



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE, ÂNGULO DE POSIÇÃO DA  
FRESA E CONDIÇÃO QUANTO AO TRATAMENTO TÉRMICO,  
SOBRE A TENSÃO RESIDUAL INDUZIDA NA SUPERFÍCIE OBTIDA  
PELA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO  
ABNT 4340**

**AIRTON DE SOUZA**

**Belo Horizonte**

**2019**

**AIRTON DE SOUZA**

**EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE, ÂNGULO DE POSIÇÃO DA  
FRESA E CONDIÇÃO QUANTO AO TRATAMENTO TÉRMICO,  
SOBRE A TENSÃO RESIDUAL INDUZIDA NA SUPERFÍCIE OBTIDA  
PELA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO  
ABNT 4340**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

S729e	<p>Souza, Airton de.</p> <p>Efeito da velocidade de corte, ângulo de posição da fresa e condição quanto ao tratamento térmico, sobre a tensão residual induzida na superfície obtida pela operação de fresamento de faceamento do aço ABNT 4340 [manuscrito] / Airton de Souza. – 2019. 120 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Marcelo Araújo Câmara.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 108-120.</p> <p>Bibliografia: f. 102-107.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. 3. Tensões residuais - Teses. 4. Usinagem - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 621(043)</p>
-------	--



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE, ÂNGULO DE POSIÇÃO DA  
FRESA E CONDIÇÃO QUANTO AO TRATAMENTO TÉRMICO,  
SOBRE A TENSÃO RESIDUAL INDUZIDA NA SUPERFÍCIE OBTIDA  
PELA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO  
ABNT 4340"**

**AIRTON DE SOUZA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS**".

Dissertação aprovada no dia 23 de abril de 2019.

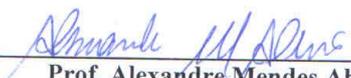
Por:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Marcelo Araújo Câmara**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Luiz Leite da Silva**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Alexandre Mendes Abrao**

Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Dedico esta obra a meus pais, Januário Miguel e Ana Maria (*ambos in memoriam*), minha querida esposa, Edna Valéria e meus queridos filhos, Ana Elisa e Miguel Vitor.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais seu corpo docente e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e seu corpo docente e em especial ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara, pela orientação, inspiração, ensinamentos, confiança, incentivo e sobretudo pelo exemplo de pessoa que é.

Ao professor Dr. Alexandre Mendes Abrão por todo suporte oferecido no curso do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas mestrandos, doutorandos e amigos do laboratório de usinagem pelo apoio e valiosas ajudas na realização desta obra. Em especial ao amigo Anderson Junior dos Santos pelo suporte para realização dos ensaios de fresamento.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela disponibilização do microscópio óptico e equipamentos necessários à realização dos ensaios metalográficos, bem como do durômetro para os ensaios de dureza, na pessoa do professor Klaus Higor dos Santos Silva e aos técnicos do Laboratório de usinagem da PUC-Minas Coração Eucarístico.

À empresa Combustol Minas na pessoa do Sr. Gabriel dos Santos pela realização dos tratamentos térmicos dos corpos de prova necessários à realização do trabalho.

Aos meus gestores na empresa Vale S.A. que sempre me incentivaram e permitiram que este objetivo fosse alcançado mediante disponibilização do tempo para realização das disciplinas necessárias.

A minha família que sempre me inspirou e deu apoio, em especial aos mais próximos, esposa e filhos pela compreensão e companheirismo.

A todos os meus amigos que sempre me incentivaram.

Meus sinceros agradecimentos.

*“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine. E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria. E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor, nada disso me aproveitaria. O amor é sofredor, é benigno; o amor não é invejoso; o amor não trata com leviandade, não se ensoberbece. Não se porta com indecência, não busca os seus interesses, não se irrita, não suspeita mal; Não folga com a injustiça, mas folga com a verdade; Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta”*  
[1 Coríntios 13:1-7]

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE QUADROS .....	xiv
LISTA DE ANEXOS .....	xv
LISTA DE APÊNDICES .....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xvii
NOMENCLATURAS .....	xviii
RESUMO .....	xx
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivos específicos .....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 A operação de fresamento.....	4
3.2 A ferramenta .....	6
3.3 Material do inserto .....	6
3.3.1 Metal duro .....	7
3.4 Geometria da fresa .....	9
3.5 Ângulo de posição e características de usinagem .....	9
3.6 Aço ABNT 4340.....	11
3.7 Tratamentos térmicos.....	12
3.7.1 Recozimento .....	13
3.7.2 Normalização.....	14
3.8 Tensões residuais .....	15
3.8.1 Tensões residuais - visão histórica .....	18
3.8.2 Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento .....	20
3.8.3 Métodos de medição de tensões residuais .....	22
3.8.4 Fatores que influenciam a tensão residual .....	27
3.9 Forças de usinagem.....	28
3.10 Planejamento Fatorial.....	31
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	34
4.1 Materiais e métodos .....	34
4.2 Preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios de fresamento.....	35
4.3 Preparação dos corpos de prova para caracterização do aço ABNT 4340 .....	36
4.4 Análise química .....	37
4.5 Caracterização da microestrutura.....	37
4.6 Realização dos ensaios de tração .....	38
4.7 Medição de dureza .....	39
4.8 Planejamento para o experimento.....	39

4.9	Medição da rugosidade .....	42
4.10	Determinação das tensões residuais .....	42
4.11	Tratamento dos dados relativos às forças de corte .....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
5.1	Caracterização do material.....	53
5.1.1	Análise química .....	53
5.1.2	Caracterização da microestrutura .....	53
5.1.3	Ensaio de tração.....	54
5.1.4	Rugosidade superficial .....	55
5.2	Força de usinagem e componentes .....	56
5.3	Tensões residuais .....	63
5.3.1	Abordagem quantitativa .....	71
5.3.2	Abordagem qualitativa .....	86
6	CONCLUSÃO.....	97
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	99
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
9	ABSTRACT .....	101
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102
11	ANEXOS E APÊNDICES .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fresamento de faceamento.....	5
Figura 3.2 - Fresamento concordante, discordante e misto .....	6
Figura 3.3 - Principais classes de metal duro .....	8
Figura 3.4 – Principais ângulos, função e efeito para uma fresa de facear .....	9
Figura 3.5 - Indicação das forças de usinagem no fresamento na operação de facear .....	10
Figura 3.6 - Efeito do ângulo de posição sobre as forças de usinagem para diferentes avanços por dente .....	10
Figura 3.7 - Espessura do cavaco em função do ângulo de posição da fresa .....	11
Figura 3.8 - Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço .....	13
Figura 3.9 - a) Curva TTT para recozimento pleno, b) região do diagrama de equilíbrio Fe-C com destaque para faixa para recozimento pleno .....	14
Figura 3.10 - a) Curva TTT para normalização, b) região do diagrama de equilíbrio Fe-C com destaque para faixa de temperatura para normalização .....	15
Figura 3.11 - Origem de tensões residuais .....	17
Figura 3.12 - Distribuição característica de tensões residuais em aço induzidas por diferentes processos de fresamento. Linhas sólidas e tracejadas, paralela e perpendicular à direção de avanço respectivamente .....	21
Figura 3.13 - a) efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual para diferentes velocidades de avanço, b) efeito da profundidade de usinagem sobre a tensão residual para diferentes velocidades de corte e c) efeito do limite de resistência a tração sobre a tensão residual para diferentes profundidades de corte. ....	22
Figura 3.14 - Comparação geral de alguns métodos para medição de tensão residual .....	23
Figura 3.15 - Geometria do furo e tensão residual, a) tensão uniforme, b) tensão não uniforme .....	25
Figura 3.16 - Esquema de uma roseta de três extensômetros organizados de forma horária...26	26
Figura 3.17 - Efeitos dos parâmetros de usinagem sobre a tensão residual induzida na superfície de uma liga de titânio alumínio pela operação de fresamento. ....	27
Figura 3.18 - Relação entre tensão residual axial e vida em fadiga. a) Ponta da ferramenta com chanfro b) ponta da ferramenta sem chanfro .....	28
Figura 3.19 - Forças de usinagem para processos típicos de usinagem. a) torneamento; b) fresamento e c) furação.....	29
Figura 3.20 - Nomenclatura e componentes de força em uma operação típica de fresamento de faceamento .....	30
Figura 3.21 - Comportamento das componentes da força de usinagem para fresamento não simétrico tendo a fresa apenas um dente .....	30
Figura 3.22 - Representação de um sistema (função), fatores (variáveis de entrada) e respostas (variáveis de saída) .....	31
Figura 3.23 - Análise de variância para um experimento de um fator .....	33
Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental .....	34
Figura 4.2 - Geometria e dimensões do corpo de prova para o fresamento .....	35
Figura 4.3 - Corpo de prova para fresamento posicionado sobre a mesa do dinamômetro.....	36
Figura 4.4 – Croqui do corpo de prova para ensaio de tração .....	36
Figura 4.5 - Corpos de prova para ensaio de tração .....	37
Figura 4.6 - Obtenção de amostra para análise química.....	37

Figura 4.7 - Preparação de amostras para metalografia.....	38
Figura 4.8 - Realização de ensaio de tração .....	38
Figura 4.9 - Codificação para condições de ensaio .....	39
Figura 4.10 - Fresas e insertos utilizados nos ensaios de fresamento .....	40
Figura 4.11 - Esquema de montagem para realizar ensaio de fresamento com aquisição de forças .....	41
Figura 4.12 - Montagem para medição de microdeformações .....	43
Figura 4.13 - Fatores contribuintes para erros de medição e ações mitigadoras .....	44
Figura 4.14 - Posição de instalação da roseta para medição das deformações aliviadas .....	44
Figura 4.15 - Nomenclatura e componentes de força em uma operação típica de faceamento por fresamento .....	45
Figura 4.16 - Representação da região de interesse para obtenção de forças de corte .....	47
Figura 4.17 - Filtro para dados referentes às forças de corte – dados iniciais.....	48
Figura 4.18 - Ocorrências de aquisições com ferramenta em contato com a peça ou não .....	49
Figura 4.19 - Forças ordenadas pelo tempo de usinagem e filtros .....	50
Figura 4.20 - Forças ordenadas pelo tempo de usinagem com base no filtro adotado.....	51
Figura 4.21 - Forças de usinagem na região de interesse segundo a segundo e média durante o percurso de usinagem .....	52
Figura 5.1 - Resultado da análise química do material.....	53
Figura 5.2 - Microestruturas obtidas após tratamentos térmicos de Normalização e Recozimento .....	54
Figura 5.3 - Posição e resultados relativos à rugosidade média da superfície fresada .....	55
Figura 5.4 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes.....	57
Figura 5.5 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a força de usinagem .....	58
Figura 5.6 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a força de usinagem.....	58
Figura 5.7 - Comportamento da força de usinagem perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) em função do ângulo de posição.....	59
Figura 5.8 - Comportamento da força paralela à direção de avanço ( $//V_f$ ). a) em função do ângulo de posição .....	60
Figura 5.9 - Comportamento da força passiva ( $F_p$ ) em função do ângulo de posição.....	61
Figura 5.10 - Comportamento da força de usinagem e suas componentes durante a usinagem para as condições AAAB90.....	62
Figura 5.11 - Comportamento da força de usinagem ( $F_u$ ) em função do ângulo de posição ...	63
Figura 5.12 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para $V_c=100\text{m/min}$ agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa para cada réplica realizada.....	66
Figura 5.13 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para $V_c=275\text{m/min}$ agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa para cada réplica realizada.....	67
Figura 5.14 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para $V_c=100\text{m/min}$ agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa obtido pela média entre réplicas conforme Quadro 5.2.....	69
Figura 5.15 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para $V_c=275\text{m/min}$ agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa obtido pela média entre réplicas conforme Quadro 5.2.....	70
Figura 5.16 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes.....	73
Figura 5.17 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a tensão residual a $17\mu\text{m}$ de profundidade a partir da superfície .....	74

Figura 5.18 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a tensão residual a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície.....	75
Figura 5.19 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes.....	77
Figura 5.20 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a tensão residual induzida a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície.....	78
Figura 5.21 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a tensão residual a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície.....	79
Figura 5.22 - Efeitos principais. a) Força de usinagem ( $F_u$ ); b) Tensão residual $\#V_f$ .....	84
Figura 5.23 - Interações. a) Força de usinagem ( $F_u$ ); b) Tensão residual $\#V_f$ .....	85
Figura 5.24 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidas a velocidade de corte e a condição quanto ao tratamento térmico do aço, normalizado ou recozido com variação do ângulo de posição em três níveis. ....	86
Figura 5.25 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidos o ângulo de posição e a condição quanto ao tratamento térmico do aço, normalizado ou recozido com variação da velocidade de corte em dois níveis. ....	89
Figura 5.26 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidos o ângulo de posição e a velocidade de corte com variação da condição quanto ao tratamento térmico do aço em dois níveis. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química e propriedades mecânicas típicas do aço ABNT 4340 .....	11
Tabela 4.1 - Organização dos ensaios de fresamento .....	40
Tabela 4.2 - Parâmetros de corte para o ensaio de fresamento.....	41
Tabela 5.1 - Análise de variância para a força de usinagem .....	57
Tabela 5.2 - Análise de variância para a tensão residual $\#V_f$ a $17\mu\text{m}$ a partir da superfície....	73
Tabela 5.3 - Análise de variância para a tensão residual $\#V_f$ a $17\mu\text{m}$ a partir da superfície....	78

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Gráfico de probabilidade normal para a força de usinagem .....	56
Gráfico 5.2 - Perfil de tensões residuais ao longo da profundidade a partir da superfície para a réplica número 2 na condição 100R45. ....	64
Gráfico 5.3 - Gráfico de probabilidade normal para a tensão residual perpendicular à direção de avanço a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície para todas réplicas .....	72
Gráfico 5.4 - Gráfico de probabilidade normal para a tensão residual perpendicular a direção de avanço a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície para seleção de réplicas .....	76
Gráfico 5.5 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função do ângulo de posição na profundidade de 17 $\mu$ m a partir da superfície. ....	80
Gráfico 5.6 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função da velocidade de corte na profundidade de 17 $\mu$ m a partir da superfície. ....	82
Gráfico 5.7 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função da condição quanto ao tratamento térmico na profundidade de 17 $\mu$ m a partir da superfície. ....	83

## LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios de tração .....	54
Quadro 5.2 - Réplicas consideradas para análise .....	68
Quadro 5.3 - Resumo - efeito do ângulo de posição da fresa sobre a tensão residual induzida .....	87
Quadro 5.4 - Resumo - efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual induzida .....	90
Quadro 5.5 - Resumo - efeito da condição quanto a tratamento térmico, recozido ou normalizado, sobre a tensão residual induzida .....	94

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 11.A - Relatório de análise química - página 1/2.....	108
Anexo 11.B - Relatório de análise química - página 2/2.....	109
Anexo 11.C - Tabela resultados de saída do software <i>H-drill</i> .....	110
Anexo 11.D - Gráficos de saída do software H-drill, a) tensão //V <sub>f</sub> (Y-Stress) e #V <sub>f</sub> (X-Stress); b) TPMA e TPMI .....	111

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 11.A Tabela organização dos ensaios de fresamento .....	112
Apêndice 11.B - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 100NXX .....	113
Apêndice 11.C - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 100RXX.....	114
Apêndice 11.D - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 275NXX .....	115
Apêndice 11.E - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 275RXX.....	116
Apêndice 11.F - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 100NXX....	117
Apêndice 11.G - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 100RXX ...	118
Apêndice 11.H - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 275NXX ...	119
Apêndice 11.I - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 275RXX .....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Austenita
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço ( <i>American Institute for Iron and Steel</i> )
ANOVA	Análise de Variância ( <i>Analysis of Variance</i> )
CCT	Transformação em resfriamento contínuo ( <i>Continuous cooling transformation</i> )
F	Ferrita
ISO	Organização Internacional de Padronização ( <i>International Organization for Standardization</i> )
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell
M <sub>I</sub>	Início de transformação martensítica
P	Perlita
RP	Réplica
TPMA	Tensão Residual Principal Máxima
TPMI	Tensão Residual Principal Mínima
TTT	Tempo Temperatura e Transformação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## NOMENCLATURAS

### Letras Latinas

$a$	Espessura não deformada do cavaco	[mm]
$a_e$	Penetração de trabalho	[mm]
$a_p$	Profundidade de usinagem	[mm]
$D$	Diâmetro da ferramenta	[mm]
$D_e$	Diâmetro que inscreve os extensômetros da roseta	[mm]
$F_{ap}$	Força de apoio	[N]
$F_{aq}$	Frequência de aquisição	[Hz]
$F_c$	Força perpendicular à direção da velocidade de avanço	[N]
$F_f$	Força paralela à direção da velocidade de avanço	[N]
$F_{mi}$	Posição angular de interesse	[°]
$F_p$	Força passiva	[N]
$F_u$	Força de usinagem	[N]
$f_z$	avanço por dente	[mm]
$h$	espessura do cavaco	[mm]
$L$	Comprimento usinado	[mm]
$L_i$	Largura de interesse	[mm]
$n$	Número de rotações da ferramenta	[rpm]
$P_r$	Força radial	[N]
$P_t$	Força tangencial	[N]
$P_x$	Força na direção do eixo x	[N]
$P_y$	Força na direção do eixo y	[N]
$R_a$	Desvio aritmético médio	[ $\mu\text{m}$ ]
$t_{aq}$	tempo de aquisição	[seg]
$t_c$	tempo de fresamento	[seg]
$V_c$	Velocidade de corte	[m/min]
$V_f$	Velocidade de avanço	[mm/min]

**Letras Gregas**

$\gamma_f$	Ângulo de saída radial	[°]
$\gamma_p$	Ângulo de saída axial	[°]
$\theta$	Posição instantânea angular de contato da ferramenta com a peça	[°]
$\theta_a$	Posição angular inicial de contato da ferramenta com a peça	[°]
$\theta_b$	Posição angular final de contato da ferramenta com a peça	[°]
$\theta_m$	Ângulo entre aquisições	[°]
$\lambda_s$	Inclinação da aresta de corte	[°]
$\chi_r$	Ângulo de posição	[°]
$\psi$	Ângulo de contato da fresa com a peça	[°]
$\psi_i$	Ângulo de contato de interesse	[°]

## RESUMO

Dentre os diversos processos de fabricação destaca-se a usinagem. Dentre suas operações tem-se a de fresamento que por sua vez, assim como as demais, confere características à superfície gerada que influem no desempenho do componente ou peça em trabalho. Uma destas características é a tensão residual induzida pelo processo. Dependendo de seu caráter, trativo ou compressivo, intensidade e profundidade afetada, pode ser benéfica ou deletéria. Neste trabalho foi investigado o efeito dos parâmetros, velocidade de corte, ângulo de posição da fresa e condição do material (aço ABNT 4340) obtida pelos tratamentos térmicos de recozimento e normalização, sobre a tensão residual induzida na superfície. Para isto, foi realizado um planejamento fatorial  $2 \times 3 \times 2$  com três réplicas. Realizada a caracterização do aço ABNT 4340 por meio de ensaio de tração, análise química e ensaio metalográfico. Foram preparados 36 corpos de prova nas dimensões de 75x60x27mm (18 receberam tratamento térmico de recozimento e 18 de normalização) fresados previamente afim de conferir-lhes dimensões compatíveis ao dinamômetro que foi utilizado para obter a força de usinagem e suas componentes. Os ensaios de fresamento foram realizados conforme o planejamento fatorial. As tensões residuais obtidas pelo método do furo central. Os resultados obtidos foram organizados e analisados sobre os aspectos qualitativo, perfil ao longo da profundidade, e quantitativo, tensão residual no ponto mais próximo à superfície,  $17\mu\text{m}$ . Os resultados indicaram que o aumento da velocidade de corte fez com que a tensão residual induzida na superfície fosse compressiva ou menos trativa. A variação do ângulo de posição exerceu efeito discreto sobre a tensão residual. O material fresado na condição normalizada apresentou tensões residuais compressivas enquanto que na condição recozido, trativas. Para avaliação do aspecto quantitativo foi realizada uma análise de variância para os dados referentes às tensões residuais induzidas na profundidade de  $17\mu\text{m}$ . A análise de variância retornou que os dados seguem uma distribuição normal e que os fatores velocidade de corte e tratamento térmico se mostraram significativos ao nível de confiança de 95% tanto isoladamente quanto nas interações de segunda ordem, velocidade de corte com tratamento térmico e tratamento térmico com ângulo de posição e de terceira ordem, velocidade de corte, ângulo de posição e tratamento térmico. Foi observado desvio padrão alto entre as réplicas para os perfis de tensão residual para todas as condições estudadas.

**Palavras-chave:** fresamento, tensão residual, ângulo de posição, método do furo central, 4340

## 1 INTRODUÇÃO

Com a forte demanda por produtos e serviços a competitividade se tornou cada vez mais acirrada tornando-se necessário o aprimoramento dos processos de fabricação tanto no que diz respeito a aspectos de produtividade e custos, quanto à qualidade, além do desenvolvimento de novos processos.

Dentre os diversos processos de fabricação disponíveis destaca-se a usinagem, que transforma em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, apud MACHADO et al., 2015). O processo de usinagem é realizado por diversas operações dentre as quais destaca-se a de fresamento, reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material, visto que a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte (MACHADO et al., 2015).

Todo processo de fabricação, desde o mais trivial ao mais complexo envolve uma série de fatores e particularidades que conferem ao produto final características que influem no seu desempenho, tanto no sentido de contribuir positivamente quanto negativamente. Neste sentido uma característica conferida a peça usinada em decorrência da operação de fresamento é a indução de tensões residuais na superfície obtida. Estas tensões dependendo de suas intensidades e caráter, trativo ou compressivo, podem ser benéficas ou deletérias para a peça durante o desempenho de sua função, ou comprometer operações de acabamento causando distorções dimensionais significativas. Sendo assim, torna-se importante conhecer e controlar os parâmetros que governam o processo.

Além dos parâmetros atribuídos ao processo de usinagem outra característica importante quanto à indução de tensões residuais devidas ao processo de usinagem diz respeito à condição do material no que se refere às suas propriedades tais como, dureza e microestrutura, propriedades estas que podem ser em certa medida controladas por meio de tratamentos térmicos.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo estudar o efeito dos parâmetros de usinagem, velocidade de corte e ângulo de posição da fresa e da condição do material quanto ao tratamento térmico, recozimento ou normalização, sobre a tensão residual induzida na superfície obtida pela operação de fresamento de faceamento do aço ABNT 4340.

### 2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Caracterização do aço ABNT 4340 recozido e normalizado para atestar sua conformidade por meio de:
  - ✓ Realização de ensaio de tração para obter as propriedades mecânicas de limite de resistência a tração e alongamento percentual.
  - ✓ Realização de metalografias para identificar os principais constituintes da microestrutura.
  - ✓ Medição da dureza superficial.
  - ✓ Determinação da composição química por meio de espectroscopia óptica.
- Medição das forças de corte durante a operação de fresamento por meio de dinamômetro para auxiliar na interpretação dos resultados de tensões residuais;
- Avaliação do efeito da condição do material, recozido ou normalizado, sobre a tensão residual induzida pela operação de fresamento do aço ABNT 4340, por meio de análise qualitativa e quantitativa.
- Avaliação do efeito do ângulo de posição da fresa em três níveis sobre a tensão residual induzida pela operação de fresamento do aço ABNT 4340, por meio de análise qualitativa e quantitativa.
- Avaliação da influência da velocidade de corte em dois níveis sobre a tensão residual induzida pela operação de fresamento do aço ABNT 4340, por meio de análise qualitativa e quantitativa.
- Medição da rugosidade da superfície gerada pela operação de fresamento do aço ABNT 4340 em todas as condições ensaiadas por meio de rugosimêtro para garantir

que o desvio médio aritmético ( $R_a$ ) da superfície esteja com no máximo  $2,5\mu\text{m}$ .  
(Boletim de instruções (VISHAY PRECISION GROUP, 2011)).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão descritos os aspectos mais relevantes quanto às áreas do conhecimento relacionadas ao objetivo do presente trabalho, o que abrange a operação de fresamento, tratamentos térmicos, materiais, tensões residuais, métodos de medições de tensões residuais, forças de corte, acabamento superficial dentre outras.

#### 3.1 A operação de fresamento

O fresamento é uma operação de usinagem que tem por objetivo gerar superfícies por meio de remoção progressiva de uma quantidade pré-determinada de material da peça. Nesta operação, a ação de corte é alcançada pela rotação da ferramenta enquanto a peça permanece fixa em uma mesa que se move realizando o movimento de avanço (TRENT; WRIGHT, 2000).

Existem diversas classificações para a operação de fresamento. Machado et al., 2015, adotam a seguinte classificação:

- fresamento tangencial
- fresamento tangencial de canais ou perfis
- fresamento de topo
- fresamento frontal
- fresamento com fresa de topo esférico
- fresamento de cavidades

Na operação de fresamento frontal destaca-se o de faceamento cuja superfície usinada é gerada pela combinação de arestas de corte localizadas na periferia e na face da fresa.

Na Figura 3.1 pode-se observar uma operação de fresamento sendo realizada.



Figura 3.1 - Fresamento de faceamento

FONTE: Disponível em: <https://vimeo.com/8106107> acessado em: janeiro/2019

Além disso, o fresamento pode ser classificado nos seguintes métodos:

- Discordante: o sentido de rotação da fresa e o sentido de avanço são opostos. A espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- Concordante: o sentido de rotação da fresa e do avanço são o mesmo. A aresta de corte ao penetrar a peça o faz com espessura de corte máxima prosseguindo o corte até a espessura de corte atingir o valor zero.
- Misto: o fresamento ocorre de maneira centrada na largura fresada  $a_e$ . No início do corte é discordante e a espessura do cavado possui um valor mínimo. Na região coincidente com a linha de simetria da peça atinge espessura máxima. Então passa a ser concordante, atingindo espessura mínima ao final do corte.

Na Figura 3.2 podem ser vistos os três métodos de forma ilustrativa.

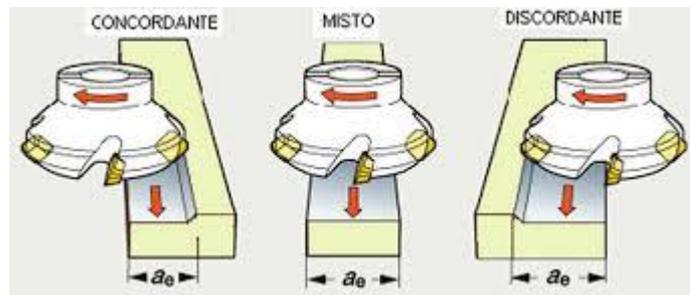


Figura 3.2 - Fresamento concordante, discordante e misto

FONTE: (STEMMER, 1995)

### 3.2 A ferramenta

A fresa é uma ferramenta que comumente possui várias arestas de corte, podendo variar de uma aresta até mais de cem, o que implica diretamente na taxa de remoção de material, observadas outras condições como potência disponível da máquina, rigidez de fixação da peça, diâmetro da ferramenta, etc. A ferramenta pode ser classificada em dois tipos: inteiriça e com insertos.

Na fresa inteiriça a aresta de corte é do mesmo material do corpo da fresa, possibilitando durante o processo de fabricação da ferramenta, por meio de retificação, a obtenção de ângulos de corte mais agudos, que por sua vez conferem menores esforços de corte durante a usinagem. São normalmente utilizadas como fresas de topo e fresas de disco. Já a fresa com insertos é composta de um corpo, que pode ser de aço, duralumínio (quando utilizadas em altíssimas rotações) ou titânio (quando é desejada redução de peso) e dos insertos (intercambiáveis ou brasados). A finalidade de se usar este tipo de fresa é reduzir o custo de fabricação da ferramenta, uma vez que o material referente ao corpo da fresa tem menor custo que o material do inserto.

### 3.3 Material do inserto

Os materiais das ferramentas que continuam a ser usados e estão comercialmente disponíveis hoje são aqueles que provaram satisfazer as demandas a que foram solicitados no que tange à vida da ferramenta, taxa de remoção de material, acabamento da superfície produzida, habilidade de responder de forma satisfatória em uma variedade de aplicações e o custo das ferramentas fabricadas com estes materiais (TRENT; WRIGHT, 2000). Para o fresamento, os

materiais devem apresentar elevada dureza com excelentes propriedades mecânicas, mas por outro lado, por se tratar de usinagem com corte interrompido, exige-se suficiente tenacidade para suportarem choques e impactos inerentes ao processo. As principais propriedades que os materiais das ferramentas de corte devem apresentar são:

- alta dureza;
- tenacidade para evitar falha por fratura;
- alta resistência ao desgaste;
- alta resistência a compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades mecânicas e térmicas à temperaturas elevadas;
- alta resistência ao choque térmico;
- alta resistência ao impacto (maior tenacidade); - ser inerte quimicamente.

Dentre os materiais usados, seja para fresas inteiriças ou fresas com insertos intercambiáveis ou brasados, destacam-se o aço rápido, os cermetes e o metal duro, empregado neste trabalho.

### 3.3.1 Metal duro

O primeiro grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com a descoberta do aço rápido, o segundo com o metal duro, pois com este, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente duas vezes. Esta descoberta aconteceu por volta de 1920, na Alemanha. O material desenvolvido originalmente continha carboneto de tungstênio e cobalto e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços. Para superar esta deficiência foi adicionado a este os carbonetos de titânio, tântalo e ou nióbio verificando-se significativa melhora no desempenho.

A ISO padronizou a classificação dos metais duros em classes de acordo com as necessidades de aplicação. Na Figura 3.3 pode-se observar as principais classes de acordo com a norma ISO 513.

Grupo principal de aplicação			Grupo de aplicação			
Letra de Identificação	Cor de Identificação	Materiais a serem usinados	Materiais duros para		-	
P	azul	<b>Aço:</b> todos os tipos de aço e aço fundido, exceto aço inoxidável com estrutura austenítica	P 01 P 10 P 20 P 30 P 40 P 50	P 05 P 15 P 25 P 35 P 45	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
M	amarela	<b>Aço Inoxidável:</b> aço inoxidável austenítico e aço austenítico/ferrítico	M 01 M 10 M 20 M 30 M 40	M 05 M 15 M 25 M 35	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
K	vermelha	<b>Ferro fundido:</b> ferro fundido cinzento, com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K 01 K 10 K 20 K 30 K 40	K 05 K 15 K 25 K 35	↑ <sub>a</sub>	↯ <sub>b</sub>
N	verde	<b>Materiais não ferrosos:</b> alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos	N 01 N 10 N 20 N 30	N 05 N 15 N 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
S	marrom	<b>Superligas e titânio:</b> ligas especiais, resistentes às altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S 01 S 10 S 20 S 30	S 05 S 15 S 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
H	cinza	<b>Materiais com alta dureza:</b> aço temperado, material fundido de aço temperado, aço fundido com coquilha	H 01 H 10 H 20 H 30	H 05 H 15 H 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
<p>a - A diminuição do número associado à letra de identificação resulta no aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.</p> <p>b - O aumento do número associado à letra de identificação resulta no aumento da tenacidade</p>						

Figura 3.3 - Principais classes de metal duro

FONTE: Adaptado de (ABNT NBR ISO 513, 2015)

### 3.4 Geometria da fresa

Os principais ângulos de uma fresa de facear são apresentados na Figura 3.4, bem como a função e o efeito de cada um.

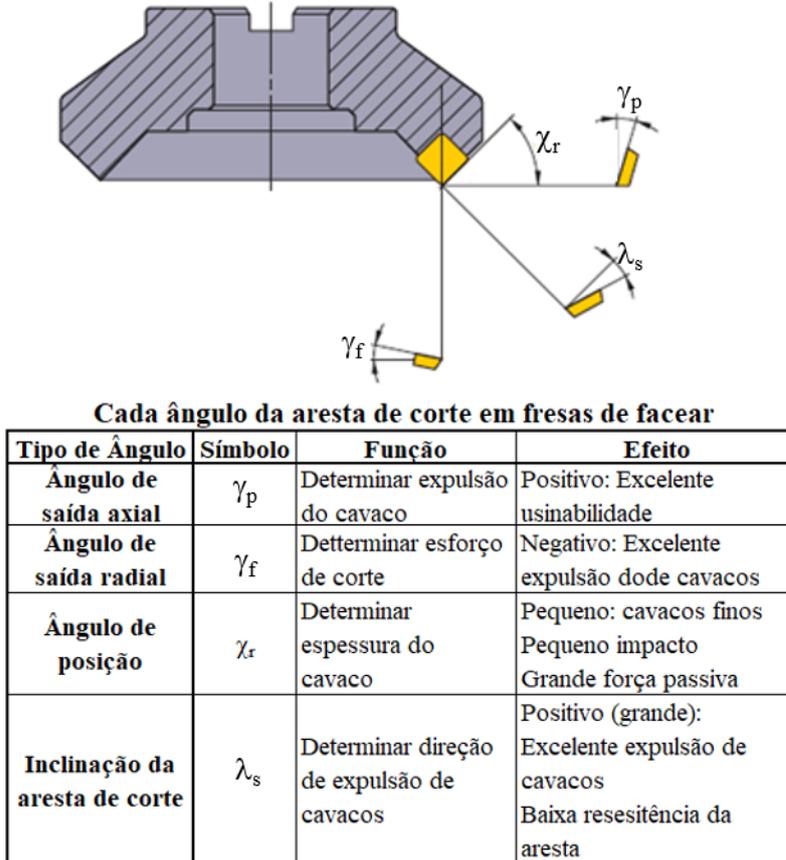


Figura 3.4 – Principais ângulos, função e efeito para uma fresa de facear

FONTE: Adaptado de (MITSUBISHI MATERIAL, 2019)

### 3.5 Ângulo de posição e características de usinagem

O ângulo de posição exerce influência direta na força de usinagem. As componentes da força de usinagem no fresamento de faceamento estão identificadas na Figura 3.5.

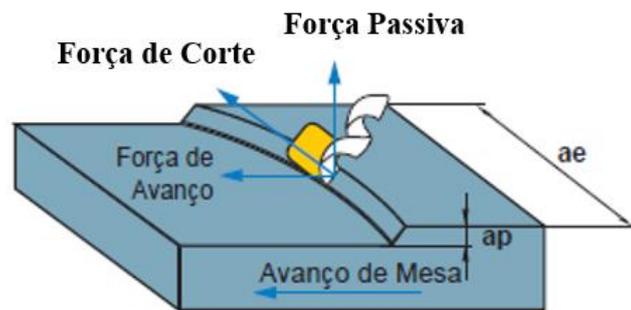


Figura 3.5 - Indicação das forças de usinagem no fresamento na operação de facear

FONTE: Adaptado de (MITSUBISHI MATERIAL, 2019)

Na Figura 3.6 pode-se observar o efeito do ângulo de posição sobre as componentes da força de usinagem para o fresamento de faceamento em aço AISI 4140 com 281HB de dureza, velocidade de corte de 125,6 m/min, profundidade de usinagem de 4mm e largura de corte de 110mm.

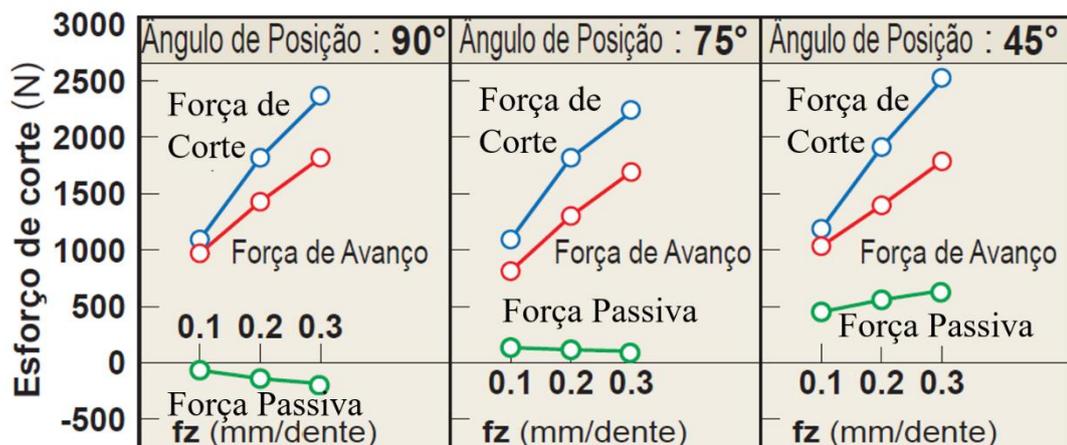


Figura 3.6 - Efeito do ângulo de posição sobre as forças de usinagem para diferentes avanços por dente

FONTE: Adaptado de (MITSUBISHI MATERIAL, 2019)

Na Figura 3.7 pode ser observado o efeito do ângulo de posição sobre a espessura do cavaco ( $h$ ) em função do avanço por dente ( $f_z$ ). Neste trabalho a espessura do cavaco será mantida constante em todas condições ensaiadas, conseqüentemente cada conjunto de velocidade de corte e ângulo de posição resultará em um avanço por dente distinto.

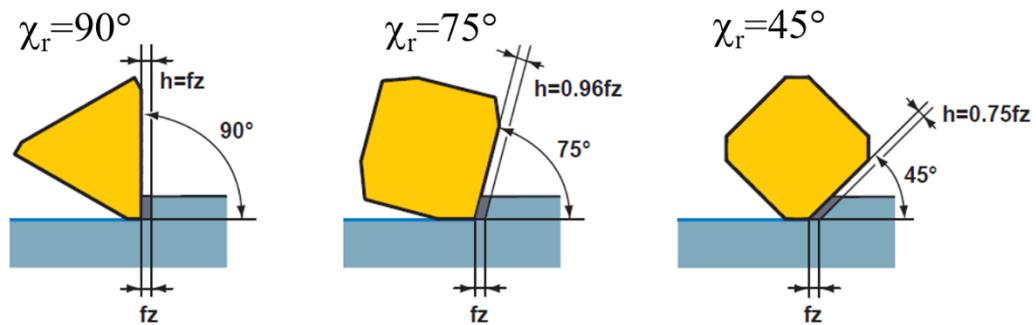


Figura 3.7 - Espessura do cavaco em função do ângulo de posição da fresa

FONTE: Adaptado de (MITSUBISHI MATERIAL, 2019)

### 3.6 Aço ABNT 4340

O aço ABNT 4340 é ligado ao cromo, níquel e molibdênio. É amplamente utilizado na indústria dada a suas ótimas propriedades tais como resistência a fadiga e boa combinação de resistência mecânica e tenacidade.

É amplamente aplicado na fabricação de peças tais, como: virabrequins, bielas, eixos e engrenagens tanto de automóveis quanto aeronaves. Sua composição química e propriedades mecânicas típicas são apresentadas na Tabela 3.1.

Elementos de liga	4340 (% em massa)	Condição	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
C	0,39	Recozido à 810°C	1280	860	22
S	0,001				
P	0,017				
Si	0,26				
MN	0,64				
Cr	0,80	Normalizado à 870°C	745	475	12,2
Ni	1,82				
Mo	0,22				
Al	-				
V	-				
Cu	-				

Tabela 3.1 - Composição química e propriedades mecânicas típicas do aço ABNT 4340

FONTE: Adaptado de <http://www.villaresmetals.com.br/pt>, acessado em janeiro/2019

### 3.7 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 1996).

São utilizados para controlar as diversas fases que podem se formar na microestrutura do aço, bem como a morfologia e o tamanho de grão. Os tratamentos térmicos possibilitam a formação de microconstituintes conhecidos como ferrita, bainita, perlita, martensita e austenita. Possibilitam a formação de aços com diferentes fases e morfologias onde a composição entre os diferentes microconstituintes torna-se fator decisivo para as propriedades mecânicas finais do material podendo ser ajustada em conformidade com as exigências de projeto (KRAUSS E THOMPSON apud ANAZAWA et al., 2012).

As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades (CHIAVERINI, 1996).

Os principais objetivos que se buscam com os tratamentos térmicos são:

- alívio de tensões;
- aumento da resistência mecânica;
- melhora da ductilidade;
- melhora da usinabilidade;
- melhora da resistência ao desgaste;
- modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Dentre os principais tratamentos térmicos destacam-se:

- recozimento;
- normalização;
- esferoidização;
- tempera.

Na sequência serão explorados os tratamentos térmicos de recozimento e normalização. Estes foram empregados no presente trabalho. É apresentado na Figura 3.8 os ciclos térmicos básicos de recozimento e normalização.

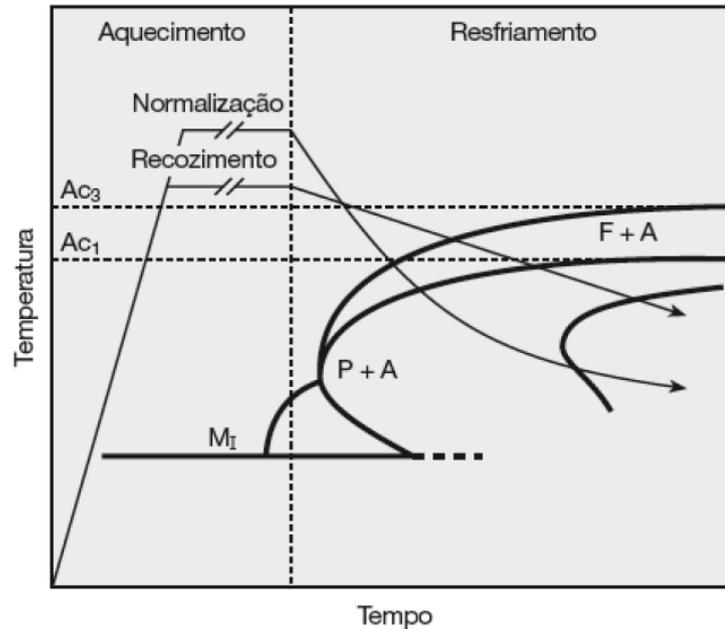


Figura 3.8 - Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço

FONTE: (COLPAERT, 2008)

### 3.7.1 Recozimento

É o tratamento térmico realizado com o fim de alcançar um ou mais dos seguintes objetivos:

- remover tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente;
- reduzir a dureza para melhor a usinabilidade;
- alterar as propriedades mecânicas como limite de escoamento, tensão de ruptura, alongamento percentual;
- modificar as características elétricas e magnéticas.

O termo genérico recozimento abrange os seguintes tratamentos específicos:

- recozimento total ou pleno;
- recozimento isotérmico ou cíclico;
- recozimento para alívio de tensões ou sub-crítico;
- esferoidização;
- recozimento em caixa.

O recozimento total ou pleno consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica por tempo suficiente para transformação de toda microestrutura em austenita, seguido de resfriamento lento realizado sob condições que permitam a formação dos constituintes previstos pelo diagrama de equilíbrio ferro carbono. Normalmente desliga-se o forno e permite que a peça se resfrie em seu interior (CHIAVERINI, 1996).

Na Figura 3.9 a) pode-se observar a curva de tempo, temperatura e transformação, e a Figura 3.9 b) a região contendo a faixa de temperatura em que o aço deve ser aquecido para realizar-se o tratamento térmico de recozimento. A microestrutura típica que se obtém com o recozimento pleno do aço ABNT 4340 é composta por ferrita e perlita (FREITAS et al., 2016).

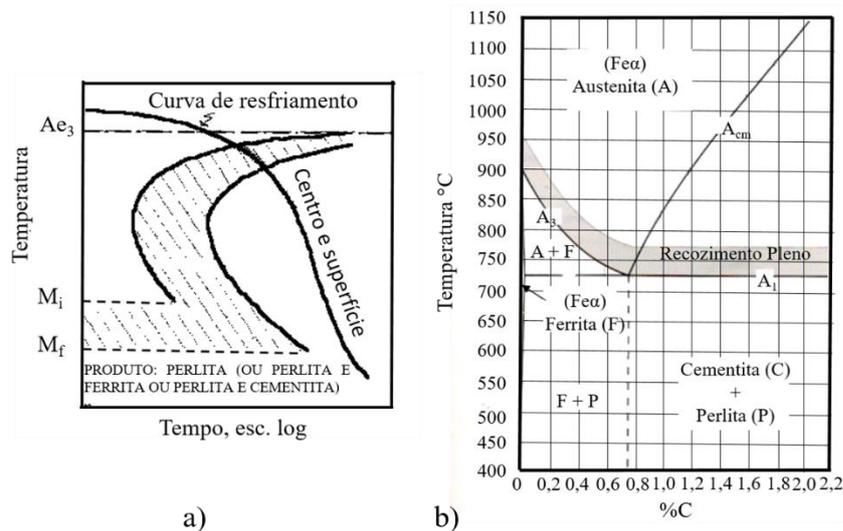


Figura 3.9 - a) Curva TTT para recozimento pleno, b) região do diagrama de equilíbrio Fe-C com destaque para faixa para recozimento pleno

FONTE: (CHIAVERINI, 1996)

### 3.7.2 Normalização

Consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica por tempo suficiente para transformação de toda microestrutura em austenita, seguido de resfriamento ao ar.

Na Figura 3.10 a) pode-se observar a curva de tempo temperatura e transformação, e a Figura 3.10 b) a região contendo a faixa de temperatura em que o aço deve ser aquecido para realizar-se o tratamento térmico de normalização.

A microestrutura típica que se obtém com a normalização é composta por ferrita, perlita, uma certa quantidade de bainita e em alguns casos austenita retida (FREITAS et al., 2016).

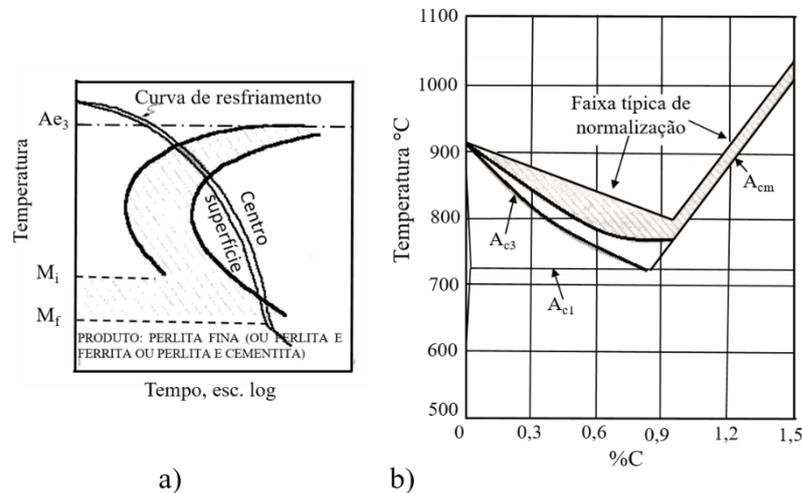


Figura 3.10 - a) Curva TTT para normalização, b) região do diagrama de equilíbrio Fe-C com destaque para faixa de temperatura para normalização

Colpaert, (2008) destaca que a normalização é o tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada e melhorar a resistência e a tenacidade do aço. Além disto, em muitos casos, para se obter uma resposta uniforme a outros tratamentos térmicos (como tempera, por exemplo) é necessário partir de uma estrutura uniforme obtida através de normalização.

### 3.8 Tensões residuais

Denominam-se tensões residuais aquelas presentes em um sólido sem que nele estejam agindo quaisquer conjunto de forças externas, inclusive peso próprio. Podem estar presentes nos mais diversos componentes e têm papel importante no desempenho destes em realizar suas funções. As tensões residuais se somam às tensões atuantes (externas) podendo aumentar ou diminuir os esforços resultantes desta interação. Assim, o conhecimento da intensidade e da distribuição destas tensões residuais ao longo da profundidade a partir da superfície é muito importante do ponto de vista de integridade estrutural.

As tensões residuais podem ser agrupadas em três tipos principais de acordo com a porção de material na qual elas podem ser observadas, sendo:

- Tipo I – Tensões Residuais macroscópicas que agem sobre no mínimo vários grãos do material.
- Tipo II – Tensões Residuais microestruturais que cobrem a distância de um grão ou parte de um grão. Este tipo pode ocorrer, por exemplo, entre diferentes fases que tem diferentes propriedades físicas ou entre partículas precipitadas, como entre inclusões e a matriz.
- Tipo III – Tensões Residuais micro-localizadas as quais ocorrem entre várias distâncias atômicas dentro de um grão e são equilibradas sobre uma pequena parte deste.

Tensões residuais na superfície e em regiões imediatamente abaixo da superfície de componentes usinados é provavelmente o aspecto mais importante na integridade visto sua direta relação com o desempenho do componente quando ele está sujeito a cargas cíclicas.

Tensões de compressão são geralmente benéficas à vida do componente no que se refere a fadiga, fluência, estabilidade dimensional e corrosão sob tensão, enquanto que tensões de tração são prejudiciais (EL-KHABEERY; FATTOUH, 1989).

Estudos têm sido conduzidos sobre tensões residuais induzidas por processo de fabricação que envolvem remoção de material. Dentre eles a usinagem, e em especial o fresamento. Tem sido observado que para uma dada peça de um dado material usinado a natureza da distribuição de tensão residual na região da superfície depende da velocidade de corte, da taxa de avanço, profundidade de usinagem, geometria da ferramenta e da utilização ou não de fluído de corte. O valor absoluto da tensão residual próximo à superfície é alto e diminui continuamente com a profundidade abaixo da superfície usinada. A tensão residual é normalmente de tração para profundidades de corte maiores e a seco e menores para profundidades de corte menores e com uso de fluído de corte (EL-KHABEERY; FATTOUH, 1989).

São várias as fontes de tensões residuais em componentes. É demonstrado na Figura 3.11 as principais fontes de indução de tensões residuais.

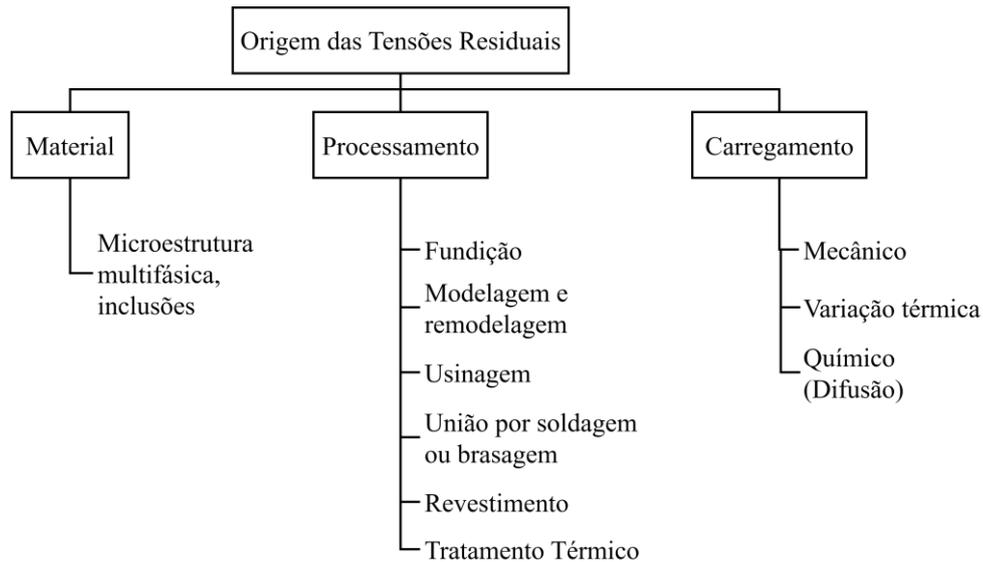


Figura 3.11 - Origem de tensões residuais

FONTE: Adaptado de (KLOOS, 1979)

As características dos componentes mais impactadas pela presença de tensões residuais, bem como sua intensidade e caráter são:

- vida em fadiga
- resistência à fluência
- resistência à corrosão
- instabilidade dimensional

Tensões residuais veem sendo estudadas desde os anos 50. As principais pesquisas têm se valido de:

- experimentação
- modelagem analítica
- modelagem por elementos finitos
- combinação entre modelagem analítica e elementos finitos

Nos processos de usinagem a deformação plástica e variação volumétrica inerentes ao processo se constituem como principais aspectos relacionados a origem das tensões residuais induzidas nas superfícies geradas pelo processo.

Deformação plástica ocorre durante o processo de formação do cavaco e o contato entre a ferramenta e as partes usinadas.

Gradientes térmicos decorrem de deformação plástica bem como do atrito. Caso reúnam-se condições de pressão e temperaturas elevadas, estas podem ser suficientes para promover transformação de fases na superfície o que implica em variação volumétrica (EL-KHABEERY; FATTOUH, 1989).

### 3.8.1 Tensões residuais - visão histórica

Su (2006) apresenta uma boa visão histórica quanto aos trabalhos desenvolvidos sobre tensões residuais nos processos de usinagem, onde consta que os primeiros estudos foram basicamente experimentais. Um dos pioneiros foi Henriksen, (1951), o qual publicou trabalhos fundamentais que ainda hoje são referenciados. Em seu trabalho concluiu que efeitos mecânicos e térmicos tem responsabilidade direta na indução (no aparecimento, ou surgimento) das tensões residuais dos componentes usinados. Sendo que os efeitos mecânicos dominam o processo.

Liu e Barash (1982) buscaram determinar os efeitos dos parâmetros de usinagem na tensão residual induzida na superfície usinada. Observaram que para corte ortogonal quatro variáveis são determinantes no padrão da tensão residual gerada na superfície usinada, sendo eles:

- comprimento do plano de cisalhamento;
- desgaste de flanco;
- geometria da cunha cortante;
- profundidade de usinagem.

Segundo eles, a geometria da cunha cortante determina o padrão de tensão residual próximo à superfície. Menores profundidades de corte, não necessariamente produzem menores tensões sub-superficiais. O desgaste de flanco aumenta a temperatura de corte. Menores restrições durante o processo de deformação resultam em menores níveis de tensão residual.

Liu e Barash (1976) conduziram um estudo cujo objetivo era não apenas avaliar os efeitos do processo de remoção de cavaco durante a usinagem na tensão residual mas também os efeitos no material usinado como um todo. A partir disto, três grandezas foram estabelecidas como relevantes para quantificar o estado mecânico da peça usinada, sendo estas:

- densidade de energia de deformação;

- índice de encruamento;
- distribuição de tensão residual.

A pesquisa mostrou que a deformação plástica da camada abaixo da superfície para uma determinada profundidade de usinagem foi determinada unicamente pelo comprimento do plano de cisalhamento.

Eles concluíram que as tensões residuais são geradas predominantemente por efeitos mecânicos embora os efeitos térmicos sejam aparentes.

Matsumoto, Barash e LIU (1986) se uniram em um estudo sobre os efeitos da dureza na integridade da superfície do aço AISI 4340. A análise, como no trabalho anterior de Liu e Barash, se baseou no processo de formação do cavaco. Nesse sentido observou-se que componentes usinados em material com dureza abaixo de 49 HRC produzem cavacos contínuos. Aumentando-se a dureza levou-se à formação de cavacos segmentados. Utilizaram o conceito de contato de rolamento para demonstrar o ciclo de carregamento experimentado pela peça durante a usinagem. Por este estudo foi observado que ao se usinar aço com menores durezas (macio) a deformação proveniente do processo alcança uma camada mais profunda e a superfície é comprimida resultando em tensão residual de tração.

Xie et al. (1989) investigaram o efeito do desgaste da ferramenta na tensão residual induzida nos processos de usinagem chegando a resultados semelhantes aos apresentados por Liu e Barash, (1982).

Sadat e Bailey (1987) ao realizarem ensaios de corte ortogonal em AISI 4340 buscando verificar os efeitos da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem no perfil de tensão residual chegaram à conclusão que o valor absoluto da tensão residual aumentou com o aumento da profundidade abaixo da superfície usinada.

Jang et al. (1996) usaram ensaios de torneamento em AISI 304 para determinar os efeitos dos parâmetros de corte na tensão residual induzida. O trabalho demonstrou uma forte influência da forma da ferramenta.

Matsumoto, Hashimoto e Lahotti, (1999) trabalhando com torneamento duro conduziu ensaios de fadiga cujos estes demonstraram que componentes fabricados por este processo apresentavam vida em fadiga similar a componentes polidos devido ao alto nível de tensão residual de compressão. Também foi constatado que, para este caso, a profundidade de usinagem e o avanço não afetaram de maneira significativa a tensão residual na sub-superfície do componente usinado. Já a geometria da ponta da ferramenta teve papel dominante no perfil de tensões residuais gerado, em linha com trabalhos anteriores.

Jacobson, (2002) conduziu ensaios de torneamento duro usando diferentes geometrias de ferramentas e variando-se a profundidade de usinagem. Observou que o ângulo de saída e o raio de ponta afetam a intensidade da tensão residual induzida. Quanto mais negativo este ângulo e menor o raio de ponta mais compressivo será o caráter de tensão residual. Em linha com trabalhos anteriores, também constatou que a profundidade de usinagem não afeta de maneira significativa a tensão residual.

### 3.8.2 Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento

A energia de corte utilizada nos processos de usinagem resulta em aumento de temperatura e deformação plástica. Três fatores que podem induzir tensões residuais podem ser destacados.

- Deformação plástica envolvendo atrito e recalque de material na superfície tende a gerar tensão residual de compressão.
- Aumento de temperatura que normalmente causa expansão, e que por sua vez é restringida pelo material como um todo. A tensão resultante devido à expansão térmica pode exceder a tensão de escoamento e por sua vez a superfície será perturbada. Durante o próximo resfriamento tensão residual de tração será induzida.
- Dependendo das características do material, martensita pode se formar e induzir tensão residual de compressão.

Nas operações de fresamento em todos os casos a tensão residual induzida é resultado do balanço entre os três fatores mencionados. O processo mecânico é usualmente dividido em formação do cavaco e atrito e recalque de material da superfície fresada. Formação do cavaco (i.e., separação metálica) tende a gerar tensão residual de tração, enquanto atrito e recalque de material da superfície tende a induzir tensão residual de compressão. A maior parte do calor gerado fica no cavaco e é removido da peça.

O efeito da temperatura é favorável em fresamento concordante, bem como nas operações de faceamento com eixo de corte inclinados e o efeito de atrito e recalque de material em fresamento discordante e operações de faceamento com eixo perpendicular.

A Figura 3.12 resume o comportamento da tensão residual em aços devido a diferentes processos de fresamento.

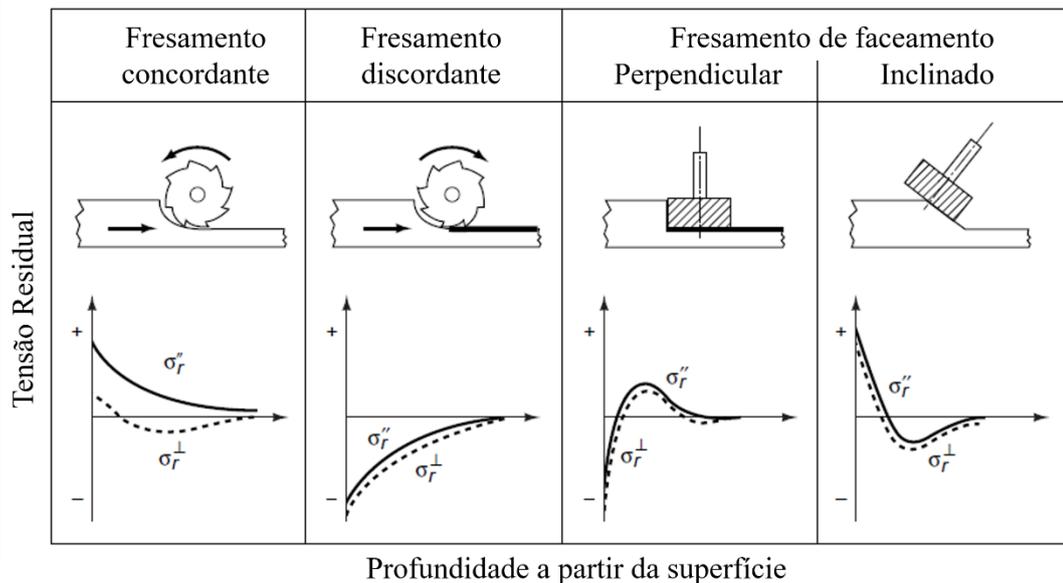


Figura 3.12 - Distribuição característica de tensões residuais em aço induzidas por diferentes processos de fresamento. Linhas sólidas e tracejadas, paralela e perpendicular à direção de avanço respectivamente  
 FONTE: Adaptado de (TOTTEN; HOWES; INOUE, 2002)

El-Khabeery e Fattouh, (1989) realizaram um estudo com objetivo de avaliar o efeito da velocidade de corte, profundidade de usinagem, taxa de avanço e limite de resistência do material ensaiado sobre a tensão residual induzida na superfície obtida por fresamento utilizando uma fresa tangencial. Os materiais ensaiados foram, uma liga de alumínio: AlMnSi, bronze: MS63, e aço: graus 34, 50 e 60. Os principais resultados são apresentados na Figura 3.13.

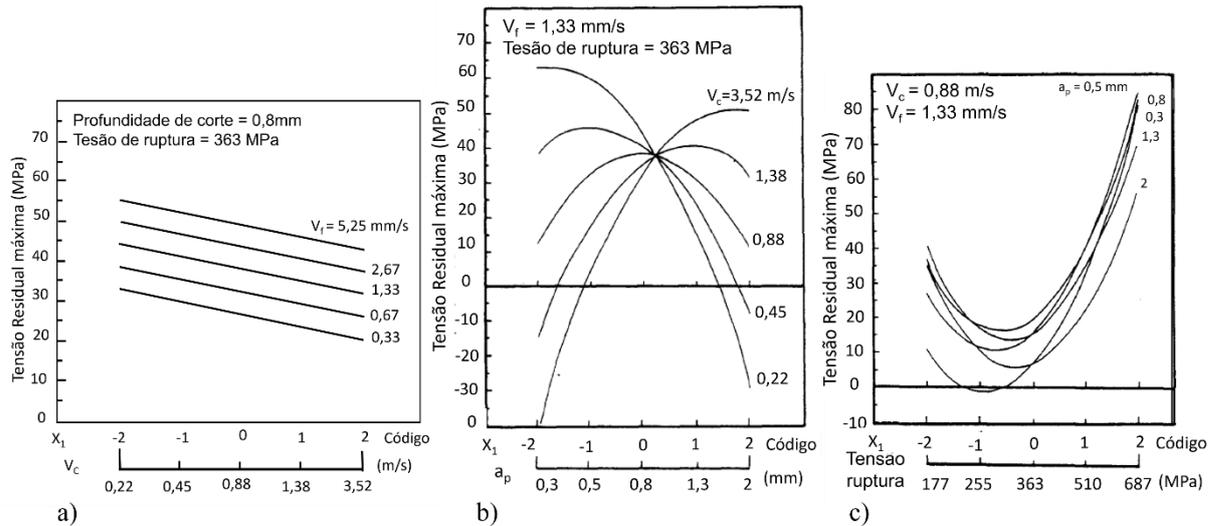


Figura 3.13 - a) efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual para diferentes velocidades de avanço, b) efeito da profundidade de usinagem sobre a tensão residual para diferentes velocidades de corte e c) efeito do limite de resistência a tração sobre a tensão residual para diferentes profundidades de corte.

FONTE: Adaptado de (EL-KHABEERY; FATTOUH, 1989)

Observa-se pela Figura 3.13 a) que o aumento da velocidade de corte resultou em redução gradual na intensidade da tensão residual independente da velocidade de avanço. Isso ocorreu provavelmente devido ao fato de que pelo balanço entre os efeitos térmicos e mecânicos predominou-se os mecânicos induzindo tensões residuais menos trativas. Pela Figura 3.13 b) observa-se o efeito da interação entre a profundidade de usinagem e a velocidade de corte. Para profundidades até 1mm um aumento na velocidade de corte resultou na redução da tensão residual. O que sugere que para estas profundidades predomina-se os efeitos de deformação plástica, atrito e recalque com possível formação de martensita. Na Figura 3.13 c) e apresentado o efeito do limite de resistência a tração sobre a tensão residual para diferentes profundidades de corte. Observa-se que para limites de resistência à tração até 363 MPa o aumento deste implicou em redução da tensão residual, enquanto que para limites de resistência a tração maiores que 363 MPa levou ao aumento rápido da tensão residual. Caracterizando um ponto de inflexão para o comportamento da tensão residual induzida em função do limite de resistência à tração. Este comportamento sugere que a partir de uma determinada resistência à tração passe a predominar os efeitos térmicos, entretanto não a ponto de ocorrer formação de martensita, visto que caso isto ocorresse teria-se a predominância de tensões residuais de compressão.

### 3.8.3 Métodos de medição de tensões residuais

Diversas técnicas para medição de tensões residuais foram desenvolvidas ao longo dos anos, tanto quantitativas quanto qualitativas.

Geralmente estas técnicas são classificadas em dois grupos, destrutivas e não destrutivas. As destrutivas comprometem a utilização do componente após a medição enquanto que a não destrutiva, possibilita a utilização, em alguns casos, do componente ensaiado. Algumas também são consideradas semi-destrutivas, entretanto dependerá do grau de responsabilidade que o componente desempenhará. Neste trabalho a técnica empregada foi a do furo central, que será mais explorada à frente.

A Figura 3.14 resume as principais técnicas disponíveis onde também é apresentado uma comparação entre elas sob alguns aspectos.

Metodo	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultrasson	Magnético	Furo Central	Deflexão	Seccionamento
Natureza	Não destrutivo	Não destrutivo	Não destrutivo	Não destrutivo	Destrutivo ou semi-destrutivo	Destrutivo	Destrutivo
Hipótese	Isotropico Homogêneo Grão fino Policristalino	Isotropico Homogêneo Policristalino	Isotropico Material homogêneo Tensão homogênea no caminho acustico entre transmissor e receptor Policristalino	Material ferromagnético	Tensão biaxial uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial uniforme no retângulo onde o comprimento e a largura são suficientemente largos	Campo de tensão tridimensional
Tipo que se aplica	I, II e III	I e II	I, II e III	I, II e III	I	I	I
Parâmetros medidos	Alteração no espaçamento interplanar	Alteração no espaçamento interplanar	Varição de velocidade da onda ultrassônica	Amplitude de ruído ou permeabilidade magnética	Deformação superficial	Deformação ou deflexão	Deformação superficial
Área mínima para análise	0,5mm <sup>2</sup>	4mm <sup>2</sup>	0,1 a 30mm <sup>2</sup>	1 a 100mm <sup>2</sup>	0,5mm <sup>2</sup>	100 a 1000mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>
Profundidade acessada	1 - 50µm	2 - 50µm	0,015 - 3mm	0,1 - 1mm	0,02 - 1,5mm	0,1 - 3mm	> 1mm
Precisão	±20MPa	±30MPa	10 - 20MPa	10 - 20MPa	±20MPa	±30MPa	±10MPa

Figura 3.14 - Comparação geral de alguns métodos para medição de tensão residual

FONTE: Adaptado de (LU, 1996)

Dentre as técnicas mais utilizadas pode-se destacar:

- difração de raio-x;
- remoção de camadas;
- furo central.

### 3.8.3.1 Difração de raio-x

Análise de tensão residual por difração de raios-X é possível a partir de informações sobre as distorções elásticas decorrentes do deslocamento relativo de planos cristalográficos particulares numa matriz cristalina. Quando a matriz é sujeitada a tensão, deformação elástica é produzida na rede cristalina. Valendo-se da teoria da elasticidade estas deformações são convertidas em tensões, uma vez conhecidas as constantes elásticas apropriadas. Os dados coletados representam a deformação medida dentro de uma camada da superfície irradiada com a espessura de alguns micrometros, dependendo do material e da intensidade da radiação.

A principal restrição para aplicação da difração de raios-X para medição de tensão residual de superfícies usinadas de ultra precisão é a profundidade de penetração dos raios-X na peça. A profundidade de penetração é dependente principalmente do comprimento de onda da irradiação, plano cristalino e do coeficiente de absorção do material.

Outra restrição diz respeito a necessidade de homogeneidade e isotropia do material. É possível medir em materiais não homogêneos, porém para isto é necessário que se faça ajustes no arranjo experimental e nas equações aplicadas.

Também são consideradas restrições relevantes para medição em componentes com gradientes de tensões ao longo da profundidade e componentes não planos (BRINKSMEIER, 1989).

### 3.8.3.2 Remoção de camadas

Esta técnica consiste em remover-se camadas da amostra ou peça ensaiada, medir as deformações decorrentes desta retirada de material e relaciona-las às tensões residuais existentes.

Cuidado deve ser tomado para evitar que a remoção destas camadas resulte em alterações no padrão de tensões residuais original. Polimento químico ou eletrolítico são boas opções para este fim.

As medições das deflexões podem ser realizadas por meio de extensometria, perfilometria e microscopia ótica.

### 3.8.3.3 Furo central

Este método consiste na realização de um furo, com diâmetro entre 0,8 e 5 milímetros, na amostra ou peça que se deseja obter as tensões residuais. Mediante a realização deste furo ocorre o relaxamento da amostra nas adjacências ao furo realizado. As deformações devidas a este relaxamento são então medidas por extensômetros e a partir destas aplica-se os conceitos da teoria da elasticidade para se calcular as tensões residuais presentes. A técnica é dita incremental tendo em vista que este furo é realizado de forma incremental ao longo da profundidade e as deformações mediadas para cada incremento.

O método foi inicialmente proposto em de 1934 por Mathar (ASTM E837, 2013).

Deste então vários trabalhos foram realizados com uso da técnica vindo a ser normatizada pela ASTM 837 em 1983.

É aplicável para determinação do perfil de tensões residuais onde os gradientes de tensões no plano são pequenos. A tensão pode ser aproximadamente constante ao longo da profundidade a partir da superfície ou pode variar significativamente. A amostra ou peça pode ser fina, quando a espessura é menor que  $0,2D$ , ou espessa, quando a espessura é maior do que  $D$ . Para o caso de espessura fina, é possível medir somente tesões uniformemente distribuídas ao longo da profundidade. A Figura 3.15 ilustra esta condição.

O método é considerado semi-destrutivo, uma vez que dependendo da aplicação a peça não terá seu desempenho comprometido em decorrência do furo.

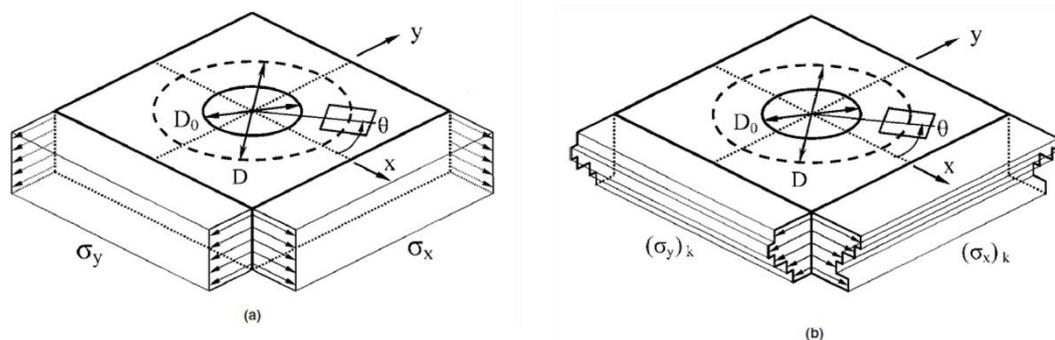


Figura 3.15 - Geometria do furo e tensão residual, a) tensão uniforme, b) tensão não uniforme

FONTE: Adaptado de (ASTM E837, 2013)

São utilizados três extensômetros para medir as deformações provocadas pelo relaxamento da amostra nas adjacências ao furo realizado. Estes extensômetros são agrupados em forma de

roseta, conforme Figura 3.16. Existem vários tipos de rosetas, sendo cada tipo indicado para uma determinada aplicação. Uma boa orientação para esta seleção pode ser encontrada na norma técnica TN-505 fornecida pelo fabricante Vishay Precision Group.

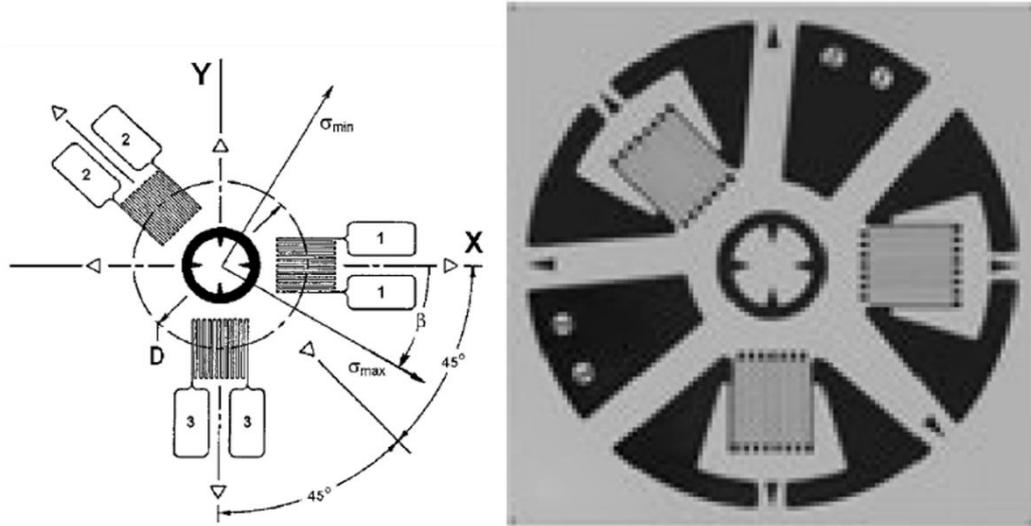


Figura 3.16 - Esquema de uma roseta de três extensômetros organizados de forma horária

FONTE: Adaptado de (ASTM E837, 2013) e (VISHAY PRECISION GROUP, 2015)

As deformações de cada extensômetro são captadas por um equipamento específico. Os dados obtidos podem ser trabalhados em softwares que entregam como resposta o perfil de tensões residuais ao longo da profundidade a partir da superfície ou podem ser realizados cálculos com base na teoria contida na norma ASTM E837.

A norma traz uma série de recomendações importantes ao se aplicar o método visando garantir uma boa acuracidade das medições. Dentre elas podem-se destacar:

- condição da superfície a receber a roseta quanto ao desvio médio aritmético e nível de sujidade;
- oscilações de temperatura ambiente durante a realização do furo e captura das deformações;
- perpendicularidade do furo em relação à superfície onde está afixada a roseta;
- condição da fresa que realiza o furo para não permitir que tensões sejam induzidas pelo processo de furação;
- em caso de materiais de difícil usinagem recomenda-se o uso de óleo lubrificante desde que não seja condutor.
- o método é válido para tensões residuais até a ordem de 80% do limite de escoamento do material ensaiado para espessura grossa ou 50% para espessura fina.

Informações mais detalhadas sobre os diversos métodos para medições de tensões residuais podem ser consultadas em (ANDEROGLU, 2005; SCHAJER, 2013; TOTTEN; HOWES; INOUE, 2002).

#### 3.8.4 Fatores que influenciam a tensão residual

Nos processos de usinagem uma série de fatores exercem influência sobre a tensão residual induzida na superfície gerada. Estudos específicos relacionados aos fatores aqui estudados da maneira como foram agrupados não são comuns. De um modo geral encontra-se estudos direcionados ao processo de torneamento, (NAVAS; GONZALO; BENGOETXEA, 2012; SADAT; BAILEY, 1987), fresamento, (HUANG; ZHANG; DING, 2015; MANTLE; ASPINWALL, 2001; SUN; GUO, 2009; ZHANG; DING; LI, 2012), furação, (KWONG; AXINTE; WITHERS, 2009), entre outros. Uma boa fonte de literaturas relacionadas ao tema pode ser encontrada em trabalhos que buscam prever o comportamento da tensão residual para os diversos processos de usinagem. Dentre estes podem-se destacar, (SU, 2006; WAN et al., 2019). Outras fontes são os trabalhos que buscam estudar o comportamento em fadiga em função da tensão residual induzida na superfície, (HUANG; XIN, 1991; JAVIDI; RIEGER; EICHLSEDER, 2008; SASAHARA, 2005).

Na Figura 3.17 pode ser observado o efeito de alguns parâmetros de usinagem sobre a tensão residual induzida sobre a superfície obtida por fresamento em uma liga de titânio alumínio.

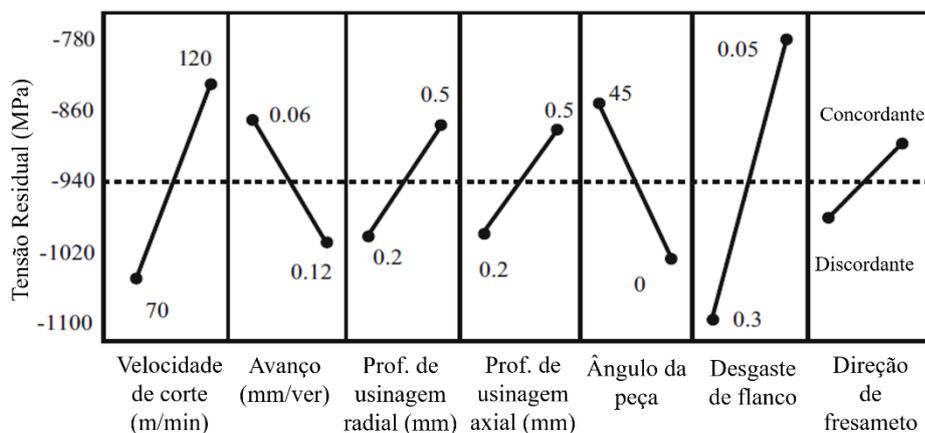


Figura 3.17 - Efeitos dos parâmetros de usinagem sobre a tensão residual induzida na superfície de uma liga de titânio alumínio pela operação de fresamento.

FONTE: Adaptado de (MANTLE; ASPINWALL, 2001)

Observa-se pela Figura 3.17 que, para a liga titânio-alumínio, o aumento da velocidade de corte reduz o caráter compressivo da tensão residual sugerindo que os efeitos térmicos passam a predominar. Quanto ao tipo de operação, concordante ou discordante, o comportamento apresentado foi em linha com o apresentado por Totten; Howes e Inoue, (2002).

Na Figura 3.18 pode se observar a relação entre a tensão residual axial e a vida em fadiga para superfícies produzidas por torneamento com ferramentas chanfradas e não chanfradas.

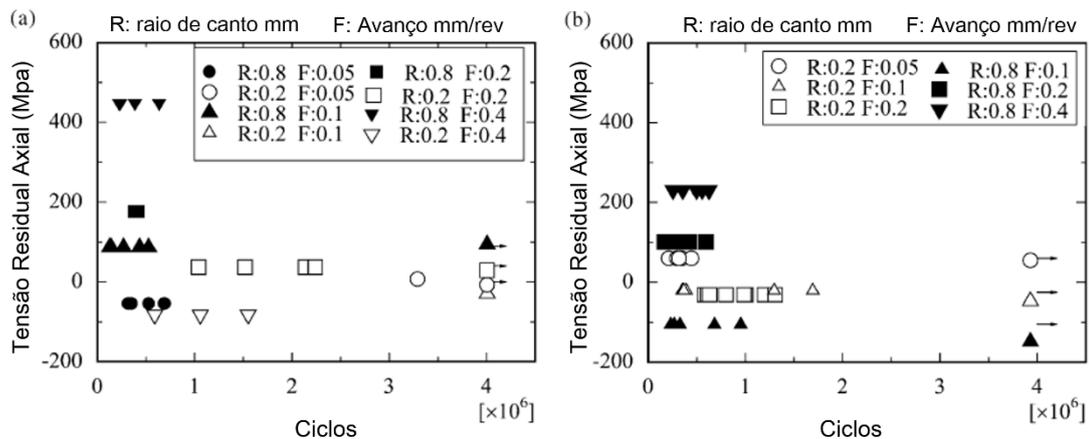


Figura 3.18 - Relação entre tensão residual axial e vida em fadiga. a) Ponta da ferramenta com chanfro b) ponta da ferramenta sem chanfro

FONTE: Adaptado de (SASAHARA, 2005)

Observa-se pela Figura 3.18 que quando a tensão residual na superfície é trativa todos corpos de prova falham com menos de  $10^6$  ciclos tanto para ferramentas com chanfro quanto sem chanfro. Já quando a tensão residual na superfície é compressiva os corpos de prova apresentam uma vida em fadiga superior a  $10^6$  ciclos.

### 3.9 Forças de usinagem

O conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de suas componentes vetoriais são de grande importância porque possibilitam estimar a potência de corte necessária para o corte bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta. Além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo (MACHADO et al., 2015). É apresentado na Figura 3.19 as principais componentes de forças de usinagem para alguns processos.

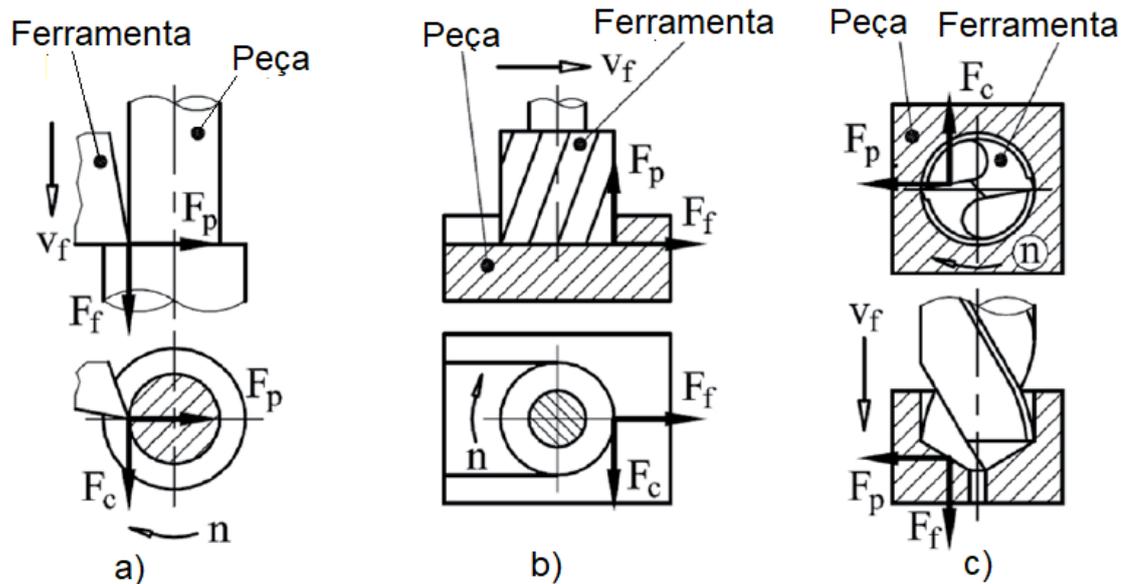


Figura 3.19 - Forças de usinagem para processos típicos de usinagem. a) torneamento; b) fresamento e c) furação  
 FONTE: Adaptado de (BIRÓ; CZAMPA; SZALAY, 2015)

Esforços para investigar o processo de fresamento, o que inclui forças de corte, iniciaram-se no início dos anos de 1940 por Martelletti. Aproximadamente uma década depois Pickenbrink estudou forças de corte na operação de fresamento de faceamento. Em 1961, Koenigsberger e Sabberwal investigaram o comportamento pulsante das forças de corte tanto para fresamento tangencial quanto de faceamento utilizando um dinamômetro para medir as três componentes de força. Com a rápida evolução da instrumentação e tecnologia computacional alcançada na década de 70 a dinâmica das forças de corte foi investigada por Tlustý e Macneil no fresamento de topo e no de faceamento por Gygax. (RUZHONG; WANG; MERCHANT, 1983).

Dois aspectos particulares do comportamento das forças de corte durante o fresamento são, o fato de serem intermitentes, visto que o corte é considerado interrompido uma vez que a ferramenta não está em contato com a peça durante todo o tempo de usinagem, e que a intensidade de cada componente de força depende, dentre outros fatores, da posição angular instantânea da ferramenta na peça. Posição está representada pelo ângulo  $\theta$ , teta, da Figura 3.20. Para cada valor de  $\theta$  tem-se uma espessura distinta ( $a$ ) para o cavaco. Esta espessura varia de um valor mínimo em  $\theta=0^\circ$  até um valor máximo em  $\theta=90^\circ$  voltando ao valor mínimo em  $\theta=180^\circ$

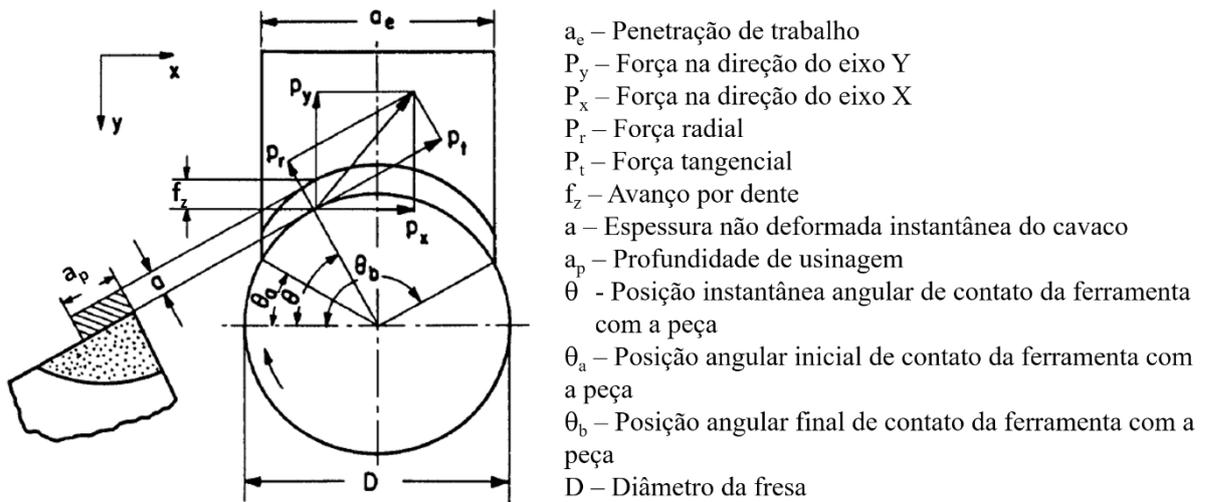


Figura 3.20 - Nomenclatura e componentes de força em uma operação típica de fresamento de faceamento

FONTE: Adaptado de (RUZHONG; WANG; MERCHANT, 1983)

Potência é fornecida ao eixo árvore da máquina ferramenta e convertida em força como resposta à resistência ao corte oferecida pelo material. Estas forças decompostas no plano são representadas na Figura 3.20 por  $P_t$  e  $P_r$ , força tangencial e força radial respectivamente. Também está presente a força passiva ( $F_p$ ) que é perpendicular ao plano que contém as forças  $P_t$  e  $P_r$ , não representada na Figura 3.20 e sim na Figura 3.19 b). As forças, tangencial e radial, são difíceis de serem determinadas. Em função disto utiliza-se para os estudos os valores obtidos para  $P_x$ ,  $P_y$  e  $F_p$  obtidos por meio de medições com uso de dinamômetros.

É apresentado na Figura 3.21 o comportamento das componentes da força de usinagem medidos nas direções x e y em função do ângulo  $\theta$ .

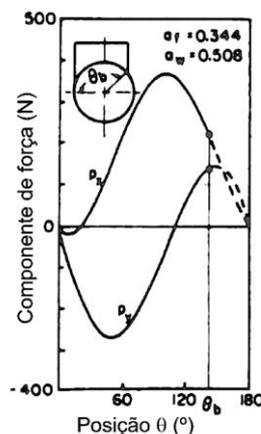


Figura 3.21 - Comportamento das componentes da força de usinagem para fresamento não simétrico tendo a fresa apenas um dente

FONTE: Adaptado de (RUZHONG; WANG; MERCHANT, 1983)

Na Figura 3.21 como o diâmetro da fresa é maior que a largura de usinagem ( $a_e$  da Figura 3.20) quando  $\theta=0$  a ferramenta ainda não está em contato com a peça, logo as componentes nas direções  $x$  e  $y$  tem módulo próximo a 0, pois refletem apenas sinais decorrentes da vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça. Na medida em que o contato ocorre e  $\theta$  aumenta,  $P_x$  e  $P_y$  aumentam em módulo até próximo a  $\theta=100^\circ$ , caso o fresamento fosse centralizado isto ocorreria em  $\theta=90^\circ$ . O aumento em módulo ocorre em resposta ao aumento da espessura do cavaco em função de  $\theta$ . A partir deste ponto máximo as componentes tem seu módulo reduzido até quando a ferramenta não está mais em contato com a peça, próximo à  $\theta=\theta_b$ .

### 3.10 Planejamento Fatorial

Um dos problemas mais comuns para quem faz experimentos é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse. A Figura 3.22 representa um sistema, que pode ser uma função, em princípio desconhecida, ligando os fatores, variáveis de entrada, às respostas, variáveis de saída (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

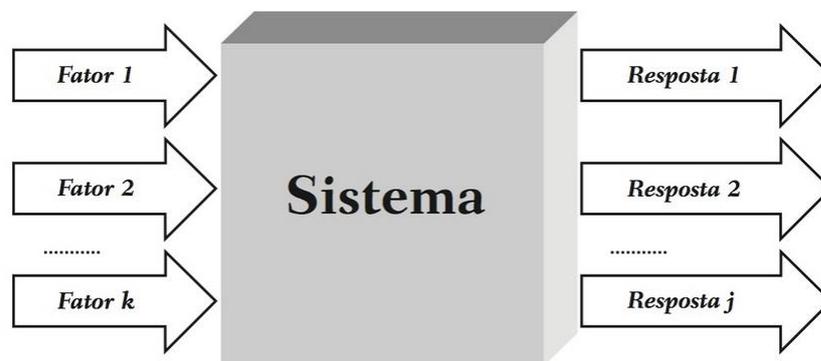


Figura 3.22 - Representação de um sistema (função), fatores (variáveis de entrada) e respostas (variáveis de saída)

FONTE: (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

Um certo número de fatores,  $F_1, F_2, \dots, F_k$ , atuando sobre o sistema em estudo, produz as respostas  $R_1, R_2, \dots, R_j$ . O sistema atua como uma função, desconhecida em princípio, que opera sobre as variáveis de entrada (os fatores) e produz como saída as respostas observadas (variáveis de saída). O objetivo da pessoa que realiza os experimentos é descobrir essa função, ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para ela. Com esse conhecimento, ela poderá entender melhor a natureza do fenômeno em estudo, e assim escolher as melhores condições de operação do sistema.

No planejamento de qualquer experimento, a primeira coisa que devemos fazer é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores, em geral, são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar. Às vezes, num determinado experimento, sabemos que existem fatores que podem afetar as respostas, mas que não temos condições de, ou não estamos interessados em controlar. Precisamos tomar muito cuidado com fatores desse tipo, para que o seu efeito não seja confundido com os efeitos de interesse. Para isso, podemos usar a blocagem e a aleatorização

Na blocagem os efeitos dos fatores de interesse variam apenas dentro de blocos, com isso exclui-se os efeitos dos fatores que não são de interesse. Já na aleatorização a ordem de realização dos ensaios é obtida por sorteio. Desta forma a probabilidade de um determinado fator afetar as respostas é a mesma para todas as respostas e assim sua atuação ficará diluída. Na aleatorização estamos nos precavendo de fatores que talvez possam influenciar as respostas, mas dos quais não temos conhecimento, já na blocagem sabemos quais são estes fatores, entretanto não estamos interessados em seus efeitos.

O planejamento dos experimentos, isto é, a especificação detalhada de todas as operações experimentais que devem ser realizadas, vai depender do objetivo particular que ele quiser atingir. Objetivos diferentes precisarão de planejamentos diferentes.

Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Em geral, se houver  $n_1$  níveis do fator 1,  $n_2$  níveis do fator 2, ..., e  $n_k$  do fator  $k$ , o planejamento será um fatorial  $n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k$ . Isso não significa, obrigatoriamente, que serão realizados apenas  $n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k$  experimentos; este é o número mínimo necessário para um planejamento fatorial completo (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Uma ferramenta para o tratamento dos dados de um experimento é a Análise de Variância, ANOVA. Com ela é possível verificar quais fatores são estatisticamente significativos no processo (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

Os resultados da análise de variância são apresentados em um quadro. A Figura 3.23 traz um exemplo acompanhado de uma legenda para cada termo do quadro. Mais detalhes poderão ser observados no capítulo Resultados e Discussão bem como consultados em Montgomery e Runger (2016).

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F <sub>0</sub>	p-valor
Tratamentos	SQ Tratamentos	$\alpha - 1$	MQ Tratamentos	MQ Tratamentos/ MQE	$p ( F_{\alpha - 1, \alpha (m - 1)} > F_0 )$
Erro	SQ <sub>E</sub>	$\alpha (m - 1)$	MQ <sub>E</sub>		
Total	SQ <sub>T</sub>	$\alpha m - 1$			

Figura 3.23 - Análise de variância para um experimento de um fator

FONTES: (MONTEGOMERY E RUNGER apud PEREIRA, 2017)

Onde:

SQ tratamentos = Soma dos quadrados dos tratamentos

SQ<sub>E</sub> = Soma dos quadrados dos erros

SQ<sub>T</sub> = Soma dos quadrados totais

MQ tratamentos = Média quadrática dos tratamentos

MQ<sub>E</sub> = Média quadrática dos erros

$\alpha$  = número de tratamentos

m = número de réplicas dentro de cada tratamento

F<sub>0</sub> = o valor é calculado pela divisão da MQ tratamentos sobre MQE

P-valor = nível descritivo ou probabilidade de significância

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda as etapas adotadas desde a preparação dos corpos de prova até a obtenção dos resultados apresentados no capítulo 5.

Os experimentos foram realizados conforme fluxograma apresentado na Figura 4.1, no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

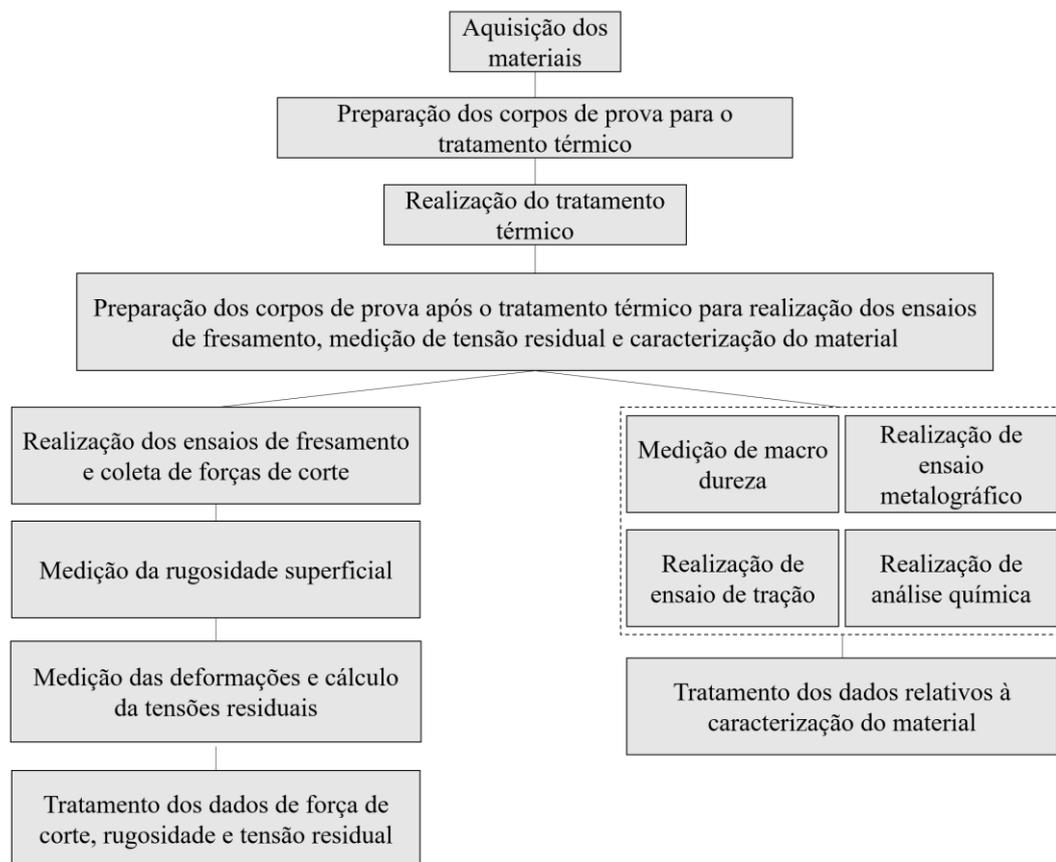


Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental

FONTE: autor, 2019

### 4.1 Materiais e métodos

Os corpos de prova foram adquiridos nas dimensões de 75x60x27 mm, retirados de um único bloco de seção transversal de 254x480mm. Foi tomado o cuidado para que todos tivessem a dimensão de 75mm com mesma orientação, sendo o sentido de laminação. Este cuidado é importante devido à anisotropia do material. Para realização do ensaio de tração foram

adquiridas barras nas dimensões de 110x25x25mm a partir do mesmo bloco que os demais com a dimensão de 110mm com orientação no sentido de laminação. Todos foram obtidos por meio de corte com uso de serra alternativa. Ao todo foram adquiridos trinta e nove blocos para os ensaios de fresamento e seis barras para os ensaios de tração. Na sequência cada metade dos corpos de prova foram tratados termicamente pelos processos de recozimento e normalização. No recozimento os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de 810°C e mantidos nesta temperatura por uma hora. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno após seu desligamento.

Na normalização os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de 870°C e mantidos nesta temperatura por uma hora. O resfriamento foi realizado ao ar.

Estes foram devidamente identificados quanto ao tratamento térmico, recozimento ou normalização.

#### 4.2 Preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios de fresamento

Após realização do tratamento térmico os corpos de prova foram usinados em um centro de usinagem Romi modelo Discovery 560 com potência de 9,0 kW e rotação máxima de 7500 rpm, com comando numérico Siemens 810D. As dimensões dos corpos de prova para o fresamento foram definidas considerando as dimensões da mesa do dinamômetro a ser utilizado para obtenção das forças de corte. Na Figura 4.2 podem ser observadas a geometria e as dimensões dos corpos de prova preparados para o ensaio de fresamento.

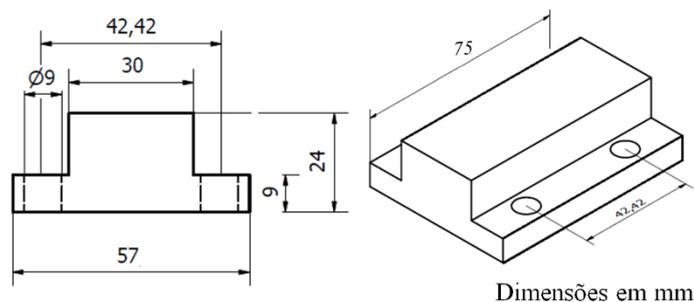


Figura 4.2 - Geometria e dimensões do corpo de prova para o fresamento

FONTE: autor, 2019

Um corpo de prova pronto para realização do ensaio de fresamento e posicionado sobre a mesa do dinamômetro pode ser visto na Figura 4.3.

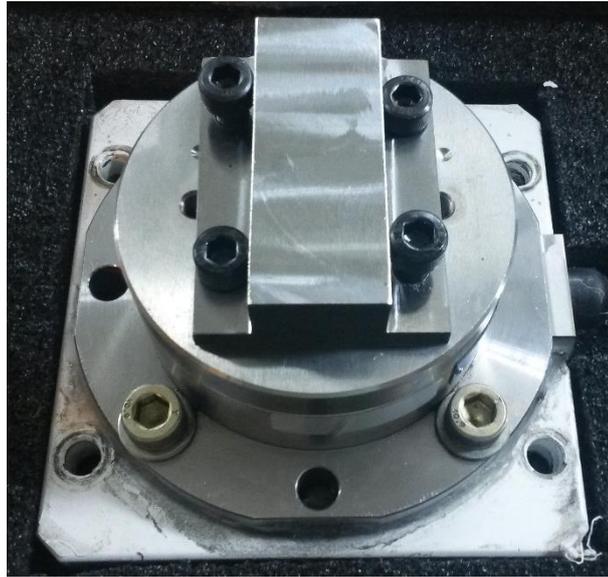


Figura 4.3 - Corpo de prova para fresamento posicionado sobre a mesa do dinamômetro

FONTE: autor, 2019

### 4.3 Preparação dos corpos de prova para caracterização do aço ABNT 4340

Para caracterização do aço ABNT 4340 tendo como objetivo atestar a conformidade do material adquirido quanto às propriedades mecânicas, composição química e microestrutura típicas, foram preparados corpos de prova para ensaio de tração e retiradas amostras para análise química e metalográficas. Um croqui com as principais dimensões para os corpos de prova com base em (ABNT 6892-1, 2018) é apresentado na Figura 4.4 e corpos de prova prontos para realização dos ensaios de tração podem ser observados na Figura 4.5.

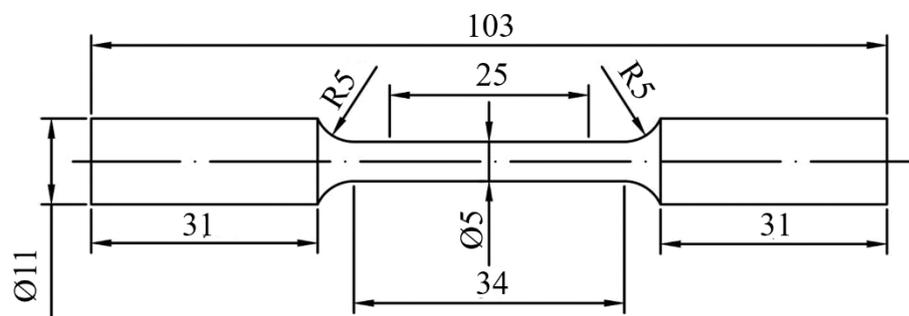


Figura 4.4 – Croqui do corpo de prova para ensaio de tração

FONTE: autor, 2019



Figura 4.5 - Corpos de prova para ensaio de tração

FONTE: autor, 2019

#### 4.4 Análise química

Foi realizada análise química por espectroscopia óptica no laboratório do Senai, unidade Itauna-MG. A amostra para este fim foi retirada do corpo de prova número 28 conforme esquema apresentado na Figura 4.6.

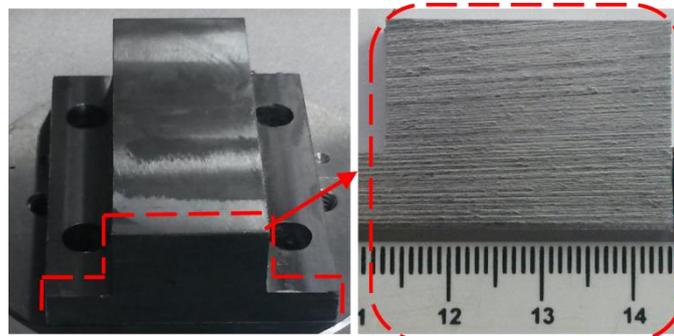


Figura 4.6 - Obtenção de amostra para análise química

FONTE: autor, 2019

#### 4.5 Caracterização da microestrutura

Para caracterização da microestrutura foram retiradas amostras dos corpos de prova 13, normalizado, e 28, recozido. Foi removida uma parte da seção transversal dos referidos corpos de prova e embutida em baquelite pelo processo a quente. Conforme pode ser observado no esquema representado na Figura 4.7.

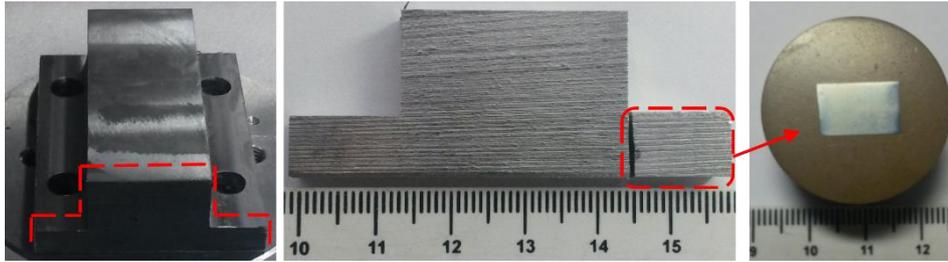


Figura 4.7 - Preparação de amostras para metalografia

FONTE: autor, 2019

Posteriormente as amostras foram lixadas com lixas de granulometria 80, 220, 320, 400, 600 e 1000. O polimento foi realizado com pasta de diamante de 1 $\mu$ m. Para a visualização da microestrutura das amostras foi realizado ataque com solução de nital a 2%. As imagens foram obtidas com uso de uma lupa eletrônica acoplada ao microscópio óptico. Para isto foi utilizado as instalações do laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, campus Coração Eucarístico.

#### 4.6 Realização dos ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio de tração modelo AG-IS 100KN do fabricante *SHIMADZU*. Adotou-se a norma ABNT 6892-1. Os dados de força e deslocamento obtidos foram tratados em uma planilha de *excel* e obtidas as propriedades desejadas. Detalhes esquemáticos referentes ao ensaio de tração podem ser observados na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Realização de ensaio de tração

FONTE: autor, 2019

#### 4.7 Medição de dureza

Realizou-se medição de dureza na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, campus Coração Eucarístico, por meio de um durômetro VEB *Wpm modelo 300/216*. Foram realizadas 3 medições em cada corpo de prova e realizada a média entre eles. Obteve como dureza média  $23 \pm 2,40$  e  $37 \pm 1,24$  HRC para o material recozido e normalizado respectivamente.

#### 4.8 Planejamento para o experimento

Os ensaios foram realizados segundo um planejamento fatorial  $2 \times 3 \times 2$  e com três réplicas. Uma sequência aleatória foi gerada para realização dos ensaios de fresamento. A profundidade de usinagem foi mantida constante em 1mm. Adotou-se espessura do cavaco constante, o que resultou em três avanços distintos para cada ângulo de posição. Para identificação das condições e simplificação do registro dos diferentes dados obtidos com os ensaios bem como se referenciar a eles no texto elaborou-se uma codificação que representa as condições dos fatores que foram variados. Esta codificação está descrita na Figura 4.9.

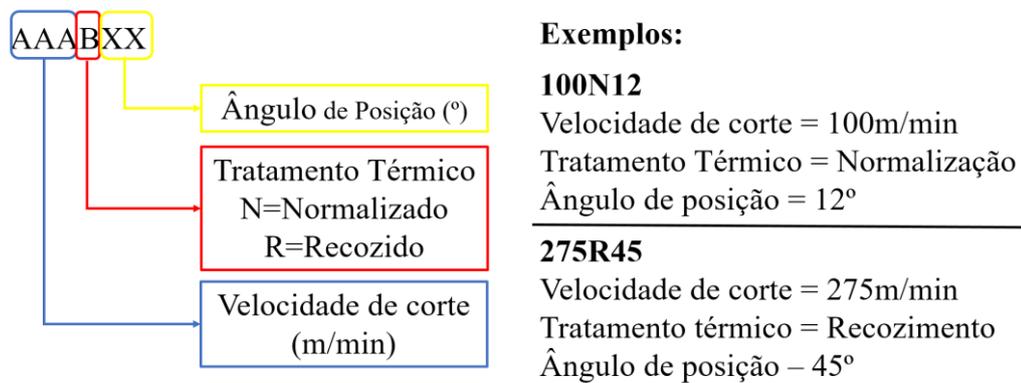


Figura 4.9 - Codificação para condições de ensaio

FONTE: autor, 2019

Quando no texto surgir a necessidade de ser referir a uma condição onde um fator é variado e os outros dois são mantidos constantes aparecerá a letra na respectiva posição referente ao fator no código.

Os corpos de prova foram devidamente numerados e tabelados. Parcialmente estão demonstrados na Tabela 4.1. A tabela completa está disponível no Apêndice 11.A.

Código	Velocidade de corte (m/min)	Tratamento Térmico	Ângulo de Posição (°)	Sequência de ensaio	Nº do Corpo de Prova	Nº Replica
100N12	100	Normalizado	12	6	13	3
100N12	100	Normalizado	12	16	1	1
100N12	100	Normalizado	12	33	7	2
100N45	100	Normalizado	45	12	8	2
100N45	100	Normalizado	45	22	14	3
100N45	100	Normalizado	45	25	2	1
100N90	100	Normalizado	90	7	9	2

Tabela 4.1 - Organização dos ensaios de fresamento

FONTE: autor, 2019

Os valores para velocidade de corte e avanço foram selecionados baseando-se em recomendação do fabricante por meio de consulta aos respectivos catálogos de ferramentas.

Foram utilizadas três fresas com ângulos de posição distintos, sendo 12, 45 e 90°. As fresas, bem como os inserts utilizados são apresentados na Figura 4.10. Fresas e inserts do fabricante *MITSUBISHI CARBIDE*.

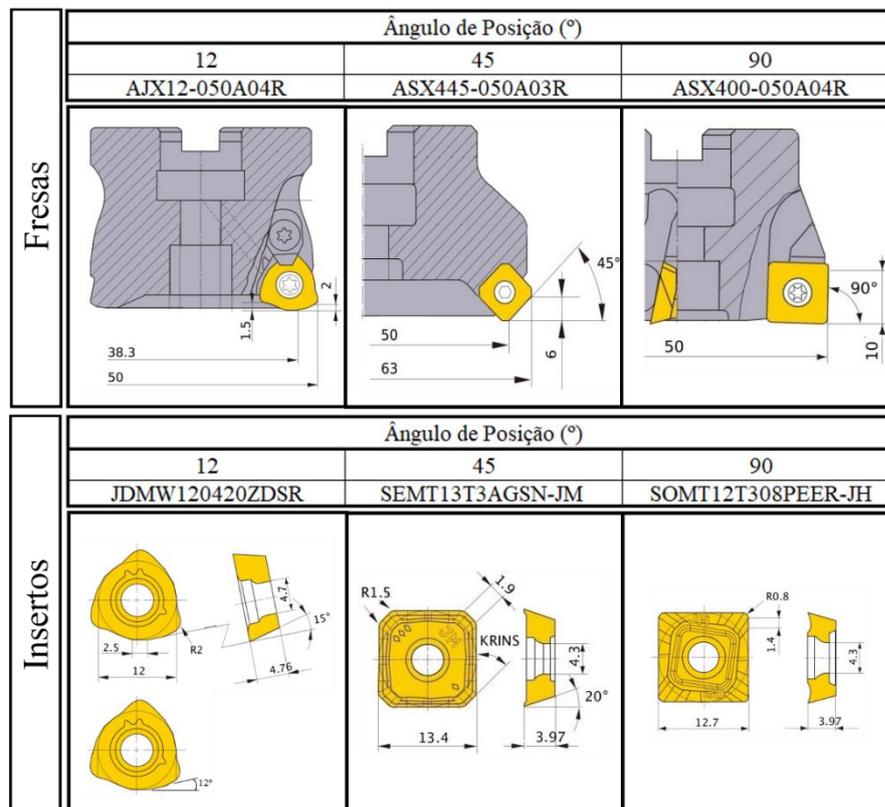


Figura 4.10 - Fresas e inserts utilizados nos ensaios de fresamento

FONTE: Adaptado de (MITSUBISHI MATERIAL, 2019)

A fresas possuem diâmetro nominal de 50mm. A largura fresada foi de 30mm com o fresamento sendo realizado de forma tal que a linha de centro da fresa fosse coincidente com a linha de simetria da peça na direção da dimensão de 75mm. Os parâmetros de corte estão resumidos na Tabela 4.1

Vc (m/min)	Rotação (RPM)	Ângulo de posição (°)					
		12		45		90	
		fz (mm/rev)	Vf (mm/min)	fz (mm/rev)	Vf (mm/min)	fz (mm/rev)	Vf (mm/min)
100	637	0,38	242	0,21	134	0,15	96
275	1765		671		371		265

Tabela 4.2 - Parâmetros de corte para o ensaio de fresamento

FONTE: autor, 2019

Tendo em vista que a variável resposta a qual este estudo se refere é a tensão residual e que no processo de usinagem a indução desta está diretamente relacionada ao esforço mecânico buscou-se obter as forças decorrentes da operação de fresamento para auxiliar na interpretação dos resultados referentes ao comportamento da tensão residual frente a variação dos 3 fatores variados. Para isto os sinais de força foram adquiridos durante a operação de fresamento por meio de um dinamômetro *Kistler* modelo 9272. Utilizou-se uma placa de aquisição de dados *National Instruments USB – 6366* fabricada pela *National Instruments*, conectada a um computador equipado com *Windows XP Professional*, processador *Intel i5-2500* e memória RAM de 4 gigabytes. O software utilizado para aquisição do sinal de força foi o *NI LabView SignalExpress 2013*. Os dados coletados foram exportados para o *Microsoft Excel 2007* para posterior análise. A Figura 4.11 representa a forma como foi realizada a montagem.

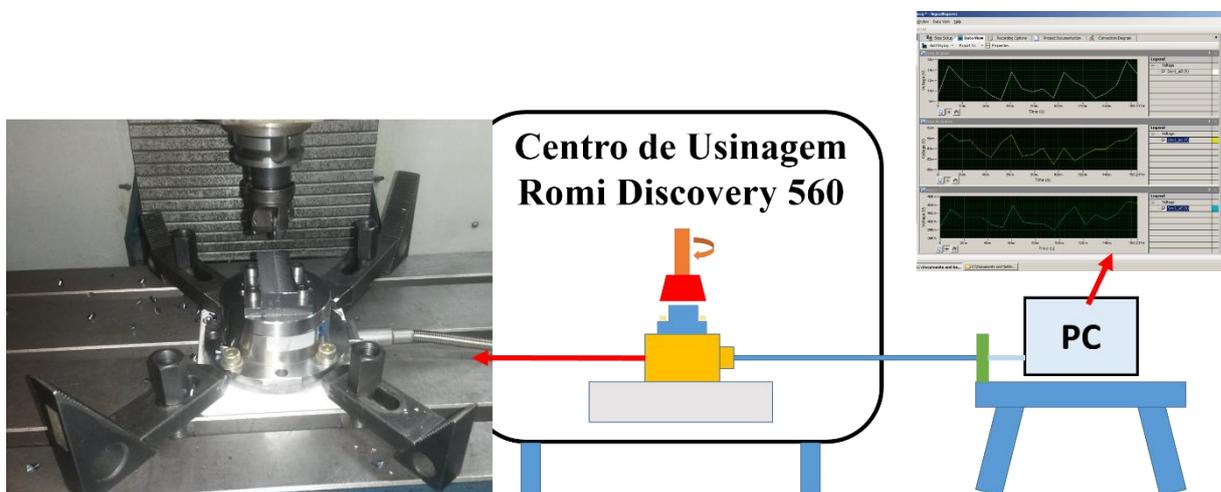


Figura 4.11 - Esquema de montagem para realizar ensaio de fresamento com aquisição de forças

FONTE: autor, 2019

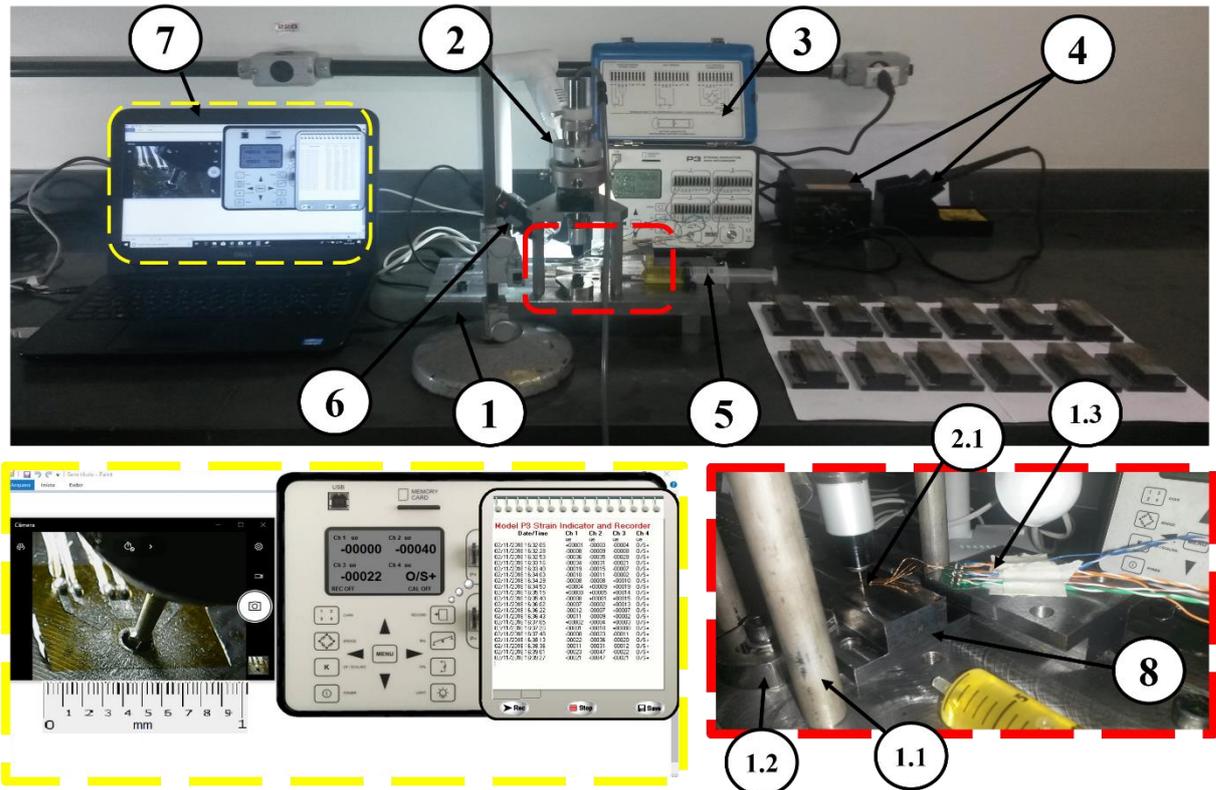
Com o objetivo de minimizar possíveis efeitos decorrentes de desgaste das ferramentas de corte, cada ensaio foi realizado com uma aresta nova da ferramenta. Mesmo as fresas tendo alojamentos para vários insertos, os ensaios foram realizados usando-se apenas um, com objetivo de simplificar as análises.

#### **4.9 Medição da rugosidade**

Após o fresamento dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro modelo *Surtronic 25* do fabricante *Taylor Hobson Precision* para medir o desvio médio aritmético,  $R_a$ , na região onde posteriormente será afixada a roseta de extensômetros para medição das deformações por meio das quais serão obtidas as tensões residuais. Para aplicações em análise de tensões em geral com uso de extensômetros, uma superfície com desvio médio aritmético,  $R_a$ , de até  $2,5\mu\text{m}$  é suficiente, por apresentar melhores condições para limpeza da superfície e fixação da roseta de extensômetros (VISHAY PRECISION GROUP, 2011). Foram realizadas três medições em cada réplica, calculada a média aritmética entre as medições e a média aritmética entre as 3 réplicas. Os comprimentos de amostragem e avaliação adotados foram de 0,8 e 4mm, respectivamente.

#### **4.10 Determinação das tensões residuais**

A determinação das tensões residuais foi realizada por meio do método do furo central. Apesar de ser um método consolidado que vem sendo aplicado desde os anos de 1930, para que se obtenha medições precisas e confiáveis é preciso observar uma série de fatores que, se não observados, podem contribuir negativamente para o resultado. Um conjunto de boas práticas foi observado em Grant; Lord e Hitehead, (2006). Com objetivo de se reduzir erros associados ao processo de medição tais como alinhamento, movimento do corpo de prova durante a medição, vibração, bem como outros, foi desenvolvido e fabricado um dispositivo para receber o equipamento *RS-200 Milling Guide*, fabricado pela *Vishay Precision Group*, acomodar e fixar o corpo de prova após o seu correto posicionamento. Tal dispositivo é apresentado na Figura 4.12.



Item	Descrição	Item	Descrição
1	Base para montagem do RS-200 Milling Guide	3	Leitor de microdeformações - P3 Indicator and Recorder
1.1	Espaçador	4	Máquina de solda Hikari NK-936A
1.2	Garra para fixação do corpo de prova	5	Seringa 200ml para aplicação de fluido refrigerante
1.3	Conector para soldagem dos terminais dos extensômetros	6	Lupa eletrônica
2	RS-200 Milling Guide	7	Notebook para aquisição e tratamento dos dados
2.1	Fresa $\varnothing$ 1,6 mm	8	Corpo de prova

Figura 4.12 - Montagem para medição de microdeformações

FONTE: autor, 2019

O equipamento *RS-200 Milling Guide* foi fixado à base (1). Para isto foram confeccionados três espaçadores (1.1) dimensionados de maneira a garantir a perpendicularidade entre a fresa (2.1) utilizada para realização do furo incremental. Também foi afixado um conector (1.3) para facilitar a substituição de corpos de prova (8) por meio de solda dos terminais dos extensômetros. Uma vez realizado o correto posicionamento do corpo de prova (8) o mesmo é fixado por meio da garra (1.2). Foi acoplada ao dispositivo e conectada ao notebook (7) uma lupa eletrônica (6) para auxiliar na observação durante alinhamento e realização do furo incremental.

Várias ações foram tomadas no sentido de se mitigar o risco de determinados fatores contribuírem negativamente para o resultado. Os principais fatores, bem como as ações mitigadoras são resumidas na Figura 4.13.

<b>Fator contribuinte</b>	<b>Ação mitigadora</b>
Erro de perpendicularidade entre a fresa responsável pela realização do furo no centro da roseta	Garantir o paralelismo entre a base do RS-200 e a base a qual ele foi fixado por meio do ajuste com uso de relógio comparador
Movimento do corpo de prova durante realização do furo	Fixação do corpo de prova na base garantido assim que não ocorra movimento relativo entre o corpo de prova e a broca
Realização da referência na face do corpo de prova para realização do primeiro incremento de 0,05mm (altura de referência)	Instalação de uma lupa eletrônica no dispositivo conectada ao notebook
Variação térmica no ambiente de ensaio	Ensaio realizado em sala com ar condicionado ajustado em 20°C

Figura 4.13 - Fatores contribuintes para erros de medição e ações mitigadoras

FONTE: autor, 2019

Por meio do recurso de filmagem da tela, disponível no *Microsoft PowerPoint 2013*, foi realizado gravação de vídeo dos ensaios, para, caso necessário, recorrer a ele no sentido de observar algum problema que por ventura possa ter ocorrido.

A roseta de extensômetros foi afixada ao corpo de prova por meio do adesivo *Permabond 793*. Para isto primeiramente foi realizada limpeza da superfície com acetona e ataque com solução de níquel 10%. A posição onde a roseta foi instalada no corpo de prova pode ser observada na Figura 4.14.

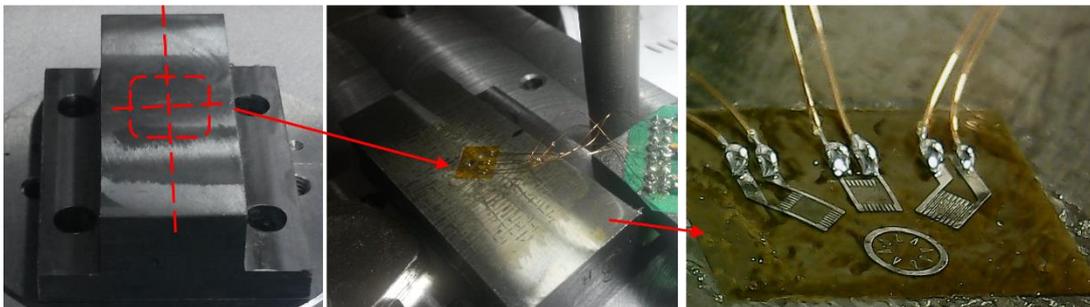


Figura 4.14 - Posição de instalação da roseta para medição das deformações aliviadas

FONTE: autor, 2019

#### 4.11 Tratamento dos dados relativos às forças de corte

As forças de corte foram obtidas com objetivo de contribuir na análise dos resultados de tensões residuais uma vez que são estas, juntamente com a temperatura, uma forma de mensurar a resposta do material ao resistir ao corte, podendo exercer influência direta na intensidade, perfil e caráter, trativo ou compressivo, das tensões residuais induzidas na superfície fresada. Outeiro et al. (2002) tentou relacionar as forças de corte diretamente com a tensão residual, entretanto

nenhuma tendência óbvia pode ser observada concluindo assim que forças de corte parecem ajudar pouco no entendimento do comportamento das tensões residuais se forem consideradas isoladamente. Portanto, aqui como em (JIANG et al., 2013; LIU; TAKAGI; TSUKUDA, 2004; M'SAOUBI et al., 1999; OUTEIRO et al., 2002; ULUTAN; ÖZEL, 2012) as forças de corte terão papel somente como suporte à análise de resultados.

O processo de faceamento por fresamento é um dos mais importantes processos de usinagem que, inerentemente tem alta taxa de remoção de material devido aos múltiplos insertos de corte da fresa. Porém a ação de corte interrompido com variação da espessura do cavaco ao longo da trajetória de corte torna a análise dos mecanismos envolvidos mais difíceis do que as operações típicas de torneamento (RUZHONG; WANG; MERCHANT, 1983).

As forças envolvidas são intermitentes e sua intensidade dependente da posição em que a ferramenta está em contato com a peça, representado na Figura 4.15 pelo ângulo teta ( $\theta$ ), e, por consequência, da seção transversal do cavaco não deformado,  $A_c$ , determinada por:

$$A_c = a_p \cdot a \quad (\text{Equação 4.1})$$

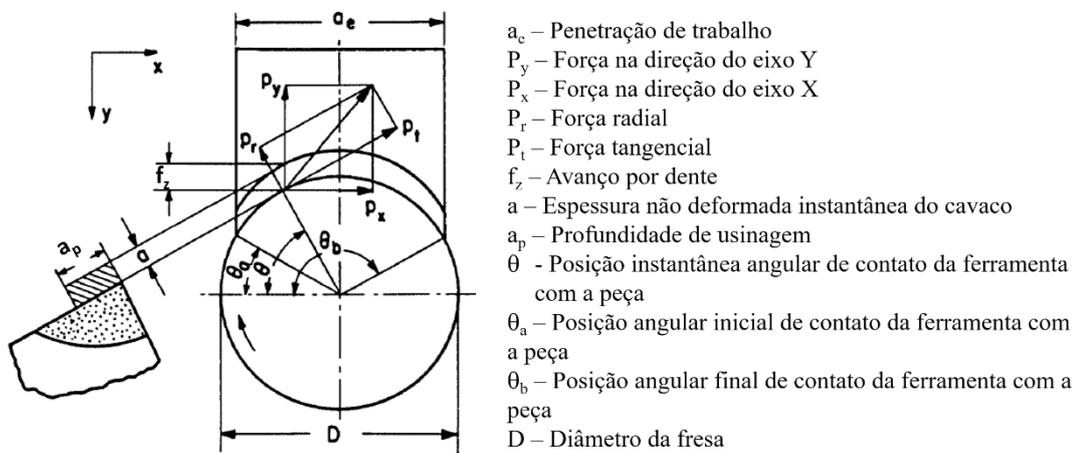


Figura 4.15 - Nomenclatura e componentes de força em uma operação típica de faceamento por fresamento  
 FONTE: (RUZHONG; WANG; MERCHANT, 1983)

Levando-se em conta que o objetivo principal deste trabalho é a avaliação do efeito de três fatores em diferentes níveis sobre a tensão residual induzida na superfície fresada e que tais tensões serão determinadas pelo método do furo incremental apresentado na revisão bibliográfica que se baseia nas deformações decorrentes do relaxamento do material nas regiões adjacentes ao furo usinado, e que estas deformações são medidas por extensômetros inscritos

em um círculo de diâmetro de aproximadamente 5mm na roseta, abrangendo assim uma determinada área conforme demonstrado na Figura 4.14, decidiu-se considerar para este estudo as forças de corte atuantes próximos à esta região.

Para isto e com base nesta premissa e no desenvolvimento teórico apresentado por Ruzhong; Wang e Merchant, (1983) foi desenvolvido um critério para obtenção da intensidade das forças nos três eixos na região de interesse. Este critério funciona como um filtro, visto que em cada posição do ângulo  $\theta$  o cavaco terá uma espessura distinta e por consequência intensidades também distintas para cada componente de força. Para a condição aqui considerada, temos que a posição onde será realizado o furo incremental corresponde a  $\theta=90^\circ$ . Nesta posição o cavaco possui espessura máxima. Observa-se também pela Figura 4.15 que neste ponto a força tangencial tem mesma direção e sentido da força na direção x, força de apoio  $F_{ap}$ , correspondendo à máxima intensidade. De acordo com Ruzhong; Wang e Merchant, (1983), temos:

$$Px = C \cdot a_p (a_f \cdot \sin \theta)^\lambda \cdot (\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$Py = -C \cdot a_p (a_f \cdot \sin \theta)^\lambda \cdot (\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

$C$  e  $\lambda$  = Constantes que dependem do material

$a_p$  = profundidade de usinagem

$f_z$  = avanço por dente

$\mu$  =  $P_r/P_t$

Para o caso de interesse,  $\theta=90^\circ$  teremos que:

$$Px = Pt \quad (\text{Equação 4.4})$$

O dinamômetro captura forças em três direções. No ponto de interesse, das três componentes a de maior intensidade é da direção x, força de apoio  $F_{ap}$ . Logo, a força nessa direção será adotada como referência para o conjunto de forças composto pelos eixos x, y e z do dinamômetro.

O dinamômetro foi montado com os eixos rotacionados a  $90^\circ$  anti-horário em relação a orientação da Figura 4.15, ou seja, o eixo x da Figura 4.15 se torna o eixo y do dinamômetro e

o eixo x da Figura 4.15 o eixo y do dinamômetro. Deste ponto em diante a orientação dos eixos do dinamômetro será a referência.

A força na direção de y corresponde à força perpendicular à direção de avanço representada aqui por  $\#V_f$ , também denominada força de apoio,  $F_{ap}$ . A da direção x corresponde à paralela à direção de avanço representada aqui por  $//V_f$ , também denominada força de avanço,  $F_f$ . A da direção z, não representada na Figura 4.15 mas correspondente à força de reação representada na Figura 3.5, à força passiva,  $F_p$ , perpendicular ao plano formado pelos eixos x e y.

Observando a Figura 4.15 e valendo-se de relações trigonométricas pode-se concluir que o ângulo de contato da fresa com a peça,  $\psi$  ( $\theta_b - \theta_a$ ) pode ser definido como:

$$\psi = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{a_e}{D} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Observando agora a Figura 4.16 define-se  $L_i$  como largura de interesse, largura esta que corresponde ao diâmetro do círculo em que os extensômetros estão inscritos ( $D_e$ ) e se valendo também de relações trigonométricas obtém-se que o ângulo de contato de interesse  $\psi_i$  pode ser definido como:

$$\psi_i = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{L_i}{D_e} \quad (\text{Equação 4.6})$$

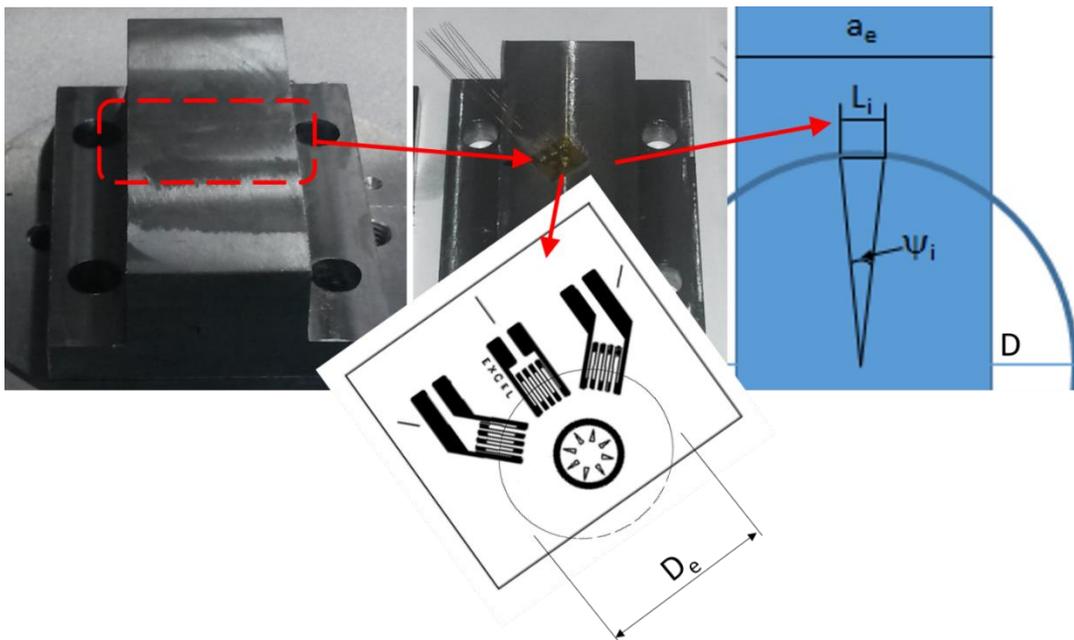


Figura 4.16 - Representação da região de interesse para obtenção de forças de corte

FONTE: autor, 2019

Definiu-se como  $F_{aq}$  a frequência de aquisição de dados de força pelo dinamômetro correspondendo esta ao número de aquisições em um intervalo de 1 segundo. A partir desta frequência é possível determinar o intervalo entre aquisições dividindo-se 1 segundo pela frequência de aquisição,  $F_{aq}$ . Por meio da proposição e solução de duas regras de três simples é possível determinar o ângulo entre aquisições, denominado  $\theta_m$ .

A primeira regra de três relaciona, com base na rotação da fresa, o número de revoluções completas realizadas no tempo de um segundo. O resultado é multiplicado pelo tempo de aquisição,  $t_{aq}$ , retornando assim o número de revoluções realizadas durante o tempo de aquisição que, finalmente multiplicado por  $360^\circ$  chega-se ao ângulo entre aquisições  $\theta_m$ .

Conhecido  $\theta_m$ , e adotando como premissa o início de aquisição de dados em  $\theta = \theta_a$ , foi desenvolvida uma tabela que faz o mapeamento das posições de  $\theta$  em que tais aquisições são realizadas.

Conhecido o ângulo de contato da fresa com a peça,  $\psi$ , é possível saber se a respectiva aquisição ocorre com a ferramenta em contato com a peça ou não. E conhecido o ângulo de contato de interesse,  $\psi_i$ , é possível saber se a respectiva aquisição ocorre com a ferramenta em contato na região de interesse ( $F_{mi}$ ) ou não. Este procedimento foi realizado partindo do tempo zero até o tempo final de usinagem ( $t_c$ ), que é obtido dividindo-se o comprimento usinado ( $L$ ) pela velocidade de avanço ( $V_f$ ). O procedimento descrito será detalhado abaixo.

Na Figura 4.17 estão reunidos os dados obtidos por meio do procedimento acima descrito para a condição 100B90.

Parâmetros para filtro das forças de corte			
<b>Vc (m/min)</b>	100	<b><math>\psi</math> (°)</b>	73,74
<b><math>f_z</math></b>	0,15	<b><math>t_{aq}</math> (s)</b>	0,008696
<b><math>V_f</math> (mm/min)</b>	96	<b><math>\theta_a</math> (°)</b>	53,1
<b>n (rpm)</b>	637	<b><math>\theta_b</math> (°)</b>	126,9
<b>D (mm)</b>	50	<b><math>\theta_m</math> (°)</b>	33,2
<b><math>a_e</math> (mm)</b>	30	<b><math>F_{mi}</math> (°)</b>	84,3
<b>L</b>	75		95,7
<b><math>t_c</math> (s)</b>	46,875	<b><math>L_i</math> (mm)</b>	5,0
<b><math>F_{aq}</math></b>	115	<b><math>\psi_i</math> (°)</b>	11,5

Vc – Velocidade de Corte  
 $f_z$  – Avanço por dente  
 $V_f$  – Velocidade de avanço  
n – Rotação  
D – Diâmetro da fresa  
 $a_e$  – Largura fresada  
L – Comprimento fresado  
 $t_c$  – Tempo de fresamento  
 $F_{aq}$  – Frequência de aquisição  
 $\psi$  – Ângulo de contato  
 $t_{aq}$  – intervalo entre aquisições  
 $\theta_a$  – Posição angular inicial de contato da ferramenta com a peça  
 $\theta_b$  – Posição angular final de contato da ferramenta com a peça  
 $\theta_m$  – Ângulo entre aquisições  
 $F_{mi}$  – Posição angular de interesse  
 $L_i$  – Largura de interesse  
 $\psi_i$  – Ângulo de interesse

Figura 4.17 - Filtro para dados referentes às forças de corte – dados iniciais

FONTE: autor, 2019

A partir dos dados representados na Figura 4.17 obteve-se os dados apresentados na Figura 4.18, tabela A. Tem-se então como informação de saída o número de aquisições previstos no tempo de usinagem  $t_c$  que ocorrem com a ferramenta em contato com a peça, coluna destacada em azul, e o número de aquisições que ocorrem com a ferramenta em contato na largura de interesse  $L_i$ . Estas duas saídas são apresentadas na tabela B da respectiva figura.

**A**

Posição de aquisição dos dados				
Nº aquisição	Posição Aquisição Geral (Ângulo)	Posição Aquisição em 360° (Ângulo)	Aquisição na peça (1=sim; 0=não)	Aquisição na região de interesse (1=sim; 0=não)
1	53,1	53,1	1	0
2	86,4	86,4	1	1
3	119,6	119,6	1	0
4	152,8	152,8	0	0
5	186,1	186,1	0	0
6	219,3	219,3	0	0
7	252,5	252,5	0	0
8	285,8	285,8	0	0
9	319,0	319,0	0	0
10	352,3	352,3	0	0
11	385,5	25,5	0	0
12	418,7	58,7	1	0
↓	↓	↓	↓	↓
$n_i$	-	-		

→

**B**

Pontos Adquiridos em contato na Peça	Pontos Adquiridos em contato na região de interesse
2336	364

Figura 4.18 - Ocorrências de aquisições com ferramenta em contato com a peça ou não

FONTE: autor, 2019

Na Figura 4.19 são apresentadas duas tabelas com as colunas identificadas por letras maiúsculas.

A	B	C	D	E	F	G	H
Tempo (s)	FY - # Vf (N)	FX - // Vf (N)	FZ - Passiva (N)	FY ordenado	1º Filtro	2º Filtro	Tempo FY maior
0,000000	-1,029683	-0,965931	-7,406355	600,529744	1	1	35,460861
0,008696	-1,658353	-1,280266	-7,589209	599,901075	1	1	15,113040
0,017391	-0,966937	-0,840238	-8,259218	569,470919	1	1	47,139119
0,026087	-0,778296	-0,777290	-8,076559	568,276326	1	1	50,626074
0,034783	-0,589655	-0,148821	-8,563909	568,024938	1	1	38,852164
0,043478	0,164910	-0,211568	-9,721268	567,018986	1	1	49,591292
0,052174	-1,155377	-0,588649	-8,624730	561,926278	1	1	38,286947
0,06087	-1,092631	-0,714544	-8,502893	561,863531	1	1	32,165209
0,069565	-1,721300	-1,783041	-7,954722	559,474345	1	1	25,382602
0,078261	-2,664305	-1,091625	-7,893705	559,348651	1	1	50,530422
0,086956	-1,218324	0,165514	-9,112080	556,204899	1	1	37,817382
0,095652	-0,149425	0,354155	-9,599430	555,827818	1	1	40,452164
0,104348	-0,526707	-0,085874	-8,807584	555,701923	1	1	36,495643
0,113043	-1,909942	-1,405960	-8,685747	554,570277	1	1	37,060860
0,121739	-3,167281	-2,474457	-8,015543	553,627272	1	1	35,365209

Figura 4.19 - Forças ordenadas pelo tempo de usinagem e filtros

FONTE: autor, 2019

A primeira, composta pelas colunas de A a D, representa as componentes de força nas direções x, y e z, ordenadas pelo tempo que ocorre a aquisição, coluna A.

Na segunda, composta pelas colunas de E a H, são apresentadas as seguintes informações:

Coluna E → Componentes de força na direção y, ordenadas da maior para a menor.

Coluna F → Filtro que seleciona somente as forças em y que possuem valor positivo, visto que as forças em y são sempre positivas quando em contato com a peça.

Coluna G → Filtro que seleciona dentre as forças positivas, as primeiras 364 maiores, para o exemplo. Informação de saída da tabela B destacada com um retângulo laranja na Figura 4.18.

Na Figura 4.20 é apresentada uma tabela composta pelas colunas de I a N, o tempo de aquisição é ordenado de forma crescente, coluna J. Seguido das respectivas componentes y, x, z obtidas pela aplicação do segundo filtro. Na coluna N são apresentados os valores para a força de usinagem  $F_u$ , obtidos por meio da equação 4.7, (MACHADO et al., 2015).

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (\text{Equação 4.7})$$

I	J	K	L	M	N
FY	Tempo ordenado com base em FY	FY - # Vf (N)	FX - // Vf (N)	FZ - Passiva (N)	Fu (N)
600,529744	8,426085	476,546234	182,145729	133,494912	527,346443
599,901075	8,521737	495,785020	109,793792	124,052798	522,729911
569,470919	8,991302	502,135068	139,400804	172,238262	548,851737
568,276326	9,086954	479,186808	84,461172	138,733730	505,965151
568,024938	9,460867	544,510755	228,285190	211,468963	627,156450
567,018986	9,556519	528,855749	121,863007	214,941234	583,728301
561,926278	9,652171	498,488541	110,233821	198,006211	547,584497
561,863531	9,747824	463,720242	45,676304	169,679675	495,897147
559,474345	9,930432	481,575995	281,150573	190,817994	589,383229
559,348651	10,026084	482,833335	204,964072	189,477781	557,709718
556,204899	10,121737	532,502276	92,884463	226,393569	586,037751
555,827818	10,217389	479,438196	56,488380	215,976755	528,864708
555,701923	10,313041	474,785717	51,962400	195,082111	515,924993
554,570277	10,408693	479,249554	-8,131883	165,415557	507,058744
553,627272	10,591302	520,556543	242,994375	256,913180	629,308957

Figura 4.20 - Forças ordenadas pelo tempo de usinagem com base no filtro adotado

FONTE: autor, 2019

Na Figura 4.21 são apresentadas duas tabelas e um gráfico. A primeira tabela reúne de forma agrupada segundo a segundo as componentes de força em cada direção bem como a força de usinagem,  $F_u$ . O que difere esta tabela da tabela da Figura 4.20 é o fato de que os valores de forças correspondentes ao tempo de aquisição foram obtidos calculando-se a média das forças que foram adquiridas dentro de um mesmo segundo na tabela a Figura 4.20.

Na segunda tabela é apresentada a média de cada componente de força, bem como da força de usinagem,  $F_u$ , calculada a partir das forças segundo a segundo durante todo tempo de usinagem. O gráfico representa o comportamento das três componentes e da força de usinagem ao longo do tempo de usinagem.

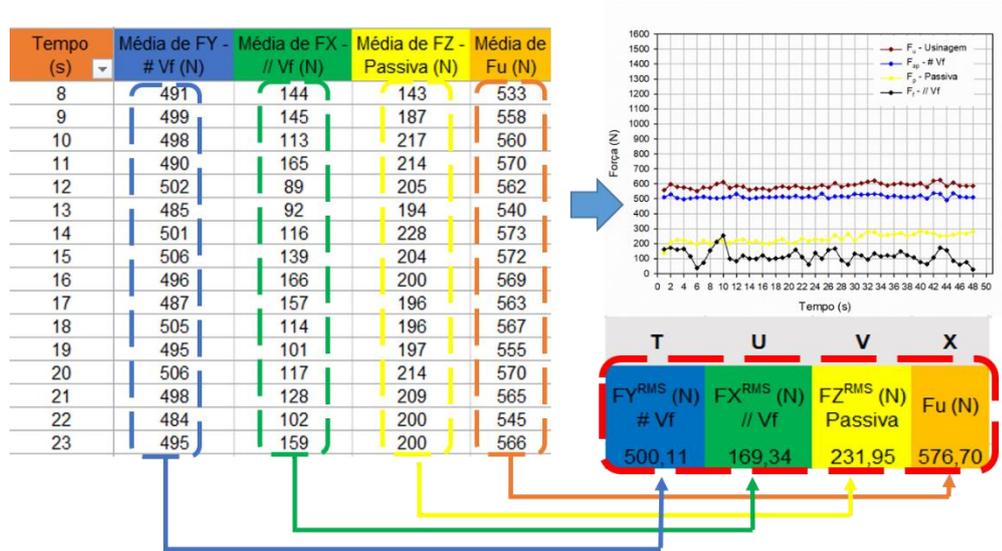


Figura 4.21 - Forças de usinagem na região de interesse segundo a segundo e média durante o percurso de usinagem

FONTE: autor, 2019

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados serão apresentados e será realizada uma discussão acerca do comportamento da tensão residual frente a combinação de cada fator.

Inicialmente serão apresentados os resultados referentes à caracterização do material e da força de usinagem e suas componentes obtidas pelo procedimento adotado e descrito no capítulo anterior.

### 5.1 Caracterização do material

#### 5.1.1 Análise química

O resultado da análise química é resumido na Figura 5.1. O relatório completo encontra-se nos Anexo 11.A e Anexo 11.B.

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>	Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Carbono (C)	0,3941	%	Chumbo (Pb)	0,0010	%
Silício (Si)	0,2355	%	Estanho (Sn)	0,0054	%
Manganês (Mn)	0,7258	%	Arsênio (As)	0,0070	%
Fósforo (P)	0,0171	%	Zircônio (Zr)	0,0015	%
Enxofre (S)	0,0115	%	Bismuto (Bi)	ND	%
Cromo (Cr)	0,7944	%	Cálcio (Ca)	0,0002	%
Molibdênio (Mo)	0,2417	%	Céριο (Ce)	ND	%
Níquel (Ni)	1,7107	%	Antimônio (Sb)	ND	%
Alumínio (Al Total)	0,0249	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0177	%	Tântalo (Ta)	ND	%
Cobre (Cu)	0,1187	%	Boro (B)	0,0003	%
Nióbio (Nb)	ND	%	Zinco (Zn)	0,0004	%
Titânio (Ti)	0,0019	%	Lantânio (La)	ND	%
Vanádio (V)	0,0201	%	Nitrogênio (N)	0,0107	%
Tungstênio (W)	0,0160	%	Ferro (Fe) Balanço	95,6300	%

Figura 5.1 - Resultado da análise química do material

FONTE: Adaptado de: (FERREIRA, 2018)

O resultado da análise química demonstra que o material ensaiado tem composição química compatível com o esperado para o aço ABNT 4340.

#### 5.1.2 Caracterização da microestrutura

Na Figura 5.2 podem ser observadas as microestruturas obtidas com os tratamentos térmicos de recozimento e normalização. Para o material normalizado obteve-se uma microestrutura típica,

sendo está bastante complexa com porções de bainita, perlita e alguns carbonetos. Para o material recozido a microestrutura obtida, também típica, foi porções de ferrita e de perlita.

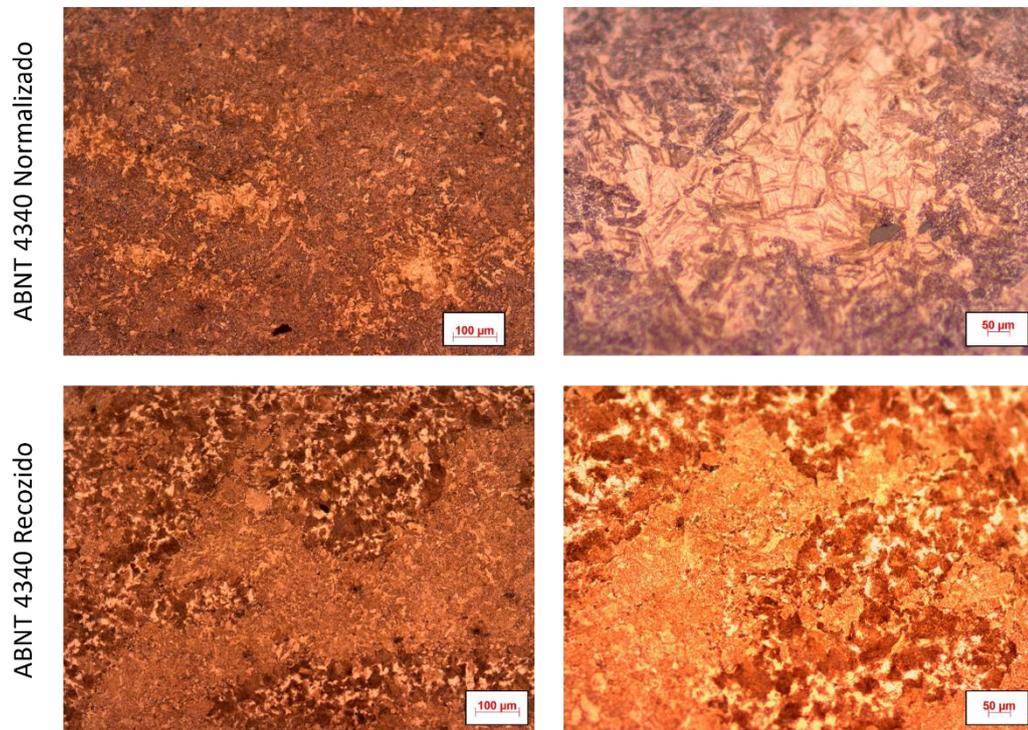


Figura 5.2 - Microestruturas obtidas após tratamentos térmicos de Normalização e Recozimento

FONTE: autor, 2019

### 5.1.3 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração são resumidos no Quadro 5.1 abaixo.

Condição	Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
Normalizado	CP01-N	1239,2	11,8
	CP02-N	1146,3	10,9
	CP03-N	1146,6	10,9
	<b>Média</b>	<b>1177,4</b>	<b>11,2</b>
	<b>Desvio P.</b>	<b>53,55</b>	<b>0,51</b>
Recozido	CP01-R	756,9	21,7
	CP02-R	771,6	21,2
	CP03-R	830,6	19,7
	<b>Média</b>	<b>786,4</b>	<b>20,9</b>
	<b>Desvio P.</b>	<b>39,01</b>	<b>1,01</b>

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios de tração

FONTE: autor, 2019

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas limite de resistência à tração e alongamento percentual foram compatíveis com valores típicos para o aço ABNT 4340 nas condições ensaiadas conforme apresentado na Tabela 3.1. Não foi possível obter o módulo de elasticidade e o limite de escoamento em virtude de um problema com os extensômetros da máquina de ensaio. O alongamento percentual foi obtido por meio da medição dos corpos de prova após ruptura. Quanto ao limite de escoamento entende-se que os valores estariam próximos aos típicos visto que demais propriedades e microestruturas encontradas foram compatíveis com os valores típicos.

#### 5.1.4 Rugosidade superficial

Os resultados da rugosidade superficial são apresentados na Figura 5.3.

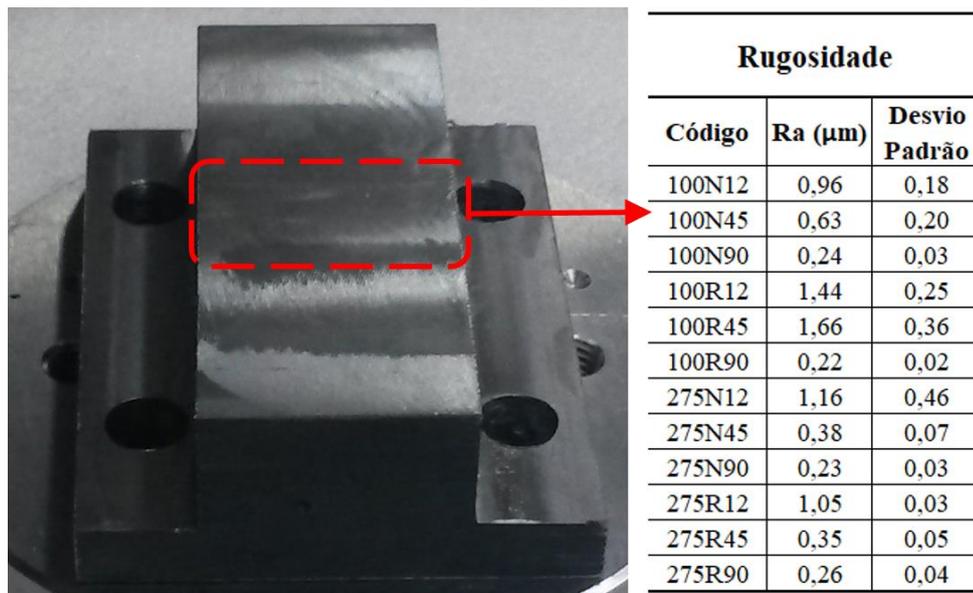


Figura 5.3 - Posição e resultados relativos à rugosidade média da superfície fresada

FONTE: autor, 2019

Os resultados demonstram que a superfície está apta a receber o extensômetro a ser afixado sem necessidade de qualquer preparação que vise melhorar a rugosidade, necessitando apenas proceder limpeza conforme descrito na secção 4.10.

## 5.2 Força de usinagem e componentes

Primeiramente será apresentado o resultado de uma análise de variância, ANOVA, realizada para a força de usinagem ( $F_u$ ) frente a variação dos três fatores considerados em seus respectivos níveis. Na sequência serão apresentados resultados gráficos referentes a cada componente da força de usinagem.

Foram utilizados os dados referentes às três réplicas realizadas considerando os três fatores variando em seus respectivos níveis. O Gráfico 5.1 demonstra o resultado do teste de Anderson-Darling para verificar se os dados podem ser aproximados por uma distribuição normal.

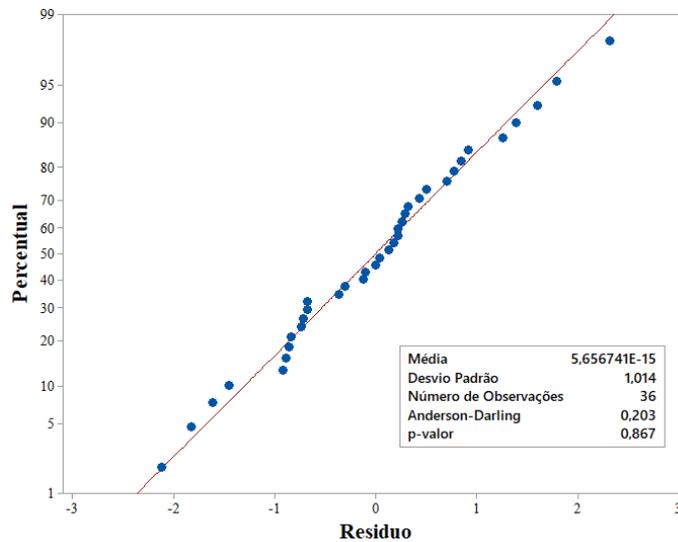


Gráfico 5.1 - Gráfico de probabilidade normal para a força de usinagem

FONTE: autor, 2019

Como o p-valor é maior que 0,05, superior ao nível de significância de 0,05 para um teste de confiança de 95%, tem-se a confirmação de que a distribuição de probabilidade pode ser aproximada pela distribuição normal. Para validação do modelo realizou-se análise dos resíduos padronizados para os dados. Na Figura 5.4 podem ser observados os gráficos de resíduos versus ordem e resíduos versus ajuste. É possível perceber que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente ao longo do tempo. Montgomery e Runger (2016), apud PEREIRA (2017) relacionam-se à necessidade de a média ser zero e variância constante. Afirmam que os erros seguem a distribuição normal com média zero e variância constante, quando cerca de 68% dos resíduos padronizados estejam entre os limites  $\pm 1$  e 95% entre os limites  $\pm 2$ . De acordo com a Figura 5.4 b) dos 36 pontos, 27 estão compreendidos no intervalo entre -1 e 1, 75%, 34 entre -

2 e 2, 94,4%, o que não chega a comprometer a condição de distribuição normal com média zero e variância constante.

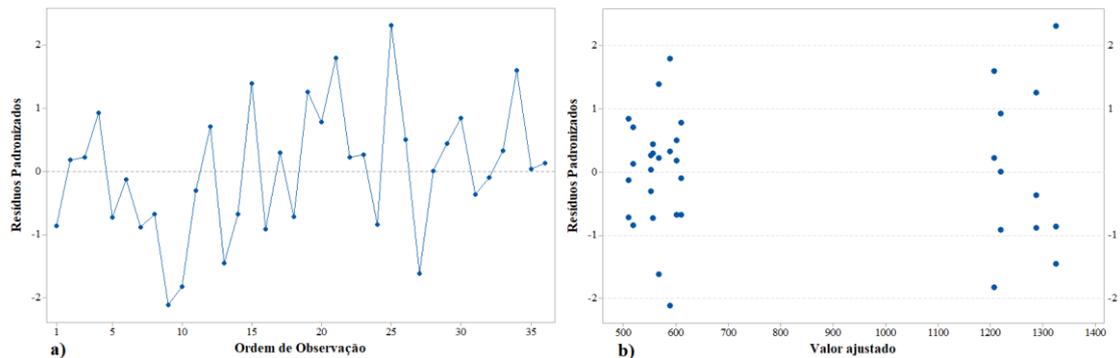


Figura 5.4 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes

FONTE: autor, 2019

A Tabela 5.1 resume os dados da ANOVA para a força de usinagem  $F_u$ . A análise retornou um valor de  $R^2$  de 99,86%. Isto indica que o modelo é adequado para avaliar o comportamento em estudo. Ainda observando a Tabela 5.1 nota-se que entre os efeitos principais o tratamento térmico e o ângulo de posição se mostraram significativos ao nível de confiança adotado tanto isoladamente quanto às interações de segunda ordem. Quanto às interações de terceira ordem nenhum efeito principal se mostrou significativo.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	p-valor
Modelo	11	3941191	358290	1588,94	0,000
Linear	4	3935183	983796	4362,92	0,000
Vc	1	60	60	0,27	0,610
TT	1	43182	43182	191,50	0,000
$\chi_r$	2	3891941	1945970	8629,96	0,000
Interações de 2 fatores	5	5313	1063	4,71	0,004
Vc x TT	1	0	0	0,00	0,993
Vc x $\chi_r$	2	2549	1274	5,65	0,010
TT x $\chi_r$	2	2764	1382	6,13	0,007
Interações de 3 fatores	2	695	347	1,54	0,235
Vc x TT x $\chi_r$	2	695	347	1,54	0,235
Erro	24	5412	225		
Total	35	3946602			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (Aj.)	R2 (pred)	
	15,016	99,86%	99,80%	99,69%	

Tabela 5.1 - Análise de variância para a força de usinagem

FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.5 pode ser observado os efeitos principais para os três fatores utilizados no experimento.

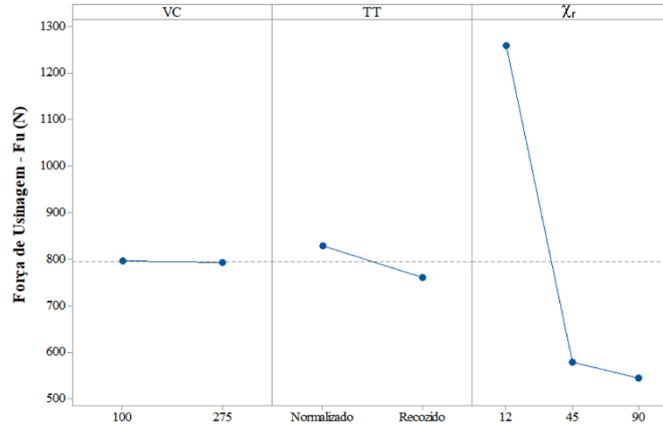


Figura 5.5 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a força de usinagem

FONTE: autor, 2019

Percebe-se que dos três fatores apenas a velocidade de corte não exerce influência sobre força de usinagem. O ângulo de posição quando variado para 12° de forma mais pronunciada. Na Figura 5.6 podem ser observados os efeitos das interações entre os três fatores considerados. Graficamente fica evidente que somente as interações de segunda ordem entre a velocidade de corte e o ângulo de posição e entre o tratamento térmico e o ângulo de posição são significativos ao nível de confiança considerado.

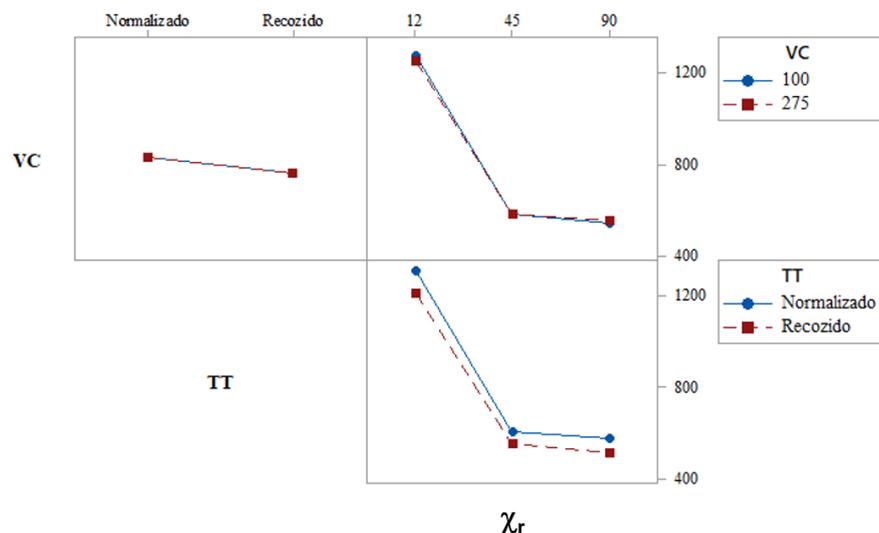


Figura 5.6 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a força de usinagem

FONTE: autor, 2019

Nenhuma interação de terceira ordem se mostrou significativa ao nível de confiança considerado.

Agora serão apresentados resultados gráficos para cada a força de usinagem e cada uma de suas componentes.

Na Figura 5.7 é apresentado o comportamento da componente da força de usinagem, perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) quando é variado um fator e mantidos dois constantes. Observa-se que quando são mantidos constantes o fator velocidade de corte e o fator condição quanto a tratamento térmico a força perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) para a ferramenta com ângulo de posição de  $12^\circ$  apresenta valor cerca de duas vezes o valor da força para as ferramentas de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo que entre estas últimas a diferença é discreta. Nesta mesma figura é possível observar que quando os fatores velocidade de corte e tratamento térmico são variados ocorre diferença discreta nesta componente em função destes.

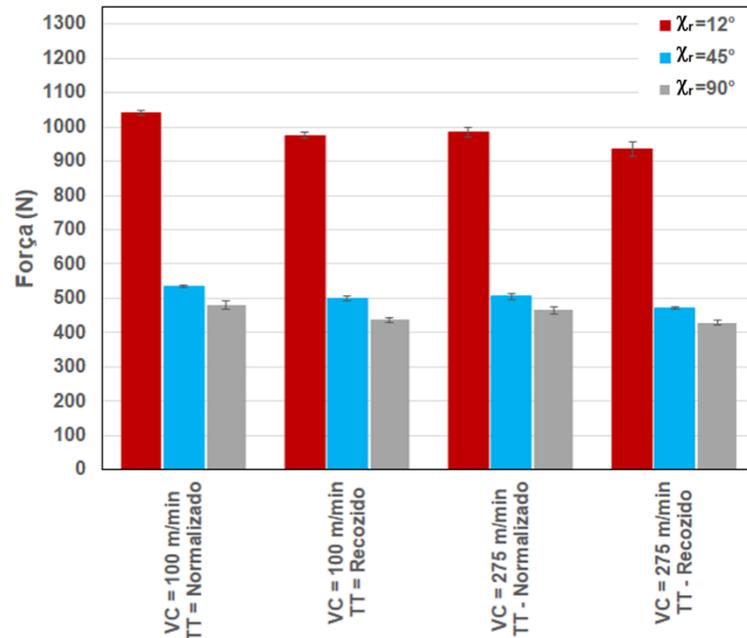


Figura 5.7 - Comportamento da força de usinagem perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) em função do ângulo de posição

FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.8 é apresentado o comportamento da componente da força de usinagem paralela à direção de avanço ( $//V_f$ ) quando é variado um fator e mantidos dois constantes. Observa-se que quando são mantidos constantes o fator velocidade de corte e o fator condição quanto a tratamento térmico a força paralela à direção de avanço ( $//V_f$ ) apresenta diferença um pouco mais pronunciada para a ferramenta com ângulo de posição de  $12^\circ$ , quando comparada às de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo que entre estas últimas tal diferença é discreta. Já quando o fator velocidade de corte é variado ocorre o oposto ao comportamento da força  $#V_f$  com exceção da condição AAAN12, ou seja ao se aumentar a velocidade de corte a força  $//V_f$  aumenta enquanto que a  $#V_f$  é reduzida. Quando é variado o tratamento térmico, o comportamento é similar ao ocorrido para a força  $#V_f$ . Entretanto a força  $//V_f$  apresenta módulo bem menor que a  $#V_f$  visto que a força  $//V_f$  na região próxima a  $\theta=90^\circ$  é composta praticamente pela contribuição da força de avanço enquanto que a  $#V_f$  pela contribuição do movimento de corte.

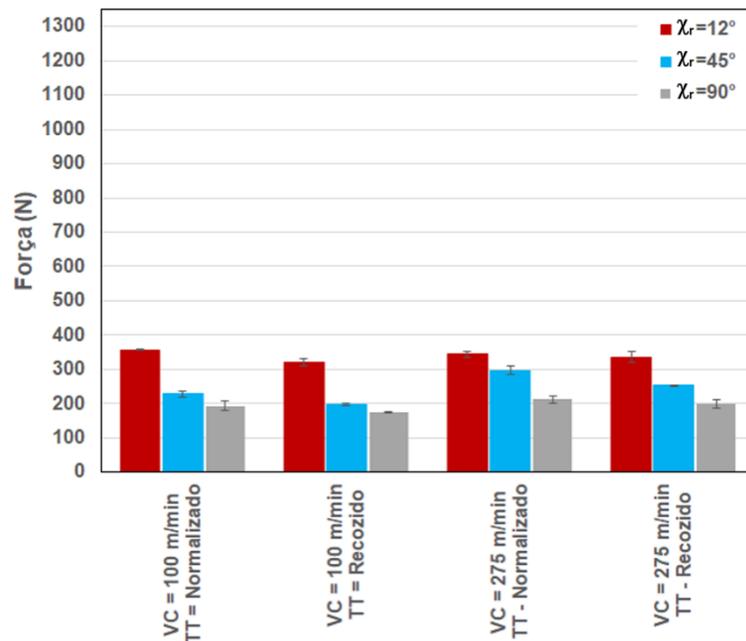


Figura 5.8 - Comportamento da força paralela à direção de avanço ( $//V_f$ ). a) em função do ângulo de posição  
FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.9 é apresentado o comportamento da força passiva ( $F_p$ ) quando é variado um fator e mantidos dois constantes. Observa-se que quando são mantidos constantes o fator velocidade de corte e o fator condição quanto a tratamento térmico a força passiva ( $F_p$ ) apresenta diferença razoável para a ferramenta com ângulo de posição de  $12^\circ$ , quando comparada às de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo que entre estas últimas tal diferença é discreta. Entretanto aqui observa-se um

comportamento diferente que o observado para as forças perpendicular e paralela à direção de avanço ao se comparar 45 com 90°, visto que para estas últimas o módulo foi maior para a com ângulo de posição de 45° enquanto aqui para a de 90°. Já quando os fatores velocidade de corte e tratamento térmico são variados o comportamento é similar ao ocorrido para a força  $//V_f$ .

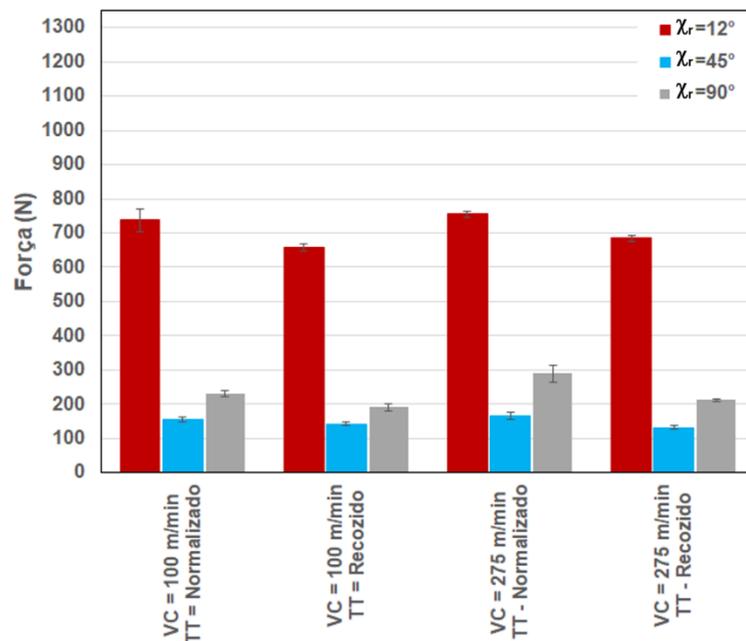


Figura 5.9 - Comportamento da força passiva ( $F_p$ ) em função do ângulo de posição

FONTE: autor, 2019

Foi observado que a força passiva ( $F_p$ ) para a fresa de 90° apresenta ao longo do tempo de usinagem, para todas as combinações, uma certa elevação. Isto não ocorre para as demais componentes e nem para os demais ângulos de posição. O comportamento para a condição com ângulo de 90° pode ser observado na Figura 5.10, para os demais nos Apêndice 11.B, C, D e E. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que uma vez que se trabalhou com espessura do cavaco constante o avanço para a fresa com 90° foi o menor. Isto implica em um tempo maior de contato para um mesmo comprimento usinado, consequentemente maior desgaste.

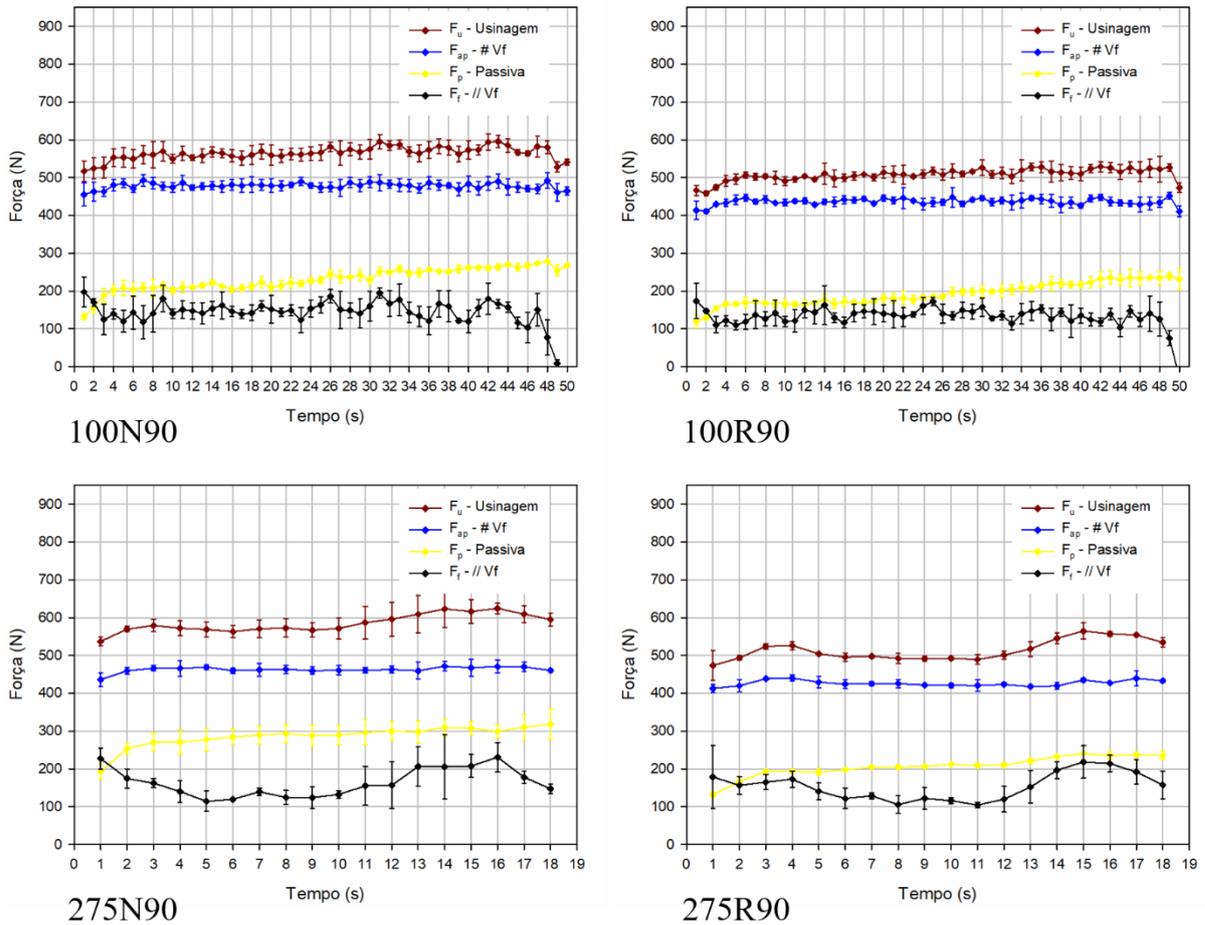


Figura 5.10 - Comportamento da força de usinagem e suas componentes durante a usinagem para as condições AAAB90

FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.11 é apresentado o comportamento da força de usinagem ( $F_u$ ) quando é variado um fator e mantidos dois constantes. Observa-se que quando são mantidos constantes o fator velocidade de corte e o fator condição quanto a tratamento térmico a força de usinagem ( $F_u$ ) apresenta comportamento similar ao observado para a força #V<sub>f</sub>. Ocorre o mesmo quando são variados os outros dois fatores, velocidade de corte e condição quanto ao tratamento térmico.

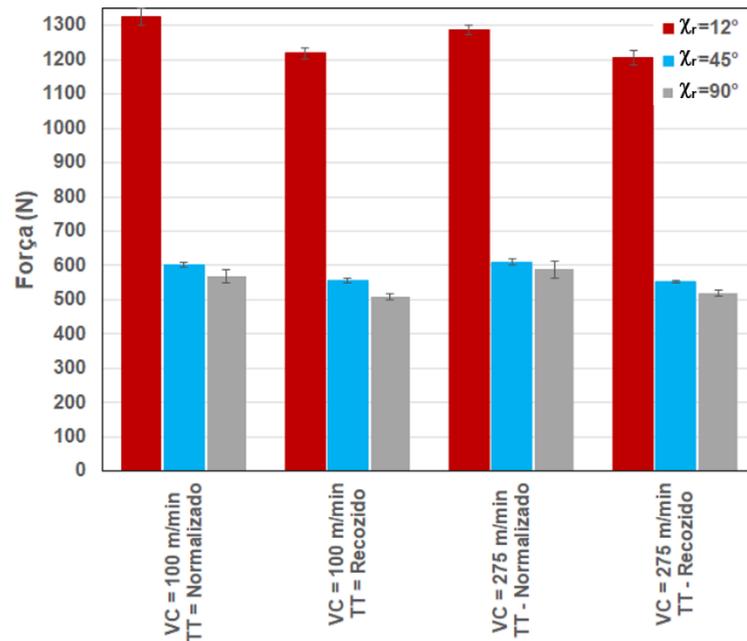


Figura 5.11 - Comportamento da força de usinagem ( $F_u$ ) em função do ângulo de posição

FONTE: autor, 2019

Em resumo tem-se que:

- o aumento do ângulo de posição implica na redução da força de usinagem ( $F_u$ ) e suas componentes, à exceção da componente passiva ( $F_p$ ) que quando se varia de 45 para 90° ocorre aumento;
- o aumento da velocidade de corte não implica em variação significativa na força de usinagem ( $F_u$ ). Entretanto, implica em aumento das componentes paralela à direção de avanço ( $F_f$ ) e passiva ( $F_p$ );
- a condição do material quanto ao tratamento térmico em normalizado implica em aumento da força de usinagem e suas componentes;
- a força de usinagem ( $F_u$ ) e suas componentes.

### 5.3 Tensões residuais

Os dados referentes às deformações coletados foram tratados no software *H-drill*, que é fornecido juntamente com o equipamento *RS-200 Milling Guide*.

Como saída o *software* fornece uma tabela de dados e três gráficos. São apresentados, na tabela, os dados referentes às deformações medidas, propriedades como tensão de escoamento e módulo de elasticidade do material utilizadas para cálculo, características dos extensômetros da roseta, erro padrão, as tensões residuais em duas direções, para o caso do presente trabalho estas direções correspondem à paralela e perpendicular à direção de avanço, tensões principais máxima e mínima bem como o ângulo entre a tensão principal e o extensômetro número 1 e respectivas tensões cisalhantes.

Um gráfico apresenta as deformações medidas ao longo da profundidade e os outros dois as tensões residuais principal máxima e mínima e nas direções paralela e perpendicular à direção de avanço. Nos anexos constam como exemplo a tabela e os gráficos, Anexo 11.C a tabela e no Anexo 11.D os referidos gráficos. Pode-se observar no Gráfico 5.2 que o perfil das tensões residuais, principal máxima, mínima, paralela e perpendicular à direção de avanço apresentam certa similaridade.

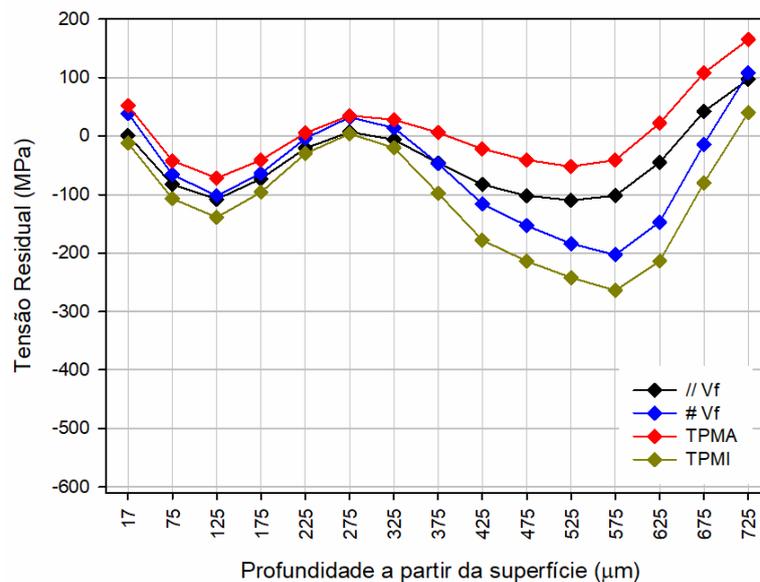


Gráfico 5.2 - Perfil de tensões residuais ao longo da profundidade a partir da superfície para a réplica número 2 na condição 100R45.

FONTE: autor, 2019

Pode-se ainda inferir pela observação do Gráfico 5.2 que as tensões, principal máxima (TPMA) e perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) possuem intensidades e tendências semelhantes. O mesmo ocorre para as tensões principal mínima (TPMI) e paralela à direção de avanço ( $//V_f$ ). Diante desta constatação e que dentre as três componentes da força de usinagem a de maior

intensidade é a perpendicular à direção de avanço, conforme exposto na seção destinada à apresentação dos resultados referentes ao efeito da variação dos três fatores sobre as forças de usinagem e suas componentes e por se tratar de um trabalho comparativo, a análise será conduzida tomando como referência as tensões residuais perpendiculares à direção de avanço ( $\#V_f$ ). Corrobora esta opção os resultados apresentados por Pereira (2016) que demonstram respostas similares entre as tensões residuais paralelas e perpendiculares à direção de avanço à variação dos fatores estudados por ele e que, à exceção do tratamento térmico, contém os aqui estudados. Pela observação das Figura 5.12 e Figura 5.13 percebe-se, do ponto de vista qualitativo, grande distinção entre os perfis de tensão residual de cada réplica para uma mesma condição, tratamento térmico, ângulo de posição e velocidade de corte.

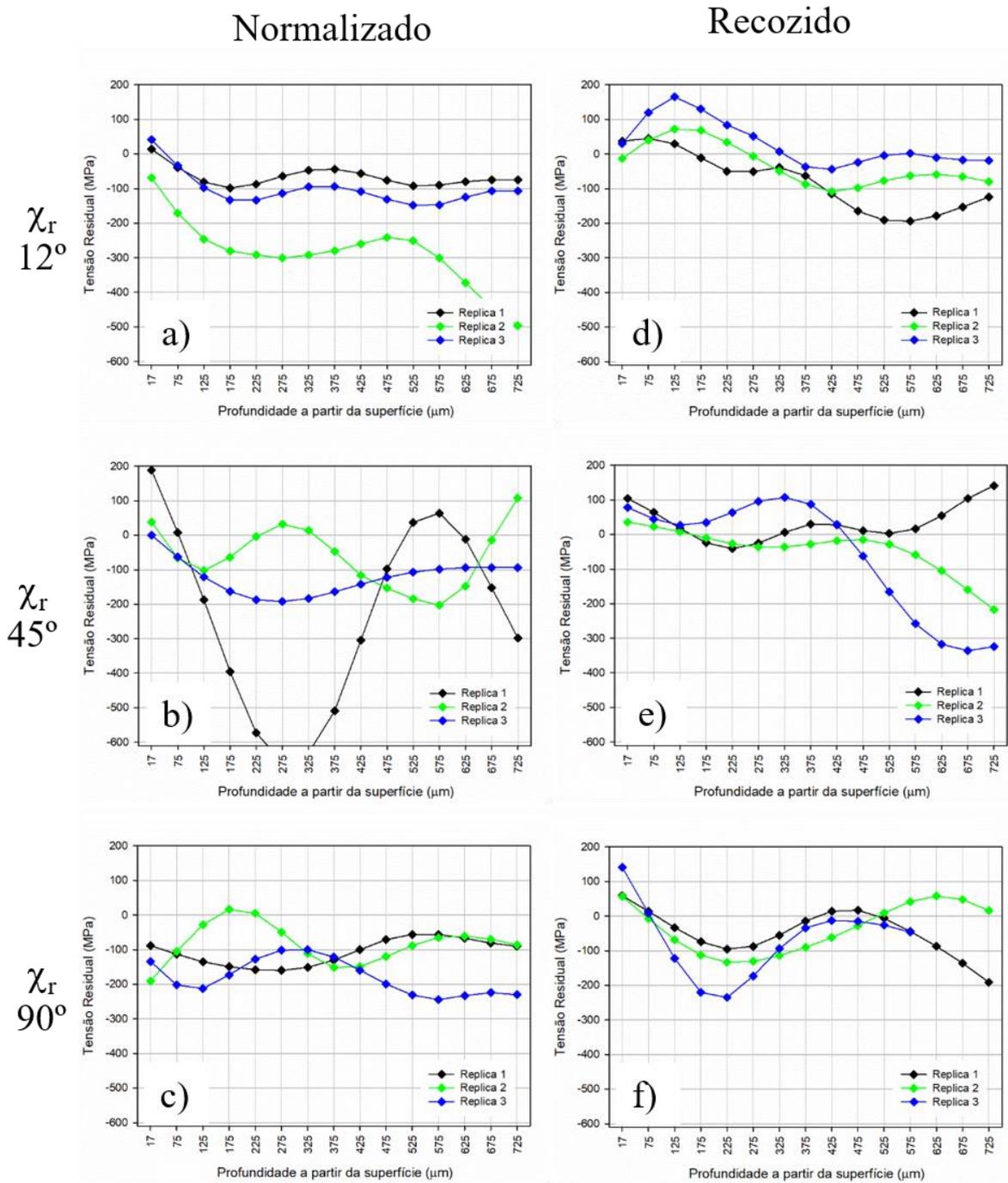


Figura 5.12 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para  $V_c=100\text{m/min}$  agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa para cada réplica realizada

FONTE: autor, 2019

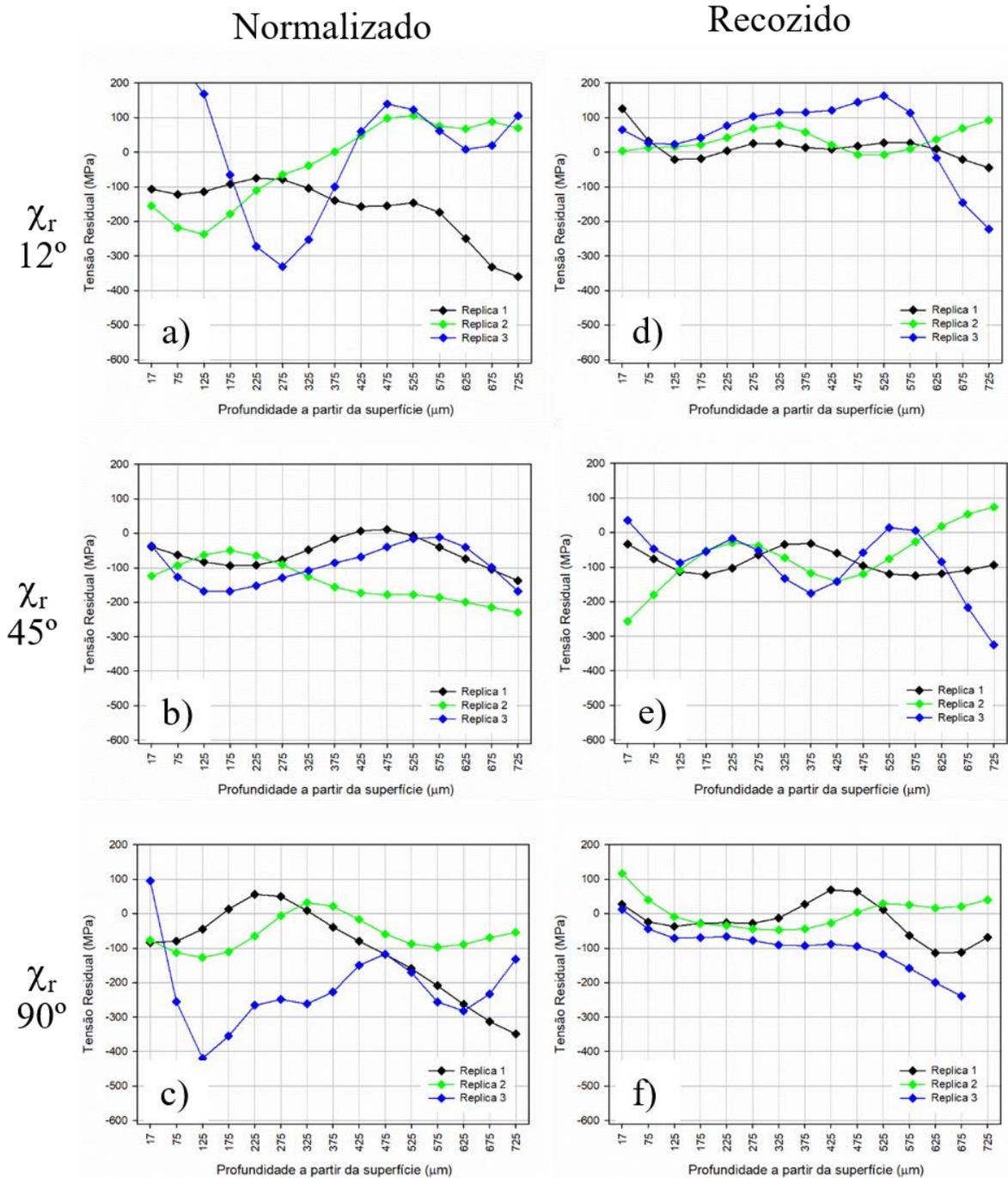


Figura 5.13 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para  $V_c=275\text{m/min}$  agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa para cada réplica realizada

FONTE: autor, 2019

A apresentação e análise dos resultados será conduzida com duas abordagens. Uma quantitativa e outra qualitativa. Na abordagem quantitativa serão apresentados e discutidos os resultados das tensões residuais calculados na profundidade de 17 micrometros a partir da superfície. Já na abordagem qualitativa serão apresentados e discutidos os aspectos quanto ao perfil da tensão

residual ao longo da profundidade a partir da superfície, seu caráter trativo ou compressivo, tendências e profundidade afetada.

Tomando como base a observação das figuras Figura 5.12 e Figura 5.13, optou-se pelo descarte de uma das réplicas. O resultado da aplicação desta opção está resumido no Quadro 5.2.

Condição	Réplicas			Réplicas Consideradas para Análise
	1	2	3	
100N12				1 e 3
100N45				2 e 3
100N90				1 e 3
100R12				2 e 3
100R45				2 e 3
100R90				1 e 2
275N12				1 e 2
275N45				1 e 3
275N90				1 e 2
275R12				1 e 3
275R45				1 e 3
275R90				1 e 2

Quadro 5.2 - Réplicas consideradas para análise

FONTE: autor, 2019

Com base nesta seleção, foram elaborados gráficos com os respectivos perfis de tensão residual ao longo da profundidade a partir da superfície considerando a média das réplicas consideradas para análise. O resultado deste trabalho é apresentado nas Figura 5.14 e Figura 5.15, figuras estas similares as Figura 5.12 e Figura 5.13 quanto ao formato apresentado.

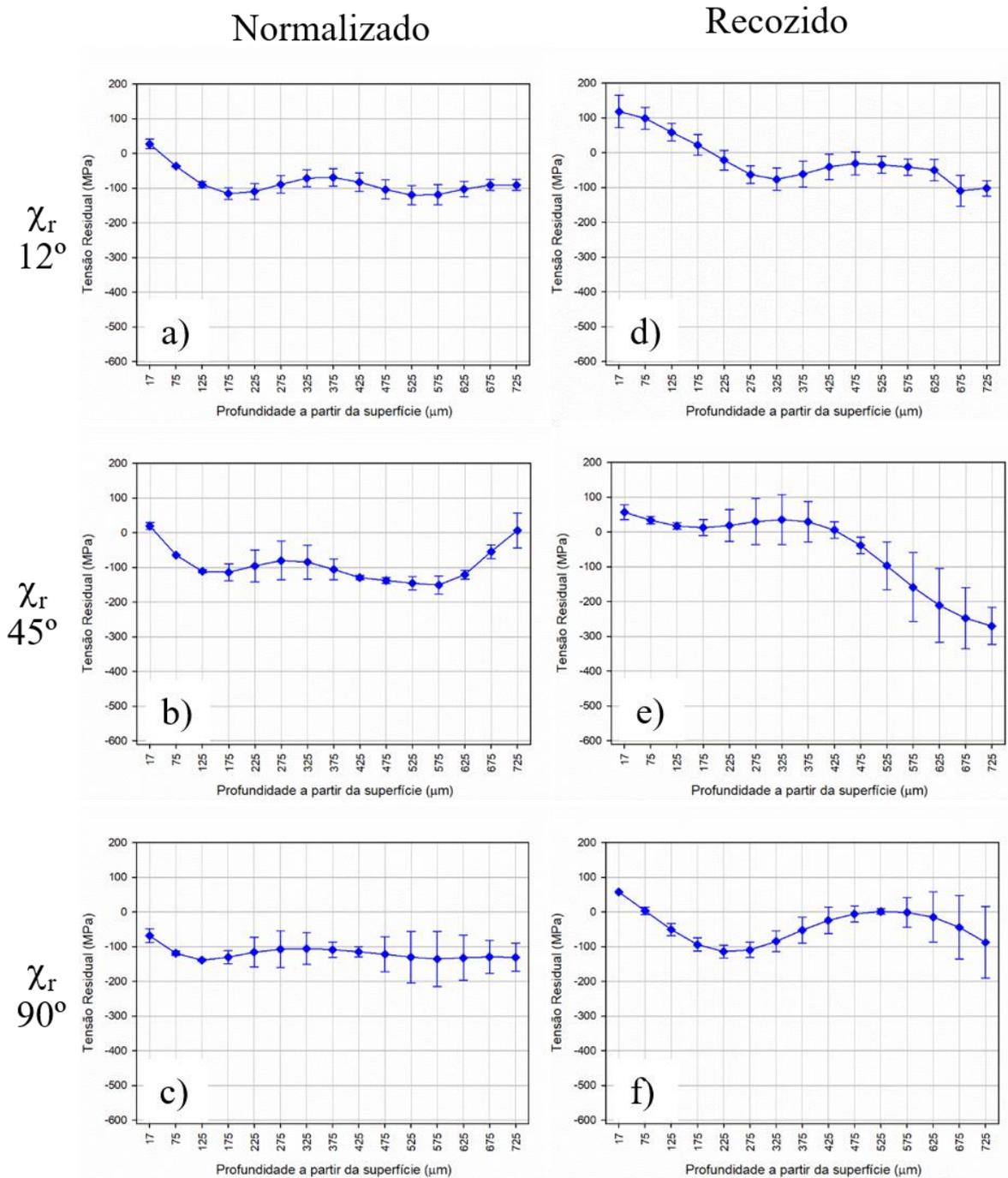


Figura 5.14 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para  $V_c=100\text{m/min}$  agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa obtido pela média entre réplicas conforme Quadro 5.2

FONTE: autor, 2019

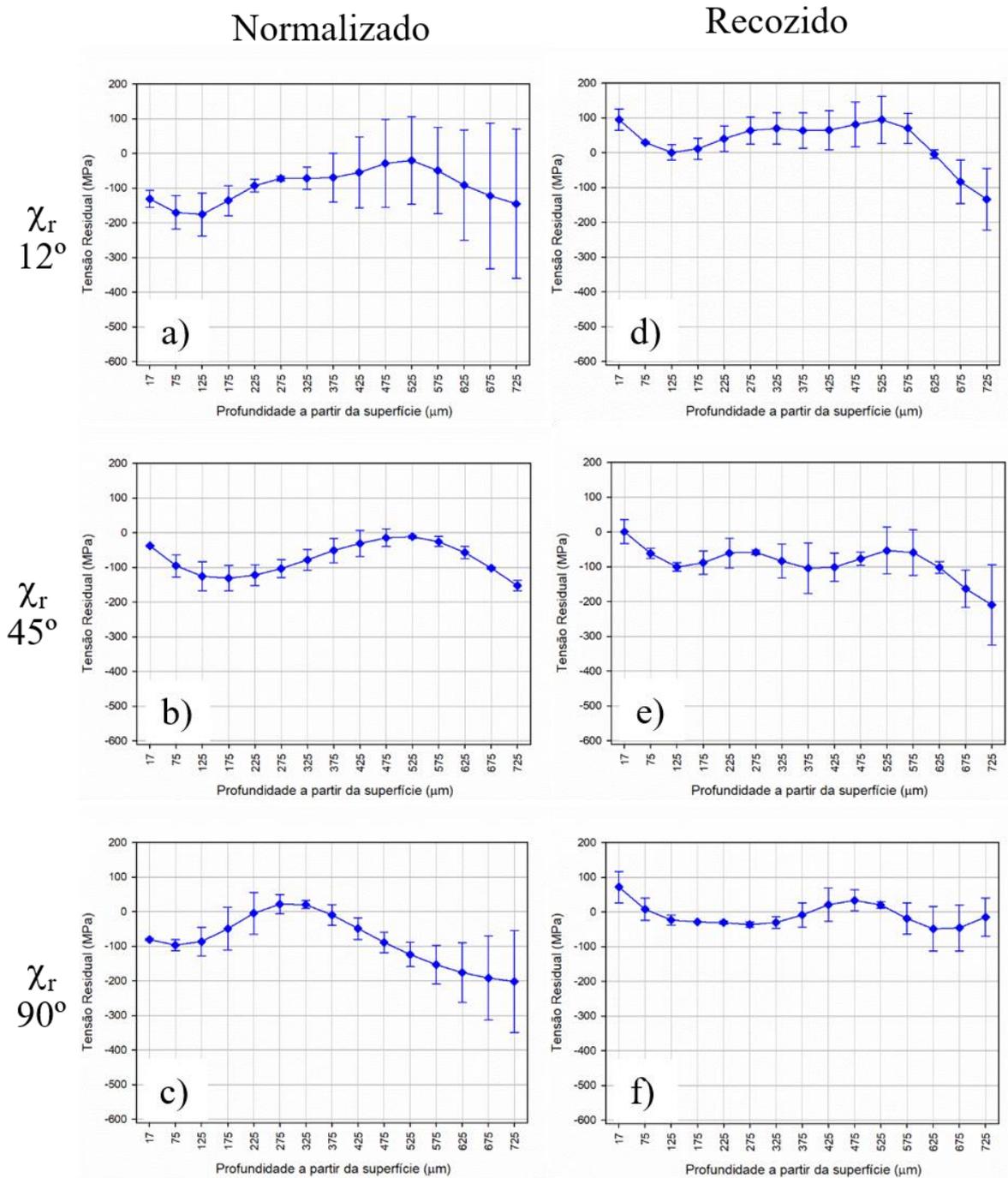


Figura 5.15 - Perfil das tensões residuais perpendiculares à direção de avanço para  $V_c=275\text{m/min}$  agrupadas pelo tratamento térmico e ângulo de posição da fresa obtido pela média entre réplicas conforme Quadro 5.2

FONTE: autor, 2019

A primeira observação que pode ser feita com base nas Figura 5.14 e Figura 5.15 é que para todas as condições o perfil resultante apresenta erro padrão significativo ponto a ponto ao longo da profundidade a partir da superfície.

### 5.3.1 Abordagem quantitativa

Na abordagem quantitativa serão apresentados e analisados os dados referentes à tensão residual perpendicular à direção de avanço ( $\#V_f$ ) na profundidade de  $17\mu\text{m}$ , sendo a primeira profundidade em que foi calculada a tensão residual pelo *software Hdrill* a partir das deformações registradas pelos extensômetros. Esta profundidade foi escolhida por ser a mais próxima da superfície em que foi calculada a tensão residual e, como discutido na revisão bibliográfica, o maior interesse em conhecer as tensões residuais em um componente qualquer está relacionado à vida em fadiga que depende em muito da integridade da superfície. Este conhecimento pode ser útil no planejamento para fabricação de componentes em geral. Outro ponto importante é que posteriormente estes dados poderão ser utilizados para comparação em estudos que venham a utilizar outros métodos de medição de tensões residuais

Aqui também serão analisados os efeitos de cada fator sobre a tensão residual induzida na superfície quando são mantidos os outros dois constantes, porém na profundidade de  $17\mu\text{m}$ . Primeiramente serão apresentados os resultados da análise estatística realizada para o experimento e na sequência gráficos representando o comportamento da tensão residual  $\#V_f$  frente à variação de cada fator.

Foi realizada uma análise de variância, ANOVA, para os dados completos e outra para a seleção realizada em conforme as réplicas constantes do Quadro 5.2 considerando o nível de confiança de 95%. Foi utilizado para isto o *software Minitab* versão 17.

Uma vez inseridos os dados no software, foi utilizado o teste de Anderson-Darling para verificar se a distribuição de probabilidade poderia ser aproximada pela distribuição normal. Realizada análise de resíduos para avaliar o grau de ajuste do modelo às observações. Finalizando com a realização da ANOVA obtendo como resposta tabelas e gráficos indicando os efeitos principais e as interações entre os fatores quanto aos efeitos sobre a tensão residual.

#### 5.3.1.1 Análise de variância para os dados completos

Nesta análise foram utilizados os dados referentes às três réplicas realizadas considerando os três fatores variando em seus respectivos níveis. O Gráfico 5.3 demonstra o resultado do teste de Anderson-Darling para verificar se os dados podem ser aproximados por uma distribuição normal.

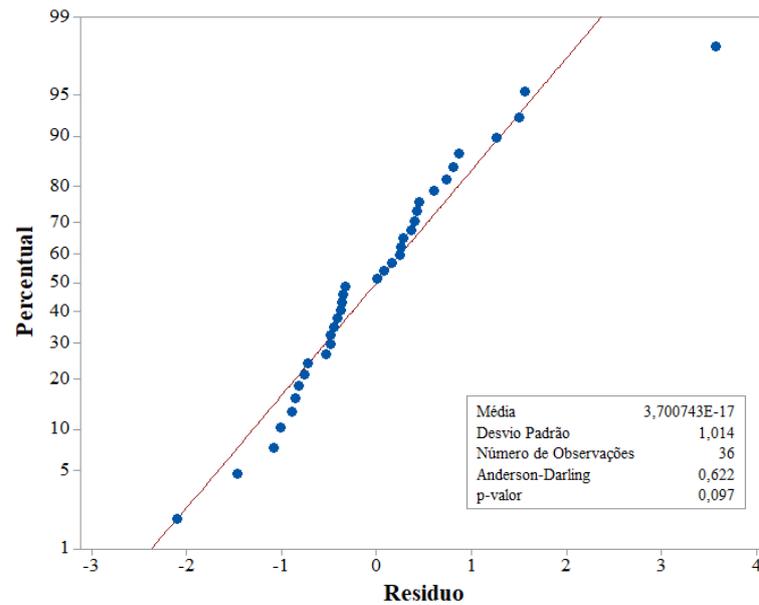


Gráfico 5.3 - Gráfico de probabilidade normal para a tensão residual perpendicular à direção de avanço a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície para todas réplicas

FONTE: autor, 2019

Como o p-valor é maior que 0,05, superior ao nível de significância de 0,05 para um teste de confiança de 95%, tem-se a confirmação de que a distribuição de probabilidade pode ser aproximada pela distribuição normal. Para validação do modelo realizou-se análise dos resíduos padronizados para os dados. Na Figura 5.16 podem ser observados os gráficos de resíduos versus ordem e resíduos versus ajuste. É possível perceber que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente ao longo do tempo. Montgomery e Runger (2016), apud PEREIRA (2017) relacionam-se à necessidade de a média ser zero e variância constante. Afirmam que os erros seguem a distribuição normal com média zero e variância constante, quando cerca de 68% dos resíduos padronizados estejam entre os limites  $\pm 1$  e 95% entre os limites  $\pm 2$ . De acordo com a Figura 5.16 b) dos 36 pontos, 32 estão compreendidos no intervalo entre -1 e 1, 88,9%, 34 entre -2 e 2, 94,4%, o que não chega a comprometer a condição de distribuição normal com média zero e variância constante.

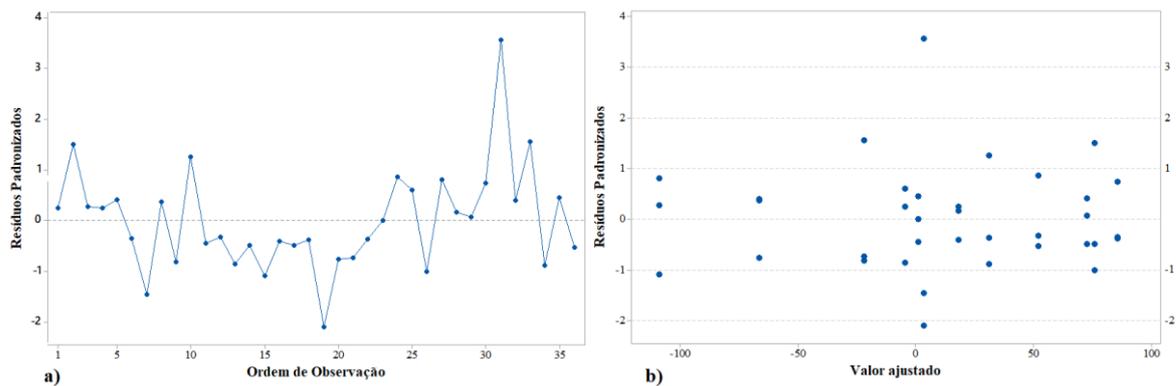


Figura 5.16 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes

FONTE: autor, 2019

A Tabela 5.2 resume os dados da ANOVA para a tensão residual perpendicular à direção de avanço na profundidade de  $17\mu\text{m}$  a partir da superfície. A análise retornou um valor de  $R^2$  muito baixo, 35,63%. Isto indica que ou o modelo não é adequado para avaliar o comportamento em estudo ou seria necessário a realização de um número maior de réplicas afim de confirmar a adequação ou não do modelo. Ainda observando a Tabela 5.2 nota-se que entre os efeitos principais o tratamento térmico foi o único a se mostrar significativo ao nível de confiança adotado. Quanto às interações de segunda e terceira ordem nenhum efeito principal se mostrou significativo.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	p-valor
Modelo	11	112812	10256	1,21	0,334
Linear	4	43757	10939	1,29	0,303
Vc	1	4877	4877	0,57	0,456
TT	1	36672	36672	4,32	0,049
$\chi_r$	2	2208	1104	0,13	0,879
Interações de 2 fatores	5	54877	10975	1,29	0,300
Vc x TT	1	506	506	0,06	0,809
Vc x $\chi_r$	2	31934	15967	1,88	0,174
TT x $\chi_r$	2	22436	11218	1,32	0,286
Interações de 3 fatores	2	14178	7089	0,83	0,446
Vc x TT x $\chi_r$	2	14178	7089	0,83	0,446
Erro	24	203823	8493		
Total	35	316635			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (Aj.)	R2 (pred)	
	92,156	35,63%	6,12%	0,00%	

Tabela 5.2 - Análise de variância para a tensão residual  $\#V_f$  a  $17\mu\text{m}$  a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.17 podem ser observados os efeitos principais para os três fatores utilizados no experimento.

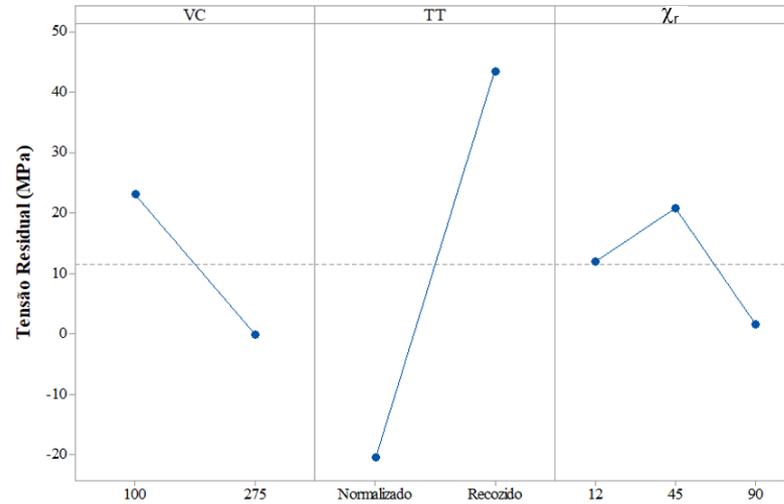


Figura 5.17 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a tensão residual a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

Percebe-se que os três fatores exercem influência sobre a tensão residual, entretanto a condição quando a tratamento térmico e o ângulo de posição, este último quando variado para 90°, de forma mais pronunciada.

Na Figura 5.18 podem ser observados os efeitos das interações entre os três fatores considerados.

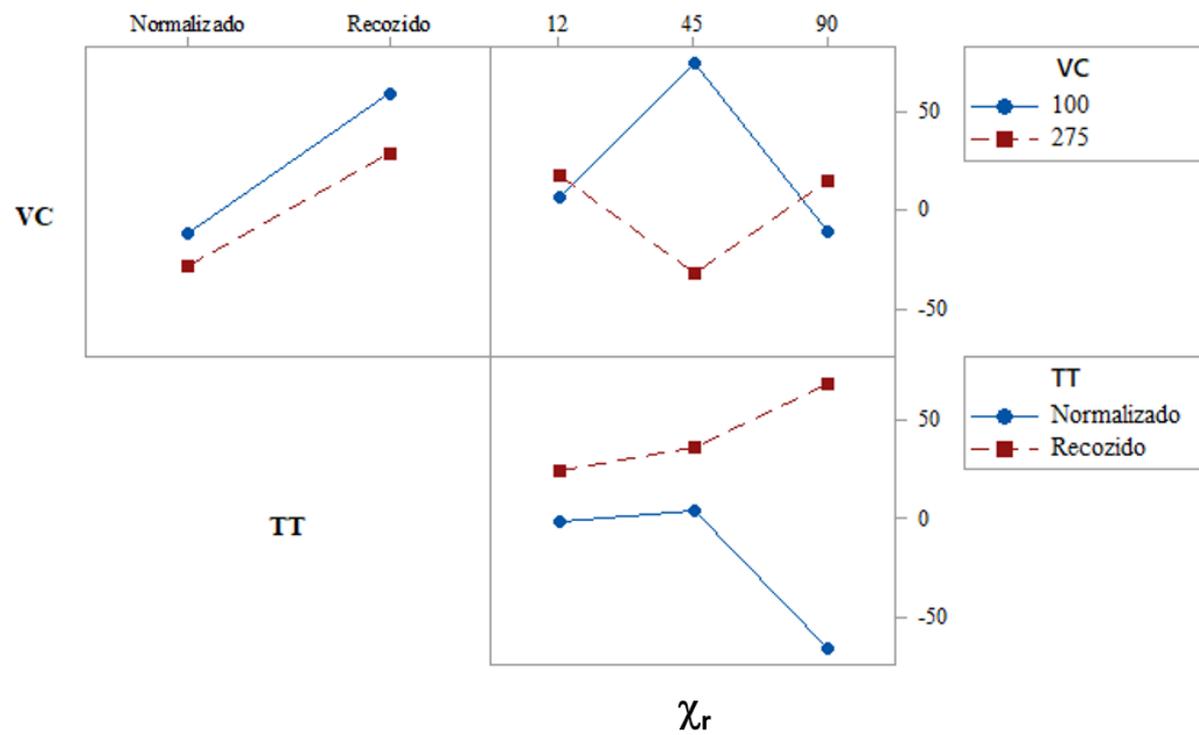


Figura 5.18 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a tensão residual a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

### 5.3.1.2 Análise de variância para os dados obtidos com a seleção de duas réplicas

Nesta análise foram utilizados os dados referentes às duas réplicas selecionadas conforme Quadro 5.2 considerando os três fatores variando em seus respectivos níveis. O Gráfico 5.4 demonstra o resultado do teste de Anderson-Darling para verificar se os dados podem ser aproximados por uma distribuição normal.

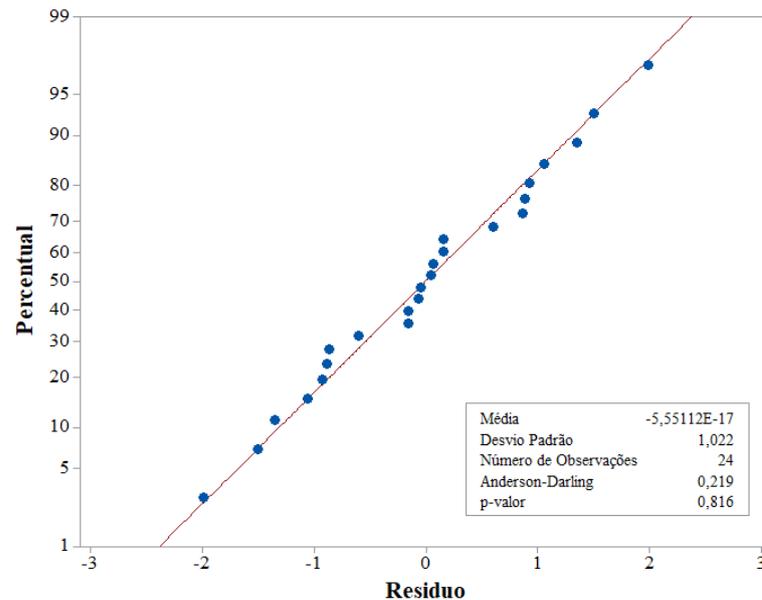


Gráfico 5.4 - Gráfico de probabilidade normal para a tensão residual perpendicular a direção de avanço a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície para seleção de réplicas

FONTE: autor, 2019

Como o p-valor é maior que 0,05, superior ao nível de significância de 0,05 para um teste de confiança de 95%, tem-se a confirmação de que a distribuição de probabilidade pode ser aproximada pela distribuição normal. Aqui também, para validação do modelo realizou-se análise dos resíduos padronizados para os dados. Na Figura 5.19 podem ser observados os gráficos de resíduos versus ordem e resíduos versus ajuste. É possível perceber que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente ao longo do tempo. Montgomery e Runger (2016), apud PEREIRA (2017) relacionam-se à necessidade de a média ser zero e variância constante. Afirmam que os erros seguem a distribuição normal com média zero e variância constante, quando cerca de 68% dos resíduos padronizados estejam entre os limites  $\pm 1$  e 95% entre os limites  $\pm 2$ . De acordo com a Figura 5.19 b) dos 24 pontos, 16 estão compreendidos no intervalo entre -1 e 1, 66,7%, 36 entre -2 e 2, 100%, ou seja, apenas um dos critérios é atendido. Aqui vale a mesma observação feita para a ANOVA com as três réplicas.

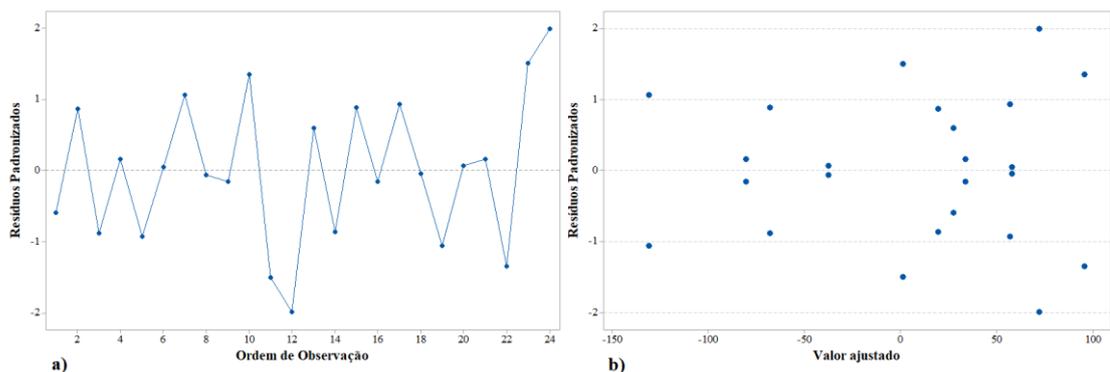


Figura 5.19 - a) análise dos resíduos x ordem, b) análise dos resíduos x ajustes

FONTE: autor, 2019

Ainda observando a Figura 5.19 b) nota-se simetria entre os resíduos. Este comportamento também foi observado por Pereira, (2017). Aqui, também, este comportamento se justifica pelo retorno de valores simétricos (iguais em intensidade) pelo modelo de regressão quando se utilizava teste e réplica, comportamento esperado dado que os valores das variáveis de entrada (VC, TT e  $\chi_r$ ) eram iguais. Vale observar que na Figura 5.16 b) isto não ocorreu, uma vez que foram utilizadas 3 réplicas, uma a mais que para este caso.

A Tabela 5.3 resume os dados da ANOVA para a tensão residual perpendicular à direção de avanço na profundidade de 17 $\mu$ m a partir da superfície. A análise retornou um valor de R<sup>2</sup> de 89,59%, melhor que o observado na ANOVA com três réplicas. O retorno de um R<sup>2</sup> melhor do que com a análise com três réplicas realizada anteriormente se justifica pelo fato de que foram selecionadas réplicas com resultados mais semelhantes. Ainda observando a Tabela 5.3 nota-se que entre os efeitos principais a velocidade de corte e o tratamento térmico se mostraram significativo ao nível de confiança adotado. Quanto às interações de segunda ordem a velocidade de corte e tratamento térmico e o tratamento térmico e o ângulo de posição se mostraram significativos ao nível de confiança adotado. A interação de terceira ordem entre os três fatores estudados se mostrou significativa ao nível de confiança adotado.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	p-valor
Modelo	11	105329	9575	9,39	0,000
Linear	4	65567	16392	16,07	0,000
Vc	1	7211	7211	7,07	0,021
TT	1	57428	57428	56,32	0,000
$\chi_r$	2	928	464	0,46	0,645
Interações de 2 fatores	5	25351	5070	4,97	0,011
Vc x TT	1	10251	10251	10,05	0,008
Vc x $\chi_r$	2	3831	1916	1,88	0,195
TT x $\chi_r$	2	11269	5635	5,53	0,020
Interações de 3 fatores	2	14411	7206	7,07	0,009
Vc x TT x $\chi_r$	2	14411	7206	7,07	0,009
Erro	12	12237	1020		
Total	23	117566			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (Aj.)	R2 (pred)	
	31,934	89,59%	80,05%	58,37%	

Tabela 5.3 - Análise de variância para a tensão residual #V<sub>r</sub> a 17 $\mu$ m a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

Na Figura 5.20 podem ser observados os efeitos principais para os três fatores utilizados no experimento.

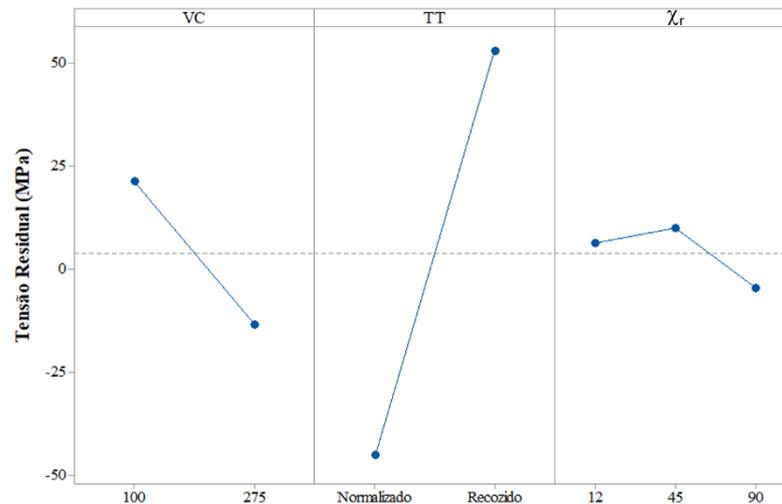


Figura 5.20 - Efeito principal para velocidade de corte, tratamento térmico e ângulo de posição sobre a tensão residual induzida a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

Aqui também se percebe que os três fatores exercem influência sobre a tensão residual, entretanto a condição quando a tratamento térmico de forma mais pronunciada.

Na Figura 5.21 pode ser observado o efeito das interações entre os três fatores considerados.

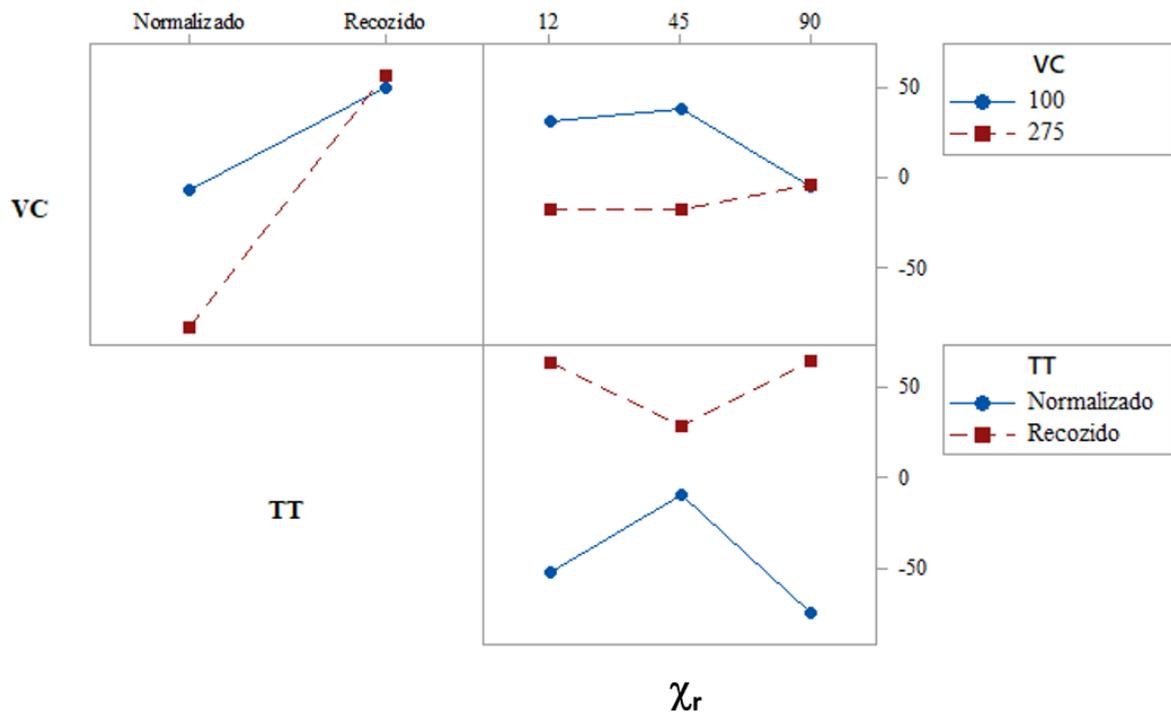


Figura 5.21 - Efeito das interações entre a velocidade de corte, o tratamento térmico e o ângulo de posição sobre a tensão residual a 17 $\mu$ m de profundidade a partir da superfície

FONTE: autor, 2019

Será mostrado e discutido na sequência a influência de cada um dos fatores quando os outros dois são mantidos constantes considerando as duas réplicas selecionadas.

### 5.3.1.3 Efeito do ângulo de posição da fresa sobre a tensão residual induzida na profundidade de 17 $\mu$ m

No Gráfico 5.5 pode ser observado o comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço para a profundidade de 17 $\mu$ m para as condições em que são mantidos constantes a velocidade de corte e a condição quanto a tratamento térmico, normalizado e recozido, variando-se o fator ângulo de posição.

Quanto à intensidade da tensão residual perpendicular à direção de avanço na profundidade de 17 $\mu$ m, o ângulo de posição apresenta os seguintes efeitos:

- reduz a intensidade da tensão residual tratativa até tornar-se compressiva quando o ângulo de posição é de 90° para a condição 100NXX;

- aumenta a intensidade da tensão residual trativa quando varia de  $12 \rightarrow 45^\circ$ . De  $45 \rightarrow 90^\circ$  não tem efeito. Para a condição 100RXX;
- reduz a intensidade da tensão residual compressiva quando varia de  $12 \rightarrow 45^\circ$  e aumenta quando varia de  $45 \rightarrow 90^\circ$ . De  $12 \rightarrow 90$  reduz. Para a condição 275NXX;
- reduz a intensidade da tensão residual trativa quando varia de  $12 \rightarrow 45$  e aumenta quando varia de  $45 \rightarrow 90$ . De  $12 \rightarrow 90$  reduz. Para a condição 275RXX.

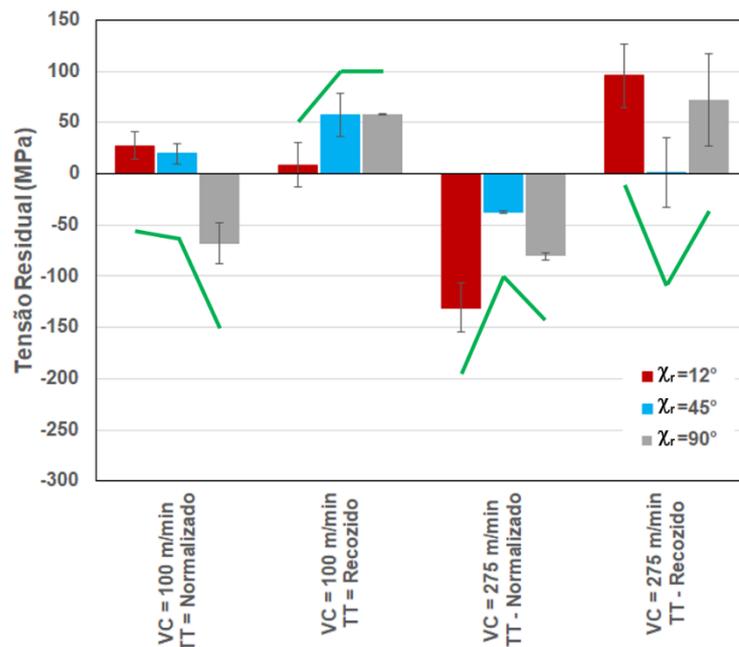


Gráfico 5.5 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função do ângulo de posição na profundidade de  $17\mu\text{m}$  a partir da superfície.

FONTE: autor, 2019

Em síntese, para velocidade de corte em  $100\text{m}/\text{min}$  a variação de  $\chi_r$  reduz a tensão residual quando o material está normalizado, já quando recozido o comportamento é o oposto. Comportamento oposto também se observa quando a velocidade de corte está em  $275\text{m}/\text{min}$ . Isto fica evidente quando se observa as linhas de tendência em verde no Gráfico 5.5. Este comportamento sugere que os efeitos térmicos são mais pronunciados no material recozido quando fresado com  $100\text{m}/\text{min}$  de velocidade de corte e menos quando fresado a  $275\text{m}/\text{min}$ . Talvez com  $275\text{ m}/\text{min}$  atinge-se uma temperatura da usinagem que reduz o limite de escoamento favorece maior deformação plástica na condição normalizado favorecendo o caráter compressivo. Como trabalhou-se com espessura do cavaco constante cada ângulo de posição proporciona um volume maior do cavaco o que exerce influência direta na ação de

remoção de calor e também na geração, visto que a área de contato é distinta para cada uma. Fazendo-se o balanço destes fatores e prevalecendo a ação mecânica o resultado será tensões residuais de compressão. Já prevalecendo a ação térmica, de tração, a exceção do caso em que houver formação de martensita que resultará em compressão devido a esta ocupar maior volume.

#### 5.3.1.4 Efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual induzida na profundidade de $17\mu\text{m}$

No Gráfico 5.6 pode ser observado o comportamento da tensão residual na direção perpendicular à direção de avanço para a profundidade de  $17\mu\text{m}$  para as condições em que são mantidos constantes o ângulo de posição e a condição quanto a tratamento térmico, normalizado e recozido, variando-se o fator velocidade de corte.

Quanto à intensidade da tensão residual perpendicular à direção de avanço na profundidade de  $17\mu\text{m}$ , a velocidade de corte apresenta os seguintes efeitos:

- reduz a intensidade da tensão residual compressiva quando as condições são AAAN12, 45 e 90;
- aumenta a intensidade da tensão residual trativa quando as condições são AAAR12 e 90;
- reduz a intensidade da tensão residual trativa quando a condição é AAAR45.

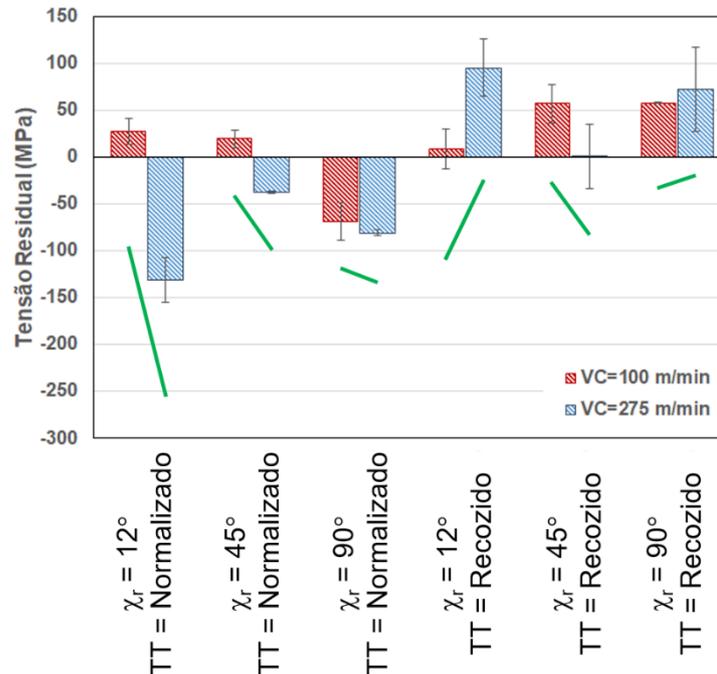


Gráfico 5.6 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função da velocidade de corte na profundidade de  $17\mu\text{m}$  a partir da superfície.

FONTE: autor, 2019

Observa-se que em geral o aumento da velocidade de corte tende a induzir tensões de compressão sugerindo uma possível formação de martensita devido a aumento de temperatura à exceção das ferramentas de  $12^\circ$  e  $45^\circ$  onde tudo indica que o aumento de temperatura não foi suficiente para formar martensita e somente promover expansão térmica resultando em tensões residuais de tração.

### 5.3.1.5 Efeito do tratamento térmico sobre a tensão residual induzida na profundidade de $17\mu\text{m}$

No Gráfico 5.6 pode ser observado o comportamento da tensão residual na direção perpendicular à direção de avanço para a profundidade de  $17\mu\text{m}$  para as condições em que são mantidos constantes a velocidade de corte e o ângulo de posição variando-se o fator tratamento térmico.

Quanto à intensidade da tensão residual perpendicular à direção de avanço na profundidade de  $17\mu\text{m}$ , a condição quanto ao tratamento térmico apresenta os seguintes efeitos:

- muda de tensão residual trativa para compressiva quando as condições são 100B90 e 275B12, 45 e 90;
- aumenta a intensidade da tensão residual trativa quando a condição é 100B12;
- reduz a intensidade da tensão residual trativa quando a condição é 100B45.

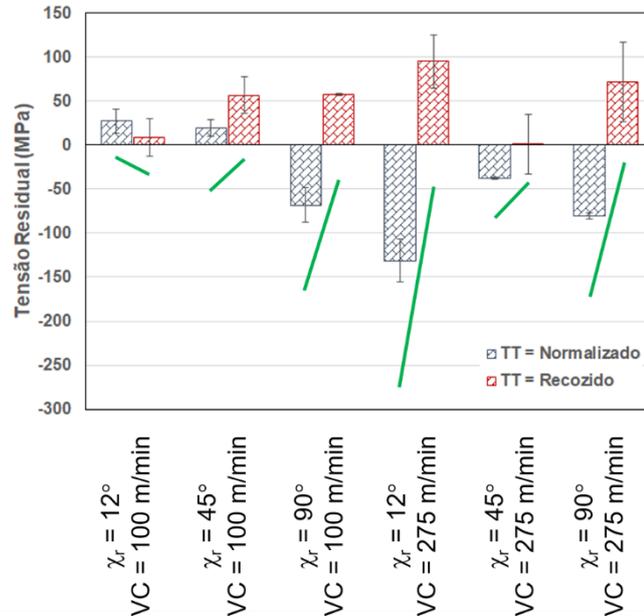
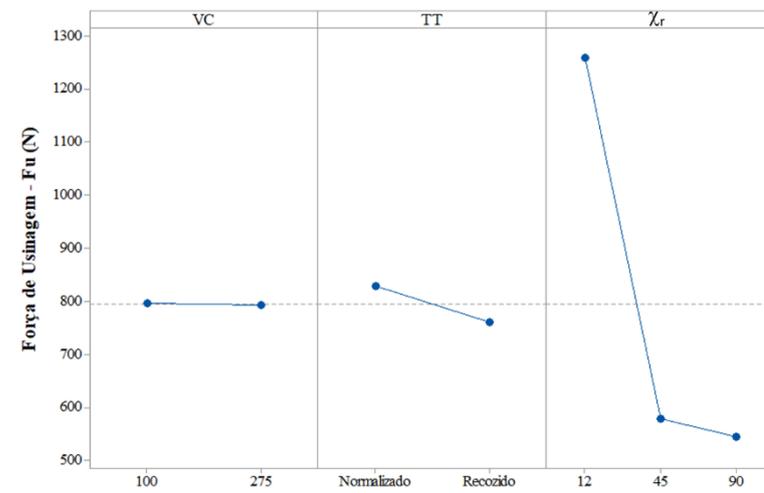


Gráfico 5.7 - Comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço em função da condição quanto ao tratamento térmico na profundidade de 17μm a partir da superfície.

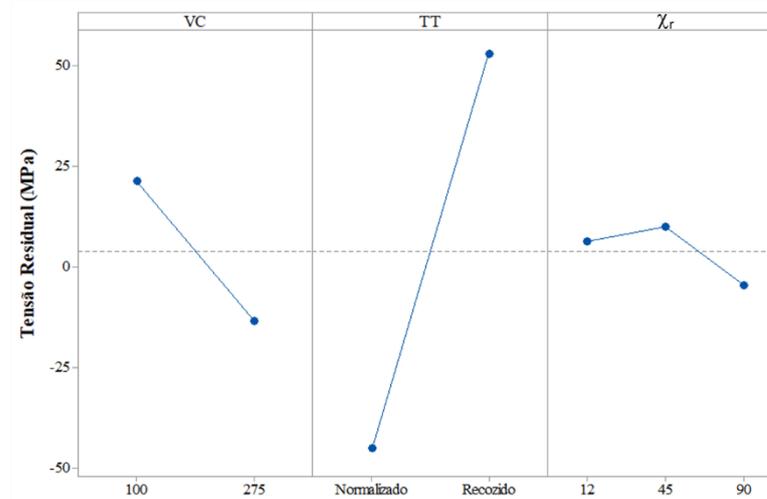
FONTE: autor, 2019

Observa-se que a variação da condição de normalizado para recozido muda o caráter da tensão residual de compressivo para trativo. O que provavelmente se deve ao fato de prevalecer os aspectos térmicos relacionados à expansão térmica da superfície usinada.

A seguir pode-se observar as Figura 5.22 e Figura 5.23 onde pode-se tentar correlacionar os efeitos principais e interações dos fatores aqui estudados sobre a tensão residual e sobre as forças de usinagem.



a)



b)

Figura 5.22 - Efeitos principais. a) Força de usinagem ( $F_u$ ); b) Tensão residual  $\#V_f$

FONTE: autor, 2019

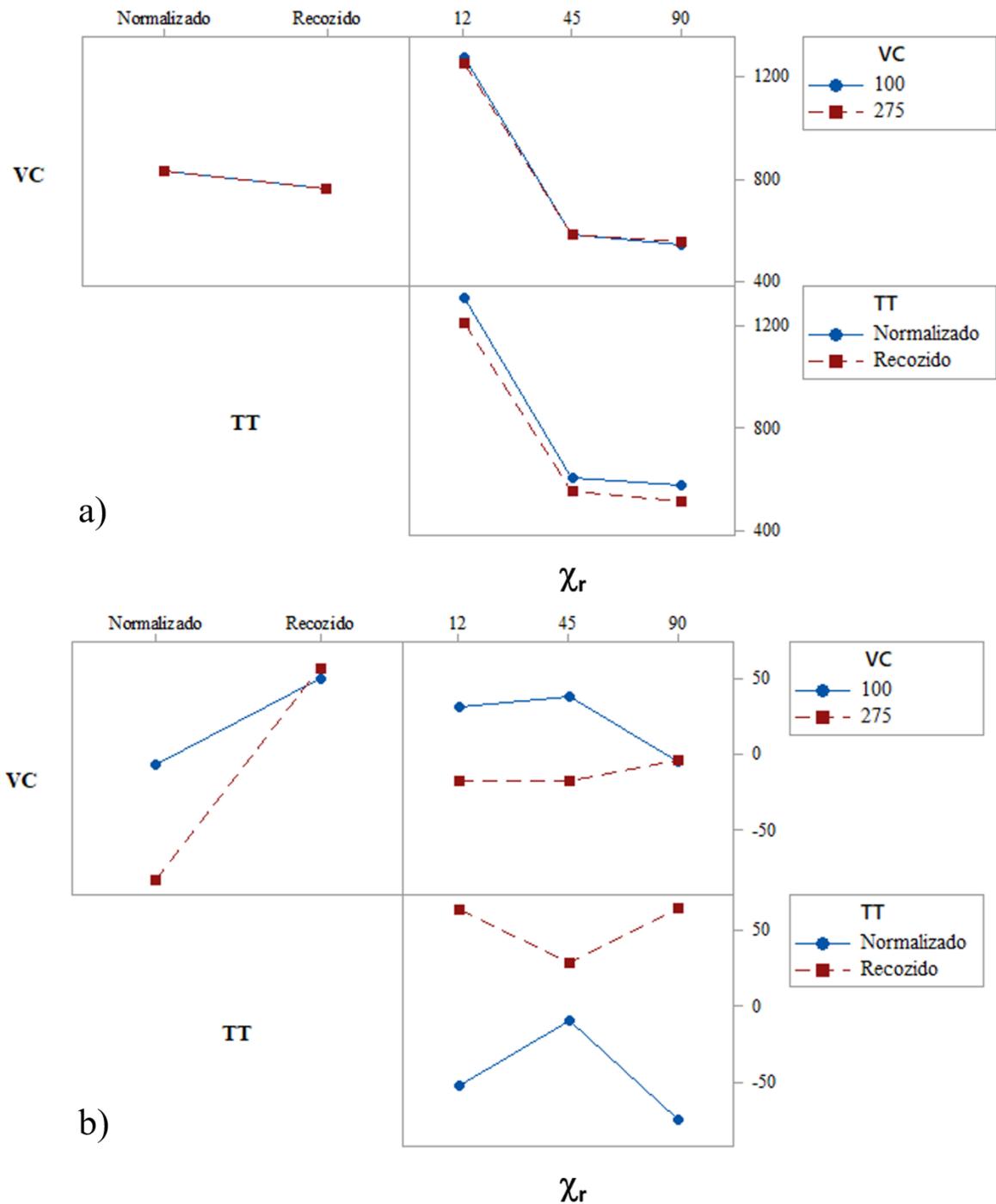


Figura 5.23 - Interações. a) Força de usinagem ( $F_u$ ); b) Tensão residual  $\chi_r$

FONTE: autor, 2019

Tentou-se estabelecer alguma relação entre a força de usinagem e a tensão residual, entretanto não foi observado nenhuma tendência óbvia. O que indica que os estudos aqui realizados não são suficientes para este fim. Sendo necessário exames mais detalhados principalmente no campo microestrutural.

Agora será feita a análise qualitativa sempre considerando a variação de um fator enquanto os outros dois são mantidos constantes.

### 5.3.2 Abordagem qualitativa

#### 5.3.2.1 Efeito do ângulo de posição da fresa sobre a tensão residual induzida

Na Figura 5.24 pode ser observado de forma agrupada o comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço ao longo da profundidade a partir da superfície quando são mantidos constantes a velocidade de corte em 100m/min, Figura 5.24 a) e c) e 275m/min Figura 5.24 b) e d), bem como a condição quanto ao tratamento térmico em normalizado, Figura 5.24 a), b) e recozido, Figura 5.24 c) e d) enquanto o ângulo de posição é variado nos três níveis.

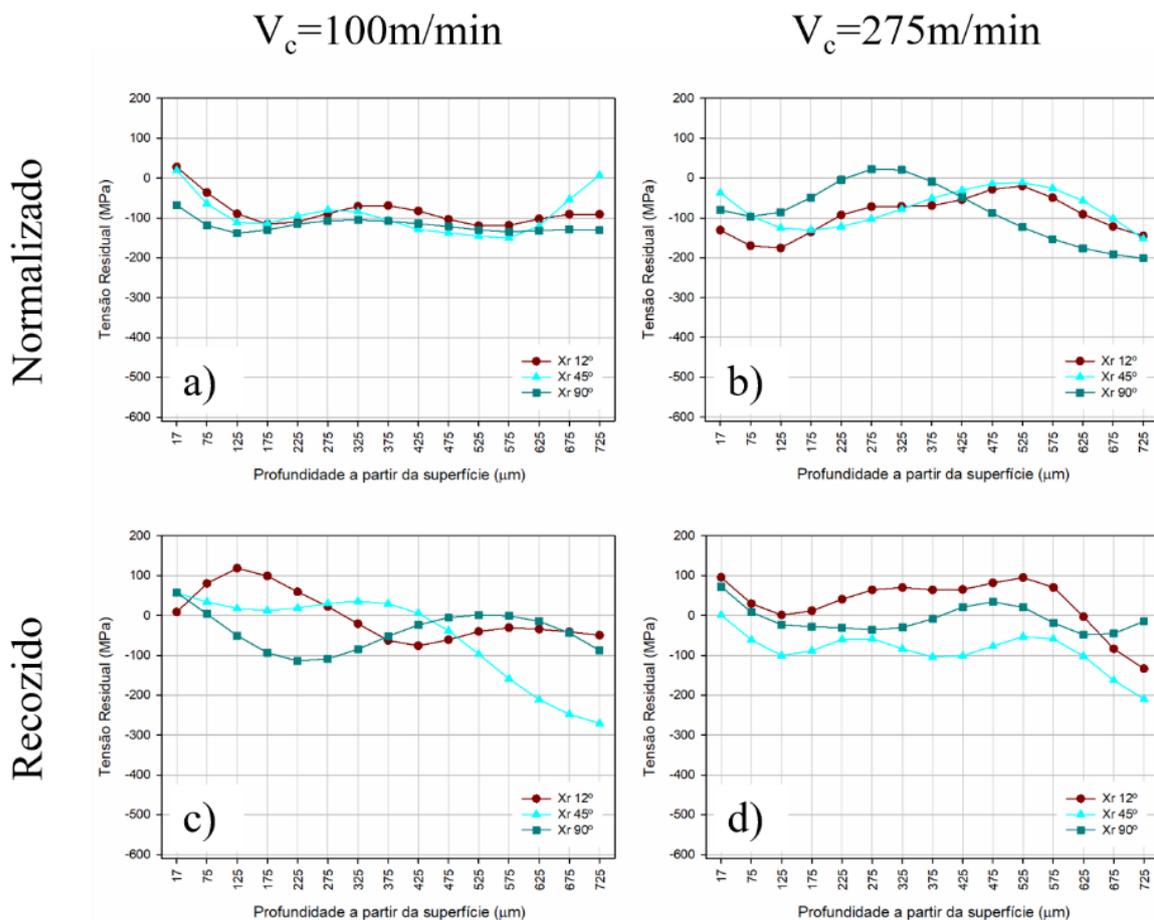


Figura 5.24 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidas a velocidade de corte e a condição quanto ao tratamento térmico do aço, normalizado ou recozido com variação do ângulo de posição em três níveis.

FONTE: autor, 2019

Pela observação da Figura 5.24 pode-se inferir que para os corpos de prova, tanto na condição normalizado quanto recozido, e velocidades de corte de 100 e 275m/min a variação do ângulo de posição exerce pouco efeito sobre o comportamento da tensão residual. Para os ângulos de 12 e 45° para a condição 100N os perfis apresentam certa similaridade até a profundidade de 275 $\mu$ m. Para as demais condições o perfil se mostra distinto para cada ângulo de posição. O Quadro 5.3 resume os resultados ora apresentados. O termo profundidade afetada se refere à profundidade a partir da superfície em que conforme a tendência observada alcança-se a maior intensidade de tensão residual de tração ou compressão.

Condição	$\chi_r$ (°)	Caráter na Superfície T - Trativo C - Compressivo	Tendência	Profundidade afetada ( $\mu$ m)	Resumo
100NXX	12	T	C	175	Somente quando $\chi_r$ passa a 90° que se percebe efeito (O caráter muda de T $\rightarrow$ C)
	45	T	C	175	
	90	C	C	175	
100RXX	12	-	T	125	Percebe-se que aumentando $\chi_r$ tende-se a reduzir o caráter T ou inverter para C Ocorre inversão de tendência e a profundidade afetada aumenta com o aumento de $\chi_r$
	45	T	$\downarrow$ T	175	
	90	T	C	225	
275NXX	12	C	C	125	Aumentando $\chi_r$ de 12 $\rightarrow$ 45 reduz a C e 45 $\rightarrow$ 90 aumenta a C
	45	C	C	175	
	90	C	T	275	
275RXX	12	T	$\downarrow$ T	125	Aumentando $\chi_r$ de 12 $\rightarrow$ 45 reduz a T e 45 $\rightarrow$ 90 aumenta a T
	45	-	C	125	
	90	T	C	175	

Quadro 5.3 - Resumo - efeito do ângulo de posição da fresa sobre a tensão residual induzida

FONTE: autor, 2019

Observa-se pela Figura 5.24 a) que para os ângulos de posição de 12 e 45° a tensão residual apresenta perfil e intensidades similares até a profundidade de 325 $\mu$ m. Para estes dois ângulos, no ponto mais próximo à superfície, 17 $\mu$ m, a tensão residual é trativa, invertendo para compressiva logo em seguida.

Para o ângulo de posição de 90° a tensão residual apresenta perfil com certa similaridade aos demais somente a partir de 175 $\mu$ m. No ponto mais próximo à superfície, 17 $\mu$ m, apresenta tensão compressiva com intensidade próxima a 70 Mpa. Entre 17 e 125 $\mu$ m observa-se a tendência de a tensão residual aumentar seu caráter compressivo, ocorrendo a partir deste ponto inversão de seu comportamento se estabilizando a partir de 325 $\mu$ m.

Observa-se pela Figura 5.24 c) que quanto ao perfil da tensão residual tem-se que para os três ângulos de posição no ponto mais próximo à superfície, 17 $\mu$ m, este inicia-se com caráter trativo

com maior intensidade para os ângulos de 45 e 90°, sendo que para 12° a tensão residual é praticamente nula. À medida em que se avança a partir da superfície os perfis para 45 e 90° tendem a se tornar compressivos, o que ocorre para 90° em 75 $\mu$ m, seguindo esta tendência até 225 $\mu$ m. Não ocorrendo o mesmo para 45°. Para o ângulo de 12° a tendência é contrária às demais. O perfil se torna mais trativo até 125 $\mu$ m invertendo a tendência e passando à compressivo em 300 $\mu$ m.

Observa-se pela Figura 5.24 b) que quanto ao perfil da tensão residual tem-se que para os três ângulos de posição, no ponto mais próximo à superfície, 17 $\mu$ m, iniciam-se com caráter compressivo com maior intensidade para o ângulo de 12° seguido do de 90° e de 45°. Para os três perfis ocorre a inversão de tendência, entretanto mais tardiamente para o ângulo de 45°, em 175 $\mu$ m, enquanto que para 12 e 90° em 125 e 75 $\mu$ m, respectivamente.

Observa-se pela Figura 5.24 d) que quanto ao perfil da tensão residual tem-se que para os ângulos de posição, 12 e 90° no ponto mais próximo à superfície, 17 $\mu$ m, iniciam-se com caráter trativo com intensidade superior para o de 12°, enquanto que para o ângulo de 45 graus, neste ponto, a tensão residual é praticamente nula. Os três perfis apresentam tendência de se tornar compressíveis, o que ocorre para, 45 e 90°, logo após 17 e 80 $\mu$ m respectivamente. Para 45 e 90° o perfil atinge maior intensidade em compressão na profundidade de 125 e 275 $\mu$ m respectivamente. Enquanto que para 12° isto não ocorre.

#### 5.3.2.2 Efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual induzida

Na Figura 5.25 pode ser observado de forma agrupada o comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço ao longo da profundidade a partir da superfície quando são mantidos constantes o ângulo de posição em 12°, Figura 5.25 a) e d), 45° Figura 5.25 b) e e), 90° Figura 5.25 c) e f) bem como a condição, quanto ao tratamento térmico do aço, normalizado, Figura 5.25 a), b) e c), e recozido, Figura 5.25 d), e) e f) para a velocidade de corte variando em dois níveis, 100 e 275m/min.

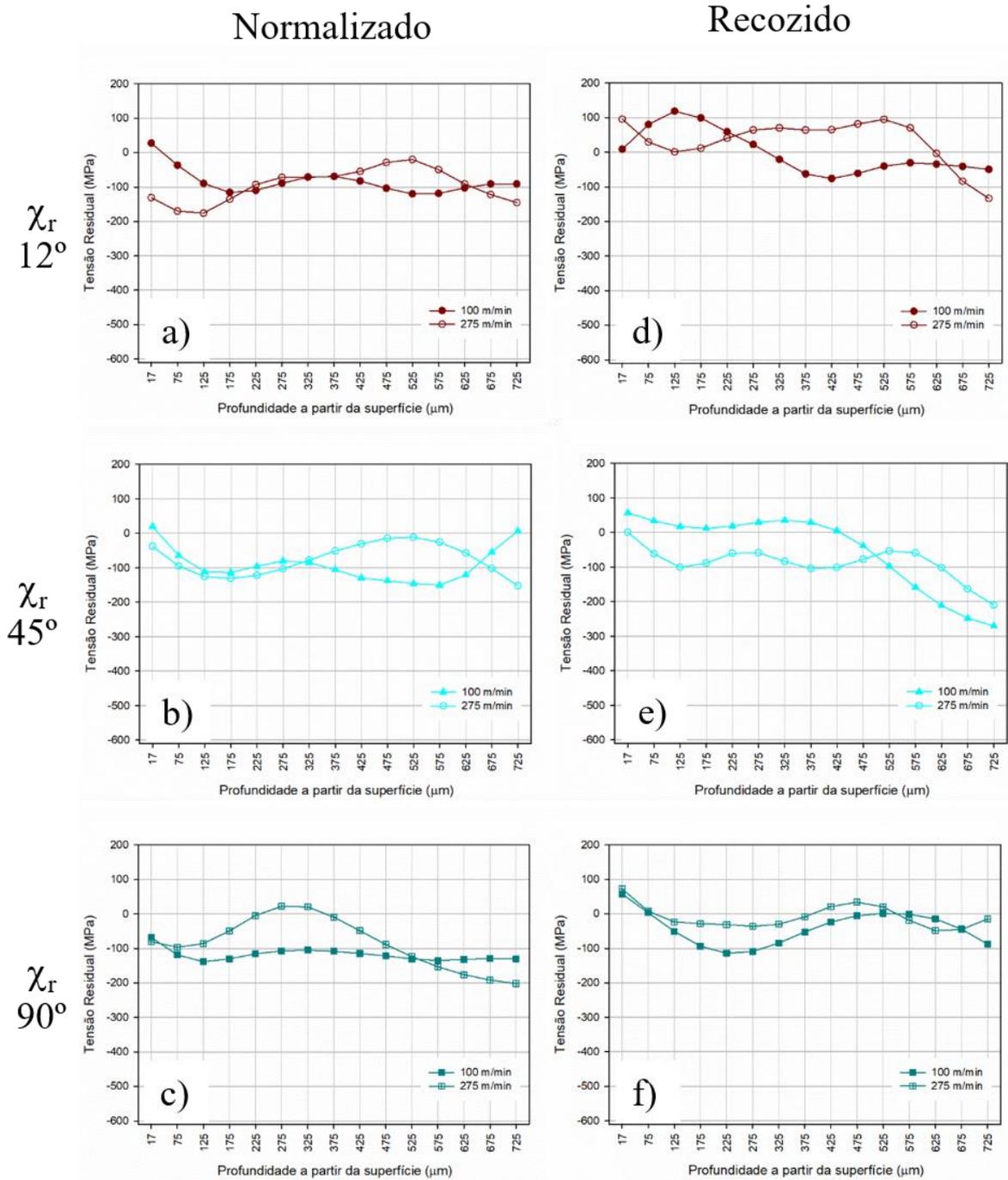


Figura 5.25 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidos o ângulo de posição e a condição quanto ao tratamento térmico do aço, normalizado ou recozido com variação da velocidade de corte em dois níveis.

FONTE: autor, 2019

Pela observação da Figura 5.25 pode-se inferir que para os corpos de prova, tanto na condição normalizado quanto recozido, o aumento da velocidade de corte exerce influência similar na tensão residual quando este é fresado com fresa com ângulo de posição de 12 e 45°, ou seja, tornam o perfil de tensões residuais ao longo da profundidade a partir da superfície mais

compressivo. Para 12°, Figura 5.25 a), mais pronunciado próximo à superfície fresada e 45°, Figura 5.25 b), de forma mais discreta. Quando o corpo de prova é fresado com fresa com ângulo de posição de 90°, Figura 5.25 c), ocorre de forma contrária, visto que para este caso o aumento da velocidade de corte torna o perfil mais trativo ou menos compressivo, Figura 5.25 f). O Quadro 5.4 resume os resultados ora apresentados. O termo profundidade afetada se refere à profundidade a partir da superfície em que conforme a tendência observada alcança-se a maior intensidade de tensão residual de tração ou compressão.

Condição	$V_c$ (m/min)	Caráter na Superfície T - Trativo C - Compressivo	Tendência	Profundidade afetada ( $\mu\text{m}$ )	Resumo
AAAN12	100	T	C	175	Aumento de $V_c$ torna o caráter C
	275	C	C	125	
AAAR12	100	-	T	125	Aumento de $V_c$ reduz o caráter T
	275	T	C	125	
AAAN45	100	T	C	175	Aumento de $V_c$ torna o caráter discretamente mais C
	275	C	C	175	
AAAR45	100	T	↓T	175	Aumento de $V_c$ torna o caráter C
	275	-	C	125	
AAAN90	100	C	C	125	Aumento de $V_c$ faz com que a tendência seja de T e aumenta a profundidade afetada
	275	C	T	275	
AAAR90	100	T	C	225	Aumento de $V_c$ reduz a profundidade afetada
	275	T	C	175	

Quadro 5.4 - Resumo - efeito da velocidade de corte sobre a tensão residual induzida

FONTE: autor, 2019

Observa-se pela Figura 5.25 a) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em seu nível inferior este apresenta inicialmente caráter trativo, enquanto que para seu nível superior, compressivo. Ambos apresentam inicialmente tendência de redução de intensidade, ou seja, para 100m/min tornar-se compressivo e para 275m/min reduzir o caráter compressivo. Atingindo isto, ambas, em 175 e 125 $\mu\text{m}$  para 100 e 275m/min respectivamente, ocorrendo a partir destes pontos inversão desta tendência.

Observa-se pela Figura 5.25 b) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em seu nível inferior este apresenta inicialmente caráter trativo, enquanto que para seu nível superior este apresenta caráter compressivo. Comportamento similar ao apresentado na análise anterior, ângulo de posição de 12°. Ambos apresentam inicialmente tendência de redução de intensidade, ou seja, para 100m/min tornar-se compressivo e para 275m/min aumentar o caráter compressivo. Atingindo isto, ambas, em 175 tanto para 100

quanto para 275m/min. A partir deste ponto ocorre inversão da tendência até 275 $\mu$ m para 100m/min e 525 $\mu$ m para 275m/min.

Observa-se pela Figura 5.25 c) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em ambos os níveis este apresenta inicialmente caráter compressivo, com intensidades muito próximas. Inicialmente estes apresentam mesma tendência, ou seja, tornar-se mais compressivo. Entretanto, para o nível superior ocorre inversão desta tendência já em 75 $\mu$ m chegando a tensões trativas próximo a 275 $\mu$ m. Para o nível inferior atinge-se a menor intensidade de tensão residual compressiva em 325 $\mu$ m ocorrendo a partir deste ponto certa estabilização.

Observa-se pela Figura 5.25 d) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em ambos os níveis este apresenta inicialmente caráter trativo, com maior intensidade para o nível superior da velocidade de corte. Estes apresentam tendência contrária, ou seja, para o nível inferior tornar-se mais trativo enquanto que para seu nível superior o oposto. Para o nível inferior da velocidade de corte a tensão residual de maior intensidade trativa é alcançada em 125 $\mu$ m quando então ocorre inversão da tendência chegando a tensões residuais compressivas próximo a 300 $\mu$ m. Já para o nível superior da velocidade de corte a tensão residual de maior intensidade compressiva é alcançada em 125 $\mu$ m quando então ocorre inversão desta tendência chegando próximo de 0MPa a partir de 525 $\mu$ m.

Observa-se pela Figura 5.25 e) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em seu nível inferior este apresenta inicialmente caráter trativo enquanto que para o nível superior apresenta tensão residual praticamente nula. Ambos apresentam tendência descendente, ou seja, para o nível inferior tornar-se menos trativo e para o nível superior tornar-se compressivo. A menor intensidade de tensão residual trativa é atingida para o nível inferior da velocidade de corte em 175 $\mu$ m enquanto que a maior intensidade de tensão residual compressiva para o nível superior da velocidade de corte é atingida em 125 $\mu$ m. A partir dos dois pontos mencionados ocorre inversão da tendência para os dois níveis da velocidade de corte. Sendo esta nova tendência mantida até 225 $\mu$ m e 325 $\mu$ m para os níveis superior e inferior da velocidade de corte respectivamente.

Observa-se pela Figura 5.25 f) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para a velocidade de corte em ambos os níveis este apresenta inicialmente caráter trativo, ambos com

intensidade semelhante e com tendência de redução desta intensidade, tornando-se compressivo logo após os 75 $\mu$ m. A tensão residual correspondente a ambos os níveis atinge maior caráter compressivo em 225 $\mu$ m, entretanto com maior intensidade para o nível inferior da velocidade de corte. Ocorrendo a partir deste ponto inversão da tendência chegando a tensões residuais próximas de 0MPa em 375 e 525 $\mu$ m para os níveis da velocidade de corte superior e inferior respectivamente.

### 5.3.2.3 Efeito da condição quanto ao tratamento térmico, normalizado ou recozido, sobre a tensão residual induzida

Na Figura 5.26 pode ser observado de forma agrupada o comportamento da tensão residual perpendicular à direção de avanço ao longo da profundidade a partir da superfície quando são mantidos constantes o ângulo de posição em 12°, Figura 5.26 a) e d), 45° Figura 5.26 b) e e), 90° Figura 5.26 c) e f), bem como a velocidade de corte em 100m/min, Figura 5.26 a), b) e c), e 275m/min, Figura 5.26 d), e) e f) para a condição quanto a tratamento térmico variando nos dois níveis, recozido e normalizado.

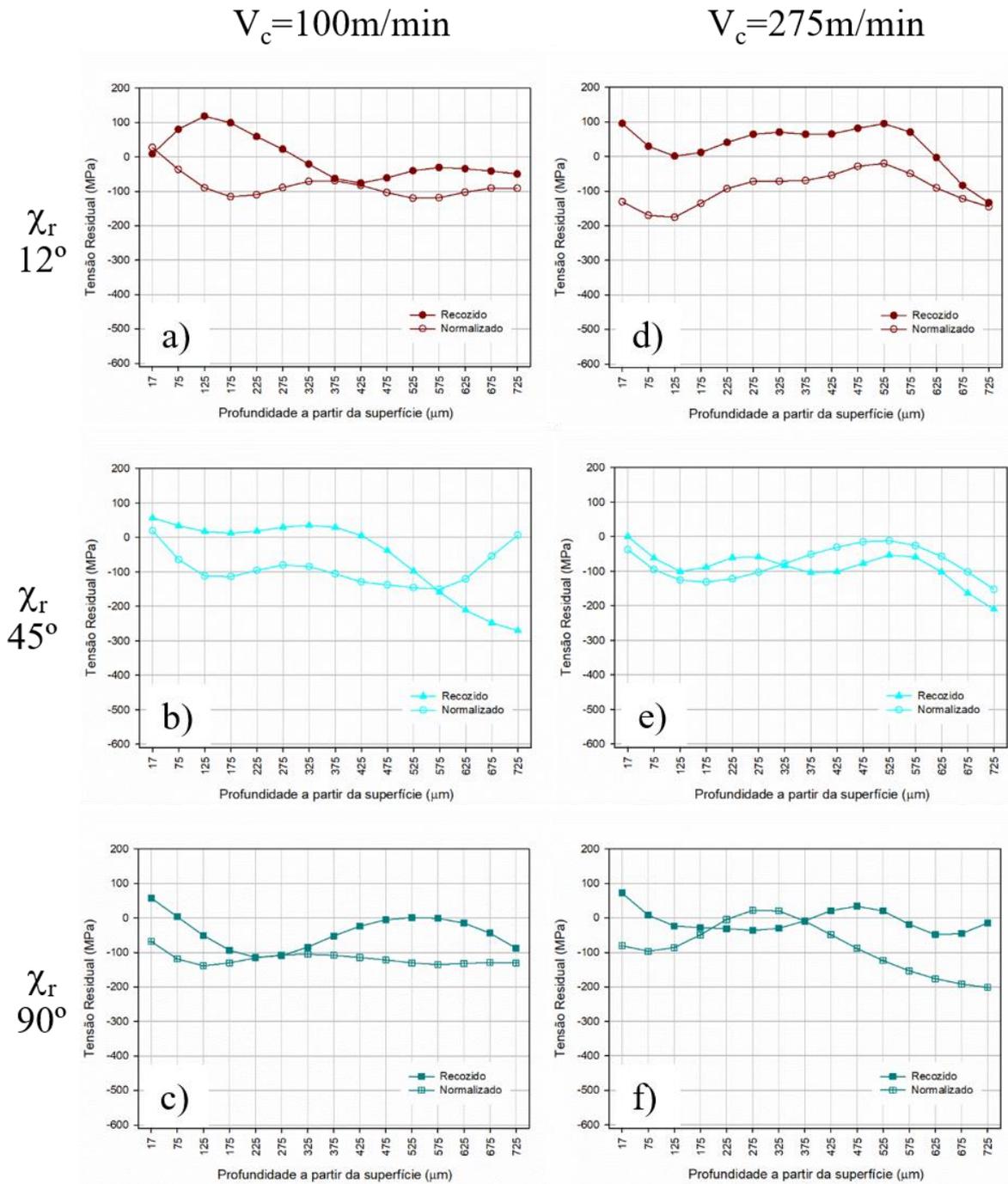


Figura 5.26 - Resumo dos perfis de tensão residual para as condições onde são mantidos o ângulo de posição e a velocidade de corte com variação da condição quanto ao tratamento térmico do aço em dois níveis.

FONTE: autor, 2019

Pela observação da Figura 5.26 pode-se inferir que para os corpos de prova, tanto para a velocidade de corte em seu nível inferior quanto superior, a condição quanto ao tratamento térmico exerce influência similar na tensão residual quando este é fresado com fresa com ângulo de posição de 12, 45 e 90°, ou seja, a condição normalizada torna o caráter e o perfil de tensões

residuais ao longo da profundidade a partir da superfície compressivo. Quanto a tendência, apenas as condições 100R12 e 275N90 apresentam comportamento distinto das demais, tornar-se trativas. A menor diferença entre as tensões residuais para as duas condições, recozida e normalizada, é observada na condição 275B45, Figura 5.26 b), e a maior na 275B12, Figura 5.26 d). O Quadro 5.5 resume os resultados ora apresentados. O termo profundidade afetada se refere à profundidade a partir da superfície em que conforme a tendência observada alcança-se a maior intensidade de tensão residual de tração ou compressão.

Condição	Tratamento Térmico N - Normalizado R - Recozido	Caráter na Superfície T - Trativo C - Compressivo	Tendência	Profundidade afetada ( $\mu\text{m}$ )	Resumo
100B12	N	T	C	175	A variação de R→N faz com que a tendência se torne C
	R	-	T	125	
100B45	N	T	C	175	A variação de R→N faz com que o caráter se torne C
	R	T	↓T	175	
100B90	N	C	↑C	125	A variação de R→N faz com que o caráter se torne C e aumenta a profundidade afeta
	R	T	C	225	
275B12	N	C	↑C	125	A variação de R→N faz com que o caráter se torne C
	R	T	↓T	125	
275B45	N	C	↑C	175	A variação de R→N produz efeito muito discreto, sendo o caráter do normalizado mais C
	R	-	C	125	
275B90	N	C	T	275	A variação de R→N faz com que o caráter se torne C, porém com tendência a T
	R	T	C	225	

Quadro 5.5 - Resumo - efeito da condição quanto a tratamento térmico, recozido ou normalizado, sobre a tensão residual induzida

FONTE: autor, 2019

Observa-se pela Figura 5.26 a) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para ambos os níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente caráter trativo, com intensidade levemente superior para normalizado. Estes apresentam tendência contrária, ou seja, para recozido tornar-se mais trativo enquanto que para o normalizado o oposto. Para o recozido a tensão residual de maior intensidade trativa é alcançada em 125 $\mu\text{m}$  quando então ocorre inversão da tendência chegando a tensões residuais compressivas próximo a 300 $\mu\text{m}$ . Já para o nível superior da velocidade de corte a tensão residual de maior intensidade compressiva é alcançada em 175 $\mu\text{m}$  quando então ocorre inversão desta tendência.

Observa-se pela Figura 5.26 b) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para ambos os níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente caráter trativo, com

intensidade levemente superior para recozido. Estes apresentam tendência similar, ou seja, para recozido tornar-se menos trativo e o normalizado compressivo. Para o recozido a tensão residual de menor intensidade trativa é alcançada em  $175\mu\text{m}$  quando então ocorre inversão da tendência. Já para o normalizado a tensão residual de maior intensidade compressiva é alcançada em  $175\mu\text{m}$  quando então ocorre inversão desta tendência.

Observa-se pela Figura 5.26 c) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para os dois níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente caracteres opostos e mesma tendência. Para o recozido se tornar menos compressivo e o normalizado mais compressivo. A partir de  $75\mu\text{m}$  a condição recozida torna-se compressiva com maior intensidade em  $225\mu\text{m}$ . A partir de então ocorre inversão desta tendência se estabilizando próximo de  $0\text{MPa}$  em  $525\mu\text{m}$ . Para a condição normalizado cuja tendência é de se tornar menos compressivo alcança-se a tensão residual de menor intensidade compressiva em  $125\mu\text{m}$  quando a partir deste ponto ocorre inversão de tendência.

Observa-se pela Figura 5.26 d) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para os dois níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente caracteres opostos, entretanto apenas quanto a se trativo ou compressivo visto que ambos apresentam a mesma tendência. Para a condição recozido, inicialmente trativo, a tendência é de se tornar menos trativo, chegando a esta condição em  $125\mu\text{m}$ , quando a partir de então ocorre inversão desta tendência. Para a condição normalizado, este apresenta-se inicialmente compressivo com tendência a se tornar mais compressivo ainda, o que ocorre em  $125\mu\text{m}$  e a partir de então ocorre inversão desta tendência.

Observa-se pela Figura 5.26 e) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para os dois níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente mesma tendência, tornar-se compressivo o recozido e aumentar a intensidade em compressão o normalizado. Porém quanto ao caráter da tensão residual, a condição recozida apresenta tensão praticamente nula no ponto mais próximo à superfície,  $17\mu\text{m}$ , enquanto que para a condição normalizada este apresenta caráter compressivo. Ambas as condições alcançam as tensões de maior intensidade compressiva em  $125\mu\text{m}$  e  $175\mu\text{m}$ , recozido e normalizado respectivamente. Imediatamente após esta região ocorre inversão de tendência.

Observa-se pela Figura 5.26 f) que quanto ao perfil da tensão residual, tem-se que para os dois níveis quanto a tratamento térmico este apresenta inicialmente mesma tendência, tornar-se

compressivo o recozido e aumentar a intensidade em compressão o normalizado. Porém quanto ao caráter, trativo ou compressivo, a condição recozida é trativa enquanto que a normalizada compressiva. Ambas as condições alcançam as tensões de maior intensidade compressiva em  $275\mu\text{m}$  e  $75\mu\text{m}$ , recozido e normalizado respectivamente. Imediatamente após esta região ocorre inversão de tendência. Na condição normalizada são alcançadas tensões residuais trativas entre  $275$  e  $325\mu\text{m}$ . Na condição recozida volta-se a ter tensões residuais trativas em  $425\mu\text{m}$ .

## 6 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão descritas as conclusões observadas neste trabalho cujo objetivo foi estudar o efeito dos parâmetros de usinagem, velocidade de corte e ângulo de posição da fresa, e da condição do material quanto ao tratamento térmico, recozido ou normalizado, sobre a tensão residual induzida na superfície obtida pela operação de fresamento de faceamento do aço ABNT 4340.

- Quanto a caracterização do Aço ABNT 4340 nas condições recozido e normalizado

Os ensaios de tração, metalográficos, dureza e análise química retornaram valores típicos para o aço ABNT 4340 nas condições de recozido e normalizado atestando assim sua conformidade.

- Quanto à rugosidade da superfície gerada pela operação de fresamento

Os valores encontrados para o desvio médio aritmético ( $R_a$ ) para a superfície obtida pela operação de fresamento em todas as condições ensaiadas foi menor que  $2,5\mu\text{m}$  assegurando assim as condições mínimas necessárias para afixação das rosetas de extensômetros utilizadas na medição das deformações aliviadas e com estas, determinação das tensões residuais induzidas na superfície.

- Efeito da velocidade de corte

A variação da velocidade de corte exerceu efeito sobre a tensão residual. Com o aumento da velocidade de corte o caráter da tensão residual se tornou compressivo ou menos trativo. Isto pode ser percebido tanto na análise quantitativa quanto qualitativa.

Na análise de variância a velocidade de corte se mostrou significativa ao nível de confiança de 95% tanto isoladamente quanto na interação de segunda ordem com o tratamento térmico e na terceira ordem com o tratamento térmico e com o ângulo de posição.

- Efeito do ângulo de posição

Na análise qualitativa a variação do ângulo de posição exerceu efeito discreto sobre o caráter trativo ou compressivo da tensão residual. Já na análise quantitativa foi observado efeito mais pronunciado.

Na análise de variância o ângulo de posição não se mostrou significativo ao nível de confiança de 95% de forma isolada, entretanto foi significativo na interação de segunda ordem com o tratamento térmico e na de terceira ordem com o tratamento térmico e a velocidade de corte.

- Efeito da condição do material quanto ao tratamento térmico, recozido ou normalizado

A variação da condição do material quanto ao tratamento térmico de recozido para normalizado exerceu o efeito de tornar o caráter da tensão residual compressivo.

Na análise de variância se mostrou significativo ao nível de confiança de 95% tanto isoladamente quanto na interação de segunda ordem com a velocidade de corte e na terceira ordem com a velocidade de corte e com o ângulo de posição.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível observar grande distinção entre os resultados de cada uma das três réplicas o que resultou em desvio padrão alto. Isto refletiu na análise de variância que retornou valores de R2 baixos e condições no limite para o teste de normalidade.

De maneira geral o efeito dos fatores velocidade de corte e tratamento térmico se mostraram em linha com a literatura disponível, ou seja, materiais com maior resistência mecânica tendem a apresentar tensões residuais trativas de menor intensidade ou de compressão.

Durante a realização desta pesquisa não foram encontrados trabalhos relacionados ao efeito do fator ângulo de posição sobre a tensão residual induzida, a exceção do trabalho realizado por Pereira, (2016) em que realizou alguns testes variando-se o ângulo de posição no fresamento do aço ABNT 4340 recozido, entretanto não sendo o objetivo principal do trabalho.

O método de medição de tensões residuais utilizado, furo central, apesar de ser normatizado e aplicado desde longa data se mostra muito sensível a variáveis operacionais, o que pode de certa forma ter contribuído para a distinção entre os resultados de cada réplica para uma mesma condição.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as limitações dos resultados aqui apresentados e discutidos aos parâmetros ora estudados sugere-se alguns possíveis trabalhos tendo como objetivo a continuidade desta pesquisa.

- Realizar estudo com um maior número de réplicas e variando-se o fator ângulo de posição em mais níveis a fim confirmar se de fato este fator exerce efeito discreto sobre a tensão residual induzida na superfície fresada.
- Realizar estudo com o aço ABNT 4340 no estado temperado com variação de dureza em três níveis a fim de se observar o efeito da dureza e microestrutura na tensão residual induzida na superfície fresada.
- Realizar estudo comparativo entre os métodos de medição de tensão residual, furo central e difração de raio X, para os corpos de prova utilizados neste trabalho na profundidade de 17 $\mu$ m com fim de verificar se as conclusões quanto ao efeito de cada fator aqui estudo, para esta profundidade, se confirmam.
- Realizar ensaio de fadiga em corpos de prova fresados nas condições aqui aplicadas com fim de verificar se de fato os que apresentam tensões residuais menos trativas ou compressivas obtém melhor desempenho.

## 9 ABSTRACT

Among the various manufacturing processes, it is worth mentioning the machining. Among its operations is the milling, which, in turn, as well as the others, confers characteristics to the surface generated that influence the performance of the component or workpiece. One of these characteristics is the process-induced residual stress. Depending on its character, tractive or compressive, intensity and depth affected, it can be beneficial or deleterious. This work investigated the effect of the parameters, cutting speed, edge angle and material condition (ABNT 4340 steel) obtained by annealing and normalizing heat treatments on surface induced residual stress. For this, a 2x3x2 factorial design with three replicates was performed. The characterization of the ABNT 4340 steel was carried out by tensile test, chemical analysis and metallographic test. Thirty-six test specimens were prepared in the dimensions of 75x60x27mm (18 were annealed and 18 were normalized). They were previously milled in order to give them compatible dimensions to the dynamometer that was used to obtain the machining force and its components. The milling tests were performed according to the factorial design. The residual stresses obtained by the central hole method. The results obtained were organized and analyzed on the qualitative aspects, profile along the depth, and quantitative, residual stress at the point closest to the surface, 17 $\mu$ m. The results indicated that the increased cutting speed caused the residual stress induced on the surface to be compressive or less tractive. The variation of the edge angle exerted a discrete effect on the residual stress. The milled material in the normalized condition presented residual compressive stresses while in the annealed condition, tractive one. In order to evaluate the quantitative aspect, a variance analysis was performed for the residual stress induced in the depth of 17 $\mu$ m. The analysis of variance returned that the data follow a normal distribution and that the cutting speed and heat treatment were shown to be significant at the 95% confidence level both in isolation and in second order interactions, cutting speed with heat treatment and heat treatment with edge angle and third order, cutting speed, position angle and heat treatment. High standard deviation was observed between the replicates for the residual stress profiles for all conditions studied.

Key words: milling, residual stress, edge angle, hole drilling method, 4340,

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT 513, N. Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas - Designação dos grupos principais e grupos de aplicação Rio de Janeiro Abnt, , 2015.

ABNT 6892-1, N. Materiais metálicos - Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, Abnt, 2018.

ANAZAWA, R. . et al. Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300m após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. Faculdade de Engenharia -Universidade Estadual Paulista- FEG/UNESP, Guaratinguetá – SP, p. 11, 2012.

ANDEROGLU, O. Residual stress measurement using X-ray diffraction. Texas A&M University, 2005.

ASTM E837, S. Determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method ASTM, , 2013.

BARROS NETO, B. DE; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Como fazer experimentos. Porto Alegre: Artmed Editora SA, 2010.

BIRÓ, I.; CZAMPA, M.; SZALAY, T. Experimental model for the main cutting force in face milling of a high strength structural steel. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, v. 59, n. 1, p. 16–22, 2015.

BRINKSMEIER, E. State-of-the-art of non-destructive measurement of sub-surface material properties and damages. PRECISION ENGINEERING, v. 11, n. 4, p. 211–224, 1989.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 1996.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderurgicos comuns. São Paulo: Edgard, Blücher, 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 8ª ed. São Paulo: Artliber, 2013.

EL-KHABEERY, M. M.; FATTOUH, M. Residual stress distribution caused by milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 29(3), p. 339–401, 1989.

FERREIRA, J. H. Q. Análise química por expectrometria ótica - Relatório N° 140048/2018. Itaúna, 2018.

FREITAS, B. M. DE et al. Comparativo Da Microestrutura E Da Microdureza No Aço 4340 a Diferentes Tempos De Recozimento. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, n. 2008, p. 6, 2016.

GRANT, P. V; LORD, J. D.; WHITEHEAD, P. The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique. *Measurement Good Practice Guide*, v. 53, n. 2, p. 63, 2006.

HENRIKSEN, E. K. Residual Stresses in Machined Surfaces. *American Society of Mechanical Engineers*, v. 73, n. 1, p. 69–76, 1951.

HUANG, Q.; XIN, J. J. Surface Intergity and Its Effects on the Fatigue Life on Nickel Based Superalloy GH33A. *Int. J. Fatigue*, v. 13, n. 4, p. 4, 1991.

HUANG, X.; ZHANG, X.; DING, H. An analytical model of residual stress for flank milling of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*, v. 31, p. 287–292, 2015.

JACOBSON, M. Surface Integrity of Hard-Turned M50 Steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 216, n. 1, p. 47–54, 2002.

JANG, D. . et al. Surface Residual Stresses in Machined Austenitic Stainless Steel. *Wear*, v. 194, n. 1–2, p. 168–173, 1996.

JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, v. 30, n. 10–11, p. 2050–2055, 2008.

JIANG, X. et al. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 68, n. 1–4, p. 175–186, 2013.

KLOOS, E. Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen. *Z. Werkstofftech*, v. 10, p. 293–332, 1979.

KWONG, J.; AXINTE, D. A.; WITHERS, P. J. The sensitivity of Ni-based superalloy to hole making operations: Influence of process parameters on subsurface damage and residual stress. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 8, p. 3968–3977, 2009.

LIU, C. R.; BARASH, M. M. Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process Part 1: Cutting with a Sharp Tool. *Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME*, v. 98 Ser B, n. 4, p. 1192–1201, 1976.

LIU, C. R.; BARASH, M. M. Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface. *Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME*, v. 104, n. 3, p. 257–264, 1982.

LIU, M.; TAKAGI, J.; 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*, v. 150, p. 234–241, 1 jul. 2004.

LU, J. *Handbook of measurement of residual stresses*. Lilburn, GA: Prentice Hall PTR, 1996.

M'SAOUBI, R. et al. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. . v. 96, p. 225-233, 1999

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MANTLE, A. L.; ASPINWALL, D. K. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 118, n. 1–3, p. 143–150, 2001.

MATSUMOTO, Y.; BARASH, M. M.; LIU, C. R. Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel. *Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME*, v. 108, n. 3, p. 169–175, 1986.

MATSUMOTO, Y.; HASHIMOTO, F.; LAHOTI, G. Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 48, n. 1, p. 59–62, 1999.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NAVAS, V. G.; GONZALO, O.; BENGOETXEA, I. Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 61, p. 48–57, 2012.

OUTEIRO, J. C. et al. Machining residual stresses in aisi 316l steel and their correlation with the cutting parameters. *Machining Science and Technology*, v. 6, n. 2, p. 251–270, 9 out. 2002.

PEREIRA, J. C. C. Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento dos aços ABNT 1010 e ABNT 4340. [s.l.] UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

PEREIRA, N. F. S. Análise comparativa do desempenho de brocas de aço rápido AISI M2 revestidas com SiO<sub>2</sub> pelo processo de SOL-GEL na furação do ferro fundido nodular - Dissertação de Mestrado. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

RUZHONG, Z.; WANG, K. K.; MERCHANT, E. Modelling of Cutting Force Pulsation in Face-Milling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 32, n. 1, p. 21–26, 1983.

SADAT, A. B.; BAILEY, J. A. Residual Stresses in Turned AISI 4340 Steel. *Experimental Mechanics*, v. 27, n. 1, p. 80–85, 1987a.

SADAT, A. B.; BAILEY, J. A. Residual stresses in turned AISI 4340 steel. *Experimental Mechanics*, v. 27, n. 1, p. 80–85, 1987b.

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 and Manufacture*, v. 45, n. 2, p. 131–136, 2005.

SCHAJER, G. S. *Practical Residual Stress Measurement Methods*. 2013. ed. Columbia: Wiley e Sons, 2013.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte II*. 2. ed. Santa Catarina: Ed. da UFSC, 1995.

SU, J. C. *Residual Stress Modeling in Machining Processes*. PhD Thesis in Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, n. December, p. 186, 2006.

SUN, J.; GUO, Y. B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 8, p. 4036–4042, 2009.

TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Novelty ed. Ohio: ASM International, 2002.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. 4<sup>a</sup> ed. Woburn: Butterworth–Heinemann, 2000.

ULUTAN, D.; ÖZEL, T. Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations. [s.l: s.n.]. v. 61

VISHAY PRECISION GROUP. *Instruction Bulletin B-129-8: Surface Preparation for Strain Gage Bonding*. n. 11129, p. 1–7, 2011.

VISHAY PRECISION GROUP. *Residual Stress Patterns Special Use Sensors - Residual Stress Strain Gages* Vishay Precision Group. 2015.

WAN, M. et al. Modeling of machining-induced residual stresses. *Journal of Materials Science*, v. 54, n. 1, p. 1–35, 2019.

XIE, Q. et al. Study on Residual Stresses and Tool Wear Induced by the Machining Process. . in *NAMRC XVII*, v. *SSME*, 1989.

ZHANG, S.; DING, T. C.; LI, J. F. Determination of surface and in-depth residual stress distributions induced by hard milling of H13 steel. *Production Engineering*, v. 6, n. 4–5, p. 375–383, 2012.

# 11 ANEXOS E APÊNDICES

## Anexo 11.A - Relatório de análise química - página 1/2



**SENAI FIEMG**

**Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT**  
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE  
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

**Análise Química por Espectrometria Óptica - Base Ferro**  
 Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

**Relatório / Report nº 14049/2018**

Ensaio NBR ISO/IEC 17025  
 CRL 0126

**Solicitante / Requester:** Alexandre Mendes Abrão  
**Endereço / Address:** EE.UFGM - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG  
**Material / Material:** Amostra para análise  
**Identificação do Cliente / Identification by customer:** Material: ABNT 4340 - Recozido - Amostra única

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Carbono (C)	0,3941	%
Silício (Si)	0,2355	%
Manganês (Mn)	0,7258	%
Fósforo (P)	0,0171	%
Enxofre (S)	0,0115	%
Cromo (Cr)	0,7944	%
Molibdênio (Mo)	0,2417	%
Níquel (Ni)	1,7107	%
Alumínio (Al Total)	0,0249	%
Cobalto (Co)	0,0177	%
Cobre (Cu)	0,1187	%
Nióbio (Nb)	ND	%
Titânio (Ti)	0,0019	%
Vanádio (V)	0,0201	%
Tungstênio (W)	0,0160	%

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Chumbo (Pb)	0,0010	%
Estanho (Sn)	0,0054	%
Arsênio (As)	0,0070	%
Zircônio (Zr)	0,0015	%
Bismuto (Bi)	ND	%
Cálcio (Ca)	0,0002	%
Cério (Ce)	ND	%
Antimônio (Sb)	ND	%
Selênio (Se)	ND	%
Tântalo (Ta)	ND	%
Boro (B)	0,0003	%
Zinco (Zn)	0,0004	%
Lantânio (La)	ND	%
Nitrogênio (N)	0,0107	%
Ferro (Fe) Balanço	95,6300	%

**Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação**  
*This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.*

Informações / <i>Informations:</i>
* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / <i>Maximum Temperature of laboratory: 28°C.</i>
<b>Procedimento / Método / <i>Procedure / Method:</i></b>
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 10 / <i>Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 10.</i>
* Normas: ASTM E 415:2014, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014 / <i>Standards: ASTM E 415:2014, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.</i>
Observações / <i>Observations:</i>
<b>O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / <i>The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.</i></b>
<b>* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / <i>Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.</i></b>



## Relatório / Report nº 14049/2018

**Equipamento utilizado / Equipment used:**  
 \* **Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.**  
**Equipamentos / Instruments / Equipment / Instruments:**  
 \* **Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante /**  
*Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.*

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento Element	+/- U 95% / Uncertainty	Fator de Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom V eff
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,678
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

\* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

**Recepção / Reception** 17/12/18

**Analista**  
Analyst

**Responsável**  
Responsible

**Realização / Achievement** 18/12/18

Jorge Henrique Queiroz Ferreira  
Laboratorista Técnico

**Emissão / Emission** 18/12/18

Patrícia Resende  
Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR

**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D**

*Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D*

**SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270  
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2

Anexo 11.C - Tabela resultados de saída do software *H-drill*

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Integral Method

275R90-CP31

Rosette type = 062 UM Rosette mean diameter = 5.13 mm  
 Young's modulus = 192.0 GPa Hole diameter = 1.600 mm  
 Poisson's ratio = 0.300 Stress depth limit = 1.03 mm  
 Yield stress = 470 MPa

Std strain err (auto) = 0.4 ue

Rms strain misfit = 0.4 ue &lt;-- satisfactory

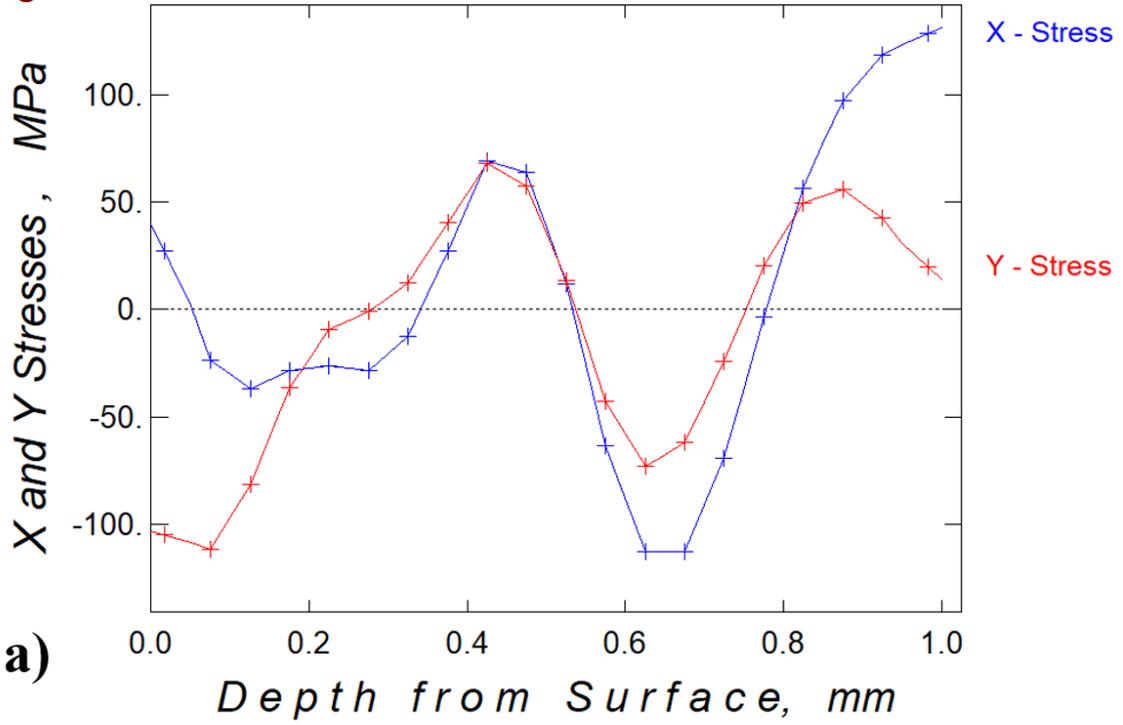
beta=angle Smax clockwise from gage 1

Depth mm	--- STRAINS ---			90% prob. bound	----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 ue		Smax MPa	Smin MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0								
0.017					50	-128	89	21	27	-105	-60
0.050	-3	-3	2								
0.075					-11	-125	57	20	-24	-112	-36
0.100	-2	-1	10								
0.125					-33	-85	26	15	-37	-81	-13
0.150	-1	0	14								
0.175					-27	-37	5	-20	-28	-36	3
0.200	-1	1	16								
0.225					-6	-30	12	-67	-26	-9	9
0.250	0	2	17								
0.275					0	-29	15	-79	-28	-1	5
0.300	1	3	19								
0.325					12	-13	13	88	-13	12	-1
0.350	3	4	19								
0.375					44	24	10	65	27	40	-8
0.400	4	4	20								
0.425					79	58	11	44	69	68	-11
0.450	1	0	17								
0.475					73	48	12	37	64	57	-12
0.500	-1	-2	17								
0.525					27	-2	14	47	12	14	-14
0.550	-3	-4	16								
0.575					-30	-75	22	59	-63	-42	-20
0.600	-1	-4	17								
0.625					-62	-124	31	65	-113	-73	-24
0.650	2	-3	19								
0.675					-54	-120	33	70	-112	-62	-22
0.700	5	-3	19								
0.725					-20	-73	26	74	-69	-24	-14
0.750	8	-2	20								
0.775					21	-4	12	86	-4	21	-2
0.800	9	-3	19								
0.825					63	44	9	-34	57	50	9
0.850	8	-3	19								
0.875					100	52	24	-15	97	56	12

Anexo 11.D - Gráficos de saída do software H-drill, a) tensão // $V_f$  (Y-Stress) e # $V_f$  (X-Stress); b) TPMA e TPMI

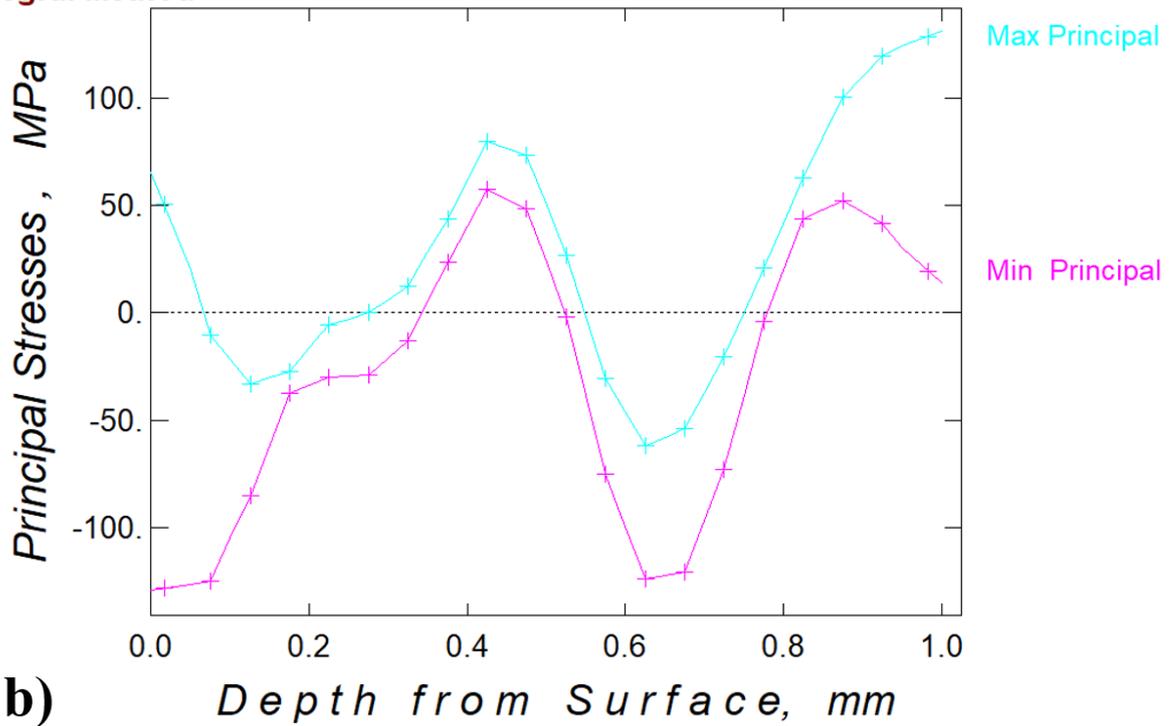
**Integral Method**

275R90-CP31



**Integral Method**

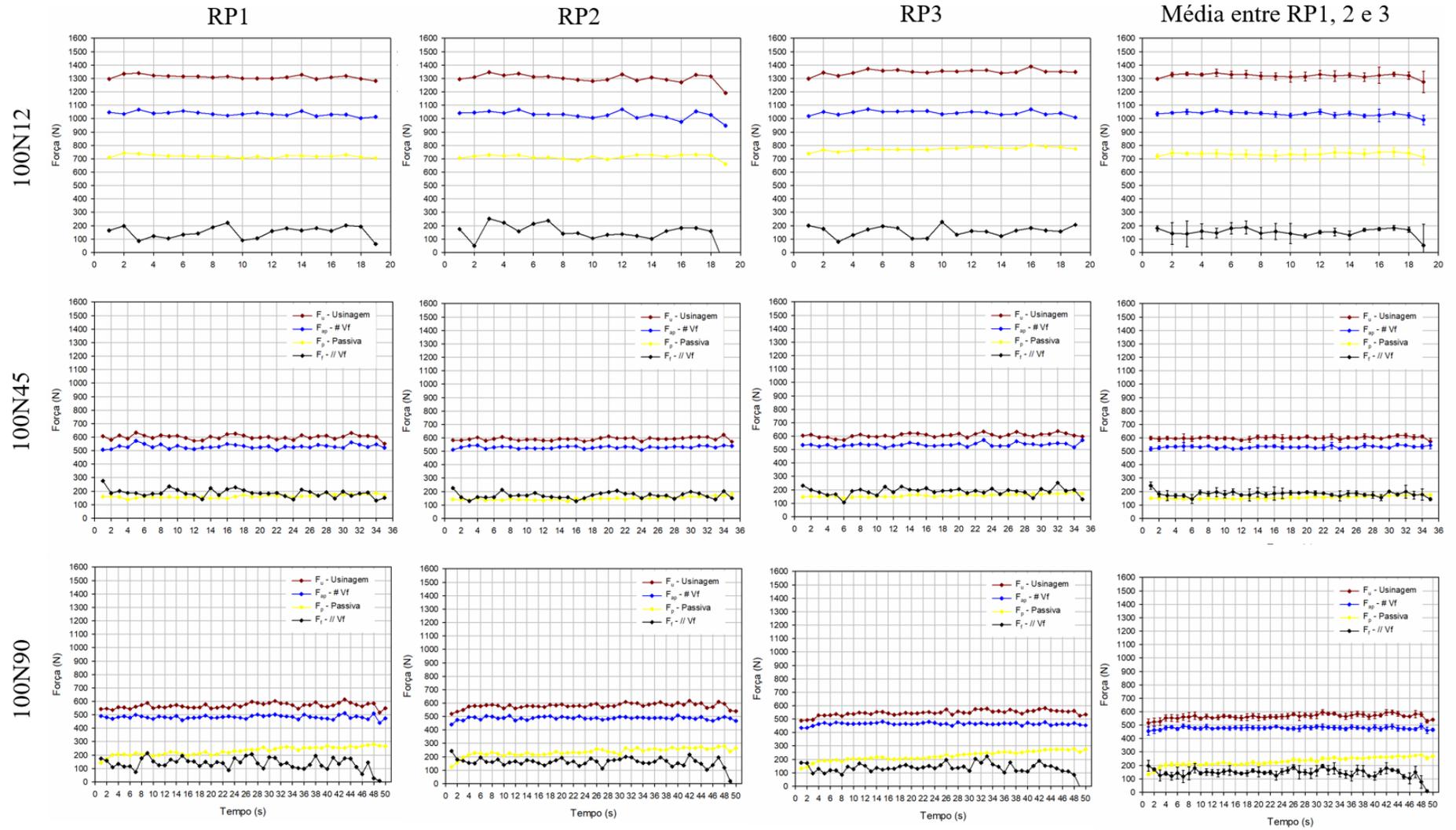
275R90-CP31



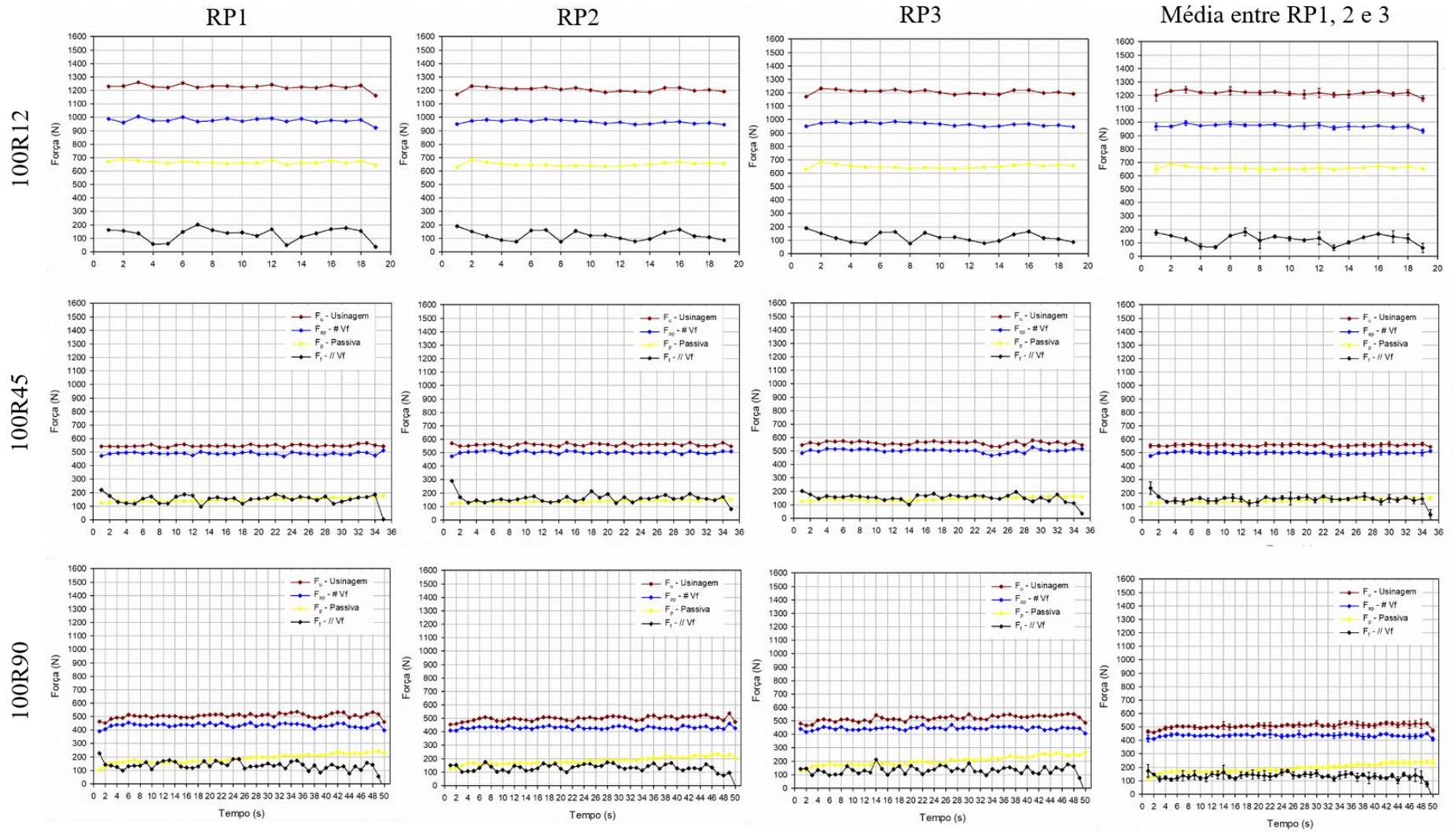
Apêndice 11.A Tabela organização dos ensaios de fresamento

Código	Velocidade de corte (m/min)	Tratamento Térmico	Ângulo de Posição (°)	Sequência de ensaio	N° do Corpo de Prova	N° Replica
100N12	100	Normalizado	12	16	1	1
100N12	100	Normalizado	12	33	7	2
100N12	100	Normalizado	12	6	13	3
100N45	100	Normalizado	45	25	2	1
100N45	100	Normalizado	45	12	8	2
100N45	100	Normalizado	45	22	14	3
100N90	100	Normalizado	90	27	3	1
100N90	100	Normalizado	90	7	9	2
100N90	100	Normalizado	90	34	15	3
100R12	100	Recozido	12	32	20	1
100R12	100	Recozido	12	2	26	2
100R12	100	Recozido	12	36	32	3
100R45	100	Recozido	45	5	21	1
100R45	100	Recozido	45	10	33	2
100R45	100	Recozido	45	19	38	3
100R90	100	Recozido	90	14	22	1
100R90	100	Recozido	90	17	28	2
100R90	100	Recozido	90	23	34	3
275N12	275	Normalizado	12	26	4	1
275N12	275	Normalizado	12	30	10	2
275N12	275	Normalizado	12	18	16	3
275N45	275	Normalizado	45	29	5	1
275N45	275	Normalizado	45	3	12	2
275N45	275	Normalizado	45	28	17	3
275N90	275	Normalizado	90	8	6	1
275N90	275	Normalizado	90	4	11	2
275N90	275	Normalizado	90	20	18	3
275R12	275	Recozido	12	1	23	1
275R12	275	Recozido	12	15	29	2
275R12	275	Recozido	12	9	35	3
275R45	275	Recozido	45	13	24	1
275R45	275	Recozido	45	35	30	2
275R45	275	Recozido	45	11	36	3
275R90	275	Recozido	90	24	31	1
275R90	275	Recozido	90	31	37	2
275R90	275	Recozido	90	21	39	3

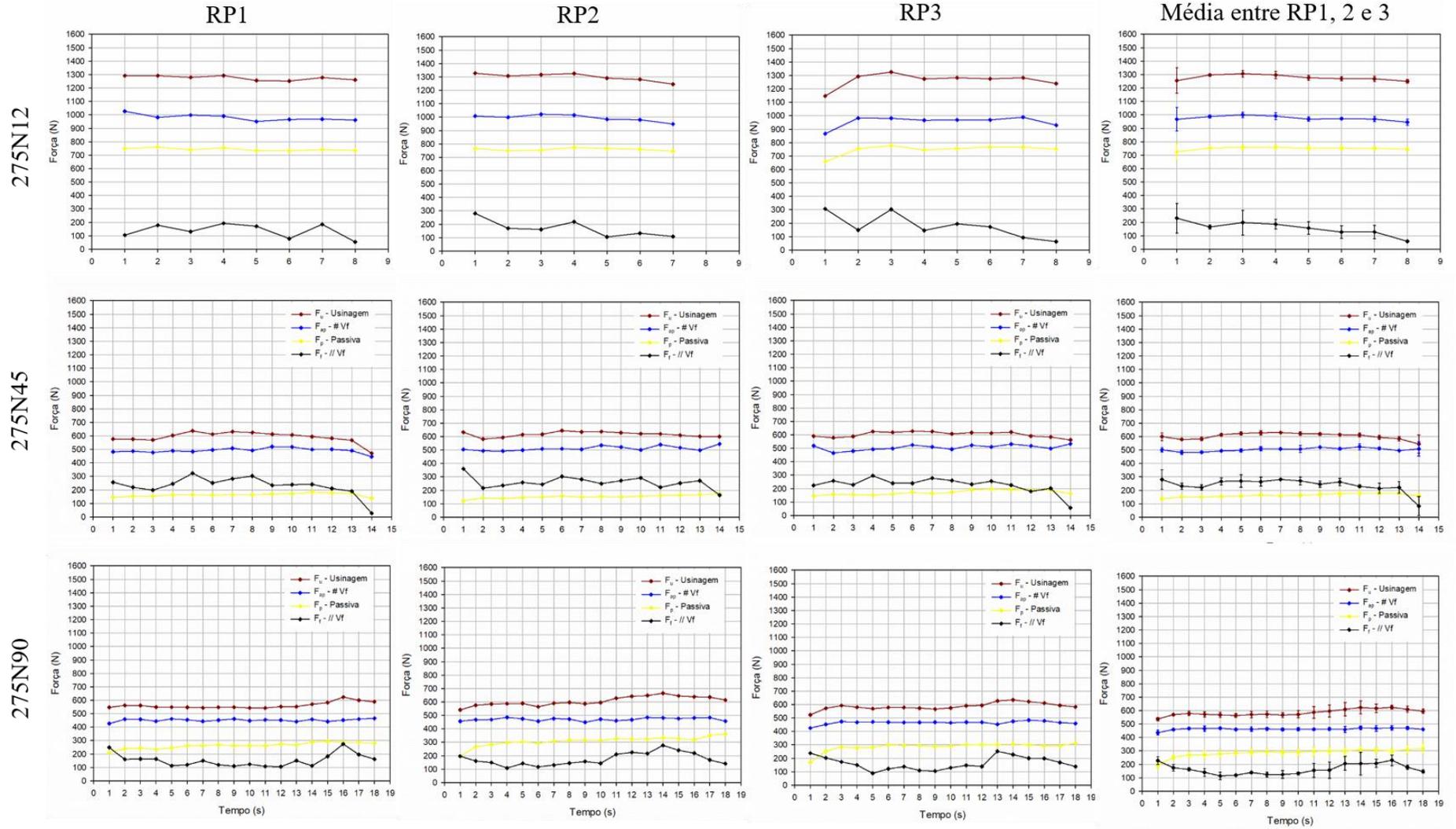
Apêndice 11.B - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 100NXX



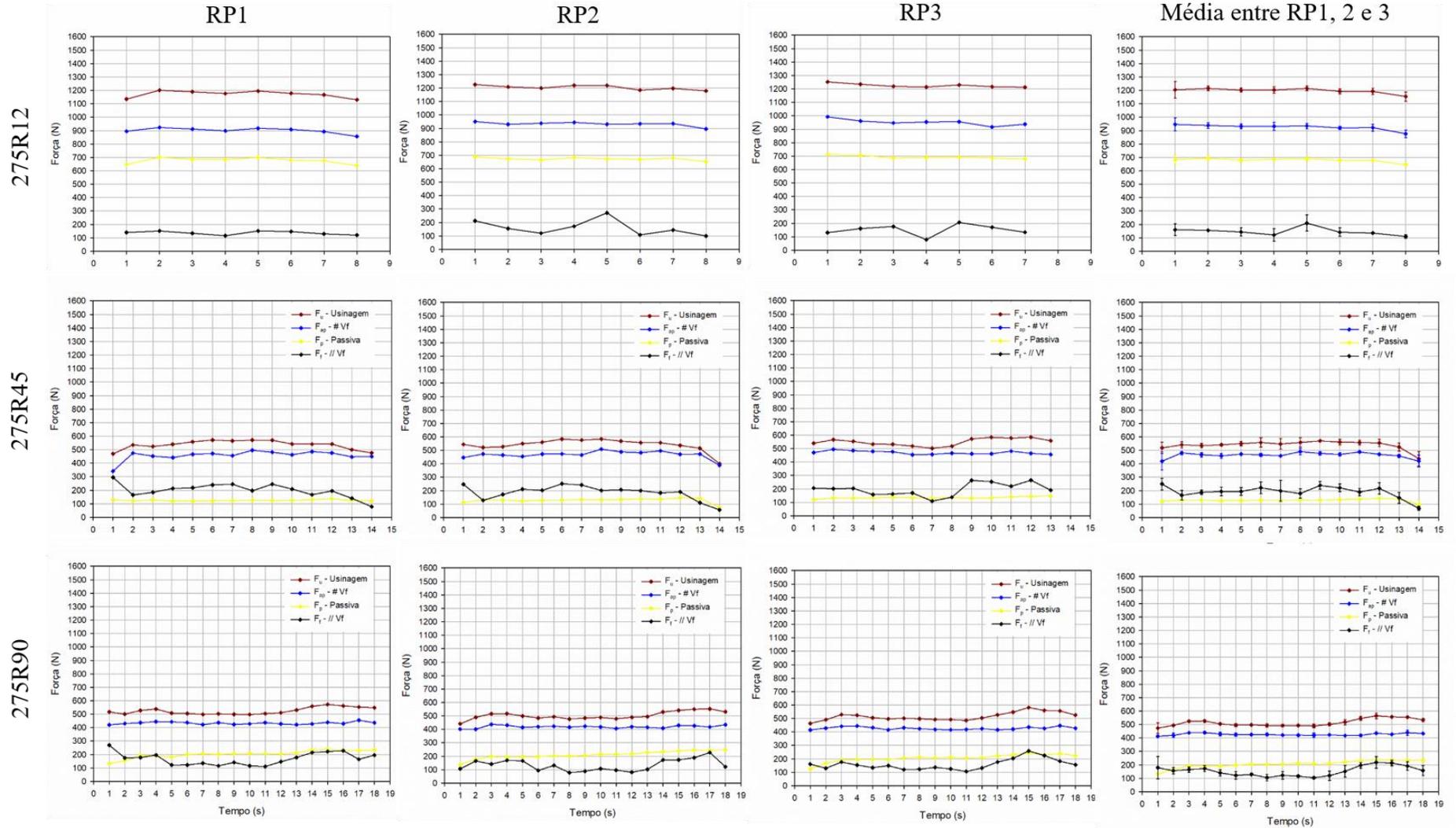
Apêndice 11.C - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 100RXX



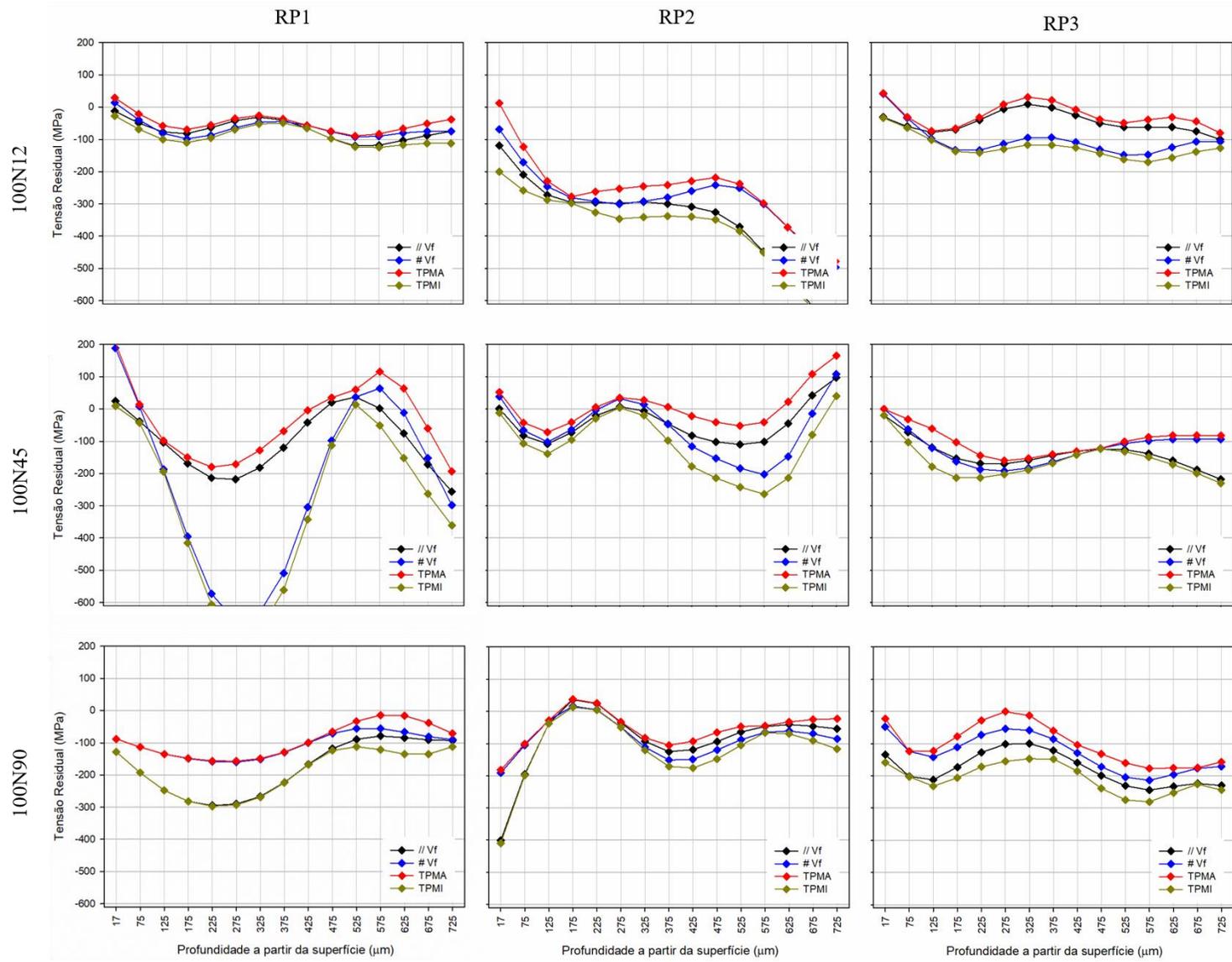
Apêndice 11.D - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 275NXX



Apêndice 11.E - Gráficos de resultados para força de usinagem e componentes para as condições 275RXX

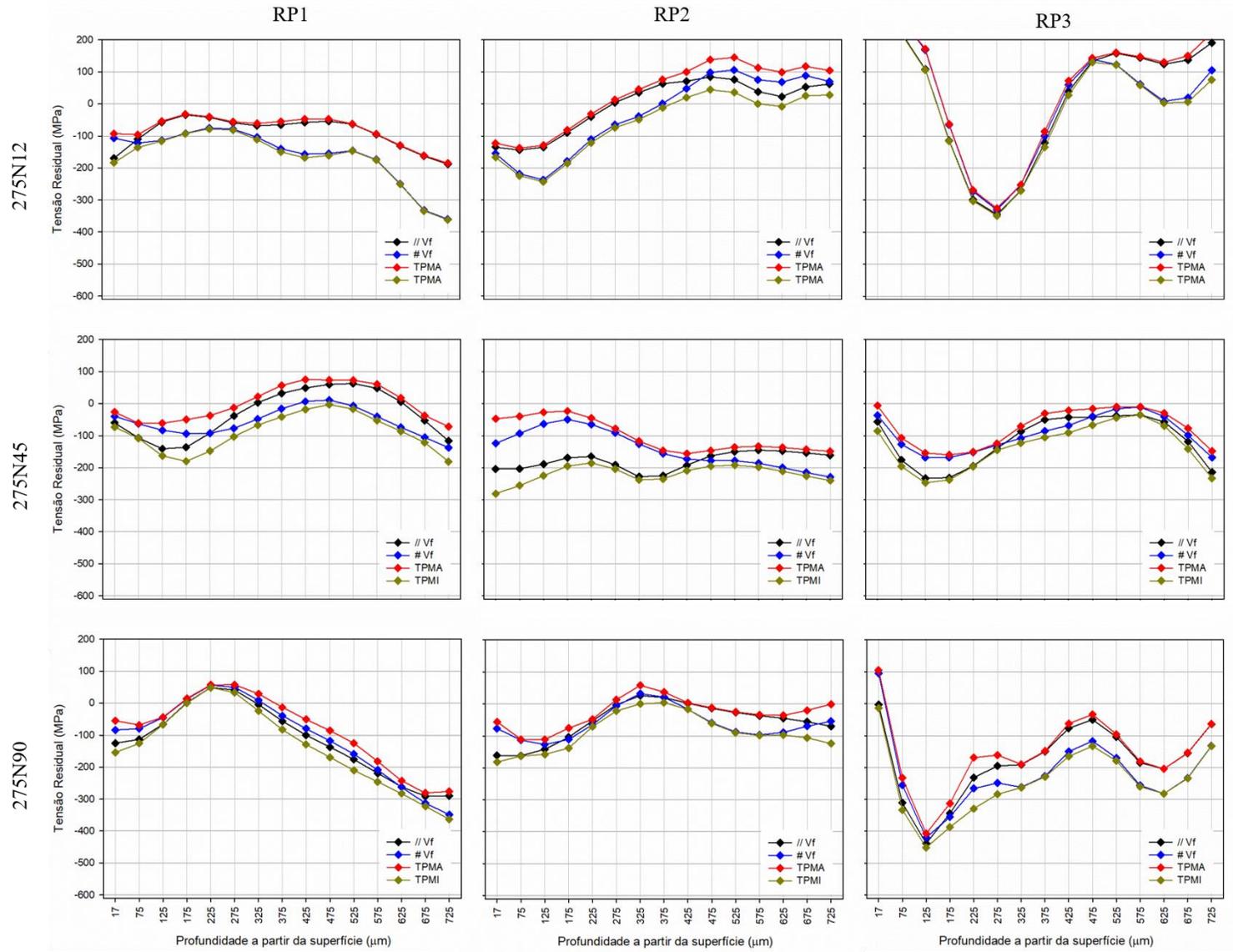


Apêndice 11.F - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 100NXX





Apêndice 11.H - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 275NXX



Apêndice 11.I - Gráficos de resultados para tensão residual para as condições 275RXX

