A qualidade do acabamento da superfície, regular ou irregular, apresentou relação direta com o mecanismo de geração das tensões residuais. O perfil de microdureza medido mostrou valores de dureza elevados nas amostras com superfície regular e em regiões com maior tensão residual.

Palavras-chave: Torneamento; acabamento; rugosidade; tensões residuais.

ABSTRACT

SURFACE INTEGRITY OF MACHINED 0,45%C STEEL BARS AFTER TURNING

This paper investigated the influence of some of the main turning parameters in surface finishing, roughness, residual stress and microhardness of turning samples. Design of experiments (DoE) approach controlled the machining factors of the 0.45%C (ABNT 1045) steel bars samples. DoE also were applied to organize a total of thirty-two parameters combination, analyze its interactions and influences in each sample's surface finish. Machining parameters investigated were: (1) feed rate, (2) cutting speed, (3) nose radius, (4) rake angle and (5) region of roughness measurement. Factorial analysis evaluated the influence of those five parameters in the average roughness (R_a) and the accuracy of each parameters combination to achieve the expected surface finish (I_r). The X-ray diffraction technique was used to measure the residual stresses in seven out of sixteen samples. The tensions were measured at their surface and at depths of 5, 10, 20, 50 and 75 μm by means of electrochemical material removal. In addition metallographic analysis of the machined surface and microhardness profile were conducted. Results showed that parameters as feed rate and nose radius have strong standardized effect in both factorial analysis. Results shown that reduction of the feed rate (or increase in nose radius) were able to produce lower roughness average (R_a) but, on the other hand, it also contribute to generate a surface roughness significant higher than theoretical roughness. The increase in cutting speed was beneficial to both, achieving a lower roughness average and improving process accuracy. The region of roughness measurement was found not significant to influence R_a . The residual stresses were strongly influenced by the feed rate and cutting speed factors, while the rake angle and nose radius showed small effect. The quality of the surface finish, regular or irregular, was directly related to residual stresses generation mechanism. The microhardness profile shown higher microhardness in samples with regular surface finish and in depths with higher residual stress.

Keywords: Turning; finishing; roughness; residual stresses.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.	22
FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO (CENTRO). SEÇÃO TRANSVERSAL DA INTERFACE FERRAMENTA DE CORTE E PEÇA SENDO USINADA (CANTO DIREITO SUPERIOR). VISTA DE UMA FERRAMENTA DE CORTE E PORTA FERRAMENTA E SEUS PRINCIPAIS DISPOSITIVOS (CANTO INFERIOR DIREITO).	23
FIGURA 3 - VISTAS EM PERSPECTIVA DOS PLANOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA FERRAMENTA.	25
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS ÂNGULOS DA CUNHA CORTANTE E SUA LOCALIZAÇÃO NOS RESPECTIVOS PLANOS DE INTERESSE.	26
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO DOBRAMENTO E ENCRUAMENTO DO CAVACO CAUSADO PELA MUDANÇA DO SINAL DO ÂNGULO DE SAÍDA (A) POSITIVO E (B) NEGATIVO.	27
FIGURA 6 - OPERAÇÃO DE CORTE MOSTRANDO INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DO ÂNGULO DE SAÍDA E DE INCLINAÇÃO DE (A) IGUAL A 0° PARA (B) MAIOR QUE 0°.	27
FIGURA 7 – COMPARAÇÃO DO CAVACO E SUA RELAÇÃO COM UM: (A) PEQUENO RAIOS DE QUINA E (B) GRANDE RAIOS DE QUINA.	28
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA VIBRAÇÃO TIPO <i>CHATTER</i> , (A) INTERAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE E ESTRUTURA DA MÁQUINA E (B) MECANISMO DE REGENERAÇÃO ONDULATÓRIA DA SUPERFÍCIE USINADA.	30
FIGURA 9 - INFLUÊNCIA DE (A) UMA FERRAMENTA DE CORTE COM RAIOS DE QUINA CONHECIDO (B) E A SUPERFÍCIE USINADA NA PRESENÇA DE VIBRAÇÕES NO SENTIDO AXIAL.	31
FIGURA 10 - MODELO COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE PARA ESTUDO DE VIBRAÇÕES TIPO <i>MODE COUPLING</i>	31
FIGURA 11 - NOMENCLATURA E SISTEMA DE REFERÊNCIA CONVENCIONADA PARA AS (A) TENSÕES ATUANTES EM UM CUBO UNITÁRIO ELEMENTAR (B) E TENSOR DE TENSÕES.	32
FIGURA 12 - INTERAÇÕES ENTRE TEMPERATURA, TENSÕES E MICROESTRUTURA QUE RESULTAM NO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS.	33
FIGURA 13 - SUPERPOSIÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS (Σ_R) COM A TENSÃO DE SERVIÇO (Σ_S).	35
FIGURA 14 - COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS OU ORDEM DAS TENSÕES RESIDUAIS. NA FIGURA OS TERMOS Σ_A Σ_B INFORMAM A FASE NA QUAL ESTÁ PRESENTE A TENSÃO RESIDUAL, E OS ÍNDICES Σ_I , Σ_{II} , Σ_{III} IDENTIFICAM QUAL O TIPO DA TENSÃO RESIDUAL EM FUNÇÃO DA SUA ORDEM.	36
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA ENTRE OS PLANOS DE DIFRAÇÃO PARALELOS A SUPERFÍCIE (D_{\perp}) E PLANOS COM UM ÂNGULO $\Phi\Psi$ EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE ($D_{\Phi\Psi}$). AS TENSÕES Σ_1 , Σ_2 E Σ_{Φ} SE ENCONTRAM NO PLANO DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.	39
FIGURA 16 - DEPENDÊNCIA LINEAR DA DISTÂNCIA INTERPLANAR, D (311), COM $\sin^2 \Psi$ DE UMA AMOSTRA DE ALUMÍNIO 5056 APÓS TRATAMENTO SUPERFICIAL DE <i>SHOT PEENING</i>	41
FIGURA 17 - DEMONSTRAÇÃO DA SEPARAÇÃO DA CURVA $\sin^2 \Psi$ E DISTÂNCIA INTERPLANAR D	42
FIGURA 18 - PROFUNDIDADE DO MATERIAL QUE OCORRE A PENETRAÇÃO DOS RAIOS-X QUE CONTRIBUEM EFETIVAMENTE PARA A ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X EM FUNÇÃO DE $\sin^2 \Psi$	43
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SUPERFÍCIE REAL DE UM SÓLIDO METÁLICO.	44

FIGURA 20 - PRINCIPAIS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A INTEGRIDADE DE UMA SUPERFÍCIE E PARÂMETROS DE ENGENHARIA A SEREM ANALISADOS EM UM PROCESSO DE MANUFATURA.	45
FIGURA 21 - DESVIOS NA RUGOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE.....	47
FIGURA 22 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DEFINIÇÃO DE LINHA MÉDIA.....	47
FIGURA 23 - CONCEITOS DE PERCURSO DURANTE O PROCESSO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE.....	48
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PARÂMETRO R_A SOBRE PERFIL DE RUGOSIDADE, ILUSTRANDO A INDIFERENÇA DESTES PARÂMETRO QUANTO AOS VALES QUE SE ENCONTRAM ABAIXO DA LINHA MÉDIA. ...	49
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PARÂMETRO R_z SOBRE PERFIL DE RUGOSIDADE.....	50
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RUGOSIDADE TEÓRICA (R_T) DO PROCESSO DE TORNEAMENTO PARA UMA OPERAÇÃO COM O AVANÇO MENOR QUE O RAIOS DE PONTA.....	50
FIGURA 27 - PRINCIPAIS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM AS TENSÕES RESIDUAIS NO TORNEAMENTO.....	52
FIGURA 28 - GERAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO TORNEAMENTO.....	53
FIGURA 29 – (A) MECANISMO MECÂNICO E (B) E TÉRMICO DE FORMAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO TORNEAMENTO.	54
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DE UM PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS GERADO APÓS O TORNEAMENTO (<i>HARD TURNING</i>) DE UM AÇO DIN 18MnCr5, TEMPERADO.....	54
FIGURA 31 - MICROGRAFIA DO MATERIAL UTILIZADO OBTIDA A PARTIR DE UM CORTE NA DIREÇÃO LONGITUDINAL E ATAQUE COM NITAL 2%.	57
FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃOS DAS AMOSTRAS.....	58
FIGURA 33 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	58
FIGURA 34 - CONFIGURAÇÃO DE MONTAGEM DA BARRA A SER USINADA, PLACA DE CASTANHA E CONTRAPONTO IDENTIFICANDO A DIFERENCIAÇÃO ENTRE A AMOSTRA A E AMOSTRA B, AMBAS USINADAS COM OS MESMOS CONJUNTOS DE FATORES.....	60
FIGURA 35 – DIAGRAMA DA AMOSTRA SOBRE BASE METÁLICA PARA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	60
FIGURA 36 - POSIÇÕES DE LEITURA DA RUGOSIDADE PARA CADA AMOSTRA DE 200 MM.....	61
FIGURA 37 - CORTE DAS AMOSTRAS E REGIÃO SELECIONADA PARA REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	63
FIGURA 38 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NA ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E PRINCIPAIS ELEMENTOS.....	64
FIGURA 39 – DEFINIÇÃO DAS DIREÇÕES DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM (A) ILUSTRAÇÃO E (B) NO PLANO DA SUPERFÍCIE DA BARRA. SÃO ELAS V_c , DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE OU TANGENCIAL, E F DIREÇÃO DO AVANÇO OU LONGITUDINAL.....	65
FIGURA 40 - EXEMPLO DOS GRÁFICOS DE TREZE POSIÇÕES DISTINTAS DE Ψ UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X NUM DETERMINADO PONTO, NUMA DIREÇÃO E UMA AMOSTRA.....	66
FIGURA 41 - EXEMPLO DO GRÁFICO DE UMA ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X PARA UM DADO Ψ E A LOCALIZAÇÃO DO CENTRO DO PICO DE DIFRAÇÃO.....	66
FIGURA 42 - EXEMPLO DO GRÁFICO $\text{SEN}^2(\Psi)$ VS 2θ UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL EM UMA DETERMINADA DIREÇÃO.....	67
FIGURA 43 - DIAGRAMA DOS DEZ PONTOS SOBRE A AMOSTRA UTILIZADOS PARA VERIFICAR A HOMOGENEIDADE DAS TENSÕES RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE.....	68

FIGURA 44 - AMOSTRA PREPARADA PARA ATAQUE ELETROLÍTICO.....	69
FIGURA 45 - AMOSTRA E ELETRODO DE CHUMBO DENTRO DA SOLUÇÃO ÁCIDA SOBRE AGITADOR MAGNÉTICO.	70
FIGURA 46 - FONTE DE TENSÃO UTILIZADA NA REMOÇÃO DE CAMADAS DAS AMOSTRAS E LIGAÇÕES DO ELETRODO DE CHUMBO E DA AMOSTRA.	70
FIGURA 47 - MICRÔMETRO UTILIZADO PARA MEDIR O DIÂMETRO DAS AMOSTRAS ANTES E DEPOIS DO ATAQUE ELETROLÍTICO.	71
FIGURA 48 – (A) MICROSCÓPIO (B) E MICRODURÔMETRO UTILIZADOS.	71
FIGURA 49 - INSPEÇÃO VISUAL DE UMA SEÇÃO REPRESENTATIVA DA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DO GRUPO RL, (A) BARRA03A, (B) BARRA08A, (C) BARRA11A E (D) BARRA 16A.	74
FIGURA 50 - INSPEÇÃO VISUAL DE UMA SEÇÃO REPRESENTATIVA DA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DO GRUPO RG, (A) BARRA02A, (B) BARRA04A, (C) BARRA10A, (D) BARRA12A E (E) BARRA14A.	75
FIGURA 51 - PERFIL DE RUGOSIDADE DA BARRA 03A PERTENCENTE AO GRUPO REGULAR LISO.	75
FIGURA 52 - PERFIL DE RUGOSIDADE DA BARRA 02A PERTENCENTE AO GRUPO REGULAR GROSSEIRO.	75
FIGURA 53 - INSPEÇÃO VISUAL DE UMA SEÇÃO REPRESENTATIVA DA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DO GRUPO IG, (A) BARRA01A, (B) BARRA05A, (C) BARRA06A, (D) BARRA09A E (E) BARRA13A.	76
FIGURA 54 - PERFIL DE RUGOSIDADE DA BARRA 13A, TÍPICO PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO IG.....	77
FIGURA 55 - INSPEÇÃO VISUAL DE UMA SEÇÃO REPRESENTATIVA DA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DO GRUPO VA, (A) BARRA07A POSIÇÃO LEITURA II, (B) BARRA07A POSIÇÃO DE LEITURA III, (C) BARRA15A POSIÇÃO DE LEITURA II E (D) BARRA15A POSIÇÃO DE LEITURA III.	78
FIGURA 56 - PERFIL DE RUGOSIDADE DA BARRA 15A MEDIDA PRÓXIMO AO CONTRAPONTO, REGIÃO III.	78
FIGURA 57 - PERFIL DE RUGOSIDADE DA BARRA 15A MEDIDA NO CENTRO DA BARRA, REGIÃO II.	78
FIGURA 58 - MICROGRAFIA DE UMA REGIÃO AFASTADA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA DE BARRA NÃO USINADA E CORTADA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL. ATAQUE NITAL 2%.....	80
FIGURA 59 - MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DAS TRÊS AMOSTRAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL COM AUMENTO DE 10X. ATAQUE NITAL 2%.	81
FIGURA 60 - MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DAS TRÊS AMOSTRAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL COM AUMENTO DE 20X. ATAQUE NITAL 2%	81
FIGURA 61 - MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DAS TRÊS AMOSTRAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL COM AUMENTO DE 50X. ATAQUE NITAL 2%	82
FIGURA 62 - MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DAS TRÊS AMOSTRAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL COM AUMENTO DE 100X. ATAQUE NITAL 2%	82
FIGURA 63 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS DOS CINCO FATORES SOBRE A RESPOSTA DE R_A , PARA $A=0,05$	84
FIGURA 64 - GRÁFICOS DOS PRINCIPAIS EFEITOS DOS CINCO FATORES SOBRE A RUGOSIDADE R_A	85
FIGURA 65 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS DOS QUATRO FATORES SOBRE O ÍNDICE I_R , PARA $A=0,05$	86
FIGURA 66 - GRÁFICOS DOS PRINCIPAIS EFEITOS DOS QUATRO FATORES SOBRE O ÍNDICE I_R	87
FIGURA 67 - TENSÕES RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MEDIÇÃO NA DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE (v_c) PARA TODAS AS AMOSTRAS.....	89

FIGURA 68 - TENSÕES RESIDUAIS CISALHANTES (T) EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MEDIÇÃO NA DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE (v_c) PARA TODAS AS AMOSTRAS.....	89
FIGURA 69 - TENSÕES RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MEDIÇÃO NA DIREÇÃO DO AVANÇO (F) PARA TODAS AS AMOSTRAS.....	91
FIGURA 70 - TENSÕES RESIDUAIS CISALHANTES (T) EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MEDIÇÃO NA DIREÇÃO DO AVANÇO (F) PARA TODAS AS AMOSTRAS.....	91
FIGURA 71 - RELAÇÃO DAS POSSÍVEIS COMPARAÇÕES DIRETAS DA MUDANÇA DE UM FATOR DE USINAGEM E SEU EFEITO SOBRE A AS TENSÕES RESIDUAIS, BEM COMO A INFLUÊNCIA DA REGULARIDADE NA RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS.....	92
FIGURA 72 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 03 E 04 E EM AMBAS DIREÇÕES DE MEDIÇÃO, NAS QUAIS O ÚNICO FATOR QUE SOFREU ALTERAÇÃO FOI O AVANÇO.....	93
FIGURA 73 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01 E 03 E EM AMBAS DIREÇÕES DE MEDIÇÃO, NAS QUAIS O ÚNICO FATOR QUE SOFREU ALTERAÇÃO FOI A VELOCIDADE DE CORTE.....	94
FIGURA 74 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01 CONTRA 05, 04 CONTRA 08 E 09 CONTRA 13 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ALTERAÇÃO DO R_ϵ DE 0,4 MM PARA 1,2 MM NA DIREÇÃO DO AVANÇO. OS DEMAIS FATORES NÃO FORAM ALTERADOS ENTRE AS COMPARAÇÕES SUGERIDAS.....	95
FIGURA 75 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01 CONTRA 05, 04 CONTRA 08 E 09 CONTRA 13 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ALTERAÇÃO DO R_ϵ DE 0,4 MM PARA 1,2 MM NA DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE. OS DEMAIS FATORES NÃO FORAM ALTERADOS ENTRE AS COMPARAÇÕES SUGERIDAS.	96
FIGURA 76 - COMPARAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE PARA AMOSTRAS USINADAS COM APENAS O R_ϵ DISTINTO.	96
FIGURA 77 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01 CONTRA 09 E 05 CONTRA 13 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ALTERAÇÃO DO ÂNGULO DE SAÍDA DE 7° PARA -6° NA DIREÇÃO DO AVANÇO. OS DEMAIS FATORES NÃO FORAM ALTERADOS.....	97
FIGURA 78 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01 CONTRA 09 E 05 CONTRA 13 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ALTERAÇÃO DO ÂNGULO DE SAÍDA DE 7° PARA -6° NA DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE. OS DEMAIS FATORES NÃO FORAM ALTERADOS.	98
FIGURA 79 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01, 05, 09 E 13 CONTRA 03, 04 E 08 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE UM TORNEAMENTO CUJO OS DIFERENTES CONJUNTOS DE FATORES FORAM CAPAZES DE PRODUZIR UMA SUPERFÍCIE REGULAR CONTRA UM QUE PRODUIU UMA SUPERFÍCIE IRREGULAR. NA DIREÇÃO DE MEDIÇÃO DO AVANÇO.	99
FIGURA 80 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DAS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 01, 05, 09 E 13 CONTRA 03, 04 E 08 PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE UM TORNEAMENTO CUJO OS DIFERENTES CONJUNTOS DE FATORES FORAM CAPAZES DE PRODUZIR UMA SUPERFÍCIE REGULAR CONTRA UM QUE PRODUIU UMA SUPERFÍCIE IRREGULAR. NA DIREÇÃO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE.....	99
FIGURA 81 - TENSÕES RESIDUAIS E MICRODUREZA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE AMOSTRAS 03 E 09.	101
FIGURA 82 – GRÁFICO DE I_R EM FUNÇÃO DE R_T PARA AS DEZESSEIS AMOSTRAS.....	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ETAPAS E ORIENTAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO DE UM EXPERIMENTO.	21
TABELA 2 - PRINCIPAIS ORIGENS DAS TENSÕES RESIDUAIS EM FUNÇÃO DE CADA PROCESSO DE MANUFATURA.	34
TABELA 3 – FATORES CONTEMPLADOS NO PRIMEIRO DoE E ANÁLISE FATORIAL QUE POSSUI R_A COMO SAÍDA E CINCO FATORES DE ENTRADA, BEM COMO OS VALORES ATRIBUÍDOS A CADA UM DOS FATORES.....	56
TABELA 4 – FATORES CONTEMPLADOS NO SEGUNDO DoE E ANÁLISE FATORIAL QUE POSSUI I_R COMO SAÍDA E QUATRO FATORES DE ENTRADA, BEM COMO OS VALORES ATRIBUÍDOS A CADA UM DOS FATORES.....	56
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS DE AÇO E NORMA ABNT 1045, EM %(M/M).	56
TABELA 6 - ESPECIFICAÇÕES E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS DE CORTE E SUPORTE UTILIZADOS NA USINAGEM DAS AMOSTRAS.	59
TABELA 7 - CONSTANTES ELÁSTICAS UTILIZADAS NO CÁLCULO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	68
TABELA 8 - ENSAIO DE DUREZA A 1MM DA SUPERFÍCIE USINADA PARA DEFINIÇÃO DA CARGA.....	72
TABELA 9 - SEGREGAÇÃO DAS AMOSTRAS EM GRUPOS CONFORME RESULTADO DAS INSPEÇÕES VISUAIS E ANÁLISE DE RUGOSIDADE.....	73
TABELA 10 - MATRIZ DE DADOS DA ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DAS TENSÕES RESIDUAIS (Σ_R , EM MPA) E O DESVIO PADRÃO (S , EM MPA) NA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DOS GRUPOS DE INTERESSE.....	79
TABELA 11 - MATRIZ DOS DADOS DO DoE COM CINCO FATORES DE ENTRADA E COMO SAÍDA A RUGOSIDADE MÉDIA R_A	83
TABELA 12 - MATRIZ DOS DADOS DO DoE COM QUATRO FATORES COMO ENTRADA E COMO SAÍDA O ÍNDICE I_R , BEM COMO OS VALORES DE $R_{Z,MÉDIA}$ E R_T UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DE I_R	86
TABELA 13 - AMOSTRAS SELECIONADAS PARA A ANÁLISE DE E TENSÕES RESIDUAIS BEM COMO OS FATORES APLICADOS NA SUA USINAGEM E PRINCIPAIS INFORMAÇÕES DE SUA RUGOSIDADE.....	87
TABELA 14 - TENSÕES RESIDUAIS (Σ_R), DESVIO PADRÃO (S) E TENSÃO RESIDUAL CISALHANTE (T) MEDIDOS NA SUPERFÍCIE E APÓS REMOÇÃO DE CAMADAS NA DIREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE.....	88
TABELA 15 - TENSÕES RESIDUAIS (Σ_R), DESVIO PADRÃO (S) E TENSÃO RESIDUAL CISALHANTE (T) MEDIDOS NA SUPERFÍCIE E APÓS REMOÇÃO DE CAMADAS NA DIREÇÃO DO AVANÇO.	90
TABELA 16 - DUREZA EM DIFERENTES PROFUNDIDAS DAS AMOSTRAS 03 E 09.....	100

LISTA DE SIMBOLOS

a_p	Profundidade de corte
A	Área
c	termo representativo do efeito da composição química do material
C	Elemento químico carbono
Cr	Elemento químico Cromo
d	Espaçamento interplanar
$d_{\phi\Psi}$	Espaçamento interplanar médio na direção
E	Módulo de Young
f	Avanço
HV	Dureza vickers
I_R	Índice de rugosidade
L_e	Comprimento de amostragem
L_m	Percurso de medição, apenas trecho útil
L_n	Final do trecho de medição, utilizado para estabilização
L_t	Percurso total de apalpamento
L_v	Início do trecho de medição, utilizado para estabilização
m	Inclinação do gráfico $\text{sen}^2 \Psi$ por distância interplanar
M	Momento fletor
ρ	termo representativo dos parâmetros do processo
P_f	Plano de trabalho convencional
P_n	Plano normal do gume
P_o	Plano ortogonal da ferramenta
P_p	Plano passivo da ferramenta
P_r	Plano de referência da ferramenta
P_s	Plano do gume da ferramenta
r_ϵ	Raio de quina
R_a	Rugosidade média aritmética
$R_{máx}$	Rugosidade máxima no percurso de medição
R_t	Rugosidade teórica
R_z	Rugosidade média das máximas parciais
s	Desvio padrão
t	termo representativo do efeito do tratamento térmico
v_c	Velocidade de corte
w	termo representativo das propriedades mecânicas do material
$X(t)$	Onda gerada durante revolução atual na superfície usinada
$X(t-T)$	Onda gerada durante revolução anterior na superfície usinada
Z_i	Rugosidade máxima parcial
α	Limite de significância
α_n	Ângulo de incidência
β_n	Ângulo de cunha
γ, γ_n	Ângulo de saída medido no plano normal ao gume
ϵ	Deformação
ϵ_r	Ângulo de quina
θ	Metade do ângulo de difração
K_r	Ângulo de posição do gume principal
K'_r	Ângulo de posição do gume secundário
λ	Comprimento de onda da radiação
λ_s	Ângulo de inclinação do gume principal

ν	Coeficiente de Poison
ϕ	Ângulo de defasagem entre as ondas geradas na superfície usinada entre as revoluções
σ	Tensão normal
σ_r	Tensão residual
σ_s	Tensão de serviço
τ	Tensão cisalhante
φ	Ângulo entre a componente na direção x no plano da superfície e a direção da medida
ψ	Ângulo entre a direção normal da amostra e a normal do plano de difração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	17
1.1	DESCRIÇÃO DA PESQUISA.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	20
2.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	21
2.3	PROCESSO DE CORTE NO TORNEAMENTO.....	22
2.3.1	Principais movimentos e remoção de material.....	24
2.3.2	Geometria da ferramenta de corte	25
2.3.3	Influência do ângulo de saída e ângulo de inclinação	26
2.3.4	Influência do raio de quina.....	28
2.3.5	Vibrações tipo <i>chatter</i> na usinagem.....	29
2.4	DEFINIÇÕES DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO	31
2.5	TENSÕES RESIDUAIS.....	33
2.6	DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	37
2.6.1	A técnica de difração de raios-X.....	38
2.6.2	Método do $\text{sen}^2 \psi$	40
2.6.3	Separação da curva $\text{sen}^2 \psi$	42
2.6.4	Profundidade de penetração.....	43
2.7	INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE	44
2.7.1	Rugosidade	46
2.7.2	Tensões residuais no torneamento.....	51
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	55
3.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO (DoE)	55
3.2	MATERIAIS.....	56
3.3	USINAGEM.....	59

3.4	ANÁLISE DA RUGOSIDADE	60
3.4.1	Rugosidade média (R_a)	61
3.4.2	Índice de rugosidade (I_R)	62
3.5	ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS	63
3.5.1	Equipamento de difração de raios-X.....	63
3.5.2	Cálculo das tensões residuais	65
3.5.3	Uniformidade das tensões residuais na superfície	68
3.5.4	Remoção de camadas e perfil de tensões residuais	69
3.6	ANÁLISE METALGRÁFICA E DUREZA.....	71
4	RESULTADOS.....	73
4.1	UNIFORMIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA.....	73
4.1.1	Grupo regular liso (RL) e regular grosseiro (RG)	73
4.1.2	Grupo irregular grosseiro (IG).....	76
4.1.3	Grupo variação axial de rugosidade (VA)	77
4.1.4	Uniformidade das tensões residuais	79
4.1.5	Caracterização metalográfica	80
4.2	INFLUÊNCIA DOS FATORES NA RUGOSIDADE	83
4.3	EFICÁCIA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	85
4.4	ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	87
4.4.1	Tensões residuais na direção da velocidade de corte.....	88
4.4.2	Tensões residuais na direção do avanço.....	90
4.5	INFLUÊNCIA DOS FATORES NAS TENSÕES RESIDUAIS	92
4.5.1	Efeito do fator avanço.....	92
4.5.2	Efeito do fator velocidade de corte.....	93
4.5.3	Efeito do fator raio de quina.....	94
4.5.4	Efeito do fator ângulo de saída	97
4.5.5	Tensões residuais em superfícies regulares e irregulares	98

4.6	PERFIL DE MICRODUREZA	100
5	DISCUSSÕES	102
5.1	FATORES DE USINAGEM FRENTE A RUGOSIDADE	102
5.1.1	Posição axial	103
5.1.2	Avanço	103
5.1.3	Raio de quina	104
5.1.4	Velocidade de corte	105
5.1.5	O ângulo de saída	105
5.2	DEFINIÇÃO DA RUGOSIDADE ALVO EM PROJETO	106
5.3	FATORES DE USINAGEM FRENTE A TENSÃO RESIDUAL E DUREZA	107
5.3.1	O avanço	109
5.3.2	Velocidade de corte	109
5.3.3	O raio de quina	110
5.3.4	O ângulo de saída	111
5.3.5	Tensões residuais em superfícies regulares e irregulares	112
6	CONCLUSÕES	113
7	REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O controle da qualidade dos componentes mecânicos é fundamental para o sucesso de qualquer processo de manufatura. O constante investimento em tecnologias de usinagem e rotas de produção capazes de gerar superfícies acabadas de excelente qualidade tem sido a força motriz para o desenvolvimento de equipamentos e produtos manufaturados de alto desempenho (JAWAHIR *et al*, 2011). Especialmente em processos de acabamento o controle de parâmetros como: rugosidade da superfície, variações geométricas e região termicamente afetada, entre outros, é essencial para garantir a integridade da superfície e o desempenho dos componentes (GARCÍA-PLAZA *et al*, 2013; WILLERT *et al*, 2018).

Dentre os métodos para avaliar a integridade de uma superfície a rugosidade é a mais largamente aplicada pois reflete diretamente as condições de corte empregadas no processo de usinagem (ULUTAN e OZEL, 2011). Naturalmente a rugosidade da superfície depende fortemente do processo, porém muitas vezes sua previsão direta se torna quase impossível devido a seu complexo mecanismo de formação em conjunto com inúmeros fatores não controlados que a influenciam. A estratégia mais comum envolve a seleção de parâmetros de processo conservadores que não garantem a obtenção de um acabamento excelente tampouco a maximização da taxa de remoção de material (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003). Dentre os principais fatores que influenciam a rugosidade do processo se encontram condições de atrito, desgaste da ferramenta e formação de gume postiço (FERRARESI, 2013). Outro fator que pode influenciar a rugosidade é a ocorrência de vibrações entre a ferramenta de corte e o material sendo torneado, e principalmente a ocorrência de vibrações do tipo *chatter*. Estas vibrações são responsáveis pela redução da qualidade da superfície usinada, redução da vida útil da ferramenta e equipamentos de usinagem e, inevitavelmente, resultam em baixa de produtividade (BHOGAL *et al*, 2015).

Na produção de rolamentos estudos consistentes comparam as propriedades da superfície (rugosidade, tensões residuais e outras) e sua relação com a vida em fadiga desses produtos (SCHWACH e GUO, 2006; GUO *et al*, 2010). Foi verificado por

Sasahara (2005) uma significativa melhora no desempenho em fadiga de corpos de prova de aço 0,45%C produzidos com diferentes perfis de tensões residuais e dureza, sendo estes gerados pela manipulação de fatores de usinagem como avanço, raio de quina e a geometria da ferramenta de corte.

As tensões residuais de um componente usinado são o resultado de diversos eventos mecânicos e térmicos que ocorreram próximo a superfície durante a usinagem. Essas tensões são criadas ou modificadas pela usinagem, podem ser tratativas ou compressivas, e a camada modificada pode ser pouco ou muito profunda (até 100 μm). Estas diferenças são proporcionais as condições de corte, material sendo trabalhado e geometria da ferramenta (EL-AXIR, 2002).

A velocidade de corte e o avanço são os dois parâmetros mais importantes que podem ser ajustados pelo operador para otimizar a condição de corte. A profundidade de corte é normalmente relativa ao diâmetro médio de usinagem (inicial e final da barra). O desempenho da ferramenta de corte depende em grande parte de sua precisão dimensional e de sua geometria. Por melhor que seja o material da ferramenta, se sua geometria não for adequada não haverá êxito na operação. O ângulo de incidência, ângulo de saída, raio de quina, a união entre ambos e suas faces são exemplos de elementos críticos da ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000; GURBUZ *et al*, 2017; XIAO *et al*, 2017).

1.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

A engenharia de elevada qualidade tem por objetivo construir produtos, ou planejar rotas de produção, capazes de mitigar as principais fontes de erros. Desta maneira a etapa mais importante de um trabalho científico se encontra no planejamento do experimento e seleção dos fatores de controle (COLEMAN e MONTGOMERY, 1993; ASILTÜRK e AKKUS, 2011).

O objetivo deste trabalho foi investigar como alguns dos principais fatores de usinagem influenciam a integridade da superfície de barras de aço 1045 após processo de torneamento.

A integridade da superfície foi avaliada através de análises de rugosidade e tensões residuais na superfície e abaixo da superfície até a profundidades de 75 μm . A execução deste estudo partiu da utilização da técnica de planejamento do experimento (DoE) para investigar a influência dos fatores de usinagem sobre a rugosidade das barras. Os fatores contemplados neste trabalho foram: avanço (f), velocidade de corte (v_c), raio de quina (r_ϵ), ângulo de saída (γ) e posição axial de medição da rugosidade.

Após a usinagem, as amostras foram separadas em grupos de acordo com a qualidade da superfície. Sua rugosidade foi medida com rugosímetro e estas informações foram alimentadas ao DoE para realizar duas análises fatoriais subsequentes. A primeira análise fatorial foi realizada com os cinco fatores descritos anteriormente como entrada e a rugosidade média (R_a) como saída. Esta análise teve como objetivo avaliar o efeito de cada um dos fatores na rugosidade das amostras. A segunda análise fatorial teve como entrada apenas quatro fatores (f , v_c , r_ϵ e γ) e como saída um índice de rugosidade (I_R). Este índice equacionou a rugosidade das amostras, obtida a partir das leituras do rugosímetro, com rugosidade teórica de cada processo. Desta maneira foi avaliada a eficácia do processo de torneamento em obter o acabamento objetivado. O acabamento também foi avaliado por análise metalográfica em duas amostras que foram selecionadas por possuírem a mesma rugosidade teórica, porém terem apresentado acabamentos distintos.

Os resultados das análises de rugosidade foram a base para a seleção de um grupo menor de amostras para serem submetidas as análises de tensões residuais. Estas amostras tiveram suas tensões residuais medidas através do método do $\text{sen}^2 \psi$ em um difratômetro de raios-X. Foi utilizado método de remoção de camadas por ataque eletrolítico para medir as tensões residuais na superfície e em profundidades de 5 μm , 10 μm , 20 μm , 50 μm e 75 μm . As tensões residuais foram medidas em duas direções (direção do avanço e na direção da velocidade de corte. Por fim foi investigado o perfil de microdureza de duas amostras e sua relação com as tensões residuais em profundidades semelhantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica dos principais conceitos, fundamentos e técnicas de análise e abordados neste trabalho.

2.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Observar um sistema ou processo operando é uma etapa importante do processo de aprendizagem e, é um fator fundamental para compreender como tal sistema, ou processo, ocorre. Porém, para compreender o efeito no processo de cada parâmetro de entrada é necessário realizar mais do que observar, é necessário explorar os parâmetros de entrada. Em outras palavras, para entender as relações de causa e efeito entre os parâmetros de entrada e o comportamento do processo é necessário realizar experimentos neste processo através da variação, muitas vezes aleatória, dos parâmetros de entrada. Observações podem levar a hipóteses e teorias de como este sistema trabalha, mas experimentos do tipo descrito acima são necessários para demonstrar que as teorias estão corretas (MONTGOMERY, 2013).

Quando um experimento precisa ser realizado de maneira eficiente, uma abordagem científica para o planejamento do experimento precisa ser empregada. Esta abordagem implica em se planejar o experimento de forma que as informações sejam coletadas da maneira apropriada, analisadas por métodos estatísticos e resultando em conclusões objetivas e verdadeiras. Para tal, Coleman e Montgomery (1993) descreveram as etapas e orientações para o planejamento de um experimento com sucesso, Tabela 1.

A análise fatorial é largamente empregada em experimentos que envolvem diversos fatores e que se faz necessário estudar o efeito combinado da resposta destes fatores. O caso particular de planejamento 2ⁿ é interessante para estágios iniciais de um trabalho experimental no qual vários fatores precisam ser investigados. Neste caso são escolhidos apenas dois níveis para cada fator. Estes níveis podem

ser tanto quantitativos, como dois valores de temperatura ou pressão, como podem ser qualitativos (MONTGOMERY, 2013).

Tabela 1 - Etapas e orientações para o planejamento de um experimento.

Etapas	Descrição	Comentários
1	Reconhecimento e definição do problema	Planejamento anterior ao experimento
2	Seleção das variáveis resposta	
3	Escolha dos fatores de entrada, tipos e	
4	Escolha do planejamento do experimento	
5	Execução do experimento	
6	Análise estatística dos dados	
7	Conclusões e recomendações	

Fonte: Adaptado de Coleman e Montgomery (1993).

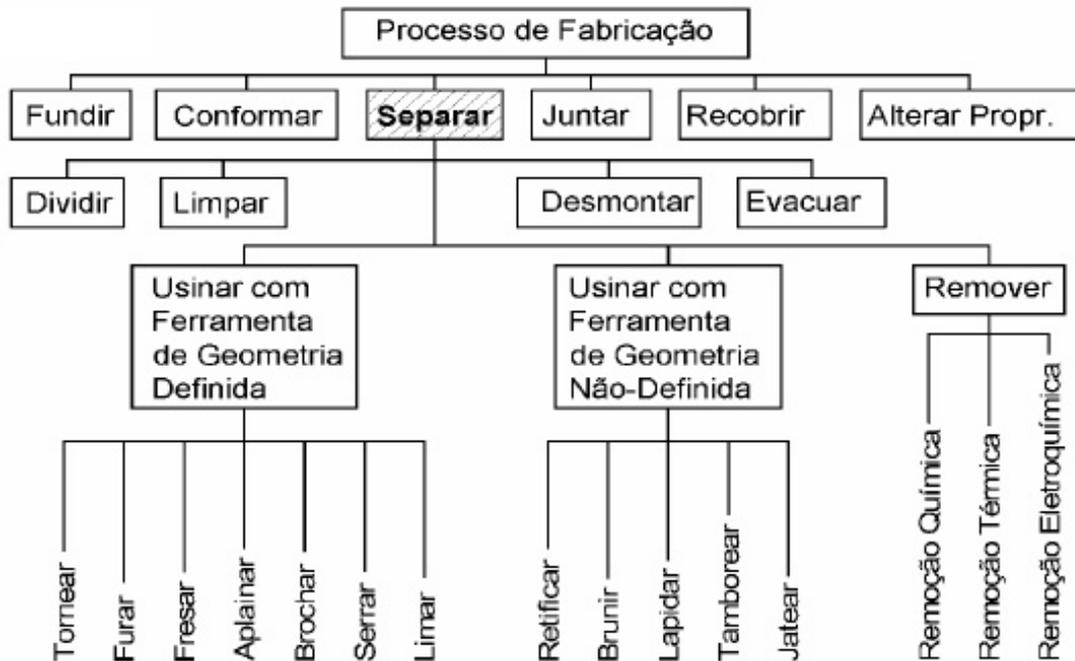
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Nos processos de fabricação, é comum existir mais de um método que pode ser empregado para produzir um determinado componente. A escolha de um método em particular dependerá de um grande número de fatores. É evidente que a fabricação de um produto, seja ele um clipe, uma lâmpada, uma calculadora ou um automóvel, além de conhecimentos de projeto, materiais e processos, requer também grande interação entre as diversas áreas produtivas e demais departamentos da empresa. Quanto mais complexo o produto, maior a necessidade de interação entre elas (MACHADO *et al*, 2009). A Figura 1 mostra a classificação dos processos de fabricação. Segundo Machado *et al* (2009), se define usinagem como processo de fabricação com remoção de cavaco, por cavaco entende-se: porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular (MACHADO).

De todos os processos usados para dar forma aos materiais a usinagem se destaca por possuir uma elevada variação das grandezas de operação. Quase que a totalidade dos metais e ligas podem ser usinados, independentemente de suas características intrínsecas, tais como: dureza elevada ou mole, ter sido fundido ou conformado, dúctil ou frágil, com ponto de fusão alto ou baixo. O tamanho dos

componentes também pode variar, desde componentes para relógios até asas de avião com trinta metros de comprimento podem ser usinadas (TRENT e WRIGHT, 2000).

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: Adaptado de DIN8580 (2003).

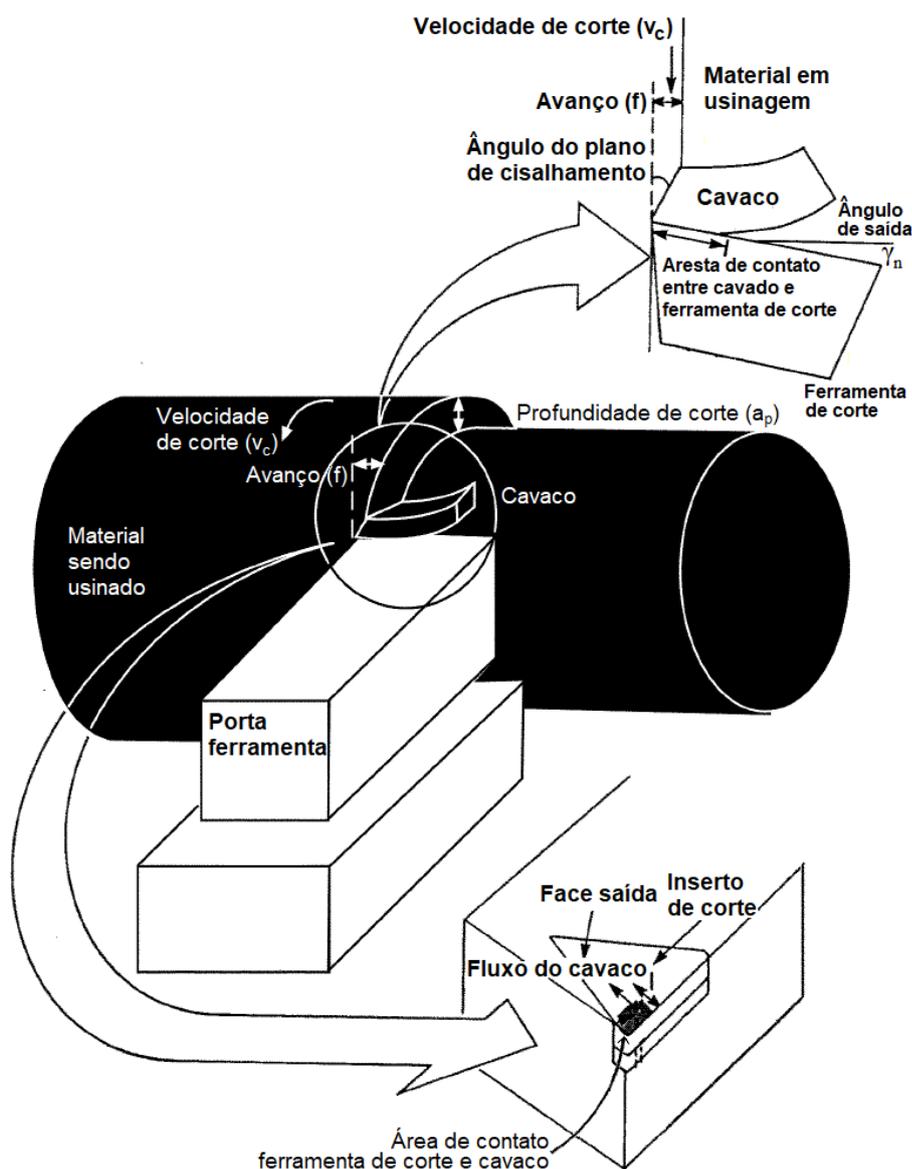
Apesar de sua versatilidade a usinagem é um processo complexo devido às dificuldades em determinar as algumas imprevisibilidades das condições de corte. É simples porque uma vez determinadas estas condições o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são as capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento a um custo competitivo (MACHADO *et al*, 2009).

2.3 PROCESSO DE CORTE NO TORNEAMENTO

A operação de torneamento é provavelmente a mais empregada em trabalhos experimentais de corte de metal (CHILDS *et al*, 2000). Nesta operação o material a

ser usinado é firmemente preso a um eixo rotativo por meio de uma placa de castanhas. A ferramenta de corte por sua vez é mantida rigidamente estática se movendo apenas em eixos específicos em direção a barra para cortar uma porção de material, chamado de cavaco, formando uma superfície cilíndrica ou muitas vezes perfis de revolução complexos. A Figura 2 mostra diagrama ilustrando a interação entre os principais componentes e parâmetros em uma operação de torneamento.

Figura 2 - Diagrama esquemático de uma operação de torneamento (Centro). Seção transversal da interface ferramenta de corte e peça sendo usinada (Canto direito superior). Vista de uma ferramenta de corte e porta ferramenta e seus principais dispositivos (Canto inferior direito).



Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

2.3.1 Principais movimentos e remoção de material

Os movimentos entre ferramenta e peça durante a usinagem são aqueles que viabilizam a ocorrência do processo de usinagem. Por convenção os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo movimento sendo feito pela ferramenta de corte. Este procedimento permite padronizar sinais algébricos aos movimentos, sempre tendo como referência a peça (DINIZ *et al*, 2006).

A velocidade da corte (v_c) é a velocidade com a qual uma aresta de corte da ferramenta é conduzida na direção do corte através do material a usinar, normalmente é expressa em metros/minuto. O avanço (f) é a distância que a ferramenta de corte se desloca axialmente em direção a peça a cada revolução, normalmente é medida em mm/revoluções. A profundidade de corte (a_p) é a espessura de material removida da barra, medida na direção radial. O produto destas três grandezas informa a taxa de remoção de material, Equação 1. Esta taxa geralmente é utilizada para medir a eficiência de uma operação de usinagem.

$$Q = v_c \cdot f \cdot a_p \quad (1)$$

Onde:

Q [mm³/min]: taxa de remoção de material;

v_c [m/min]: velocidade de corte;

a_p [mm]: profundidade de corte;

f [mm/rev]: avanço.

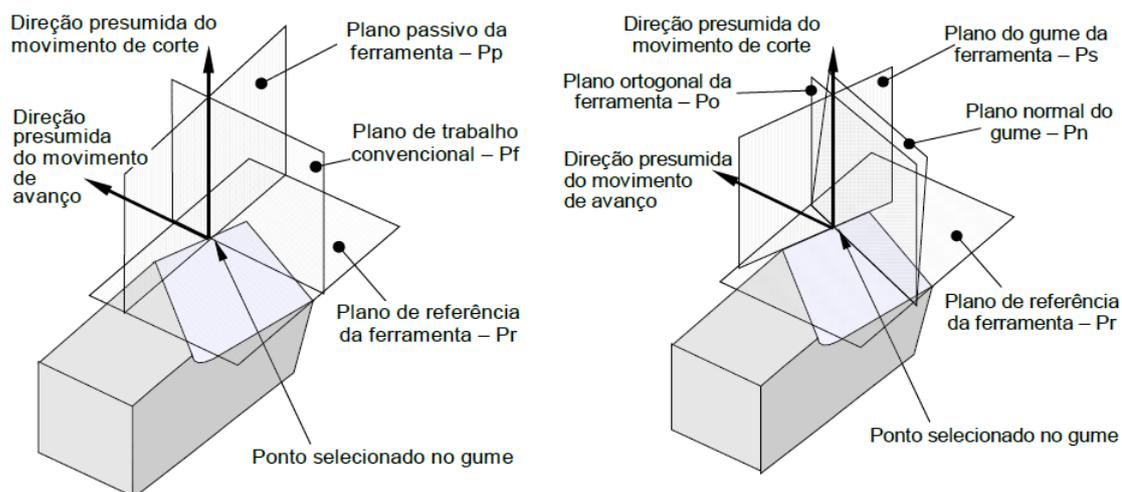
A velocidade de corte e o avanço são os dois parâmetros mais importantes que podem ser ajustados pelo operador para se obter uma condição de corte ótima. A profundidade de corte é normalmente relativa ao diâmetro inicial da barra e ao diâmetro final da superfície que se deseja obter (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.3.2 Geometria da ferramenta de corte

O desempenho da ferramenta de corte depende em grande parte de sua precisão dimensional e sua geometria. Por melhor que seja o material da ferramenta, se sua geometria não for adequada não haverá êxito na operação. Na maioria dos casos existem características e dimensões específicas que precisam ser formadas com extrema precisão para promover o corte com eficiência. O ângulo de incidência, raio de quina, a união entre ambos e suas faces ou mesmo o gume primário ou secundário são exemplos de elementos críticos da ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000). Os principais aspectos e definições dos componentes de uma ferramenta de corte estão apresentados na Figura 2.

É necessário empregar um sistema de referência da ferramenta de corte para a determinação da geometria da cunha de corte durante as etapas de projeto, execução e controle da operação. Os planos definidos a seguir na Figura 3 são referidos a um ponto selecionado sobre o gume principal. Foi utilizado o sistema de ferramenta na mão, visto que o plano de trabalho só existe no sistema de referência efetivo. O sistema de ferramenta na mão só pode ser imaginado (assumido) como “plano de trabalho convencional”, pois a ferramenta não está em ação, e com isso não estão fixadas as direções de corte e avanço (CAVALER, 2017).

Figura 3 - Vistas em perspectiva dos planos do sistema de referência da ferramenta.

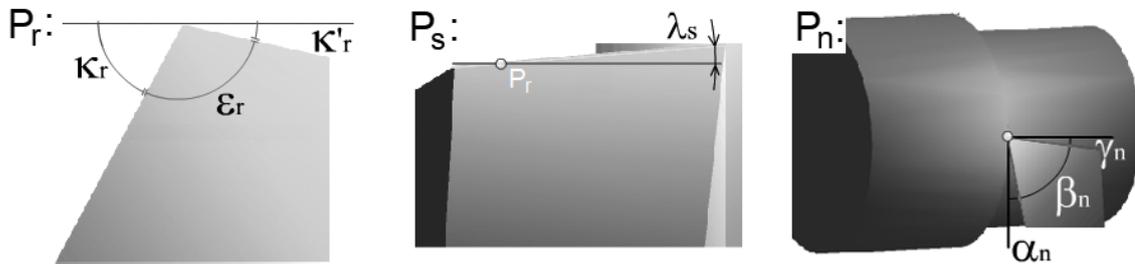


Fonte: Adaptado de Stoeterau (2007).

Neste sistema o plano de referência da ferramenta (P_r) é perpendicular à direção atribuída de corte, escolhida de modo que esse plano seja o mais paralelo ou perpendicular possível à superfície da ferramenta. Nas ferramentas para torneamento, o plano de referência é paralelo à superfície de apoio do cabo.

Os ângulos da cunha cortante destinam-se à determinação da posição e da forma da cunha de uma ferramenta. São agrupados de acordo com o plano no qual estão localizados, ou seja, em ângulos medidos no plano de referência (P_r), no plano normal ao gume (P_n) e no plano do gume (P_s), conforme Figura 4.

Figura 4 - Representação dos principais ângulos da cunha cortante e sua localização nos respectivos planos de interesse.



Plano de referência (P_r):

K_r : ângulo de posição do gume principal;
 K'_r : ângulo de posição do gume secundário;
 ϵ_r : ângulo de quina.
 $K_r + K'_r + \epsilon_r = 180^\circ$

Plano do gume (P_s):

λ_s : ângulo de inclinação do gume principal

Plano normal ao gume (P_n):

γ_n : ângulo de saída;
 β_n : ângulo de cunha;
 α_n : ângulo de incidência.
 $\gamma_n + \beta_n + \alpha_n = 90^\circ$

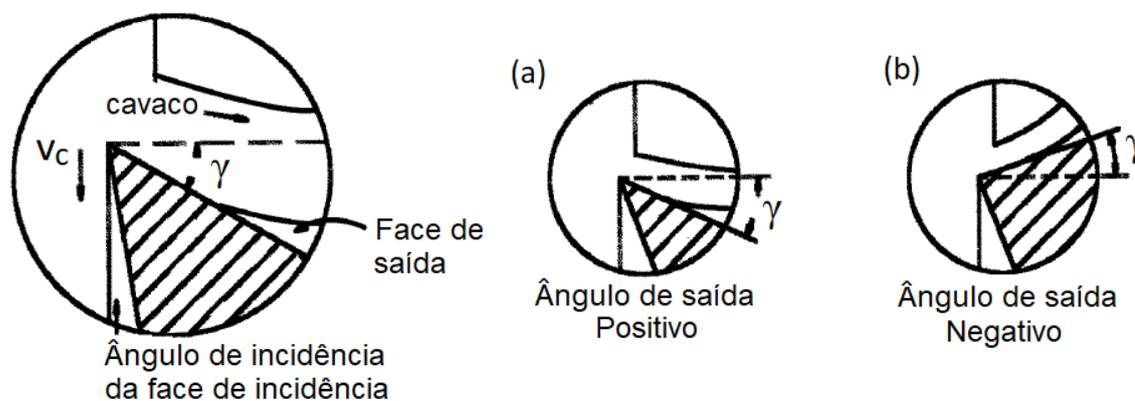
Fonte: Adaptado de Cavaler (2017).

2.3.3 Influência do ângulo de saída e ângulo de inclinação

Os principais fatores que afetam a formação e a retirada contínua do cavaco são o ângulo de saída da ferramenta, a fricção entre cavaco e ferramenta e por fim o encruamento do material à medida que o cavaco é formado (CHILDS *et al*, 2000). O ângulo de saída (γ) influencia decisivamente na força e na potência necessária ao

corte. Uma vez que quanto maior o ângulo de saída menor será o trabalho de dobramento e encruamento do cavaco, conforme ilustrado na Figura 5.

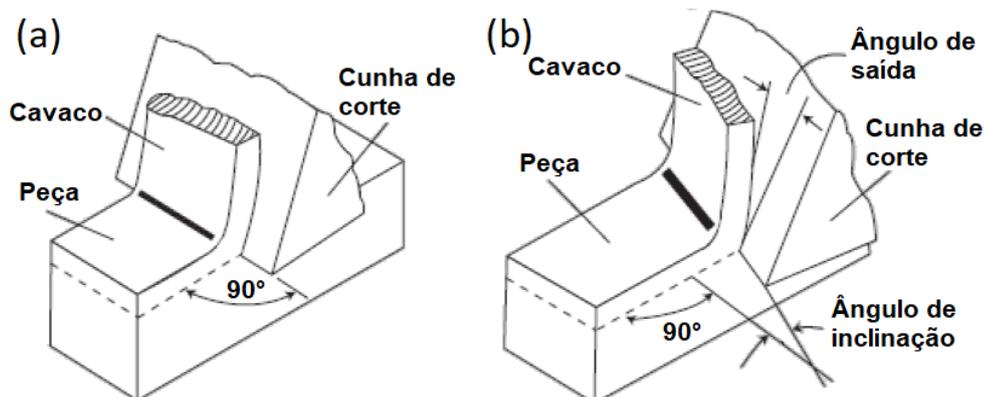
Figura 5 - Representação esquemática do dobramento e encruamento do cavaco causado pela mudança do sinal do ângulo de saída (a) positivo e (b) negativo.



Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

O ângulo de inclinação (λ) possui influência similar ao ângulo de saída, conforme mostrado na Figura 6. Conseqüentemente o acabamento da peça e temperatura de corte também serão afetados. O valor do ângulo de saída é normalmente definido em função da resistência mecânica da peça e da ferramenta, bem como da quantidade de calor gerado pelo corte e da velocidade de avanço (DINIZ *et al*, 2006).

Figura 6 - Operação de corte mostrando influência da alteração do ângulo de saída e de inclinação de (a) igual a 0° para (b) maior que 0° .



Fonte: Adaptado de Machado *et al* (2009).

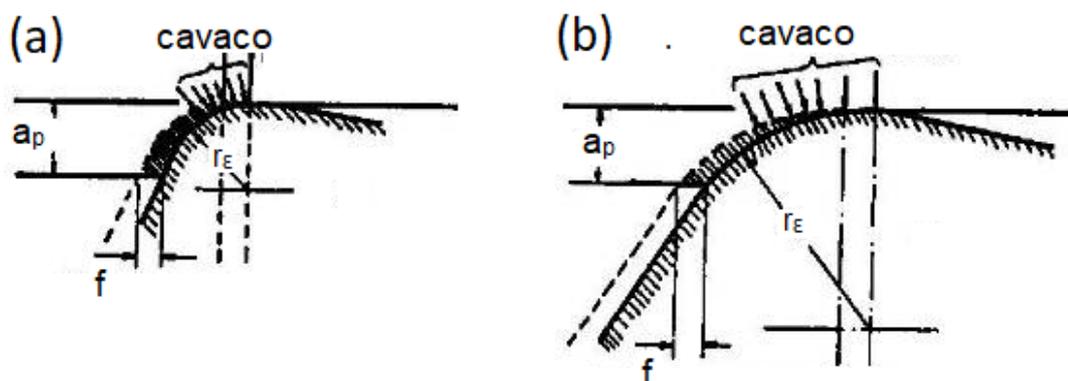
Valores negativos de ângulo de saída são comumente empregados no corte de materiais de difícil usinabilidade por garantir maior resistência a cunha de corte e em cortes interrompidos pois faz com que o impacto se dê afastado da quina evitando assim a quebra da ferramenta (CAVALER, 2017).

2.3.4 Influência do raio de quina

O raio de quina (r_E) da ferramenta de corte, ou raio de ponta, é a região que se encontram a aresta do gume principal e do gume secundário, e é um importante parâmetro do processo de usinagem. Este raio influencia fortemente a resistência da ponta da ferramenta de corte. Valores elevados de raio de quina garantem maior resistência a ponta da ferramenta, entretanto, há um maior contato entre ferramenta e peça, o que provoca o aumento da força de usinagem (MACHADO *et al*, 2009).

Esforços radiais empurram a ferramenta de corte para longe da superfície de corte, como resultado ocorre tendência de vibrações e redução da qualidade do acabamento superficial, em geral estes esforços radiais podem ser minimizados com raios de quina menores e profundidade de corte (a_p) maior (SANDVIK, 2017). O raio de quina também afeta a formação de cavacos, geralmente, a quebra de cavacos melhora com um raio menor, conforme Figura 7 (CAVALER, 2017).

Figura 7 – Comparação do cavaco e sua relação com um: (a) pequeno raio de quina e (b) grande raio de quina.



Fonte: Adaptado de Cavaler (2017).

Geralmente o valor de partida do raio de quina está relacionado com o avanço e profundidade de corte pretendidos. Como regra geral, o valor de partida para profundidade de corte deve ser maior ou igual a $2/3$ do raio de ponta ou o avanço deve ser $1/2$ do raio de ponta (SANDVIK, 2017).

2.3.5 Vibrações tipo *chatter* na usinagem

A vibração mecânica autoalimentada, tipo *chatter*, durante o processo de corte do metal na usinagem é um dos principais obstáculos que limitam sua produtividade e eficácia. Esta vibração não é desejada pois implica em baixa qualidade da superfície e acelera o desgaste da ferramenta de corte. E ainda, possui um efeito de deterioração da máquina de usinagem, reduz sua confiabilidade e coloca em risco a segurança da operação de usinagem (WIERCIGROCH e BUDAK, 2001).

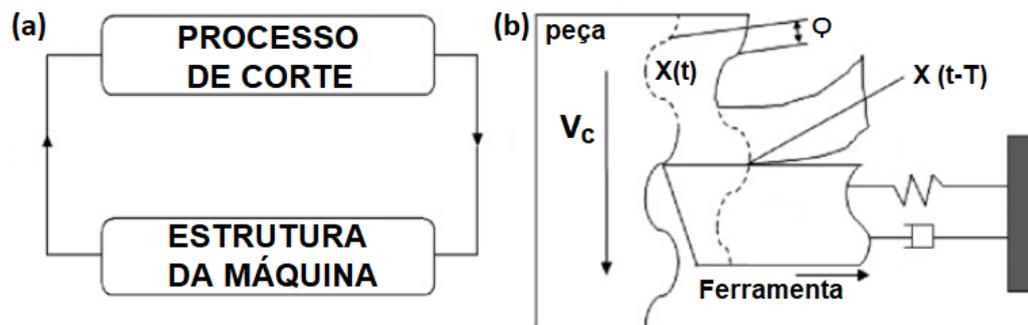
Durante um processo de usinagem existem três diferentes tipos de vibrações mecânicas. As duas primeiras são conhecidas como vibrações livres, que possuem origem no choque entre componentes, e as vibrações forçadas, que possuem origem no desbalanceio ou folgas na montagem dos componentes do sistema de usinagem. Estes dois tipos de vibrações podem ser localizados e eliminados com facilidade. O terceiro tipo são as vibrações autoalimentadas, ou *self-excited chatter vibrations* (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012). As vibrações tipo *chatter* por sua vez são classificadas como:

- I. Fricção, entre a peça e a ferramenta de corte;
- II. Termomecânica;
- III. *Mode coupling*;
- IV. Regenerativas.

Vibrações regenerativas tipo *chatter* são as vibrações mais perigosas dentre as demais devido ao seu comportamento caótico. Estas ocorrem em uma frequência que encontra modos de vibração correspondente na estrutura da máquina de usinagem (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012).

Excitações deste modo tem origem na passagem da ferramenta de corte sobre a superfície que foi usinada na revolução anterior, e causam movimento relativo entre a estrutura da máquina e a peça. A Figura 8 mostra um movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça sendo usinada. Neste exemplo, $X(t)$ é a onda gerada durante a revolução atual e $X(t-T)$ é a onda gerada durante a revolução anterior. O atraso, ou defasagem (ϕ), entre as duas ondas é fator que governa a ocorrência de vibrações tipo *chatter* no processo de torneamento (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012).

Figura 8 - Representação esquemática da vibração tipo *chatter*, (a) interação do processo de corte e estrutura da máquina e (b) mecanismo de regeneração ondulatória da superfície usinada.

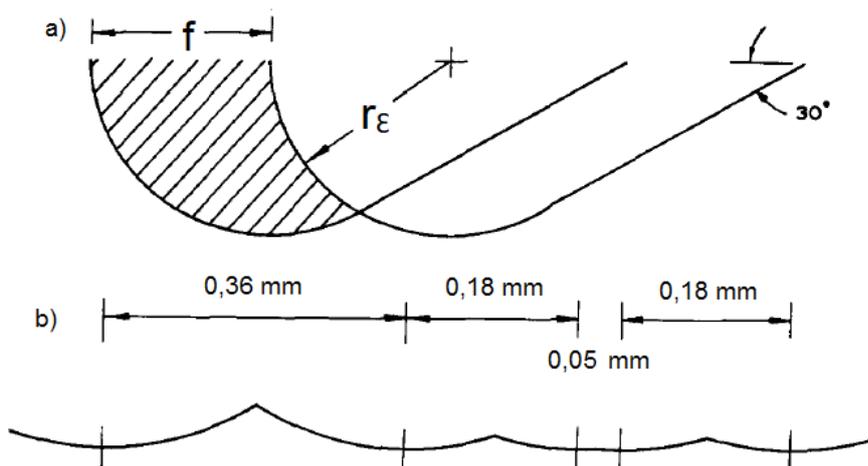


Fonte: Adaptado de Siddhpura e Paurobally (2012).

A perda da qualidade da superfície usinada causada pelas vibrações do tipo *chatter* durante o processo de torneamento foram investigadas por Skelton (1969), dentre seus experimentos se destaca a descrição da influência de vibrações aleatórias, caóticas, na direção axial (direção do avanço) e sua influência sobre a superfície usinada, conforme Figura 9.

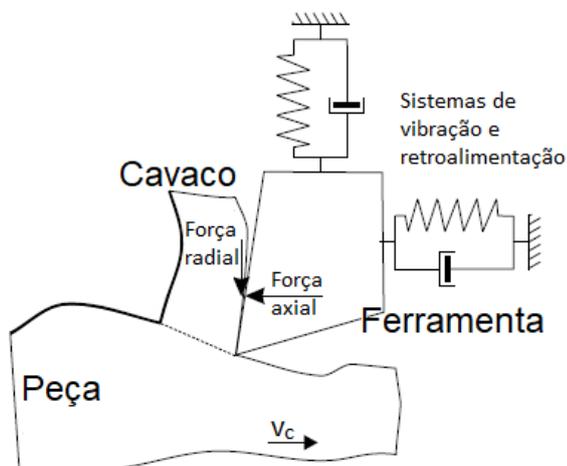
Vibrações do tipo *mode coupling* tem origem em uma retroalimentação, onde um aumento do esforço na direção axial (do avanço) ocasiona um aumento de esforço na direção radial (da velocidade de corte) que por sua vez resulta em outra variação de esforços na direção axial. Este sistema gera oscilações nos esforços da usinagem e vibração excessiva do sistema e pode resultar em superfícies usinadas como mostrado na Figura 10 (WIERCIGROCH e BUDAK, 2001).

Figura 9 - Influência de (a) uma ferramenta de corte com raio de quina conhecido (b) e a superfície usinada na presença de vibrações no sentido axial.



Fonte: Adaptado de Skelton (1969).

Figura 10 - Modelo com dois graus de liberdade para estudo de vibrações tipo *mode coupling*.



Fonte: Adaptado de Wiercigroch e Budak (2001).

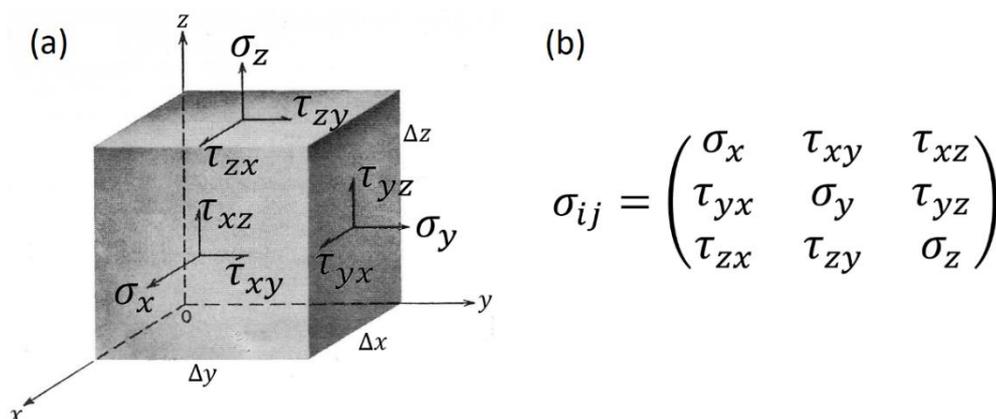
2.4 DEFINIÇÕES DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Em engenharia o estado de tensão mecânica em um ponto, para um material qualquer, e em referência com um sistema de coordenadas é representado por um tensor de segunda ordem (σ_{ij}), no qual os elementos da diagonal representam as tensões normais, na direção dos eixos escolhidos, e os demais elementos do tensor representam tensões cisalhantes (DIETER, 1981).

Em geral é conveniente representar as tensões atuando perpendicularmente as faces do cubo elementar pelo subíndice que identifica a direção na qual a tensão atua, ou seja a tensão normal σ_x atua na direção x . Já para as tensões cisalhantes são necessários dois índices, o primeiro indica a normal do plano em que a tensão atua e o segundo a direção, por exemplo a tensão cisalhante τ_{yz} atua no plano perpendicular ao eixo y e na direção de z , conforme Figura 11 (DIETER, 1981).

O tensor de tensões (σ_{ij}) é simétrico e pode ser diagonalizado, ou seja, para qualquer ponto é possível escolher um sistema de eixos específicos e que nesta situação apenas os elementos da diagonal serão diferentes de zero. Isto é, um sistema de eixos nos quais existem apenas tensões normais e nenhuma tensão cisalhante. Neste caso específico chamamos este sistema de eixos de eixos principais do tensor, e as tensões de tensões principais do tensor.

Figura 11 - Nomenclatura e sistema de referência convencionada para as (a) tensões atuantes em um cubo unitário elementar (b) e tensor de tensões.



Fonte: Adaptado de Dieter (1981).

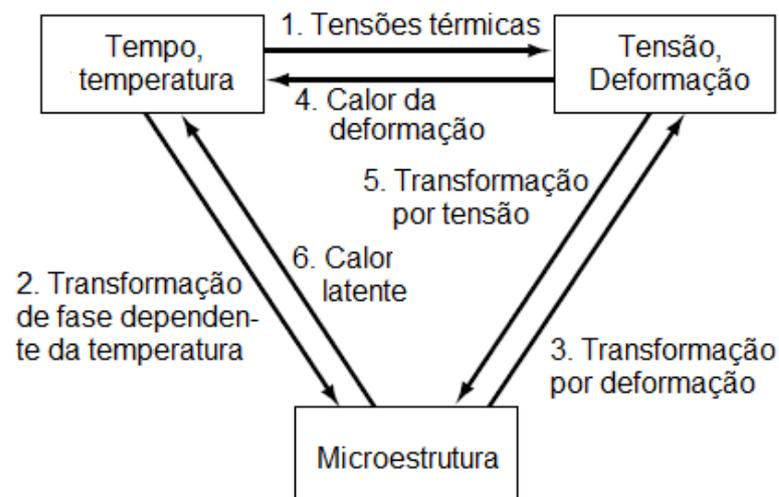
Em qualquer amostra de referência o estado de deformações de um pequeno elemento de volume é definido por um tensor de segunda ordem, ϵ_{ij} . Os elementos da diagonal representam as deformações ao longo dos eixos escolhidos e os demais elementos representam deformações cisalhantes entre os eixos. O tensor de deformações é simétrico e se aplicam as mesmas regras observadas para o tensor de tensões (DIETER, 1981). Na prática, não é a tensão que obtém-se pela medição de difração. Sendo impreciso falar de medição de tensões, pois é necessário correlacionar a medição de deformação em tensão. (LODINI, 2003).

2.5 TENSÕES RESIDUAIS

Mura (1987) definiu tensões residuais como tensões em equilíbrio, existentes no material, quando este não é submetido a nenhuma força externa ou restrição de sua superfície e mantido a uma temperatura constante.

Segundo Bhadeshia (2002), as tensões residuais são consequências de interações, ao longo do tempo, de três importantes pilares da metalurgia: temperatura, deformação e microestrutura (Figura 12). Dentre as características dos materiais que influenciam o desenvolvimento de tensões residuais se encontram a condutividade térmica, capacidade térmica, expansão térmica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica e cinemática das transformações, mecanismos das transformações e transformação plástica (BHADESHIA 2002). Similarmente, a origem das tensões residuais foi definida por Lodini (2003) como a ocorrência de deformações heterogêneas ou incompatibilidades locais. Estas podem ter sido geradas por uma ou mais das três origens físicas fundamentais: variações de volume (não relacionadas a temperatura), expansão térmica e movimentação de matéria. A relaxação incompleta de deformações elásticas associadas com estes fenômenos resulta em tensões residuais. (LODINI, 2003)

Figura 12 - Interações entre temperatura, tensões e microestrutura que resultam no desenvolvimento de tensões residuais.



Fonte: Adaptado de Bhadeshia (2002).

Na Tabela 2 foi relacionado como as diferentes técnicas de manufatura aplicadas aos materiais metálicos pode influenciar a condição final, ou intermediária, do estado de tensões residuais de um produto. A fabricação de um produto qualquer, na atividade industrial, comumente emprega uma ou mais das técnicas listadas na Tabela 2. Esta sucessão de etapas produtivas da origem a um estado de tensões residuais complexo. Desta maneira o primeiro passo para calcular as tensões residuais de um componente é identificar a origem destas tensões residuais (LU, 2002).

Tabela 2 - Principais origens das tensões residuais em função de cada processo de manufatura.

Fundição	Mecânica: Não Térmica: Gradientes de temperatura durante resfriamento Estrutural: Transformação de fase
Laminação, forjamento, dobramento, extrusão, endireitamento, brunimento por rolos, <i>chasing</i> , <i>Shot and hammer peening</i>	Mecânica: Deformação plástica heterogenia entre a superfície e o centro do material Térmica: Não Estrutural: Sim, a depender do material
Retificação, furação, torneamento, fresamento.	Mecânica: Deformação plástica na remoção do cavaco Térmica: Gradientes de temperatura durante a usinagem Estrutural: Transformação de fase durante usinagem, caso a temperatura seja suficientemente elevada para o material
Tempera (Indução, por feixe de elétrons, Laser, plasma e outros métodos convencionais)	Mecânica: Não Térmica: Gradientes de temperatura Estrutural: Transformação de fase durante tempera, caso a temperatura seja suficientemente elevada para o material
Cementação, nitretação	Mecânica: Não Térmica: Incompatibilidades térmicas Estrutural: Adição de um novo componente químico, com modificação de volume
Soldagem	Mecânica: Retração térmica Térmica: Gradientes de temperatura Estrutural: Alteração da microestrutura na zona termicamente afetada

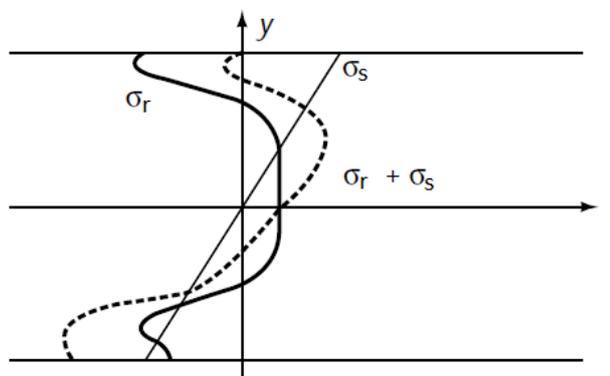
Fonte: Adaptado de Lu (2002).

O desenvolvimento de um projeto seguro deve contemplar não apenas a análise das tensões residuais existentes nos materiais, componentes ou elementos estruturais, mas também a ponderação das modificações do campo de tensões durante toda etapa produtiva do componente, bem como e a caracterização do campo de tensões no produto final (KUDRYAVTSEV, 2008). Isto pois, as tensões residuais

possuem significativa influência sobre o desempenho em fadiga e falhas, resistência a corrosão e estabilidade dimensional e outros (LU, 2002).

Na prática, é preciso considerar que a tensão de serviço, a qual um dado componente foi projetado, será influenciada pelo perfil de tensões residuais existente neste mesmo componente. É possível que para uma dada solicitação as tensões de serviço e tensões residuais se subtraíam, o que resultaria em um projeto mais seguro. Porém também é possível que ambas as tensões se somem, tornando a tensão resultante maior e colocando em dúvidas a segurança do o projeto (LU, 2002). Estas situações podem ocorrer simultaneamente em um mesmo componente, conforme Figura 13.

Figura 13 - Superposição do perfil de tensões residuais (σ_r) com a tensão de serviço (σ_s).



Fonte: Adaptado de LU (2002).

Na ciência da engenharia, a análise de tensão e/ou deformação é normalmente realizada através da escolha de um sistema de referência cartesiano (o, x, y, z). Porém as definições adotadas não são suficientes para descrever a origem de um campo de tensões no material. Pois para tal é necessário separar claramente macrotensões e macrodeformações de microtensões e microdeformações. (LODINI, 2003).

Foi proposto por Macherach E Kloss (1986) uma classificação das tensões residuais em três tipos de acordo com a ordem de grandeza, ou escala, em que elas são observadas e no qual é atingido o seu equilíbrio.

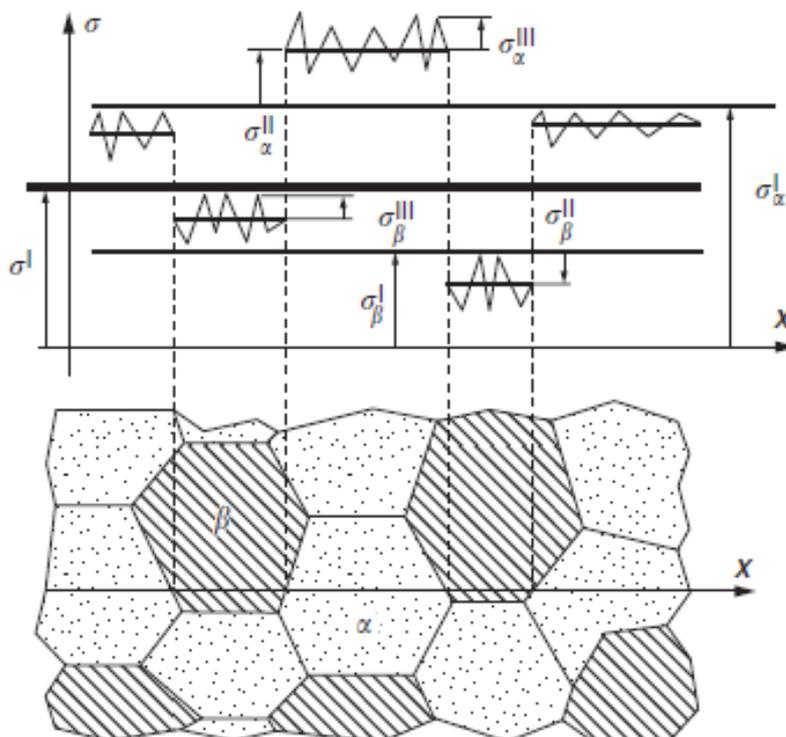
1. Tensões residuais de primeira ordem, ou **tipo I**, são homogêneas ao longo de um grande número de domínios cristalinos, ou diversos grãos. As forças

internas relacionadas com estas tensões são iguais a zero em torno de todos os eixos. Geralmente também são chamadas de macrotensões, e representadas por: $(\sigma_I r)$

2. Tensões residuais de segunda ordem, ou **tipo II**, são homogêneas em um pequeno domínio cristalino, um único grão ou fase. As forças internas relacionadas com estas tensões se equilibram entre diferentes grãos ou fases.
3. Tensões residuais de terceira ordem, ou **tipo III**, são homogêneas em domínio cristalino muito pequeno, ao longo de poucas distâncias entre átomos ou parâmetros de rede. As forças internas relativas a estas tensões se encontram em equilíbrio em domínios muito pequenos, tais como defeitos pontuais ou discordâncias. As tensões residuais do tipo II e III são chamadas de microtensões, e são representadas por: $\sigma_{II} r$ e $\sigma_{III} r$.

No caso de materiais reais, a tensão residual resultante em um ponto é uma soma das tensões residuais dos tipos I, II e III conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Comparativo entre os tipos ou ordem das tensões residuais. Na figura os termos σ_α σ_β informam a fase na qual está presente a tensão residual, e os índices σ_I , σ_{II} , σ_{III} identificam qual o tipo da tensão residual em função da sua ordem.



Fonte: Adaptado de LODINI (2003).

2.6 DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais não podem ser medidas diretamente, mas sim é necessário medir alguma grandeza física a qual as tensões residuais estão relacionadas. (EKMEKÇI *et al*, 2004). As técnicas existentes para medição de tensões residuais se diferenciam em função de sua natureza destrutiva ou não-destrutiva, porém para análises de tensões residuais em camadas profundas mesmo as técnicas ditas como não-destrutivas requerem a destruição parcial da amostra.

Foi proposto por Lu (1996) uma distinção entre as técnicas a respeito da forma direta ou indireta de se realizar a medição das tensões residuais. As técnicas de medição direta analisam relações físicas, ou parâmetros cristalográfico, de um material e sua influência sobre as tensões residuais, dentre as técnicas diretas se destacam: a difração de raios-X ou de nêutrons, ultrassom e métodos magnéticos. Já as técnicas de medição indiretas se baseiam em medir a deformação do componente durante a remoção controlada de material, uma vez que esta remoção de material resulta no relaxamento e rearranjo das tensões residuais do componente. Dentre as técnicas indiretas se destacam o método do furo cego, núcleo toroidal, remoção de camadas ou de seções.

Segundo Dias (2013) na medição de tensões residuais não existe uma técnica ideal que seja capaz de oferecer os melhores resultados para uma aplicação qualquer. Por esta razão para escolher a técnica a ser aplicada é preciso levar em consideração uma série de parâmetros, entre os quais se destacam:

- Natureza do componente;
- Tipo das tensões residuais presentes;
- Gradiente das tensões residuais;
- Local de medição, campo ou laboratório;
- Possibilidade de Intervenção destrutiva ou não-destrutiva;
- Tempo disponível entre medição e apresentação dos resultados;
- Precisão e repetibilidade do método;
- Custo final da medida.

Os métodos de medição de tensões residuais por difração são amplamente difundidos pois são não destrutivos, precisos e capazes de medir tensões na superfície e/ou no interior do material. E ainda, com estes métodos é possível realizar o mapeamento completo (tridimensional) do tensor de tensões (WINHOLTZ, 2003).

Os raios-X possuem uma penetração muito pequena quando aplicados na análise de tensões residuais por difração, em geral apenas algumas dezenas de micrometros. Esta limitação pode ser utilizada como uma vantagem quando aplicamos o método do $\sin^2 \Psi$. Pois, para pequenas profundidades de análise é possível assumir um estado plano de tensão, neste caso os elementos σ_{3i} e σ_{i3} do tensor assumem valor zero. Desta forma o número de medidas necessárias para se caracterizar o campo de tensões na superfície de um componente fica significativamente reduzido. (WITHERS e BHADSHIA, 2001)

2.6.1 A técnica de difração de raios-X

A medição de deformação por difração de raios-X tem-se mostrado muito versátil no desenvolvimento de pesquisas básicas e aplicadas (MACHERAUCH, 1966). No campo da tecnologia de materiais, a análise de tensões residuais por difração de raios-X representa um método interessante para determinação de carga e/ou tensões residuais imediatamente na superfície, e regiões próximas a superfície, de materiais metálicos (MACHERAUCH e WOLFSTIEG, 1977).

Esta técnica explora o princípio de que a distância entre os planos cristalográficos de um material qualquer é definida pelas suas características físicas. Assim, quando este material é irradiado por raios-X monocromáticos, as características da radiação difratada (picos no difratograma) representam as propriedades do material, incluindo as tensões residuais (NUNES, 2012).

A difração de raios-X pode ser utilizada para medir com precisão o espaçamento entre uma rede utilizando a lei de *Bragg*, Equação 2.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

Onde:

λ [μm]: comprimento de onda da radiação utilizada;

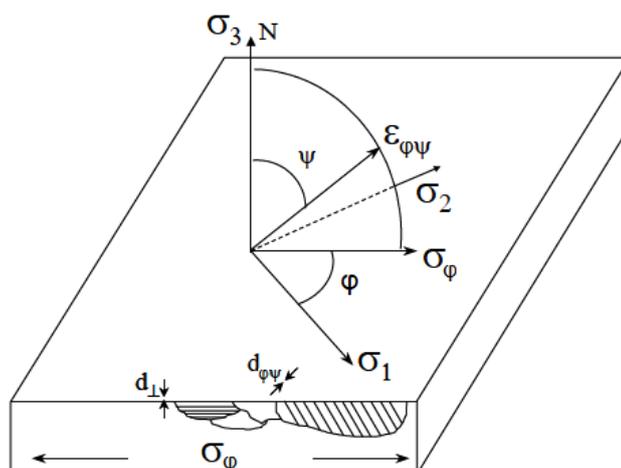
θ [$^\circ$]: metade do ângulo da radiação difratada;

d [Å]: média das distâncias interplanares do retículo cristalino do material que resultou na difração da radiação.

As distâncias interplanares livres de deformações produzem um padrão de difração característico para cada material. Já quando um material se encontra deformado elasticamente, contrações ou elongações são produzidas na rede cristalina, com respectivas alterações nas distâncias interplanares de um dado plano $\{hkl\}$ qualquer (FITZPATRICK *et al*, 2005).

Para realizar a medição de deformações a amostra precisa ser posicionada em um difratometro de raios-X e exposta a um feixe de raios-X monocromáticos. Durante esta exposição é realizada uma varredura, em forma de arco ao redor da amostra, localizando os picos de difração. Através do giro da amostra dentro do difratometro é possível realizar medições de planos com ângulo ψ e com o Φ , e as deformações nessas direções pode ser calculada ($\epsilon_{\psi\phi}$), Figura 15.

Figura 15 - Representação esquemática entre os planos de difração paralelos a superfície (d_{\perp}) e planos com um ângulo $\phi\psi$ em relação a superfície ($d_{\phi\psi}$). As tensões σ_1 , σ_2 e σ_ϕ se encontram no plano da superfície da amostra.



Fonte: Adaptado de Fitzpatrick *et al* (2005).

Através da manipulação orientação da amostra é possível colocar outros planos cristalinos em uma situação que satisfaça a lei de Bragg e assim medir as suas deformações. O estado de deformações em ponto do material é um tensor de segunda ordem e possui em suas componentes deformações normais e cisalhantes. Uma vez que para um material tensionado o espaçamento entre a rede cristalográfica pode ser utilizado como um medidor de deformação (*strain gauge*). Utilizando um sistema de coordenadas adequado é possível determinar o estado de deformação deste material (WINHOLTZ, 2003).

2.6.2 Método do $\text{sen}^2 \psi$

O método do $\text{sen}^2 \psi$ é o método tradicional para medição de tensões com difração de raios-X (MACHERAUCH e WOLFSTIEG, 1977; HAUKE, 1997). Existe muita experiência na interpretação das análises de tensões por este método e, a maioria dos comportamentos anômalos existentes já foram estudados e interpretados. Este método tem suas origens nas soluções gráficas, porém nos dias de hoje se difundiu também nas análises por computador se tornando muito útil na visualização e interpretação dos dados. (WINHOLTZ, 2003).

Segundo FITZPATRICK *et al* (2005) o mecanismo mais comum para determinar tensões residuais em qualquer direção, pelo método do $\text{sen}^2 \psi$, deve se realizar de pelo menos duas medições na superfície da amostra e na direção da tensão que se deseja medir, e utilizando a Equação 3:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu) \text{sen}^2 \psi} \left(\frac{d_{\psi} - d_n}{d_n} \right) \quad (3)$$

Onde:

σ_{φ} [μm]: Tensão em determinada direção com o ângulo φ ;

E [GPa]: Modulo de elasticidade;

ν : Coeficiente de Poisson;

ψ [$^{\circ}$]: Angulo entre a direção normal da amostra e a normal do plano de difração;

d_{ψ} [\AA]: Distância interplanar entre planos com um angulo ψ com a superfície;

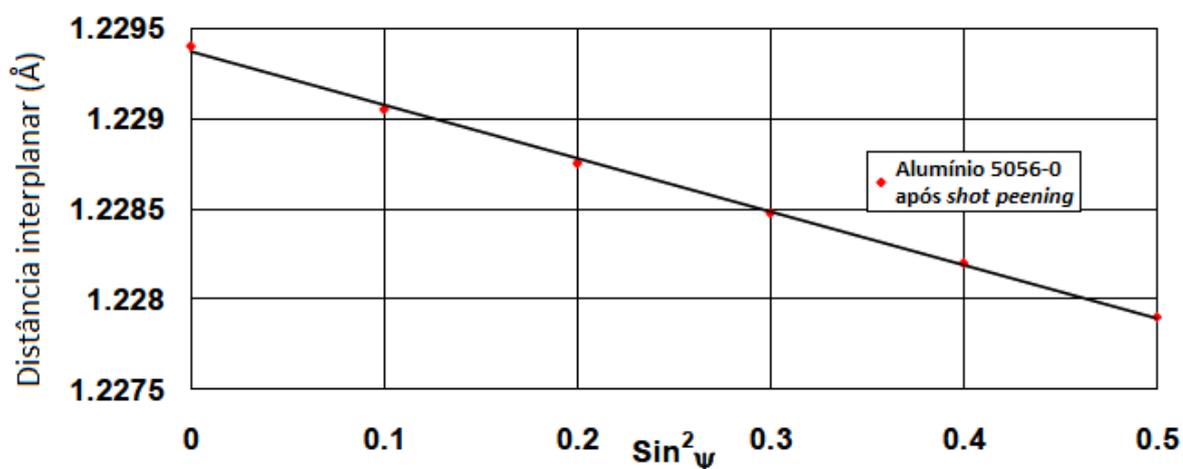
d_n [\AA]: Distância interplanar entre planos normais a superfície;

Uma vez realizado um número suficiente de medições de difração de raios-X pode-se criar o gráfico de distância interplanar, ou posição 2θ do pico de difração, no eixo vertical e o $\sin^2 \psi$ no eixo horizontal, conforme Figura 16.

E desta forma a tensão pode ser calculada a partir da inclinação do gráfico (m) e com conhecimentos básicos das propriedades elásticas do material, com auxílio da Equação 4:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)} m \quad (4)$$

Figura 16 - Dependência linear da distância interplanar, d (311), com $\sin^2 \psi$ de uma amostra de alumínio 5056 após tratamento superficial de *shot peening*.



Fonte: Adaptado de Fitzpatrick *et al* (2005).

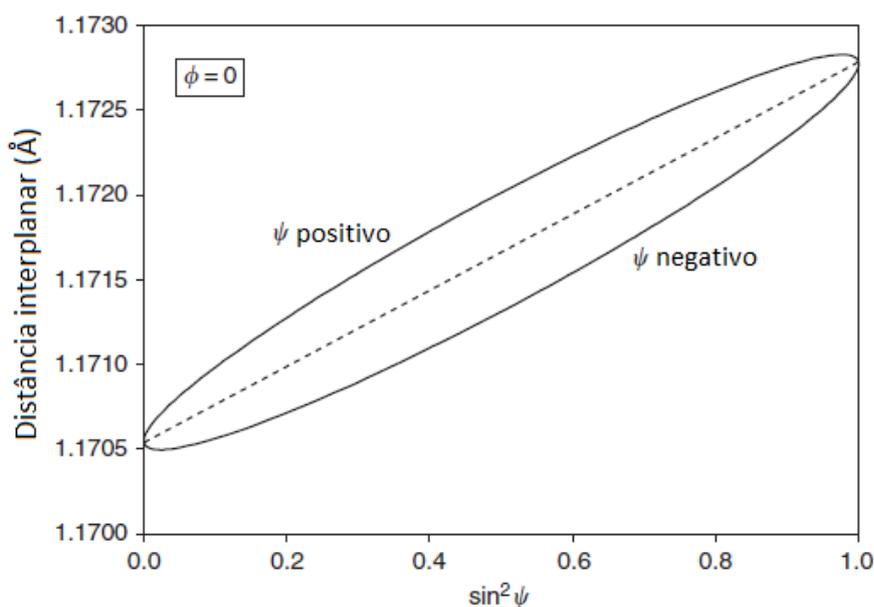
Este mecanismo é suficiente para determinar tensões residuais por difração de raios-X para maioria dos casos. Em situações não ideais nas quais existem tensões residuais σ_{i3} ou σ_{3i} diferentes de zero presentes no material, ou tensões residuais heterogêneas no material, pode ser necessário aplicar soluções mais complexas.

2.6.3 Separação da curva $\sin^2 \psi$

É possível que estejam presentes no volume de difração tensões cisalhantes σ_{23} ou σ_{13} . Estes dois componentes do tensor de tensões possuem influência sobre distâncias interplanares d não lineares com $\sin^2 \psi$. Por esta razão, para medições com ϕ constante, a curva $\sin^2 \psi$ possuirá valores com desvios opostos, porém de mesma magnitude. Desta maneira a distância interplanar d irá mostrar dois braços, um para valores positivos de ψ e outro para valores negativos de ψ , Figura 17 (WINHOLTZ, 2003).

O valor correto da tensão residual normal que está sendo medido pode ser calculado a partir da linha central da elipse, ou a média entre os valores positivos e negativos dos braços do ψ . Esta técnica funciona pois, ao se realizar a média é removida a contribuição das tensões cisalhantes (σ_{13} ou σ_{23}) e uma vez que elas possuem contribuições contrárias para valores positivos e negativos de ψ (WINHOLTZ, 2003).

Figura 17 - Demonstração da separação da curva $\sin^2 \psi$ e distância interplanar d .



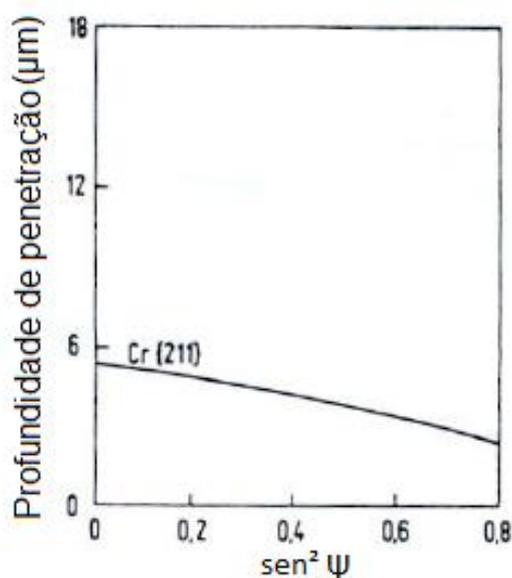
Fonte: Adaptador de Winholtz (2003).

Ao se analisar o desvio a partir da linha de centro da elipse é removido o efeito da tensão normal, e torna possível calcular a tensão cisalhante (σ_{i3} , por exemplo) pois esta é proporcional à altura da elipse. Este método de análise dos dados é conhecido como o método de *Dölle-Hauk* (WINHOLTZ, 2003; DOLLE, 1979).

2.6.4 Profundidade de penetração

A intensidade do feixe incidente de raios-X é significativamente reduzida a curtas distâncias abaixo da superfície, isto pois a maioria dos componentes metálicos absorve raios-X. A determinação da profundidade efetiva de penetração dos raios-X e qual fração desta profundidade realmente produz raios difratados para análise das tensões residuais é uma função do coeficiente de absorção do material para a radiação em questão e dimensões do feixe sobre a superfície da amostra (FITZPATRICK *et al*, 2005). A Figura 18 mostra a dependência da penetração em função do $\text{sen}^2 \psi$ para materiais comumente utilizados para medições de tensões residuais.

Figura 18 - Profundidade do material que ocorre a penetração dos raios-X que contribuem efetivamente para a análise de tensões residuais por difração de raios-X em função de $\text{sen}^2 \psi$.



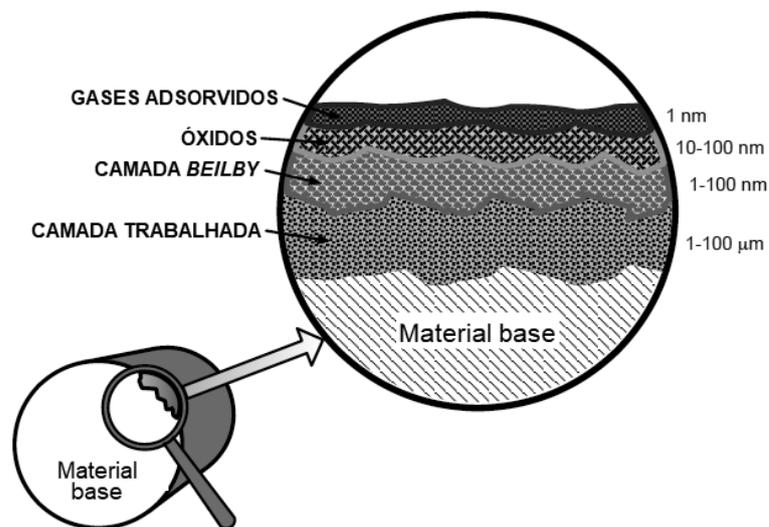
Fonte: Adaptado de Fitzpatrick *et al* (2005).

Não existe uma resposta direta para a penetração efetiva, porém pode ser observado que a intensidade decresce exponencialmente com a profundidade do material. A atenuação, perda de intensidade do feixe de raios-X, é proporcional à distância percorrida pelo feixe dentro do material, sendo assim a contribuição de raios-X difratados em planos inferiores será reduzida. E ainda, após ocorrer a difração do feixe, esta radiação precisa percorrer o caminho de retorno pelo interior do material, sofrendo ainda mais atenuação (FITZPATRICK *et al*, 2005).

2.7 INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

Superfície pode ser definida como a fronteira entre o corpo manufaturado e seu ambiente. O termo integridade da superfície descreve o estado e atributos desta superfície (possivelmente usinada) a sua relação com o desempenho em serviço do corpo. De uma maneira geral, integridade da superfície pode ser dividida em dois tópicos: o primeiro que aborda a topografia externa da superfície (acabamento) e o segundo que aborda a microestrutura, propriedades mecânicas e tensões residuais da região imediatamente abaixo da superfície (DAVIM, 2010). A Figura 19 mostra uma representação esquemática da superfície real de sólidos metálicos.

Figura 19 - Representação esquemática da superfície real de um sólido metálico.

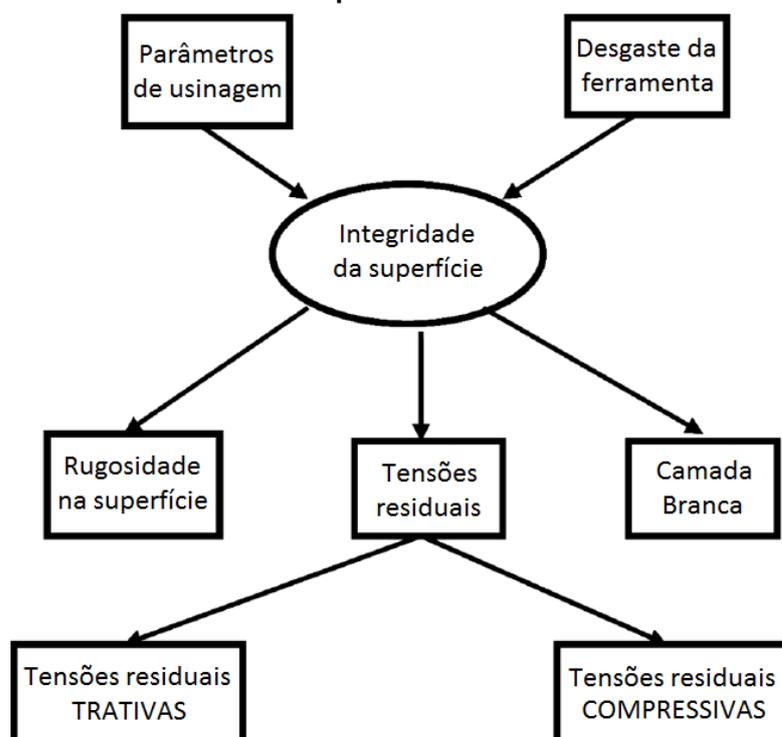


Fonte: Adaptado de Astakhov (2010)

A integridade da superfície também é definida como o estado topográfico, mecânico, químico e metalúrgico que a superfície se encontra e sua relação com o desempenho em serviço. Dentre os parâmetros de desempenho que são geralmente sensíveis a integridade da superfície se destacam: a resistência a fadiga, resistência mecânica, taxa de corrosão, comportamento tribológico (atrito, desgaste e lubrificação) e precisão dimensional (GRIFFITHS, 2001).

O controle da integridade de uma superfície se torna de fundamental importância no processo produtivo, uma vez que efeitos do processo como parâmetros de usinagem de desgaste das ferramentas afetam consideravelmente o estado da superfície e conseqüentemente o desempenho do produto. Dentre as propriedades de engenharia essenciais que podem ser analisadas, se destacam a rugosidade na superfície, tensões residuais e camada branca, Figura 20 (SAINI *et al*, 2012).

Figura 20 - Principais aspectos que influenciam a integridade de uma superfície e parâmetros de engenharia a serem analisados em um processo de manufatura.



Fonte: Adaptado de Saini *et al* (2012).

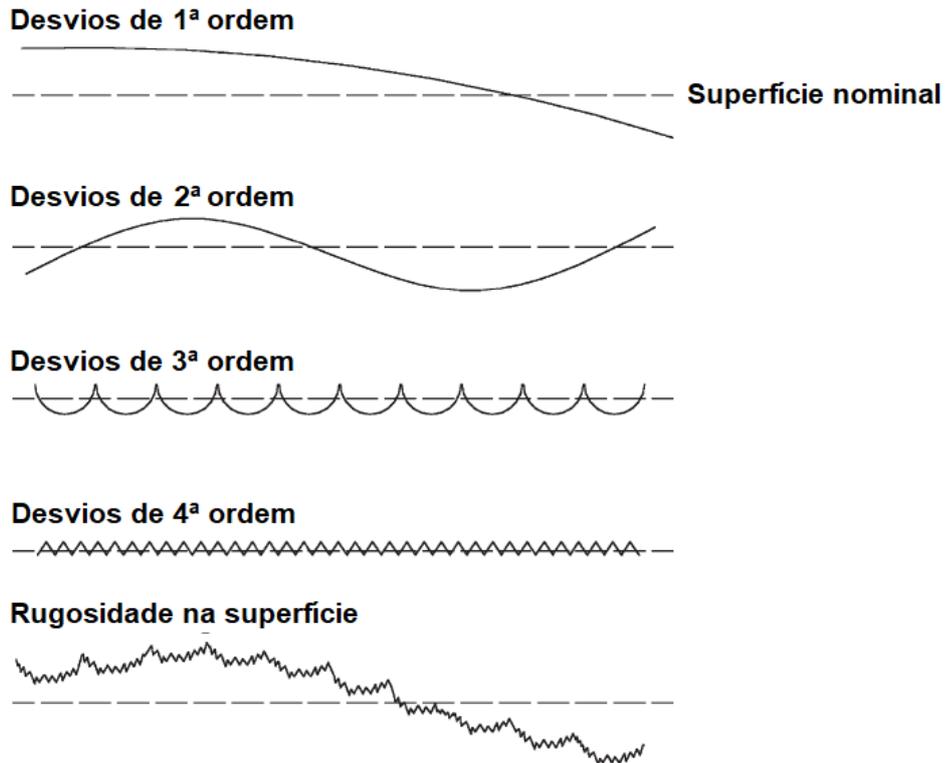
2.7.1 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, por exemplo marcas de avanço, gume postiço, desgaste da ferramenta entre outros (MACHADO *et al*, 2009). Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como principal parâmetro de saída para controlar o processo de usinagem sendo um requisito técnico de muitos produtos mecânicos. A obtenção do acabamento superficial desejado é de grande importância para o funcionamento em serviço de um componente. (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003).

A rugosidade de uma superfície retrata os desvios desta superfície de sua forma nominal. Os desvios que podem ser considerados para análise da rugosidade são padronizados por normas internacionais (DIN4760, 1982), e vão desde a ordem três até ordem seis. A primeira e a segunda ordem dos desvios se referem quanto à forma, respectivamente, planicidade ou circularidade e ondulação, e quanto aos erros de usinagem a deformação da peça sendo usinada, montagem e fixação incorreta, vibração e heterogeneidade da peça. Os desvios de terceira e quarta ordem se referem a reentrâncias periódicas, trintas e arrancamentos que estão relacionados com a forma e condição do gume de corte, formação do cavaco e cinemática do processo de usinagem. Desvios de quinta e sexta ordem se referem a estrutura do material, quanto a mecanismos físicos e químicos de interação entre grãos e até mesmo o retículo cristalino, tais como: escorregamento, difusão, oxidação e tensões residuais (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003). As diferentes ordens dos desvios e sua superposição para formação do perfil de rugosidade de uma superfície são mostrados na Figura 21.

Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macrogeométricos. Esta separação é realizada através da filtragem. Geralmente os rugosímetros utilizam filtros que deixam passar os sinais de alta frequência e eliminam os sinais de baixa frequência, para efetuar esta separação é utilizado um valor pré-determinado de frequência, este valor é chamado de frequência de *cut-off*. Estes filtros são denominados filtro passa-alta.

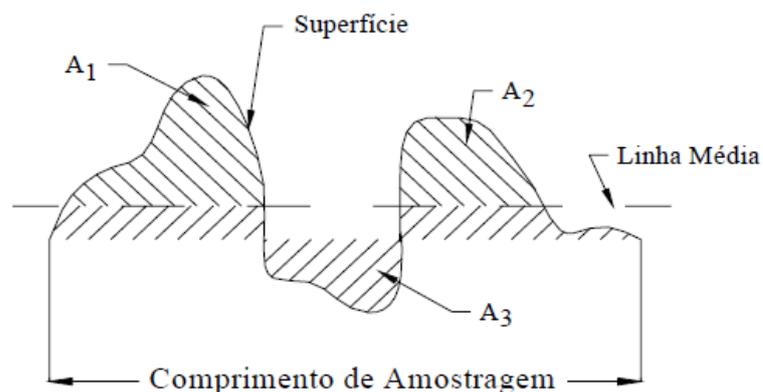
Figura 21 - Desvios na rugosidade de uma superfície.



Fonte: Adaptado de Benardos e Vosniakos (2003).

Dentro os sistemas de medição de rugosidade, o método da linha média é o mais utilizado. Neste método todas as grandezas são definidas a partir de uma linha de referência, a linha média. Esta linha é disposta paralelamente à direção geral de medição e representa uma igualdade entre a soma das áreas superiores (A_1 e A_2) e inferiores a linha (A_3), Figura 22.

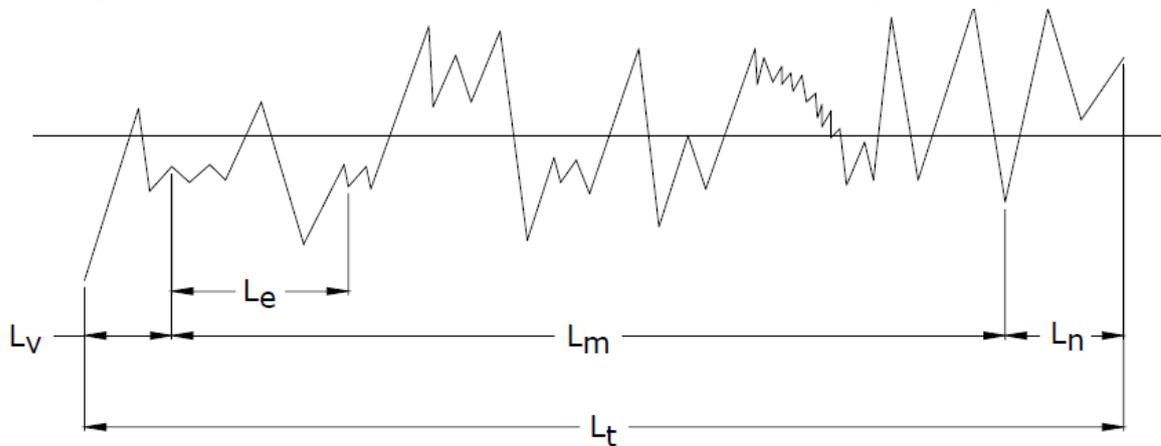
Figura 22 - Representação esquemática da definição de linha média.



Fonte: Adaptado de Machado (2009).

Durante a medição o rugosímetro apalpa a superfície a ser medida e registra o percurso de medição, a Figura 23 mostra algumas das principais definições do percurso de medição.

Figura 23 - Conceitos de percurso durante o processo de medição de rugosidade.

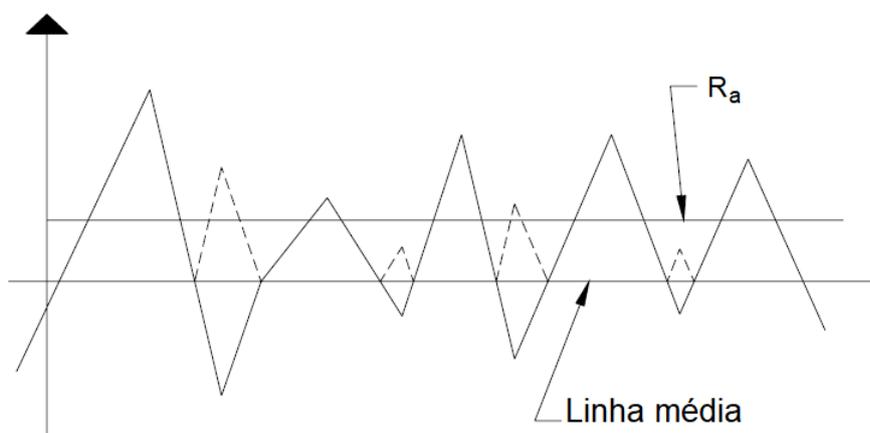


Fonte: Adaptado de Machado (2009).

- **Percurso inicial (L_v):** É a extensão da primeira parte do primeiro trecho, projetado sobre a linha média. Ele não é utilizado na avaliação da rugosidade. Este trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição e a centralização do perfil de rugosidade.
- **Percurso de medição (L_m):** É a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média.
- **Percurso final (L_n):** É a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média e não utilizado na avaliação. Finalidade similar ao percurso inicial.
- **Percurso de apalpamento (L_t):** É o percurso total apalpado pelo sistema de medição, ou seja, é a soma dos percursos inicial, de medição e final.
- **Comprimento de amostragem (L_e):** É igual a um quinto do percurso de medição. O comprimento de amostragem deve ser o suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos de rugosidade.

A rugosidade média, R_a , corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição L_m . R_a é um valor médio, podendo as vezes, não dar indicação direta do estado da superfície, Figura 24.

Figura 24 – Representação gráfica do parâmetro R_a sobre perfil de rugosidade, ilustrando a indiferença deste parâmetro quanto aos vales que se encontram abaixo da linha média.

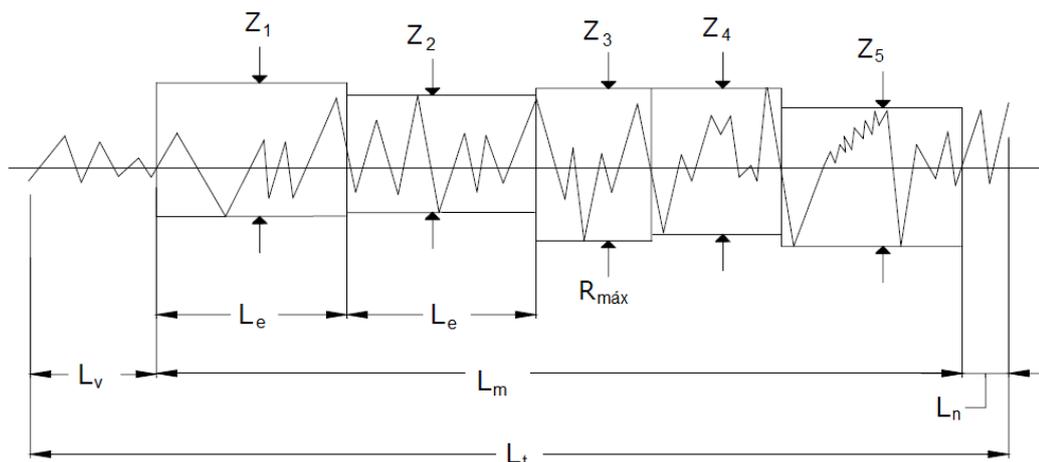


Fonte: Adaptado de Machado (2009).

Em determinadas aplicações específicas pode ser mais útil utilizar outros parâmetros de rugosidade (CHILDS *et al*, 2000). A rugosidade média, R_z , é média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial, Z_i . A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem L_e . Graficamente, este valor representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem L_e , Figura 25.

Outro parâmetro utilizado para avaliação da rugosidade de um equipamento é o $R_{máx}$ este parâmetro informa a distância entre o maior pico e o maior vale dentro do percurso de medição, Figura 25. Este parâmetro é muito utilizado para avaliação de áreas de vedação (MACHADO, 2009).

Figura 25 – Representação gráfica do parâmetro R_z sobre perfil de rugosidade.



Fonte: Adaptado de Machado (2009).

Os parâmetros de rugosidade, R_a e $R_{máx}$, podem ter seus valores teóricos calculados. Embora esses valores sejam apenas indicativos pois em condições reais estes valores estarão acrescidos de diversos fatores. Para o processo de torneamento, quando opera-se com um avanço menor que o raio de ponta, a rugosidade teórica (R_t) pode ser calculada pela Equação 5 e ilustrado na Figura 26 (STOETERAU, 2007; MACHADO, 2009; CAVALER, 2017).

$$R_t = \frac{f^2}{(8r_\epsilon)} \cdot 1000 \quad (5)$$

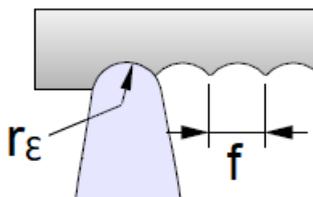
Onde:

R_t [μm]: Rugosidade teórica

f [mm/rev]: Avanço

r_ϵ [mm]: Raio de ponta

Figura 26 – Representação esquemática da rugosidade teórica (R_t) do processo de torneamento para uma operação com o avanço menor que o raio de ponta.



Fonte: Adaptado de Cavaler (2017), Stoeterau (2007) e Machado (2009).

2.7.2 Tensões residuais no torneamento

De forma geral as tensões residuais para um aço qualquer que será submetido a um processo de torneamento pode ser expressa pelos componentes apresentados na Equação 6, na qual o termo w relaciona as características dos materiais e o termo p contém os parâmetros de torneamento de maior relevância (CAPELLO, 2006). A representação esquemática da relação destes termos e seus componentes foram ilustrados na Figura 27.

$$\sigma_r = \sigma_r(w, p) \quad (6)$$

Onde:

σ_r [MPa]: Tensão residual

w : Termo que representa as características dos materiais

p : Termo que representa os parâmetros de torneamento de maior relevância

Dentre estes fatores de usinagem inclusos no termo p se destacam o avanço, o raio de quina e a velocidade de corte pela sua grande influência no perfil das tensões residuais (CAPELLO, 2005; CAPELLO, 2006; GUNNBERG *et al*, 2006; NAVAS *et al*, 2012; CABRERA *et al*, 2015). O ângulo de saída também se destaca por ser capaz de contribuir para geração de tensões residuais negativas de maior intensidade e em alguns casos produz um perfil de tensões residuais com maior profundidade (DAHLMAN *et al*, 2004; GUNNBERG *et al*, 2006; JAWAHIR *et al*, 2011). O parâmetro de usinagem profundidade de corte (a_p) possui pouca influência nas tensões residuais (CAPELLO, 2005). O parâmetro ângulo de entrada (K_r) também possui influência relativamente menor que os demais, sendo que seu impacto pode ser reduzido quando K_r assume valores próximo a 90° (CAPELLO, 2006). Desta forma o termo p pode ser representado pela Equação 7.

$$p = p(v_c, f, r_E, \lambda) \quad (7)$$

Já o termo w , que representa as propriedades mecânicas do material, ainda não é conhecido como a combinação de seus elementos influenciam a composição do

perfil de tensões residuais. A princípio, devido a natureza elasto-plástica das tensões residuais, todas as propriedades mecânicas normalmente utilizadas para caracterizar os aços (modulo de elasticidade, tensão de escoamento, alongação e outros) devem contribuir para a composição do termo w (CAPELLO, 2006). Resumidamente as propriedades mecânicas dos aços dependem fortemente da microestrutura, da composição química e do tratamento térmico sofrido pelo material, desta forma é possível inferir que o termo w seja representado pela Equação 8.

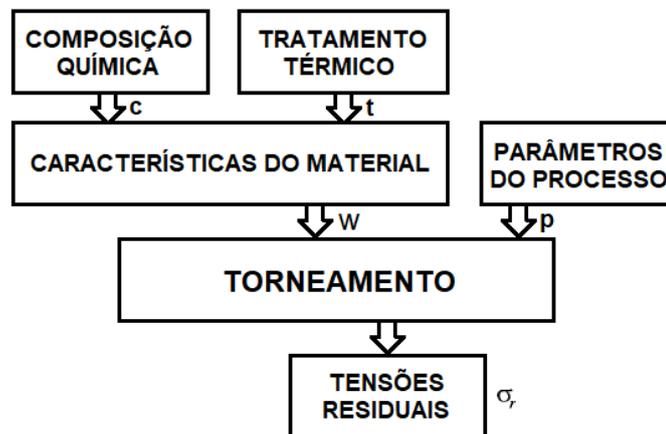
$$w = w(c, t) \quad (8)$$

Onde:

c : Termo que representa a influência da composição química;

t : Termo que representa a influência do tratamento térmico.

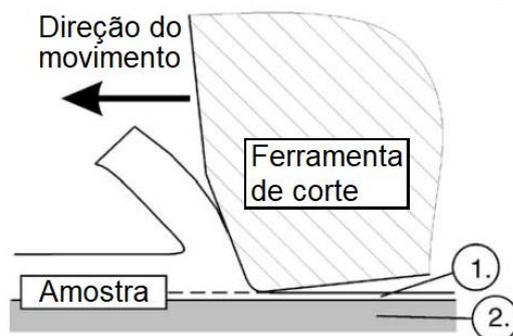
Figura 27 - Principais aspectos que influenciam as tensões residuais no torneamento.



Fonte: Adaptado de Capello (2006).

O modo como o torneamento influencia o perfil de tensões residuais pode ser explicado pela análise do movimento da ferramenta de corte deslizando sobre a amostra sendo usinada (Figura 28). Nessa abordagem se manifestam dois mecanismos responsáveis pela alteração do perfil de tensões residuais por meio da criação da superfície usinada e do novo estado de tensões na superfície (Figura 28, índice 1) e imediatamente abaixo da superfície (Figura 28, índice 2), (GUNNBERG *et al*, 2006).

Figura 28 - Geração de tensões residuais pelo torneamento.



Fonte: Adaptado de Gunnberg *et al*, (2006).

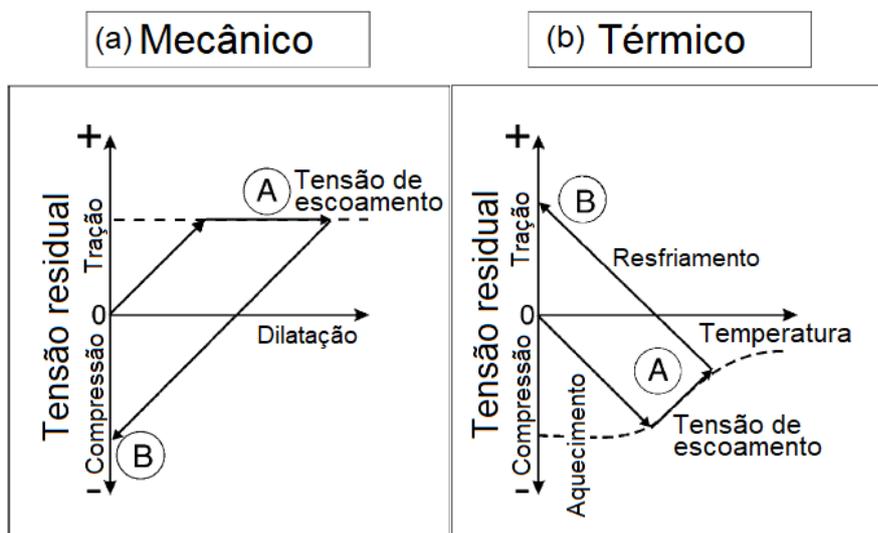
O mecanismo mecânico de criação de tensões residuais durante o corte (Figura 29a) pode ser explicado pela deformação plástica na superfície (Figura 28, índice 1) e pela deformação elástica na camada logo abaixo a superfície (Figura 28, índice 2 e Figura 29a, curva A). Com o objetivo de alcançar o equilíbrio entre as forças internas e compatibilidade geométrica após o processo de corte a dilatação elástica induz uma tensão residual compressiva na superfície (Figura 29a), curva B), (GUNNBERG *et al*, 2006).

O mecanismo térmico de geração de tensões residuais tem origem no aquecimento criado pelo processo corte. Nesse processo inicialmente ocorre a expansão da superfície e produção tensões residuais compressivas (Figura 29b, curva A) este evento é seguido do rápido resfriamento da amostra sendo usinada (Figura 29b, curva B) o qual resulta na contração da superfície (Figura 28, índice 1) que por fim produz uma tensão residual trativa (Figura 29b, curva B). O efeito térmico perde intensidade ao penetrar no corpo da amostra por isso a principal consequência deste efeito são tensões residuais trativas na superfície. A temperatura da aresta de corte pode ser utilizada como variável de controle de extrema importância para se reduzir as tensões residuais trativas na superfície (GUNNBERG *et al*, 2006).

A geração de tensões residuais representa uma interação complexa dos efeitos térmicos e mecânicos. Esses dois fenômenos concorrentes interagem para criar o perfil final de tensões residuais do componente. O conhecimento destes dois mecanismos de formação das tensões residuais permite prever ou até controlar os níveis de tensões residuais até uma profundidade específica. Esta profundidade possui forte dependência do material sendo usinagem e muitas vezes se localiza

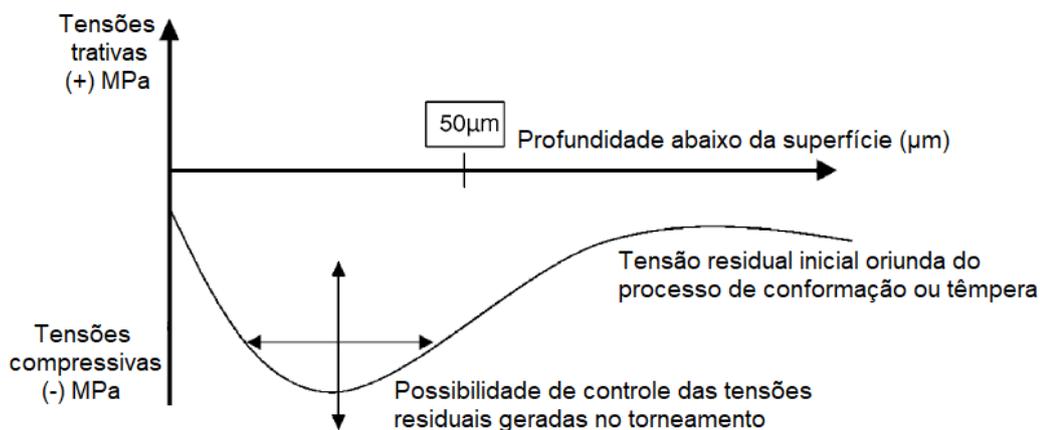
próximo dos 50 μm Figura 30. Abaixo dos 70 μm na maioria dos casos os níveis de tensões residuais estarão relacionados com os processos de conformação ou tempera executados antes da usinagem (GUNNBERG *et al*, 2006).

Figura 29 – (a) Mecanismo mecânico e (b) e térmico de formação das tensões residuais no torneamento.



Fonte: Adaptado de Gunnberg *et al*, (2006).

Figura 30 – Representação ilustrativa de um perfil de tensões residuais gerado após o torneamento (*hard turning*) de um aço DIN 18MnCr5, temperado.



Fonte: Adaptado de Gunnberg *et al*, (2006).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A escolha dos fatores a serem investigados neste estudo baseou-se na revisão de trabalhos existentes na literatura (MUÑOZ-ESCALONA e CASSIER, 1998; DAHLMAN *et al*, 2004; CAPPELO, 2005; SASAHARA, 2005; CAPPELO, 2006; GUNNBERG *et al*, 2006; SENTHILKUMAR e TAMIZHARASAN, 2014; CABRERA *et al*, 2015). Resumidamente estes trabalhos exploram os efeitos da manipulação de parâmetros de usinagem e ferramentas de corte sobre duas das principais áreas de pesquisa da engenharia de superfície, tensões residuais e rugosidade. Desta forma mapeou-se os fatores citados como fortemente responsáveis pela modificação da rugosidade da superfície e as tensões residuais de barras de aço submetidas ao processo de torneamento (entre eles o aço 0,45%C). Os fatores de usinagem e propriedades da ferramenta de corte selecionados foram: (1) velocidade de corte v_c , (2) avanço f , (3) raio de quina r_ϵ , e (4) ângulo de saída γ . Além dos quatro fatores citados anterior foi adicionado ao experimento um quinto fator, (5) posição axial.

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO (DoE)

Utilizou-se a técnica de planejamento do experimento (DoE) para organizar a produção das amostras e executar a comparação dos resultados obtidos por meio da análise fatorial completa. Para elaboração da matriz do DoE atribuiu-se a cada um dos fatores em estudo dois valores diferentes sendo um designado como alto (+1) e outro como baixo (-1). O valor absoluto atribuído a cada fator teve sua origem definida no referido estudo da literatura apresentado na seção 3. Ao quinto fator, região de medição da rugosidade, assumiu-se duas regiões distintas de medição da rugosidade com rugosímetro, são elas: próximo aos pontos fixos durante a usinagem (placa de castanhas e contraponto), e no centro das amostras. Esse parâmetro foi chamado de posição axial, e será detalhado na seção 3.4.

Nesse trabalho conduziu-se dois DoEs e duas análises fatoriais completas. A primeira foi construída com cinco fatores de entrada (2⁵) e resultou num total de trinta

e duas diferentes combinações dos fatores de entrada. Os fatores de entrada e os valores atribuídos a cada um deles no primeiro DoE estão apresentados na Tabela 3. A segunda análise fatorial foi conduzida com quatro fatores como entrada (2^4) e resultou num total de dezesseis diferentes combinações dos fatores de entrada. Os fatores de entrada e os valores atribuídos a cada um deles no segundo DoE estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Fatores contemplados no primeiro DoE e análise fatorial que possui R_a como saída e cinco fatores de entrada, bem como os valores atribuídos a cada um dos fatores.

FATORES	v_c (m/min)	f (mm/rot)	r_ϵ (mm)	γ (°)	POSIÇÃO AXIAL
-1	150	0,10	0,4	+7	Extremidades (I e III)
+1	250	0,25	1,2	-6	Centro (II)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Fatores contemplados no segundo DoE e análise fatorial que possui I_R como saída e quatro fatores de entrada, bem como os valores atribuídos a cada um dos fatores.

FATORES	v_c (m/min)	f (mm/rot)	r_ϵ (mm)	γ (°)
-1	150	0,10	0,4	+7
+1	250	0,25	1,2	-6

Fonte: Próprio autor.

3.2 MATERIAIS

O material utilizado neste trabalho foram barras de aço produzidas pelo processo de trefilação combinada. A partir da composição química da amostra, apresentada na Tabela 5, observa-se que o aço pode ser classificado como ABNT 1045.

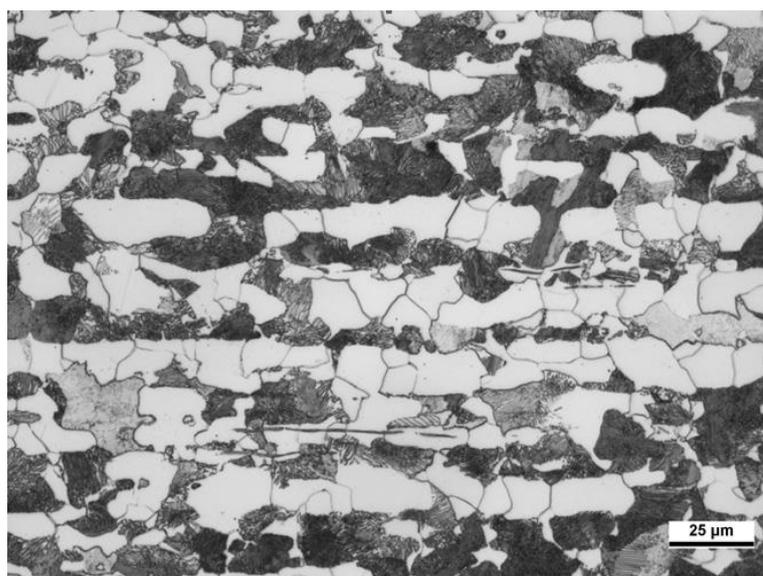
Tabela 5 - Composição química das amostras de aço e norma ABNT 1045, em %(m/m).

ELEMENTO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
AMOSTRA	0,43	0,24	0,79	0,03	0,02	0,13	0,08	0,03	Balanço
NORMA (ABNT)	0,43 - 0,5	-	0,6 - 0,9	<0,04	<0,05	-	-	-	Balanço

Fonte: Adaptado Nunes, 2012.

A Figura 31 mostra a micrografia do material em um corte na direção longitudinal e ataque com Nital 2%. A microestrutura apresentada é formada tipicamente de Perlita, região escura da micrografia, e Ferrita, região clara das micrografias, observa-se um alinhamento típico de materiais que foram laminados a quente. Outro aspecto importante é o bandeamento apresentado, este comportamento é semelhante em todo o perímetro da amostra e segue o sentido longitudinal (ou de laminação).

Figura 31 - Micrografia do material utilizado obtida a partir de um corte na direção longitudinal e ataque com Nital 2%.

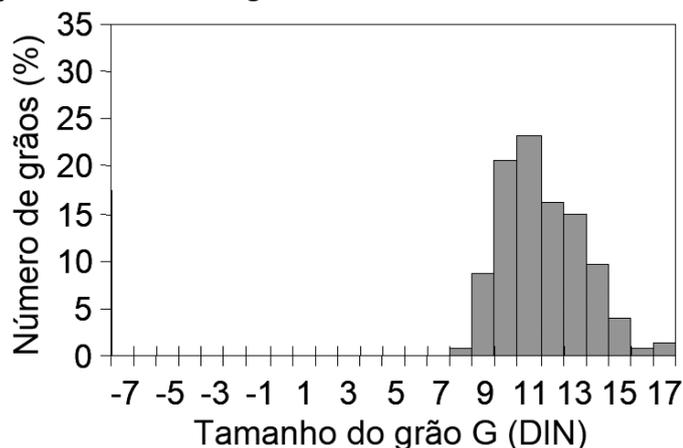


Fonte: Adaptado Nunes, 2012.

A Figura 32 mostra a distribuição dos tamanhos de grãos, assumindo uma distribuição gaussiana, e de acordo com a norma DIN o tamanho se encontra entre 10 a 11. Este tamanho de grão é relativamente pequeno e demonstra uma elevada qualidade do material. O volume de Ferrita calculado pelo método manual foi de 0,51 enquanto que o comprimento médio do grão de Ferrita foi de 7,4 µm (Nunes, 2012).

A geometria das amostras foi em barras com diâmetro de 20,65 mm e comprimento de 6 m. Em laboratório cortou-se as barras longas com serra fita em amostras de 400 mm de comprimento cada. Descartou-se 0,40 m das extremidades das barras longas pois conforme verificado por Dias (2013) as extremidades dessas barras apresentavam propriedades distintas do restante do material devido ao processo de corte cisalhante.

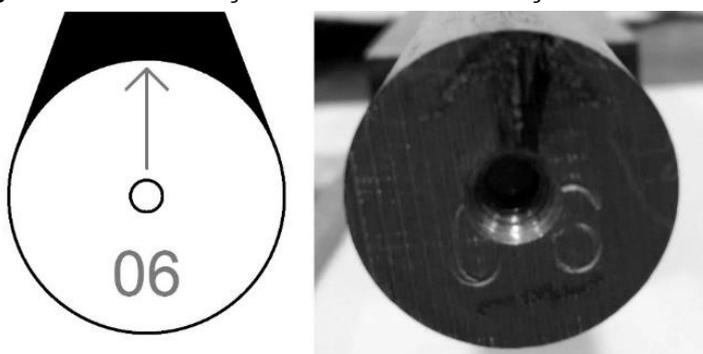
Figura 32 - Distribuição do tamanho de grãos das amostras.



Fonte: Adaptado Nunes, 2012.

Identificou-se as amostras de 400 mm com marcador elétrico em sua seção transversal. A identificação consistiu de um número de dois algarismos de 00 até 16 e uma seta com o objetivo de manter a informação da direção e orientação do processo de trefila, Figura 33. O conhecimento desta direção é importante pois durante o processo de trefilação combinada é criado um perfil de tensões residuais distinto quando analisada a região da superfície localizada no topo da seta ou outra região da superfície localizada ao girarmos 90° a barra em torno de seu eixo axial (NUNES, 2008; SOARES, 2012; NUNES, 2012; DIAS, 2013).

Figura 33 - Identificação das amostras na seção transversal.



Fonte: Próprio autor.

3.3 USINAGEM

Submeteu-se as barras ao processo de torneamento em um torno CNC Romi 30D, situado no Laboratório de Manufatura Mecânica (LAMAM) da SATC de Criciúma-SC. Realizou-se a usinagem com dois passes, sendo o primeiro com profundidade de corte (a_p) de 0,4 mm, com o objetivo de remover qualquer heterogeneidade presente na superfície das barras, e o segundo passe de 0,1 mm para produzir a superfície a ser analisada nesse estudo. Usinou-se as barras a seco e a força aplicada no contraponto foi a mesmo para todas as barras.

A Tabela 6 detalha as especificações técnicas das ferramentas de corte em conjunto com o suporte MTJNR/W utilizados para se obter as condições descritas no DoE. Utilizou-se o mesmo suporte em todas as operações de usinagem. As características distintas das ferramentas de corte (γ_n e λ_s), os ângulos relevantes que permaneceram constantes (κ_r , κ'_r e α_n), a nomenclatura e definição das grandezas angulares adotada nesse estudo constam na Figura 4.

Tabela 6 - Especificações e principais características das ferramentas de corte e suporte utilizados na usinagem das amostras.

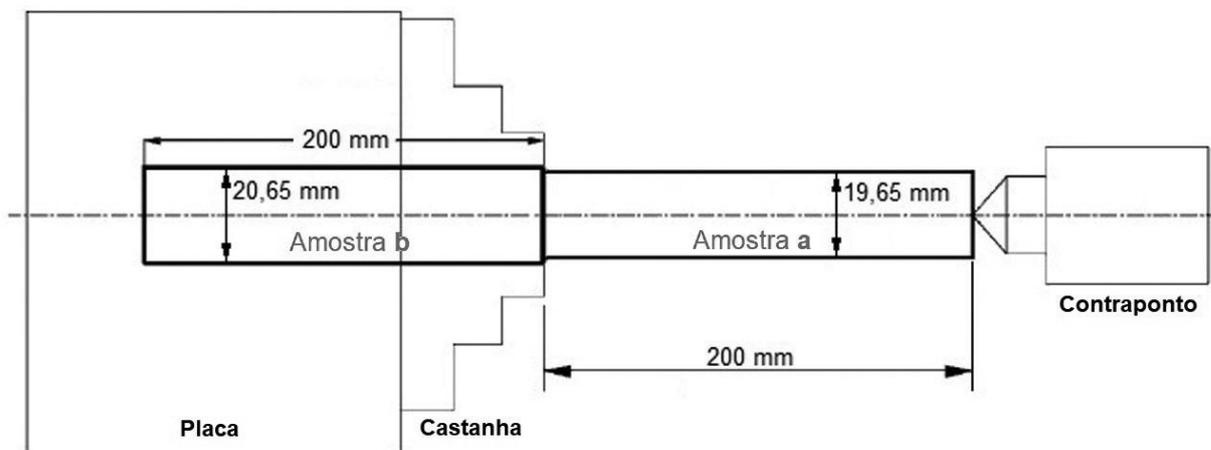
CÓDIGO DO INSERTO	TNMG 160404-TF	TNMG 160412-TF	TNMA 160404	TNMA 160412
r_ϵ (mm)	0,4	1,2	0,4	1,2
γ_n (°)	7	7	-6	-6
λ_s (°)	7	7	-6	-6
κ_r (°)	93	93	93	93
κ'_r (°)	27	27	27	27
α_n (°)	6	6	6	6

Fonte: Próprio autor.

Para execução da usinagem fixou-se as barras na placa de castanha de forma a deixar 200 mm entre a extremidade das castanhas e o contraponto (Figura 34). Por esta razão a usinagem de cada barra foi realizada em duas etapas, ou seja, para cada barra de 400 mm obteve-se duas amostras de barras usinadas com o mesmo conjunto

de fatores e com 200 mm cada. Utilizou-se a letra **a** e **b** ao final do número para diferenciar as duas amostras obtidas com cada conjunto de fatores.

Figura 34 - Configuração de montagem da barra a ser usinada, placa de castanha e contraponto identificando a diferenciação entre a amostra *a* e amostra *b*, ambas usinadas com os mesmos conjuntos de fatores.



Fonte: Próprio autor.

3.4 ANÁLISE DA RUGOSIDADE

Utilizou-se o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-210 para analisar a rugosidade na superfície das barras. A fim de obter um sistema estável para realizar a medição da rugosidade posicionou-se a barra sobre uma base metálica cuja seção transversal possui formato de cunha, Figura 35.

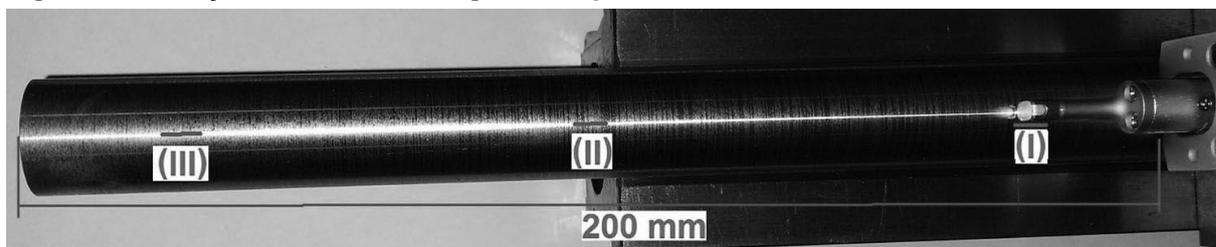
Figura 35 – Diagrama da amostra sobre base metálica para medição da rugosidade.



Fonte: Próprio autor.

Mediu-se a rugosidade de cada amostra de 200 mm em três posições axiais distintas: (I) próximo à placa castanha, (II) centro da barra, (III) próximo ao contraponto, Figura 36. Cada leitura avaliou os parâmetros de rugosidade média (R_a) e a rugosidade média das máximas parciais (R_z).

Figura 36 - Posições de leitura da rugosidade para cada amostra de 200 mm.



Fonte: Próprio autor.

3.4.1 Rugosidade média (R_a)

Utilizou-se a rugosidade média (R_a) como parâmetro de saída no primeiro DoE e análise fatorial que possuíam cinco fatores como entrada, conforme descrito na Tabela 3. A determinação de R_a levou em consideração o quinto fator explorado neste DoE, posição axial, e a média das leituras de rugosidade das amostras terminadas em **a** e **b** para regiões semelhantes.

Calculou-se a R_a média de cada barra para posição axial **extremidade** por meio da Equação 9 e calculou-se a R_a média no **centro** das barras pela Equação 10.

$$R_{a;barra01;extremidades} = (R_{a;01a;I} + R_{a;01a;III} + R_{a;01b;I} + R_{a;01b;III})/4 \quad (9)$$

$$R_{a;barra01;centro} = (R_{a;01a;II} + R_{a;01b;II})/2 \quad (10)$$

3.4.2 Índice de rugosidade (I_R)

Utilizou-se o índice de rugosidade (I_R) para avaliar se o acabamento obtido no processo de usinagem de cada barra foi satisfatório. Conforme apresentado na Equação 11 este índice equaciona a média das rugosidades máximas de uma dada amostra (obtido a partir da média de R_z) com a rugosidade teórica (R_t) que é utilizada como referência de acabamento satisfatório.

$$I_R = R_{z,média} / R_t \quad (11)$$

Onde:

I_R [μm]: Índice de rugosidade;

$R_{z,média}$ [μm]: Média entre o R_z medido nas três posições de leitura;

R_t [μm]: Rugosidade teórica.

Quando I_R possui valores próximos a 1,0, sugere-se, que a rugosidade obtida se aproxima significativamente da rugosidade teórica, e que o acabamento obtido foi conforme esperado. Já para valores maiores significa que a $R_{z,média}$ foi I_R vezes maior que R_t indicando que o processo de torneamento deve ter sofrido influência fenômenos que prejudicaram o acabamento.

A $R_{z,média}$ foi calculado a partir da média aritmética das rugosidades R_z medidas nas três posições de cada barra e amostras terminadas em **a** e **b**, Equação 12. O parâmetro posição axial de medição da rugosidade não foi considerado uma variável nesta análise, ou seja, ao se calcular a média das rugosidades R_z foi realizado a soma das leituras feitas nas extremidades e no centro das amostras. A rugosidade teórica (R_t , medida em μm) de cada amostra foi calculada pela Equação 5.

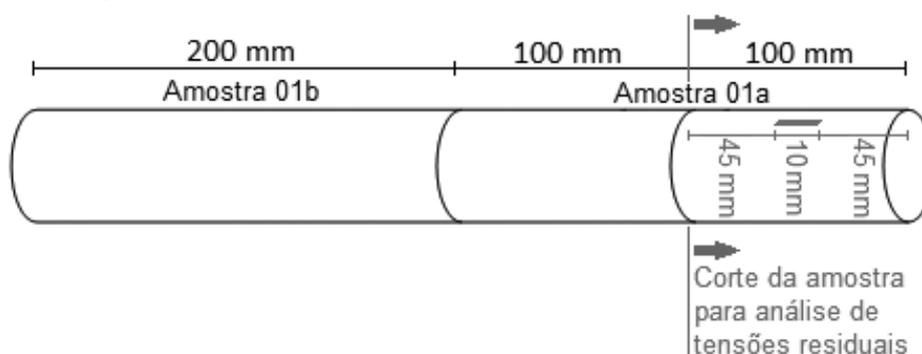
$$R_{z,média} = (R_{z;01a;I} + R_{z;01a;II} + R_{z;01a;III} + R_{z;01b;I} + R_{z;01b;II} + R_{z;01b;III})/6 \quad (12)$$

3.5 ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS

As amostras para análise das tensões residuais por difração de raios-X foram produzidas a partir do corte de uma seção de 100 mm da extremidade das amostras terminadas em a de cada barra, Figura 37.

Realizou-se as análises de tensões residuais sempre em uma mesma região, com comprimento de 10 mm localizado próximo ao centro da amostra, sinalizada por uma faixa vermelha na Figura 37. Para conservação da superfície das amostras foi aplicada uma leve camada de óleo sobre as barras entre cada uma das etapas de usinagem, corte e finalmente análise. Não foi realizado nenhum outro tratamento ou condicionamento da superfície das amostras.

Figura 37 - Corte das amostras e região selecionada para realização da análise de tensões residuais por difração de raios-X.

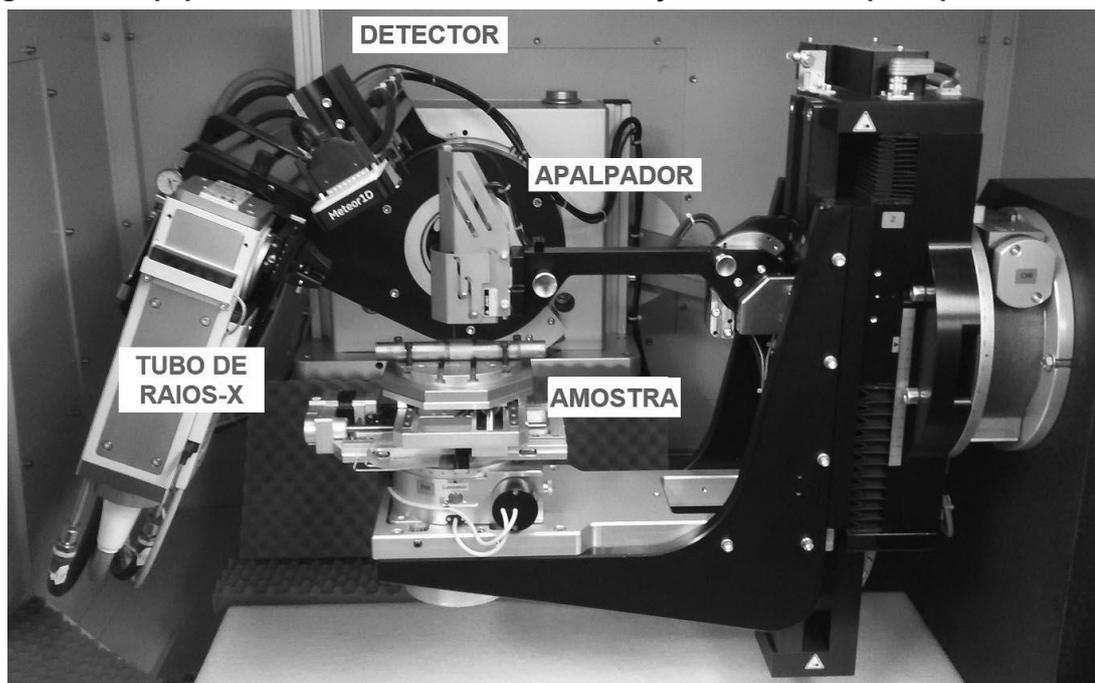


Fonte: Próprio autor.

3.5.1 Equipamento de difração de raios-X

A técnica de medição das tensões residuais adotada foi a difração de raios-X e o cálculo das tensões a partir do método $\text{sen}^2\psi$. Utilizou-se na análise o equipamento GE Seifert Charon XRD M Research Edition® situado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. Esse equipamento e seus principais elementos estão apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Equipamento utilizado na análise de difração de raios-X e principais elementos.



Fonte: Próprio autor.

Principais parâmetros adotados para realização das medições:

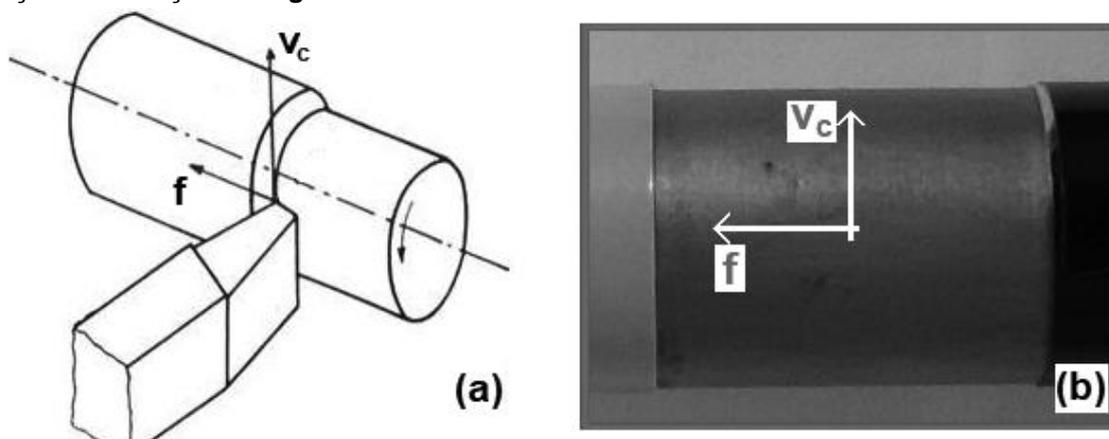
- Elemento do tubo de raios-X: Cr
- Comprimento de onda $k\text{-}\alpha$: 2,2897 Å
- Tensão do tubo: 30 kV
- Corrente: 50 mA
- Detector usado: *Meteor 1D*
- Ângulos utilizados em ambos sentidos: $[-60^\circ \text{ até } +60^\circ]$, $\psi = 13$
- Tempo de escaneamento tangencial e longitudinal: 20s
- Passo: $0,1^\circ$
- Tempo de ensaio: uma medição em uma direção (Longitudinal): ~15 minutos
- Pico de difração utilizado: $\{2\ 1\ 1\}$ $\{h\ k\ l\}$ 2-theta $[156,08^\circ]$
- Variação do ângulo de difração: $[147^\circ\text{-}166^\circ]$
- Colimador: 2 mm

Anteriormente ao início de cada análise fixou-se a amostra sobre o porta-amostra por meio de quatro parafusos de forma a garantir sua estabilidade durante a operação do equipamento. Por meio do apalpador aferiu-se um ponto no centro da região

selecionada da amostra para ser a referência de ponto zero da análise. Uma vez concluída a fixação da amostra e o ajuste ponto zero iniciou-se cada análise.

O giro de 90° da amostra para permitir a leitura na direção do avanço e na direção da velocidade de corte foi realizado pelo próprio equipamento por meio do giro do porta-amostra, não sendo necessário interromper o processo para reposicionar a amostra. A Figura 39 ilustra a definição das direções de medição das tensões residuais.

Figura 39 – Definição das direções de medição das tensões residuais em (a) ilustração e (b) no plano da superfície da barra. São elas v_c , direção da velocidade de corte ou tangencial, e f direção do avanço ou longitudinal.

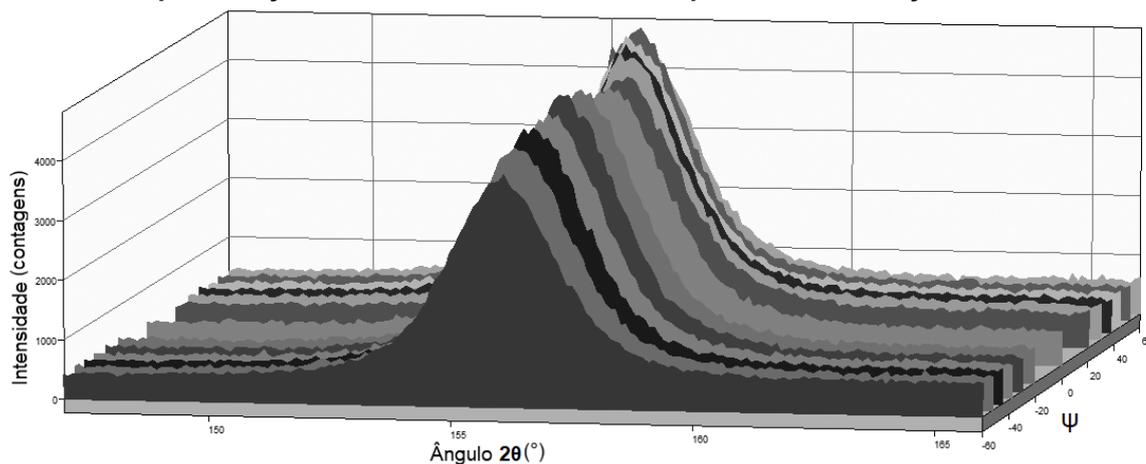


Fonte: Próprio autor.

3.5.2 Cálculo das tensões residuais

Utilizou-se o programa *Analyze RayfleX*, versão 2.503 da *GE sensing & inspection technologies*® para intermediar o tratamento dos dados da análise de difração de raios-X, e auxiliar no cálculo e análise dos dados das tensões residuais. Para o cálculo da tensão residual em um determinado ponto de uma amostra e em cada direção foi necessário realizar a análise de treze gráficos, referentes a seis ângulos ψ negativos, seis ângulos ψ positivos e ângulos ψ igual a zero (Figura 40).

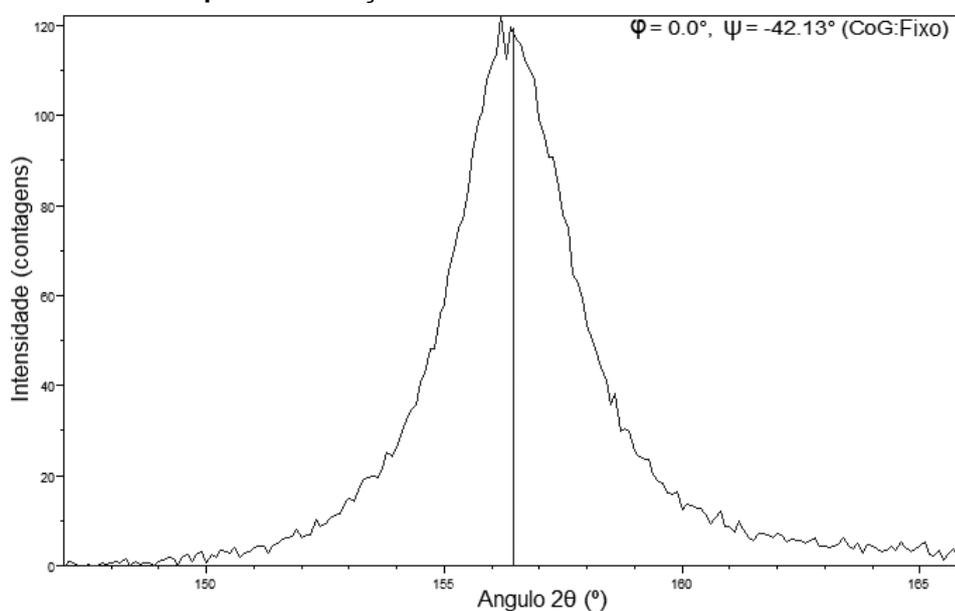
Figura 40 - Exemplo dos gráficos de treze posições distintas de ψ utilizados para o cálculo da tensão residual por difração de raios-X num determinado ponto, numa direção e uma amostra.



Fonte: Próprio autor.

A análise de cada gráfico, referente a cada ângulo ψ é realizada individualmente. Nesta análise utilizou-se o método linear para remoção do ruído (*background*) e o método do centro de gravidade (CoG) considerando 20% da altura do pico para calcular a posição do centro do pico de difração. A Figura 41 mostra o gráfico de um pico de difração com seu respectivo centro calculado pelos métodos citados acima.

Figura 41 - Exemplo do gráfico de uma análise de difração de raios-X para um dado ψ e a localização do centro do pico de difração.

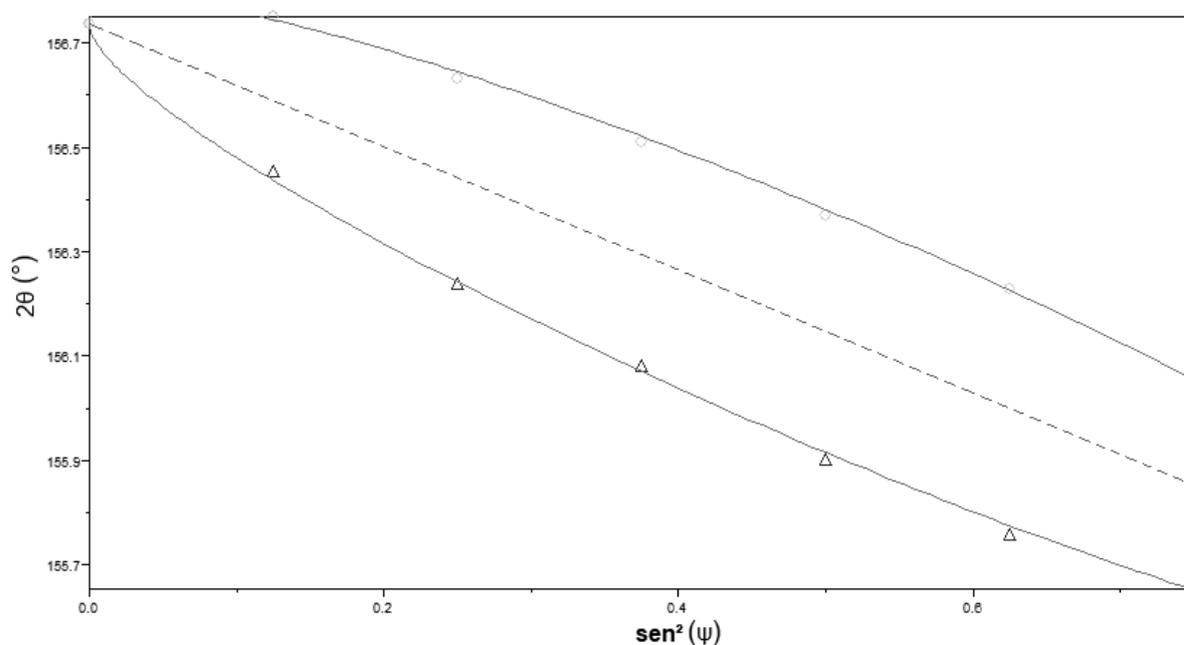


Fonte: Próprio autor.

Após identificado o valor do ângulo referente a cada pico de difração para cada ψ esses valores foram plotados no gráfico $\text{sen}^2(\psi)$ vs 2θ . A Figura 42 ilustra a localização dos pontos referentes aos ψ negativos (identificados pelos marcadores em forma de círculo) e os pontos referentes aos ψ positivos (identificados pelos marcadores na forma de triângulo). Segundo o método do $\text{sen}^2(\psi)$ a tensão residual nessa direção para este ponto é obtida ao se calcular a inclinação da curva que corta o centro desta elipse formada pelos pontos de ψ negativo e positivo (FITZPATRICK *et al*, 2005).

O programa citado também auxilia na análise do gráfico $\text{sen}^2(\psi)$ vs 2θ para obtenção do valor da tensão cisalhante responsável pela abertura desta elipse em relação a linha média representada pela reta tracejada na Figura 42 (WINHOLTZ, 2003). Outros parâmetros relevantes utilizados nos cálculos das tensões residuais foram as constantes elásticas apresentadas na Tabela 7.

Figura 42 - Exemplo do gráfico $\text{sen}^2(\psi)$ vs 2θ utilizado para o cálculo da tensão residual em uma determinada direção.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Constantes elásticas utilizadas no cálculo das tensões residuais.

$\frac{1}{2} S_2$	$5,810 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$
$-S_1$	$1,270 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$
Módulo de <i>Young</i> (E)	$220,264 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$
Coefficiente de <i>Poisson</i> (ν)	0,280

Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Uniformidade das tensões residuais na superfície

Inicialmente executou-se as análises de tensões residuais em dez pontos diferentes da superfície de algumas das amostras (Figura 43). Sendo que em cada ponto realizou-se a análise nas duas direções de interesse, direção do avanço (ou longitudinal) e da velocidade de corte (ou tangencial), conforme Figura 39.

Este estudo foi realizado para verificar se as superfícies produzidas pelo torneamento com diferentes fatores de usinagem possuíam tensões residuais homogêneas ao longo do eixo longitudinal das amostras. Uma vez confirmada esta homogeneidade seria possível prosseguir as análises de tensões residuais utilizando um número menor de pontos, ou seja, um número menor de análises. As análises subsequentes foram realizadas em três pontos por medição.

Figura 43 - Diagrama dos dez pontos sobre a amostra utilizados para verificar a homogeneidade das tensões residuais na superfície.



Fonte: Próprio autor.

3.5.4 Remoção de camadas e perfil de tensões residuais

A usinagem de materiais metálicos influencia as tensões residuais na superfície e na região logo abaixo da superfície (CAPELLO, 2005). A depender do material sendo usinado esta alteração das tensões residuais pode se estender desde a superfície até regiões 100 μm abaixo da superfície (CAPELLO, 2006).

Utilizou-se a técnica de remoção de material para permitir o acesso a camadas internas das amostras e assim investigar o perfil das tensões residuais em função da profundidade de análise. Desta forma foi possível avaliar não apenas o efeito dos fatores de usinagem sobre as tensões residuais na superfície, mas também abaixo da superfície, e ainda verificar até qual profundidade estes fatores influenciaram nas tensões residuais das amostras. Este método consistiu de realizar uma análise de tensões residuais em uma dada região, submeter esta mesma região a remoção de material até alcançar a camada de interesse e, posteriormente realizou-se outra análise de tensões residuais, e assim sucessivamente. Este processo foi repetido para se obter as tensões residuais nas seguintes profundidades: superfície, 5 μm , 10 μm , 20 μm , 50 μm e 75 μm .

Primeiramente a amostra foi protegida por fita adesiva de forma a permitir que a reação química ocorresse apenas na região de interesse (Figura 44).



Fonte: Próprio autor.

Esta remoção de material, ou remoção de camadas, foi realizada por ataque eletrolítico. Na sequência esta amostra foi mergulhada em uma solução de ácido sulfúrico (42%vol), ácido fosfórico (34%vol) e água destilada (24%vol), sendo que esta solução se encontrava dentro de um recipiente de vidro e sobre um agitador magnético

operando. Conectou-se o polo positivo de uma fonte de tensão na amostra a ser decomposta e conectou-se o polo negativo desta fonte a um eletrodo de chumbo que também se encontrava mergulhado na solução (Figura 45).

Figura 45 - Amostra e eletrodo de chumbo dentro da solução ácida sobre agitador magnético.



Fonte: Próprio autor.

Por fim foi aplicado uma tensão contínua de aproximadamente 3,5V que resultou em um corrente média de 1A pelo tempo suficiente para se remover a quantidade de material desejado. A fonte de tensão utilizada esta mostrada na Figura 46.

Figura 46 - Fonte de tensão utilizada na remoção de camadas das amostras e ligações do eletrodo de chumbo e da amostra.



V+: Conectado na amostra
V-: Conectado no eletrodo de chumbo

Fonte: Próprio autor.

Em geral foi necessário manter a amostra submetida a essa reação, com os parâmetros citados acima, por aproximadamente um minuto para se remover 1 μm do

diâmetro da amostra. Cada amostra teve seu diâmetro medido com micrômetro (Figura 47) antes e depois de ser submetida a esta reação, desta forma realizou-se o ajuste fino do tempo de reação para se alcançar a camada de interesse.

Figura 47 - Micrômetro utilizado para medir o diâmetro das amostras antes e depois do ataque eletrolítico.



Fonte: Próprio autor.

3.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA E DUREZA

De posse dos resultados obtidos com as análises de rugosidade e tensões residuais selecionou-se duas amostras para análise metalográfica e investigação do perfil de micro dureza Vickers. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com solução de Nital 2%. As micrografias foram obtidas com o microscópio Olympus GX51 e a micro dureza no microdurômetro Insize ISH-TDV1000 (Figura 48).

Figura 48 – (a) Microscópio (b) e microdurômetro utilizados.



Fonte: Próprio autor.

Os critérios para escolha das amostras para análise de microdureza foram os mesmos adotados na seleção das amostras para análise metalográfica. O ensaio de

microdureza iniciou pela realização de um ensaio preliminar para encontrar um valor de carga adequado. Este ensaio foi realizado a distância de 1 mm da superfície usinada pois nessa região a microestrutura não sofreu alteração devido aos diferentes parâmetros adotados na usinagem. O tempo de aplicação da carga para todas as medições de dureza foi de 5 segundos. A dureza média foi obtida a partir de cinco indentações, os dados desse ensaio foram consolidados na Tabela 8.

O valor da carga selecionado para elaboração do perfil de microdureza foi 50 g por apresentar uma diagonal de indentação compatível com as distâncias da superfície que se desejava medir, que foi aproximadamente 17 μm . A equivalência da dureza em ambas amostras foi verificada a partir da medição com a carga de 50 g a 1 mm da superfície, nessa região a amostra 09 apresentou 257,8 HV enquanto que a amostra 03 apresentou 269,0 HV. A dureza média obtida com carga de 50 g foi próxima da dureza medida com as cargas de 100 e 500 g enquanto que o desvio padrão ficou apenas ligeiramente superior ao observado com a carga de 100g.

Tabela 8 - Ensaio de dureza a 1mm da superfície usinada para definição da carga.

Amostra	Carga (g)	Diagonal aproximada da indentação (μm)	Dureza média (HV)	s (HV)
3	25	15	230,8	18,3
3	50	17	269,0	7,0
3	100	26	288,3	6,6
3	500	56	283,8	1,0
9	50	17	257,8	7,6

Fonte: Próprio autor.

A carga de 100 g não foi escolhida pois a diagonal de 26 μm de sua indentação não permitiria a microdureza na profundidade de 10 μm . A carga de 25 g não foi escolhida por apresentar um resultado de dureza significativamente diferente daquele medido nas demais cargas e também por apresentar o maior desvio padrão.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais. Em um primeiro momento foi realizada a análise visual da superfície das barras pós-torneamento e de rugosidade em todas as amostras. As análises seguintes foram executadas em uma seleção de amostras em função de sua separação em grupos, em função de suas características semelhantes. Segregadas as amostras foram eleitas amostras representativas de cada grupo para execução da análise do perfil de tensões residuais, metalográfica e microdureza.

4.1 UNIFORMIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

Após usinagem as barras foram inspecionadas visualmente e foi possível separá-las em quatro grupos de acordo com o acabamento obtido (Tabela 9).

Tabela 9 - Segregação das amostras em grupos conforme resultado das inspeções visuais e análise de rugosidade.

NOME DO GRUPO	SIGLA	BARRAS NO GRUPO
Regular liso	RL	3a, 3b, 8a, 8b, 11a, 11b, 16a, 16b
Regular grosseiro	RG	2a, 2b, 4a, 4b, 10a, 10b, 12a, 12b, 14a, 14b
Irregular grosseiro	IG	1a, 1b, 5a, 5b, 6a, 6b, 9a, 9b, 13a, 13b
Variação axial de rugosidade	VA	7a, 7b, 15a, 15b

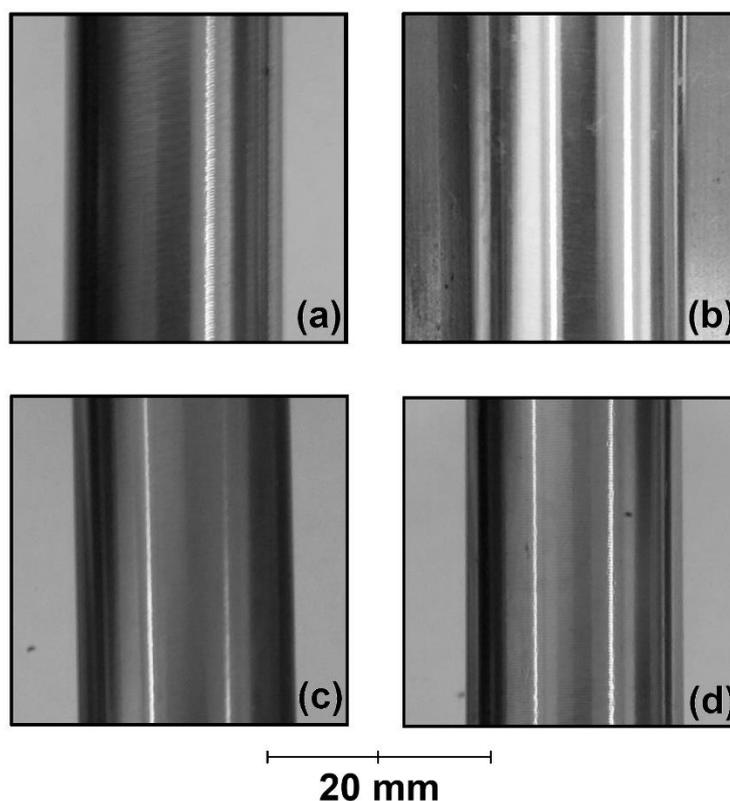
Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Grupo regular liso (RL) e regular grosseiro (RG)

As amostras presentes nesses dois grupos apresentaram rugosidade equivalente nas três regiões de medição (I, II e III) e apresentaram também um perfil da leitura do rugosímetro com as linhas do avanço bem definidas e repetições

regulares. A Figura 49 apresenta a inspeção visual das barras do grupo RL nas quais foi observado um acabamento liso, e a Figura 50 apresenta a inspeção visual das barras do grupo RG nas quais é possível identificar linhas do avanço e sua regularidade.

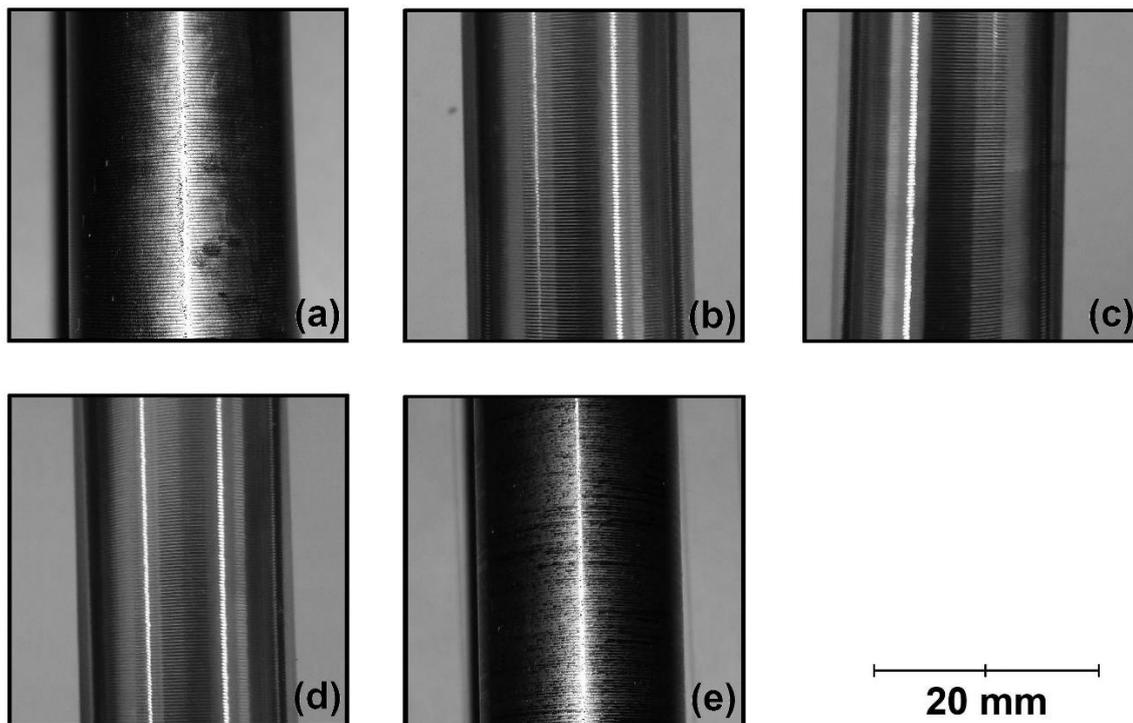
Figura 49 - Inspeção visual de uma seção representativa da superfície das barras do grupo RL, (a) barra03a, (b) barra08a, (c) barra11a e (d) barra 16a.



Fonte: Próprio autor.

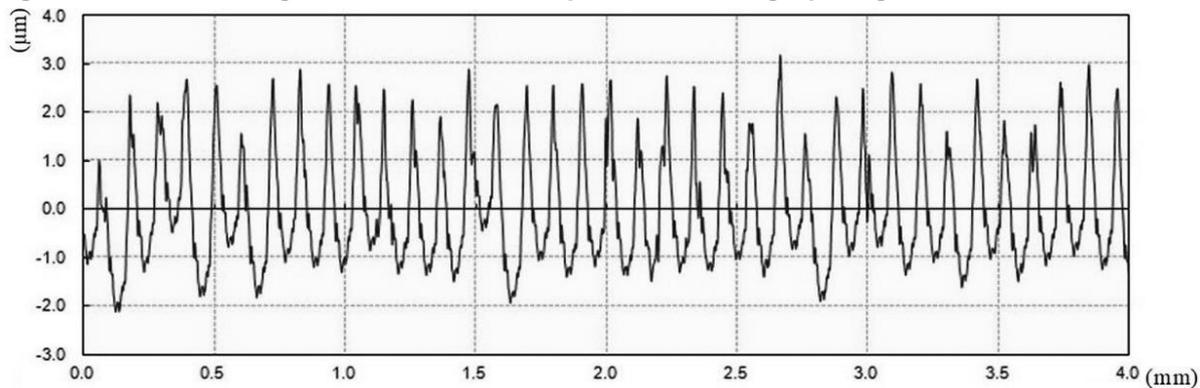
A leitura da rugosidade produzida pelo rugosímetro para a amostra 03a usinada com um avanço de 0,10 mm/rev e alocada no grupo RL se encontra apresentada na Figura 51, e a medição da amostra 02a usinada com um avanço de 0,25 mm/rev e alocada no grupo RG esta apresentado na Figura 52. As amostras desses grupos foram classificadas como regulares pois em todos os perfis de rugosidade é possível confirmar a regularidade dos picos e vales e sua coerência com o avanço utilizado no torneamento.

Figura 50 - Inspeção visual de uma seção representativa da superfície das barras do grupo RG, (a) barra02a, (b) barra04a, (c) barra10a, (d) barra12a e (e) barra14a.



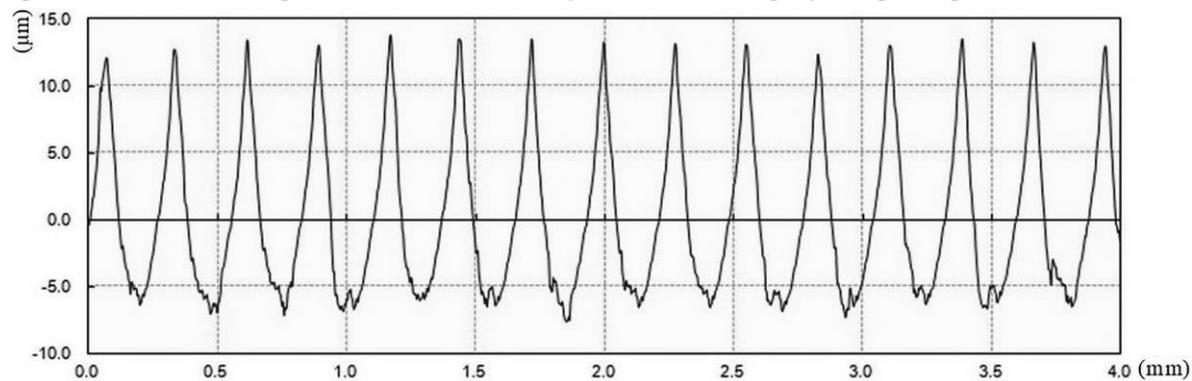
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Perfil de rugosidade da barra 03a pertencente ao grupo regular liso.



Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Perfil de rugosidade da barra 02a pertencente ao grupo regular grosseiro.



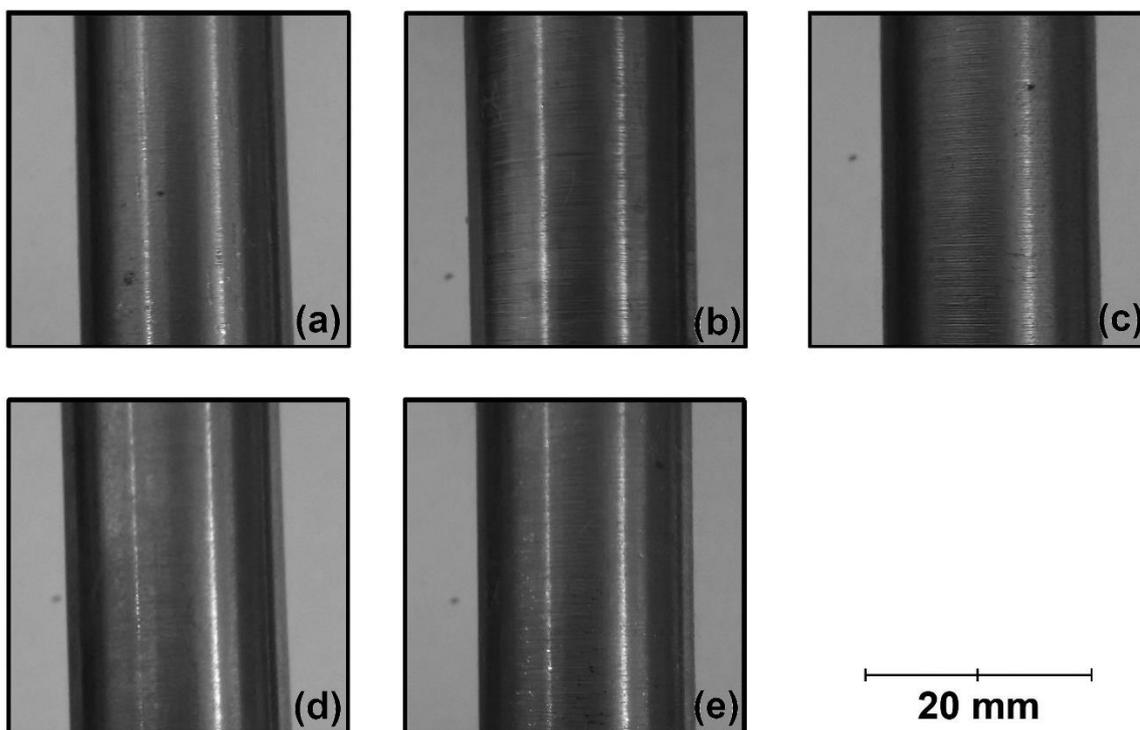
Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Grupo irregular grosseiro (IG)

No grupo IG foram agrupadas amostras que apresentaram uma rugosidade equivalente nas três regiões (I, II e III) e que, apesar de possuírem uma rugosidade visível ela não apresentou repetibilidade ao longo da barra, conforme mostrado na Figura 53 pela inspeção visual.

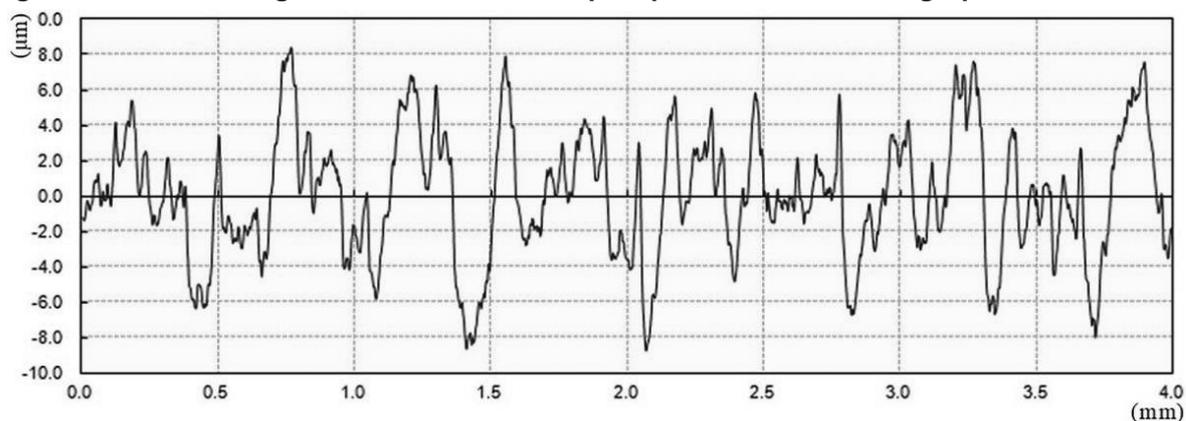
Utilizou-se como exemplo o perfil de rugosidade da barra 13a (Figura 54) para evidenciar a inexistência de regularidade entre o perfil e o avanço utilizado no torneamento dessa amostra, que havia sido 0,1mm/rev. Todas as barras que apresentaram essa característica foram classificadas como irregulares.

Figura 53 - Inspeção visual de uma seção representativa da superfície das barras do grupo IG, (a) barra01a, (b) barra05a, (c) barra06a, (d) barra09a e (e) barra13a.



Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Perfil de rugosidade da barra 13a, típico para as amostras do grupo IG.



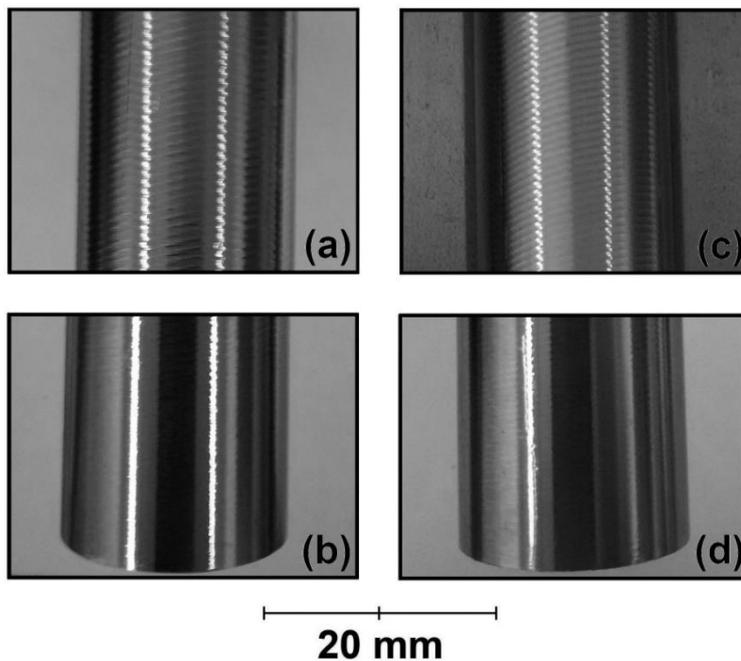
Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Grupo variação axial de rugosidade (VA)

No grupo VA se encontram amostras nas quais observou-se padrões de rugosidade diferentes ao longo da barra, ou seja, as leituras com o rugosímetro nas três regiões (I, II e III) mostraram valores distintos. Na Figura 55 mostra-se a inspeção visual de uma região próxima ao contraponto (posição de leitura III) que apresentou um acabamento liso quando comparado a uma região próxima ao centro da barra (posição de leitura II) que apresentou um acabamento grosseiro.

As leituras de rugosidade realizadas com o rugosímetro na barra 15a confirmaram que a superfície da amostra possui acabamento diferenciado em função da posição axial da medida. A leitura realizada em uma região próxima ao contraponto (região III) encontrou superfície com apenas um padrão de repetição de rugosidade, com amplitude (picos de rugosidade) aproximadamente $3,5 \mu\text{m}$ e período de $0,1 \text{ mm}$ (o avanço utilizado nesta amostra foi de $0,1 \text{ mm/rev}$), Figura 56. Já a leitura realizada próximo ao centro da barra, região II, mostrou um padrão de repetição duplo, no período de $0,1 \text{ mm}$ observou-se uma amplitude similar a anterior, aproximadamente $2 \mu\text{m}$ enquanto que no período de $0,8 \text{ mm}$ observou-se amplitude de $13 \mu\text{m}$, Figura 57.

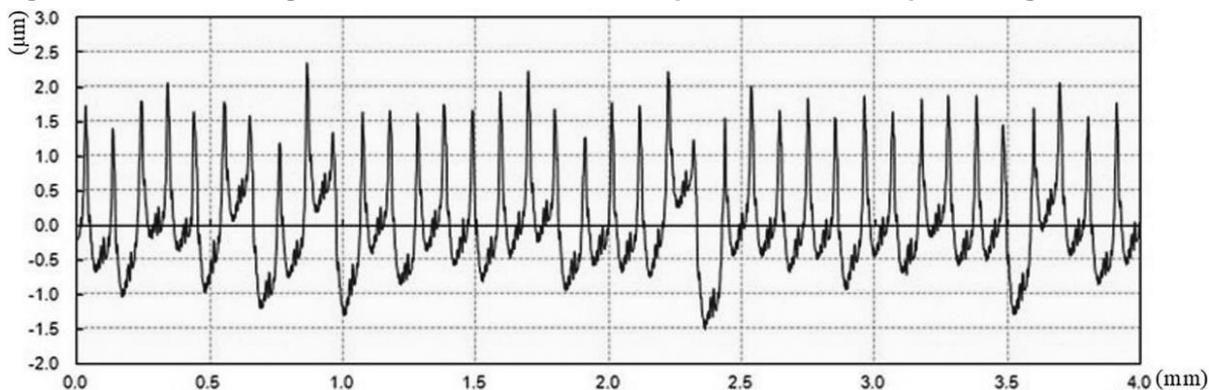
Figura 55 - Inspeção visual de uma seção representativa da superfície das barras do grupo VA, (a) barra07a posição leitura II, (b) barra07a posição de leitura III, (c) barra15a posição de leitura II e (d) barra15a posição de leitura III.



20 mm

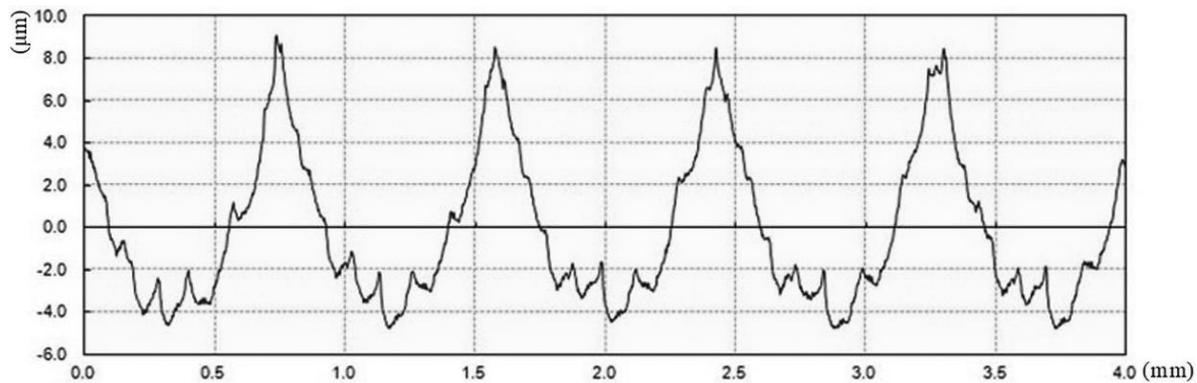
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Perfil de rugosidade da barra 15a medida próximo ao contraponto, região III.



Fonte: Próprio autor.

Figura 57 - Perfil de rugosidade da barra 15a medida no centro da barra, região II.



Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Uniformidade das tensões residuais

Observou-se superfícies pós usinagem com acabamento liso ou grosseiro de caráter regular ou irregular, por esta razão fez-se necessário averiguar se estas diferenças refletiriam também em diferentes tensões residuais. Os resultados das análises das tensões residuais de uma amostra de cada um dos grupos de interesse se encontra na Tabela 10.

Verificou-se que independente do grupo analisado a média das dez leituras, realizadas em dez diferentes pontos de uma mesma amostra, existiu um desvio padrão inferior ao desvio padrão das leituras individuais. Indicando que nos casos analisados a superfície apresenta uma tensão residual estatisticamente equivalente e que para as análises subsequentes não se faz necessário realizar um número tão grande de medições. As análises de tensões residuais apresentadas nos capítulos seguintes foram executadas em apenas três pontos.

Tabela 10 - Matriz de dados da análise da uniformidade das tensões residuais (σ_r , em MPa) e o desvio padrão (s , em MPa) na superfície das barras dos grupos de interesse.

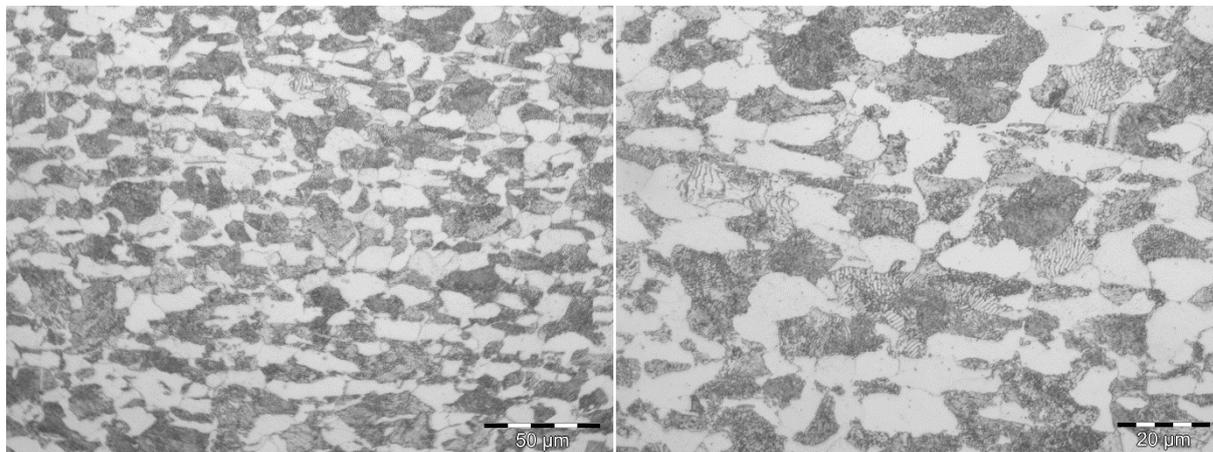
AMOSTRA	BARRA 1 (IG)				BARRA 3 (RL)				BARRA 4 (RG)					
	DIREÇÃO		v_c		f		v_c		f		v_c		f	
Ponto	σ_r	s	σ_r	s	σ_r	s	σ_r	s	σ_r	s	σ_r	s	σ_r	s
1	176,5	21,9	241,9	37,4	449,0	34,2	305,0	23,6	586,9	25,3	599,3	30,4		
2	176,6	23,2	242,1	27,8	446,2	22,7	298,7	33,1	576,4	25,8	622,4	28,1		
3	174,8	22,9	265,8	23,5	446,6	29,4	282,1	21,7	600,6	33,7	657,4	24,5		
4	192,5	21,7	268,7	20,0	430,1	20,6	278,3	23,3	603,3	20,1	652,0	25,2		
5	186,1	34,9	279,7	27,6	428,6	24,4	293,1	22,8	564,9	20,5	655,0	22,9		
6	202,8	22,9	246,3	20,0	446,1	20,4	327,6	26,7	596,8	31,5	644,3	28,4		
7	194,4	38,0	267,5	19,2	454,0	19,9	335,4	24,3	583,7	32,0	625,7	25,6		
8	181,0	22,8	270,1	28,8	465,7	30,7	329,9	38,6	579,2	20,0	621,4	25,0		
9	194,4	38,0	259,0	20,6	448,7	26,8	293,6	18,3	579,2	23,8	610,3	31,7		
10	178,6	26,1	264,4	21,5	441,7	15,8	299,7	30,1	585,7	37,6	607,7	30,0		
Média	185,8		260,6		445,7		304,3		585,7		629,6			

Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Caracterização metalográfica

Selecionou-se uma amostra representativa dos grupos RG e IG para análise metalográfica com objetivo de identificar as diferenças do corte entre amostras regulares, irregulares e com a superfície antes da usinagem. A Figura 58 mostra a microestrutura típica formada de Perlita, região escura da micrografia, e Ferrita, região clara das micrografias, em uma região afastada da superfície da amostra de barra não usinada. As amostras 03 (grupo RG) e 09 (grupo IG) foram escolhidas por possuírem uma rugosidade teórica igual, porém foi constatado que a qualidade da superfície produzida em ambas foi distinta. E ainda, estas duas estão inclusas no grupo de amostras que tiveram suas tensões residuais analisadas.

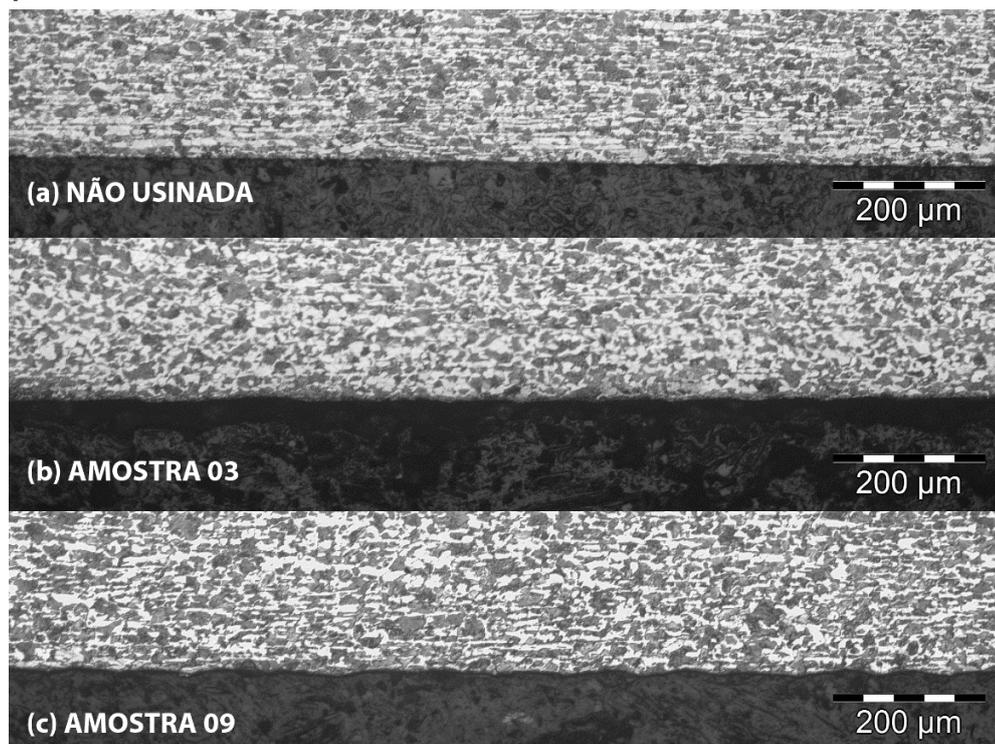
Figura 58 - Micrografia de uma região afastada da superfície da amostra de barra não usinada e cortada na direção longitudinal. Ataque Nital 2%.



Fonte: Próprio autor.

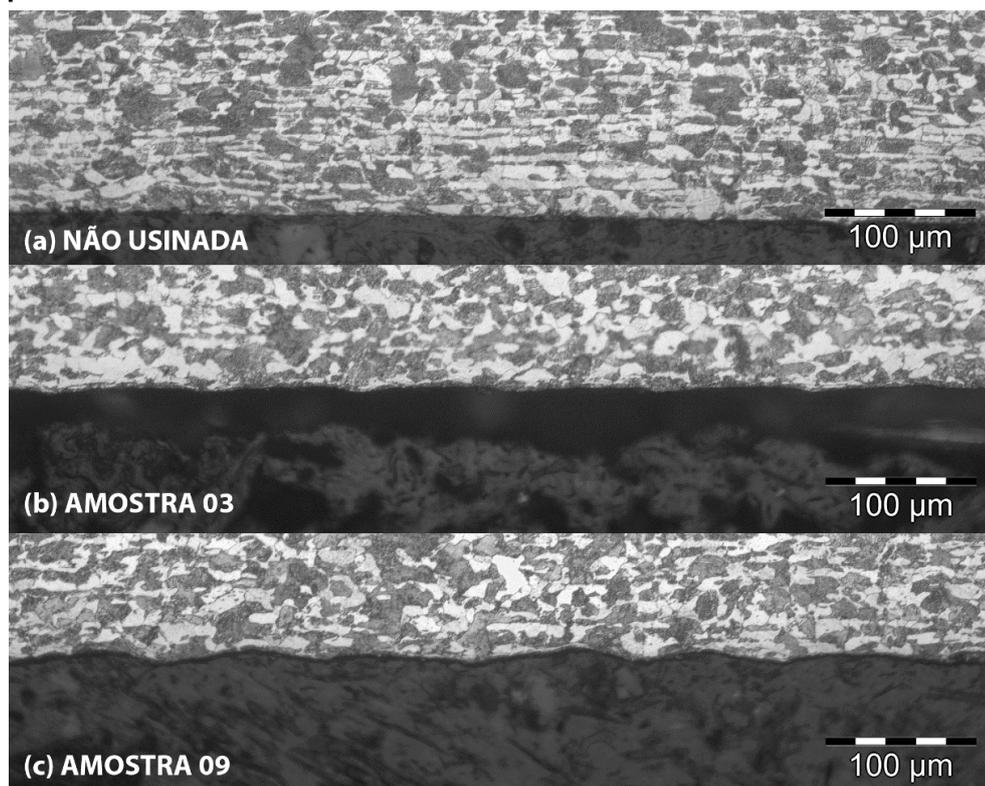
As micrografias das amostras com mesmo aumento foram agrupadas para permitir a comparação de suas superfícies. As Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 mostram as micrografias com diferentes escalas.

Figura 59 - Micrografia da superfície das três amostras na direção longitudinal com aumento de 10x. Ataque Nital 2%.



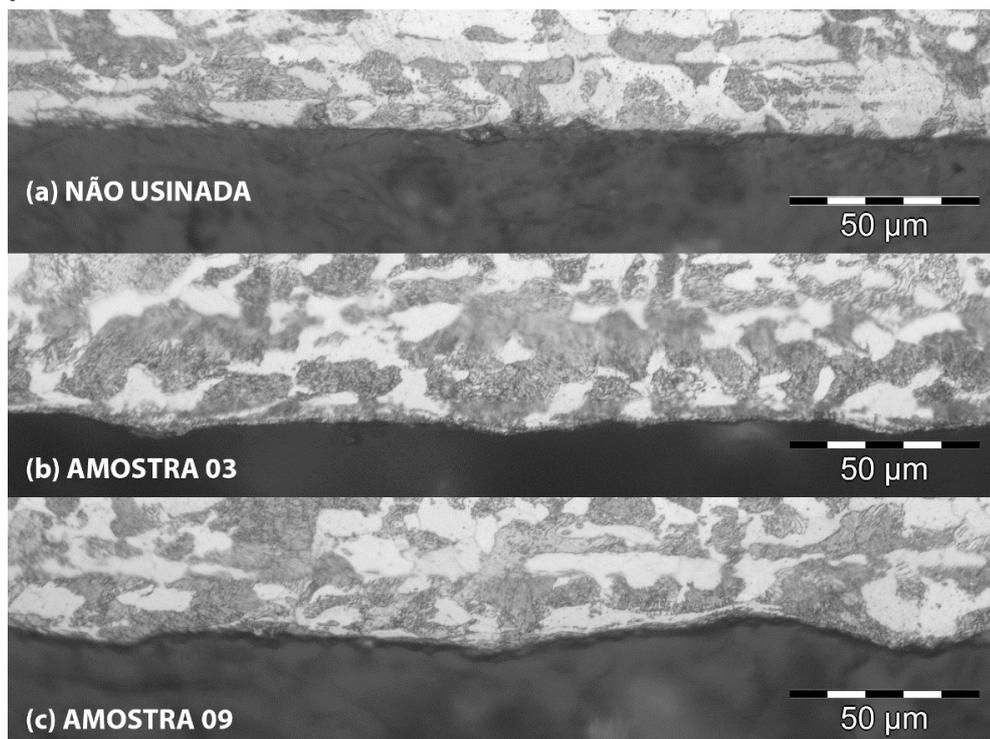
Fonte: Próprio autor.

Figura 60 - Micrografia da superfície das três amostras na direção longitudinal com aumento de 20x. Ataque Nital 2%.



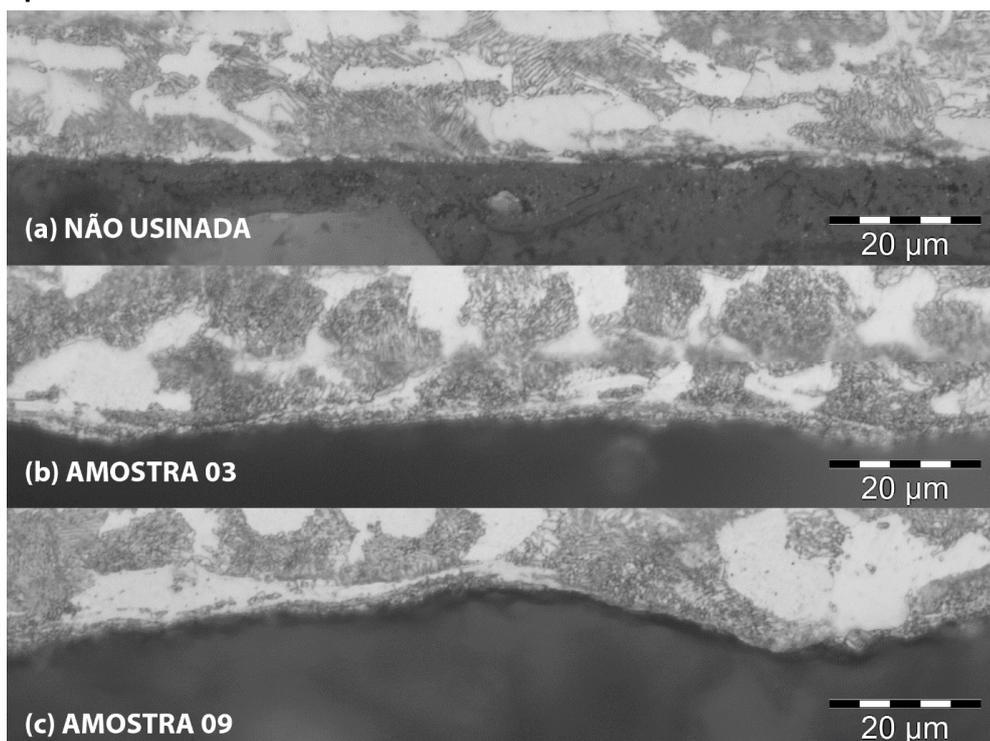
Fonte: Próprio autor.

Figura 61 - Micrografia da superfície das três amostras na direção longitudinal com aumento de 50x. Ataque Nital 2%



Fonte: Próprio autor.

Figura 62 - Micrografia da superfície das três amostras na direção longitudinal com aumento de 100x. Ataque Nital 2%



Fonte: Próprio autor.

4.2 INFLUÊNCIA DOS FATORES NA RUGOSIDADE

Realizou-se a construção do primeiro *DoE* e análise fatorial com cinco fatores de entrada e uma saída (R_a) com base nos dados consolidados na Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz dos dados do DoE com cinco fatores de entrada e como saída a rugosidade média R_a .

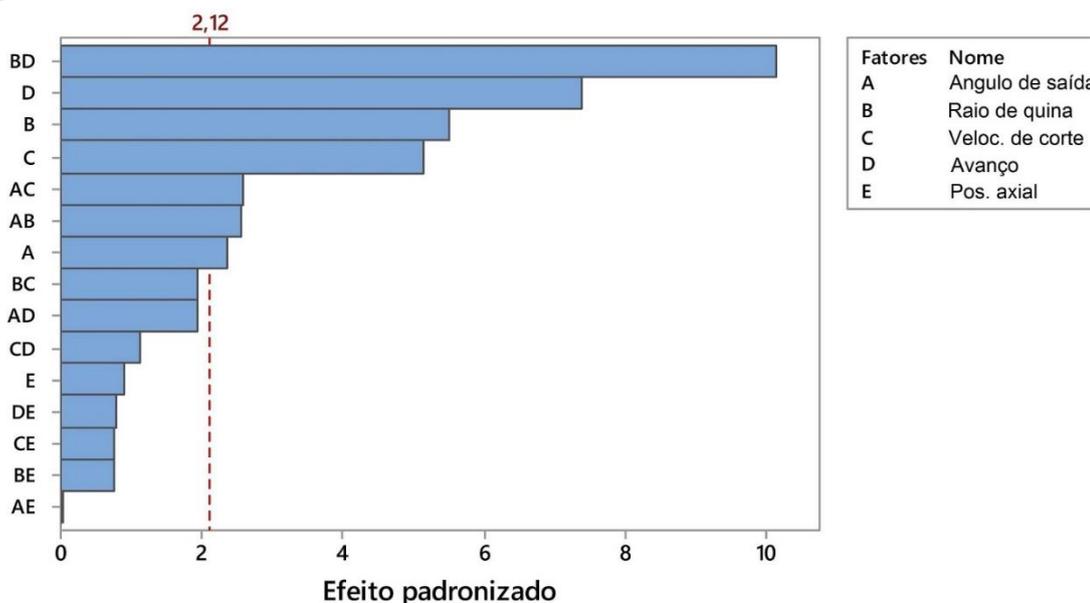
BARRA (Nº)	ÂNGULO DE SAÍDA (°)	RAIO DE QUINA (mm)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	AVANÇO (mm/rot)	POSIÇÃO AXIAL	R_a (μm)
1	+7	0,4	150	0,10	Extremidade	2,154
1	+7	0,4	150	0,10	Centro	2,546
2	+7	0,4	150	0,25	Extremidade	4,961
2	+7	0,4	150	0,25	Centro	4,960
3	+7	0,4	250	0,10	Extremidade	0,985
3	+7	0,4	250	0,10	Centro	0,976
4	+7	0,4	250	0,25	Extremidade	4,894
4	+7	0,4	250	0,25	Centro	4,902
5	+7	1,2	150	0,10	Extremidade	3,562
5	+7	1,2	150	0,10	Centro	3,553
6	+7	1,2	150	0,25	Extremidade	3,839
6	+7	1,2	150	0,25	Centro	4,303
7	+7	1,2	250	0,10	Extremidade	1,535
7	+7	1,2	250	0,10	Centro	2,043
8	+7	1,2	250	0,25	Extremidade	1,632
8	+7	1,2	250	0,25	Centro	1,555
9	-6	0,4	150	0,10	Extremidade	2,161
9	-6	0,4	150	0,10	Centro	2,028
10	-6	0,4	150	0,25	Extremidade	5,068
10	-6	0,4	150	0,25	Centro	4,974
11	-6	0,4	250	0,10	Extremidade	1,356
11	-6	0,4	250	0,10	Centro	1,420
12	-6	0,4	250	0,25	Extremidade	4,823
12	-6	0,4	250	0,25	Centro	4,817
13	-6	1,2	150	0,10	Extremidade	2,953
13	-6	1,2	150	0,10	Centro	2,682
14	-6	1,2	150	0,25	Extremidade	1,432
14	-6	1,2	150	0,25	Centro	1,292
15	-6	1,2	250	0,10	Extremidade	1,090
15	-6	1,2	250	0,10	Centro	3,016
16	-6	1,2	250	0,25	Extremidade	1,160
16	-6	1,2	250	0,25	Centro	1,169

Fonte: Próprio autor.

O gráfico de Pareto da Figura 63 mostra que o maior impacto sobre o resultado de R_a foi obtido para uma combinação de raio de quina (r_ϵ) e avanço (f). Individualmente os fatores com maior influência sobre R_a foram, da maior para a menor influência: avanço (f), raio de quina (r_ϵ), velocidade de corte (v_c), ângulo de saída (γ) e posição axial cujo o efeito padronizado ficou abaixo do ponto de corte, sinalizado pela linha vertical pontilhada, e foi considerado não significativo.

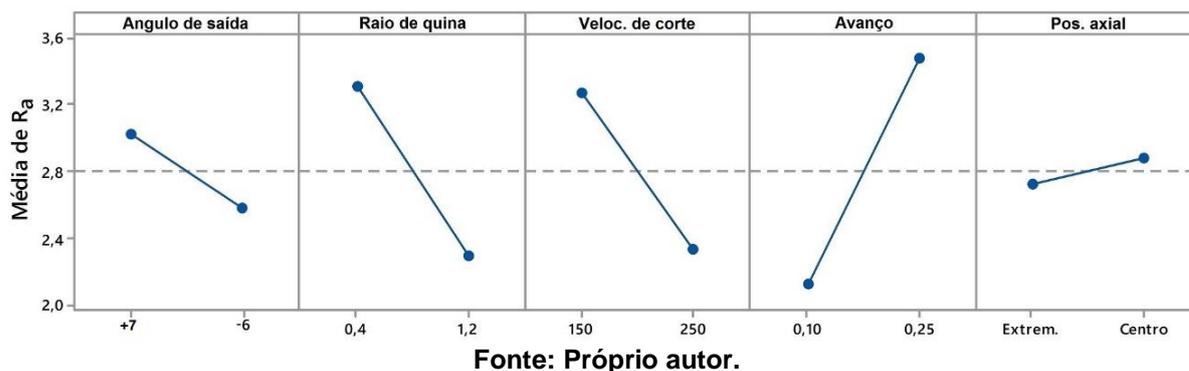
A análise conjunta do gráfico de Pareto (Figura 63) e do gráfico dos principais efeitos (Figura 64) mostra que no sentido do menor avanço e maior raio de quina foram encontradas as menores médias de R_a , e que o aumento da velocidade de corte possui efeito de reduzir R_a e que a sua influência foi quase tão intensa quanto o efeito do raio de quina. O ângulo de saída quando negativo (-6°) contribui para uma redução do R_a , porém esta contribuição foi apenas ligeiramente acima do limite da significância. O fator posição axial ficou abaixo do limite de significância de 0,05 indicando que sua influência sobre R_a não é estatisticamente relevante.

Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos cinco fatores sobre a resposta de R_a , para $\alpha=0,05$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 64 - Gráficos dos principais efeitos dos cinco fatores sobre a rugosidade R_a .



4.3 EFICÁCIA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Utilizou-se a rugosidade teórica, calculada pela Equação 5, como referência para avaliar o quanto satisfatório foi o acabamento obtido no processo de usinagem através da sua comparação com a média da rugosidade R_z calculada pela Equação 12. Os fatores de usinagem de cada uma das dezesseis barras e as rugosidades, $R_{z,média}$, R_t , e o índice I_R foram consolidados na Tabela 12.

Os dados apresentados na Tabela 12 foram utilizados para construir a análise fatorial para avaliar a influência dos fatores sobre I_R . A análise de Pareto (Figura 65) mostra que as influências dos fatores de usinagem sobre o I_R , da maior influência para a menor, foram: avanço, raio de quina, combinação de avanço e raio de quina, velocidade de corte e na sequência demais combinações destes fatores. O ângulo de saída foi o parâmetro que individualmente apresentou menor influência, uma vez que seu efeito padronizado ficou abaixo do ponto de corte ele pode ser considerado não significativo.

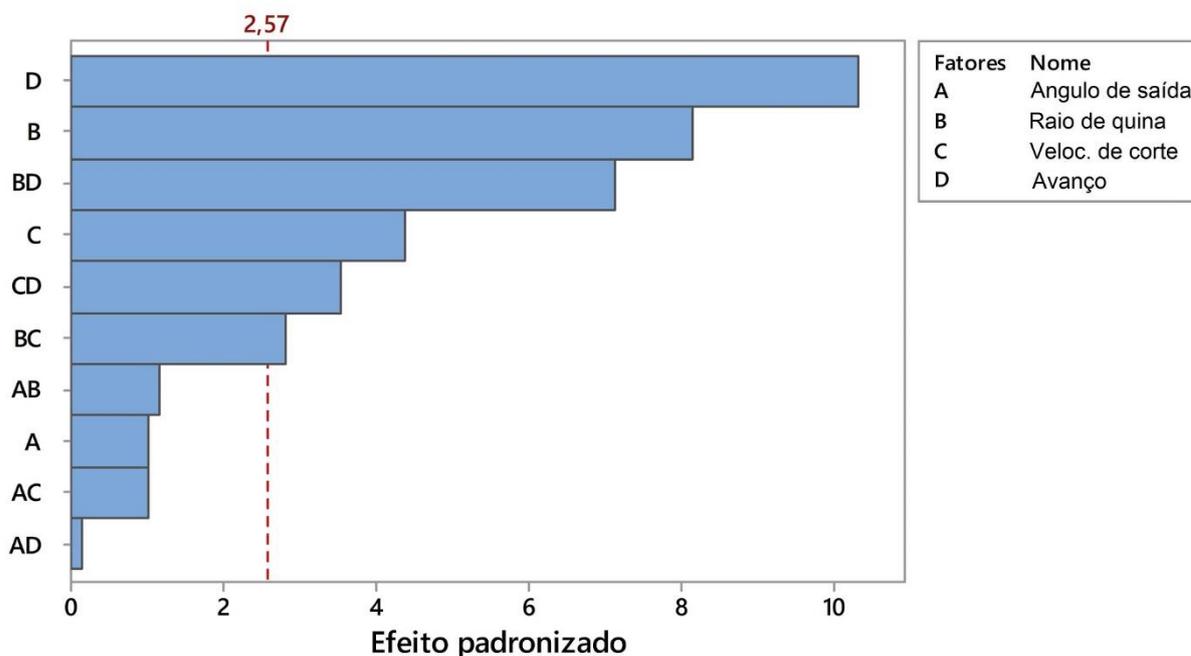
O efeito do aumento de fatores como avanço e a velocidade de corte contribuíram para redução do I_R , enquanto que o aumento do raio de quina contribuiu para o aumento do I_R . O efeito individual dos fatores estudados foi apresentado na Figura 66.

Tabela 12 - Matriz dos dados do DoE com quatro fatores como entrada e como saída o índice I_R , bem como os valores de $R_{z,média}$ e R_t utilizados para o cálculo de I_R .

BARRA (nº)	ÂNGULO DE SAÍDA (°)	RAIO DE QUINA (mm)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	AVANÇO (mm/rot)	GRUPO	$R_{z,média}$ (μm)	R_t (μm)	I_R
1	+7	0,4	150	0,10	IG	12,062	3,125	3,86
2	+7	0,4	150	0,25	RG	20,958	19,531	1,07
3	+7	0,4	250	0,10	RL	5,525	3,125	1,77
4	+7	0,4	250	0,25	RG	20,449	19,531	1,05
5	+7	1,2	150	0,10	IG	18,292	1,042	17,56
6	+7	1,2	150	0,25	IG	19,592	6,510	3,01
7	+7	1,2	250	0,10	VA	8,788	1,042	8,44
8	+7	1,2	250	0,25	RL	8,066	6,510	1,24
9	-6	0,4	150	0,10	IG	12,181	3,125	3,90
10	-6	0,4	150	0,25	RG	19,810	19,531	1,01
11	-6	0,4	250	0,10	RL	6,990	3,125	2,24
12	-6	0,4	250	0,25	RG	19,195	19,531	0,98
13	-6	1,2	150	0,10	IG	15,096	1,042	14,49
14	-6	1,2	150	0,25	RG	8,226	6,510	1,26
15	-6	1,2	250	0,10	VA	8,605	1,042	8,26
16	-6	1,2	250	0,25	RL	6,614	6,510	1,02

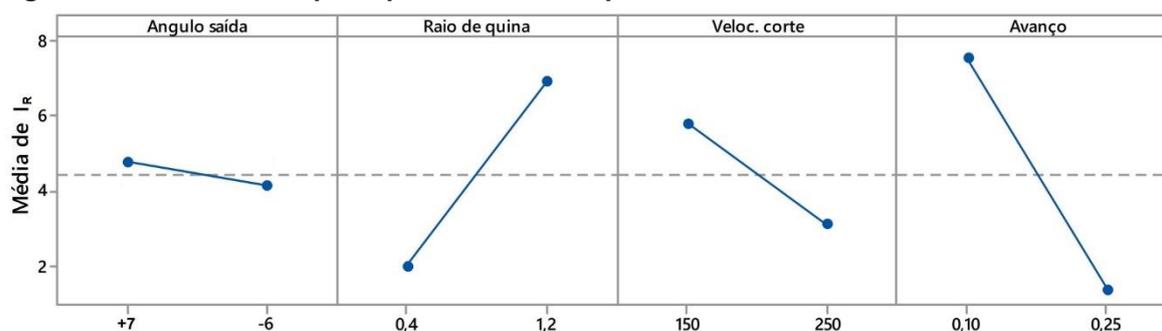
Fonte: Próprio autor.

Figura 65 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos quatro fatores sobre o índice I_R , para $\alpha=0,05$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 66 - Gráficos dos principais efeitos dos quatro fatores sobre o índice I_R .



Fonte: Próprio autor.

4.4 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

Selecionou-se um grupo menor de amostras para avaliar a influência dos quatro fatores de usinagem nas tensões residuais na superfície e abaixo da superfície das barras. As amostras selecionadas para este estudo, os fatores aplicados na sua usinagem, o grupo que elas foram alocadas e as principais informações quanto a sua rugosidade se encontram na Tabela 13.

Tabela 13 - Amostras selecionadas para a análise de e tensões residuais bem como os fatores aplicados na sua usinagem e principais informações de sua rugosidade.

AMOSTRA (nº)	ÂNGULO DE SAÍDA (°)	RAIO DE QUINA (mm)	VELOC. DE CORTE (m/min)	AVANÇO (mm/rot)	GRUPOS	$R_{a;med}$	R_t	I_R
1	7	0,4	150	0,10	IG	2,284	3,125	3,86
3	7	0,4	250	0,10	RL	0,982	3,125	1,77
4	7	0,4	250	0,25	RG	4,897	19,531	1,05
5	7	1,2	150	0,10	IG	3,559	1,042	17,56
8	7	1,2	250	0,25	RL	1,606	6,510	1,24
9	-6	0,4	150	0,10	IG	2,116	3,125	3,90
13	-6	1,2	150	0,10	IG	2,862	1,042	14,49

Fonte: Próprio autor.

Analisou-se as tensões residuais das amostras acima em duas direções. Estas direções foram chamadas de direção da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f). As direções se encontram apresentadas na Figura 39.

4.4.1 Tensões residuais na direção da velocidade de corte

As tensões residuais medidas na direção da velocidade de corte na superfície e abaixo da superfície para as sete amostras se encontram na Tabela 14. A Figura 67 mostra o gráfico dessas tensões residuais e a Figura 68 mostra as tensões cisalhantes, ambos em função da profundidade de análise de todas as amostras.

Tabela 14 - Tensões residuais (σ_r), desvio padrão (s) e tensão residual cisalhante (τ) medidos na superfície e após remoção de camadas na direção da velocidade de corte.

AMOSTRA (n°)		01	03	04	05	08	09	13
SUPERFÍCIE	σ_r (MPa)	185,8	445,7	585,7	138,5	426,3	77,8	164,5
	s (MPa)	25,3	24,6	26,7	20,1	25,5	15,4	14,4
	τ (MPa)	67,4	-50,9	-4,2	-60,4	-33,9	-66,2	-61,7
05 μm	σ_r (MPa)	126,8	272,4	400,5	55,4	375,2	11,3	92,8
	s (MPa)	13,0	17,5	14,9	10,5	12,7	12,4	13,9
	τ (MPa)	71,3	68,7	69,5	-52,0	74,1	-62,6	-63,0
10 μm	σ_r (MPa)	25,3	213,4	297,7	-73,5	265,6	-64,2	-39,9
	s (MPa)	15,3	12,2	18,3	9,7	13,7	11,0	15,6
	τ (MPa)	-54,4	-73,4	-63,4	-28,6	-69,0	45,4	-42,0
20 μm	σ_r (MPa)	-120,6	67,4	97,9	-134,3	90,6	-84,0	-136,3
	s (MPa)	13,7	10,9	11,5	8,1	10,9	8,4	9,3
	τ (MPa)	-23,7	-61,8	-68,3	6,0	-50,0	20,8	0,2
50 μm	σ_r (MPa)	-100	-114,8	-175,5	-132,7	-109,5	-41,8	-134,6
	s (MPa)	7,2	11,6	10,1	8,3	7,1	7,4	8,1
	τ (MPa)	-6,4	-8,0	-44,4	-0,6	8,6	-3,8	9,0
75 μm	σ_r (MPa)	-104,8	-98,1	-166,0	-120,6	-50,9	-40,9	-127,5
	s (MPa)	10,3	13,9	15,7	16,0	10,1	10,5	11,7
	τ (MPa)	-5,2	8,0	20,1	0,7	-14,7	1,0	4,9

Fonte: Próprio autor.

Figura 67 - Tensões residuais em função da profundidade de medição na direção da velocidade de corte (v_c) para todas as amostras.

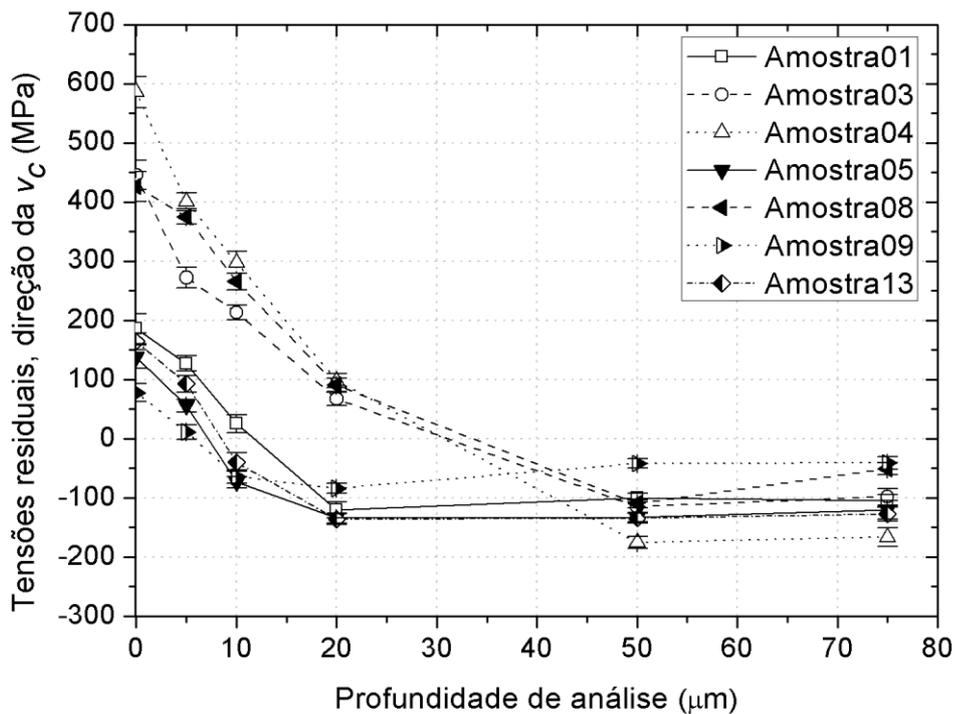
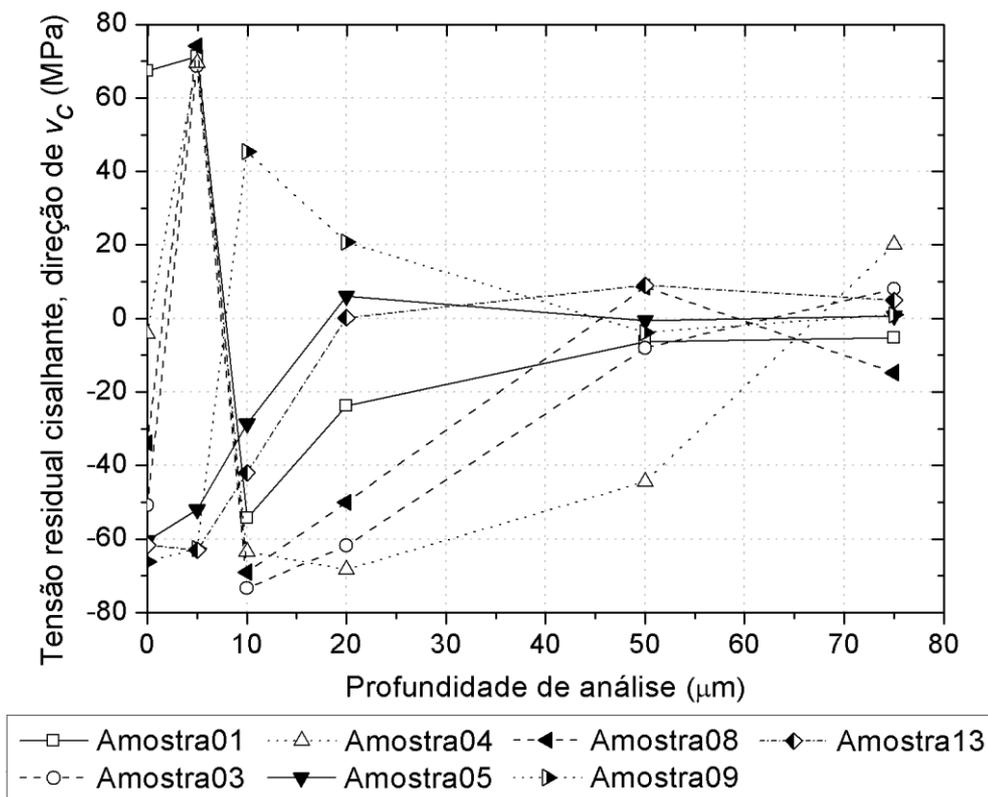


Figura 68 - Tensões residuais cisalhantes (τ) em função da profundidade de medição na direção da velocidade de corte (v_c) para todas as amostras.



4.4.2 Tensões residuais na direção do avanço

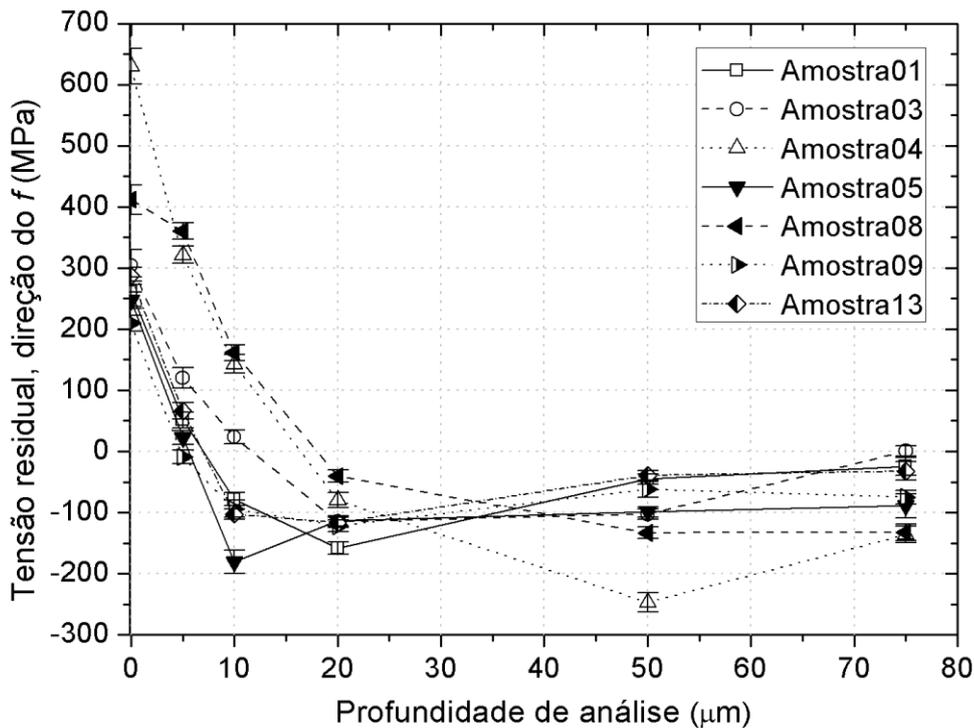
As tensões residuais medidas na direção do avanço na superfície e abaixo da superfície para as sete amostras se encontram na Tabela 15. A Figura 69 mostra o gráfico dessas tensões residuais e a Figura 70 mostra as tensões cisalhantes, ambos em função da profundidade de análise e para todas as amostras.

Tabela 15 - Tensões residuais (σ_r), desvio padrão (s) e tensão residual cisalhante (τ) medidos na superfície e após remoção de camadas na direção do avanço.

AMOSTRA (n°)		01	03	04	05	08	09	13
SUPERFÍCIE	σ_r (MPa)	260,6	304,3	629,6	247,1	411,7	209,7	286,9
	s (MPa)	24,1	26,1	29,2	13,5	24,3	12,9	14,1
	τ (MPa)	6,45	7,0	-5,4	10,9	7,5	15,9	9,3
05 μm	σ_r (MPa)	51,1	120,3	321,4	22,6	360,4	-9,5	66,0
	s (MPa)	12,9	16,7	13,9	11,3	13,4	11,3	13,2
	τ (MPa)	-9,3	-6,7	4,2	10,3	-5,3	18,3	15,1
10 μm	σ_r (MPa)	-78,2	23,6	143,0	-180,7	161,3	-94,1	-102,9
	s (MPa)	11,1	11	15,2	19,0	12,7	13,8	8,2
	τ (MPa)	6,6	18,4	8,2	8,5	14,8	-10,8	10,3
20 μm	σ_r (MPa)	-158,2	-115,2	-80,1	-113,8	-40,4	-122,1	-116,7
	s (MPa)	10,3	9,3	12,5	8,3	9,6	9,7	8,5
	τ (MPa)	1,9	16,6	15,3	-3,7	13,7	-4,8	-7,4
50 μm	σ_r (MPa)	-45,1	-102,5	-247,2	-99,1	-133,1	-62,2	-39,3
	s (MPa)	8,4	8,6	15,3	8,5	9,6	12,6	7,7
	τ (MPa)	0	2,9	3,4	4,9	7,3	1,0	5,0
75 μm	σ_r (MPa)	-24,9	0,4	-136,0	-89,2	-132,4	-74,9	-32,5
	s (MPa)	14,5	8,8	13,3	19,5	13,7	11,4	15,1
	τ (MPa)	1,5	0,9	4,1	-4,0	-5,9	3,4	6,1

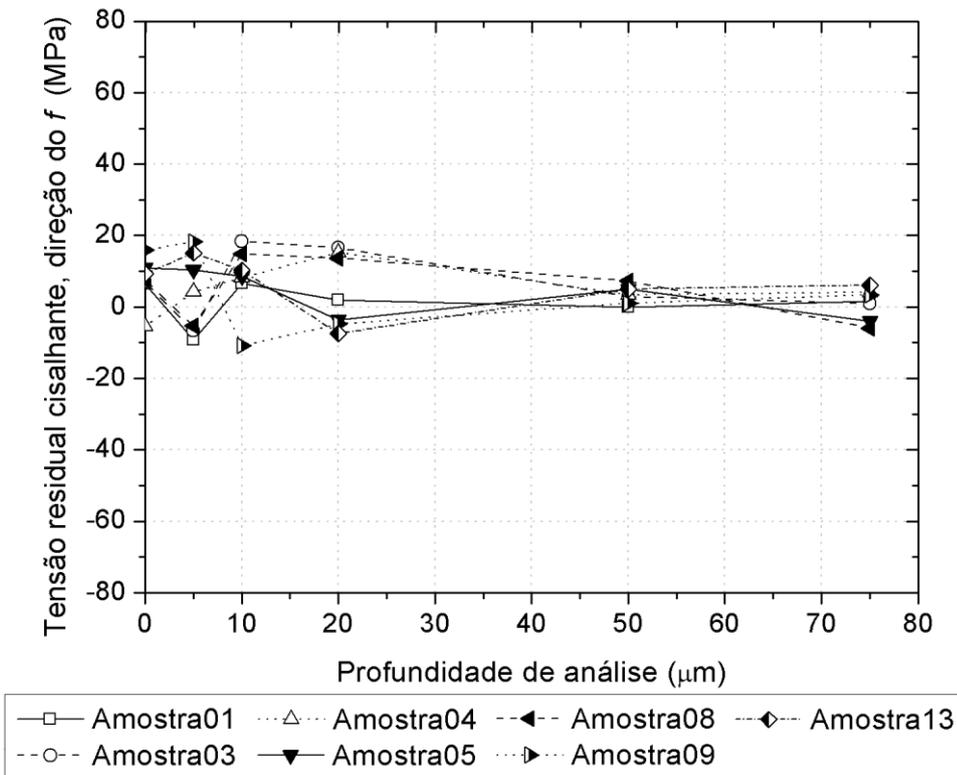
Fonte: Próprio autor.

Figura 69 - Tensões residuais em função da profundidade de medição na direção do avanço (f) para todas as amostras.



Fonte: Próprio autor.

Figura 70 - Tensões residuais cisalhantes (τ) em função da profundidade de medição na direção do avanço (f) para todas as amostras.

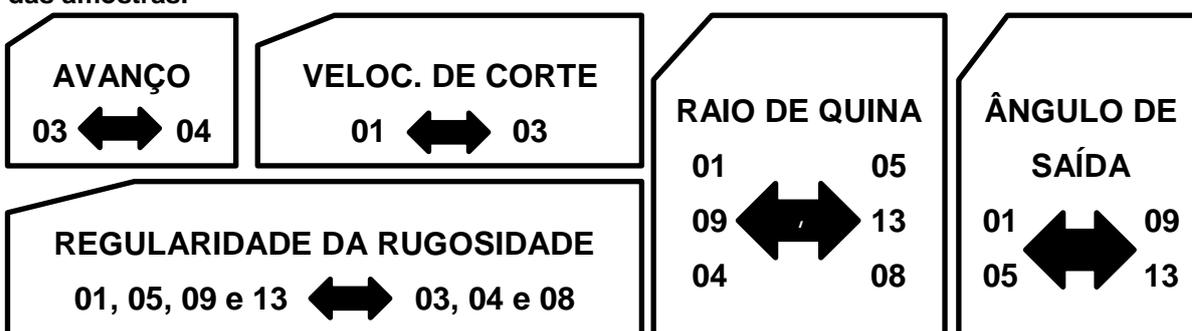


Fonte: Próprio autor.

4.5 INFLUÊNCIA DOS FATORES NAS TENSÕES RESIDUAIS

A escolha das amostras teve como objetivo maximizar as comparações possíveis entre a alteração de um fator de usinagem e sua influência no perfil de tensões residuais, bem como explorar a relação de um corte regular durante o torneamento (grupos RG e RL) com um irregular (grupos IG), Figura 71.

Figura 71 - Relação das possíveis comparações diretas da mudança de um fator de usinagem e seu efeito sobre as tensões residuais, bem como a influência da regularidade na rugosidade das amostras.

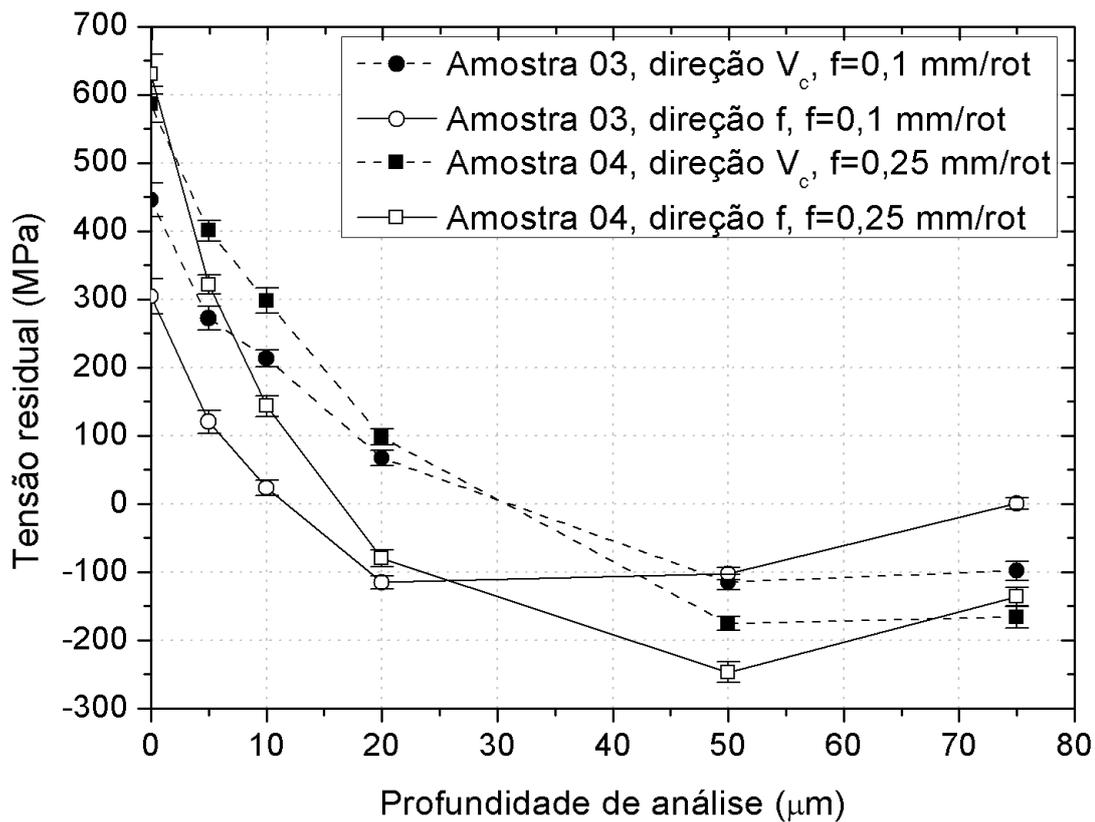


Fonte: Próprio autor.

4.5.1 Efeito do fator avanço

Com o objetivo de avaliar o efeito do fator avanço de forma independente dos demais fatores foi construído o gráfico, Figura 72, apenas com as tensões residuais medidas na amostra 03, que foi usinada com 0,1 mm/rot, e a amostra 04, que foi usinada com 0,25 mm/rot. Os demais fatores de torneamento aplicados nestas barras não foram alterados.

Figura 72 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 03 e 04 e em ambas direções de medição, nas quais o único fator que sofreu alteração foi o avanço.

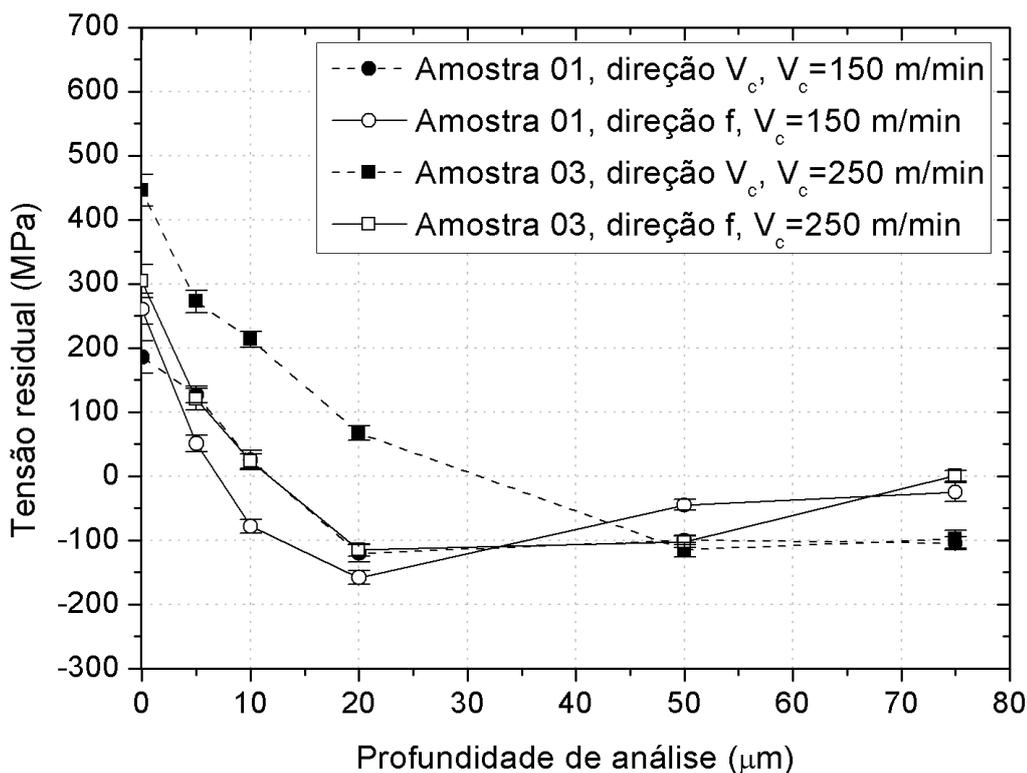


Fonte: Próprio autor.

4.5.2 Efeito do fator velocidade de corte

Similarmente ao método adotado para o avanço foi avaliada a velocidade de corte de forma independente dos demais fatores através da criação do gráfico, Figura 73, contendo apenas os resultados das tensões residuais medidas na amostra 01, que foi usinada com 150 m/min, e a amostra 03, que foi usinada com 250 m/min. Os demais fatores de torneamento aplicados nestas barras não foram alterados.

Figura 73 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01 e 03 e em ambas direções de medição, nas quais o único fator que sofreu alteração foi a velocidade de corte.

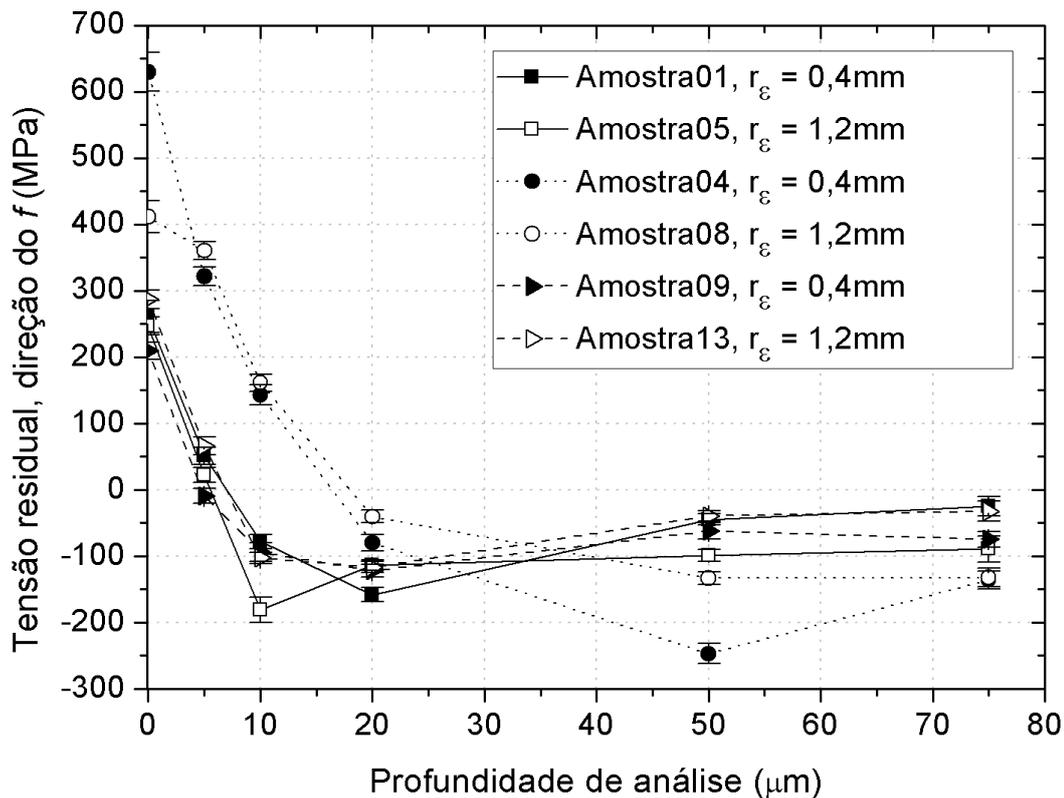


Fonte: Próprio autor.

4.5.3 Efeito do fator raio de quina

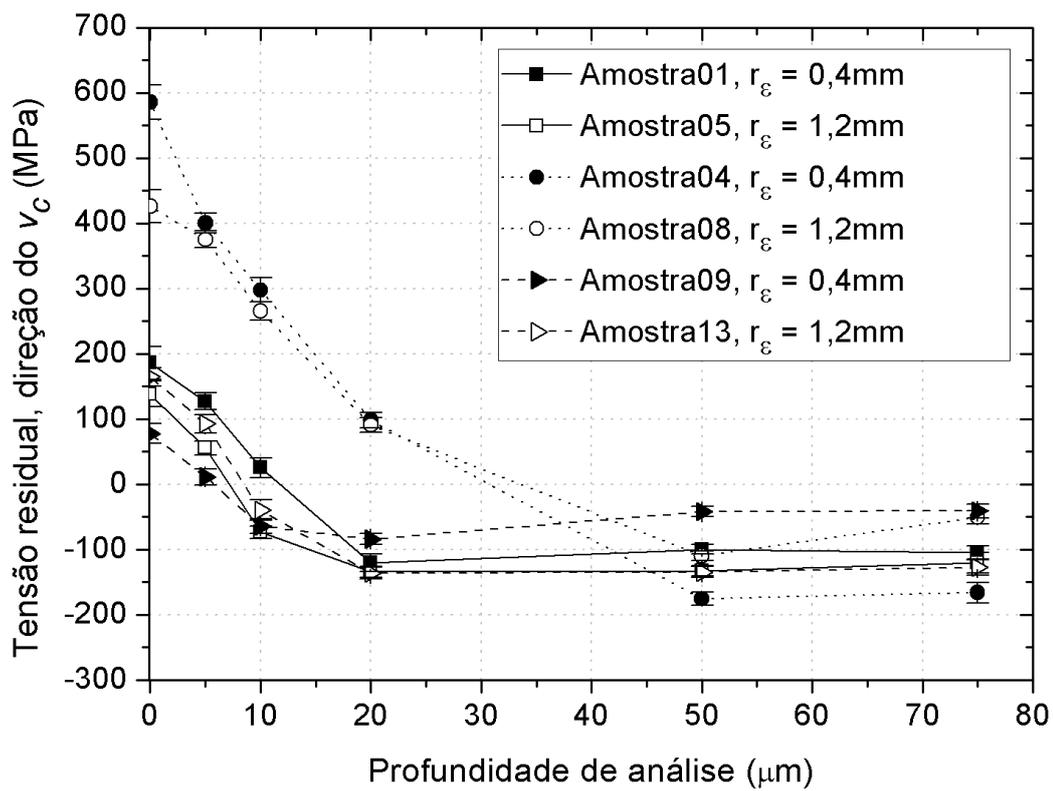
A avaliação do fator raio de quina (r_ϵ) sobre as tensões residuais foi realizada com um maior número de comparações diretas que os demais fatores. Desta forma foram criados dois gráficos que comparam o efeito deste fator, um na direção do avanço (Figura 74) e outro na direção da velocidade de corte (Figura 75). Em ambos os gráficos ao comparar a curva da amostra 01 contra 05, ou da amostra 04 contra 08 ou ainda da amostra 09 contra 13 estamos avaliando apenas a alteração do fator r_ϵ de 0,4 mm para 1,2 mm, respectivamente. Os demais fatores de torneamento aplicados nestas barras não foram alterados quando realizadas as comparações sugeridas.

Figura 74 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01 contra 05, 04 contra 08 e 09 contra 13 para avaliação do efeito da alteração do r_ϵ de 0,4 mm para 1,2 mm na direção do avanço. Os demais fatores não foram alterados entre as comparações sugeridas.



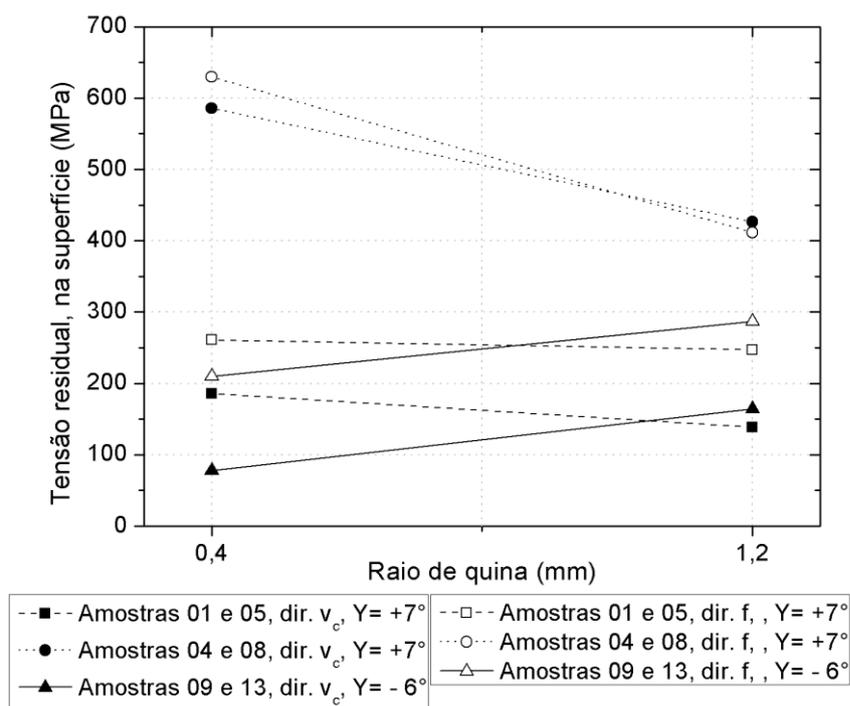
As tensões residuais na superfície, em ambas direções, foram agrupadas de forma a facilitar análise do efeito da alteração do r_ϵ . Nesta a comparação as amostras 01 contra 05 e 04 contra 08 apresentaram uma curva decrescente quando o r_ϵ foi de 0,4 mm para 1,2 mm. Este comportamento foi oposto quando comparadas as curvas das amostras 09 contra a 13 que apresentaram um aumento na tensão residual em função do aumento do r_ϵ (Figura 76).

Figura 75 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01 contra 05, 04 contra 08 e 09 contra 13 para avaliação do efeito da alteração do r_ϵ de 0,4 mm para 1,2 mm na direção da velocidade de corte. Os demais fatores não foram alterados entre as comparações sugeridas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 76 - Comparação das tensões residuais na superfície para amostras usinadas com apenas o r_ϵ distinto.

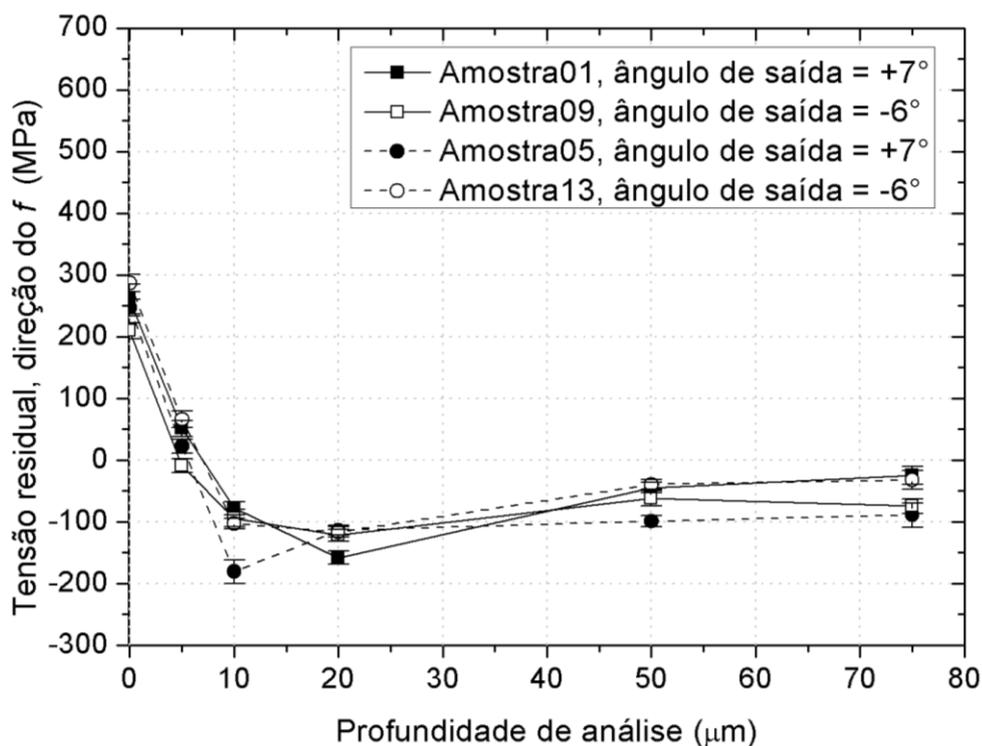


Fonte: Próprio autor.

4.5.4 Efeito do fator ângulo de saída

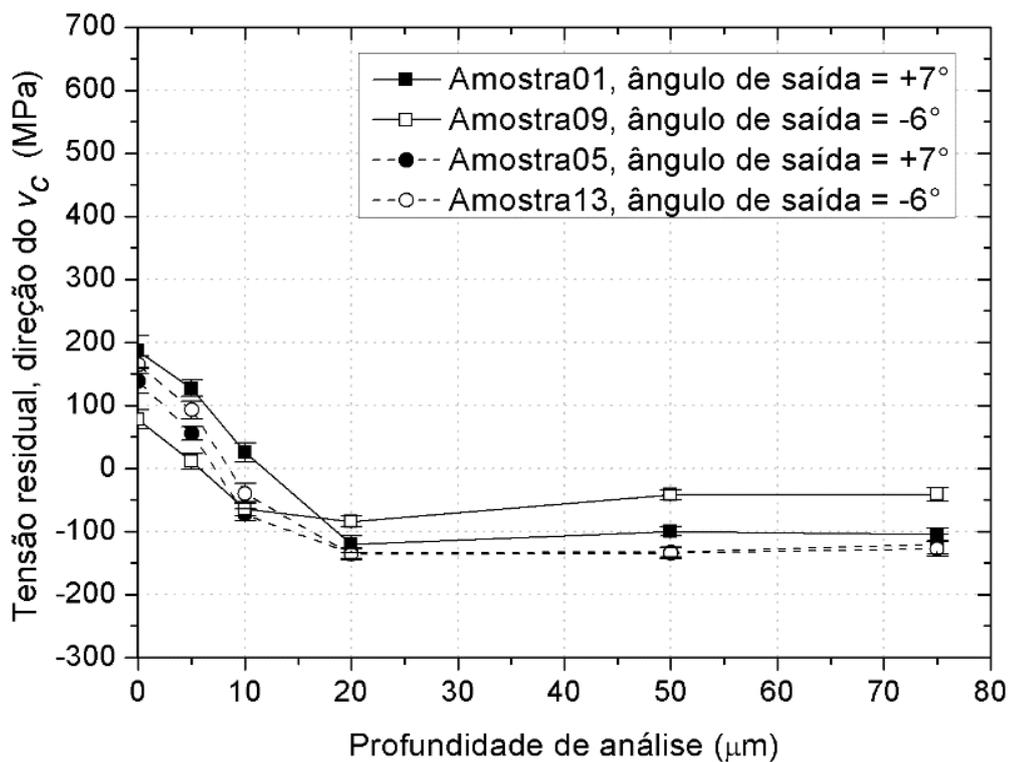
Realizou-se a avaliação do fator ângulo de saída (γ) sobre as tensões residuais por meio da comparação direta da amostra 01 contra a 09 e da amostra 05 contra a 13. Desta forma foram criados dois gráficos que comparam o efeito deste fator, um na direção do avanço (Figura 77) e outro na direção da velocidade de corte (Figura 78). Em ambos os gráficos ao realizar a comparação sugerida se está avaliando apenas a alteração do fator ângulo de saída de 7° para -6° . Os demais fatores de torneamento aplicados nestas barras não foram alterados quando realizadas as comparações sugeridas.

Figura 77 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01 contra 09 e 05 contra 13 para avaliação do efeito da alteração do ângulo de saída de 7° para -6° na direção do avanço. Os demais fatores não foram alterados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 78 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01 contra 09 e 05 contra 13 para avaliação do efeito da alteração do ângulo de saída de 7° para -6° na direção da velocidade de corte. Os demais fatores não foram alterados.



Fonte: Próprio autor.

4.5.5 Tensões residuais em superfícies regulares e irregulares

Alguns conjuntos de fatores do torneamento promoveram condições de corte capazes de gerar superfícies regulares enquanto que outros conjuntos de fatores geraram superfícies irregulares. Realizou-se a avaliação de como estes conjuntos de fatores influenciaram o perfil de tensões residuais ao comparar o perfil das amostras 03, 04 e 08 (regular) contra as amostras 01, 05, 09 e 13 (irregular). Desta forma foram criados dois gráficos que comparam o efeito deste fator, um na direção do avanço (Figura 79) e outro na direção da velocidade de corte (Figura 80). Em ambos os gráficos as curvas das amostras que apresentaram superfície regular se encontram unidas por uma linha pontilhada enquanto que as curvas das amostras que apresentaram superfície irregular se encontram unidas por uma linha contínua.

Figura 79 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01, 05, 09 e 13 contra 03, 04 e 08 para avaliação do efeito de um torneamento cujo os diferentes conjuntos de fatores foram capazes de produzir uma superfície regular contra um que produziu uma superfície irregular. Na direção de medição do avanço.

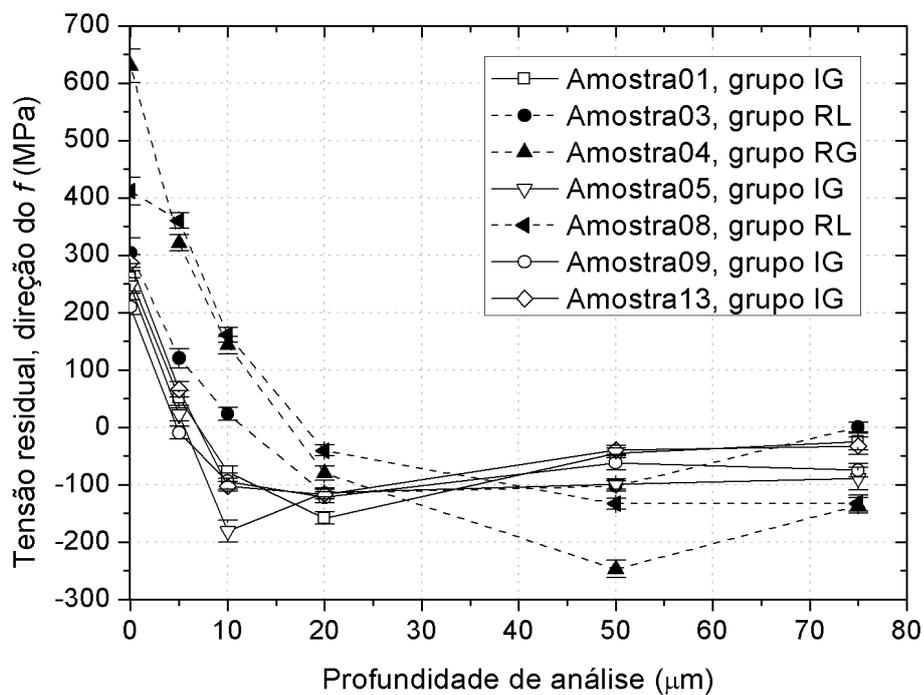
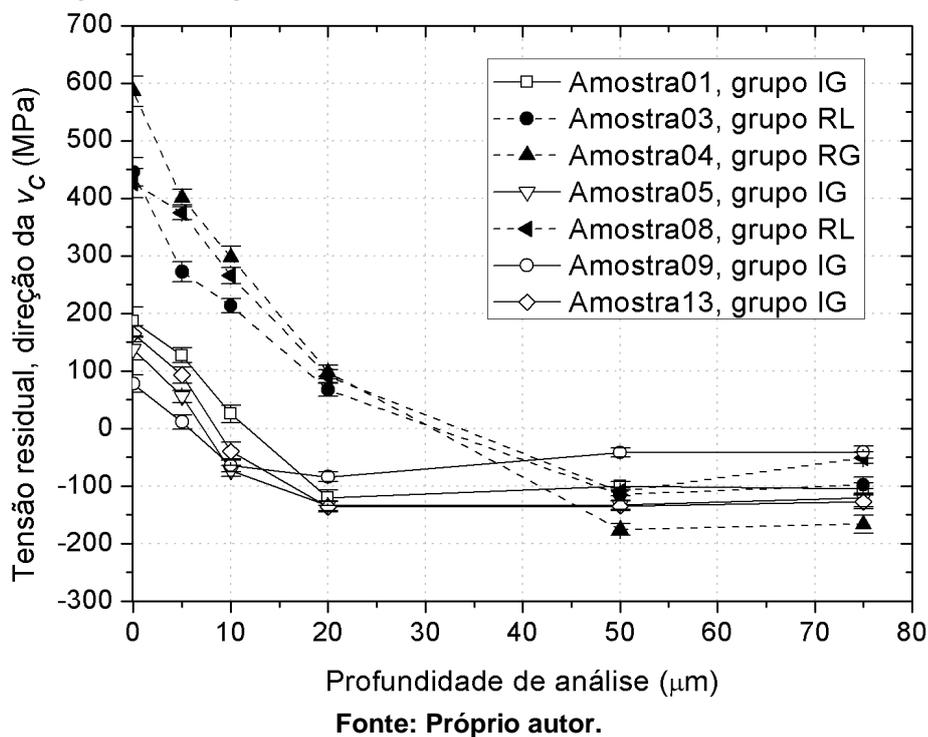


Figura 80 - Comparação entre o perfil das tensões residuais das amostras 01, 05, 09 e 13 contra 03, 04 e 08 para avaliação do efeito de um torneamento cujo os diferentes conjuntos de fatores foram capazes de produzir uma superfície regular contra um que produziu uma superfície irregular. Na direção de medição da velocidade de corte.



4.6 PERFIL DE MICRODUREZA

A profundidade de medição da dureza foi definida para coincidir com os pontos de medição das tensões residuais. Não foi possível medir a microdureza aos 5 μm devido a sua proximidade da superfície em relação com a largura da indentação. A dureza das amostras 03 e 09 foi medida na superfície e nas profundidades de 10, 20, 50 e 75 μm . Os dados das medições de dureza em função da profundidade se encontra consolidado na Tabela 16.

Tabela 16 - Dureza em diferentes profundidades das amostras 03 e 09.

Profundidade de análise (μm)	Amostra 03		Amostra 09	
	Média (HV)	s (HV)	Média (HV)	s (HV)
Superfície	354,1	11,6	349,6	10,7
10	306,2	8,2	250,1	13,0
20	257,4	10,1	259,1	8,3
50	267,9	8,5	248,4	5,4
75	267,8	8,4	236,4	6,9

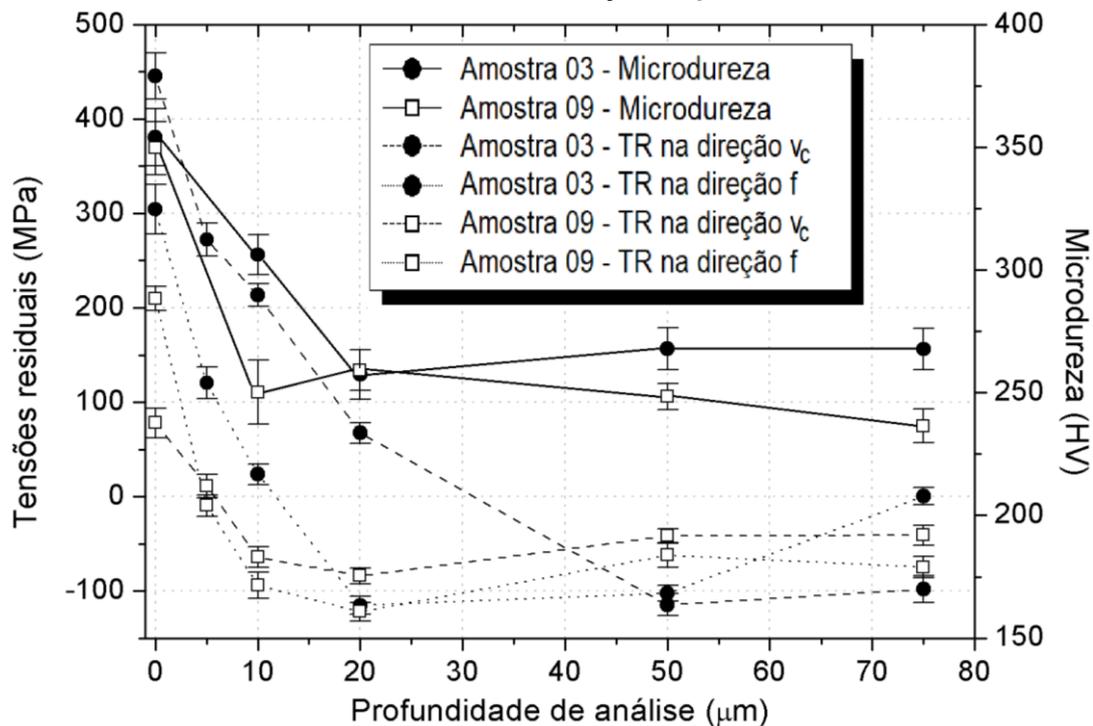
Fonte: Próprio autor.

A amostra 03 apresentou microdureza na superfície similar a amostra 09, 354,1 HV e 349,6 HV respectivamente. Enquanto que a 10 μm de profundidade a microdureza da amostra 03 foi significativamente maior, 306,2 HV frente a 250,1 HV da amostra 09. As medições de 20 e 50 μm apresentaram valores próximos. Já aos 75 μm a amostra 03 apresentou valor similar as profundidades próximas e a microdureza que foi medida a 1 mm da superfície, que foi de 269,0 HV. A amostra 09 por sua vez apresentou uma microdureza menor aos 75 μm de profundidade, que foi de 236,4 HV.

As medidas de dureza foram agrupadas no gráfico (Figura 81) em conjunto com os valores de tensões residuais em função da profundidade. Nessa análise é possível verificar que em regiões como a superfície, que foram medidas as maiores tensões residuais (em módulo) também foi encontrado as maiores durezas. Na profundidade de 10 μm a amostra 03 ainda apresenta tensões residuais, na direção de v_c , de 213

MPa e dureza de 306,2 HV enquanto que a amostra 09 apresenta tensões residuais que, em módulo, entre 50 e 100 MPa e dureza de 250 HV. Nas profundidades de 20, 50 e 75 μm as tensões residuais se encontram, em módulo, entre 0 e 120 MPa enquanto que as durezas nestas regiões tiveram valores próximos, entre 236 e 270 HV.

Figura 81 - Tensões residuais e microdureza em função da profundidade das amostras 03 e 09.



Fonte: Próprio autor.

5 DISCUSSÕES

O presente capítulo trata da discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior. Essa discussão foi organizada de forma a permitir o cruzamento dos resultados obtidos sobre cada propriedade em estudo independente da ordem de execução das análises.

5.1 FATORES DE USINAGEM FRENTE A RUGOSIDADE

A separação das amostras por grupos permitiu analisar os efeitos semelhantes que uma combinação adequada ou não de fatores de usinagem pode causar. Em especial as amostras 07 e 15 do grupo VA apresentaram I_R elevado, 8,44 e 8,26, e que também apresentaram rugosidade média R_a diferente ao longo do seu comprimento. As amostras do grupo IG apresentaram os maiores I_R , de 3,01 a 17,56. E as amostras que visualmente apresentaram uma superfície regular (grupo RL e RG) tiveram uma variação do I_R de 0,98 a 2,24. Esta análise permitiu identificar que os fenômenos de processo que prejudicaram o acabamento das peças torneadas ocorreram na maioria dos processos, porém com magnitudes diferentes. E ainda, verifica-se que possivelmente existe um limite, no qual estes fenômenos comprometem a regularidade das superfícies. Nas análises realizadas esse limite se encontra entre o I_R de 2,24 a 3,01. É provável que dentre as causas para a obtenção das superfícies irregulares se encontra a influência de vibrações, possivelmente do tipo *chatter*, conforme descrita por Tansel *et al* (1992) e Siddhpura e Paurobally (2012).

Por fim a análise metalográfica (capítulo 4.1.5) evidenciou a distinção da rugosidade de uma amostra do grupo RL (amostra 03) em comparação com uma amostra do grupo IG (amostra 09), mesmo quando ambas torneadas com um conjunto de parâmetros que possuem a mesma R_t . Nesta análise tanto foi possível distinguir a distância irregular entre as linhas de avanço quanto a amplitude entre picos e vales

quando comparados com a amostra regular que apresentou linhas de avanço regulares e uma distância entre picos e vale similar a calculada pela R_t .

5.1.1 Posição axial

As barras 07 e 15 foram usinadas com os mesmos fatores, com exceção do ângulo de saída da ferramenta de corte que foi $+7^\circ$ para a barra 07 e -6° para a barra 15. É provável que o conjunto de fatores de usinagem aplicado no torneamento das duas barras resultaram em um modo de vibração específico. Esse modo de vibração por possuir sua magnitude influenciada pela distância, em relação a extremidade da barra, deu origem a um acabamento diferente nas amostras ao longo do seu comprimento.

Este acabamento só foi observado nas barras 07 e 15 indicando que este modo de vibração não ocorreu nas demais amostras. E ainda, verificou-se pela análise fatorial e o gráfico de Pareto (Figura 63) que a influência da posição axial de medição da rugosidade não foi significativa, sendo assim é seguro afirmar que para todas as demais amostras a rugosidade média não variou significativamente ao longo do seu comprimento.

5.1.2 Avanço

Dentre os fatores de usinagem estudados, o avanço foi o parâmetro que individualmente mostrou maior influência tanto sobre R_a quanto sobre I_R . A sua influência sobre R_a pode ser prevista pela Equação 5, que informa que a rugosidade teórica é proporcional ao quadrado do avanço ($R_t \propto f^2$), ou seja, em um processo de torneamento para obtenção de uma rugosidade baixa deve-se utilizar avanços pequenos. Este comportamento foi confirmado pelo gráfico dos principais efeitos do avanço sobre R_a , Figura 64.

Por outro lado, avanços pequenos resultaram em um elevado I_R , conforme verificado na Figura 66, ou seja, ao aplicar um avanço pequeno com a intenção de obter uma baixa rugosidade foram criadas condições para ocorrência de fatores que resultaram em prejuízo na qualidade do acabamento. Segundo Trent e Wright (2000) a redução do avanço no torneamento reduz a força contra a ferramenta de corte e em alguns casos pode comprometer a estabilidade do sistema e induzir vibrações, como resultado se observa redução da qualidade do acabamento.

Desta maneira por ser o parâmetro com efeito padronizado mais intenso, e possuir efeito concorrente sobre R_a e I_R , a escolha adequada do avanço se torna fundamental para o controle do acabamento da peça usinada, seu valor deve satisfazer o acabamento pretendido da peça, porém não deve comprometer a eficácia do processo de torneamento, induzindo um I_R elevado.

O avanço também foi encontrado predominante sobre os demais fatores a respeito de sua influência sobre a rugosidade por Capello (2005) e Muñoz-escalona e Cassier (1998). Bem como foi encontrado por Gunnberg *et al* (2006), Capello (2005), Muñoz-escalona e Cassier (1998) que é possível melhorar o acabamento de uma superfície usinada por torneamento, reduzindo sua rugosidade, a partir da redução do avanço e aumento do raio de quina e velocidade de corte.

5.1.3 Raio de quina

É possível prever a influência do raio de quina sobre a rugosidade teórica pela Equação 5, sendo que este é inversamente proporcional a rugosidade teórica ($R_t \propto 1/r_\epsilon$), ou seja, para obtenção de uma rugosidade teórica baixa se faz necessário utilizar um raio de quina alto. Este comportamento foi confirmado pelo gráfico dos principais efeitos do raio de quina sobre R_a , Figura 64.

O efeito do raio de quina sobre I_R foi concorrente ao seu efeito sobre R_t , ou seja, ao aumentarmos o raio de quina com o objetivo de reduzirmos a rugosidade teórica inevitavelmente temos como consequência um aumento no I_R (Figura 66). A

abordagem indicada para determinação do raio de quina deve ser similar à adotada para o avanço.

5.1.4 Velocidade de corte

O cálculo da rugosidade teórica, Equação 5, não depende do termo velocidade de corte. Porém a partir da análise do gráfico de Pareto (Figura 63) é possível verificar que a velocidade de corte possui um efeito padronizado sobre a rugosidade R_a quase tão intenso quanto o raio de quina. Os gráficos dos principais efeitos da velocidade de corte sobre R_a (Figura 64) e sobre I_R (Figura 66) mostram que o aumento da velocidade de corte resultou na redução de ambos R_a e I_R . Diferentemente do avanço e raio de quina a manipulação da velocidade de corte no torneamento pode ser utilizada para obter simultaneamente uma redução do I_R e da R_a .

Segundo Ferraresi (2013) em velocidades de corte baixas ocorre a formação de uma aresta postiça de corte (ou gume postiço). O material depositado transitoriamente na superfície de saída da ferramenta tende a sair na forma de partículas que aderem tanto ao cavaco quanto a superfície usinada prejudicando sensivelmente o acabamento da superfície. Geralmente este problema pode ser amenizado com o aumento da temperatura do corte, que pode ser obtido através do aumento da velocidade de corte.

5.1.5 O ângulo de saída

O ângulo de saída apresentou um efeito discreto sobre a rugosidade R_a , indicando que o ângulo de saída negativo (-6°) influenciou na obtenção de um melhor acabamento das amostras torneadas. Porém seu efeito padronizado foi apenas ligeiramente acima do limite de significância, conforme mostrado no gráfico de Pareto (Figura 63). Já para a análise do I_R o ângulo de saída ficou abaixo do limite de significância, também mostrado no gráfico de Pareto (Figura 65).

É possível que os valores escolhidos para análise do ângulo de saída foram muito próximos e por esta razão não foi encontrada influência em sua alteração ou realmente o efeito padronizado do ângulo de saída sobre R_a seja pequeno quando comparado aos demais fatores em estudo e sobre I_R não seja significativa.

5.2 DEFINIÇÃO DA RUGOSIDADE ALVO EM PROJETO

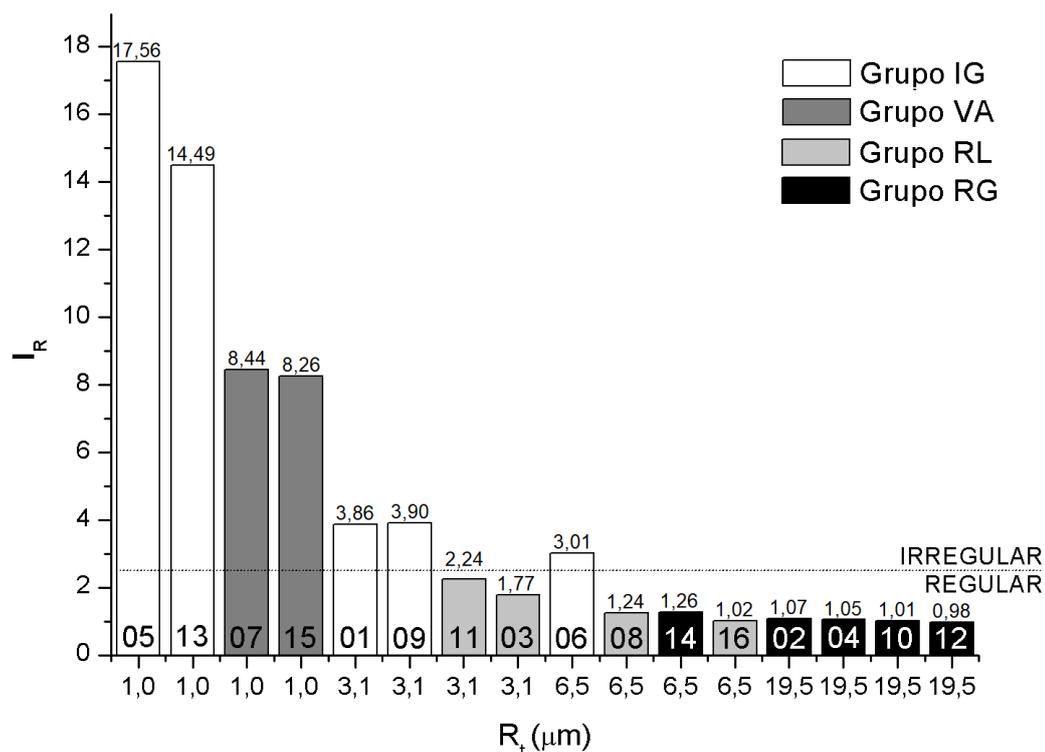
Dentre os requisitos a serem atendidos durante o planejamento de um processo de usinagem se destaca a escolha de fatores que combinados produzam o acabamento (R_a ou R_z) conforme especificado no projeto. Com o objetivo de comparar o atendimento da rugosidade teórica do processo de torneamento das barras estudadas construiu-se um gráfico que relaciona R_t com I_R de forma que as amostras com R_t similares foram agrupadas (Figura 82).

O atendimento do requisito de rugosidade pode ser bastante facilitado quando a rugosidade alvo é relativamente elevada, conforme pode ser verificado pelas amostras 02, 04, 10 e 12 que possuem as maiores rugosidades teórica ($\sim 19,5 \mu\text{m}$) e foi possível alcançar um I_R próximo a 1,0. E também por algumas das amostras que tinham rugosidade teórica de $\sim 6,5 \mu\text{m}$, são elas as amostras 08, 14 e 16. Todas as amostras citadas neste exemplo tiveram um acabamento regular.

Por outro lado, o atendimento deste requisito pode ser bastante difícil quando a rugosidade alvo é reduzida, como por exemplo a rugosidade teórica de $\sim 1,0 \mu\text{m}$ que foi o objetivo da usinagem das amostras 05, 07, 13 e 15. Neste caso o I_R das amostras foi elevado e resultou em acabamentos grosseiros e irregulares.

Desta forma fica evidente que existe uma adequação entre o valor limite de rugosidade que pode ser alcançada com o processo de usinagem adotado, composto por: máquina de usinagem, sistema de fixação, material do produto a ser usinado, geometria do produto (relação diâmetro vs comprimento) e com os fatores de usinagem dentro dos limites estabelecidos neste trabalho.

Figura 82 – Gráfico de I_R em função de R_t para as dezesseis amostras.



Fonte: Próprio autor.

Este valor limite de R_t se encontra por volta dos 3,1 μm e os parâmetros de usinagem devem ser semelhantes aos adotados nas amostras 03 e 11. A tentativa de alcançar uma rugosidade teórica mais baixa ou mesmo a utilização de outros parâmetros de usinagem (como os adotados nas amostras 01 e 09) provavelmente resultaram na perda da estabilidade do processo e como consequência teremos uma superfície irregular e um I_R elevado, prejudicando sensivelmente o acabamento do produto.

5.3 FATORES DE USINAGEM FRENTE A TENSÃO RESIDUAL E DUREZA

Os gráficos apresentados nas Figura 67 e Figura 69 mostram o perfil de tensões residuais em função da profundidade de análise de todas as amostras. A avaliação inicial das curvas presente nesses gráficos mostra um perfil similar com a representação ilustrativa proposta por Gunnberg *et al* (2006). Em especial o formato

de parábola voltada para baixo seguido por uma tendência de estabilização a direita a partir da profundidade de 50 μm . Esta tendência de estabilização representa a profundidade máxima que o torneamento é capaz de influenciar o perfil das tensões residuais dos componentes.

Essa tendência de estabilização também foi confirmada na Figura 68 e Figura 70 que mostram o perfil de tensões residuais cisalhantes nas quais é possível observar a tendência de agrupamento das curvas quando se aproximam da profundidade de 50 μm e na profundidade de 75 μm é observado valores próximos para todas as amostras. Resultados similares foram encontrados por Jacobson *et al* (2002), Dahlman *et al* (2004), Liu *et al* (2004), Gunnberg *et al* (2006) e Guo *et al* (2010).

A análise de microdureza das amostras 03 e 09 evidenciou o efeito do torneamento sobre microestrutura e sua relação com as tensões residuais. Em especial nas medidas na superfície e na profundidade de 10 μm (Tabela 16). Onde para a amostra 03 foram observadas durezas de 354,1 e 306,2 HV, respectivamente, mostrando que o torneamento causou alteração significativa na microdureza até esta profundidade. E para a amostra 09 que obteve microdurezas de 349,6 e 250,1 HV, respectivamente, mostrando que a diferença entre os parâmetros de torneamento utilizados nestas duas amostras alterou sensivelmente a profundidade em que a microestrutura foi modificada.

As tensões residuais trativas encontradas na superfície, com magnitudes de até 629 MPa, contrastam com a tensão residual de 370 MPa encontrado por Cabrera *et al* (2015) em uma amostra de aço 1045 normalizada. Por outro lado, se assemelham aos 650 MPa reportado por Capello (2006) para amostras de aço 1045 endurecido. Ambos autores citados acima realizaram seus experimentos em amostras de aço 1045 após torneamento com avanço 0,25 mm/rot e outros parâmetros de corte semelhantes aos aplicados neste estudo.

Estas diferenças provavelmente são provenientes da condição inicial do material utilizado no estudo. Segundo Capello (2005) e Gunnberg *et al* (2006) as propriedades mecânicas iniciais do material influenciam fortemente seu perfil de tensões residuais, sendo que quanto maior suas propriedades mecânicas maior também será o nível de suas tensões residuais.

5.3.1 O avanço

A partir da análise do gráfico presente na Figura 69, que mostra os perfis de tensões residuais na direção do avanço, é possível verificar que as amostras 04 e 08 (únicas torneadas com 0,25 mm/rot) representam as duas maiores tensões residuais na superfície encontradas nessa direção (629,6 e 411,7 MPa respectivamente). De maneira análoga a Figura 67 mostra os perfis de tensões residuais na direção da velocidade de corte e neste gráfico é possível verificar que novamente as amostras 04 e 08 se encontram entre as três amostras com maiores tensões residuais na superfície.

É possível analisar o efeito do avanço isoladamente por meio da comparação entre os perfis de tensões residuais das amostras 03 e 04, Figura 72. Na direção do avanço verifica-se um aumento da tensão residual na superfície de 304,3 MPa (amostra 03, $f=0,1$ mm/rot) para 629,6 MPa (amostra 04, $f=0,25$ mm/rot). Foi observado também na direção da velocidade de corte está menor tensão residual na superfície da amostra 03 (445,7 MPa) em relação a 04 (585,7 MPa).

Este efeito do avanço sobre as tensões residuais influenciou o perfil abaixo da superfície até a profundidade de 20 μm , em ambas as direções de medição. Nas camadas mais profundas, abaixo de 50 μm , é possível verificar que as curvas da amostra 03 e 04 tendem a se agrupar e alcançar valores próximos.

Tensões trativas de maior intensidade na superfície na direção do avanço e um aumento discreto das tensões na direção da velocidade de corte foram reportadas por Capello (2005), Gunnberg *et al* (2006), Cabrera *et al* (2015) e Dahlman *et al* (2004) como consequência da manipulação do avanço no torneamento.

5.3.2 Velocidade de corte

Por meio da análise do gráfico presente na Figura 67, que mostra os perfis de tensões residuais na direção da velocidade de corte, é possível verificar que as

amostras 03, 04 e 08 (todas torneadas com $v_c=250$ m/min) representam as três maiores tensões residuais na superfície encontradas nessa direção (445,7; 585,7 e 426,3 MPa respectivamente). Esse comportamento não se repetiu no gráfico presente na Figura 69, que mostra os perfis de tensões residuais na direção do avanço, e coloca o perfil de amostra 03 agrupado com todas as demais amostras que foram torneadas com $v_c=150$ m/min.

Na direção da velocidade de corte foi confirmado pelo gráfico mostrado na Figura 73 o expressivo aumento da tensão residual nessa direção quando comparamos o perfil da amostra 01, 185,8 MPa e $v_c=150$ m/min, contra a amostra 03, 445,7 MPa e $v_c=250$ m/min. Abaixo da superfície o efeito da velocidade de corte foi perceptível até a profundidade de 50 μm , enquanto que o fator avanço mostrou influência apenas até a profundidade de 20 μm , aproximadamente.

Já na direção do avanço o gráfico da Figura 73 mostrou que a variação da velocidade de corte pouco influenciou o valor da tensão residual na superfície, que variou de 260,6 MPa (amostra 01) para 304,3 MPa (amostra 03). Sendo que o perfil das tensões residuais abaixo da superfície encontrado para ambas amostras possui um formato e assume valores equivalentes.

Essa forte influência da velocidade de corte sobre o perfil de tensões residuais na direção de v_c e uma influência nula na direção do avanço foi reportado por Jacobson *et al* (2002), Gunnberg *et al* (2006), Cabrera *et al* (2015).

Foi reportado por Ferraresi (2013) e Cabrera *et al* (2015) que em elevados valores de v_c deve ser observado uma redução das tensões residuais na superfície. A velocidade de corte necessária para observar este fenômeno para o aço 1045 se encontra entre 500 e 750 m/min, por esta razão este efeito não foi observado.

5.3.3 O raio de quina

O efeito do raio de quina sobre o perfil de tensões residuais não se apresentou tão significativo quanto o efeito do avanço ou da velocidade de corte. Em ambas direções de análise é possível verificar um pequeno aumento das tensões trativas na

superfície e um pequeno deslocamento das curvas em camadas mais profundas, até 20 μm , mantendo esta diferença de maior tensão residual nas amostras usinadas com $r_\epsilon = 0,4$ mm em comparação com as de $r_\epsilon = 1,2$ mm, para as curvas 01 contra 05 e 04 contra 08, e um efeito exatamente oposto quando comparamos as amostras 09 contra 13 (Figura 74 e Figura 75).

Esta alteração do comportamento ficou evidente quando observamos o gráfico apresentado na Figura 76 que mostra que as amostras com $\gamma = +7^\circ$ tiveram uma redução das tensões residuais na superfície com o incremento do r_ϵ , enquanto que as amostras com $\gamma = -6^\circ$ tiveram um incremento das tensões com o mesmo incremento do r_ϵ . Gunnberg *et al* (2006) também observou esta mudança do efeito de r_ϵ sobre as tensões residuais em função do valor do γ . Capello (2005) encontrou uma influência similar do r_ϵ sobre as tensões residuais, porém seu estudo inclui um valor único para o ângulo de saída.

5.3.4 O ângulo de saída

A comparação dos perfis de tensão residual das amostras 01 contra 09 e 05 contra 13, na direção do avanço (Figura 77), mostraram valores iniciais e formato da curva equivalentes. Com única exceção de um pico tensão compressiva de maior intensidade na profundidade 10 μm para a amostra 05 ao compara-la com a 13, e aos 20 μm para a amostra 01 ao compara-la com a 09. Sendo que ambas amostras 01 e 05 foram usinadas com $\gamma = +7^\circ$ enquanto que as amostras 09 e 13 foram usinadas com $\gamma = -6^\circ$.

Na direção da velocidade de corte (Figura 78) a comparação das curvas das amostras 05 contra a 13 mostrou também perfis equivalentes, com a tensão na superfície de 138,5 e 164,5 MPa, respectivamente. Já para a comparação das amostras 01 contra 09 foi encontrado 185,8 e 77,8 MPa, respectivamente, indicando uma provável influência maior do mecanismo mecânico de geração de tensões residuais no torneamento da amostra 09, que foi realizado com $\gamma = -6^\circ$.

Segundo Jacobson *et al* (2002), que realizou ensaios com ângulos de saída negativos variando de -6° até -61° , a aplicação de γ negativo no torneamento favorece o mecanismo mecânico de geração de tensões residuais. Este mecanismo geralmente é responsável por criar uma região com elevadas tensões compressivas logo abaixo da superfície, entre 10 a 30 μm de profundidade. Este efeito ganha intensidade conforme o ângulo de saída utilizado se torna mais negativo.

O comportamento descrito por Jacobson *et al* (2002) não foi observado neste trabalho provavelmente devido aos ângulos de saída utilizados representarem valores muito próximos ($+7^\circ$ e -6°) e seus efeitos terem sido modestos em comparação ao efeito dos demais fatores estudados.

5.3.5 Tensões residuais em superfícies regulares e irregulares

As amostras torneadas com condições de corte regulares, grupos RL e RG, foram aquelas que obtiveram um I_R abaixo de 3. Essas amostras se destacaram das demais por obter um perfil de tensões residuais trativo na superfície e atingindo níveis de tensão compressiva em regiões mais profundas, a partir dos 20 μm na direção do avanço (Figura 79) e por volta dos 40 μm na direção da velocidade de corte (Figura 80).

As amostras 03, 04 e 08 apresentaram este fenômeno e se caracterizam por um corte com pouca deformação que favorece o mecanismo térmico de geração de tensões residuais e resulta em tensões trativas na superfície (GUNNBERG *et al*, 2006). Enquanto que as amostras 01, 05, 09 e 13 que apresentaram superfície irregular caracterizada por mais deformação durante o corte favorece o mecanismo mecânico de geração de tensões residuais e resulta em tensões compressivas logo abaixo da superfície (GUNNBERG *et al*, 2006).

6 CONCLUSÕES

A utilização do índice (I_R) se mostrou capaz de comparar a eficácia do acabamento no torneamento. Para o processo e material incluídos neste estudo o limite de R_t se encontra por volta dos 3,1 μm , e os parâmetros de usinagem com melhor desempenho frente o acabamento foram $v_c = 250\text{m/min}$, $f = 0,1\text{mm/rot}$, $r_\epsilon = 0,4\text{mm}$ (amostras 03 e 11).

Os fatores avanço e raio de quina mostraram possuir influência semelhante tanto sobre R_a quanto sobre I_R . Ambos fatores apresentaram influência concorrente, isto é, quando um valor minimiza R_a e R_t inevitavelmente eleva o valor de I_R . A velocidade de corte mostrou ser um parâmetro chave na obtenção de um ótimo acabamento pois foi o único parâmetro que influenciou simultaneamente a redução do R_a e R_t , e redução do I_R . O ângulo de saída foi o fator que apresentou o menor efeito sobre R_a . Sua influência sobre a eficácia do acabamento, I_R , não foi significativo. Em um processo no qual os fenômenos de vibração, ou outros, são minimizados o fator posição axial não deve influenciar a rugosidade e o acabamento da peça torneada.

As tensões residuais e microdureza próximas a superfície sofreram grande influência dos fatores de usinagem. A comparação da amostra 01 com a 04 foi encontrado um $\Delta\sigma_r$ na superfície de 369 MPa (trativa), enquanto que o $\Delta\sigma_r$ a 50 μm de profundidade foi 202,1 MPa (compressiva). A microdureza na superfície e a 10 μm de profundidade que foi, respectivamente, de 354,1 e 306,2 HV para a amostra 03 e 349,6 e 250,1 HV para a amostra 09.

Os fatores de usinagem que possuem maior impacto no perfil de tensões residuais foram o avanço e a velocidade de corte. Sendo que o avanço foi capaz de influenciar as tensões nas duas direções de medição enquanto que a velocidade de corte apenas na sua própria direção. Os demais fatores em estudo, r_ϵ e γ , oferecem uma pouca influência sobre o perfil de tensões residuais. As amostras com acabamento regular (RL e RG) e as amostras com acabamento irregular (IG) apresentaram um agrupamento de suas curvas de tensões residuais. Esta separação mostrou que o mecanismo de geração de tensões residuais (mecânico e térmico) está diretamente relacionado com um corte estável e regular durante o torneamento.

7 REFERÊNCIAS

- ASILTÜRK, I.; AKKUS, H. **Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method.** Measurement 44. p. 1697–1704. 2011.
- ASTAKHOV, V. P. **Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance.** Surface Integrity in Machining. Londres: Springer-Verlag. 2010.
- BENARDOS, P.G.; VOSNIAKOS, G.C. **Predicting surface roughness in machining: a review.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 43. 2003.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Handbook of residual stress and deformation of steel: Material factors.** ASM international. 2002.
- BHOGAL, S. S.; SINDHU, C.; DHAMI, S. S.; PABLA, B. S. **Minimization of Surface Roughness and Tool Vibration in CNC Milling Operation.** Journal of Optimization. 2015.
- CABRERA, J. M.; MOLINER, R.T; SILVEIRA, J. L. L. **The influence of cutting speed and feed rate in surface integrity of AISI 1045.** Ingeniería Mecánica. Vol. 18. No. 3. p. 203-210. 2015.
- CAPELLO, E. **Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters.** Journal of Materials Processing Technology 160. p. 221–228. 2005.
- CAPELLO, E. **Residual stresses in turning Part II: Influence of the machined material,** Journal of Materials Processing Technology 172. p. 319–326. 2006.
- CAVALER, L. C. C. **Fundamentos da teoria de usinagem.** 2017. 38 p. Notas de aula, texto redigido em Word.
- CHILDS, T.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal machining: Theory and Applications.** Londres: Arnold. 2000.
- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. **A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment (with Discussion).** Technometrics, Vol. 35, pp. 1–27. 1993.
- DAHLMAN, P.; GUNNBERG, F.; JACOBSON, M. **The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning.** Journal of materials processing technology 147. p. 181–184. 2004.
- DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining.** Londres: Springer-Verlag. 2010.

DIAS, V. W. **Influência dos procedimentos de corte sobre as distribuições de tensões residuais em barras redondas trefiladas de aço ABNT 1045**. Porto Alegre: UFRGS, 2013. Dissertação (Mestrado em engenharia).

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 1981.

DINIZ, E. A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8º ed. São Paulo: Artliber. 2006.

DIN4760. **Form Deviations: Concepts, Classification System**. Deutsches Institut Für Normung. 1982.

DIN8580. **Manufacturing Processes - Terms and Definitions, Division**. Deutsches Institut für Normung. 2003.

DOLLE, H. **The influence of multiaxial stress states, stress gradients and elastic anisotropy on the evaluation of (residual) stresses by X-rays**. J. Appl. Cryst. 1979.

EKMEKÇI, B.; EKMEKÇI, N.; TEKKAYA, A. E.; ERDEN, A. **Residual stress measurement with layer removal method**. Proceedings of the first cappadocia international mechanical engineering symposium. 2004.

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

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora blucher, 2013.

FITZPATRICK, M.E.; FRY, A.T.; HOLDWAY, P.; KANDIL, F.A.; SHACKLETON, J.; SUOMINEN, L. **Measurement good practice guide no. 52": Determination of residual stresses by X-ray diffraction – issue 2**. Londres: National Physical Laboratory. 2005.

GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J.; SALGADO, D. R.; CAMBERO, I.; HERRERA OLIVENZA, J. M.; SANZ-CALCEDO, J. G. **Surface Finish Monitoring in Taper Turning CNC Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Methods**. Procedia Engineering 63. p. 599 – 607. 2013.

GRIFFITHS, B. J. **Manufacturing Surface Technology, Surface Integrity and Functional Performance: Manufacturing Engineering Modular Series**. Nova York: Penton Press. 2001.

GUNNBERG, F.; ESCURSELL, M.; JACOBSON, M. **The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel**. Journal of Materials Processing Technology 174. p. 82–90. 2006.

GUO, Y. B.; LI, W.; JAWAHIR, I. S. **Surface integrity characterization and prediction in machining of hardened and difficult-to-machine alloys: a state-of-art research review and analysis.** *Machining Science and Technology: An International Journal*. 13:4. 437-470. 2009.

GUO, Y. B.; WARREN, A. W.; HASHIMOTO, F. **The basic relationships between residual stress, white layer, and fatigue life of hard turned and ground surfaces in rolling contact.** *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2. p. 129–134. 2010.

GÜRBÜZ, H.; ŞEKER, U.; KAFKAS F. **Investigation of effects of cutting insert rake face forms on surface integrity.** *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 90. p. 3507–3522. 2017.

HAUK, V. **Structural and residual stress analysis by nondestructive methods.** Elsevier, Amsterdam. 1997.

JACOBSON, M; DAHLMAN, P; GUNNBER, G. F. **Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel.** *Journal of Materials Processing Technology* 128, p. 318–323. 2002.

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMIEIER, E.; M'SAOUBI, R.; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO, J. C.; MEYER, D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D. **Surface integrity in material removal processes: Recent advances.** *Manufacturing Technology* 60. p. 603–626. 2011.

KUDRYAVTSEV, Y. F. **Handbook of experimental solid mechanics: Residual stress.** Springer US. pp 371-388. 2008.

LIU, M.; TAKAGI, J. I.; TSUKUDA, A. **Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel.** *Journal of Materials Processing Technology* 150, p. 234–241. 2004.

LODINI, A. **Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation: Calculation of residual stress from measured strain.** Taylor & Francis. 2003.

LU, J. **Handbook of Measurement of Residual Stresses.** Society for Experimental Mechanics (U.S.). Lilburn, GA. The Fairmont Press. 1996.

LU, J. **Handbook of residual stress and deformation of steel: Pre-stress engineering of structural material: A global design approach to the residual stress problem.** ASM international. 2002.

MACHADO A. R.; ABRÃO A. M.; COELHO, R. T.; SILVA M. B.; RUFFINO R. T. **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MACHERAUCH, E. **X-ray stress analysis: Paper covers some rather important developments during the last decade, including new experimental results and theoretical aspects of X-ray stress analysis.** International Congress on Experimental Mechanics, Washington. 1966.

MACHERAUCH, E.; KLOSS, K. H. **Proceedings of the international conference on residual stresses**, Garmisch-Partenkirchen, Alemanha. 1986.

MACHERAUCH, E.; WOLFSTIEG, U. **Recent German activities in the field of x-ray stress analysis.** Materials Science and Engineering. 1977.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, Inc. 2013.

MUÑOZ-ESCALONA, P.; CASSIER, Z. **Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel.** Wear 218. 103-109. 1998.

MURA, T. **Micromechanics of defects in solids.** 2. ed. Holanda: Springer, 1987

NAVAS, V. G.; GONZALO, O.; BENGOTXEA, I. **Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel.** International journal of machine tools & manufacture 61. 48–57. 2012.

NUNES, R. M. **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento.** Porto alegre: UFRGS, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

NUNES, R. M. **Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução.** Porto alegre: UFRGS, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia).

SAINI, S.; AHUJA, I. S.; SHARMA, V. S. **Residual Stresses, Surface Roughness, and Tool Wear in Hard Turning: A Comprehensive Review.** Materials and Manufacturing Processes. 2012

SANDVIK COROMANT. **Torneamento geral: Como obter uma peça de boa qualidade durante o torneamento, Informações sobre pastilhas, Raio de ponta da pastilha.** Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/insert-information/insert-nose-radius. Acesso em: 08 jul. 2017.

SASAHARA, H. **The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 45. p. 131–136. 2005.

SCHWACH, D. W.; GUO, Y. B. **A fundamental study on the impact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue.** International Journal of Fatigue 28. p. 1838–1844. 2006.

SENTHILKUMAR, N.; TAMIZHARASAN, T. **Effect of Tool Geometry in Turning AISI 1045 Steel: Experimental Investigation and FEM Analysis**. Arab J Sci Eng 39. p. 4963–4975. 2014.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. **A review of chatter vibration research in turning**. International journal of machine tools & manufacture. 2012.

SKELTON, R. C. **Surface finish produced by a vibrating tool**. International journal of machining tool design and research. 1969.

SOARES, C. A. T. **Simulação numérica das tensões residuais no processo de trefilação combinada considerando os efeitos de anisotropia**. Porto alegre: UFRGS, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

STOETERAU, L. R. **Fundamentos da usinagem: Geometria de uma ferramenta monocortante**. 2007. 34 p. Notas de aula, apresentação em PowerPoint.

TANSEL, I. N.; ERKAL, C.; KERAMIDAS, T. **The chaotic characteristics of three dimensional cutting**. The International Journal of Machine Tools and Manufacture 32. p. 811-827. 1992.

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

ULUTAN, D.; OZEL, T. **Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 51. p. 250–280. 2011.

WIERCIGROCH, M.; BUDAK, E. **Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 359. 2001.

WILLERT, M; RIEMER, O; BRINKSMEIER, E. **Surface integrity in precision turning of steel**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94. p. 763–771. 2018.

WINHOLTZ, R. A. **Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation: *Characterization of macrostresses***. Taylor & Francis. 2003.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Residual stress: Part 1 – Measurement techniques**. Materials Science and Technology. 2001.

XIAO, Z.; LIAO, X.; LONG, Z.; MING, L. **Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5 tool**. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 93. p. 273–282. 2017.