

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

VINICIUS WAECHTER DIAS

INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO NA DISTORÇÃO DE EIXOS
EM AÇO ABNT NM 87 GRAU 1045 TEMPERADOS POR INDUÇÃO

PORTO ALEGRE

2018

VINICIUS WAECHTER DIAS

**INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO NA DISTORÇÃO DE EIXOS
EM AÇO ABNT NM 87 GRAU 1045 TEMPERADOS POR INDUÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Dias, Vinicius Waechter
INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO NA DISTORÇÃO
DE EIXOS EM AÇO ABNT NM 87 GRAU 1045 TEMPERADOS POR
INDUÇÃO / Vinicius Waechter Dias. -- 2018.
125 f.
Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

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

1. Distorção. 2. Tensões residuais. 3. Simulação
numérica. I. Rocha, Alexandre da Silva, orient. II.
Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais pelo suporte incondicional. À minha família pelo apoio em momentos de adversidade dentro e fora do âmbito acadêmico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, por me acompanhar como orientador desde o trabalho de conclusão de curso de engenharia até a presente tese de doutorado. Ao professor Thomas Hirsch que prestou uma grande contribuição para a preparação e o planejamento desta pesquisa.

Aos amigos e colegas Juliana Zottis, Carla Soares Diehl e Tomaz Fantin pelas ricas discussões científicas, parcerias em pesquisas e colaboração na publicação de artigos científicos.

Aos demais colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), especialmente aos do Grupo de Engenharia de Superfícies (GES), Gilceu Cardoso, Leonardo Oliveira, Luciano Kempinski e Rodrigo Hatwig pela amizade e coautoria em publicações científicas.

Aos bolsistas de iniciação científica Carolina Vaghetti, Érica Munaretti, Francisco Simon, Gabriel Bacellar, Hugo Kemerich, Rachel Possamai e Vicky Hegele pelo auxílio na realização de ensaios, preparação de amostras e imagens. Em especial ao, agora Engenheiro Metalúrgico, Mateus Sotelo.

Ao instituto Alemão IWT (*Stiftung Institut Werkstofftechnik*), na figura do Dr-Ing. Jérémy Epp, pela oportunidade de realização de diversos ensaios importantes para a realização desta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio à pesquisa através da bolsa de doutorado, pelo processo número 141374/2014-4.

"Don't count the days; make the days count."

Muhammad Ali

RESUMO

As distorções geradas ao longo de processos de fabricação elevam os custos de fabricação em componentes mecânicos, pois muitas vezes os componentes têm que ser desempenados, usinados ou retificados para ajustes dimensionais. Portanto, o entendimento das causas da distorção relacionadas a cada etapa de uma rota de fabricação se torna determinante na possibilidade de minimizar as distorções de forma e dimensionais. A presente pesquisa visou o entendimento de como parâmetros importantes de diferentes etapas da rota de fabricação de eixos fabricados com aço ABNT NM 87 GRAU 1045 afetam a distorção, levando-se em conta as modificações que estes parâmetros causam nos chamados potenciais de distorção (tais como tensões residuais, geometria, microestrutura não homogênea, dentre outros). Através de um Planejamento de Experimento (DOE), realizaram-se análises geométricas, microestruturais, de dureza e de tensões residuais de diferentes etapas da rota de fabricação, variando-se parâmetros de fabricação em cada uma delas. A análise permitiu a determinação dos fatores mais importantes nas distorções finais do produto, bem como a identificação de eventos que indicaram a existência de “variações não-controladas” na rota de fabricação que atuam de forma significativa na distorção final do produto fabricado. Uma investigação de possíveis origens dessas “variações não-controladas” de processo foi então realizada para a verificação de como elas poderiam interferir na distorção. Novas análises metalográficas e de dureza foram realizadas e somadas a simulações numéricas computacionais para a determinação do impacto dessas “variações não-controladas”. O conjunto de análises permitiu a identificação de que a etapa de trefilação combinada é de maior significância para as distorções finais. Além disso, fatores como a heterogeneidade na distribuição de segregação na microestrutura do material, desalinhamentos e a não efetiva realização de pré endireitamentos anteriores ao processo de trefilação são algumas das principais “variações não-controladas” encontradas na rota de fabricação estudada.

Palavras-chave: Distorção, ABNT NM 87 GRAU 1045, Tensão residual, Simulação numérica computacional, Planejamento de experimento, Eixos automotivos.

ABSTRACT

Distortions originated during manufacturing process causes elevations on manufacturing costs from mechanical components. Due to the necessity of straightening, machining or grinding to achieve geometrical patterns. Therefore, the understanding of distortion causes and its relationship with each manufacturing step is determinant to minimize geometrical and shape distortions. The presented research aims at the understanding of how important parameters of different steps of an ABNT NM 87 GRAU 1045 steel shaft manufacturing route affects distortion. Considering how changes in these parameters affects the distortion potentials (like residual stresses, geometry, non-homogeneous microstructure, among others). Based on a Design of Experiment (DoE), geometrical, microstructural, hardness and residual stresses analysis were performed after each manufacturing step with a modified parameter. This analysis showed the most significant factors in the evaluated manufacturing route. Also, the existence of “uncontrollable variations” during some manufacturing steps. An investigation of possible origins from these “uncontrollable variations” were performed to understand how they interfere on distortion with the use of new metallographic and hardness analysis combined with numerical simulations. The final analysis identified the combine drawing step as the most significant factor impacting the distortions on the studied route. Furthermore, factors as non-homogeneous microstructure segregations, misalignments and an inefficient pre-straightening before drawing are the main reasons for “uncontrollable variations” in the investigated manufacturing route.

Keywords: Distortion; Residual Stress; Numerical Simulation; Design of Experiment; Automotive Shafts; ABNT NM 87 GRAU 1045.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Rota de fabricação pesquisada dentro do escopo do projeto BRAGECRIM.....	18
Figura 2. Principais mecanismos relacionados a distorção.	21
Figura 3. Metodologia desenvolvida para a redução da distorção.	24
Figura 4. Sistema de pré endireitamento por rolos.....	27
Figura 5. Representação dos tipos de tensões residuais observados na secção periférica após o jateamento com profundidade de 1800 μm . Onde o sinal de “+” representa as tensões trativas e o sinal de “-“ representa as tensões compressivas.	28
Figura 6. Representação de uma ferramenta de trefilação com a indicação das regiões que a compõem.	30
Figura 7. Representação das geometrias presentes no processo de trefilação.....	31
Figura 8. Relação entre o comprimento da superfície de contato e a profundidade de deformação no processo de trefilação.	32
Figura 9. Relação entre tensões residuais superficiais e ângulo de fieira para diferentes condições de atrito obtidas através da simulação numérica computacional.....	33
Figura 10. Tensões residuais medidas por difração de nêutrons em amostras trefiladas com ferramentas de ângulos de 15° e 20°.	34
Figura 11. Sistema de operação do processo de PERC. Onde em (a) observa-se o ajuste entre os rolos côncavo e convexo com a barra e em (b) observa-se a relação angular de alinhamento dos rolos.....	35
Figura 12. Relações de geometria, força e velocidades envolvidas no corte com serra.....	38
Figura 13. Etapas de corte por cisalhamento e evolução da força envolvida.....	40
Figura 14. Representação dos efeitos do corte cisalhante em uma barra redonda e a determinação das zonas geradas no processo: (a) Zona de arredondamento; (b) Zona cisalhada; (c) Zona fraturada; (d) Rebarba; (e) Empenamento.	41
Figura 15. Máquina de corte do tipo tesoura.	43
Figura 16. Sistema de corte cisalhante do tipo guilhotina.....	43
Figura 17. Relação entre a posição de entrada da lâmina de corte e o resultado observado das tensões residuais.	44
Figura 18. Processo de aquecimento indutivo e resfriamento utilizado na têmpera por indução e seus efeitos nas tensões residuais.	46
Figura 19. Parâmetros do processo de retífica para: (a) retífica cilíndrica externa e (b) retífica cilíndrica interna.	50

Figura 20. Tensões residuais geradas no processo de retífica nas condições definidas como: (a) Padrão I e (b) Padrão II.....	52
Figura 21. Tensões residuais geradas no processo de retífica nas condições definidas como (a) padrão IIIa e (b) padrão IIIb.	52
Figura 22. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.	53
Figura 23. Dimensões finais do eixo-modelo criado.....	54
Figura 24. Rota de fabricação utilizada para a pesquisa.....	55
Figura 25. Representação esquemática dos processos de corte utilizados. (a) Serra-Fita; (b) Guilhotina.	57
Figura 26. Ilustração do equipamento de têmpera por indução durante o processo.....	58
Figura 27. Referenciamento utilizado em relação ao processo de trefilação.	60
Figura 28. (a) Representação do círculo de melhor ajuste conforme posição dos pontos de medição. (b) Representação física do cálculo de determinação do vetor curvatura.....	61
Figura 29. Posições onde foram realizadas as análises químicas.	62
Figura 30. Representação das posições de perfis de medições de durezas nas secções transversais e longitudinais.....	63
Figura 31. (a) Posições analisadas no MEV e (b) posições de medições de dureza próximo as superfícies cortadas (0,1 mm de distância).....	63
Figura 32. Representação esquemática das profundidades de penetração das diferentes técnicas de avaliação de tensões residuais utilizados.	64
Figura 33. Equipamento de medição de tensões residuais Analytical X-ray MZ VI.	65
Figura 34. Posições de medição das tensões residuais em relação a geometria dos eixos.	65
Figura 35. Técnica de remoção de camada utilizada.	66
Figura 36. Posições de medição de tensões residuais nas amostras de corte e suas distâncias em relação a face cortada.	67
Figura 37. (a) Posições de medições de tensões residuais pelo método de Difração de Nêutrons na seção transversal. (b) Montagem de amostra no equipamento de medições de tensões residuais E3.	67
Figura 38. Posições de retirada de amostras.	70
Figura 39. Amostras retiradas de barras para as avaliações.	71
Figura 40 . Diferentes condições escolhidas para a avaliação de heterogeneidades no processo de trefilação.	73
Figura 41. Representação esquemática do processo de têmpera de indução por passagem em uma barra reta e uma barra empenada.	74

Figura 42. Posição espacial dos vetores curvatura após o processo de trefilação combinada com ferramenta de ângulos (a) 15° e (b) 20°.	76
Figura 43. Posição espacial dos vetores curvatura após o processo de têmpera por indução. Agrupados conforme o ângulo da ferramenta de trefilação: (a) 15° e (b) 20°.	77
Figura 44. Distribuição dos vetores que indicam as curvaturas de cada amostra após cada etapa da rota de fabricação avaliada para a condição de ferramenta de trefilação (a) 15° e (b) 20°.	78
Figura 45. Metalografias de (a) secção transversal e (b) secção longitudinal de uma amostra após o processo de trefilação indicando o posicionamento de segregações de carbono.	79
Figura 46. Composições químicas em % massa medidas através de espectroscopia de emissão ótica e suas posições de medição.	80
Figura 47. (a) Conteúdo de carbono medido através de EPMA ao longo da (b) seção transversal da amostra.	81
Figura 48. Metalografia das regiões próximas a superfície trefilada par as amostras trefiladas com ferramentas de (a) 20° e (b) 15°. Onde as setas nas partes inferiores indicam as direções de trefilação.	81
Figura 49. Medições de durezas superficiais após os processos de trefilação com os diferentes ângulos.	82
Figura 50. Distribuição das tensões residuais superficiais após o processo de trefilação com ferramenta de 15°.	82
Figura 51. Imagens de MEV das faces das amostras após os diferentes métodos de corte. Onde (a) representa corte com serra-fita e (b) corte com guilhotina.	83
Figura 52. Metalografia da superfície cortada com guilhotina com (a) baixa aumento e com (b) alta ampliação.	84
Figura 53. Metalografia próxima a superfície cortada com serra-fita.	84
Figura 54. Durezas superficiais médias após os processos de corte.	85
Figura 55. Resultados de tensões residuais para a amostra cortada com guilhotina.	86
Figura 56. Perfil longitudinal de tensões residuais superficiais após corte com serra-fita.	86
Figura 57. Metalografias das camadas temperadas após a têmpera por indução com profundidade de:	87
Figura 58. Perfis de microdureza após a têmpera por indução para amostras trefiladas com ferramenta de 15°. (a) Camada endurecida de 1,2 mm; (b) Camada endurecida de 2,2 mm.	88
Figura 59. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura à Meia Altura para as amostras temperadas por indução com camada de 1,2 mm.	89

Figura 60. Perfil de tensões residuais após o processo de têmpera por indução com camada de 1,2 mm.....	89
Figura 61. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura à Meia Altura para as amostras temperadas por indução com camada de 2,2 mm.....	90
Figura 62. Perfil de tensões residuais para amostra temperada por indução com camada de 2,2 mm.....	91
Figura 63. Durezas superficiais para as amostras após o processo de retificação com remoção de 100 μ m. Onde (a) corresponde a camada temperada de 1,2 mm e (b) 2,2 mm.....	91
Figura 64. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura a Meia Altura para amostra retificada com profundidade de 100 μ m e camada temperada de 2,2 mm.	92
Figura 65. Perfil de tensões residuais obtido por difração de nêutrons após o processo de tempera por indução com profundidade de camada de 2,2 mm.	92
Figura 66. Efeitos Padronizados da análise do DoE contendo combinações de até 3 fatores. O valor 2,385 indica o limite mínimo para que um fator (ou uma soma de fatores) sejam considerados significativos com uma confiabilidade de 98%.	93
Figura 67. Efeitos individuais de cada processo na curvatura final, segundo cálculo do DoE.	94
Figura 68. Variações das direções do vetor curvatura antes e depois do processo de retificação.	99
Figura 69. Resumo das curvaturas médias para cada grupo de rotas de fabricação utilizados. Representados na legenda da seguinte forma: (Classificação) Ferramenta de Trefilação (20/15) – Tipo de corte (G/S) – Camada Temperada (1,2/2,2) – Profundidade de Retificação (100/200).	99
Figura 70. Macrografias de amostras retiradas após o processo de trefilação com ferramentas de ângulo (a) 15° e (b) 20°, indicando a variação das posições de segregação no material. ..	100
Figura 71. Evolução da dureza média superficial em comparação com a dureza média do núcleo ao longo do processo de fabricação.	101
Figura 72. Tensões residuais superficiais nas posições periféricas das amostras trefiladas com ferramentas de ângulos: (a) 15° e (b) 20°. As legendas do gráfico indicam as posições de medições na barra com relação a ponta contendo o entalhe na amostra.	103
Figura 73. Distribuição de tensões residuais superficiais em diferentes posições periféricas para as profundidades especificadas nos gráficos após os processos de: (a) Trefilação 20° + camada 1,2 mm; (b) Trefilação 15° + camada 1,2 mm; (c) Trefilação 15° + camada 2,2 mm; (d) Trefilação 15° + camada 2,2 mm + retificação 100 μ m.	104

Figura 74. Perfis de tensões residuais obtidos por difrações de nêutrons após os processos de trefilação, têmpera por indução e retificação.....	105
Figura 75. (a) Macrografia da secção da amostra. Micrografias (a) na região de segregação e (b) na região sem segregação. Posições das micrografias estão indicadas pelas setas.....	108
Figura 76. Metalografias de amostras retiradas de diferentes etapas do processo de trefilação combinada. Onde as setas indicam as posições de pontos de segregações.	109
Figura 77. Amostras retiradas do processo de PERC onde as setas indicam as posições de segregações.....	110
Figura 78. Secções longitudinais indicando diferentes tamanhos de segregações.....	110
Figura 79. Distribuição de tensões residuais com os diferentes softwares de simulação para as mesmas condições iniciais comparadas com o resultado de difração de nêutrons de uma amostra trefilada com o mesmo ângulo de trefilação.....	112
Figura 80. Tensões residuais na posição central com diferentes diâmetros de segregações. .	113
Figura 81. Resultado de tensões residuais variando-se as posições de segregações comparados com a as tensões residuais medidas por difração de nêutrons.	113
Figura 82. Tensões residuais obtidas com as simulações numéricas computacionais de diferentes parâmetros de heterogeneidades juntamente com a simulação padrão.....	114
Figura 83. Perfis de microdureza para a amostra somente trefilada.....	116
Figura 84. Perfis de microdureza para as amostras temperadas com camadas de 1,2 mm (Posições 173° e 353°) e 2,2 mm (Posições 80° e 260°). Onde as posições periféricas de 173° e 80° representam as direções dos vetores curvatura de cada amostra, enquanto as outras posições periféricas indicam a direção oposta.	116
Figura 85. Perfis de microdureza nas amostras retificadas com 100 µm de remoção após têmpera por indução de camada 1,2 mm. A posição periférica de 133° representa a posição para a qual aponta o vetor curvatura para a amostra. Enquanto a posição periférica de 313° representa a posição oposta ao vetor curvatura.....	117
Figura 86. Perfis de dureza nas amostras retificadas com 100 µm de remoção após têmpera por indução de camada 2,2 mm. A posição periférica de 341° representa a posição para a qual aponta o vetor curvatura para a amostra. Enquanto a posição periférica de 161° representa a posição oposta.....	118

LISTA DE SIGLAS ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DRX – Difracto de Raios-X

GES – Grupo de Engenharia de Superfícies

LdTM – Laboratório de Transformao Mecânica

MEV – Microscópio Eletrnico de Varredura

PPGE3M – Programa de Pós-Graduao em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

PERC – Polimento e Endireitamento por Rolos Cruzados

K_f – Limite de escoamento

$^{\circ}$ – Graus Celsius

Δ – Parâmetro delta

α – Semingulo de trefilao

δ – Ângulo entre os rolos do PERC

d_i – Diâmetro inicial da barra

d_f – Diâmetro final da barra

L – Comprimento da região de contato

r – Raio da ferramenta de trefilao

μ – Coeficiente de atrito

kN – Kilo Newton

tonf – Toneladas força

HV – Dureza Vickers

MPa – Mega Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO	19
1.2	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	DISTORÇÃO.....	21
2.1.1	Tipos de distorção	22
2.1.2	Metodologia de avaliação	23
2.1.3	Assinatura de processo.....	25
2.2	ROTA DE FABRICAÇÃO PARA EIXOS AUTOMOTIVOS.....	26
2.2.1	Trefilação combinada	26
2.2.2	Métodos de corte.....	35
2.2.3	Têmpera por indução	45
2.2.4	Retífica.....	47
3	METODOLOGIA GERAL	53
3.1	PROJETO DO COMPONENTE MECÂNICO	54
3.2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	56
3.3	AMOSTRAGEM	59
3.4	MEDIÇÕES DIMENSIONAIS	60
3.5	POTENCIAIS DE DISTORÇÃO.....	61
3.5.1	Análise Química	61
3.5.2	Metalografia e Dureza	62
3.5.3	Tensões Residuais.....	63
3.6	METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÕES DAS “VARIAÇÕES NÃO-CONTROLADAS”	68
3.6.1	Heterogeneidade Microestrutural.....	70
3.6.2	Influência da Segregação na Trefilação.....	71

3.6.3	Heterogeneidades no Processo de Trefilação Combinada	72
3.6.4	Heterogeneidades na camada endurecida	73
4	RESULTADOS	76
4.1	DIMENSIONAL	76
4.2	POTENCIAIS DE DISTORÇÃO	79
4.2.1	Características do Fio-Máquina (matéria-prima)	79
4.2.2	Trefilação combinada	81
4.2.3	Corte	83
4.2.4	Têmpera por Indução	87
4.2.5	Retificação	91
4.3	ANÁLISE DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO (DOE)	93
4.4	RESUMO DA ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	94
5	DISCUSSÃO GERAL	97
5.1	VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (VETOR CURVATURA)	97
5.2	MICROESTRUTURA	100
5.3	DUREZA	101
5.4	TENSÕES RESIDUAIS	102
5.4.1	Tensões Residuais Superficiais	102
5.4.2	Perfis de Tensões Residuais	104
5.5	“VARIAÇÕES NÃO-CONTROLADAS”	105
5.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	106
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE AS “VARIAÇÕES NÃO-CONTROLADAS”	108
6.1	HETEROGENEIDADES MICROESTRUTURAIS	108
6.2	HETEROGENEIDADES NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO	111
6.2.1	Simulações padrão	111
6.2.2	Efeito da segregação	112

6.2.3	Geometria e alinhamento da barra	114
6.3	HETEROGENEIDADES NA CAMADA ENDURECIDA.....	115
6.4	HETEROGENEIDADES NO PROCESSO DE RETÍFICA	116
6.5	CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A REDUÇÃO DA DISTORÇÃO	118
7	CONCLUSÕES.....	120
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

1 INTRODUÇÃO

Distorções em componentes mecânicos comprometem suas funcionalidades, reduzindo o seu tempo de vida, em alguns casos podem até acarretar no descarte do componente antes mesmo que entre em serviço. No caso de eixos de aço, utilizados nas mais diversas aplicações (mecânica, automotiva, construção civil, extração de petróleo, entre outras), a distorção mais importante em termos de desempenho é o empenamento. Eixos com elevado grau de empenamento induzem vibrações no processo de funcionamento de motores, um defeito que além de gerar ruído, pode acarretar na falha em serviço tanto do eixo quanto de partes do motor (CAMARGO, 2010).

Gastos com processos de correções e eliminações de distorções podem chegar a 45% do custo total de fabricação de componentes mecânicos (ZOCH, 2006). Em alguns casos, o componente deve ser descartado por apresentar distorções irreparáveis ou de difícil reparo (alto custo). Portanto, o conhecimento sobre as causas das distorções de forma se torna cada vez mais necessárias para a obtenção de um produto mais bem acabado e com menores custos de fabricação.

As origens de empenamento em eixos são variadas, desde oscilações térmicas em funcionamento passando por desbalanceamentos na montagem do eixo e, principalmente, devido aos processos de fabricação do mesmo (CAMARGO, 2010). Este tipo de distorção comumente se torna evidente após processos de tratamentos térmicos ou termoquímicos, mas, segundo as premissas desenvolvidas nos conceitos de “engenharia de distorção” (ZOCH, 2009), sabe-se que toda a rota de fabricação possui alguma influência nestas distorções.

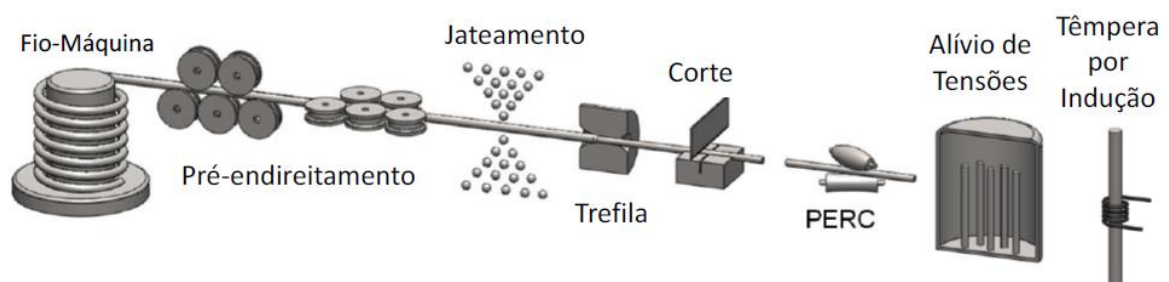
O correto entendimento dos efeitos de uma rota de fabricação na distorção de um material passa pela análise holística desta rota. Avaliando-se como cada processo influencia em propriedades do material, conhecidas como portadoras dos potenciais de distorção (ZOCH, 2009). Recomenda-se a utilização de uma metodologia estatística como o Planejamento de Experimento (DoE, do inglês *Design of Experiment*) para a determinação das etapas da rota que possuem maior significância na distorção final do componente a ser analisado.

Esta pesquisa tem como ponto inicial o projeto de pesquisa chamado “*Investigation and improvment of a manufacturing chain from cold drawing to induction hardening*”, no âmbito

do programa de cooperação internacional *Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology* (BRAGECRIM) em uma parceria do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) com o instituto alemão *Stiftung Institut Werkstofftechnik* (IWT) na cidade de Bremen.

Neste projeto foi avaliada a rota de fabricação de barras de aço cilíndricas processadas pelo processo de trefilação combinada até o processo de têmpera por indução. Nunes (2012), um dos pesquisadores envolvidos neste projeto, indica em seu trabalho a necessidade de se avaliar a rota de fabricação de forma mais extensiva e aplicada a um componente mecânico com geometria maior que a estudada por ele. A rota estudada por Nunes (2012), apresentada na Figura 1, contempla apenas o processo de trefilação combinada seguido por tratamentos térmicos de alívio de tensões e têmpera por indução. Baseando-se na continuidade desta pesquisa, determinou-se a necessidade de se pesquisar uma rota completa de fabricação de eixos automotivos, adicionando etapas comuns à fabricação como usinagem e acabamento, mas não avaliadas em trabalhos anteriores.

Figura 1. Rota de fabricação pesquisada dentro do escopo do projeto BRAGECRIM.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2012).

A rota de fabricação de eixos automotivos tem origem na etapa de fusão e lingotamento contínuo, por onde o aço é vazado e laminado ainda a quente até a obtenção de um fio-máquina de um tamanho e geometria específicos. Este fio-máquina é enrolado em forma de bobina em um processo realizado ainda a quente para facilitar o seu armazenamento. Após a fabricação deste fio-máquina, o mesmo é levado à etapa de trefilação combinada, onde o fio é desbobinado, pré-endireitado, jateado, trefilado, cortado em barras longas, polido e endireitado. Todos estes processos são realizados a frio. Estas duas etapas geralmente são realizadas por siderúrgicas e o seu produto (longas barras de aço) é vendido aos fabricantes de eixos. Os fabricantes de eixos, por sua vez, realizam a etapa de fabricação final dos eixos. Constituída pelos processos de corte, usinagem, tratamento térmico e correções geométricas, esta etapa pode ser realizada através de

um endireitamento ou de retificação para a remoção de distorções. As etapas posteriores ao processo de lingotamento contínuo são os alvos desta pesquisa.

O aspecto inédito desta pesquisa é a aplicação de uma avaliação holística em uma rota de fabricação utilizada para eixos automotivos.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo determinar/avaliar os efeitos das principais etapas de uma rota de fabricação de eixos automotivos produzidos com aço ABNT NM 87 GRAU 1045 sobre sua distorção final. Partindo do fio-máquina até o produto acabado, após processos como tratamento térmico e retífica. Variando-se parâmetros em diferentes processos dentro da rota avaliada de acordo com um planejamento de experimento, a investigação tem como foco os seguintes tópicos:

- Análise e determinação dos processos com maior influência (significância) nas distorções de eixos fabricados de aço ABNT NM 87 GRAU 1045 dentro da rota estudada através da utilização de um Planejamento de Experimento (DoE).
- Identificação dos efeitos de cada processo de fabricação analisado no potencial de distorção final dos eixos.
- Apresentação dos motivos pelos quais as etapas de maior significância estatística afetam a distorção do eixo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Conforme apresentado nos objetivos, a tese visa identificar os efeitos do processo de fabricação e, posteriormente, explicar os motivos pelos quais certas etapas são classificadas como mais significativas através do estudo estatístico. Portanto, o trabalho seguirá uma ordem de exposição cronológica com relação ao processo de fabricação.

Primeiramente serão expostos os conceitos em que se baseiam este trabalho no capítulo de revisão bibliográfica. Após serão apresentadas as metodologias utilizadas para a realização da pesquisa de forma geral, desde o desenho do componente, passando pelo planejamento do

experimento até a descrição de todas as análises realizadas para a caracterização das amostras de cada etapa da rota de fabricação avaliada. No capítulo de resultados, serão apresentados de forma geral os resultados das análises realizadas, primeiramente para os resultados das avaliações geométricas e após isso, os resultados das avaliações das propriedades das amostras. Ambos seguirão a ordem dos processos na rota de fabricação.

O capítulo de discussão geral discutirá a evolução das características avaliadas ao longo da rota de fabricação. Neste caso, serão discutidos os efeitos de todas as etapas em cada uma das características avaliadas. No término deste capítulo serão apresentadas conclusões parciais do estudo, que servem também de motivação para as etapas posteriores da pesquisa desenvolvida.

No capítulo de resultados e discussão sobre as “variações não-controladas” os resultados das investigações sobre estas variações serão apresentados e discutidos no capítulo intitulado resultados e discussão das investigações complementares.

Finalizando, serão apresentadas as conclusões finais da pesquisa, considerando todos os resultados e discussões apresentados ao longo do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DISTORÇÃO

Distorção é definida como uma alteração de forma em um material que se manifesta de forma definitiva e não pode ser revertido sem algum processo de deformação plástica, processo térmico ou de remoção de material. Problemas originados por distorção, juntamente com danos causados por corrosão, são os principais causadores de perdas econômicas em produtos técnicos. Zoch (2009) afirmou que, após um levantamento da associação alemã de pesquisa para engenharia automotiva (*German Research Association of Drive Engineering*), estima-se que, aproximadamente 1 bilhão de Euros eram gastos em tentativas de remoção de distorções nos processos de fabricação. Thoben (2002) indicou em seus estudos que até 45% dos custos de fabricação em componentes mecânicos são destinados à remoção de distorções de forma após o tratamento térmico.

O fenômeno distorção é investigado cientificamente há mais de 100 anos, entretanto, o conhecimento e ações contra a distorção são ainda imperfeitos e diversas vezes limitados a aspectos isolados ou fatores influenciadores únicos (ZOCH, 2006). Os principais mecanismos relacionados à distorção em termos térmicos, mecânicos e de materiais são conhecidos, conforme o exemplo mostrado na Figura 2 (HEESS et al., 1997) para tratamento térmico, mas os fatores que os influenciam são numerosos, podendo ultrapassar 200.

Figura 2. Principais mecanismos relacionados a distorção.



Fonte: Adaptado de (HEESS et al., 1997).

2.1.1 Tipos de distorção

Segundo Klein (KLEIN; SEIFERT; THOBEN, 2009), a distorção em um componente nem sempre pode ser visível durante a rota de fabricação. O “estado interno” do componente sofre mudanças contínuas ao longo da fabricação, desde a produção do aço até o tratamento térmico, formando uma espécie de histórico no material. Estas mudanças no “estado interno” do material podem se dar em diferentes características do material, como composição química, histórico mecânico e tensões residuais, entre outros. Estas características que podem ser afetadas são conhecidas como potenciais de distorção.

Durante o tratamento térmico, estas distorções internas no material reagem à temperatura, aumentando a distorção geral e tornando visíveis estas distorções internas. O fato destas distorções ocorrerem internamente no material dificulta o planejamento de redução de distorções gerais no projeto de um componente mecânico.

As distorções de forma podem se manifestar em componentes metálicos de diferentes formas. Com relação à secção transversal, pode se manifestar através do alargamento e redução da secção ou da mudança da geometria, como a ovalização de uma barra de secção circular por exemplo. Para a secção longitudinal estas distorções ocorrem com o aumento ou a redução do comprimento de forma semelhante à secção transversal, mas diferenciando-se com relação as variações geométricas, onde destaca-se o empenamento como a distorção geométrica mais comum.

O empenamento pode ser definido como o desvio da retilinearidade de um componente qualquer. Sua ocorrência é bastante comum em barras de aço, de secções circulares ou quadradas, após processos de tratamento térmico ou termoquímico. Podendo se apresentar como o somatório de diferentes curvaturas (sentido ondulatório) ou como uma curvatura única em relação ao eixo central ideal, conhecido como forma de C ou de banana. Este tipo de deformação de forma é bastante comumente encontrado na fabricação de eixos automotivos, barras de direção, cremalheiras, entre outros componentes mecânicos de uso geral.

Com relação ao desempenho de um componente mecânico que apresente empenamento, pode-se dividi-los em três grupos:

- ***Não afeta o desempenho:***

Valores significativamente baixos de empenamentos acabam por não afetar o desempenho mecânico do componente. Geralmente, este valor de empenamento é o limite definido pelos fabricantes (automotivos principalmente) como o padrão aceitável;

- ***Afeta levemente o desempenho:***

Distorções um pouco mais elevadas ocasionam vibrações durante serviço e, portanto, afetam o desempenho do componente. Em casos de equipamentos mais robustos ou que não sejam afetados por vibrações, estes limites de empenamento podem ser aceitos;

- ***Afeta catastróficamente o desempenho:***

Elevados graus de distorção podem levar a falhas catastróficas de conjuntos mecânicos, devido a desalinhamentos resultantes do empenamento e elevadas vibrações durante o funcionamento (CAMARGO, 2010). Neste caso, os componentes devem ser submetidos a processos de recuperação de forma, como despenamento ou retificação, chegando até, em alguns casos, ao descarte do componente devido ao elevado empenamento.

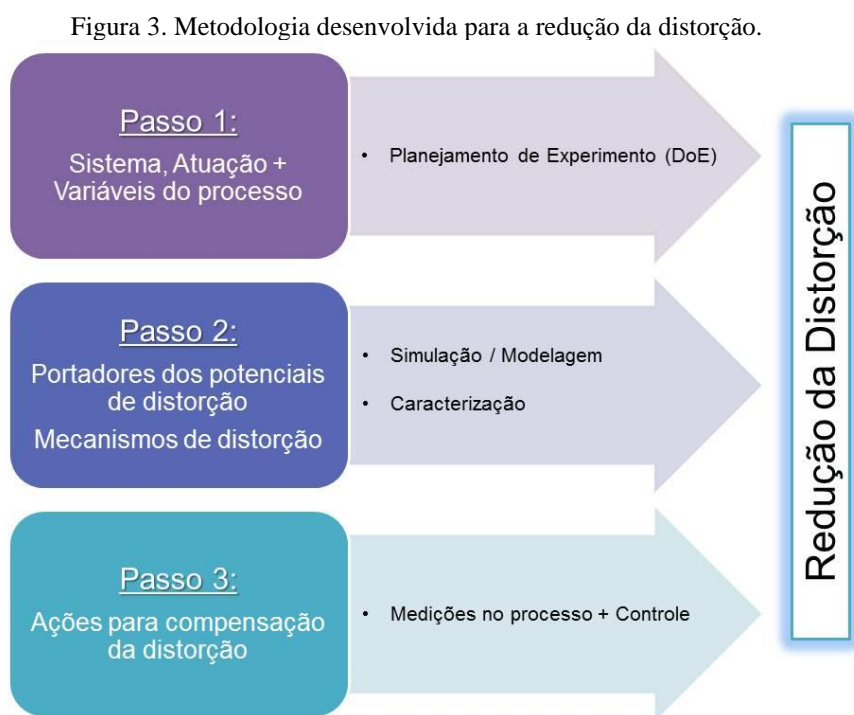
2.1.2 Metodologia de avaliação

Os avanços no entendimento da existência de um relacionamento de diferentes etapas do processo de fabricação nas distorções observadas em componentes mecânicos levaram a criação do *Collaborative Research Center 570* (CRC 570 em inglês ou SFB 570 em alemão) “*Distortion Engineering*”. Com o objetivo de explorar as razões intrínsecas das distorções em componentes fabricados com aço durante o tratamento térmico, este projeto permitiu a determinação de uma metodologia de investigação dos fenômenos relacionados à distorção. Possibilitando o entendimento de como as distorções são formadas em uma rota de fabricação e, também, a realização de ações visando à redução ou compensação destas distorções em componentes mecânicos com simetria axial.

A metodologia desenvolvida pelo CRC 570 é constituída de três passos (ZOCH 2009) e é retratada na Figura 3. O primeiro passo descrito é a determinação das variáveis que possuem maiores chances de influenciar a distorção do produto em cada processo avaliado na rota de fabricação. O segundo passo é descrito como a determinação dos chamados “portadores do potencial de distorção”, que podem ser definidos como os fatores que podem afetar a distorção,

tensões residuais. Existem mais de 200 fatores relacionados a distorção (NUNES, 2012) porém, fatores como geometria do componente, distribuição de fases e elementos de liga, histórico mecânico e distribuição de tensões residuais são considerados como os principais por autores como Frerichs (2009) e Zoch (2012).

Como a medição ou observação de alguns destes mecanismos pode ser de difícil execução, a utilização de simulações numéricas computacionais é recomendada para preencher estas lacunas de informação. Além disso, a combinação destas informações (simulações + caracterizações) permite a criação de modelos numéricos capazes de extrapolar as informações obtidas para diferentes geometrias, materiais e processos.



Fonte: Adaptado de (ZOCH, 2009).

O terceiro e último passo é a aplicação do conceito de “potencial de compensação”. Zoch (2009) define o potencial de compensação como o somatório das influências que contribuem positivamente para a forma e tamanho do componente. Se os mecanismos de distorção ao longo da rota de fabricação forem corretamente compreendidos, a utilização do “efeito inverso” pode implicar nas modificações dimensionais necessárias para a redução das distorções. De forma simplificada, uma possível identificação de um mecanismo de distorção que acarrete um empenamento para a certa posição pode ser compensada por um prévio empenamento na

direção oposta. Para isto, torna-se necessária a realização de medições durante o processo, acrescidas de um controle em tempo real dos parâmetros em questão.

2.1.3 Assinatura de processo

Outra abordagem consequente da metodologia holística é o entendimento de que os efeitos gerados pelos processos de fabricação utilizados têm como consequência um determinado conjunto de características específicas da sequência e tipo de processos utilizados. A este conjunto de características é dado o nome de “Assinatura de Processo”. Podendo ser comparado analogamente ao histórico genético.

Como intuito de promover uma mudança de paradigmas com relação a processos de fabricação orientados ao material, foi criado o projeto de pesquisa internacional Alemanha-Estados Unidos (SFB/TRR 136, 2018).

A “assinatura de processo” resume todas as interações entre processos de fabricação e características de um material de maneira unificada. É uma nova abordagem para descrever o processo de fabricação como uma rota orientada pela funcionalidade e baseada em uma interligação de abordagens científicas e de engenharia durante o processo. Portanto, a “assinatura de processo” descreve uma relação entre as tensões no material (externas e internas) e as modificações realizadas no material, proporcionando informações sobre a resultante destas modificações nas propriedades superficiais e subsuperficiais do material (BRINKSMEIER et al., 2018).

Entende-se através desta abordagem que etapas do processo de fabricação “imprimem” sobre o material, características específicas resultantes destes processos. E que tais características são transportadas com o material através dos processos de fabricação subsequentes. Um entendimento semelhante ao observado nas premissas da “engenharia de distorção”, com a diferença entre as abordagens principalmente localizada na distinção realizada pela abordagem da “assinatura de processo” com relação aos efeitos do processo em relação ao estado do material.

A pesquisa neste sentido visa diferenciar as características verificadas no material após o processamento com as características já presentes no material, ou que são inerentes ao mesmo.

Enquanto a abordagem da “engenharia de distorção” apresenta um enfoque maior no resultado final de cada processo e o seu efeito no processo subsequente.

2.2 ROTA DE FABRICAÇÃO PARA EIXOS AUTOMOTIVOS

O processo completo de fabricação de eixos automotivos parte da fabricação do aço até os processos de acabamento, como retificação. A rota mais utilizada para estes tipos de componentes segue as seguintes etapas após a fabricação do aço:

- Trefilação combinada;
- Corte;
- Usinagem;
- Tratamento térmico;
- Acabamento (ajuste geométrico).

As etapas da rota de fabricação serão apresentadas seguindo a mesma ordem em que são realizadas durante o processo de fabricação de eixos automotivos. Serão abordados os elementos que compõem a trefilação combinada, os diferentes tipos de corte, tratamento térmico (especificamente a têmpera por indução) e processos de retificação. Dentro destes tópicos serão apresentados as características e principais efeitos descritos na literatura sobre cada processo estudado. O processo de usinagem não será mencionado na revisão bibliográfica pois ele não teve seus efeitos avaliados na pesquisa.

2.2.1 Trefilação combinada

A etapa de trefilação combinada é composta pelo somatório dos processos de desbobinamento, pré endireitamento horizontal e vertical, jateamento, trefilação e Polimento e Endireitamento por Rolos Cruzados (PERC).

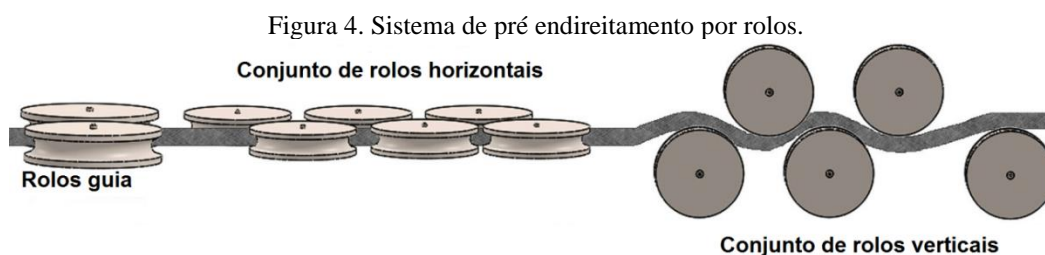
O processo de desbobinamento tem como objetivo somente a retirada do fio-máquina da forma de bobina, a qual é utilizada para o armazenamento do mesmo, e inseri-lo no processo de pré endireitamento. O processo apresenta somente deformações elásticas no material, portanto seus aspectos não serão abordados neste capítulo.

2.2.1.1 PRÉ ENDIREITAMENTO

Os processos de pré endireitamento horizontal e vertical são aplicados com o objetivo de endireitar o fio-máquina, previamente armazenado em bobinas, o melhor possível para que ele esteja em uma condição retilínea para o processo de trefilação. Este processo é realizado com a ação de conjuntos de rolos paralelos sequenciais que realizam dobramentos no fio máquina de modo a endireitá-lo. Como o processo de bobinamento utilizado na fabricação do fio-máquina o deixa com o formato de uma bobina helicoidal, a etapa de pré endireitamento é realizada com sequencias de rolos tanto na direção horizontal quanto na direção vertical. Cada conjunto de 3 rolos forma um momento “M” no fio. O diâmetro e a posição dos rolos determinam o fator de endireitamento “h”, que é definido pela distância máxima do dobramento realizado pelo conjunto de rolos.

Pesquisas científicas sobre o assunto são pouco conhecidas e, portanto, existem poucas informações acerca dos efeitos das distribuições dos rolos no endireitamento e nas tensões residuais. Portanto, não se pode determinar uma relação ideal de rolos para um processamento do fio-máquina. Alguns autores (NUNES, 2012; PAECH, 2002) afirmam que uma quantidade de 5 rolos, normalmente, é considerada como suficiente para a obtenção de um fio-máquina em condições de ser trefilado. Entretanto, pouco se discute sobre o estado de tensões residuais após o processo. Wang (2002) apresenta um modelo contendo as deformações sofridas pelo fio durante o processo e indica os efeitos destas tensões de processo sobre as tensões residuais.

Diehl (DIEHL et al., 2017) avaliou os efeitos do processo nas propriedades de um fio máquina fabricado com aço ABNT NM grau 1045. A composição dos conjuntos é a mesma que a apresentada na Figura 4. Observou-se que as maiores deformações plásticas realizadas no processo se deram entre os ângulos de 90° e 270° (eixo horizontal). Justamente o eixo de maior curvatura do fio-máquina antes do endireitamento. Estes mesmos ângulos apresentaram maiores gradientes de tensões residuais em comparação com os ângulos perpendiculares de 0° e 180° (eixo vertical).



Fonte: Adaptado de (DIEHL et al., 2017).

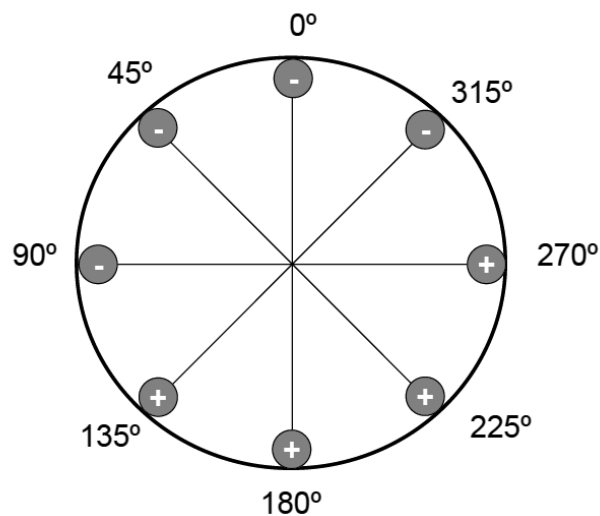
Portanto, o processo de pré endireitamento apresenta um produto com um acabamento geométrico aceitável, embora seus efeitos no material sejam heterogêneos.

2.2.1.2 JATEAMENTO

O processo de jateamento consiste na passagem do fio-máquina por um jato de granalha de ferro, as quais possuem como objetivo a remoção de óxidos (carepas) da superfície do material. Além disso, apresenta uma mudança no estado de tensões residuais na região superficial da peça devido às pequenas deformações mecânicas realizadas durante o choque das granalhas com a superfície do material.

Este tipo de processo também é aplicado em fases de acabamento de componentes mecânicos pois transforma as tensões residuais superficiais. Nunes (2012) em sua avaliação do processo de trefilação combinada observou que os efeitos do processo nas tensões residuais são limitados a superfície do material, uma vez que em uma profundidade de 1800 μm já se observa tensões trativas e compressivas em diferentes posições periféricas, conforme mostrado na Figura 5. Somando-se isso ao fato de os processos subsequentes (trefilação e PERC) causarem transformações mais profundas e mais significativas, o processo de jateamento, nesta etapa, se faz importante somente pela remoção de carepas da superfície do material.

Figura 5. Representação dos tipos de tensões residuais observados na secção periférica após o jateamento com profundidade de 1800 μm . Onde o sinal de “+” representa as tensões trativas e o sinal de “-” representa as tensões compressivas.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2012).

2.2.1.3 TREFILAÇÃO

O processo de trefilação consiste na conformação mecânica de uma barra ou tubo com o objetivo de redução ou ajuste do diâmetro e o consequente alongamento do mesmo, aliado do aumento gerado nas propriedades mecânicas.

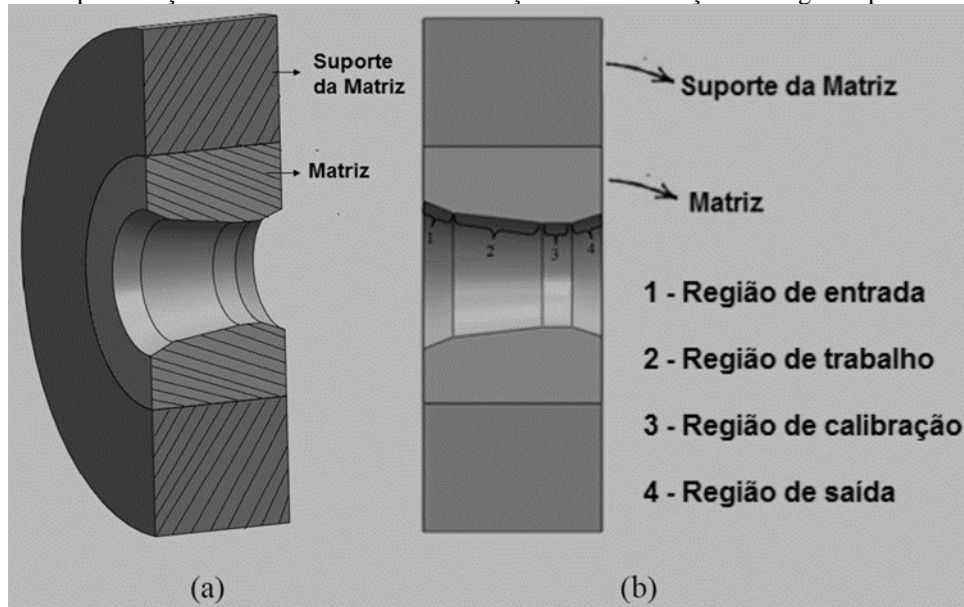
Luis et al. (2005) definem como os parâmetros mais importantes no processo de trefilação os seguintes:

- Ângulo de ferramenta;
- Redução de área;
- Tipo de lubrificante;
- Velocidade de processo.

A ferramenta utilizada para a realização do processo é chamada de fieira. Ela é formada por quatro regiões (DIETER, 2003), representadas na Figura 6:

- Região de entrada:
Região que serve de ajuste para o posicionamento do material e a adição de lubrificantes utilizados no processo. Possui um ângulo maior que a região subsequente o que facilita o posicionamento do material e a deposição de lubrificantes.
- Região de trabalho:
Esta é a parte onde o processo de redução de secção ocorre. O seu ângulo de trabalho é determinado em função da redução de secção desejada. A relação entre o ângulo de trabalho e a área de contato com o material a ser trefilado determina a profundidade das deformações atingidas pelo processo. Esta relação é conhecida como parâmetro Δ (delta).
- Região de calibração:
Nesta região o material é mantido no diâmetro final da região de trabalho para garantir uma maior estabilidade dimensional da barra.
- Região de saída:
Esta região é utilizada para que o material deixe a ferramenta com a liberação do retorno elástico comum aos materiais deformados mecanicamente.

Figura 6. Representação de uma ferramenta de trefilação com a indicação das regiões que a compõem.

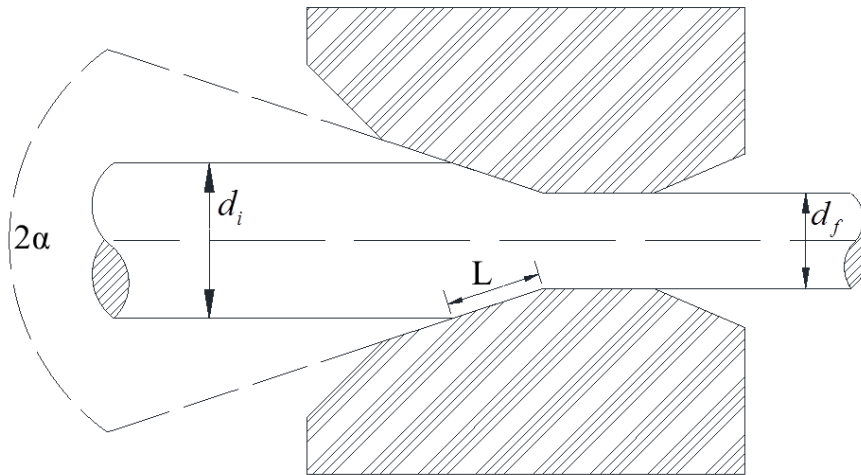


Fonte: Adaptado de (SOARES, 2012).

Como esta ferramenta realiza deformações elevadas nos materiais, ela é composta de modo geral por aços ferramentas de alta resistência mecânica, como metal duro WC, entre outros. Estes materiais geralmente possuem elevadas resistências ao desgaste e altas tensões, mas possuem baixa ductilidade. Portanto, utiliza-se o encapsulamento, observado na Figura 6a como suporte da matriz, para gerar tensões compressivas na região externa da fiavel. Diminuindo-se assim as tensões efetivas (tensões residuais + tensões de serviço) durante o processo de trefilação. Menezes (MENEZES et al., 2017) mostrou que as elevadas tensões trativas de serviço que a ferramenta é exposta durante o processo de trefilação indicam a necessidade da utilização deste recurso. O material mais utilizado para o encapsulamento é um aço médio carbono, geralmente aços ABNT NM GRAU 1045, por sua relação entre resistência mecânica e ductilidade.

As tensões e deformações do processo no material variam conforme o ângulo e a profundidade da região de trabalho. Sabe-se que a região de trabalho é responsável pelos maiores níveis de deformação ocorridos no processo de trefilação. Entretanto, o ângulo da região de trabalho (nível de redução) não é o único fator a influenciar o fluxo de material durante o processamento. Existe uma relação entre o diâmetro médio do material e arco de contato entre a ferramenta e o material, descritos na Equação 1, definida por Wistreich (1958) como o parâmetro Δ . A Figura 7 ilustra os fatores que afetam esta relação. O ângulo que determina a região de trabalho é usualmente tratado com o valor pertencente ao 2α .

Figura 7. Representação das geometrias presentes no processo de trefilação.



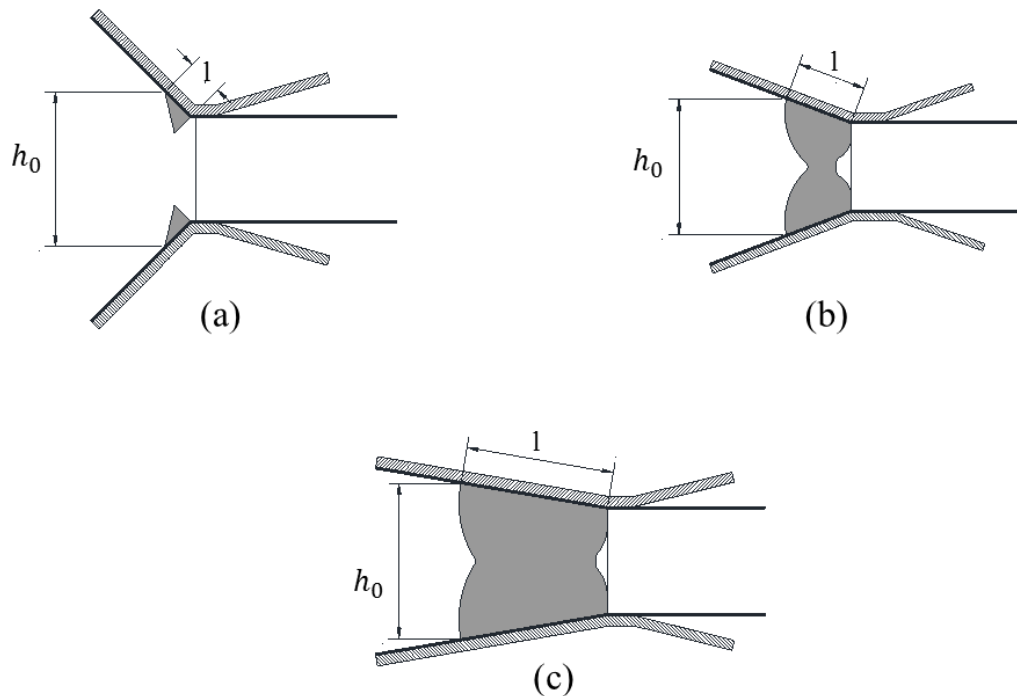
Fonte: Adaptado de WANG (2002).

Equação 1.
$$\Delta = \frac{[1+(1+r)^{\frac{1}{2}}]^2 \operatorname{sen} \alpha}{r}$$

Observa-se, portanto, uma relação inversamente proporcional entre a redução do processo e o parâmetro Δ . Assim como se deduz uma relação direta entre o ângulo da ferramenta e o parâmetro. Uma exemplificação desta relação está apresentada na Figura 8, onde diferentes ângulos de trefilação (representados nos itens a, b e c), para um mesmo diâmetro final, afetam a região de deformações no processo. Na Figura 8a observa-se que um ângulo elevado infere em menores profundidades de deformações, enquanto em ângulos intermediários (Figura 8b) essa profundidade é aumentada e com ângulos baixos, como na Figura 8c, a área deformada se torna consideravelmente maior que em ângulos maiores.

Uma vez que a profundidade de deformações é relacionada às variações no parâmetro Δ , entende-se que o mesmo também possui relação com a formação de tensões residuais no processo de trefilação. Wang (WANG, 2002) indica que para valores baixos do parâmetro Δ , iguais ou menores que 1, observam-se menores tensões residuais no perfil trefilado. Nunes (NUNES, 2012) afirma que para valores do parâmetro Δ acima de 1 o trabalho redundante começa a existir. Isto faz com que ocorra um aumento nas tensões residuais geradas no processo.

Figura 8. Relação entre o comprimento da superfície de contato e a profundidade de deformação no processo de trefilação.



Fonte: Adaptado de NAKAGIRI et al. (2001).

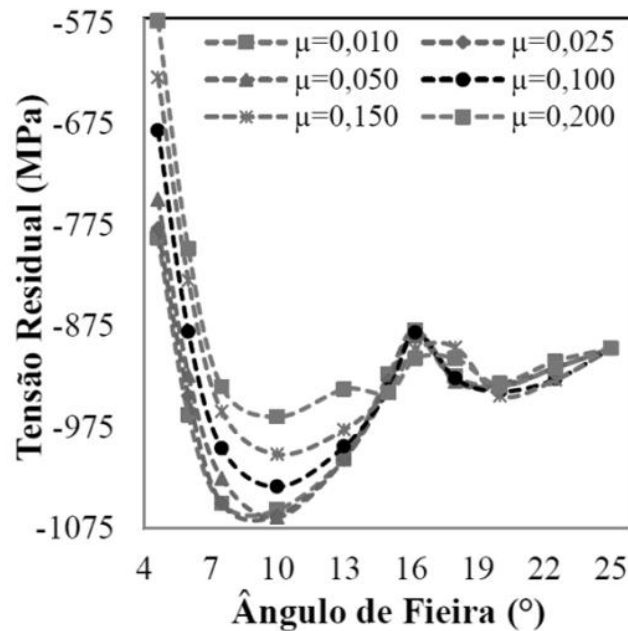
2.2.1.4 ÂNGULO DE FERRAMENTA

Soares (SOARES, 2012) em seu trabalho variou os ângulos de trabalho e o atrito, através de simulações numéricas computacionais, de barras de aço ABNT NM 87 GRAU 1045, obtendo assim as relações entre ângulos de trabalho e tensões residuais com diferentes condições de atrito no processo de trefilação de barras redondas. Seus resultados, apresentados na Figura 9 indicam uma redução nas tensões residuais compressivas no núcleo da barra para o ângulo de 15°. Para ângulos menores que 7° verifica-se também reduções no valor de tensões residuais compressivas, mas isso implica em uma relação de parâmetro Δ desfavorável (l muito longo). Observou-se também que para ângulos menores que 15° a variação nas condições de atrito gera maiores diferenças nas tensões residuais superficiais para um mesmo ângulo, além da modificação da força necessária para a trefilação.

Nunes (NUNES, 2012) utilizou-se de fierras de 15° e 20° para a avaliação dos efeitos destes diferentes ângulos de trefilação em barras de aço ABNT NM 87 GRAU 1045 durante o processo de trefilação combinada. Na Figura 10 são apresentados os perfis de tensões residuais obtidos por Nunes (NUNES, 2012) para as amostras trefiladas com os ângulos de 15° (Figura 10a) e 20° (Figura 10b). Nestes resultados ficam mais claros os efeitos das diferentes profundidades

de deformações realizados pelos diferentes ângulos de trefilação. Para o ângulo de 15° observou-se uma redução nas tensões residuais menos acentuada, enquanto para o ângulo de 20° observaram-se maiores valores de tensões residuais trativas nos primeiros pontos de medições próximos às superfícies. A amostra trefilada com ângulo de 20° (entre -0,5 e 0,5) apresenta também uma maior região com tensões compressivas em comparação a amostra trefilada com 15° (entre -0,4 e 0,4).

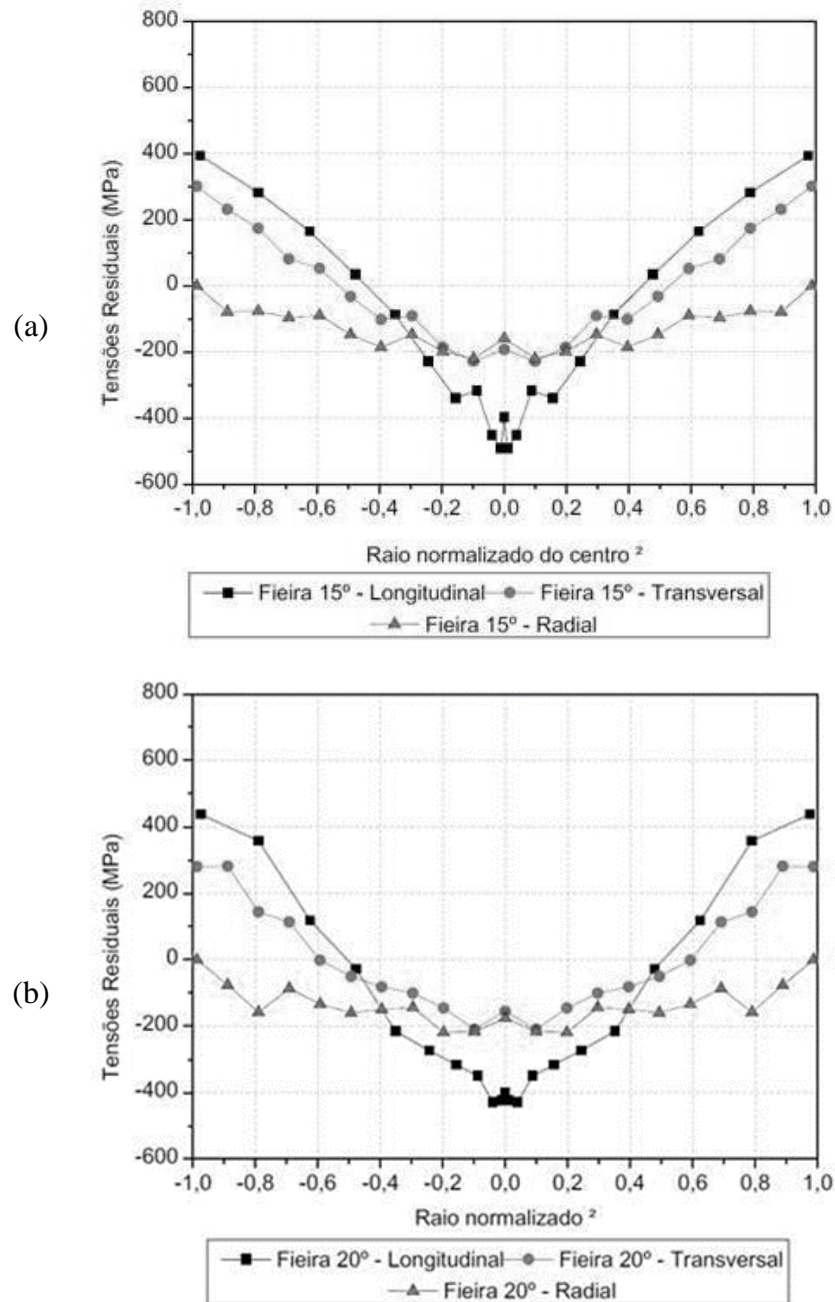
Figura 9. Relação entre tensões residuais superficiais e ângulo de fieira para diferentes condições de atrito obtidas através da simulação numérica computacional.



Fonte: adaptado de SOARES (2012).

Trabalhos mais recentes indicam a utilização de geometrias não convencionais para a realização do processo de trefilação com características mais favoráveis tanto em termos de produção quanto em termos de produto. Souza (SOUZA, 2017) fez uma avaliação abrangente entre diferentes propostas de geometrias alternativas para o processo. Seus resultados indicaram que a utilização de uma fieira com duas regiões de trabalho acrescidas por raios de concordância ou uma fieira com um ressalto na região de calibração gerariam perfis de tensões residuais com menores gradientes. Entretanto, estas configurações aumentariam a força de trefilação necessária para o processo, o que pode gerar maiores custos de produção.

Figura 10. Tensões residuais medidas por difração de nêutrons em amostras trefiladas com ferramentas de ângulos de 15° e 20°.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2012).

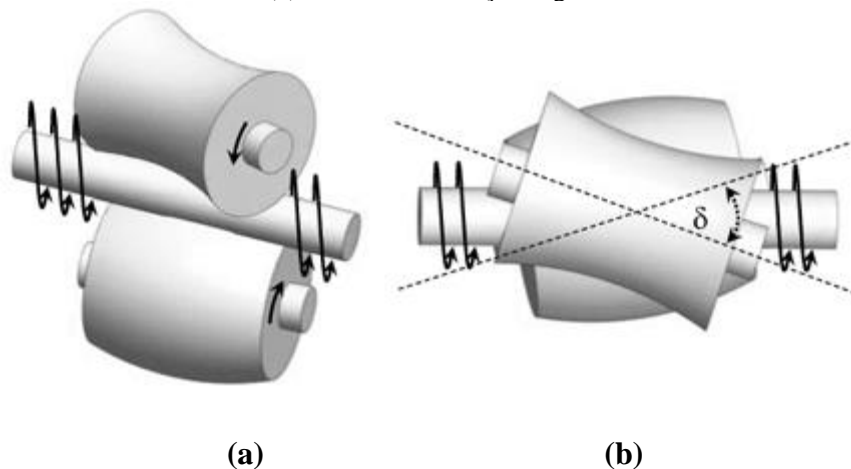
2.2.1.5 POLIMENTO E ENDIREITAMENTO POR ROLOS CRUZADOS (PERC)

O processo de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PERC) é a etapa final do conjunto de processos que formam a trefilação combinada. Neste processo, as barras já cortadas recebem um acabamento pela ação de uma dupla de rolos, sendo um convexo e o outro cruzado que atuam com uma relação angular entre eles, conforme mostrado na Figura 11. Esta relação

angular pode variar entre ângulos de 10° a 20° , sendo este valor dependente das propriedades mecânicas do material a ser processado (NUNES, 2012).

O movimento circular dos rolos permite que a barra seja tracionada e rotacionada sem a necessidade de auxílios externos. Durante o processo, o rolo convexo induz baixas deformações plásticas na superfície do material, servindo como o endireitamento. Enquanto o rolo convexo atua no polimento das barras (YOSHIMURA; DEMIYA; MIHARA, 2009).

Figura 11. Sistema de operação do processo de PERC. Onde em (a) observa-se o ajuste entre os rolos côncavo e convexo com a barra e em (b) observa-se a relação angular de alinhamento dos rolos.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2012).

Embora o equipamento de PERC seja majoritariamente utilizado para o processo de trefilação combinada, o mesmo pode ser aplicado para o polimento e endireitamento de perfis redondos obtidos em outros processos de fabricação. A grande vantagem estratégica deste processo é que além de apresentar um bom acabamento superficial (através do polimento) e um ajuste geométrico, este processo permite a transformação das tensões residuais superficiais de trativas em compressivas (ROCHA, 2008). Para isto, deve-se aplicar a parametrização adequada para o material processado, levando-se em consideração o ângulo entre os rolos e a pressão de contato dos rolos com o material.

2.2.2 Métodos de corte

O processo de corte é uma ação mecânica que visa o seccionamento de um material, ao ultrapassar as tensões de cisalhamento do mesmo, orientado pelo perfil da ferramenta de corte

utilizada. A escolha por um método de corte depende de características físicas do material como dureza, resistência mecânica e temperatura, além de características geométricas desejadas, como precisão dimensional e acabamento superficial.

Para o setor industrial, um dos fatores mais determinantes na escolha do método de corte é a relação entre tempo de processo e tolerâncias dimensionais atendidas. Os métodos de corte mais utilizados para barras são o cisalhamento, através do uso de tesouras ou guilhotinas, corte com serras e discos abrasivos, além do corte a gás.

O método de corte por cisalhamento, com a utilização de guilhotinas ou tesouras é tido como um dos métodos com maior velocidade de execução, embora possua pior acabamento e precisão que os cortes por discos ou serras e cortes a gás. Em processos de fabricação de eixos automotivos os métodos mais comuns são o corte cisalhante e o corte por serra ou disco abrasivo.

2.2.2.1 CORTE POR SERRA

O processo de corte por serra se caracteriza pela ação dos gumes de corte (dentes) contra a superfície do material, cortando-o através do processo de fricção entre os dentes e o material. Sua forma de processamento é semelhante a processos de usinagem como fresamento no fato de ser um corte multi-dentado que promove diversas vantagens como a realização de um corte contínuo, mínima perda de material e variação de velocidades de corte, possibilitando o seccionamento de peças de diversos tamanhos (SAGLAM, 2011).

Serras manuais ou serras mecanizadas são capazes de cortar corpos de aço, desde que as mesmas possuam as propriedades mecânicas minimamente necessárias para a efetuação do corte. Geralmente, as lâminas de corte são fabricadas de aço rápido, permitindo o corte das mais variadas séries de aços. A classificação de serras de corte se dá entre três tipos:

- **Serra Manual:** Utilizada para corte de peças finas e serviços não repetitivos. Recomendam-se lâminas de 32 dentes por polegada para peças com até 1,60 mm de espessura e de 24 dentes por polegada para material com espessura compreendida ente 1,60 e 6,35 mm de espessura. Para espessuras maiores, recomenda-se utilizar lâminas de dentes grossos para facilitar a remoção dos cavacos e prevenir entupimento. Para um

corte suave é necessário manter pelo menos dois dentes em contato constante com a peça a ser cortada.

- **Serra Mecânica:** Utilizada para cortes de seções relativamente grossas em trabalhos repetitivos ou não. O emprego de equipamento motorizado permite cortes mais profundos por amplitude de curso e requer o emprego de lâminas com dentes mais largos, usualmente de 8 a 12 dentes por polegada. A velocidade de corte varia dependendo da potência disponível, do tipo de lâmina e do material a ser cortado. A lâmina deve ser resfriada por mistura de óleos solúveis em água para serviços pesados.
- **Serra Fita:** Largamente utilizada para corte de aços. Executa cortes retos ou com contorno irregular tanto em chapas quanto em barras e tubos. O emprego de lâminas de aços rápidos possibilita maior durabilidade e a utilização de velocidades de corte maiores. Nos modelos mais recentes, operam-se velocidades de corte de 18 a 30 m/min para materiais acima de 1,60 mm de espessura e de 30 a 58 m/min para materiais mais finos.

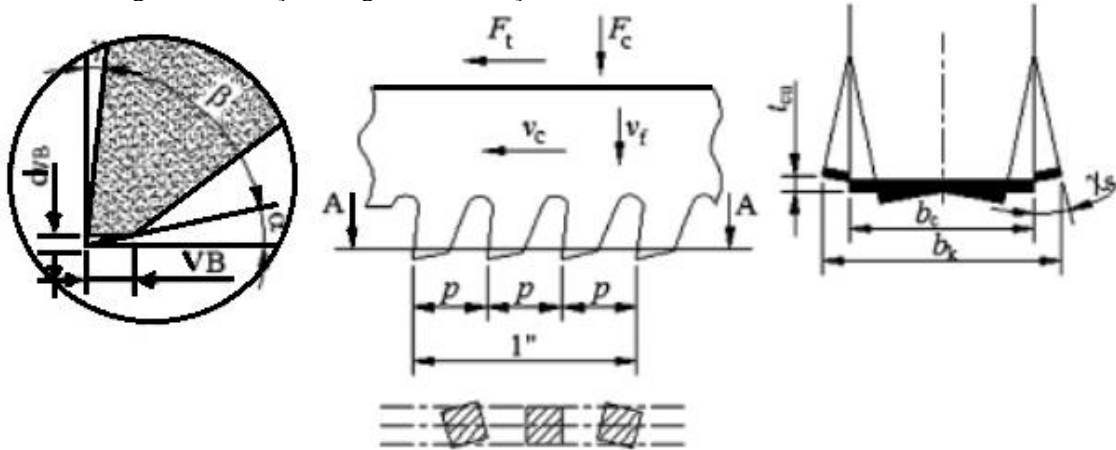
2.2.2.2 *SERRA-FITA*

Embora se assemelhe ao processo de fresamento, não existem tantos estudos sobre os processos de corte com serra, especialmente com uso de serra fitas. Muitos autores trabalharam na determinação das forças de corte envolvidas no processo (SAGLAM, 2011), mas poucos resultados são conhecidos de seus efeitos no material cortado (DIAS, 2013; SAGLAM, 2011).

A serra fita é composta basicamente por uma fita de metal com diversos dentes que realizam o processo de corte disposta sobre dois volantes (discos de encaixe), os quais podem ter a distância entre seus centros ajustada. A forma de ajuste varia conforme marca e modelo de cada fabricante. O deslocamento do volante tem como função tensionar a lâmina de corte, garantindo o seu tracionamento. Este tracionamento é conhecido como tensão de montagem, que mantém a lâmina sobre os volantes durante o funcionamento (SANTINI, 2000). A forma geométrica da aresta de corte (ponta do dente) da serra varia devido ao deslocamento para proporcionar a folga necessária para a parte detrás da lâmina (ANDERSSON; ANDERSSON; STÅHL, 2001). A geometria da serra junto com a necessária terminologia é mostrada na Figura 12. O movimento de fricção entre os gumes de corte e o material gera um conseqüente aumento de temperatura

do sistema serra-material devido ao atrito entre ambos, necessitando inclusive em casos de materiais muito espessos a utilização de fluidos de corte refrigerantes (KO; KIM, 1999).

Figura 12. Relações de geometria, força e velocidades envolvidas no corte com serra.



Fonte: Adaptado de ANDERSSON; ANDERSSON; STÅHL, 2001.

Os modelos de máquinas podem ser diferenciados por diversas características como disposição dos volantes (vertical, horizontal e inclinada), deslocamento relativo entre a serra e o material, tipo de volante e largura da serra. A classificação geral dos modelos segundo as características descritas se apresenta da seguinte forma:

- **Máquina de serra vertical**

As máquinas de serra vertical são amplamente utilizadas para o corte de diversos produtos. São utilizadas no corte de madeiras, chapas de aço e até cortes frigoríficos. Nesta configuração, os volantes estão alinhados verticalmente. O posicionamento da lâmina direciona a inclinação dos dentes da mesma para baixo, na direção da peça a ser cortada. As configurações das mesas de fixação de peças permitem que o corte seja realizado em diferentes direções, permitindo a realização de cortes em curva de geometrias diversas.

- **Máquina de serra horizontal**

Nestas máquinas o alinhamento dos volantes é de forma horizontal. A aplicação deste tipo de máquina se baseia no corte de barras e outras formas de diferentes geometrias e materiais, como aços, metais não ferrosos e madeiras. Nesta configuração, a serra se desloca verticalmente em relação à peça. O movimento é realizado através da ação de cilindros servo-hidráulicos, o que permite a automatização do sistema de corte. Também

são consideradas serras horizontais os equipamentos portáteis, ou seja, que não possuem um sistema de fixação.

- **Máquina de serra inclinada**

As máquinas de serra inclinada são também conhecidas como máquinas de bancada, devido ao seu tamanho e aplicação. Consistem em um volante fixo e o outro móvel e alinhado de forma inclinada, formando um ângulo agudo com relação ao volante fixo. O seu movimento de corte, geralmente, pode ser realizado através do peso do equipamento sobre o produto a ser cortado. Devido à relativa baixa velocidade de corte, o processo não necessita de lubrificação.

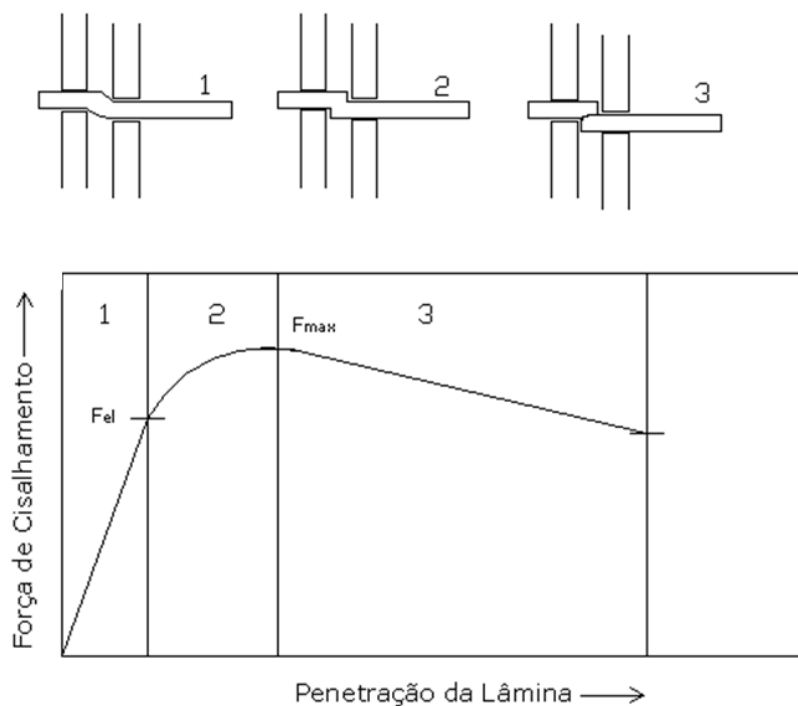
2.2.2.3 CORTE CISALHANTE

O corte de aços por cisalhamento é caracterizado basicamente como ação de duas lâminas de corte sobre um material, onde o movimento entre elas deforma o material até a sua ruptura. Qualquer metal que pode ser usinado pode também ser cisalhado - embora a necessidade de potência aumente com a resistência do metal de trabalho. O design da lâmina é mais crítico e sua vida cai com o aumento da resistência deste metal.

Breitling et al (1997) classificam as etapas de corte de barras por cisalhamento em três diferentes etapas, representadas na Figura 13:

1. Primeiramente, ocorre a deformação elástica do material com a inserção da lâmina.
2. No segundo momento tem início a deformação plástica e fluxo do material na direção de corte e para dentro da folga entre as lâminas. O fluxo do material causa endurecimento por deformação, o que resulta em um aumento da força de cisalhamento até a carga máxima. Neste instante ainda não há cisalhamento.
3. A terceira etapa acontece assim que a pressão nas lâminas aumenta o suficiente - o material para deformar-se e tem início o cisalhamento. Devido à redução da seção de corte a força decai, apesar do endurecimento por deformação. Nesta etapa ocorre a fratura da barra.

Figura 13. Etapas de corte por cisalhamento e evolução da força envolvida.



Fonte: adaptado de BREITLING et al 1997.

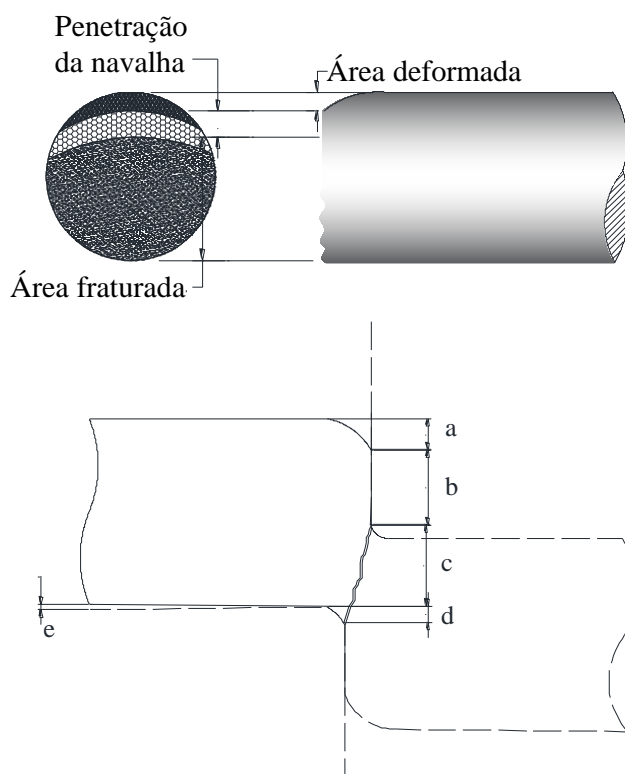
Westerkamp (1998) cita a existência de mais duas etapas, chegando a um total de cinco etapas, ou zonas, mostradas na Figura 14: (a) Zona de arredondamento; (b) Zona cisalhada; (c) Zona fraturada; (d) Rebarba; (e) Empenamento. A zona de arredondamento, que é caracterizada pela região de penetração da navalha, apresenta uma aparência lisa após o corte, diferentemente das outras regiões que apresentam aparência rugosa.

O formato das lâminas de corte interfere diretamente na geometria, acabamento e tensões do material. Lâminas retas podem ser utilizadas para o corte de barras, embora ocorra considerável distorção (zona de empenamento). Além disso, a concentração de tensões é maior quando cisalhado com lâminas retas, especialmente no caso de barras de seção redonda. Lâminas que acompanham a geometria da barra minimizam, mas não eliminam estas características. Geralmente, a configuração da lâmina de corte apresenta um ângulo agudo em relação ao material a ser cortado.

Segundo Westerkamp (1998), a velocidade com que materiais são cisalhados sem efeito adverso pode variar de quase zero até 24 metros por minuto. No entanto, para velocidades acima de 7m/min há dificuldades para evitar que o final da barra “chicoteie”, especialmente para barras com espessura acima de 6,4 mm. Há também uma relação entre a qualidade da superfície

da lâmina, dureza e velocidade. Para barras com dureza acima de 30 HRC, o corte feito com velocidade acima de 15 m/min pode causar trincas e lascas na lâmina (WESTERKAMP, 1998).

Figura 14. Representação dos efeitos do corte cisalhante em uma barra redonda e a determinação das zonas geradas no processo: (a) Zona de arredondamento; (b) Zona cisalhada; (c) Zona fraturada; (d) Rebarba; (e) Empenamento.



Fonte: Adaptado de (WESTERKAMP, 1998).

Outro fator de grande importância na qualidade do corte é o espaçamento ou folga entre as lâminas. Uma folga muito pequena incrementa o desgaste da ferramenta, pois quanto menor a folga, maior a força necessária para o corte. No material, uma folga menor causa uma zona cisalhada maior devido às tensões mais elevadas, o que posterga o início da fratura. Uma folga maior resulta em uma zona de penetração da lâmina maior, e conseqüentemente maior deformação plástica. Isto foi mostrado por BREITLING et al (1997) através de simulação pelo método dos elementos finitos. A determinação correta da folga elimina o surgimento de trincas e melhora o acabamento da superfície de corte. Não há na literatura especificações sobre o dimensionamento exato da folga para barras de seções redondas. O que se tem estabelecido é a utilização de folgas menores para metais mais dúcteis e maiores para metais mais resistentes. No corte de chapas, que é um processo similar, recomenda-se a utilização de folgas de cerca de 4% para metais macios como alumínio e de até 10% para metais resistentes como aço inox.

Outro método é determinar a folga pela divisão da espessura de corte por 20, 16 ou 14, para metais macios, aço médio e aço duro, respectivamente (SCHAEFFER, ROCHA, 2007).

A qualidade da superfície cisalhada é influenciada pelos diversos parâmetros discutidos anteriormente, e a mudança em um destes parâmetros geralmente influencia o efeito de mudanças nos outros parâmetros. Os principais parâmetros utilizados para se avaliar um processo de corte e o ferramental empregado são os seguintes (BREITLING et al., 1997; WESTERKAMP, 1998):

- Estrutura do equipamento e guia das partes móveis para evitar deflexão sobre carga;
- Desenho das lâminas de corte;
- Material das lâminas;
- Folga entre as navalhas de corte;
- Velocidade de corte;
- Apoios ou suportes para evitar que as barras se curvem;
- Temperatura de corte.

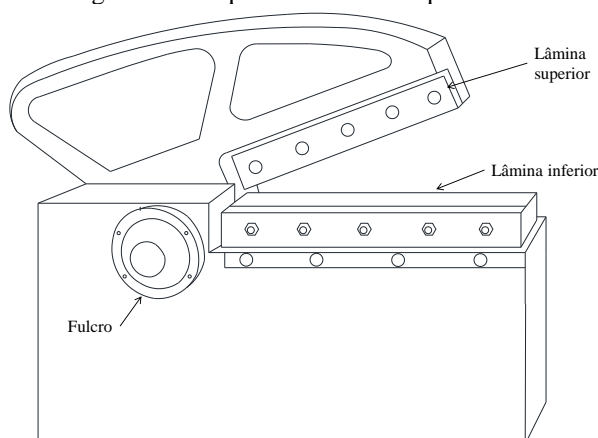
2.2.2.4 MÁQUINAS DE CORTE CISALHANTE

Existe uma grande variedade de equipamentos utilizados para a realização de cortes cisalhantes de barras. Algumas máquinas inclusive podem ser adaptadas de cortes de chapas e outros perfis para o corte de barras. Entre as máquinas de cisalhamento podem-se destacar três principais tipos: Tesoura; Guilhotina; Máquinas de combinação.

Na configuração do tipo tesoura, a lâmina inferior é mantida fixada enquanto a lâmina superior realiza o movimento em forma de arco com relação ao seu fulcro, conforme indicado na Figura 15. A ação de cisalhamento neste caso se assemelha a de uma tesoura convencional. Máximas forças de cisalhamento são geradas nas regiões da lâmina mais próximas ao fulcro e decaem com o afastamento em relação ao mesmo.

O movimento de corte começa com a descida da lâmina em relação ao eixo de rotação até o contato com o material. Com o aprofundamento do corte (deslocamento da lâmina) a área de contato na secção transversal aumenta e, conseqüentemente, aumenta-se a energia gasta, reduzindo a velocidade do corte até atingir-se o limite de ruptura do material. Neste momento, a força da máquina supera o limite de ruptura do metal fazendo com que ocorra a fratura da secção restante.

Figura 15. Máquina de corte do tipo tesoura.

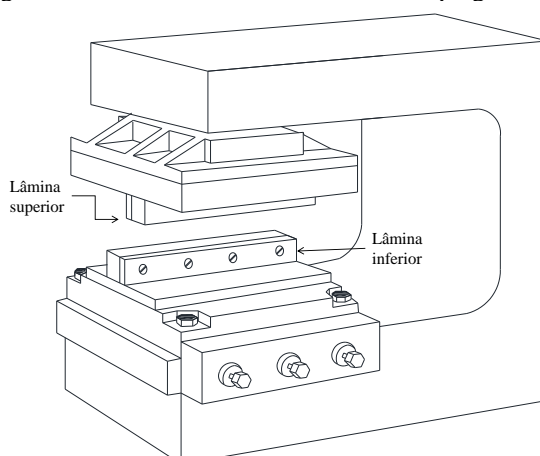


Fonte: Adaptado de (WESTERKAMP, 1998).

As configurações do tipo guilhotina são as mais utilizadas para a realização deste tipo de corte devido a sua versatilidade para a realização de cortes de diferentes perfis de secção transversais. Basicamente são divididas em guilhotinas abertas ou fechadas. No caso de máquinas de corte do tipo guilhotina, o movimento da lâmina ocorre de forma vertical, com o ângulo de corte definido pelo tipo de lâmina utilizada. Na Figura 16 apresenta-se um desenho esquemático de uma guilhotina de corte do tipo aberta em forma de C.

Guilhotinas de corte possuem sistemas de atuação mecânico, hidráulico ou pneumático, onde os sistemas hidráulicos e pneumáticos permitem equipamentos de menores portes. Esta possibilidade permite a utilização de equipamentos completamente portáteis, apesar de apresentarem menores capacidades de forças, de até 90 kN (10 tonf) aproximadamente. Enquanto prensas com maiores capacidades (de 200 a 300 tonf) são consideradas semi-portáteis (WESTERKAMP, 1998).

Figura 16. Sistema de corte cisalhante do tipo guilhotina.



Fonte: Adaptado de (WESTERKAMP, 1998).

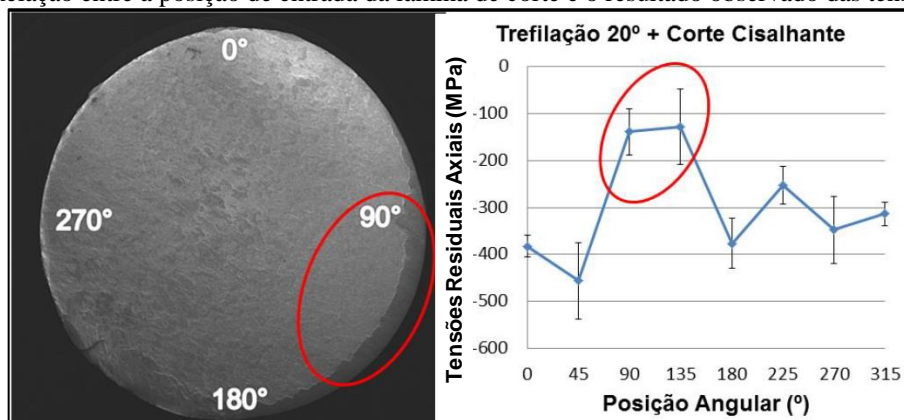
Máquinas de combinação são geralmente utilizadas para produções de menor escala, como pequenas oficinas de fabricação metálica, onde a necessidade de produção de cortes se limita a duas ou três peças por vez com grandes variações de formas e tamanhos. Algumas máquinas inclusive servem para mais processos de conformação de metais. Neste tipo de equipamento as lâminas podem ser trocadas por outros tipos de lâminas e até ferramentas, dependendo das necessidades do operador. Podem-se utilizar lâminas com o formato da secção a ser cortada, como secções quadradas ou circulares, ou então utilizar lâminas retas ou anguladas. O equipamento em si é semelhante a guilhotina, diferenciando-se basicamente na possibilidade de alteração de montagens e ferramentais.

2.2.2.5 TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE CORTE CISALHANTE

Trabalhos prévios (DIAS, 2013) apresentaram os efeitos do processo de corte do tipo tesoura nas características de barras de aço ABNT NM 87 GRAU 1045 apresentando, entre outros resultados, seus efeitos nas tensões residuais. Destaca-se que é possível observar os efeitos das zonas de corte (posições de entrada e saída da lâmina) nos valores das tensões residuais medidos.

Na Figura 17 pode-se verificar o resultado de tensões residuais e sua relação com a superfície cortada, verificada através de Microscopia Eletrônica de Varredura. Observa-se que entre as posições angulares destacadas, as tensões residuais estão com valores menos compressivos. E isto foi verificado para mais de uma amostra. Salienta-se também que as amostras passaram por um processo de polimento e endireitamento na sequência do processo de corte, o que provavelmente modificou as tensões residuais de trativas para compressivas.

Figura 17. Relação entre a posição de entrada da lâmina de corte e o resultado observado das tensões residuais.



Fonte: Próprio autor.

2.2.3 Têmpera por indução

O processo de têmpera por indução se difere de um processo de têmpera convencional devido ao rápido aquecimento provocado pela utilização de uma corrente induzida no material. Apesar de ser comumente utilizado para a realização de têmpera superficial, o processo pode ser utilizado também para a realização de têmpera em toda a secção do material tratado. Este tipo de tratamento tem sido largamente empregado na produção de componentes mecânicos dentro da indústria automotiva, especialmente para aços com baixos teores de carbono (COUPARD et al., 2008).

O aquecimento realizado pelo processo ocorre aplicação de uma corrente alternada em uma bobina (indutor) que envolve a peça estabelecendo um campo magnético concentrado que induz um potencial elétrico, que provoca um fluxo de corrente na peça. O aquecimento da peça se dá pela resistência dela ao fluxo de corrente. Entende-se que o modelo de aquecimento indutivo e a camada aquecida dependam dos seguintes parâmetros (HASSEL; ROSS, 1991):

- Forma da bobina;
- Número de voltas;
- Distância entre a bobina e a peça;
- Frequência;
- Tempo de aquecimento.

Uma das maiores vantagens do processo é a elevação nas propriedades de resistência à fadiga devido ao endurecimento superficial enquanto o núcleo se mantém dúctil. Também é visto como um processo mais limpo que processos como cementação e nitretação gasosa, pois não emite gases poluentes. Outra vantagem é a facilidade de implantação do processo em uma linha de produção devido a sua elevada velocidade de processamento, necessitando de apenas poucos segundos para o completo ciclo de processamento.

A têmpera superficial por indução proporciona um material com elevada dureza superficial aliada com tensões residuais compressivas e um núcleo mais dúctil e com tensões residuais levemente trativas (CANALE; TOTTEN, 2005).

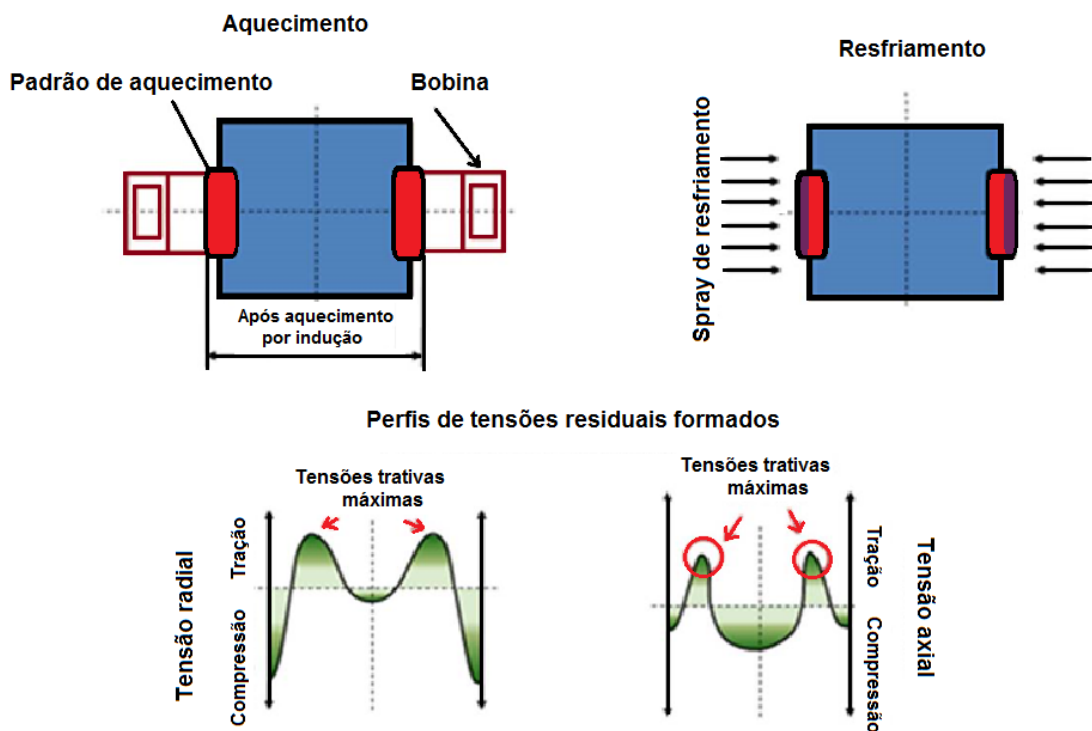
Grum (2002), através da Figura 18, apresenta a distribuição do perfil de tensões residuais esperado para componentes cilíndricos tratados termicamente por indução. Esta configuração (perfil) foi comprovadamente eficaz no aumento da vida em fadiga, dificultando a formação e propagação de trincas. Entretanto, a efetividade do perfil de tensões residuais a ser formado é

dependente do perfil de tensões residuais previamente existentes no material (ROCHA; NUNES; HIRSCH, 2012).

Dependendo do perfil de tensões residuais e da carga externa aplicada, trincas podem ser iniciadas tanto nas proximidades da superfície quanto após a camada endurecida. Portanto, é de extrema importância a determinação dos perfis de tensões residuais de um produto durante o planejamento de sua rota de fabricação.

Por se tratar de processos com variações significativas de temperatura, o tratamento térmico costuma apresentar elevados casos de distorções de forma após a sua realização. Tais distorções são geralmente atribuídas aos “relaxamentos” das tensões residuais distribuídas de forma heterogênea ao longo da peça. Tanto nas secções transversais, quanto nas secções longitudinais.

Figura 18. Processo de aquecimento indutivo e resfriamento utilizado na têmpera por indução e seus efeitos nas tensões residuais.



Fonte: Adaptado de GRUM (2002).

O relaxamento das tensões residuais ocorre devido ao fato do aumento da temperatura na peça, o limite de escoamento da mesma (K_f) é reduzido, fazendo com que regiões do material que possuíam tensões residuais acima deste limite escoem, mesmo que de forma localizada, gerando então deformações de forma (GRUM, 2007).

Outro fator que induz distorções de forma durante o tratamento térmico é o aquecimento heterogêneo da peça. Gradientes de temperatura durante o processo de aquecimento podem também induzir deformações localizadas devido a variações nos limites de escoamento de forma não-uniforme ao longo das seções longitudinais e transversais da peça. PRINZ et al. (2009) indicam que além dos fatores conhecidos de transformações de fases e aquecimento heterogêneo, existe ainda a presença de uma linha de segregação descontraída do centro do material. Efeito que interfere nas temperaturas de aquecimento e transformações de fase, se tornando um potencial de distorções durante o tratamento térmico.

O processo de têmpera por indução, por se tratar de um processo com aquecimento localizado, é tido como um processo de tratamento térmico que apresenta menores distorções em comparação a outros processos semelhantes por causa da sua variação de temperatura ser realizada somente em uma região específica da peça. Mas isso não impede que o processo apresente distorções. Pois mesmo sendo localizado, o aquecimento indutivo ainda pode acarretar nos mecanismos de escoamento apresentados anteriormente. A técnica de rotação da peça durante o processo de têmpera por indução permite uma redução considerável em relação a distorções, pois garante o aquecimento uniforme ao longo da secção transversal.

2.2.4 Retífica

O processo de retífica é tradicionalmente utilizado para o acabamento superficial de componentes aos quais as geometrias desejadas já foram criadas por outras operações de fabricação. Entende-se por acabamento superficial a remoção de irregularidades na superfície do material e deformações originadas em processos anteriores. Trata-se de um processo de remoção de material alcançado através da ação das partículas abrasivas contidas nos rebolos ligados com resina, que rotaciona em alta velocidade (GROOVER, 2010). Estas partículas em alta velocidade entram em contato com o material, ocasionando a sua remoção pelo efeito de abrasão. A definição do processo de retífica se assemelha muito ao processo de fresagem. Entretanto, segundo o autor, apesar destas similaridades, os processos apresentam as seguintes diferenças significativas:

- Os grãos abrasivos no rebole são muito menores e mais numerosos que os dentes da fresa;

- As velocidades de corte (remoção) no processo de retífica são muito maiores que no processo de fresagem;
- Os grãos abrasivos no rebolo são aleatoriamente ordenados e possuem, em média, ângulos negativos de inclinação muito elevados;
- O rebolo se torna auto-afiado quando em uso. Conforme o rebolo se desgasta, as partículas abrasivas que se tornam arredondadas, acarretando na quebra destas partículas ou em seus desprendimentos. Ambos os mecanismos retomam a capacidade de corte da ferramenta.

A ferramenta utilizada no processo, conhecida como rebolo, consiste de partículas abrasivas unidas com a utilização de um agente ligante. Este agente é responsável também pela forma e estrutura do rebolo. O composto formado por estes dois elementos Apesar de ser formado por apenas dois elementos, existem 5 parâmetros determinantes para a fabricação dos rebolos (GROOVER, 2010):

1. Material Abrasivo: A escolha do material abrasivo está relacionada as propriedades do material em que se pretende retificar. Elevada dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e friabilidade são propriedades gerais nas quais a escolha do material abrasivo se baseia.

As propriedades de resistência ao desgaste, dureza e tenacidade são necessárias e desejadas para qualquer processo de corte. Já a propriedade de friabilidade se refere a capacidade do material abrasivo de se quebrar quando o mesmo se torna arredondado e perde a sua condição de corte.

Entre os materiais mais utilizados como abrasivos atualmente está o óxido de alumínio (Al_2O_3), que é o material mais comum para aplicações gerais e possui uma dureza Knoop de aproximadamente 2100. Outros materiais utilizados são carbetos de silício (SiC), nitreto de boro cúbico (cBN), além de diamante, que possui a dureza mais elevada entre eles, em torno de 7000 Knoop.

2. Tamanho de Grão: O tamanho de grão dos materiais abrasivos é importante para a determinação do acabamento superficial e da taxa de remoção. Grãos menores permitem um melhor acabamento, enquanto grãos maiores acarretam em maiores taxas de remoção. Portanto, a escolha deve ser baseada em qual objetivo é mais importante para o processo. Esta escolha também deve considerar a dureza do material a ser retificado. Pois materiais com maiores durezas necessitam de menores grãos abrasivos e o contrário pode ser afirmado para materiais de menores durezas.

3. Materiais Ligantes: Os materiais ligantes servem para a fixação dos elementos abrasivos na roda, além de estabelecerem a integridade estrutural e a forma do rebolo. As propriedades desejáveis englobam dureza, tenacidade e resistência térmica. O material ligante deve suportar as variações térmicas e a força centrífuga sofrida pela roda, resistir à quebra na carga de choque da roda. Além de manter os grãos abrasivos fixados durante o processo de corte e possibilitar, após o desgaste dos grãos, que os mesmos possam ser desalojados e substituídos pelos outros grãos presentes na roda.
Existem diversos tipos de materiais ligantes utilizados na fabricação de rebolo, podendo ser classificados entre: Vítreos; Silicatos; Borrachas; Resinas; Metálicos.
4. Estrutura: A estrutura da roda se refere ao espaçamento dos grãos abrasivos na roda. Esta estrutura é definida pela relação das proporções volumétricas dos elementos envolvidos na composição da roda, determinadas como: P_g = proporção de grãos; P_b = proporção de ligantes; P_p = proporção de poros.
A escala da estrutura é medida entre “aberta” e “densa”, onde uma estrutura “aberta” possui um P_p relativamente alto e um P_g relativamente baixo. Já a estrutura “densa” utiliza um P_p baixo e um P_g alto. Estruturas “densas” são recomendadas para melhores acabamentos superficiais e estruturas “abertas” são recomendadas para situações onde há a necessidade de remoção de cavaco.
5. Grau: O grau da roda é definido pelas características de retenção de grãos abrasivos do material ligante. A sua escala é definida entre “macio” e “duro”, onde o grau “macio” os grãos são desprendidos rapidamente e no grau “duro” os grãos são desprendidos com maiores dificuldades.

O conjunto destes parâmetros define as especificações do rebolo. A norma ISO 525 (2013) abrange todos os parâmetros citados na especificação dos sistemas de composição de um rebolo.

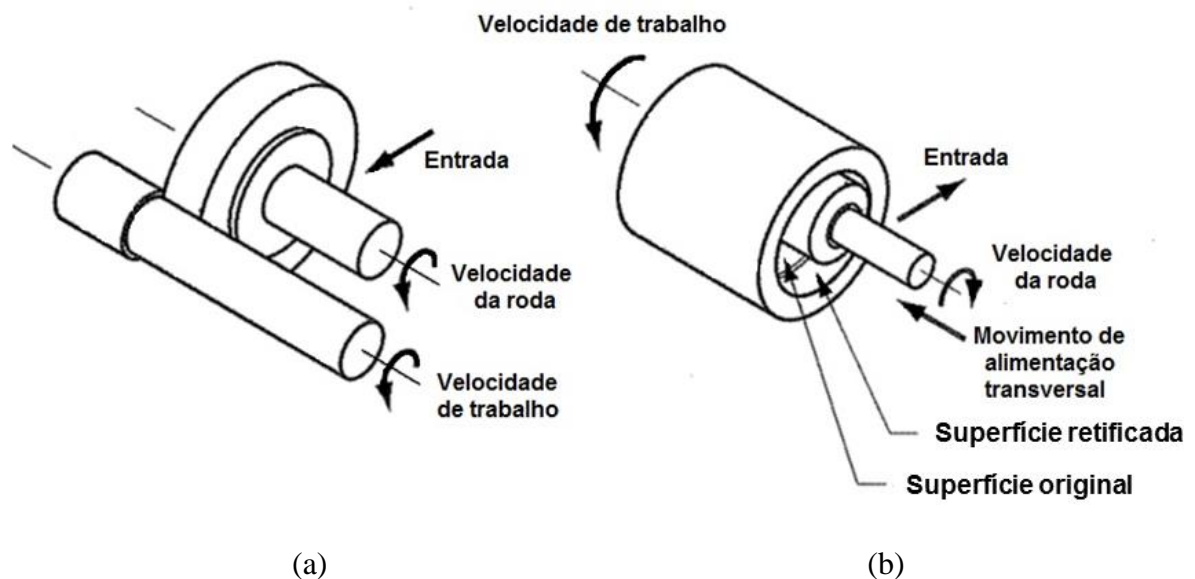
Existem diversos tipos e métodos de utilização do processo de retífica, entre eles são mais comumente utilizados os processos de retífica superficial, cilíndrica e com máquinas sem ponta, centragem espontânea.

O processo de retífica cilíndrica é dividido em dois tipos básicos: retífica externa e retífica interna. O processo de retífica cilíndrica interna é utilizado para componentes cilíndricos para ajustes geométricos em superfícies internas. Geralmente utilizado para acabamentos de superfícies internas de anéis de rolamentos após o endurecimento, o processo de retífica interna opera de forma similar a um processo de broqueamento, onde o rebolo é inserido dentro do furo

e atua na remoção de material da superfície interna, conforme se observa na Figura 19. Como seu diâmetro deve ser menor que o do furo onde vai ser inserido, as velocidades rotacionais da ferramenta devem ser bastante elevadas para atingir as condições de remoção de material necessárias. Os movimentos de avanço da ferramenta podem ser realizados em uma de duas possíveis configurações: avanço transversal (Figura 19) ou avanço de imersão (GROOVER, 2010).

O processo de retífica cilíndrica externa (ver Figura 19a) se assemelha muito ao processo de torneamento, com a diferença do uso de um rebolo no lugar da ferramenta de corte. A peça a ser processada é rotacionada a velocidades superficiais entre 18 e 30 m/min, enquanto o rebolo é rotacionado a velocidades entre 1200 e 2000 m/min para a realização da remoção. Existem dois tipos de direções de avanço possíveis para o processo, o avanço transversal e o avanço de imersão. No sistema de avanço transversal, o avanço ocorre na direção paralela ao eixo da peça trabalhada. O avanço costuma ser entre 0,0075 e 0,075 mm. No movimento de avanço de imersão, o rebolo se movimenta de radialmente em direção à peça. Este tipo de processo é utilizado para acabamento de componentes cilíndricos que foram previamente usinados e tratados termicamente para aumento de dureza desejado. Alguns exemplos de componentes que utilizam este processo para acabamento superficial são eixos automotivos, virabrequins e anéis de rolamento (GROOVER, 2010).

Figura 19. Parâmetros do processo de retífica para: (a) retífica cilíndrica externa e (b) retífica cilíndrica interna.



Fonte: Adaptado de (GROOVER, 2010).

2.2.4.1 TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE RETÍFICA

As tensões residuais induzidas pelo processo de retífica em um componente são principalmente devido a três causas (DING et al., 2017):

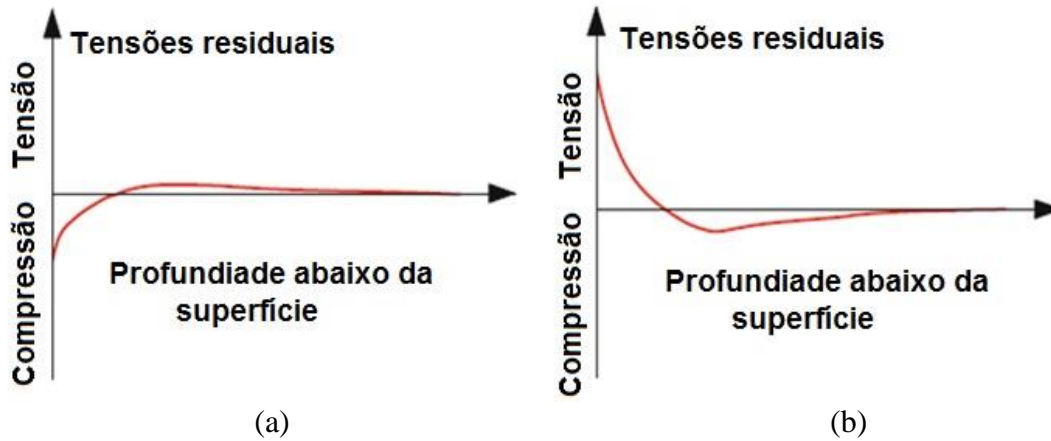
1. Expansões ou contrações térmicas do material retificado;
2. Deformações plásticas devido a abrasão do rebolo;
3. Mudança de volume induzida por transformação de fase localizada (LIU et al., 2015).

Embora o processo de retífica provoque deformações em uma camada superficial consideravelmente pequena, seus efeitos nas tensões residuais podem ser observados em maiores profundidades. Ding (DING et al., 2017) apresenta os padrões mais típicos de distribuição de tensões residuais nas regiões próximas a superfície em processos de retífica. No padrão I, apresentado na Figura 20a, observa-se que a distribuição de tensões residuais é induzida somente pelas deformações plásticas do processo e se apresenta de forma compressiva nas regiões próximas a superfície. As tensões residuais mostradas pelo padrão II, apresentado na Figura 20b, são originadas pelas deformações plásticas termicamente induzidas. Este padrão geralmente apresenta tensões residuais trativas próximo à superfície.

Outras duas variações do mesmo padrão 3 são atribuídas a efeitos de transformações de fase durante o processo de retífica e estão apresentados nas Figura 21a e Figura 21b. Se a densidade da fase transformada pela ação do processo é superior a densidade original do material, o padrão IIIa segue o apresentado na Figura 21a com tensões trativas. Isto ocorre pelo fato da nova fase tende a reduzir o volume do material, enquanto a sua matriz (material não afetado pelo processo) tende a reter a dimensão original. Entretanto, para o caso da densidade ser menor que a original do material, o padrão IIIb, apresentado na Figura 21b se aplica. Neste caso a região afetada tende a expandir, enquanto a região não afetada restringe sua deformação.

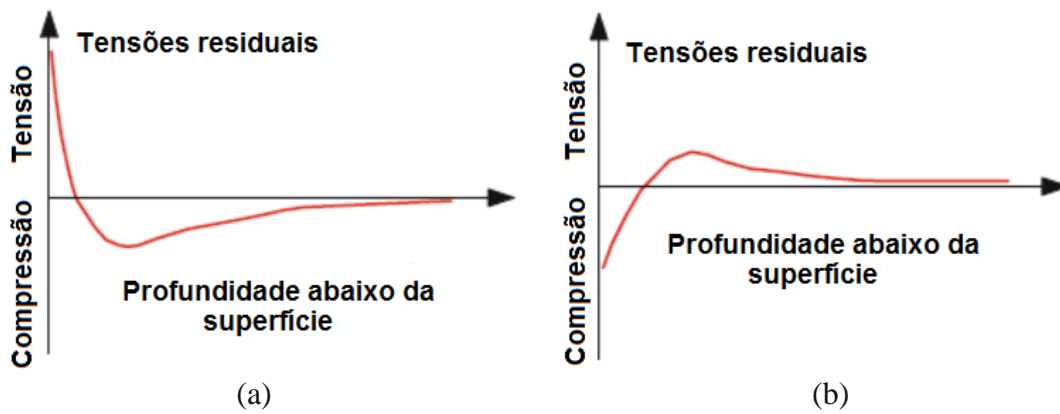
Diversos outros fatores, como as características do rebolo, técnicas de dressamento, parâmetros de processo, condições de resfriamento e propriedades do material a ser retificado afetam consideravelmente as tensões residuais do produto final. Em alguns casos a relação encontrada é direta e pode ser quantificada, como o estudo apresentado por Vashista et al (VASHISTA et al., 2010), onde os autores descrevem uma relação quase linear entre as temperaturas atingidas pelo processo e a redução das tensões residuais compressivas.

Figura 20. Tensões residuais geradas no processo de retífica nas condições definidas como: (a) Padrão I e (b) Padrão II.



Fonte: Adaptado de (DING et al., 2017).

Figura 21. Tensões residuais geradas no processo de retífica nas condições definidas como (a) padrão IIIa e (b) padrão IIIb.



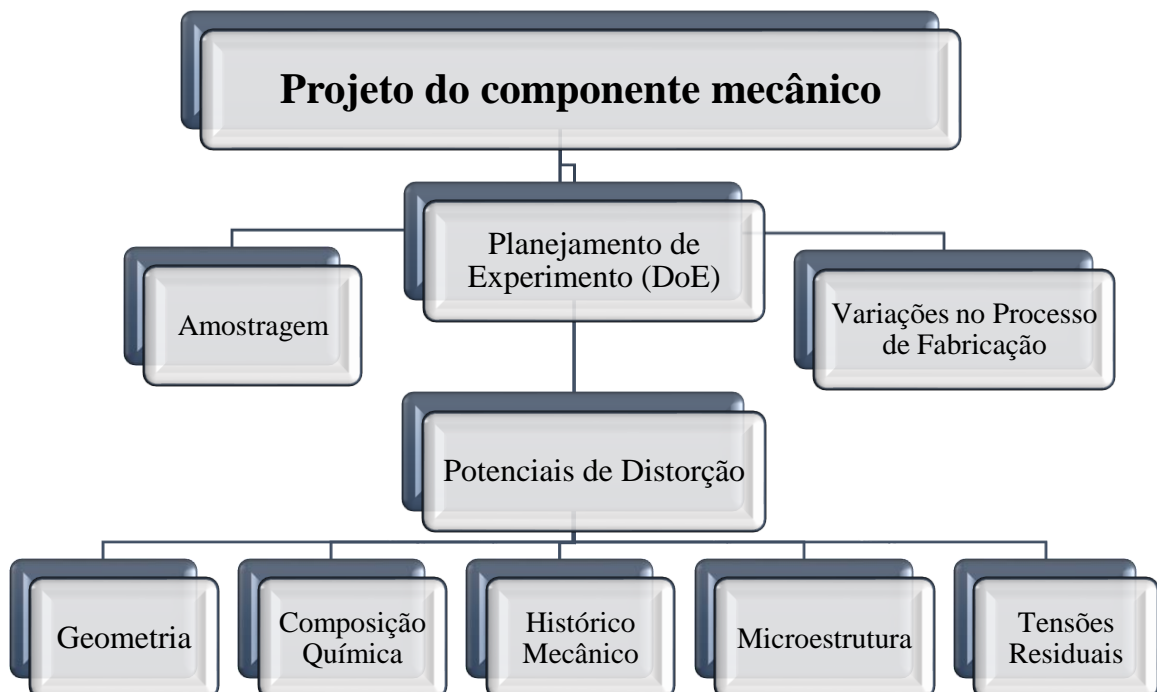
Fonte: Adaptado de (DING et al., 2017).

3 METODOLOGIA GERAL

Neste capítulo serão explicados os procedimentos adotados para a investigação proposta na tese. A Figura 22 indica um fluxograma da metodologia geral aplicada nesta investigação. O primeiro passo foi a criação do projeto do componente mecânico a ser fabricado, isso envolve as definições de geometria e rota de fabricação utilizada. A segunda etapa se dá através da criação de um DoE baseando-se na rota definida. Neste momento são definidas as etapas da rota de fabricação a serem estudadas e quais parâmetros serão variados, além disso, são definidos os métodos de amostragem, determinando-se a quantidade de amostras e o sistema de referenciamento guiado utilizado. Por fim, serão apresentados os ensaios utilizados para a análise dos potenciais de distorção avaliados, sendo eles: Geometria; Composição Química; Histórico Mecânico; Microestrutura; Tensões Residuais.

Após a análise dos resultados obtidos através dos ensaios, combinados com o estudo estatístico do DoE, observou-se a existência de variações que poderiam influenciar a distorção apesar de não serem originadas pelas variações utilizadas na rota de fabricação escolhida. Estes acontecimentos foram nominados como “variações não-controladas” e a metodologia para avaliação de como estas variações poderiam afetar as distorções também é apresentada neste capítulo.

Figura 22. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.



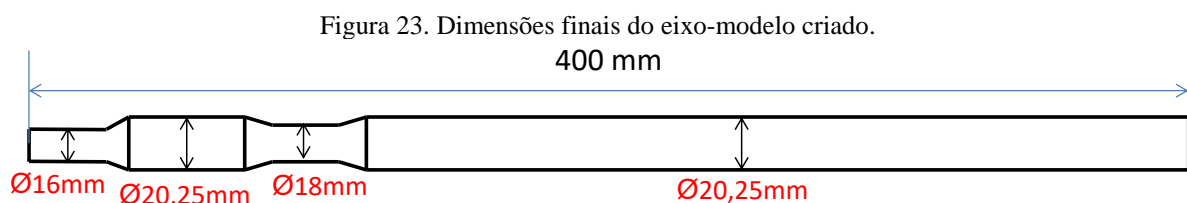
Fonte: Próprio autor.

3.1 PROJETO DO COMPONENTE MECÂNICO

A pesquisa teve como base a utilização de um “eixo-modelo” inspirado em trabalhos anteriores (LEMOS, 2012; NUNES, 2012) obtido através do processo de trefilação combinada com diâmetro de 20,25 mm (semelhante a NUNES, 2012), com um comprimento intermediário entre Nunes (2012) com 200 mm e Lemos (2012) com 730 mm, simulando assim as geometrias de um semieixo automotivo.

Portanto, as definições da geometria do eixo em relação aos trabalhos citados (NUNES, 2012 e Lemos, 2012) começam pela determinação de um comprimento de 400 mm. A escolha deste comprimento atende não só ao fato de eixos e semieixos automotivos possuírem comprimentos semelhantes, mas também ao fato de que aumentando-se o comprimento das barras em relação à pesquisa de Nunes (2012), as distorções com relação a curvatura apresentarão maiores magnitudes. Diminuindo-se assim a influência dos erros associados as medições.

A segunda adição ao desenho foi de adicionar dois rebaixos (entalhes) em uma das pontas do eixo. Com diâmetros de 16 mm (ponta) e 18 mm (corpo do eixo) para replicar efeitos de rebaixos que são comumente utilizados neste tipo de componente para acoplamento com outros elementos mecânicos como rodas e engrenagens, por exemplo. Para o processo de tratamento térmico foi escolhida a têmpera por indução seguida por revenimento em forno sem atmosfera controlada. Por fim, optou-se pelo processo de retífica como forma de redução/correção do empenamento. O resultado do desenho de projeto é apresentado de forma esquemática na Figura 23 contendo as dimensões finais.



Fonte: Próprio autor.

A rota de fabricação de eixos avaliada baseou-se em uma rota de produção convencional, dividido em dois grandes grupos, produção de barras longas e a manufatura final do eixo. A parte de produção das barras longas inicia-se no processo lingotamento contínuo e vai até a

obtenção de barras longas de 6 metros de comprimento, passando por etapas de laminação a quente, bobinamento do fio-máquina e trefilação combinada. A etapa de manufatura do eixo consiste nos processos de fabricação que, geralmente, são realizados fora das siderúrgicas, após o recebimento das barras longas.

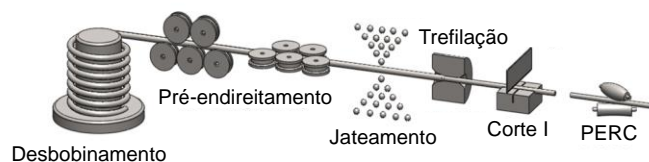
A rota estudada neste projeto não leva em consideração as etapas anteriores ao processo de trefilação combinada (lingotamento, laminação à quente e bobinamento) utilizando-se, portanto, das seguintes etapas:

- Desbobinamento;
- Pré endireitamento;
- Jateamento;
- Trefilação;
- Corte Inicial;
- Polimento e endireitamento por rolos cruzados (PERC);
- Corte Final;
- Usinagem;
- Têmpera por indução;
- Revenimento;
- Retífica.

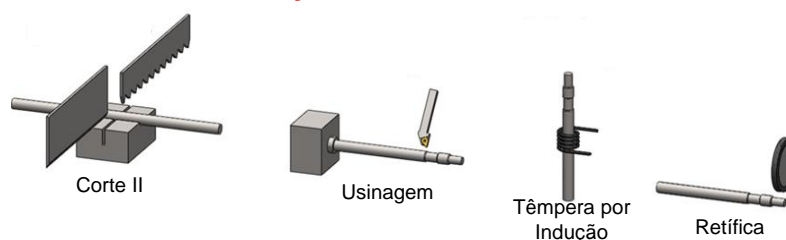
Um desenho esquemático da rota de fabricação geral estudada está apresentado na Figura 24, bem como a distinção entre a as etapas de fabricação a partir do fio-máquina e a etapa de fabricação do eixo-modelo.

Figura 24. Rota de fabricação utilizada para a pesquisa.

Rota de Fabricação a partir do Fio- Máquina



Fabricação de um "Eixo-modelo".



Fonte: Próprio autor.

3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

Como forma de se avaliar os efeitos das etapas de fabricação na distorção, foram realizadas variações em diferentes processos da cadeia através de um planejamento de experimento (DoE) de quatro processos com duas variáveis cada (modelo 4^2). Para a realização de um planejamento de experimento necessita-se que sejam determinadas as variações em que se acredita que causarão maior e menor efeito na resposta. A Tabela 1 apresenta um resumo dos processos e suas variações adotadas, bem como indica qual a variável esperada para causar maiores distorções (+) e menores distorções (-).

Tabela 1. Processos, parâmetros e variações utilizadas no planejamento do experimento.

Processo	Parâmetro	Variações	
		-	+
Trefilação combinada	Ângulo de fieira (2α)	15°	20°
Corte Final	Método de corte	Serra	Guilhotina
Têmpera por indução	Camada endurecida	1,2 mm	2,2 mm
Retífica	Profundidade de remoção	200 μm	100 μm

Fonte: Próprio autor

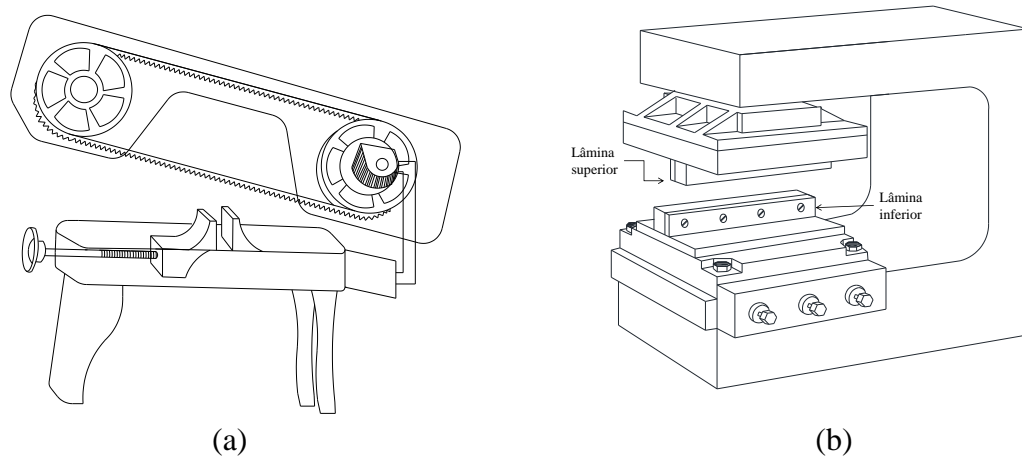
O resultado do processo de trefilação combinada foi avaliado como uma etapa única, considerando-se que esta parte do processo geralmente é realizada em uma siderúrgica, enquanto as etapas subsequentes são realizadas por indústrias de componentes automotivos. Esta etapa da cadeia foi chamada de “Rota de fabricação de barras semiacabadas”. Neste conjunto variou-se o ângulo de trefilação, pois o mesmo apresentou a maior significância em estudos prévios sobre estes processos (HIRSCH, 2014; NUNES, 2012). Os ângulos de trabalho utilizados foram de 15° e 20°, sendo o primeiro um valor calculado como indicado para um estado de tensões mais homogêneas (SOARES, 2012) e o segundo é um ângulo de trabalho utilizado comumente por empresas que utilizam este tipo de processo.

O segundo processo a ser avaliado foi o Corte Final, onde se escolheu variar o método de corte utilizado entre um corte com o uso de serra-fita rotativa e um corte com prensa hidráulica, tipo guilhotina, com a ação de uma lâmina vertical realizando um corte cisalhante. A escolha do corte com prensa hidráulica se deu pela velocidade do corte e pelo fato de ser muito utilizado no processo de fabricação de geratrizes. Já a escolha pelo uso da serra-fita se deu pelo fato de

apresentar melhor acabamento superficial e menores deformações geométricas na região cortada. Como forma de se manter uma uniformidade na realização dos cortes, todas as amostras foram posicionadas de forma idêntica para a realização dos cortes, utilizando-se de um sistema de orientação guiada como referência, com o ângulo de referência 0° voltado para a parte de cima. As amostras cortadas com serra-fita serão referidas a partir deste ponto como “serra” e as amostras cortadas com o uso da prensa hidráulica como “guilhotina”.

Na Figura 25a é apresentada uma representação esquemática do equipamento de corte com serra-fita, enquanto na Figura 25b se apresenta uma representação esquemática do corte com guilhotina.

Figura 25. Representação esquemática dos processos de corte utilizados. (a) Serra-Fita; (b) Guilhotina.



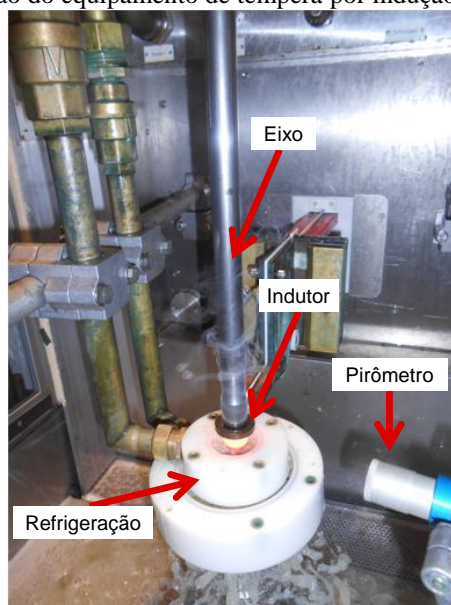
Fonte: (a) Próprio autor e (b) adaptado de WESTERKAMP (1998).

A terceira etapa foi o tratamento térmico superficial, onde foi variada a profundidade de camada endurecida. Foram determinadas as profundidades de 1,2 mm e 2,2 mm, a primeira profundidade semelhante a pesquisa realizada por Nunes (2012) e a segunda foi escolhida com o objetivo de verificar o efeito de uma camada maior. Para este procedimento, foi utilizado um equipamento de têmpera por indução de escaneamento SINAC 200/300 S FMC (EFD) pertencente ao IWT-Bremen, apresentado na Figura 26. Observa-se que o equipamento possui um pirômetro acoplado, medindo a temperatura de austenitização antes dos chuveiros de resfriamento.

Conforme a literatura (TOTTEN; INOUE; HOWES, 2002), diversos fatores podem alterar a camada endurecida. Portanto, variou-se apenas a potência do equipamento de forma a obter diferentes profundidades de camada. Para a camada endurecida menor, com no mínimo 1,2 mm

de profundidade, a potência utilizada variou 52% e 55% da potência máxima de 200 kW. Enquanto para a camada maior, de no mínimo 2,2 mm, esse parâmetro variou entre 63% e 68%. Os outros parâmetros foram mantidos constantes, conforme pode ser observado na Tabela 2. Após a têmpera por indução, todas as amostras, independentemente da profundidade de camada endurecida, foram revenidas em forno de resistência elétrica em uma temperatura de 170 °C durante 120 minutos.

Figura 26. Ilustração do equipamento de têmpera por indução durante o processo.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo de têmpera por indução.

Parâmetro	Valor (unidade)
Diâmetro do indutor	22 (mm)
Velocidade de rotação	500 (RPM)
Frequência	12,1 (kHz)
Corrente	500 (A)
Vazão Chuveiro 1 (40 mm de diâmetro)	7 (l/min)
Vazão Chuveiro 2 (100 mm de diâmetro)	30 (l/min)

Fonte: Próprio autor.

A última etapa de fabricação avaliada foi o processo de retífica para remoção/correção de empenamento. A escolha do método de remoção deve considerar a qualidade das propriedades mecânicas do produto final, e a presença de tensões residuais trativas na superfície de um componente mecânico é prejudicial ao seu desempenho. Kristoffersen (KRISTOFFERSEN et al., 2011) e Lemos (LE MOS, 2012) mostraram que a utilização de métodos de conformação mecânica (dobramento) para a redução da curvatura (endireitamento) em eixos pode resultar em tensões residuais trativas em certas posições da superfície. Portanto, optou-se pela utilização

do processo de retífica (retificação) objetivando-se a redução das curvaturas finais dos eixos fabricados. Neste processo foram variadas as profundidades de passe com o valor mínimo de 100 μm e o máximo de 200 μm . A determinação das profundidades escolhidas foi baseada em uma avaliação das curvaturas médias dos eixos após o tratamento térmico.

A análise estatística dos resultados das variações utilizadas através do Planejamento de Experimento foi realizada com o auxílio do software MINITAB®. O software utiliza a distribuição t de Student (efeito com variável desconhecida) para a avaliação dos dados de distorção. Os efeitos das variáveis utilizadas foram calculados para uma significância estatística com $\alpha = 0,02$ (98%).

3.3 AMOSTRAGEM

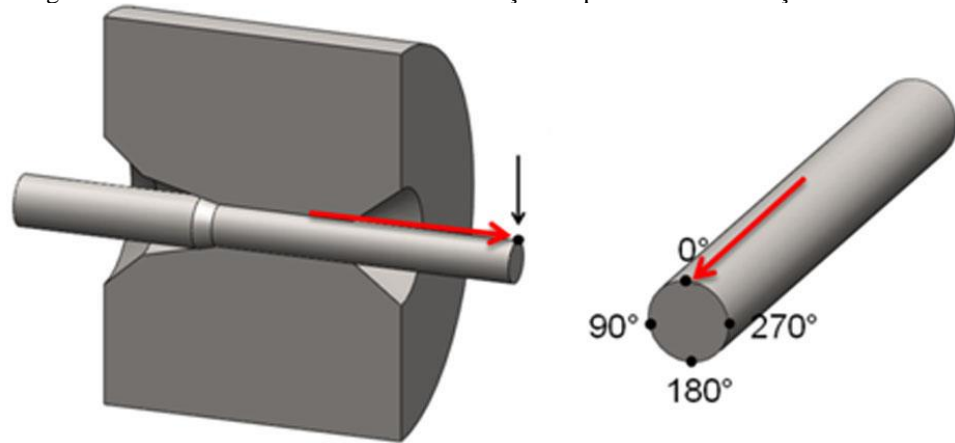
A realização de um planejamento de experimento (DoE) com quatro processos e duas variáveis em cada um deles acarreta uma amostragem de 16 resultados combinados diferentes. Para uma análise estatística aceitável, são necessárias em torno de 5 amostras por combinação. Tornando-se necessário, neste caso, uma quantidade mínima de 80 amostras. Como alguns ensaios realizados necessitam de longos períodos de análises e outros demandam o corte das amostras e, além disso, as etapas de fabricação serão avaliadas também, é necessário aumentar a quantidade de amostras fabricadas. Considerando todos estes fatores, foram fabricadas dez (10) amostras para cada parâmetro avaliado, totalizando 160 amostras para a realização da pesquisa.

Durante o processo de fabricação das amostras, uma medida que se torna crucial para as análises futuras é a determinação de um ponto de referência no processo de fabricação, ou seja, um sistema de referenciamento guiado que permita a realização de comparações entre diferentes etapas do processo e seus efeitos na distorção. Thoben (2002) define que a utilização de um sistema guiado é essencial para a análise de distorções.

Neste sistema, adotou-se o processo de trefilação como o referencial, uma vez que somente após o mesmo o fio-máquina é cortado em barras, podendo, portanto, sofrer mudanças em seu posicionamento em outras etapas. Foi determinado que a posição superior da fieira fosse o referencial 0°. Somado a direção de trefilação é determinado que as posições periféricas (ângulos) variem de forma anti-horária (utilizando a regra da mão direita), conforme mostrado

na Figura 27. Com isso, todas as barras utilizadas foram marcadas com uma seta apontando a posição de referência, bem como a direção de trefilação.

Figura 27. Referenciamento utilizado em relação ao processo de trefilação.



Fonte: Próprio autor.

Cada método de avaliação necessita de um tamanho específico de amostra, portanto os tamanhos das amostras retiradas serão descritos quando necessários. Salienta-se que uma vez que o processo de trefilação combinada foi considerado como uma etapa só da fabricação, ou seja, como o material é recebido pela empresa que fabrica o eixo, a retirada de amostras ocorre após a última fase do processo, o PERC.

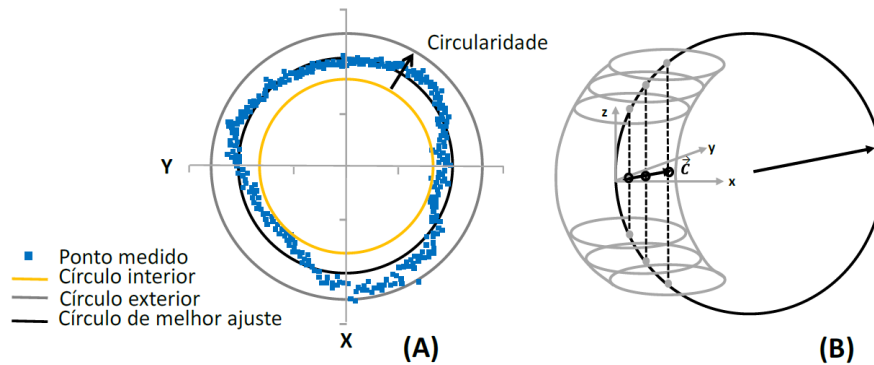
3.4 MEDIÇÕES DIMENSIONAIS

Existem diferentes formas em que as distorções podem se manifestar em componentes mecânicos, conforme descrito no capítulo 2.1.1. A forma de distorção mais prejudicial e mais comum a eixos automotivos é a curvatura, também conhecida como empenamento. Portanto, serão avaliadas as curvaturas das barras após cada etapa de fabricação. Essas avaliações só podem ser realizadas após a usinagem dos eixos, uma vez que antes desse processo de usinagem as barras possuem 6 metros de comprimento.

As medições dimensionais foram realizadas com o equipamento de medições tridimensionais por coordenadas por contato. Foram realizadas medições de 20 contornos ao longo das barras. Cada contorno consiste na medição de 360 pontos (posições periféricas) ao redor da barra, resultando em uma varredura de seu perímetro. Após a medição de cada contorno, é calculado

o círculo de melhor ajuste obtido através dos resultados obtidos, conforme representação apresentada na Figura 28a. A partir destes círculos de melhor ajuste, são determinados os centros de cada posição medida. O vetor curvatura do eixo é obtido através da utilização do método dos mínimos múltiplos quadráticos, realizando-se as projeções destes pontos no plano X-Y, conforme indicado na Figura 28b.

Figura 28. (a) Representação do círculo de melhor ajuste conforme posição dos pontos de medição. (b) Representação física do cálculo de determinação do vetor curvatura.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2012).

3.5 POTENCIAIS DE DISTORÇÃO

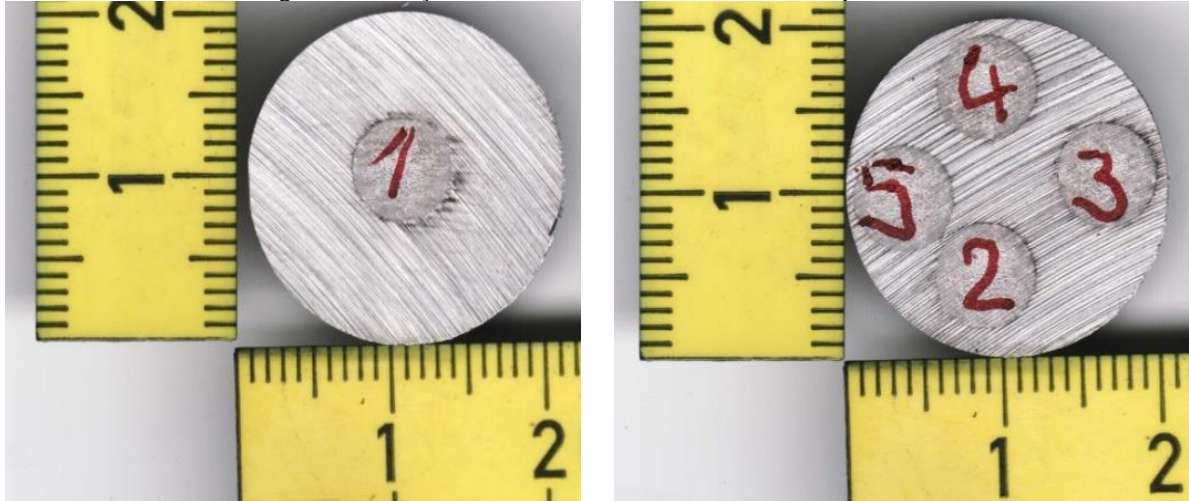
3.5.1 Análise Química

Primeiramente, foi retirada uma amostra de material diretamente da barra após o processo de trefilação combinada com comprimento de 20 mm. Na secção transversal destas amostras, foram realizadas análises de espectrometria por emissão ótica em diferentes posições da peça, conforme indicado na Figura 29. A avaliação de diferentes posições da amostra permite determinar se há variação na composição química ao longo da secção da amostra. Salienta-se que os ensaios foram realizados somente para uma amostra, pois todas as barras foram fabricadas com o mesmo fio-máquina. Portanto, espera-se que a composição química se assemelhe ao longo de todo o comprimento da barra.

Complementarmente, realizou-se uma avaliação através do equipamento de microsonda eletrônica (Electron Probe Microanalysis - EPMA), o qual realiza uma varredura de uma determinada região na secção longitudinal e determina a concentração de elementos químicos específicos nesta região. Foram avaliados os percentuais de carbono (C) e manganês (Mn) presentes na amostra como uma forma de caracterizar a segregação presente na mesma. A

segregação é uma ocorrência comum para este tipo de aço, e sua formação e posicionamento pode variar conforme o processo de resfriamento do mesmo. Para isto, foi cortada uma secção longitudinal da amostra de 20 mm e a varredura em uma linha de um lado ao outro da amostra (0° a 180°).

Figura 29. Posições onde foram realizadas as análises químicas.



Fonte: Próprio autor.

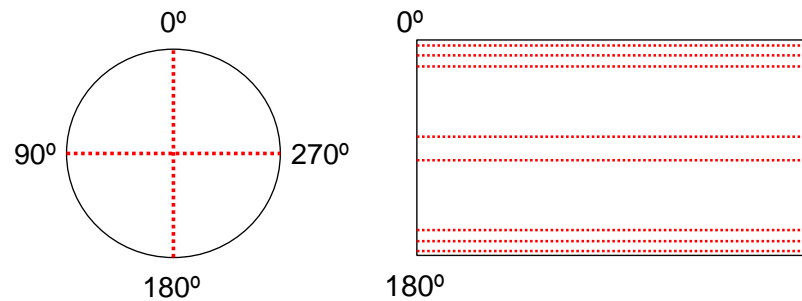
3.5.2 Metalografia e Dureza

O processo de análise metalográfica seguiu uma metodologia básica de avaliação microestrutural. As amostras foram cortadas em pequenos segmentos com comprimentos de 10 e 30 mm para as análises das secções transversais e longitudinais, respectivamente. Os cortes longitudinais respeitaram os ângulos de referência e, em geral, foram aplicados a posição 0° - 180° . Após o corte, as amostras são lixadas por uma série de lixas entre 80 e 1200 *mesh*, foram polidas com pasta de diamante de 2 e 4 μm e atacadas quimicamente com nital 4% para a revelação microestrutural. Para sua avaliação, utilizou-se microscopia óptica e macrografias para as avaliações das regiões de interesse.

As medições de dureza foram realizadas posteriormente às análises metalográficas utilizando-se das mesmas amostras. Para as amostras da secção transversal foram realizados perfis de dureza Vickers com cargas de 0,1 kgf, 0,5 kgf e 1 kgf em linhas entre os ângulos de referência 0° - 180° e 90° - 270° , conforme esquematizado na Figura 30. Já para as secções longitudinais, os perfis foram realizados de forma longitudinal com diversas distâncias em relação às bordas

da amostra. Estas linhas avaliadas estão representadas na Figura 29 e foram realizadas entre os ângulos de 0° e 180° .

Figura 30. Representação das posições de perfis de medições de durezas nas secções transversais e longitudinais.

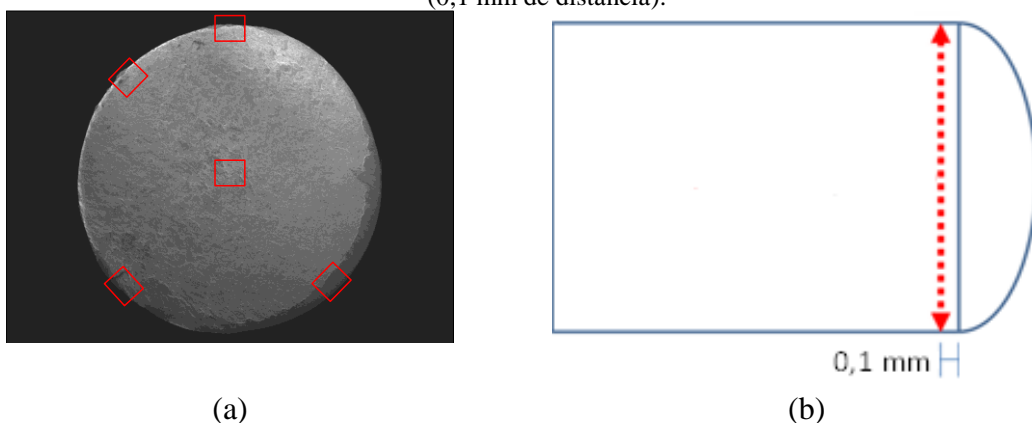


Fonte: Próprio autor.

Para as amostras dos diferentes métodos de cortes torna-se necessário a realização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para a caracterização da superfície cortada. Para isto, analisaram-se as zonas características do corte cisalhante, e comparadas com a região equivalente do corte com serra, conforme indicado na Figura 31a.

Com relação a avaliação de dureza, foram realizadas medições próximas a superfície cortada (0,1 mm de distância) após o corte longitudinal da amostra entre os ângulos de 0° e 180° , indicado pela linha tracejada no desenho esquemático apresentado na Figura 31b.

Figura 31. (a) Posições analisadas no MEV e (b) posições de medições de dureza próximo as superfícies cortadas (0,1 mm de distância).



Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Tensões Residuais

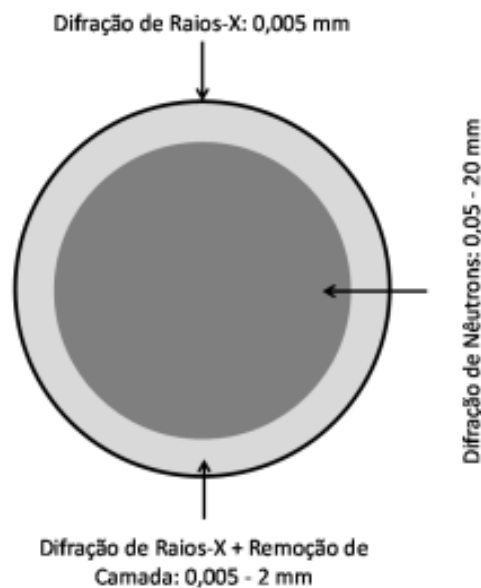
Para as análises de tensões residuais foram utilizados dois métodos complementares Difração de Raios-X e Difração de Nêutrons. Cada uma das técnicas apresenta vantagens e limitações para o seu uso, principalmente com relação ao alcance (profundidade).

A técnica de Difração de Raios-X tem como vantagens a velocidade de medição e a facilidade de acesso a equipamentos que realizem o ensaio. Suas limitações consistem principalmente no fato da baixa penetração dos raios-X permitirem apenas medições nas regiões superficiais. Esta técnica somada à técnica de remoção eletrolítica de material pode ampliar a região de análise das tensões residuais. Além disso, com a remoção de camadas, a técnica se torna destrutiva.

A técnica de Difração de Nêutrons possui uma alta penetração, o que a torna vantajosa para a realização de medições de perfis completos (em toda a secção) de tensões residuais. Entretanto, a difração de nêutrons possui limitações com medições próximas as superfícies, tornando-se necessária a utilização de técnicas complementares como a Difração de Raios-X.

A Figura 32 apresenta uma representação das diferentes profundidades alcançadas com cada técnica.

Figura 32. Representação esquemática das profundidades de penetração das diferentes técnicas de avaliação de tensões residuais utilizados.



Fonte: Próprio autor.

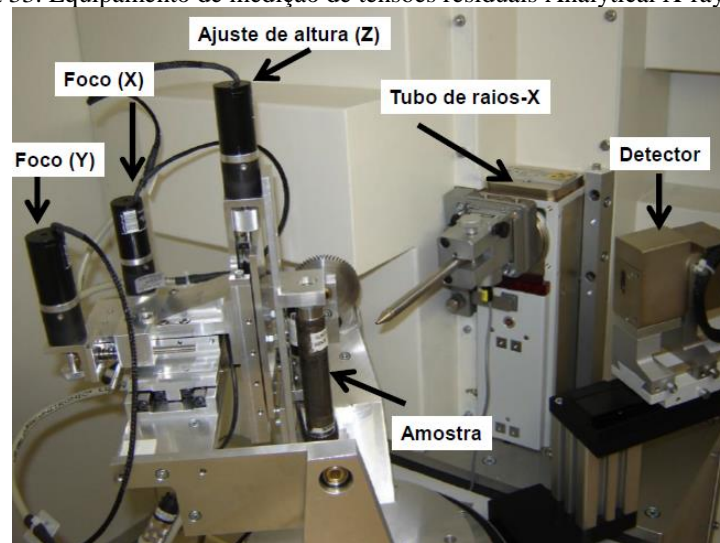
As medições de ambas as técnicas foram realizadas através de acordos de cooperação com institutos alemães IWT (Bremen) e HZB (Berlin) para Raios-X e Nêutrons, respectivamente.

As medições de tensões residuais através do método de Difração de Raios-X utilizaram o equipamento modelo Analytical X-ray MZ VI da marca GE® Inspection Technologies (Figura 33) com os seguintes parâmetros principais:

- Elemento do tubo de raios-X: Cr;
- Comprimento de onda $k\text{-}\alpha$: 2.2897 Å;

- Voltagem do tubo: 35 kV;
- Corrente: 35 mA;
- Detector utilizado: scintillation;
- Ângulos utilizados: - 45° até + 45°, Psi (Ψ) = 11;
- Tempo total de medição (cada ponto): 2 h;
- Pico de difração: {2 1 1} {h k l} 2-Ângulo teta (156,1°);
- Variação do ângulo de difração: 153° – 159°.

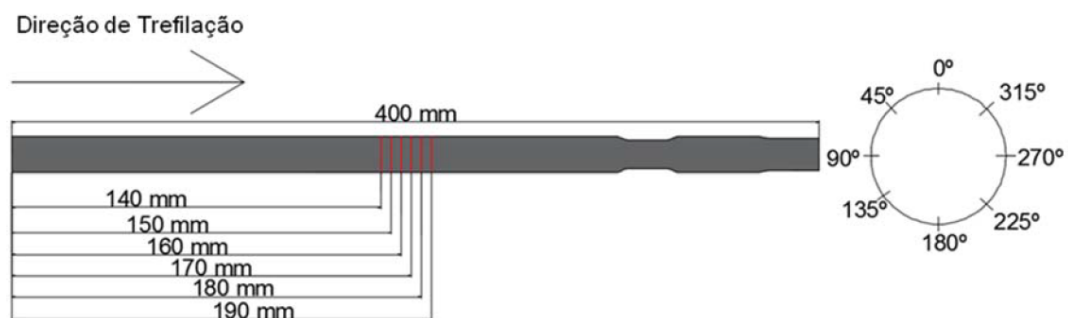
Figura 33. Equipamento de medição de tensões residuais Analytical X-ray MZ VI.



Fonte: Nunes, 2012.

Inicialmente, foram realizadas medições superficiais em seis posições centrais em relação ao comprimento da barra (a cada 10 mm), de 140 a 190 mm de distância da face não usinada. Essas medições foram realizadas a cada 45° com base no ângulo de referência. Na Figura 34 representa-se as posições longitudinais de medição, bem como as posições periféricas (conforme ângulos de referência).

Figura 34. Posições de medição das tensões residuais em relação a geometria dos eixos.



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente, foi utilizada uma técnica de remoção química eletrolítica para possibilitar a medição das tensões residuais logo abaixo da superfície. O reagente utilizado foi $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$, composto por 42% de H_3PO_4 e 34% de H_2SO_4 diluídos em 24% de H_2O , variando-se o tempo de exposição, visando remoções com profundidades de 50, 100, 200 e 300 μm . Os perfis de profundidade foram realizados na posição longitudinal de 150 mm e para todos os ângulos de referência avaliados anteriormente. Na Figura 35 apresenta-se o procedimento em execução.

Figura 35. Técnica de remoção de camada utilizada.



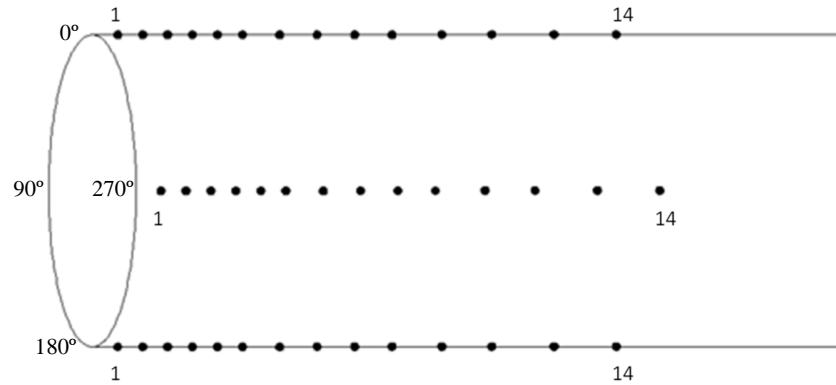
Fonte: Próprio autor.

Assim como nas metalografias e durezas, a avaliação dos métodos de corte utilizou-se de uma metodologia diferenciada para os ensaios de Difração de Raios-X. Foram realizados perfis a partir da posição mais próxima da superfície cortada com distanciamento entre os pontos aumentando de forma gradativa, variando de 2 mm até 42 mm da superfície cortada, conforme Figura 36. Estas medições foram realizadas para oito ângulos de referência (a cada 45°), somente na direção axial.

O objetivo desta metodologia empregada foi de abranger a maior área de análise possível sem que se percam informações significativas sobre o comportamento das tensões residuais e reduzir o tempo geral de realização dos ensaios, uma vez que cada ponto de medição demora em média duas horas (2 h) para a sua realização, além do tempo de preparação do equipamento, retirada e análise dos dados.

Figura 36. Posições de medição de tensões residuais nas amostras de corte e suas distâncias em relação a face cortada.

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Distância (mm)	2	4	6	8	10	12	15	18	21	24	28	32	37	42

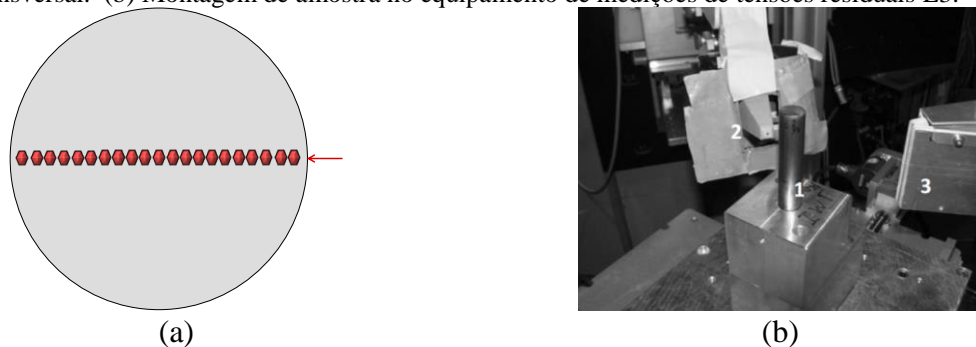


Fonte: Próprio autor.

A estratégia para medições de tensões residuais por difração de nêutrons foi determinada em função dos resultados de medições dimensionais. Uma vez determinado o vetor curvatura da amostra a ser examinada, a secção em que foram medidas as tensões residuais segue a orientação do vetor, realizando-se uma varredura (perfil) do lado oposto ao vetor até o lado em que o vetor aponta. Por exemplo: um eixo com vetor distorção com ângulo de 90° será medido o seu perfil entre 270° e 90° . O perfil medido consiste em 21 posições, uma central e 10 para cada lado da amostra, conforme Figura 37. Os principais parâmetros de medição utilizados foram:

- Instrumento: E3 do Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB);
- Detector: PSD $30 \times 30 \text{ cm}^2$;
- Comprimento de onda: $1,47 \text{ \AA}$;
- Monocromador: Si (400), “Double Focussing”;
- Aberturas Primárias e Secundárias: 2 mm.

Figura 37. (a) Posições de medições de tensões residuais pelo método de Difração de Nêutrons na seção transversal. (b) Montagem de amostra no equipamento de medições de tensões residuais E3.



Fonte: (a) Próprio autor, (b) Nunes, 2012.

3.6 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÕES DAS “VARIÇÕES NÃO-CONTROLADAS”

Após verificar-se a existência de “variações não-controladas”, investigou-se e descobriu-se os motivos e efeitos relacionados a estes eventos na distorção dos eixos fabricados. Para isto, foram geradas hipóteses baseadas nos conhecimentos dos processos metalúrgicos e de fabricação que ocorrem na rota de fabricação das barras para a confecção de eixos. Estas hipóteses são explicadas e justificadas da seguinte forma:

- *Heterogeneidade Microestrutural:*
 - As análises microestruturais indicam uma variação entre as amostras avaliadas, sendo que as amostras são oriundas do mesmo lote de material (fio-máquina). Distorções em componentes axissimétricos estão relacionadas a heterogeneidades, portanto, variações microestruturais tanto na secção transversal quanto longitudinal são potenciais de distorção significativos, principalmente com relação a segregações.

- *Influência da Segregação na Trefilação:*
 - Observou-se que a zona de segregação apresenta maior dureza que os valores médios para o material. Portanto, a segregação do carbono no material, bem como a variação de sua posição, pode representar alterações nas propriedades do material após o processo.

- *Heterogeneidades no Processo de Trefilação Combinada:*
 - Durante a fabricação dos eixos foram observadas diversas heterogeneidades no processo de trefilação combinada, como, por exemplo, as barras que são trefiladas apresentam desvios de linearidade e circularidade prévios ao processo. Assim como o processo de lubrificação pode não ser completamente homogêneo, o que pode acarretar diferentes condições de atrito dentro do processo. Tais heterogeneidades podem resultar em diferenças nas tensões residuais após o processo.

- *Heterogeneidade de Camada Endurecida:*
 - O processo de têmpera por indução é um processo de aquecimento e resfriamento simétrico, mas uma vez que a barra já esteja com uma curvatura antes do processo, espera-se que a camada temperada seja irregular ao longo da secção transversal, sendo maior nas regiões com maior proximidade ao indutor.

- *Heterogeneidade do processo de retífica:*
 - O processo de retífica objetiva a remoção de material para que o componente apresente uma geometria mais uniforme, portanto, no caso de uma barra curvada o objetivo é a remoção de material de forma heterogênea para a redução desta curvatura. O resultado observado de mudança de curvatura, em média aproximada, de 180° indica uma maior remoção de material no lado convexo dos eixos, o que implica na mudança de direção das curvaturas após a retífica. Conforme discutido anteriormente, a remoção de material através do processo de retífica é determinada através da profundidade de avanço designada ao rebolo de retificação em relação a ponta (face) da barra, imaginando-se tratar de uma barra reta. Portanto, a remoção em uma barra que já possua uma curvatura prévia poderá afetar a remoção heterogênea de material da barra.

Com base nestas hipóteses, foram propostas e desenvolvidas novas investigações, visando à comprovação destas ocorrências. Este capítulo aborda as metodologias adotadas para a realização delas.

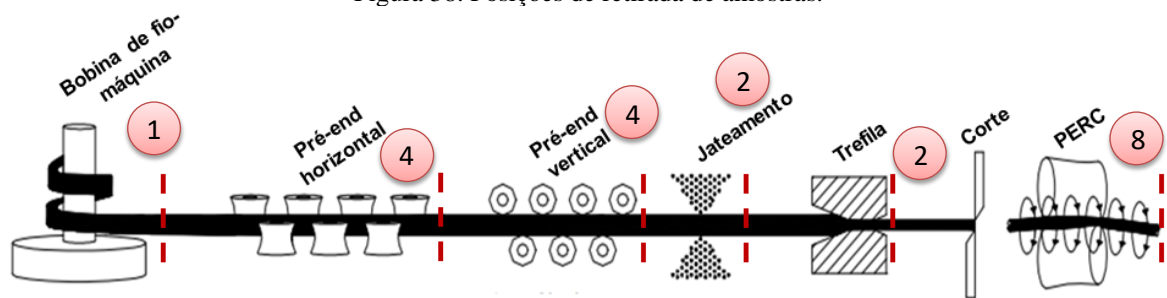
Uma das maneiras mais efetivas de se avaliar como diferentes variáveis afetam o produto é através do uso de simulações numéricas computacionais. Como o Grupo de Engenharia de Superfície do Laboratório de Transformação Mecânica possui extensa pesquisa sobre as etapas do processo de trefilação na área de simulações numéricas computacionais, estabeleceram-se ótimos parâmetros e simulações do processo de trefilação com resultados sólidos e próximos aos encontrados em ensaios de caracterização (SOARES, 2012; SOUZA, 2011; ZOTTIS, 2013). Através da comparação de trabalhos prévios (SOARES, 2012; ZOTTIS, 2013), observou-se que diferentes softwares de simulação apresentam características diferentes na preparação e criação de modelos numéricos para simulação, bem como nos seus métodos de cálculos. Portanto, como o objetivo da investigação é avaliar efeitos e não os quantificar, o uso de diferentes programas de simulação numérica computacional permite uma abrangência maior

para a criação de modelos numéricos que visam avaliar a influência de diferentes variações de processo.

3.6.1 Heterogeneidade Microestrutural

A avaliação da microestrutura em secções transversais e longitudinais apresentadas até o momento serve apenas de indicativo de uma variação microestrutural ao longo do material, principalmente com relação ao posicionamento e dimensão das zonas de segregação. Uma quantidade mais significativa de amostras é necessária para a realização de alguma afirmação sobre a condição do material no início do seu processamento. Para isto, 21 amostras de segmentos do fio-máquina foram retiradas, com o intuito de avaliá-las quanto as suas zonas de segregação. A amostragem não poderia ser realizada na bobina de fio-máquina diretamente, pois o corte da mesma interromperia a realização do processo de trefilação. Portanto, foram retiradas amostras de material durante diversas etapas do processo de trefilação combinada com o objetivo de se obter uma abrangência maior ao longo do fio-máquina. A Figura 38 indica as posições com relação ao processo e ao fio-máquina em que as amostras foram retiradas, bem como a quantidade de amostras retiradas para cada etapa.

Figura 38. Posições de retirada de amostras.

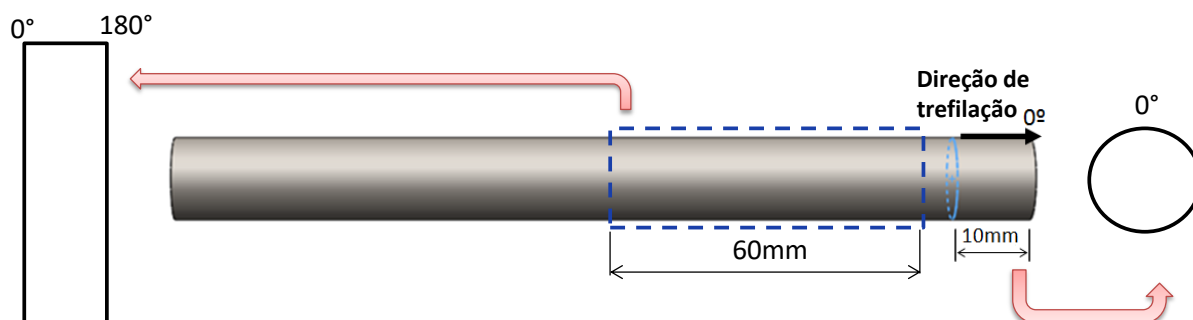


Fonte: Adaptado de Nunes (2012).

Após a retirada de amostras, elas foram tratadas de diferentes formas para se caracterizar as variações da segregação. A primeira avaliação foi a da secção transversal de diversas amostras de diferentes etapas do processo. Na Figura 39 indica-se como foram realizados os cortes para as secções transversais e longitudinais das amostras. A preparação metalográfica seguiu os mesmos procedimentos descritos no capítulo 3. Após a preparação, foram retiradas imagens visando observar a amostra em toda a sua secção, podendo-se assim comparar as posições das segregações entre as amostras.

Na segunda avaliação, foram cortadas amostras na secção longitudinal para determinação da continuidade da segregação. Foram obtidas seções longitudinais de 60 milímetros de comprimento das amostras, apenas após o processo de trefila e o PERC, pois estas amostras são mais retilíneas e, portanto, mais fáceis de serem segmentadas em maiores comprimentos.

Figura 39. Amostras retiradas de barras para as avaliações.



Fonte: Próprio autor.

3.6.2 Influência da Segregação na Trefilação

Para a determinação das influências da segregação nas tensões residuais geradas após o processo de trefilação, utilizou-se o recurso de simulação numérica computacional através do método de elementos finitos.

Com base em modelos numéricos apresentados e apresentados em trabalhos anteriores (DE SOUZA et al., 2013), foram realizadas simulações com a inserção de uma linha de segregação no material antes do processo de trefilação, utilizando-se um material diferente do material de base. Após a análise metalográfica, onde foi observada uma grande quantidade da fase perlita nas zonas de segregação, procurou-se nos bancos de dados do software utilizado um material que se assemelhasse a um aço com alto percentual perlítico. Portanto, foi escolhido o aço AISI 1060 para a representação desta segregação.

O software escolhido foi o Simufact.formingGP© devido ao fato de o mesmo apresentar a possibilidade de variar o material dentro de uma mesma barra. Os dados utilizados na simulação são baseados no trabalho apresentado por Soares (SOARES, 2012) que analisou o mesmo processo utilizando o mesmo software e avaliando o mesmo material. Os dados utilizados para estas simulações estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para as simulações computacionais do processo de trefilação.

Parâmetros	Dados
Tipo de malha	Hexaédrica
Material (barra)	ABNT NM 87 GRAU (Dados experimentais)
Material (segregação)	AISI 1060 (Banco de dados)
Coefficiente de atrito (μ)	0,1
Angulo de Trabalho (2α)	15°
Diâmetro Inicial/ Diâmetro Final	21.463 / 20.25 mm
Módulo de Young (E)	210 GPa
Tensão equivalente de escoamento ($\sigma_{0.2}$)	390 Mpa
Elementos no Raio	10

Fonte: Próprio autor.

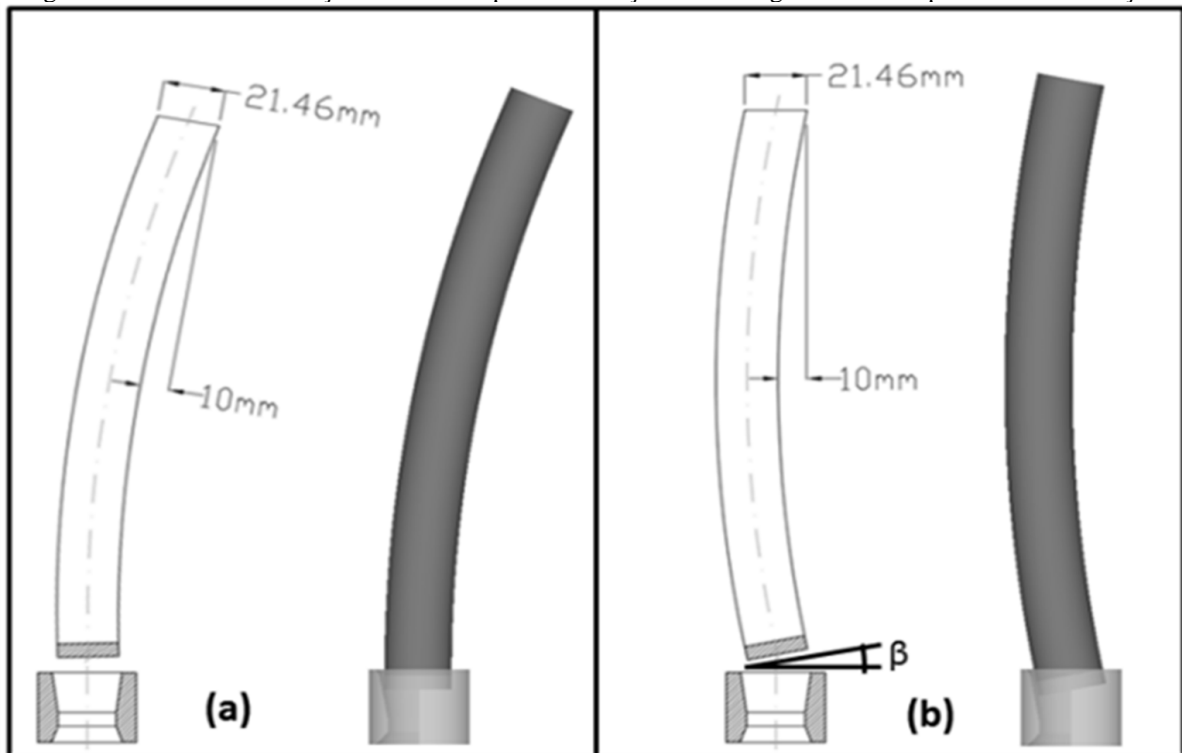
Além da adição da de uma linha de segregação, foi simulado também variações da posição desta linha em relação ao centro da barra, sendo deslocada há 1 e 2 mm do centro da barra simulada. Todas as simulações realizadas nesta investigação foram tridimensionais com o uso de simetria de metade da barra para a otimização dos tempos de simulação.

3.6.3 Heterogeneidades no Processo de Trefilação Combinada

Através de observações do processo de trefilação combinada percebe-se que o fio-máquina não fica completamente reto na entrada da fieira. Com isso, optou-se pela avaliação dos resultados obtidos por Zottis (ZOTTIS, 2013) em sua pesquisa no âmbito do projeto de cooperação BRAGECRIM, descrito anteriormente. Em seu trabalho, foi simulado o efeito que heterogeneidades no processo de trefilação causariam nas tensões residuais. Destas heterogeneidades, optou-se por avaliar os efeitos que uma barra curva terá nas tensões residuais após a trefilação e a relação com o alinhamento de entrada da barra.

Para isto, a autora utilizou-se de uma curvatura representativa do estado mais crítico, simulando o evento em que os processos de pré endireitamento não foram efetivos. Portanto, foi medida a curvatura do fio-máquina anteriormente ao pré endireitamento e utilizada como a barra de entrada no processo de trefilação, representado pela Figura 40a. Complementando esta análise, foi testada a possibilidade de haver um desalinhamento entre a barra e a ferramenta de trefilação (fieira) com um determinado ângulo de desalinhamento, chamado de ângulo β . A Figura 40b apresenta uma representação esquemática deste modelo e do ângulo β .

Figura 40 . Diferentes condições escolhidas para a avaliação de heterogeneidades no processo de trefilação.



Fonte: Adaptado de (ZOTTIS, 2013).

Estas possibilidades foram simuladas através do software DeformTM e seus parâmetros estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para simulações computacionais de heterogeneidades no processo de trefilação.

Parâmetro	Data
Tipo de Malha	Hexaédrica
Material	ABNT NM 87 GRAU (dados experimentais)
Coefficiente de atrito (μ)	0,1
Ângulo de Trabalho (2α)	15°
Diâmetro Inicial / Diâmetro Final	21.46 / 20.25 mm
Módulo de Young (E)	210 GPa
Tensão equivalente de escoamento (k_{f0})	390 MPa
Elementos no Raio	10

Fonte: Próprio autor.

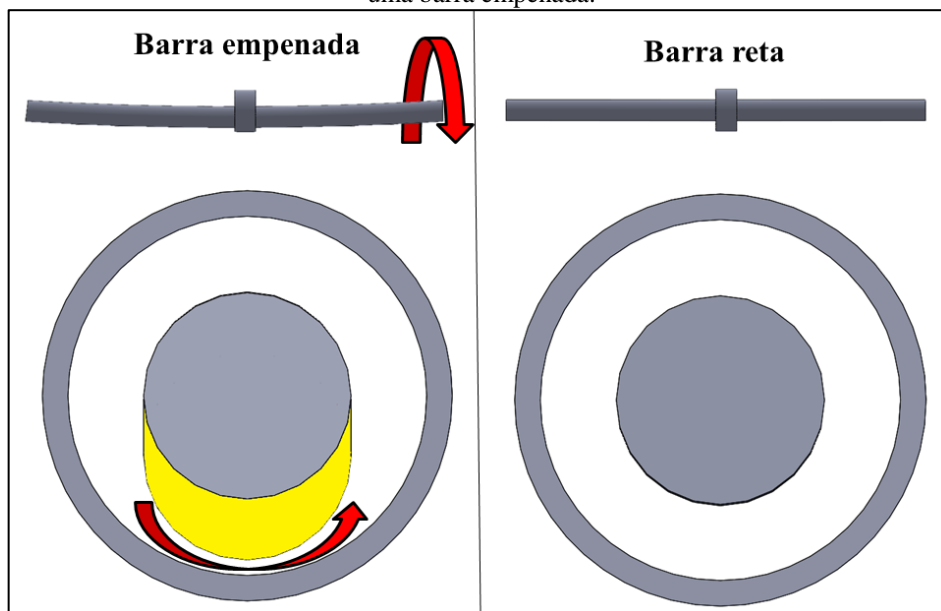
3.6.4 Heterogeneidades na camada endurecida

O processo de têmpera por indução de passagem em eixos cilíndricos é desenhado como um processo simétrico, uma vez que se utiliza um indutor cilíndrico que percorre a extensão do

eixo para a realização do aquecimento indutivo. Neste caso, inclusive foram alterados parâmetros para que o aquecimento fosse suficiente para a indução de camada mesmo nas regiões onde foram realizados os rebaixos nas amostras. Entretanto, este procedimento não leva em conta possíveis heterogeneidades da barra como a curvatura prévia da mesma apesar de ser algo comum para este tipo de geometria (NUNES, 2012).

Conforme já foram mostrados nos resultados dimensionais, as barras que originaram os eixos estudados já apresentavam curvaturas antes do processo de têmpera por indução. Mesmo que estas apresentassem valores entre 10 e 35 μm . O aquecimento indutivo nos moldes realizados pode acabar aquecendo de forma heterogênea a barra, pois, uma vez que ela é rotacionada em torno de seu eixo longitudinal, a posição periférica oposta à direção do vetor curvatura acaba sendo posicionado sempre mais próximo ao indutor enquanto o mesmo induz o aquecimento naquelas regiões. Isto implicaria num maior aquecimento nesta região e uma consequente heterogeneidade na transformação de fase do processo na secção do material. Na Figura 41 ilustra-se uma extrapolação da utilização de uma barra curvada durante o processo e uma barra completamente reta.

Figura 41. Representação esquemática do processo de têmpera de indução por passagem em uma barra reta e uma barra empenada.



Fonte: Próprio autor.

Conseqüentemente, a mesma situação é esperada para o processo de retífica, onde a remoção de material no lado oposto ao que aponta o vetor curvatura pode ser responsável por alterações em propriedades do material.

Baseando-se na situação anteriormente descrita, foram realizadas análises de dureza em amostras antes do tratamento térmico, após o tratamento térmico para as duas camadas e após o processo de retífica de 100 μm . As análises consistiram na realização de perfis de microdureza Vickers com carga de 500 gf nos dois lados do vetor curvatura, ou seja, a partir da posição periférica (ângulo) para a qual o vetor aponta até o término de sua camada endurecida. Estes perfis foram a partir da retirada de amostras das secções transversais dos eixos nas posições centrais, aproximadamente 200 mm de distância da ponta do eixo.

4 RESULTADOS

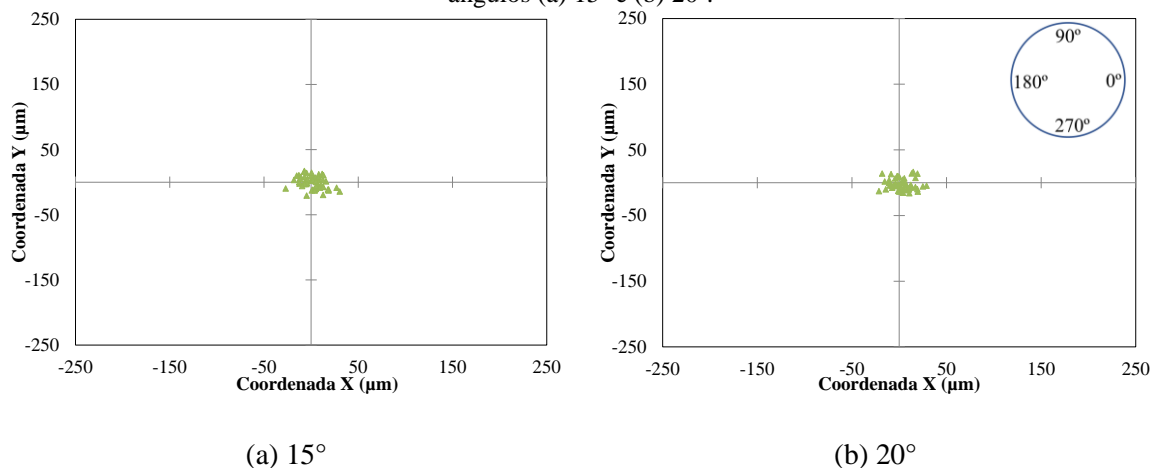
No capítulo de metodologia a ordem do processo de planejamento e execução de ensaios foi apresentada em forma cronológica, indicando uma sequência linear de raciocínio e execução. Portanto, o capítulo de apresentação de resultados segue a mesma sequência lógica, inserindo-se apenas que a avaliação do planejamento de experimento deve ser realizada após o levantamento de informações sobre todos os processos para que a mesma possa ser estudada e entendida.

4.1 DIMENSIONAL

Os vetores curvatura calculados a partir das medições dimensionais foram agrupados e plotados em gráficos das coordenadas X–Y de cada vetor curvatura avaliado para todas as etapas do processo, permitindo-se assim a observação da orientação e amplitude da curvatura de cada barra/eixo durante as etapas de fabricação. Nestes gráficos, a direção de 0° é definida pelo lado positivo do eixo X e as demais direções no sentido anti-horário.

Na Figura 42 apresenta-se as curvaturas (em magnitude e sentido) das barras após o processo de trefilação combinada, corte e usinagem. As curvaturas medidas exibem médias de $22 \mu\text{m}$ para as amostras trefiladas com ângulo de 15° (Figura 42a) e de $23 \mu\text{m}$ para as amostras trefiladas com ângulo de 20° (Figura 42b). O tipo de corte não indica uma influência inicial nas curvaturas, pois as regiões cortadas foram posteriormente usinadas (faceadas) para a padronização dos eixos fabricados.

Figura 42. Posição espacial dos vetores curvatura após o processo de trefilação combinada com ferramenta de ângulos (a) 15° e (b) 20° .

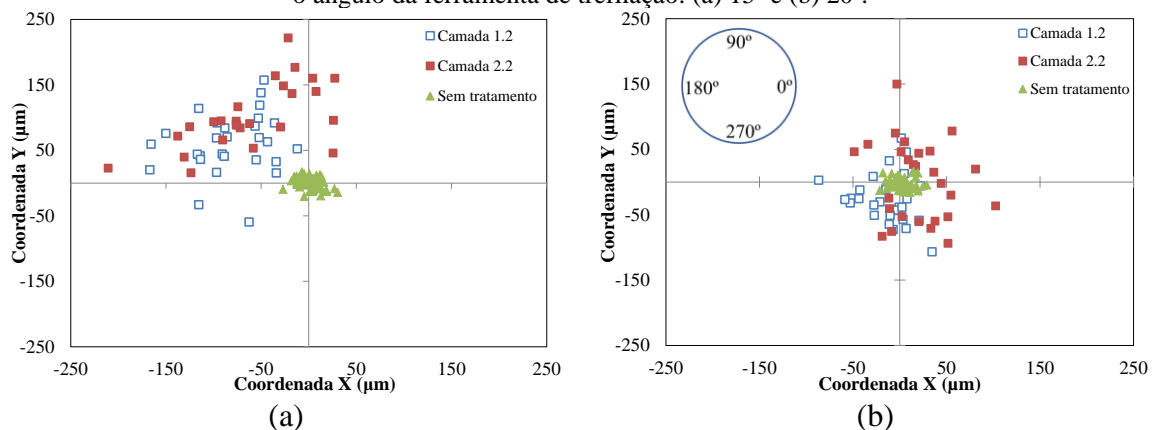


Na Figura 43. Posição espacial dos vetores curvatura após o processo de têmpera por indução. Agrupados conforme o ângulo da ferramenta de trefilação: (a) 15° e (b) 20°. pode-se observar as curvaturas das barras após o processo de tratamento térmico de têmpera por indução e revenimento. Neste ponto é possível verificar uma diferença nos valores de curvatura pelo processo de trefilação utilizado e pela profundidade de camada obtida. Para as amostras trefiladas com 15°, observou-se uma curvatura média de 184 μm para a camada de 1,2 mm e 193 μm para a camada de 2,2 mm.

As amostras trefiladas com 20° apresentaram uma curvatura média de 66 μm para a camada de 1,2mm e 96 μm para camada de 2,2 mm, valores consideravelmente menores que os medidos para amostras trefiladas com fierra de ângulo 15°.

Outro fator que se pode destacar é que as amostras trefiladas com a fierra de 15° apresentaram um quadrante preferencial para as suas curvaturas, com 85% das amostras com ângulo de curvatura entre 90° e 180° (quadrante superior esquerdo da Figura 43a). Este resultado indica a influência de uma variação ocorrida somente nas amostras trefiladas com a ferramenta de trefilação com ângulo de 15°.

Figura 43. Posição espacial dos vetores curvatura após o processo de têmpera por indução. Agrupados conforme o ângulo da ferramenta de trefilação: (a) 15° e (b) 20°.



Fonte: Próprio autor.

As variações com relação ao diâmetro e ao comprimento das barras após o tratamento térmico são apresentadas na Tabela 5 em relação percentual. O diâmetro aumentou após o tratamento térmico entre 0,046% e 0,066%, enquanto o comprimento das amostras diminuiu entre 0,010% e 0,031%. Esta relação ocasionou um aumento de volume entre 0,064% e 0,121%. Observa-se que a camada de 2,2 mm apresenta valores maiores de aumento no diâmetro e menores reduções no comprimento, apresentando, portanto, maiores volumes. Estes efeitos estão diretamente

associados à formação de martensita durante o tratamento térmico e a presença de austenita retida, fases que apresentam maior volume específico e desta forma contribuem para um aumento volumétrico das amostras (Dieter, 2003).

Tabela 5. Variações dimensionais após o processo de têmpera por indução.

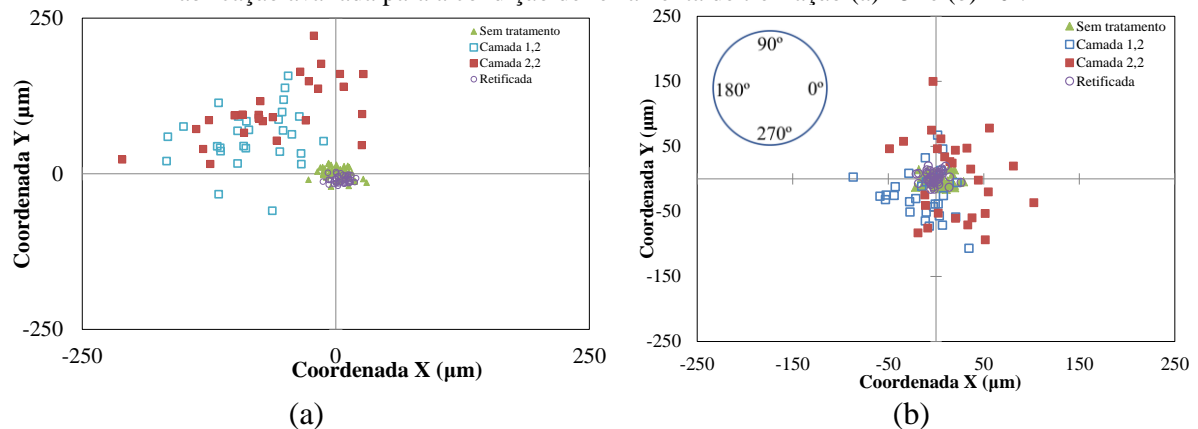
	Trefila 20°		Trefila 15°	
	Camada 1,2	Camada 2,2	Camada 1,2	Camada 2,2
Diâmetro	0,046 %	0,066 %	0,051 %	0,062 %
Comprimento	-0,029 %	-0,010 %	-0,031 %	-0,018 %
Volume	0,064 %	0,121 %	0,070 %	0,107 %

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 44 são apresentadas as distribuições dos vetores de curvaturas após o processo de retífica. Observa-se que as curvaturas após o processo de retífica, de modo geral, são menores que as medidas após o processo de usinagem (condição original), o que indica a conformidade dos resultados com o esperado pelo projeto de fabricação das amostras. Os valores médios das curvaturas após o processo de retífica foram de 13,75 μm para as amostras trefiladas utilizando a fieira com ângulo de 15° e de 12,75 μm para as amostras trefiladas utilizando a fieira com ângulo de 20°.

O processo de retífica com remoção de 100 μm , de modo geral, apresentou menores curvaturas que o processo com remoção de 200 μm . Não são observadas grandes diferenças entre amostras que foram trefiladas com ângulos de 15° e 20° neste caso, sendo que o primeiro grupo exibe curvaturas médias de 15 μm e o segundo 13 μm . No capítulo de discussão dos resultados os motivos pelos quais a remoção de 100 μm apresenta melhores resultados serão discutidos de forma mais aprofundada.

Figura 44. Distribuição dos vetores que indicam as curvaturas de cada amostra após cada etapa da rota de fabricação avaliada para a condição de ferramenta de trefilação (a) 15° e (b) 20°.



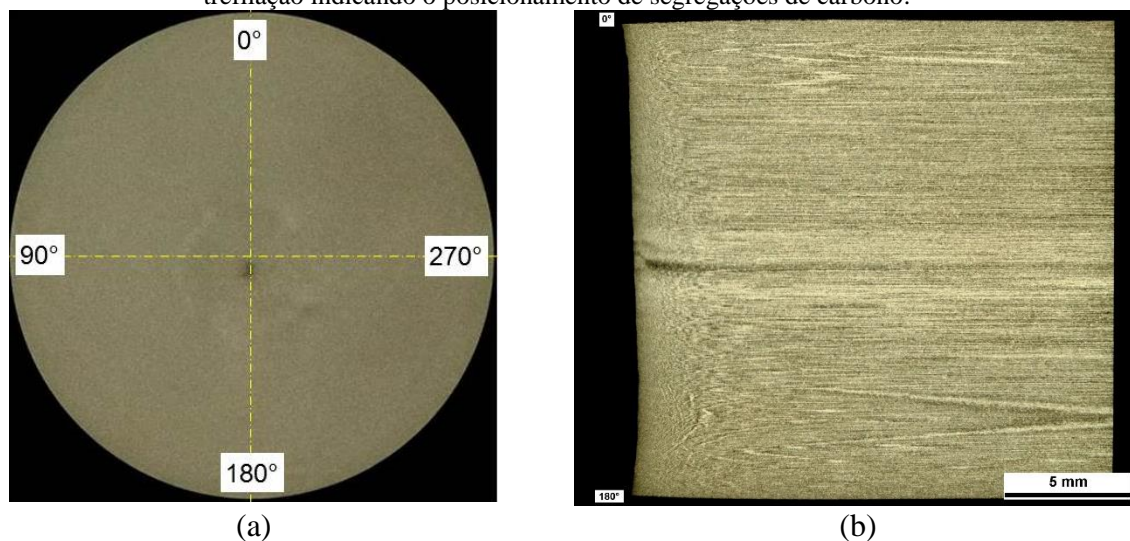
4.2 POTENCIAIS DE DISTORÇÃO

Conforme descrito no capítulo de metodologia, a influência da trefilação combinada foi avaliada como um todo, embora sendo composta por várias etapas, neste trabalho foi variado somente o ângulo de trefilação. Portanto, os potenciais de distorção serão apresentados pela avaliação das condições iniciais do material (caracterização do Fio-Máquina), seguindo para as etapas de processamento nas quais foram variados parâmetros: Trefilação combinada, Corte, Têmpera por indução e Retificação.

4.2.1 Caracterização do Fio-Máquina (matéria-prima)

A secção transversal da amostra, apresentada na Figura 45a, permite a observação de uma zona de segregação próxima ao centro dela. Já para as outras regiões do material, ocorre uma distribuição entre ferrita e perlita característica para este tipo de aço. A Figura 45b, que apresenta a secção longitudinal da amostra, permite a observação de uma estrutura lamelar proveniente dos processos de lingotamento contínuo e laminação à quente, aos quais o material é submetido na fabricação do fio-máquina. Outro fator observado é que a segregação é observada numa macrografia como uma linha na direção longitudinal do material. Observações iniciais indicaram uma variação na posição e concentração das segregações verificadas. Este tipo de variação microestrutural pode caracterizar um importante fator na distorção futura do material e necessita de maior atenção.

Figura 45. Metalografias de (a) secção transversal e (b) secção longitudinal de uma amostra após o processo de trefilação indicando o posicionamento de segregações de carbono.

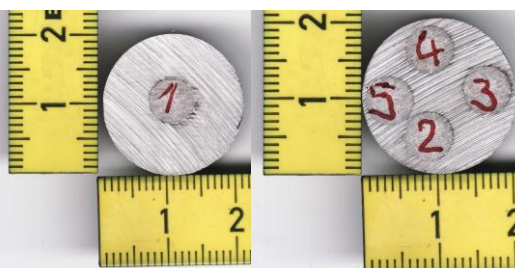


Fonte: Próprio autor.

Após a observação da presença da região de segregação no centro da amostra, a estratégia para a medição da composição química seguiu o procedimento apresentado no capítulo 3.5.1 (análise química), que consiste na realização de quatro pontos de medição periféricos e um ponto central. A Figura 46 apresenta o resultado da composição química medida, juntamente com a composição nominal para este tipo de material (norma A29/A29M). A medição na posição central (Posição 1) apresenta maior teor de carbono no centro da amostra (0,02 % massa), região onde se observa a presença de segregações.

Figura 46. Composições químicas em %massa medidas através de espectroscopia de emissão ótica e suas posições de medição.

	C	Si	Mn	P	S
1	0,49	0,237	0,877	0,025	0,035
2	0,47	0,233	0,871	0,025	0,036
3	0,47	0,236	0,868	0,025	0,037
4	0,47	0,235	0,869	0,024	0,034
5	0,47	0,235	0,870	0,024	0,034
Norma (ABNT)	0,43 - 0,50		0,6 - 0,9	<0,040	<0,050

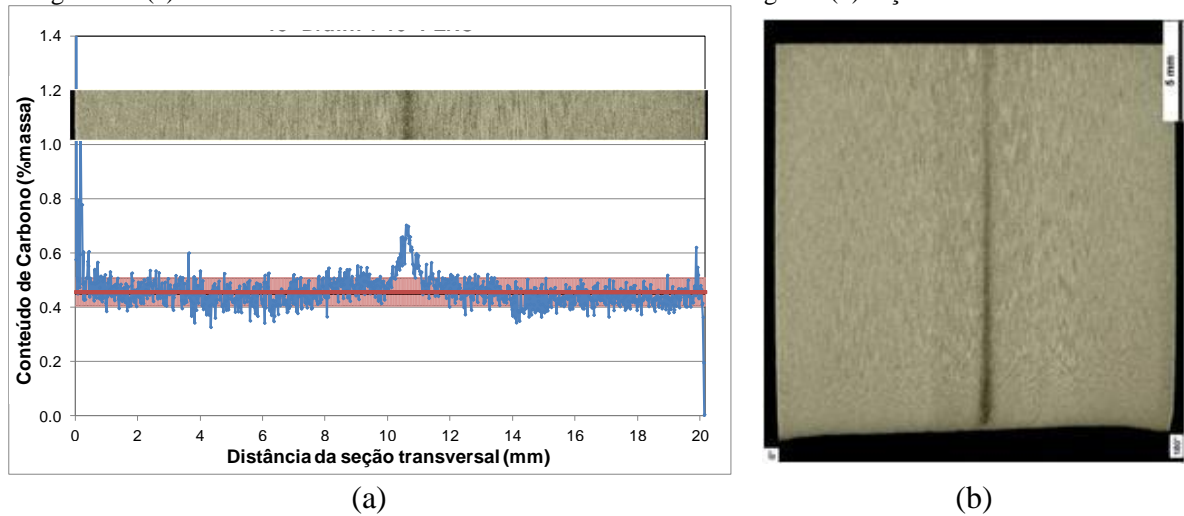


Fonte: Próprio autor.

Após a análise de espectrometria confirmar um maior teor de carbono na região central da amostra, os resultados das análises Microsonda (EPMA) apresentam picos de concentração de carbono na área ocupada pela segregação, conforme apresentado na Figura 47a, com 0,7 % em massa de carbono.

A presença deste tipo de segregação é bastante comum para esta classe de material e ocorre durante a etapa de resfriamento no processo de lingotamento contínuo, onde os elementos de liga no material são segregados para a região central (núcleo) do material pelo limite de solubilidade na ferrita e perlita. O deslocamento observado da posição da linha de segregação com relação ao centro pode ser atribuída a heterogeneidades no processo de solidificação durante o lingotamento contínuo e laminação a quente (PRINZ et al., 2009). O que pode ocorrer de diversas formas, como um agitação magnética ineficiente, ou um resfriamento heterogêneo na periferia do material.

Figura 47. (a) Conteúdo de carbono medido através de EPMA ao longo da (b) seção transversal da amostra

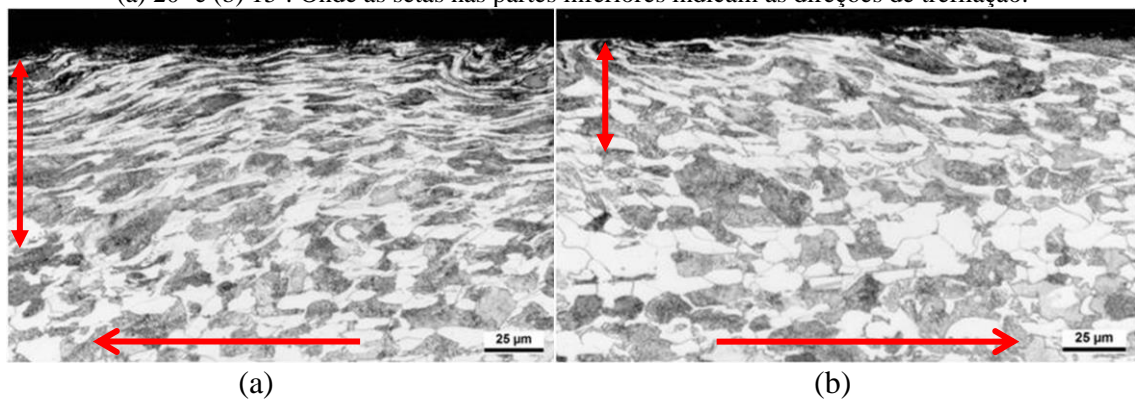


Fonte: Próprio autor

4.2.2 Trefilação combinada

O processo de trefilação apresenta também deformações mais significativas nos grãos localizados próximos das superfícies de contato com as fieiras utilizadas. Na Figura 48a observa-se que deformações mais acentuadas nos grãos oriundas do processo de trefilação com fieira de 20° chegam aproximadamente até a $100\ \mu\text{m}$ da superfície de contato com a ferramenta (representadas pela seta de duas pontas). Já para a amostra trefilada com ângulo de fieira de 15° , apresentada na Figura 48b, observa-se que estas deformações nos grãos são menores, atingindo profundidades de até $50\ \mu\text{m}$, aproximadamente. Estes efeitos podem ser relacionados ao parâmetro delta e também a presença de forças cisalhantes entre a superfície da ferramenta e o material trefilado (WISTREICH, 1958) por isso se retém mais próximo as superfícies.

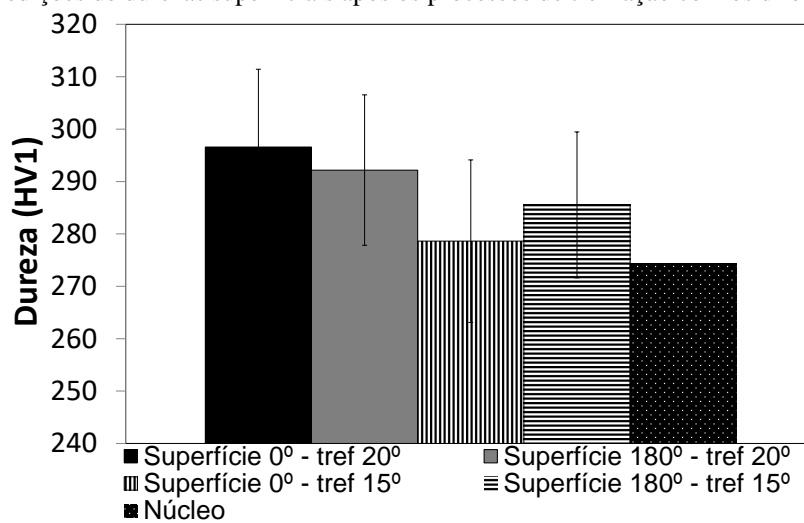
Figura 48. Metalografia das regiões próximas a superfície trefilada par as amostras trefiladas com ferramentas de (a) 20° e (b) 15° . Onde as setas nas partes inferiores indicam as direções de trefilação.



Fonte: Próprio autor.

As análises dos resultados de dureza superficiais apresentados na Figura 49 permitem observar um aumento nos valores de dureza próximos a superfície do material quando comparados aos valores do núcleo. Estes aumentos nos valores de dureza são atribuídos as maiores deformações nos grãos ocorridas nas regiões próximas à superfície, observadas nas metalografias (Figura 48), outro indicativo da relação com o parâmetro delta. Isso pode ser observado também ao se comparar as durezas medidas nas amostras trefiladas com 15° em relação as amostras trefiladas com 20°. Observa-se também diferenças entre as posições de medição para as mesmas ferramentas.

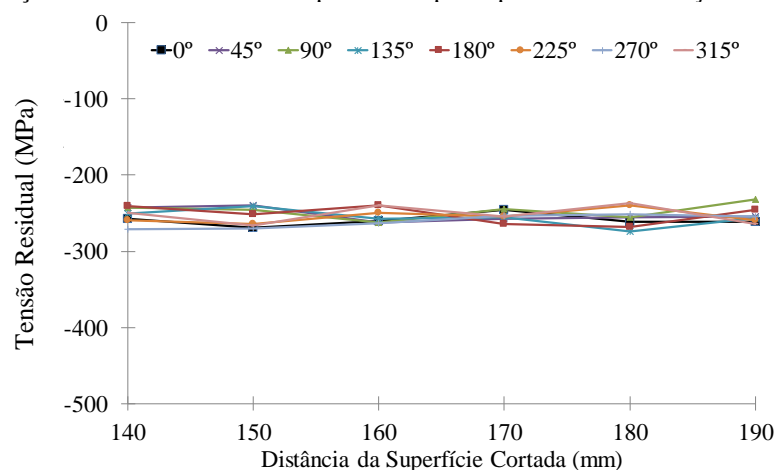
Figura 49. Medições de durezas superficiais após os processos de trefilação com os diferentes ângulos.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados de tensões residuais ao longo das barras nas diferentes posições periféricas são apresentados para a amostra trefilada com o ângulo de 15° na Figura 50. De modo geral, observa-se tensões residuais compressivas entre 200 e 300 MPa, além de uma variação baixa tanto entre as posições periféricas, quanto ao longo das barras.

Figura 50. Distribuição das tensões residuais superficiais após o processo de trefilação com ferramenta de 15°.



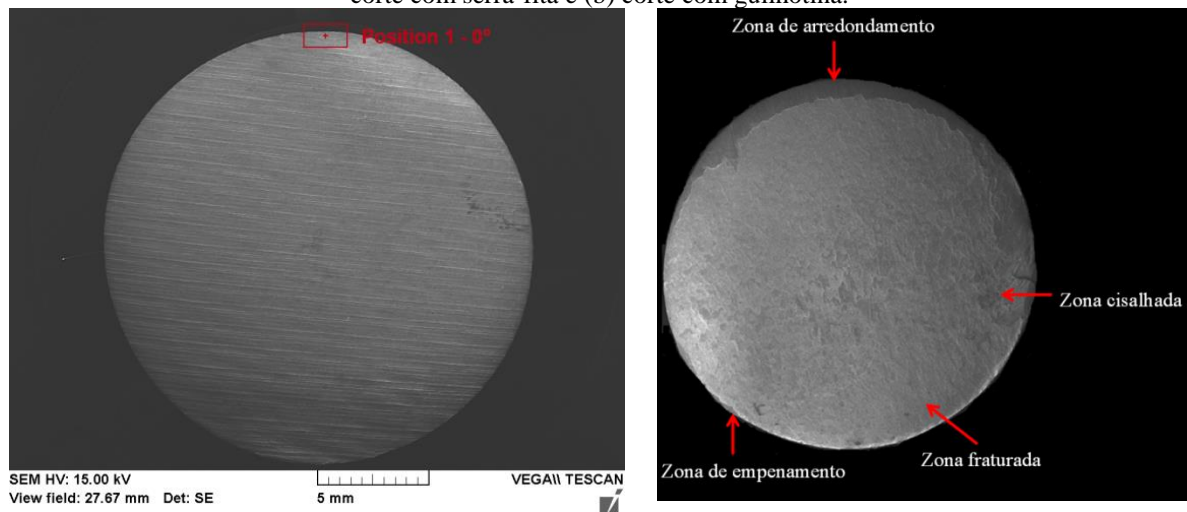
Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Corte

A caracterização através de microscopia eletrônica de varredura apresentada na Figura 51a evidencia as linhas de corte para o processo com serra. Observa-se que toda a superfície do corte é composta por vales, regiões onde a ferramenta de corte da serra (ponta do dente) atua no material, e pelos picos, espaço entre um passe e outro da ponta da serra. Já a amostra cortada com a guilhotina (Figura 51b) apresenta todas as regiões descritas pela literatura de um corte cisalhante: Zona de arredondamento; Zona cisalhada; Zona fraturada; Zona de empenamento.

A caracterização metalográfica das amostras cortadas, apresentadas na Figura 52, mostra que o corte de guilhotina gera uma deformação nos grãos do material na mesma direção do movimento da lâmina de corte. A profundidade das deformações após o corte com guilhotina pode ser observada na Figura 52a. Observam-se também irregularidades na superfície, devido à deformação plástica sofrida e o arranchamento do material inerente ao processo, além de uma elevada deformação nos grãos, conforme pode-se observar na Figura 52b.

Figura 51. Imagens de MEV das faces das amostras após os diferentes métodos de corte. Onde (a) representa corte com serra-fita e (b) corte com guilhotina.

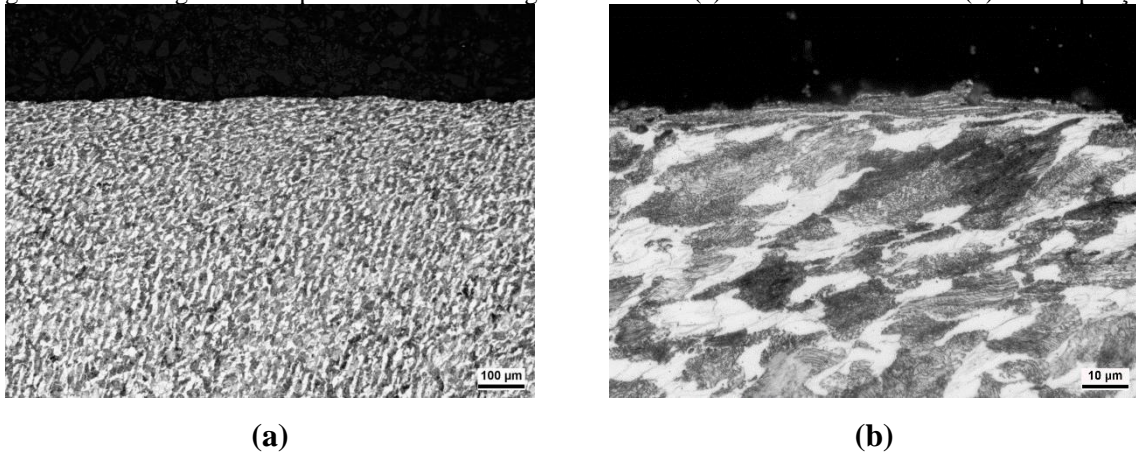


(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

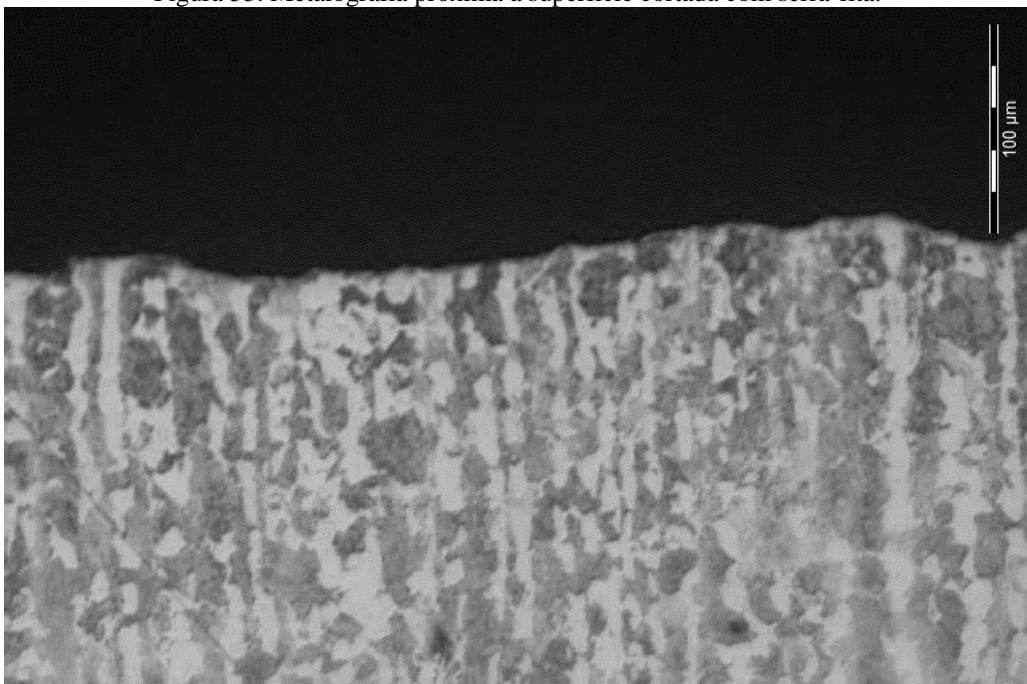
Figura 52. Metalografia da superfície cortada com guilhotina com (a) baixa aumento e com (b) alta ampliação.



Fonte: Próprio autor.

Já para a amostra serrada apresentada na Figura 53, não se observa qualquer variação no bandejamento nem na estrutura dos grãos mais próximos ao corte. Com relação ao acabamento da superfície, observa-se apenas a variação gerada pelo movimento dos dentes de corte, já observados nas imagens de MEV.

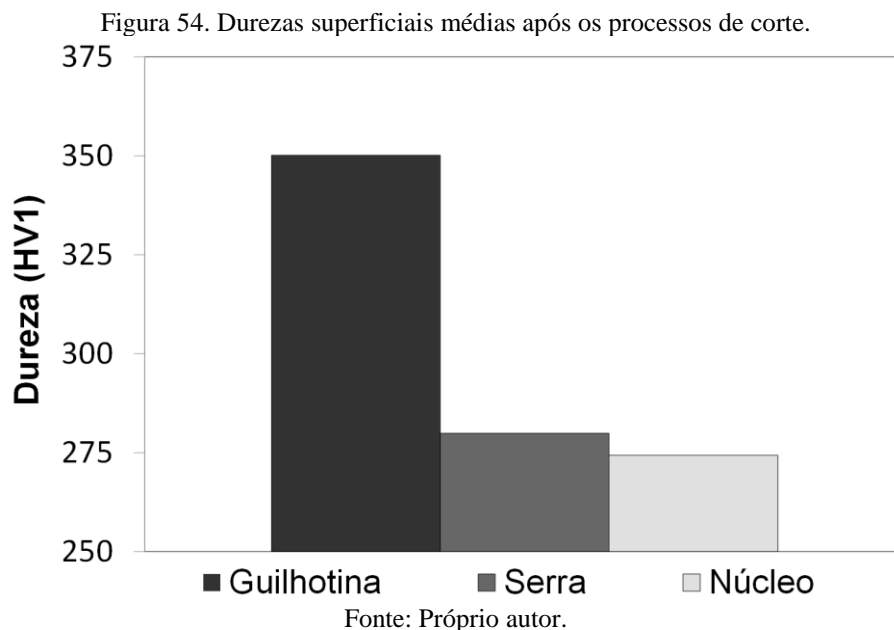
Figura 53. Metalografia próxima a superfície cortada com serra-fita.



Fonte: Próprio autor.

As durezas médias nas regiões superficiais próximas ao corte são apresentadas na Figura 54, juntamente com a dureza média do núcleo. Observa-se que os valores de dureza condizem com as observações das micrografias. A dureza média do corte de guilhotina apresenta valores na casa de 350 HV1 para ambos os ângulos de trefilação, enquanto para as amostras cortadas com serra esses valores atingem em média 280 HV1.

Comparando-se com a dureza de núcleo média de 275 HV1, entende-se que o processo de corte com serra não possui uma influência significativa na dureza do material, já o corte de guilhotina apresenta uma elevação significativa na dureza (em torno de 70 HV1). Foram realizados perfis de dureza afastando-se da região de corte para avaliar a profundidade dos efeitos, mas não foram observadas variações significativas após o ponto de medição inicial, a 0,1 mm de distância do corte. O ângulo de trefilação não apresenta diferença nas durezas avaliadas.

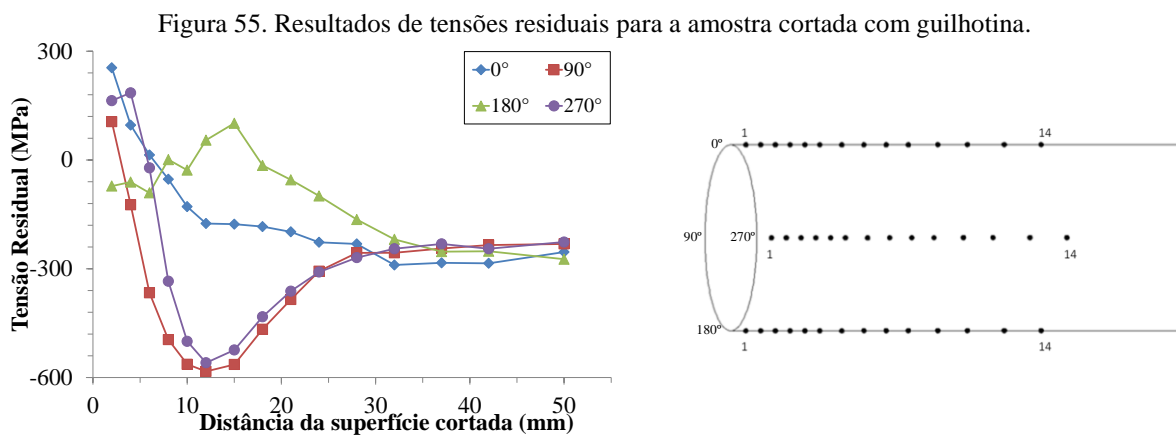


As tensões residuais superficiais dos processos de corte cisalhante já tiveram comprovação de sua relação com a posição das zonas de corte (com relação ao ângulo de entrada) (DIAS, 2013) e neste caso, apresentado na Figura 55, fica clara a posição de corte como o ponto mais trativo de tensões residuais (0°), enquanto o ângulo oposto (180°) apresenta tensões compressivas e os ângulos perpendiculares ao movimento de corte (90° e 270°) apresentaram valores trativos, mas com menores magnitudes.

Estes perfis de tensões residuais ao longo da superfície mostram o efeito das diferentes zonas de corte identificadas nas amostras. A zona de arredondamento (posição de 0°) apresenta um perfil com tensões trativas até a distância de 6 mm, onde apresenta valor próximo a zero. As tensões então seguem com valores mais compressivos até a profundidade de 28 mm, onde o perfil apresenta valores semelhantes aos perfis normais do material após o processo de PERC. A zona cisalhada, representada pelas posições 90° e 270° apresenta uma diferença em relação a

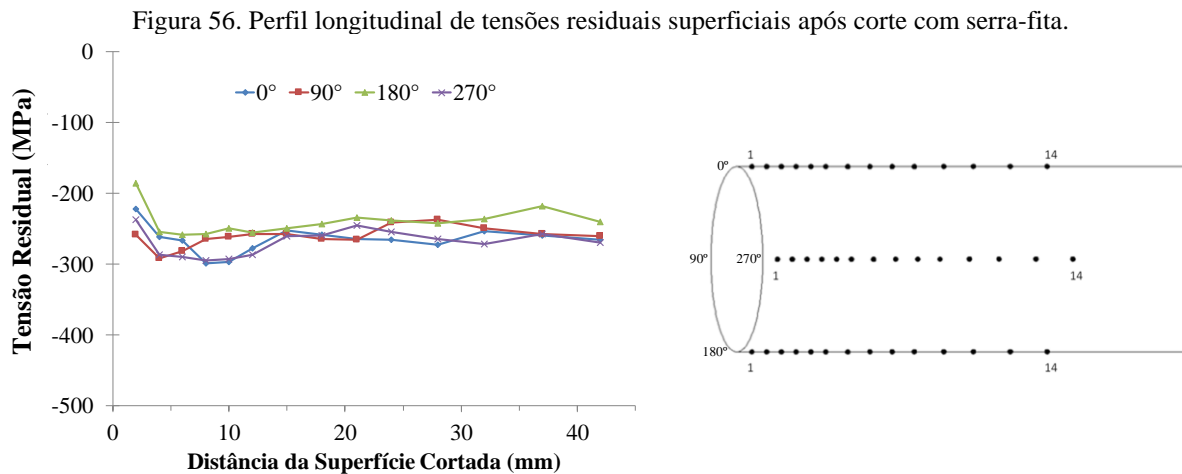
zona de arredondamento, pois apresenta um pico de tensões residuais compressivas na distância de 12 mm e se estabilizam na distância de 28 mm.

Os valores dos picos se aproximam de 600 MPa compressivos. Já a zona fraturada apresenta um perfil bastante diferente das demais, com tensões compressivas próximas a superfície, apresentando um pico de tensões trativas (100 MPa) na distância de 15 mm e voltando a apresentar tensões compressivas e estabilizando após 32 mm da superfície cortada. Na comparação entre a as posições analisadas, observa-se um gradiente de tensões máximo de 650 MPa na distância de 14 mm entre as posições de 0° e 180°.



Fonte: Próprio autor.

As tensões residuais superficiais da amostra cortada com serra, ver Figura 56, não apresentam alterações significativas, mantendo um perfil semelhante ao observado no processo anterior (após a trefilação combinada). A única observação que pode ser mencionada é uma pequena redução nos valores no primeiro ponto de medição (2 mm de distância do corte). Isto resulta do efeito do corte no relaxamento das tensões próximas a superfície.



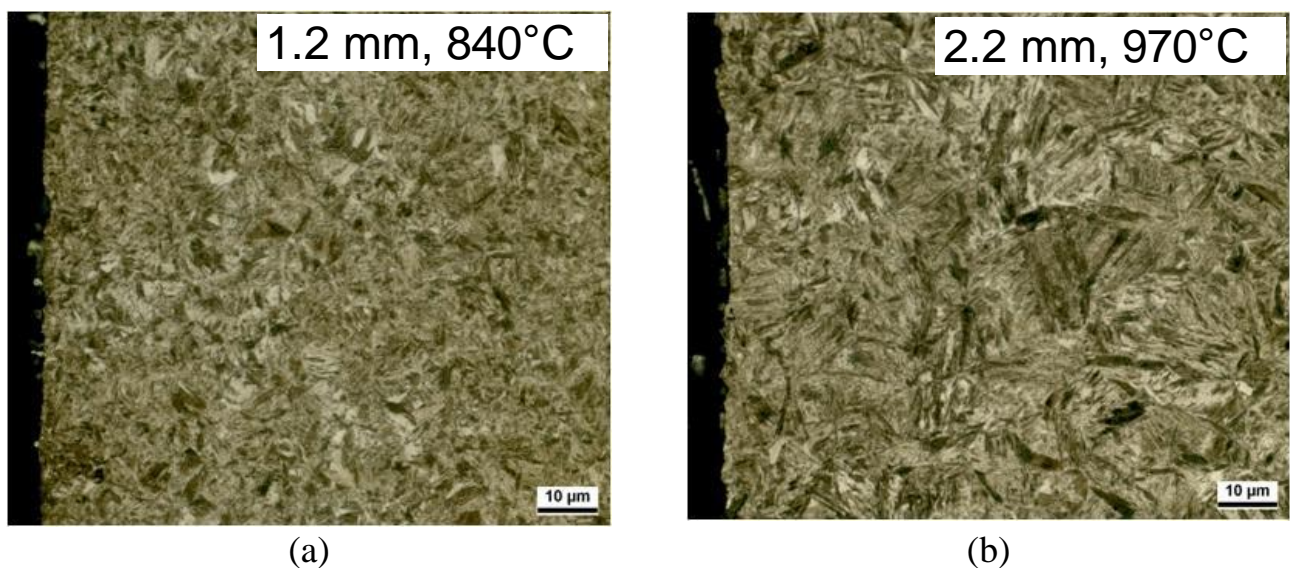
Fonte: Próprio autor.

Apesar do gradiente de tensões residuais no corte com guilhotina variar até uma profundidade de 32 mm (no máximo), vale-se salientar que as barras foram usinadas (faceadas) em 10 mm até o comprimento final do eixo. Portanto, a extensão deste gradiente de tensões relativo ao corte é em torno de 20 mm, um percentual de 5% do comprimento final do eixo, o que dificulta a presença deste fator como um potencial significativo no processo.

4.2.4 Têmpera por Indução

As metalografias das camadas temperadas estão apresentadas na Figura 57. Observa-se na Figura 57a que para a amostra de 1,2 mm de camada a formação de martensita com pequenas áreas de austenita retida. Já para a Figura 57b, que representa a amostra endurecida com 2,2 mm de camada, é possível observar uma martensita mais grosseira e com maiores quantidades de ferrita e austenita retida. Isto se dá pela maior temperatura necessária para se atingir uma maior camada endurecida, mudando de 850 °C para a amostra de 1,2 mm para 970 °C para a amostra de 2,2 mm (GRUM, 2007). Estas temperaturas são referentes as medições realizadas nas superfícies das amostras através de um pirômetro posicionado logo abaixo ao indutor durante o processo de têmpera por indução, apresentado anteriormente na Figura 26.

Figura 57. Metalografias das camadas temperadas após a têmpera por indução com profundidade de: (a) 1,2 mm e de (b) 2,2 mm.

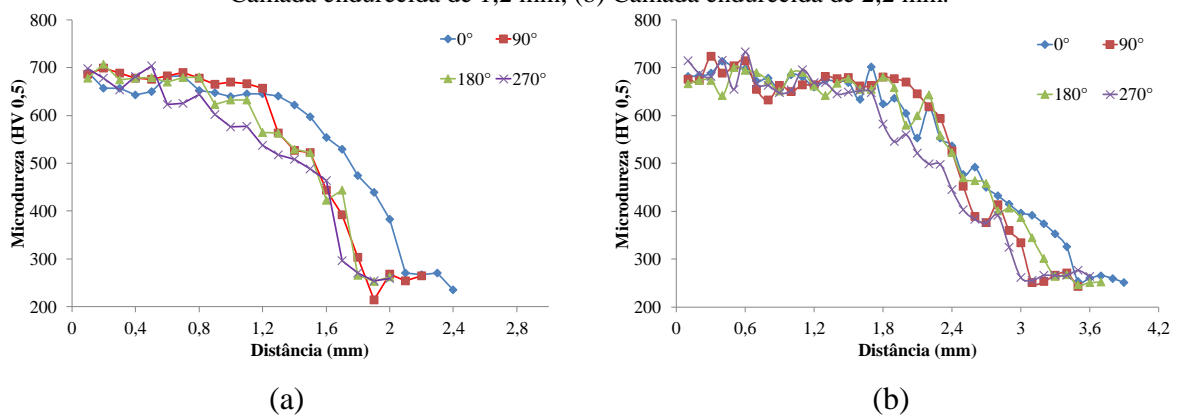


Fonte: Próprio autor.

Os perfis de dureza foram realizados a partir das quatro posições periféricas de referência (0°, 90°, 180° e 270°) com dureza Vickers de 0,5 Kgf (HV0,5). As profundidades de camada endurecida foram determinadas com base na norma EN 10052, onde a profundidade de camada

endurecida é obtida pelo valor correspondente a 70% da dureza superficial. Observa-se na Figura 58a que a camada menor atingiu a profundidade mínima de 1,4 mm para todas as posições medidas, sendo o objetivo mínimo de 1,2 mm. Já para a amostra com maior camada endurecida (Figura 58b), observa-se que as camadas atingem profundidades superiores aos 2,2 mm planejados para todas as posições avaliadas. Observa-se em ambos os casos uma heterogeneidade entre, pelo menos, uma das posições medidas. No caso da camada de 1,2 mm, a posição de 0° apresenta uma camada superior às demais (0,3 mm de diferença). Já para a camada maior, a posição de 270° apresentou menor camada endurecida (0,1 mm de diferença).

Figura 58. Perfis de microdureza após a têmpera por indução para amostras trefiladas com ferramenta de 15°. (a) Camada endurecida de 1,2 mm; (b) Camada endurecida de 2,2 mm.

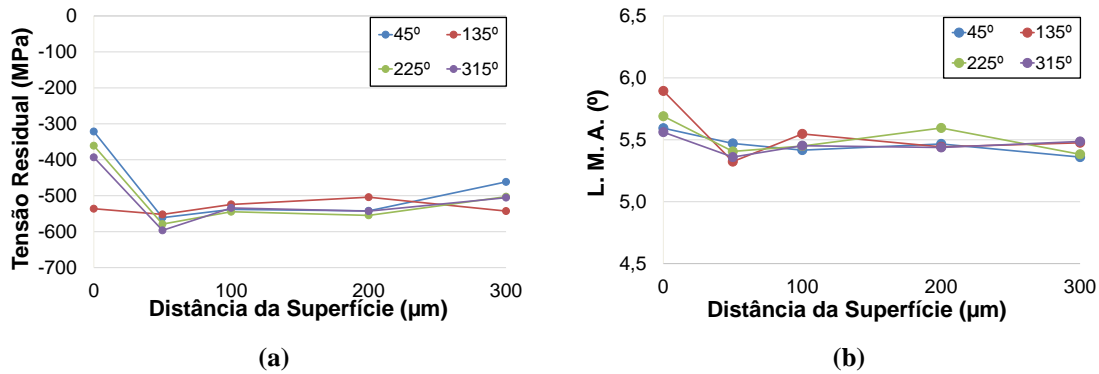


Fonte: Próprio autor.

As tensões residuais apresentadas na Figura 59a da amostra com camada de 1,2 mm indicam uma dispersão na superfície do material com tensões menos compressivas do que nas profundidades subsequentes (50 a 300 μm). As tensões residuais na superfície apresentaram valores entre 300 e 400 MPa compressivos (com exceção do ângulo 135°) e para as outras profundidades avaliadas os valores ficaram entre 500 e 600 MPa. Esta dispersão pode estar associada à decarbonetação superficial provocada pelo aquecimento da barra, bem como a uma presença de austenita retida e a formação de uma martensita mais grosseira.

Os resultados das Larguras à Meia Altura (LMA) (Figura 59b) não permitem concluir sobre estas possibilidades, pois não houve alterações em relação às outras profundidades. O valor de tensões mais compressivas observadas para o ângulo de 135°, de 530 MPa, pode ser justificado por algum eventual dano a barra (impacto, oxidação etc.).

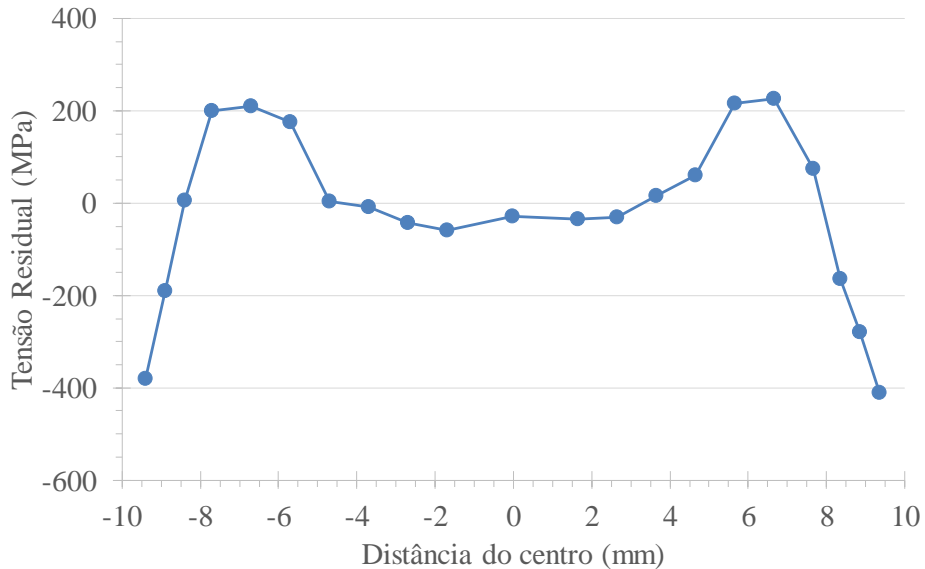
Figura 59. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura à Meia Altura para as amostras temperadas por indução com camada de 1,2 mm.



Fonte: Próprio autor.

O perfil de tensões residuais da amostra endurecida através de tempera por indução com camada de 1,2 mm, obtido através de difração de nêutrons é apresentado na Figura 60. O vetor curvatura desta amostra está posicionado do lado esquerdo (-10) em direção ao direito (+10) no gráfico. Esta amostra demonstrou uma pequena assimetria na distribuição de tensões residuais, principalmente nas extremidades, onde o lado esquerdo (-10) apresenta tensões menos compressivas que o lado direito (+10), com uma diferença de 60 MPa entre as posições extremas.

Figura 60. Perfil de tensões residuais após o processo de têmpera por indução com camada de 1,2 mm.



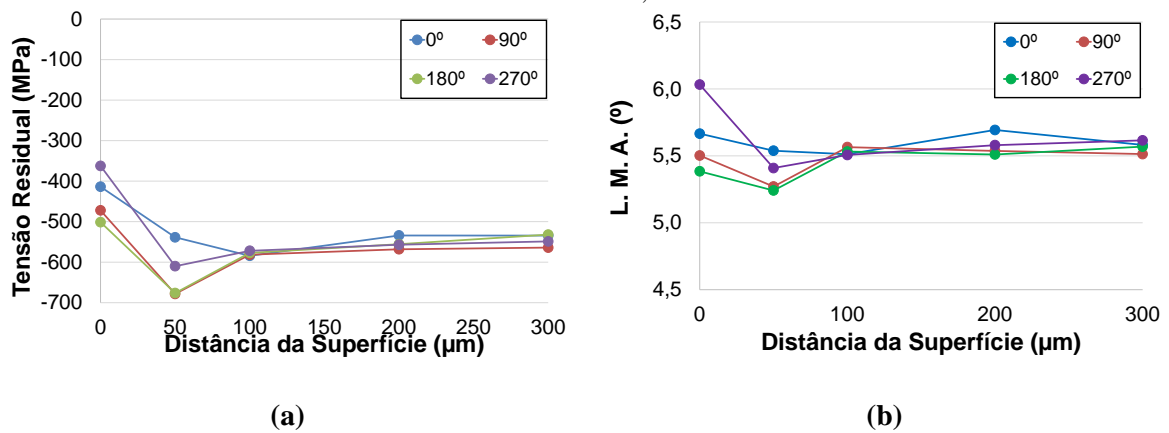
Fonte: Próprio autor.

Para a amostra com camada de 2,2 mm apresentada na Figura 61a, observa-se uma extensão da dispersão superficial para profundidades de medição maiores (até 50 µm), além de uma dispersão maior em termos de valores (aproximadamente 175 MPa). Na Figura 61b gráficos

das Larguras à Meia Altura apresentam uma dispersão para as mesmas profundidades, indicando que fatores como os descritos anteriormente para a amostra de 1,2 mm possam estar afetando os valores mensurados.

A maior profundidade desta dispersão pode ser atribuída as maiores temperaturas necessárias para a realização de uma camada endurecida maior (GRUM, 2007). Uma vez que foram observadas estruturas martensíticas mais grosseiras e uma presença maior de austenita retida em relação a camada menor.

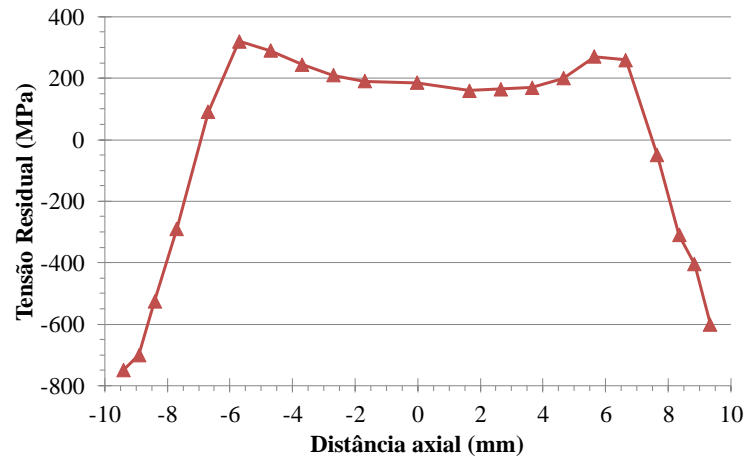
Figura 61. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura à Meia Altura para as amostras temperadas por indução com camada de 2,2 mm.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 62 apresenta o perfil de tensões residuais de uma amostra com camada de 2,2 mm obtidos por difração de nêutrons. Neste caso, a curvatura da barra aponta para o lado esquerdo do gráfico (-10 mm). Este perfil apresenta também uma heterogeneidade entre os lados da barra e uma distribuição semelhante, onde a direção de curvatura (-10) apresenta valores de picos mais trativos e picos mais compressivos que o lado oposto (+10). Diferente da amostra com camada menor, somando-se este perfil aos resultados obtidos por difração de Raios-X observa-se uma diferença semelhante em magnitude (entre 50 e 150 MPa) mas, neste caso, o resultado obtido por difração de nêutrons tem valores mais compressivos. Além da já mencionada diferença de resolução entre as técnicas de avaliação, a diferença nas posições avaliadas pode ser um fator que altere estes resultados. Uma vez que as avaliações com difração de Raios-X foram realizadas em todas as amostras nas mesmas posições periféricas (ângulos de referência), para as medições de difração de nêutrons as amostras foram avaliadas somente na secção do vetor curvatura.

Figura 62. Perfil de tensões residuais para amostra temperada por indução com camada de 2,2 mm.

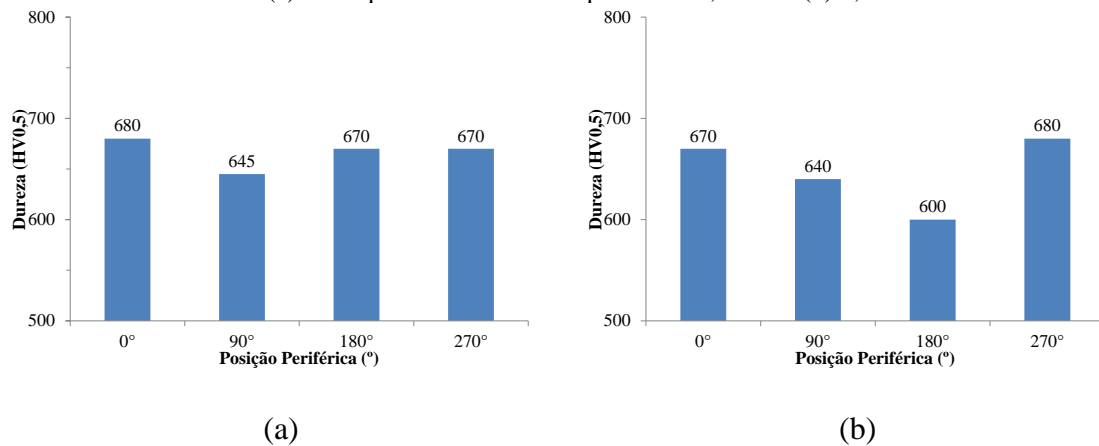


Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Retificação

As durezas das amostras após o processo de retífica de $100\ \mu\text{m}$ são apresentadas na Figura 63. Observa-se que na amostra com camada temperada de 1,2 mm, mostrada na Figura 63a, a variação entre os valores de dureza chega a $80\ \text{HV}_{0,5}$ entre as posições periféricas de 180° e 270° . Na amostra com camada de 2,2 mm apresentada na Figura 63b, a variação entre as durezas próximas a superfície são menores, chegando ao máximo de $35\ \text{HV}_{0,5}$ entre as posições 0° e 90° . Estes valores são bastante próximos aos observados para as amostras após o tratamento térmico de têmpera por indução.

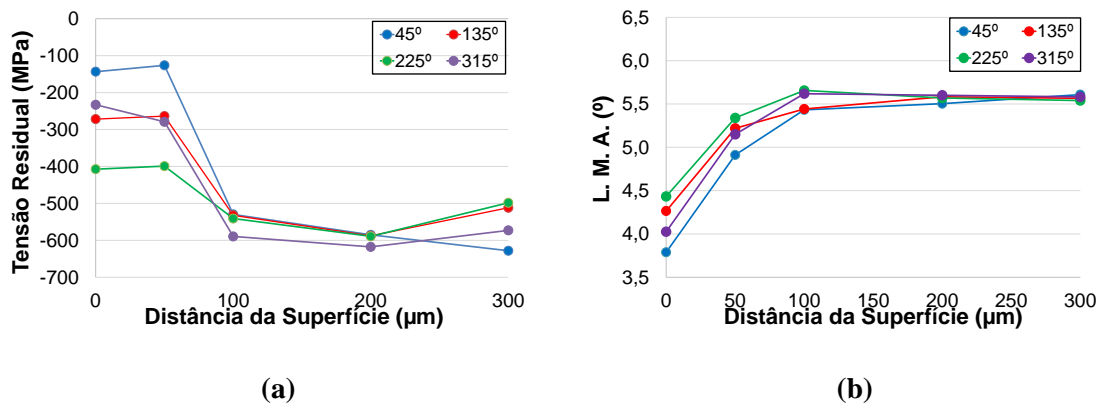
Figura 63. Durezas superficiais para as amostras após o processo de retificação com remoção de $100\ \mu\text{m}$. Onde (a) corresponde a camada temperada de 1,2 mm e (b) 2,2 mm.



Fonte: Próprio autor.

As análises de tensões residuais por DRX após o processo de retífica foram realizadas apenas para uma amostra retificada com a profundidade de 100 µm e camada temperada de 2,2 mm. Na Figura 64a se pode observar que há uma grande dispersão entre os valores medidos para as profundidades de 0 e 50 µm, além de tensões residuais menos compressivas que nas profundidades subsequentes. Esta diferença chega a, aproximadamente 300 MPa, sendo os ângulos de referência opostos de 45° e 225° os que apresentam tal dispersão. É possível observar no gráfico da largura à meia altura, apresentado na Figura 64b, uma variação de até 1,7° na superfície e até 0,5° na profundidade de 50 µm em seus valores quando comparados com as profundidades subsequentes. Estes resultados se assemelham a perfis descritos na literatura para este tipo de processo. Considerando-se a existência de tensões residuais presentes no material previamente ao processo de retificação.

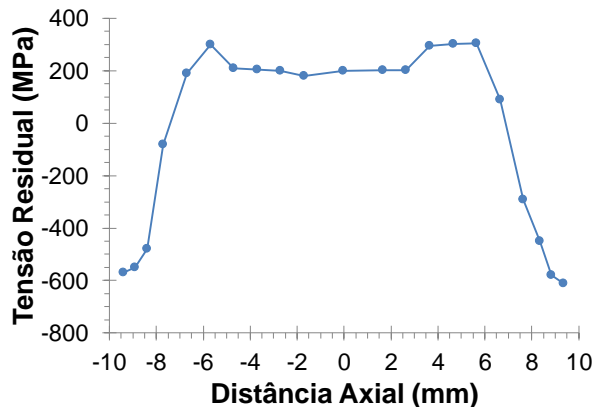
Figura 64. Perfis de (a) tensões residuais e (b) Largura a Meia Altura para amostra retificada com profundidade de 100 µm e camada temperada de 2,2 mm.



Fonte: Próprio autor.

No perfil obtido através do método de difração de nêutrons apresentado na Figura 65 a amostra com camada de 2,2 mm apresenta um perfil de tensões residuais semelhantes ao observado na amostra após a têmpera com mesma profundidade de camada (ver Figura 62).

Figura 65. Perfil de tensões residuais obtido por difração de nêutrons após o processo de tempera por indução com profundidade de camada de 2,2 mm.

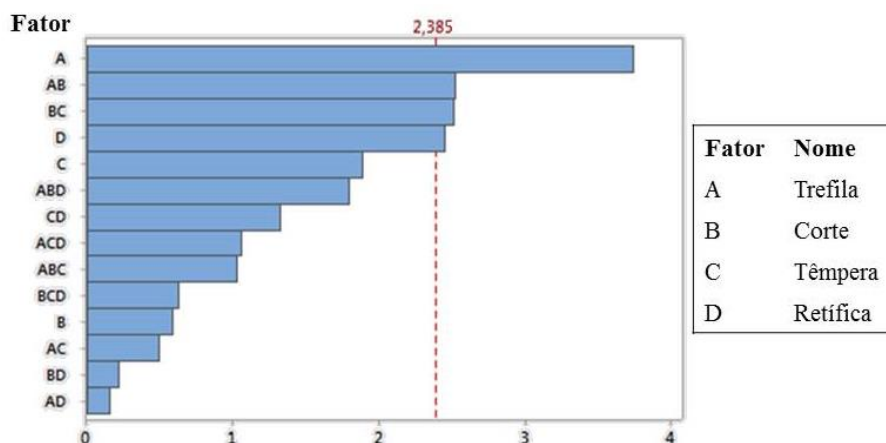


Fonte: Próprio autor.

4.3 ANÁLISE DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO (DOE)

O resultado da análise do DoE com base nas curvaturas finais dos eixos é apresentado na Figura 66 através de um gráfico de Pareto. Observa-se que, para um fator de confiabilidade de 98%, o processo de trefilação é o mais significativo na curvatura final do produto. Este resultado vai ao encontro de outros resultados publicados recentemente. A interação entre a trefilação e processo de corte apresenta uma significância semelhante a interação entre os processos de corte e têmpera por indução. O último fator significativo para a análise é o processo de retífica, o qual já era esperado, pois seu propósito é a remoção da curvatura gerada após o processo de tratamento térmico. A análise de resíduos estatísticos teve como resultado uma distribuição em S, sugerindo uma distribuição com caudas longas.

Figura 66. Efeitos Padronizados da análise do DoE contendo combinações de até 3 fatores. O valor 2,385 indica o limite mínimo para que um fator (ou uma soma de fatores) sejam considerados significativos com uma confiabilidade de 98%.



Fonte: Próprio autor.

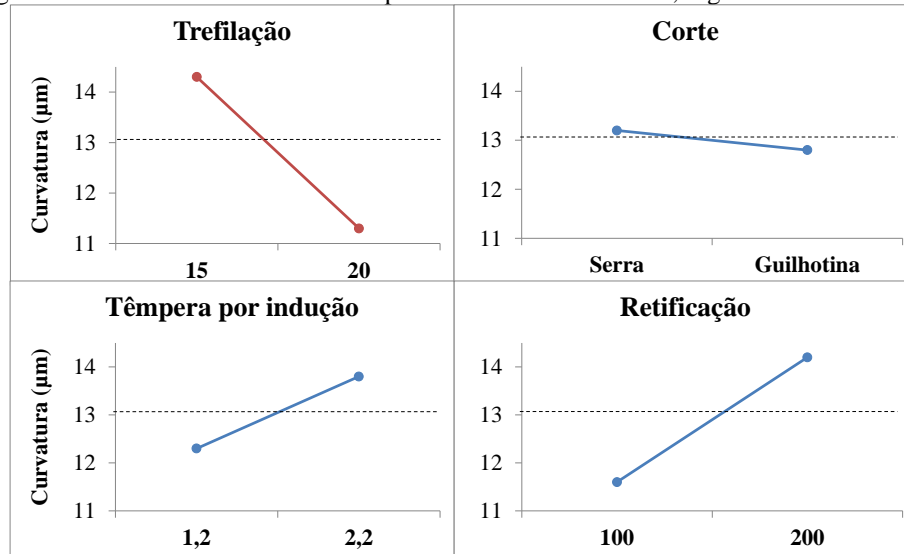
A relação dos efeitos dos parâmetros e as curvaturas médias são apresentadas na Figura 67. Pode-se verificar que o processo de trefilação com ângulo de 15° apresenta maiores curvaturas. Já para o processo de corte, apesar de apresentarem efeitos muito semelhantes na curvatura, o corte com serra apresentou maiores curvaturas que o corte com guilhotina. Para o processo de tratamento térmico, a maior camada endurecida apresentou maiores curvaturas. E para o processo de retífica, a maior profundidade de remoção acarretou maiores curvaturas.

Nesta relação apresentada, alguns fatores chamam a atenção, como o caso da ferramenta de trefilação com ângulo de 15°, que levou a maiores curvaturas que as amostras trefiladas com ferramenta com ângulo de 20°. O que não era esperado segundo resultados prévios (NUNES, 2012) e simulações numéricas (SOARES, 2012; SOUZA, 2011). Destaca-se também o fato de

a maior remoção de material no processo de retífica com 200 μm de profundidade haver acarretado maiores curvaturas finais.

Finalmente, observou-se que a maior influência do processo de corte com serra, embora muito semelhante, não era esperada, uma vez que o processo de corte com guilhotina apresentou maiores potenciais de distorção, como gradiente de tensões residuais e deformações de grãos.

Figura 67. Efeitos individuais de cada processo na curvatura final, segundo cálculo do DoE.



Fonte: Próprio autor.

Destaca-se que a análise do Planejamento de Experimento apresenta resultados coerentes com os resultados observados nas avaliações de cada processo.

4.4 RESUMO DA ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Baseado nos resultados apresentados no presente capítulo, algumas conclusões iniciais podem ser realizadas. Com relação aos seguintes aspectos avaliados:

Dimensional

É necessário avaliar a ocorrência de algum evento não controlado durante a etapa de trefilação combinada que possa ser responsável pelo resultado observado de empenamento de 84% das barras para o mesmo quadrante. A existência deste evento fica mais clara, uma vez que não era esperado o maior empenamento das barras para a trefilação com ângulo de 15° e, principalmente, para uma direção preferencial. Observações no material indicam variações na

posição da segregação dentro do mesmo fio-máquina (lote de material) e observações no processo indicam heterogeneidades na etapa de trefilação combinada.

Observou-se que a maior camada temperada resulta, na média, em maiores distorções.

O processo de retífica com profundidade de 100 μm . se mostrou com eficiência semelhante ou maior que o processo com remoção de 200 μm .

Análise da Matéria Prima e Trefilação Combinada

O aço apresenta uma zona de segregação na região central da secção transversal. As análises químicas indicam que estas segregações possuem uma quantidade elevada de carbono (0,7 %massa).

Observaram-se variações microestruturais em diferentes secções transversais analisadas, tais como a mudança da localização da zona de segregação.

A ferramenta de trefilação com ângulo de 20° causou maiores deformações próximas à superfície que a ferramenta de 15° conforme observados nos resultados das metalografias e durezas.

Corte

O processo de corte com guilhotina apresenta deformações microestruturais até uma profundidade de 400 μm da superfície cortada. Estas deformações acarretaram um aumento da dureza próxima a superfície de até 70 HV1.

O perfil das tensões residuais superficiais do processo de corte com guilhotina é heterogêneo no perímetro e apresenta gradientes até uma distância de 30 mm.

O corte com serra não apresenta variações microestruturais e na dureza próxima a região cortada. A pequena variação observada nas tensões residuais está associada mais ao relaxamento das tensões próximo a uma extremidade do que a um efeito do processo em si.

Tratamento Térmico

A camada de 2,2 mm apresentou uma microestrutura martensítica mais grosseira que a observada na amostra com 1,2 mm de camada, conforme visto nas metalografias.

As tensões residuais indicaram dispersões próximas às superfícies para as diferentes camadas endurecidas utilizadas. Estas variações são maiores para a camada maior.

Os perfis de tensões residuais obtidos por difração de nêutrons indicam que as tensões compressivas são maiores nas superfícies do lado convexo da barra (para onde aponta o vetor curvatura).

Retificação

A análise de tensões residuais nas regiões próximas a superfície indica a ocorrência de um perfil de tensões semelhantes aos descritos na literatura, somados ao estado de tensões residuais prévio do material.

O perfil de tensões residuais por difração de nêutrons demonstra uma redução no gradiente de tensões ao longo da peça e uma distribuição similar a dos perfis anteriores ao processo.

Planejamento de Experimento

A análise do planejamento de experimento aponta a etapa de trefilação combinada como a mais significativa rota de fabricação avaliada. A interação entre a trefilação e processo de corte apresenta uma significância semelhante a interação entre os processos de corte e tratamento térmico. E processo de retificação é o último fator a possuir significância na distorção.

5 DISCUSSÃO GERAL

O presente capítulo tratará das discussões gerais com relação aos resultados apresentados no capítulo anterior. Para isto, será discutida a evolução dos resultados ao longo da rota de fabricação estudada. Os tópicos abordados serão as evoluções dimensionais, mudanças microestruturais, variações de dureza, evolução das tensões residuais (juntamente com a combinação das diferentes técnicas utilizadas) e uma discussão inicial sobre a existência de “variações não-controladas” identificados no trabalho.

5.1 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (VETOR CURVATURA)

As magnitudes médias dos vetores curvaturas, bem como os respectivos desvios padrão, para cada etapa da rota de fabricação em função do ângulo da ferramenta de trefilação estão compiladas na Tabela 6. Observa-se a coerência dos resultados apresentados pelo estudo do DoE, uma vez que as maiores diferenças são causadas pelo ângulo da ferramenta de trefilação após o tratamento térmico e pelas diferentes profundidades de camada endurecida. Os resultados das curvaturas médias após a têmpera apresentam uma diferença entre as ferramentas de trefilação (15° e 20°) de 118 μm entre as amostras com camada temperada de 1,2 mm, com 184 μm para ferramenta de 15° e 66 μm para a ferramenta de 20°. Essa diferença diminui para 97 μm entre as amostras com camada de 2,2 mm, sendo 193 μm para as amostras com a ferramenta de 15° e 96 μm para a ferramenta de 20°. Ambas com menores valores para as amostras trefiladas com ferramenta com ângulo de 20°.

As diferenças entre as curvaturas após a têmpera indicam que o processo com camada endurecida de 1,2 mm apresenta menores curvaturas que o tratamento com camada de 2,2 mm. Estas diferenças são de, aproximadamente, 5% para o ângulo de 15° e 70% para o ângulo de 20°. Portanto, as variações entre as curvaturas devidas às profundidades de camada são claras, assim como apresentado por Nunes (2012), mas também é possível verificar que a influência do processo de trefilação ainda se faz presente.

É possível observar ainda que todos os resultados após os processos de retífica apresentam curvaturas menores que as apresentadas inicialmente, anteriores aos tratamentos térmicos. Para as amostras trefiladas com o ângulo de 20°, a profundidade de remoção de 100 μm evidenciou

menores curvaturas para ambas as camadas temperadas. Já para as amostras trefiladas com ângulo de 15°, a diferença entre os valores é muito pequena. Este é mais um indício de que o processo de trefilação apresentou influências maiores que as etapas subsequentes na distorção das amostras. Contudo, é possível afirmar que a remoção de 100 µm é suficiente para a obtenção de eixos com curvaturas menores que as observadas antes do processo de têmpera por indução.

Tabela 6. Resumo das curvaturas médias para as diferentes etapas do processo, separados pelo ângulo da ferramenta de trefilação.

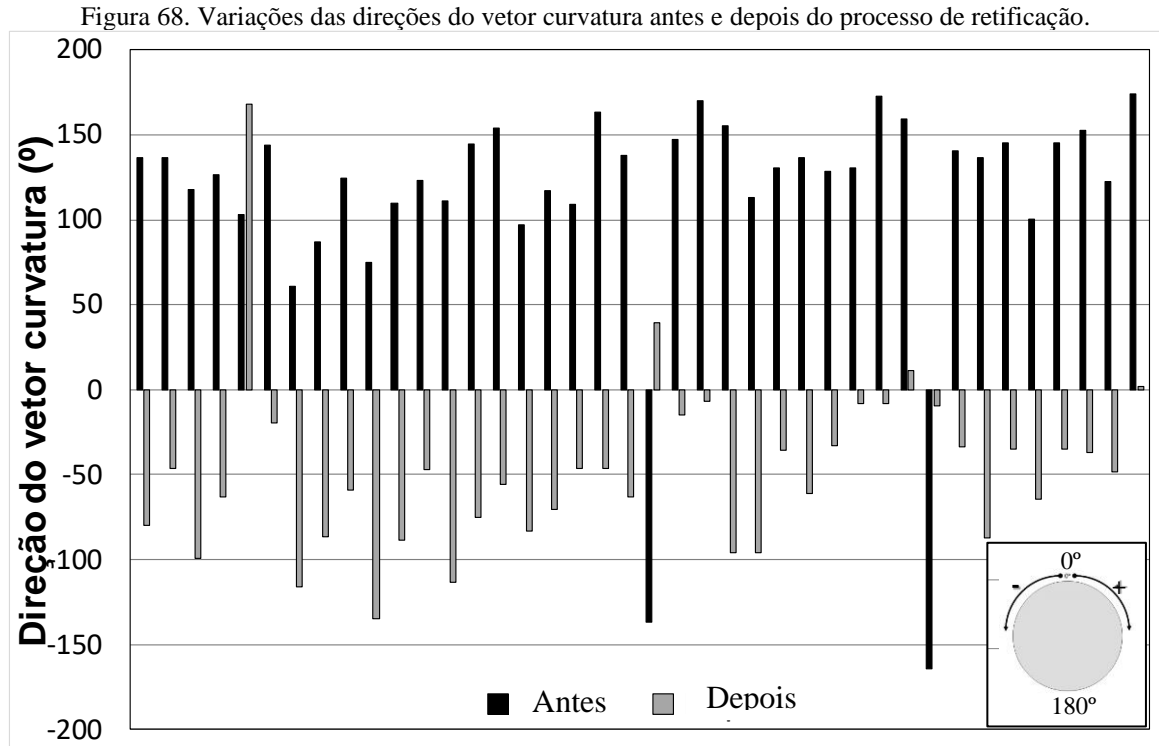
Trefila 15°			Trefila 20°		
Têmpera (mm)	Retífica (µm)	Curvatura Média (µm)	Têmpera (mm)	Retífica (µm)	Curvatura Média (µm)
-	-	22 ± 12	-	-	23 ± 12
1,2	-	184 ± 54	1,2	-	66 ± 28
2,2	-	193 ± 63	2,2	-	96 ± 47
1,2	100	15 ± 5	1,2	100	11 ± 3
1,2	200	14 ± 2	1,2	200	15 ± 8
2,2	100	12 ± 5	2,2	100	9 ± 5
2,2	200	14 ± 4	2,2	200	16 ± 5

Fonte: Próprio autor.

A análise dos resultados das direções das curvaturas após o processo de retífica apresentou um efeito de “inversão” da curvatura com relação aos resultados das amostras após o tratamento térmico. Na Figura 68 observa-se esta variação para os resultados de direção da curvatura (ângulo) antes e depois do processo de retífica para as amostras trefiladas com 15°. Essa variação observada no ângulo do vetor curvatura foi em média de 165°. Esta mudança de direção pode ser atribuída a uma remoção heterogênea de material ao longo da amostra, uma vez que ela possuía uma curvatura antes da realização do processo. A remoção através do processo de retífica é determinada através da profundidade de avanço designada ao rebolo de retificação em relação a ponta (face) da barra, imaginando-se tratar de uma barra reta. Portanto, a remoção em uma barra que já possua uma curvatura prévia irá acarretar na remoção heterogênea de material da barra.

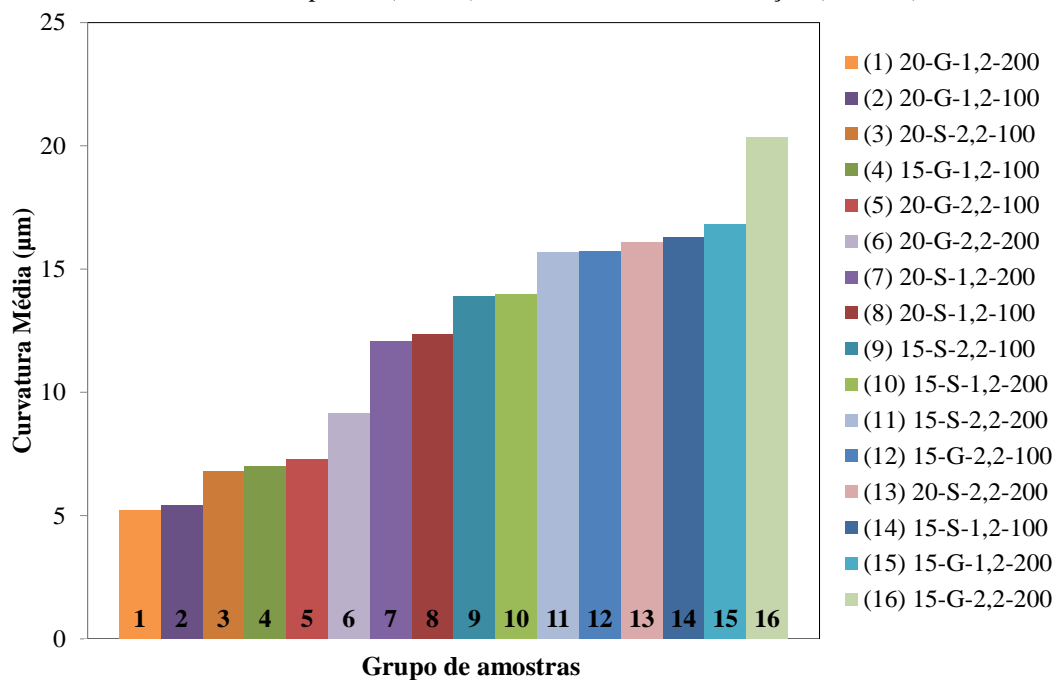
A classificação final dos conjuntos de amostras está apresentada na Figura 69 em função de suas curvaturas finais (valores médios). Percebe-se que o conjunto que apresentou os menores valores de curvaturas médias utilizou a seguinte rota: ferramenta de trefilação com ângulo de 20°; corte cisalhado (guilhotina); camada temperada de 1,2 mm; profundidade de retificação de 200 µm. Com valores bastante semelhantes aparece o conjunto com rota similar, onde somente a profundidade de retificação mudando para 100 µm. O maior valor médio das curvaturas é apresentado pelo conjunto com a seguinte rota: ferramenta de trefilação de 15°; corte cisalhado;

camada temperada de 2,2 mm; profundidade de retificação de 200 μm . A presença do corte cisalhante tanto na rota com menores curvaturas quanto na rota com maiores serve como mais um indicativo de que, para as geometrias trabalhadas, o tipo de corte não apresenta influência significativa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 69. Resumo das curvaturas médias para cada grupo de rotas de fabricação utilizados. Representados na legenda da seguinte forma: (Classificação) Ferramenta de Trefilação (20/15) – Tipo de corte (G/S) – Camada Temperada (1,2/2,2) – Profundidade de Retificação (100/200).



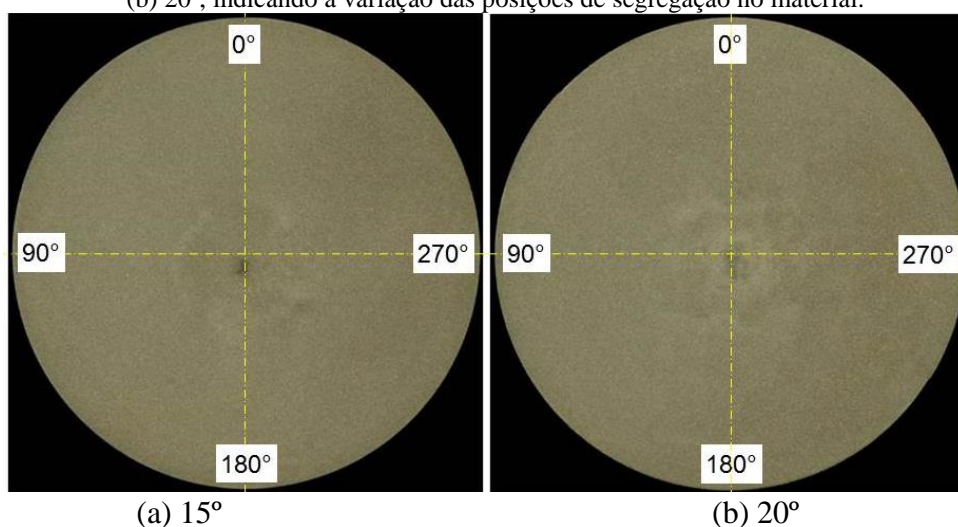
Fonte: Próprio autor.

Outra informação obtida na análise deste gráfico apresentado na Figura 69 é que das 8 rotas com menores curvaturas médias (metade dos grupos), apenas uma utilizou a ferramenta de trefilação de 15°. Isto colabora com o entendimento de que algum evento complementar ocorre no processo de trefilação combinada, fazendo com que a utilização da ferramenta de 15° apresente maiores curvaturas finais, indo no sentido oposto do esperado durante o planejamento do experimento e observado por outros autores (HIRSCH, 2014; ROCHA, 2012).

5.2 MICROESTRUTURA

Observou-se ao longo das análises metalográficas que o material apresentava variações nas distribuições de segregações em diferentes amostras em cortes nas secções longitudinais e transversais. A Figura 70 ilustra estas diferenças com relação à secção transversal das amostras. Para a amostra trefilada com ângulo de 15°, apresentada na Figura 70a, observa-se a presença de uma zona de segregação bastante concentrada, porém deslocada do centro da barra, enquanto para a amostra trefilada com ângulo de 20° (Figura 70b) esta zona de segregação não se mostra muito concentrada, mas está mais centralizada que a amostra apresentada na Figura 70a. Estas variações observadas indicam que o material não é homogêneo tanto na secção transversal quanto ao longo do seu comprimento (observados na Figura 45) devido as heterogeneidades no seu processo de solidificação, uma vez que todas as amostras são oriundas do mesmo fio-máquina, gerado a partir do processo de lingotamento contínuo (PRINZ et al., 2009).

Figura 70. Macrografias de amostras retiradas após o processo de trefilação com ferramentas de ângulo (a) 15° e (b) 20°, indicando a variação das posições de segregação no material.

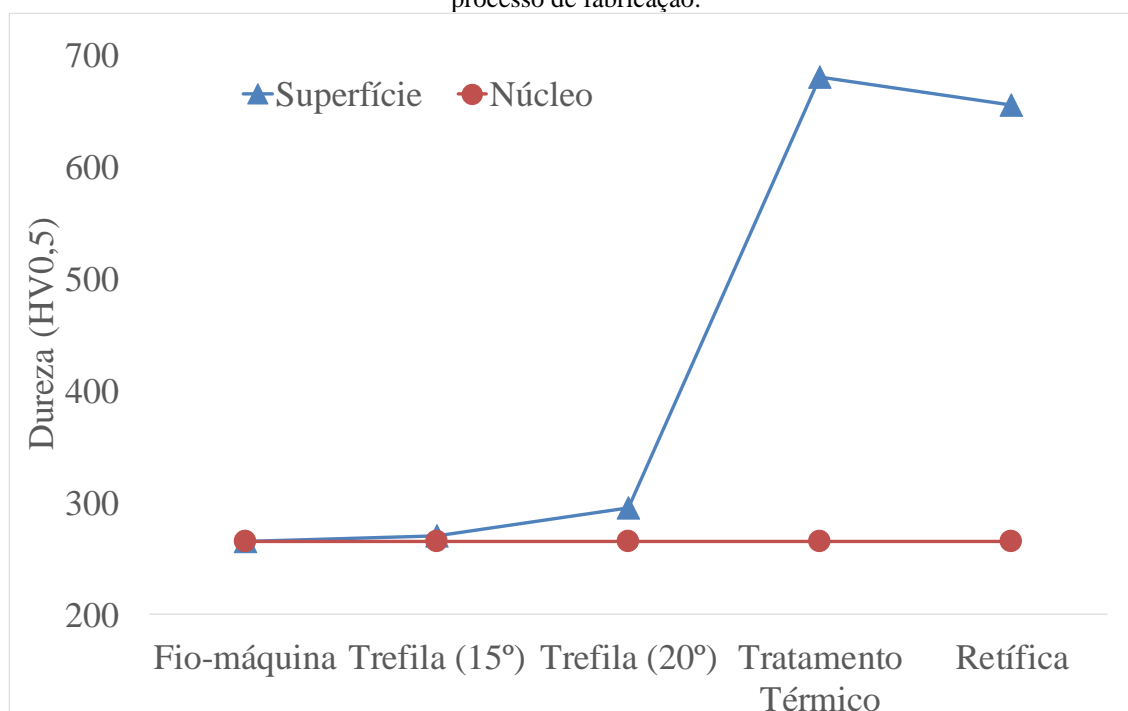


Fonte: Próprio autor.

5.3 DUREZA

A evolução das durezas médias superficiais em comparação com as durezas de núcleo é apresentada na Figura 71. A dureza de núcleo apresenta um valor médio de 265 HV0,5. Observa-se que os ângulos de trefilação apresentam diferentes aumentos na dureza superficial, para 270 HV0,5 para a amostra que utilizou a ferramenta de trefilação com ângulo de 15° e 295 HV0,5 para a amostra que utilizou a ferramenta de trefilação com ângulo de 20°. Portanto, observa-se um aumento de 5 Vickers para a amostra trefilada com ferramenta com ângulo de 15° e 40 Vickers para a ferramenta com ângulo de 20°. Os resultados mostram que a ferramenta com ângulo de 20° necessita de maior força de trefilação e, conseqüentemente, apresenta maiores forças cisalhantes resultando em grãos mais deformados na região superficial (WISTREICH, 1958). A transformação de fases realizada pelo tratamento térmico de têmpera por indução aumenta a dureza superficial para 680 HV0,5 em média. O processo de retificação indica um valor médio de 655 HV0,5, um indicativo do aporte térmico que afetou também os as tensões residuais (DING et al., 2017).

Figura 71. Evolução da dureza média superficial em comparação com a dureza média do núcleo ao longo do processo de fabricação.



Fonte: Próprio autor.

5.4 TENSÕES RESIDUAIS

A discussão sobre os resultados apresentados de tensões residuais divide-se em duas partes, uma delas referente as tensões residuais superficiais realizadas através da DRX, e a seguinte, referente aos perfis de tensões residuais obtidos através da Difração de Nêutrons.

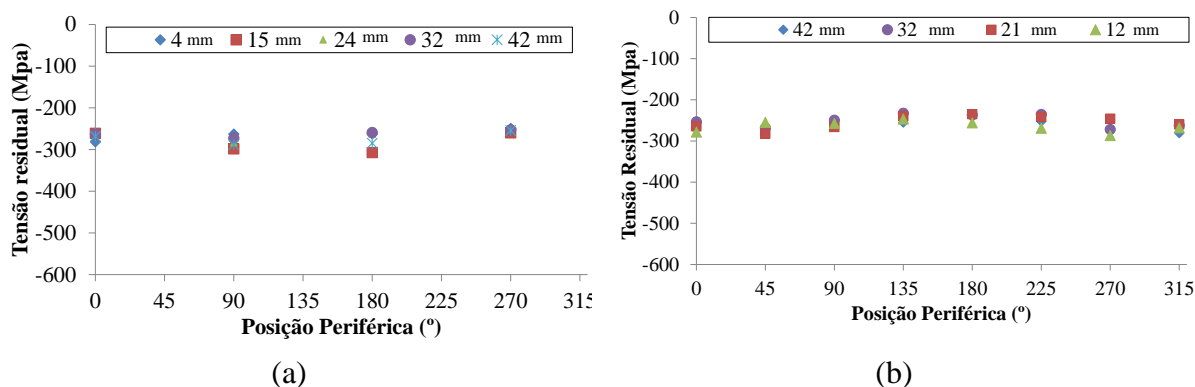
5.4.1 Tensões Residuais Superficiais

A evolução das tensões residuais superficiais ao longo da cadeia de processo é apresentada primeiramente após o processo de trefilação combinada comparando-se os resultados dos diferentes ângulos de trefilação utilizados. Posteriormente, serão comparados os resultados das tensões residuais superficiais após as etapas de tratamento térmico e após a etapa de retífica para amostras trefiladas com o ângulo de 15°. Como os processos de corte mostraram efeitos somente nas proximidades das pontas das barras, não é possível comparar seus resultados com as regiões centrais medidas para as outras amostras, portanto esses resultados não serão tratados neste capítulo.

A distribuição de tensões residuais obtidas após o processo de trefilação combinada é apresentada nas Figura 72a, para o ângulo de 15°, e Figura 72b para o ângulo de 20°. Observou-se um valor médio de 255 MPa compressivos para ambas as amostras, com uma diferença entre os valores mínimos e máximos de 42 MPa para a amostra de 15° e de 50 MPa para a amostra de 20°, além de um padrão ondulatório de distribuição entre as posições periféricas.

Não é possível destacar diferenças consideráveis entre os ângulos das ferramentas de trefilação utilizados. Estas diferenças na superfície são dificilmente observadas devido ao processo de PERC transformar as tensões residuais superficiais em compressivas. Os padrões de tensões são compatíveis e comparáveis com observados por Nunes (2012) que estudou o mesmo processo com as mesmas ferramentas de trefilação.

Figura 72. Tensões residuais superficiais nas posições periféricas das amostras trefiladas com ferramentas de ângulos: (a) 15° e (b) 20°. As legendas do gráfico indicam as posições de medições na barra com relação a ponta contendo o entalhe na amostra.



Fonte: Próprio autor.

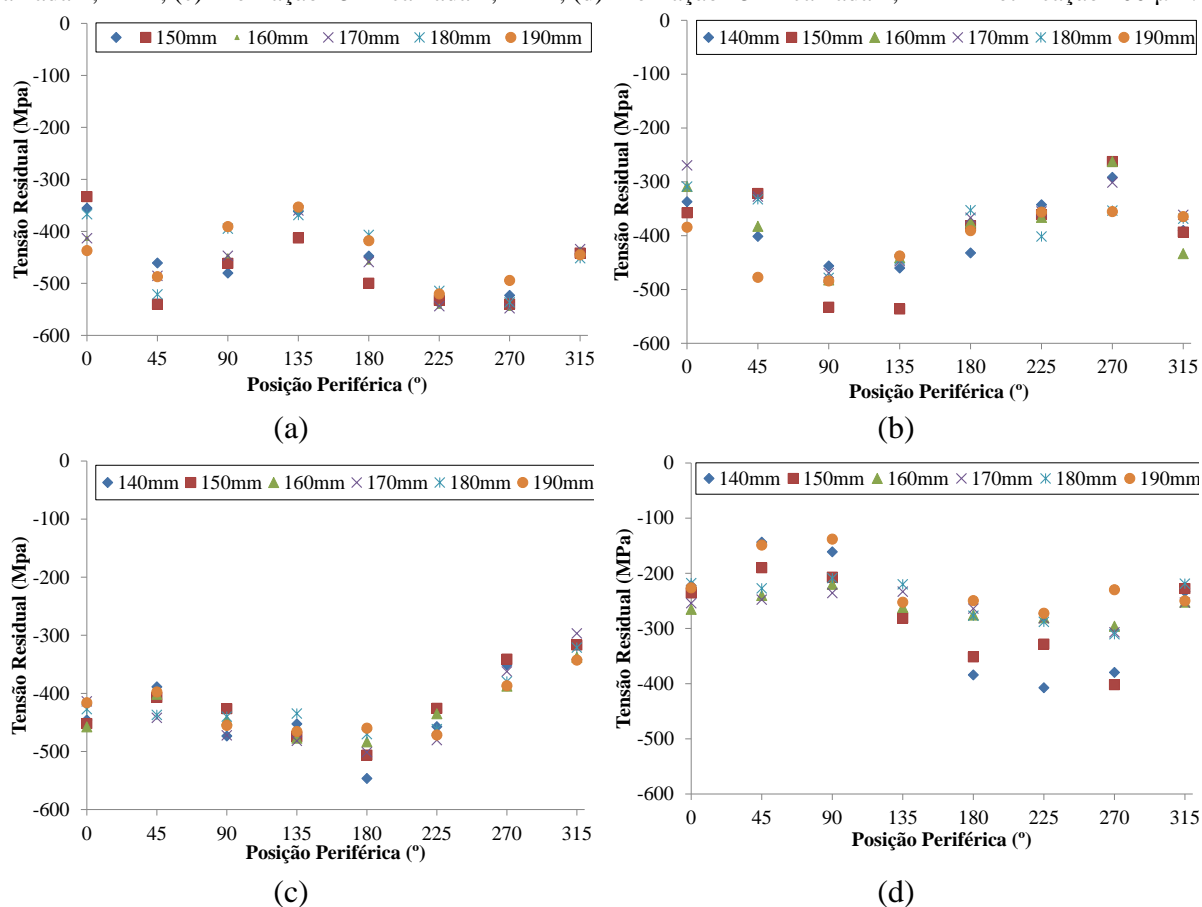
O processo de tratamento térmico leva a um aumento na magnitude das tensões residuais longitudinais compressivas assim como no gradiente de tensões (dispersão de valores) nas posições periféricas das amostras. Para a amostra trefilada com ângulo de 20° e camada de 1,2 mm (Figura 73a), as tensões variam entre -330 e -540 MPa. Já para a amostra com ângulo de trefilação de 15° e mesma profundidade de camada (Figura 73b) as tensões variam entre -260 e -540 MPa. Além das maiores variações entre as magnitudes das tensões residuais, a amostra com ângulo de 15° apresenta também maiores dispersões ao longo do comprimento da barra para a mesma posição periférica, no caso, a posição de 45° apresenta uma variação de 150 MPa entre os valores medidos e, na amostra com ângulo de trefilação de 20° a maior variação observada foi de 103 MPa, para a posição periférica de 0°.

Para a camada de 2,2 mm e ângulo de trefila de 15° (Figura 73c), as variações ao longo da barra em uma mesma posição periférica são menores, mas a dispersão entre as posições periféricas é maior que os observados nas amostras com camada de 1,2 mm, chegando a 250 MPa de diferença entre o menor valor e o maior valor compressivo. O resultado das medições no processo de retífica apresentado na Figura 73d indica uma dispersão mais elevada (a maior entre as etapas analisadas) tanto entre as posições periféricas quanto entre as diferentes distâncias medidas. A variação observada entre as posições periféricas chega a 270 MPa (de -138 MPa a -408 MPa) e para uma mesma posição, a variação ao longo da barra chega a 170 MPa (-230 MPa a -400 MPa).

Todas as amostras apresentam uma variação ondulatória na distribuição das tensões residuais no perímetro das amostras. Esse comportamento é observado de forma bastante sutil após o processo de trefilação combinada (Figura 73) e se torna mais evidente após o processo de tratamento térmico. Estas variações remetem as etapas de pré endireitamento vertical e

horizontal que imprimem deformações heterogêneas no material e seus efeitos podem ser observados ao longo da rota de fabricação (DIEHL et al., 2017). Esses dados indicam uma “assinatura de processo”, um efeito que se propaga ao longo da rota de fabricação. Os efeitos observados contribuem também para a afirmação da existência de variações não-controladas durante a etapa de trefilação combinada que influenciam nas propriedades do material ao longo de toda a rota de fabricação.

Figura 73. Distribuição de tensões residuais superficiais em diferentes posições periféricas para as profundidades especificadas nos gráficos após os processos de: (a) Trefilação 20° + camada 1,2 mm; (b) Trefilação 15° + camada 1,2 mm; (c) Trefilação 15° + camada 2,2 mm; (d) Trefilação 15° + camada 2,2 mm + retificação 100 μm .



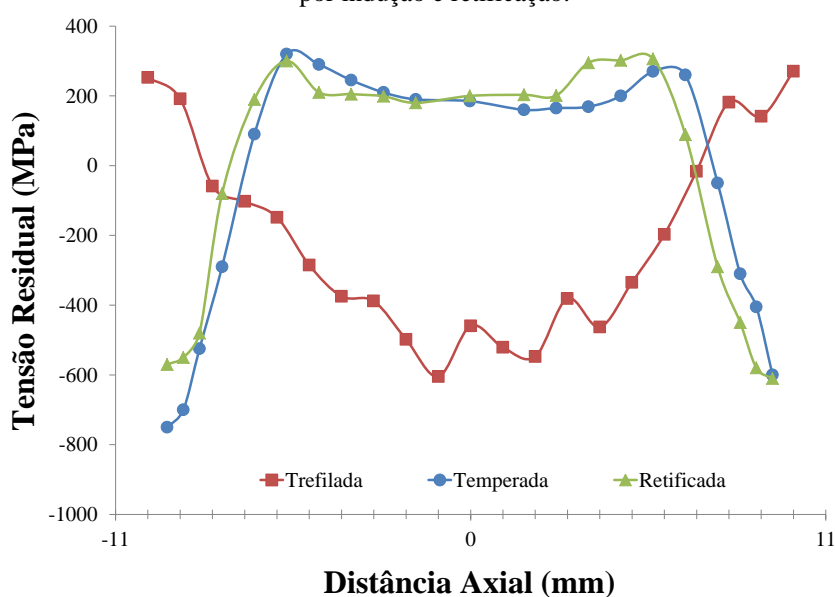
Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Perfis de Tensões Residuais

A evolução dos perfis de tensões residuais ao longo da secção transversal está apresentada na Figura 74. Observa-se que o perfil após o processo de trefilação, apresentado previamente por Zottis (2013), apresenta tensões trativas nas regiões superficiais com as tensões mais compressivas próximas do núcleo. Após o processo de têmpera por indução o perfil indica tensões compressivas na superfície e trativas após 3 mm da superfície até atingir o núcleo. Este

perfil se diferencia do apresentado por Totten (2002) com relação as tensões próximas ao núcleo serem trativas, onde seu trabalho indica que as tensões deveriam ser compressivas. Isto pode ser explicado pelo fato de o modelo apresentado por Totten não considerar o estado de tensões residuais prévio do componente. O perfil após o processo de retífica não sofre alterações significativas em relação ao perfil após a têmpera por indução nas profundidades observadas pelo método.

Figura 74. Perfis de tensões residuais obtidos por difrações de nêutrons após os processos de trefilação, têmpera por indução e retificação.



Fonte: Próprio autor.

Destaca-se que não há simetria nas tensões residuais após nenhuma das etapas avaliadas. Isso mostra que as heterogeneidades dos processos não são compensadas por completo em nenhum momento ao longo da rota de fabricação avaliada, apesar de após o tratamento térmico os perfis apresentarem menores heterogeneidades (gradientes) em relação aos resultados dos processos anteriores. A análise também indica que as variações observadas nas avaliações das superfícies (ensaios de Difração de raios-X) se refletem para o interior do material.

5.5 “VARIAÇÕES NÃO-CONTROLADAS”

Os resultados apresentados através da análise do DoE (Capítulo 4.3) indicam que o processo de trefilação combinada apresentou a maior significância nas curvaturas após o processo final de retífica. Esse resultado se refere às variáveis estudadas e que foram submetidas a alterações controladas para a verificação de seus efeitos. Sabe-se que outros fatores não avaliados também podem afetar a distorção (ROCHA; NUNES; HIRSCH, 2012; ZOCH, 2012), mas não foram

considerados como significativos no planejamento de experimento. Considerando-se que o ângulo de 15° no processo de trefilação apresentou maiores distorções que o ângulo de 20°, apesar de resultados prévios indicarem que o esperado era a ocorrência contrária (ângulo de 20° com maiores distorções), entende-se que outros fatores sejam importantes influenciadores no processo de trefilação, e não somente o ângulo de trefilação.

Para estas variações designou-se o nome de “variações não-controladas”, uma vez que estão presentes no processo de fabricação, mas nem sempre podem ser alteradas ou controladas conforme a necessidade ou através da modificação de parâmetros de processos diretos.

Heterogeneidades nas deformações dos processos de pré endireitamento (vertical e horizontal), desalinhamento entre o fio-máquina e a entrada da ferramenta de trefilação (fieira), variações microestruturais ao longo do fio-máquina, lubrificação não uniforme, além variações não-controladas no pré endireitamento são alguns das possíveis variações não-controladas identificados. O capítulo 6 tratará das hipóteses geradas a partir da determinação destes parâmetros e da metodologia utilizada para a investigação dos mesmos.

5.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados dimensionais indicam claramente que os efeitos do processo de trefilação com ângulo de 15°, além de decorrer em maiores curvaturas, se sobressai com relação a outros efeitos observados nas amostras trefiladas com o ângulo de 20°, como das profundidades de camada endurecida pela têmpera por indução e removida pela retífica.

Observa-se uma mudança de direção nos vetores curvatura de aproximadamente 180° após o processo de retífica.

As análises metalográficas de amostras retiradas após a etapa de trefilação para os diferentes ângulos indicaram diferenças entre as microestruturas, principalmente com relação à formação e posicionamento da zona de segregação. Como estas amostras são oriundas do mesmo fio-máquina (lote de material), necessita-se de maiores estudos para a confirmação da variação microestrutural dentro do lote.

Todos os resultados de tensões residuais superficiais após a etapa de trefilação combinada apresentam tensões compressivas em todo o perímetro com uma variação ondulatória entre as

posições periféricas medidas. Com maiores dispersões, tanto longitudinalmente quanto na circunferência, para a amostra retificada.

Os perfis de tensões residuais indicam que todas as etapas da rota de fabricação apresentam heterogeneidades na secção. Apesar de elas serem menores após os processos de tratamento térmico.

Concluiu-se que existem fatores não avaliados que influenciam, direta ou indiretamente, na distorção dos eixos. Estes fatores foram chamados de “variações não-controladas”, ou seja, variações que afetam o processo, mas nem sempre podem ser alteradas ou controladas.

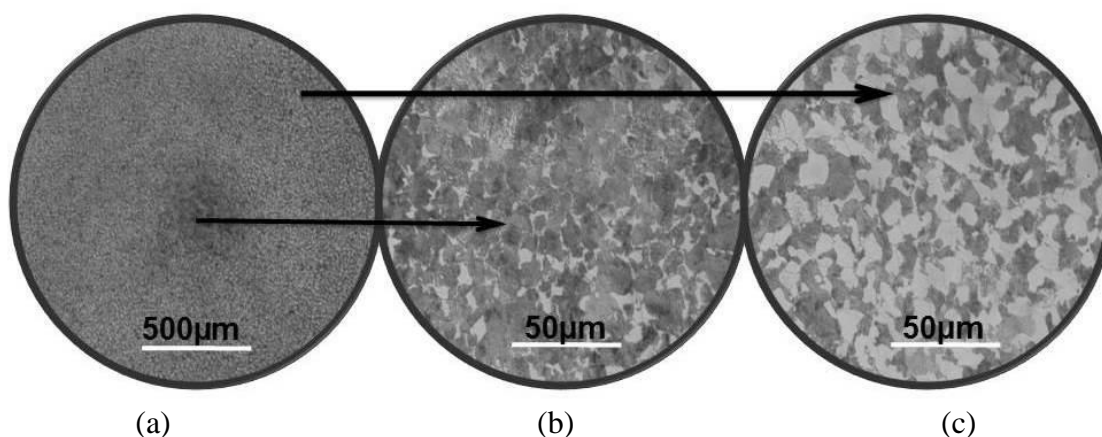
O Capítulo 6 apresentará os resultados e discussão das avaliações realizadas sobre as “variações não-controladas”.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE AS “VARIAÇÕES NÃO-CONTROLADAS”

6.1 HETEROGENEIDADES MICROESTRUTURAIS

Inicialmente, foi observada a zona de segregação como a região mais escura após o ataque com reagente Nital 2%, ver Figura 75a. Após a avaliação com maiores aumentos no microscópio ótico, observa-se que a segregação predomina a região observada (Grãos escuros, Figura 75b), enquanto a ferrita representa um percentual pequeno da área (Grãos claros). Isto pode ser confirmado pelas análises químicas apresentadas no capítulo 4. Na Figura 75c, onde é apresentada uma metalografia com maior aumento da área sem segregação, é possível verificar a diferença de composição entre a zona de segregação e as regiões adjacentes, onde o material apresenta uma distribuição proporcional entre ferrita (Grãos claros) e perlita (Grãos escuros) bastante normal para aços desta classe.

Figura 75. (a) Macrografia da secção da amostra. Micrografias (a) na região de segregação e (b) na região sem segregação. Posições das micrografias estão indicadas pelas setas.



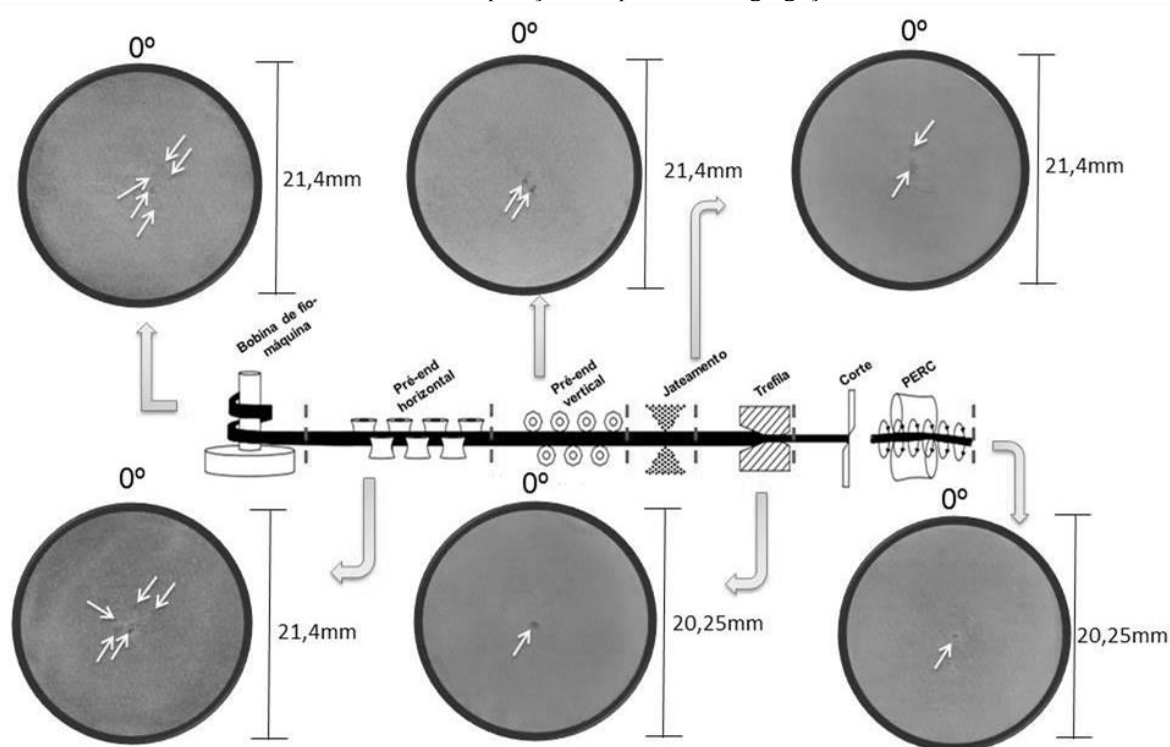
Fonte: Próprio autor.

A análise de diversas secções permite concluir que há variação nas segregações, tanto em tamanho quanto em posição ao longo das diferentes posições do fio-máquina, representado pelas etapas em que ocorreu a retirada. A Figura 76 apresenta metalografias de todas as etapas do processo de trefilação combinada. Na amostra retirada do fio-máquina observa-se que não há uma zona de segregação efetiva, apenas pequenas concentrações maiores de perlita na secção. Na amostra da etapa de pré endireitamento horizontal são observados pequenos pontos

de segregação dispersos na região central da amostra. As amostras do pré endireitamento vertical e jateamento apresentam uma formação semelhante, onde se destacam dois pontos de concentração das segregações, mas o posicionamento deles muda entre as amostras. Já as amostras após o processo de trefila e PERC apresentam uma zona de segregação única e próxima ao centro.

Torna-se importante enfatizar que as variações microestruturais descritas não são influenciadas pelos processos de transformação mecânica da trefilação combinada, mas apresentam relação com questões do processo de resfriamento do material durante o processo de lingotamento contínuo e laminação que dá origem ao fio-máquina (PRINZ et al., 2009).

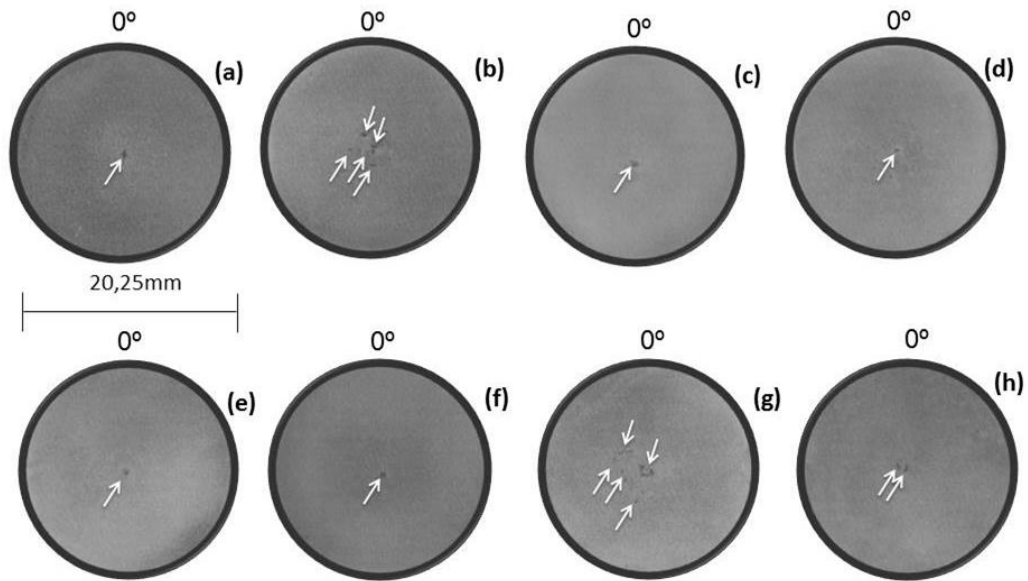
Figura 76. Metalografias de amostras retiradas de diferentes etapas do processo de trefilação combinada. Onde as setas indicam as posições de pontos de segregações.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 77 mostra diferentes amostras retiradas após a mesma etapa de PERC. Nelas é possível observar variações no posicionamento e tamanho das zonas de segregação. Nas Figuras 77a, 77c, 77d, 77e e 77f a segregação é formada por apenas uma concentração, bastante próxima ao núcleo da barra. Já as amostras apresentadas nas figuras 77b e 77g apresentam diversos pontos de segregação com posições dispersas. Portanto, estes resultados confirmam que estas distribuições não possuem influência das etapas do processo de trefilação combinada.

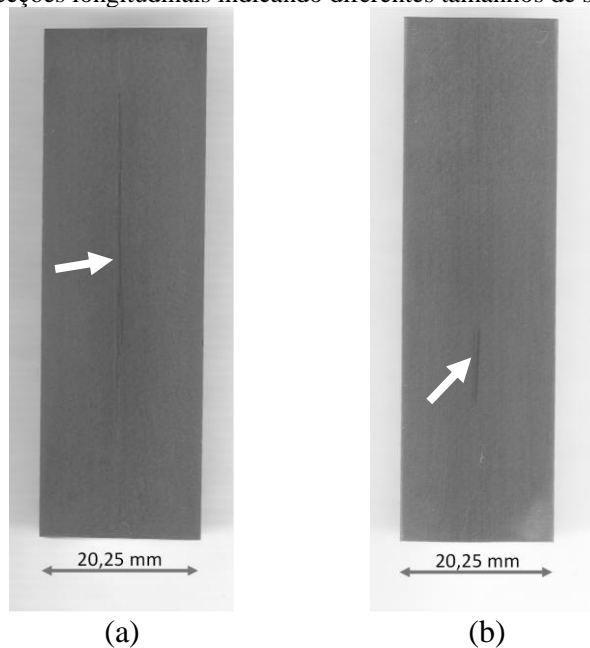
Figura 77. Amostras retiradas do processo de PERC onde as setas indicam as posições de segregações.



Fonte: Próprio autor.

A análise das secções longitudinais permite uma melhor observação da variação das zonas de segregação ao longo do material. Na Figura 78b pode-se observar uma linha de segregação em uma curta região da secção longitudinal, de comprimento em torno de 15 mm. Já na Figura 78a esta linha é mais alongada, com um comprimento de, aproximadamente, 40 mm.

Figura 78. Secções longitudinais indicando diferentes tamanhos de segregações.



Fonte: Próprio autor.

6.2 HETEROGENEIDADES NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO

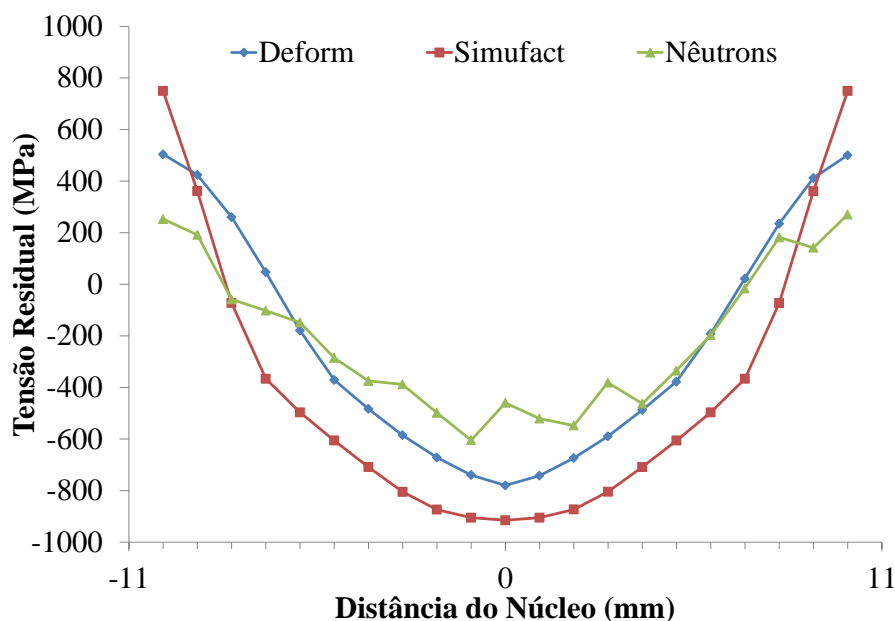
As investigações das heterogeneidades durante o processo de trefilação tiveram como base a simulação numérica computacional através do método de elementos finitos. Os resultados obtidos apresentados neste capítulo serão comparados com simulações padrão e com resultados de medições de tensões residuais através do método de difração de nêutrons. As simulações padrão são baseadas em um processo de trefilação simétrico e homogêneo e foram realizadas para os diferentes programas utilizados. Já perfil de difração de nêutrons foi apresentado previamente por Nunes (NUNES, 2012), onde o autor apresenta a avaliação de uma amostra trefilada sob as mesmas condições de fabricação das amostras utilizadas na investigação.

6.2.1 Simulações padrão

O objetivo da aplicação destas simulações é de somente identificar os efeitos de diferentes heterogeneidades na distribuição das tensões residuais e não os quantificar, portanto não há a necessidade de se aprofundar a discussão sobre as diferenças entre os modelos numéricos e seus métodos de solução. Esta discussão foi abordada em trabalhos já publicados (SOARES, 2012; ZOTTIS, 2013).

A Figura 79 apresenta os resultados das simulações padrão para ambos os softwares utilizados (ver Capítulos 3.6.2 e 3.6.3). Notam-se algumas diferenças entre os valores máximos e mínimos das tensões residuais calculadas por cada software, com o software Simufact.forming apresentando maior gradiente de tensões nos seus resultados (tensões mais trativas na superfície e mais compressivas no núcleo) do que o software Deform. Estas variações são atribuídas a diferenças entre os métodos de solução de cálculos utilizados por cada software, além da forma como cada um permite a inserção de dados sobre as propriedades do material trefilado, mas ambos apresentam um comportamento similar nos seus perfis de tensões residuais. Comparando-se como perfil obtido através da difração de nêutrons é possível observar que os modelos apresentam comportamentos estáveis, ou seja, sem variações significativas regiões opostas da barra. Já o resultado experimental demonstra variações entre as posições angulares opostas e na região central da barra.

Figura 79. Distribuição de tensões residuais com os diferentes softwares de simulação para as mesmas condições iniciais comparadas com o resultado de difração de nêutrons de uma amostra trefilada com o mesmo ângulo de trefilação.



Fonte: Próprio autor.

6.2.2 Efeito da segregação

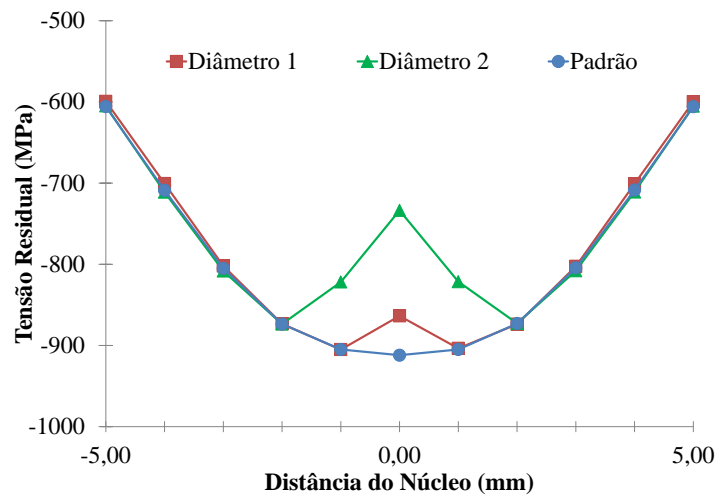
A primeira avaliação realizada foi com relação ao tamanho da zona de segregação. A Figura 80 apresenta os resultados com relação a variação do diâmetro da zona de segregação inserida no centro da barra trefilada e seus efeitos nas tensões residuais. Ambos os diâmetros utilizados apresentaram uma redução nas tensões residuais compressivas no centro da barra, portanto somente a região central da barra (de -5 mm a +5 mm do centro) é destacada no gráfico. Fica evidente o fato de que um maior diâmetro da região de segregação (diâmetro 2) apresenta uma maior variação das tensões residuais, onde as posições adjacentes também foram afetadas. Estas variações são atribuídas às diferenças entre as propriedades mecânicas da material base para o material utilizado para a representação das simulações, indicando que de fato a presença de segregações altera a distribuição de tensões residuais no material após o processo de deformação mecânica.

A Figura 81 apresenta o gráfico das distribuições de tensões residuais para as simulações onde foram variados os posicionamentos das zonas de segregação com diâmetro de 2 mm. Neste gráfico é possível observar que o ponto de diminuição das tensões compressivas se desloca conforme a posição da linha de segregação. Fica claro na comparação com a simulação padrão

(sem segregação), que a segregação representa um efeito considerável nas tensões residuais e varia conforme sua localização. Este efeito se assemelha ao observado nos resultados de nêutrons (ver Capítulo 5.4.2), onde estas variações ocorreram em mais de uma posição, indicando possíveis pontos de segregações acumulados na secção medida, esses pontos são marcados no gráfico.

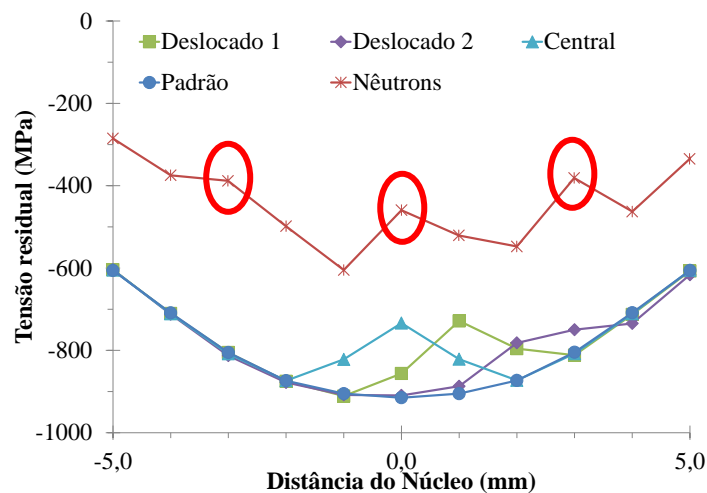
Estes resultados, somados as variações microestruturais apresentadas anteriormente convergem para o entendimento de que as variações nas tensões residuais observadas na amostra avaliada através difração de nêutrons está realmente ligada a presença de pontos de concentração de segregações no material.

Figura 80. Tensões residuais na posição central com diferentes diâmetros de segregações.



Fonte: Próprio autor.

Figura 81. Resultado de tensões residuais variando-se as posições de segregações comparados com a as tensões residuais medidas por difração de nêutrons.

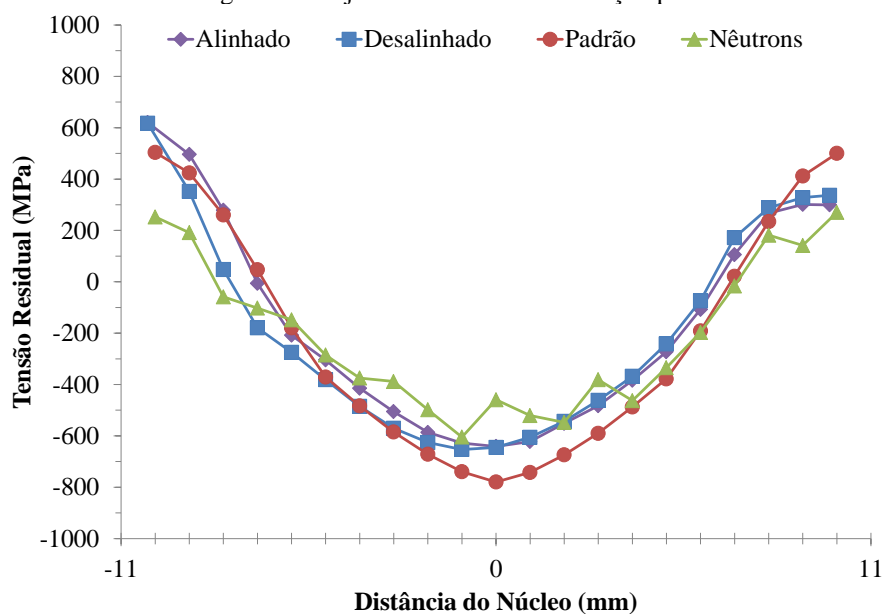


Fonte: Próprio autor.

6.2.3 Geometria e alinhamento da barra

O resultado da simulação de uma trefilação com a barra ainda curvada utilizando o software DeformTM, indicando uma insuficiência no processo de pré endireitamento, é apresentada na Figura 82. Observa-se que a existência de uma curvatura anterior ao processamento incide em um perfil heterogêneo, onde o lado para onde aponta o vetor curvatura da barra apresenta tensões menos trativas na superfície, tanto para a amostra alinhada quanto para a amostra desalinhada. Já a barra desalinhada apresenta uma diferença também com relação à distribuição das tensões, onde a posição para onde aponta o vetor curvatura apresenta tensões residuais trativas na ordem de 170 MPa até uma profundidade de 3 mm da superfície, e na direção oposta ao vetor curvatura, o valor está próximo de 45 MPa. Observa-se também uma redução nas tensões compressivas no núcleo em relação à simulação padrão em ambas as condições simuladas. De modo geral, este modelo apresenta grandes semelhanças com os resultados experimentais.

Figura 82. Tensões residuais obtidas com as simulações numéricas computacionais de diferentes parâmetros de heterogeneidades juntamente com a simulação padrão.



Fonte: Próprio autor.

As diferentes simulações apresentadas comprovam a influência das variações não-controladas na etapa de trefilação combinada. Pontos como a distribuição microestrutural (principalmente segregações), a não efetividade dos processos de pré endireitamento, bem como o

desalinhamento entre a ferramenta e a barra inferem em heterogeneidades nas tensões residuais durante o processo de trefilação, indicando um potencial de distorção significativo.

6.3 HETEROGENEIDADES NA CAMADA ENDURECIDA

As avaliações das camadas endurecidas com relação aos seus vetores curvaturas são apresentadas individualmente para cada amostra avaliada. Seguindo as rotas apresentadas na Tabela 7, onde a numeração se refere ao número delas no planejamento do experimento. Primeiramente é apresentada a amostra somente trefilada, como referencial para comparação. Seguido pelas amostras após o processo de tratamento térmico, conforme suas respectivas camadas endurecidas. Finalizando com os resultados referentes ao processo de retífica, neste caso somente para a profundidade de 100 μm .

Tabela 7. Relação das amostras avaliadas indicando a direção do vetor curvatura delas.

Trefila (°)	Camada (mm)	Retífica (μm)	Direção (°)
15	-	-	0*
15	1,2	-	173
15	2,2	-	80
15	1,2	100	-47
15	2,2	100	-19

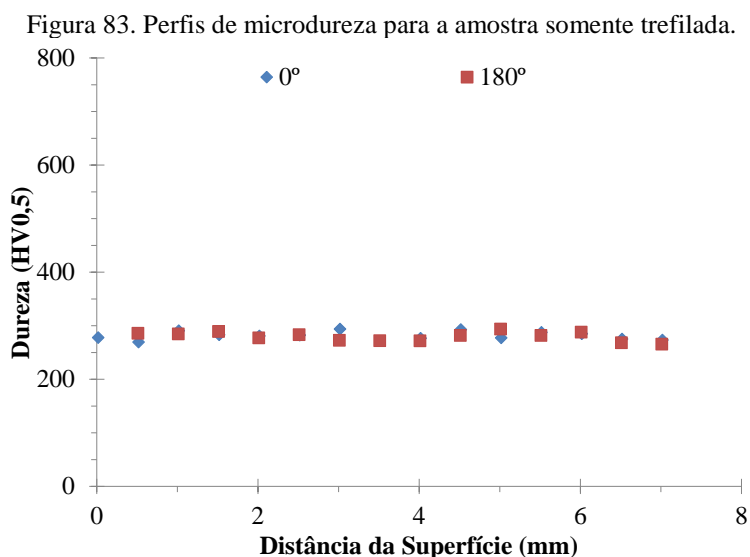
*A amostra somente trefilada não foi avaliada com relação ao seu vetor curvatura, pois a mesma não foi temperada por indução, não se encaixando na avaliação a ser realizada por estes ensaios. Servindo apenas como dado de referência.

Fonte: Próprio Autor

As medições de dureza na amostra de referência (somente trefilada) são apresentadas na Figura 83. Percebe-se que não ocorrem variações significativas nas durezas ao longo das secções avaliadas. Com valores médios de 282 HV0,5 para medição na direção de 0° e 280 HV0,5 para a medição na direção de 180°.

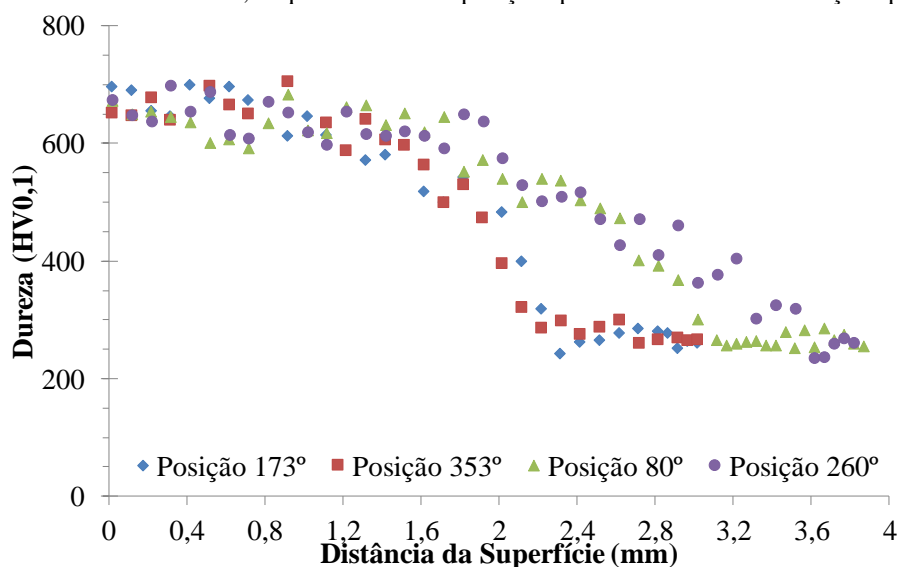
Os perfis de dureza Vickers (HV0,1) para as diferentes profundidades de tratamento térmico são apresentados na Figura 84 de forma conjunta pois ambos apresentam comportamentos semelhantes para as posições avaliadas. As posições periféricas para onde o vetor curvatura aponta foram de 173° (353° direção oposta) para a camada temperada de 1,2 mm e 80° (260° direção oposta) para a camada temperada de 2,2 mm. As profundidades determinadas a partir das posições periféricas para onde apontam os vetores curvatura apresentaram uma diferença de 0,1 mm inferior às camadas avaliadas nas posições periféricas opostas para ambas as

profundidades de camada. Estes resultados não são conclusivos com relação a um maior aquecimento nas regiões mais próximas ao indutor (posição oposta a direção dos vetores curvatura).



Fonte: Próprio autor.

Figura 84. Perfis de microdureza para as amostras temperadas com camadas de 1,2 mm (Posições 173° e 353°) e 2,2 mm (Posições 80° e 260°). Onde as posições periféricas de 173° e 80° representam as direções dos vetores curvatura de cada amostra, enquanto as outras posições periféricas indicam a direção oposta.



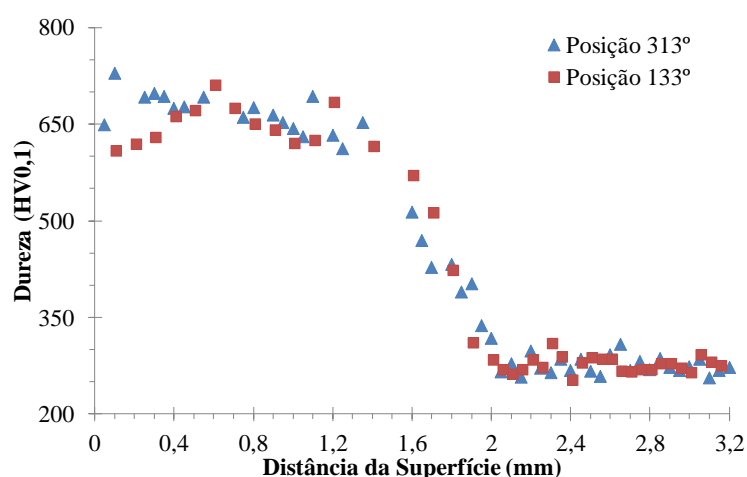
Fonte: Próprio autor.

6.4 HETEROGENEIDADES NO PROCESSO DE RETÍFICA

Os perfis de dureza realizados na amostra com camada de 1,2 mm e retificada com 100 μ m de profundidade são apresentados na Figura 85. Observa-se que para a posição periférica de 133°

(lado oposto ao vetor curvatura) a dureza superficial é de, aproximadamente, 600 HV0,1. Já a posição periférica oposta de 313°, verifica-se dureza na superficial de, aproximadamente, 650 HV0,1, uma diferença considerável entre as posições avaliadas. Observa-se também uma camada endurecida mais profunda para a posição periférica 133° (oposta a direção do vetor curvatura). A redução da dureza superficial observada evidencia uma maior remoção de material no lado oposto ao vetor curvatura, pois uma vez que as praticamente todas as amostras apresentaram uma mudança de, aproximadamente, 180° no seu vetor curvatura. Portanto, partindo-se dessa constatação, a posição periférica oposta ao vetor curvatura após o processo de retificação indica a posição periférica para a qual o vetor curvatura apontava antes do processo (após a têmpera por indução).

Figura 85. Perfis de microdureza nas amostras retificadas com 100 µm de remoção após têmpera por indução de camada 1,2 mm. A posição periférica de 133° representa a posição para a qual aponta o vetor curvatura para a amostra. Enquanto a posição periférica de 313° representa a posição oposta ao vetor curvatura.



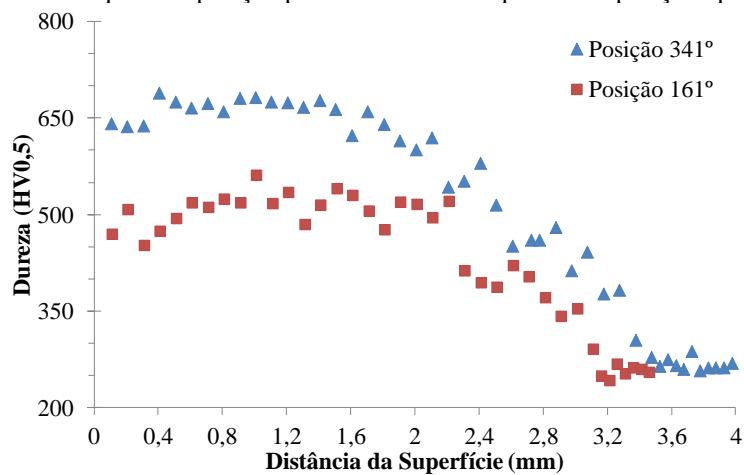
Fonte: Próprio autor.

Para o processo de retífica após o tratamento térmico com camada de 2,2 mm apresentada na Figura 86, observa-se uma diferença bastante significativa em relação aos perfis de dureza as posições periféricas observadas. A posição periférica de 341° representa a direção verificada para o vetor curvatura e a posição 161° a direção oposta. É possível observar que os valores medidos a partir da posição periférica oposta ao vetor curvatura apresentaram um perfil com menores durezas do que no perfil da posição para a qual o vetor apontava. A diferença entre as durezas superficiais é de, aproximadamente, 200 HV0,5.

Os eventos observados em ambas as avaliações indicam uma redução nas durezas nas posições periféricas as quais se supunha que o processo de retificação apresentaria um maior efeito em termos de aporte térmico (DING et al., 2017; GRUM, 2001). Estes resultados, portanto,

corroboram com o entendimento de que o maior aporte térmico nas direções opostas ao vetor curvatura encontrado anteriormente ao processo de retífica afeta as durezas nas regiões superficiais e subsuperficiais das amostras.

Figura 86. Perfis de dureza nas amostras retificadas com 100 μm de remoção após têmpera por indução de camada 2,2 mm. A posição periférica de 341° representa a posição para a qual aponta o vetor curvatura para a amostra. Enquanto a posição periférica de 161° representa a posição oposta.



Fonte: Próprio autor.

6.5 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A REDUÇÃO DA DISTORÇÃO

Os resultados apresentados permitem afirmar que a segregação é variável tanto ao longo do comprimento do material quanto em sua distribuição em relação a secção transversal. E que isto afeta a distribuição de tensões residuais após o processo de trefilação, conforme mostrado pelos resultados de simulação computacional.

A solução mais indicada para a homogeneização da segregação no material é a utilização de ferramentas para um melhor controle na etapa de resfriamento do processo de lingotamento contínuo e laminação. Estudos apontam (YURGEL et al., 2015) a importância do uso de agitação magnética durante o processo de solidificação para a obtenção de uma microestrutura mais homogênea somada a redução de segregações no aço.

As curvaturas prévias das barras não demonstraram influências significativas sobre os perfis de dureza para ambas as profundidades de camadas.

As ações recomendadas para melhorar o controle sobre distorções no tratamento térmico seriam a diminuição de heterogeneidades nas etapas anteriores ao processo, e a utilização de um

processo de controle e atuação em tempo real sobre o resfriamento durante o processo de tratamento térmico como, por exemplo, o utilizado por STARK et al., (2012).

O processo de retífica apresentou um efeito significativo nos perfis de dureza das diferentes posições avaliadas. O que está relacionado à maior profundidade de corte efetiva (maior remoção de material) das regiões periféricas do eixo com relação ao eixo devido a sua curvatura.

Como o processo de retificação apresentou resultados adequados em termos de geometria final, são recomendadas ações para a eliminação ou a diminuição destes efeitos no material. A modificação nos parâmetros de retífica, como a redução das profundidades de avanço em cada passo.

Todas as ações visando melhorias em cada etapa do processo tendem a resultar em melhorias nos processos subsequentes. Portanto, o estudo individual de cada etapa com foco no produto final, leva a relações de melhoria em toda a rota de produção.

7 CONCLUSÕES

- A análise estatística do Planejamento de Experimento (DoE) apresenta uma maior significância na distorção da etapa de trefilação combinada, o que condiz com os resultados das avaliações geométricas e das propriedades das amostras.
- Apenas a variação do ângulo da ferramenta não é o único fator determinante para a etapa de trefilação combinada apresentar elevada significância nas distorções finais. A ocorrência de “variações não-controladas” durante esta etapa da rota de fabricação imprime características ao material que se mantém ao longo da cadeia de fabricação.
- Os processos de corte não demonstraram influências diretas na distorção final dos eixos, apesar de apresentarem diferenças em termos microestruturais, de dureza e de tensões residuais.
- No processo de têmpera por indução com baixas profundidades de camada (entre 1,2 e 2,2 mm), verificou-se que o aumento da profundidade de camada gera maiores curvaturas para as amostras.
- A significância observada do processo de retífica era esperada devido ao processo ser utilizado exatamente para a atenuação das curvaturas. Entretanto, observou-se que a profundidade de remoção de 100 μm já é suficiente para a obtenção de eixos com curvaturas reduzidas, frente as profundidades de tempera por indução empregadas.
- As “variações não-controladas” investigadas são inerentes a processos industriais e se mostraram determinantes nos potenciais de distorção avaliados. Mas, observa-se que os efeitos destas variações podem ser atenuados com uma análise completa da rota de fabricação.
- A segregação tem um papel importante na formação de heterogeneidades nos perfis de tensões residuais no processo de trefilação. E que a sua variação em magnitude e posicionamento de forma constante ao longo do fio máquina é um fator para a ocorrência de distorções.
- Fatores como o desalinhamento entre a ferramenta de trefilação e o fio máquina contribuem para a geração de tensões heterogêneas no processo de trefilação. Assim como o pré endireitamento não efetivo.
- As heterogeneidades das camadas endurecidas apresentaram uma variação de apenas em 0,1 mm entre as posições analisadas nas amostras. Esta variação não é suficiente para afirmar uma ação heterogênea no processo.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da análise dos resultados e discussão apresentados pela presente pesquisa, sugere-se algumas linhas de pesquisa complementares que poderiam auxiliar no aprofundamento do entendimento sobre os efeitos dos processos na rota de fabricação avaliada:

- Estudar o efeito de variações na configuração e forma do processo de pré endireitamento realizado durante a trefilação combinada.
- Determinar os fatores mais importantes para a obtenção de fios mais homogêneos no processo de lingotamento contínuo e laminação realizados antes da etapa de trefilação combinada.
- Estudar a influência de camadas temperadas mais profundas (até 1/3 da secção) na distorção dos eixos automotivos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, C.; ANDERSSON, M. T.; STÅHL, J. E. Bandsawing. Part I: Cutting force model including effects of positional errors, tool dynamics and wear. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2001.

BREITLING, J. et al. Precision shearing of billets - special equipment and process simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, 1997.

BRINKSMEIER, E. et al. The Missing Link to Predict Surface Surface Integrity Integrity in Machining Machining. In: **PROCEDIA CIRP 2018, Anais...** : Elsevier B.V., 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.006>>

CAMARGO, Lucas Ward Franco De. **Ajuste de parâmetros para desalinhamento e empenamento aplicado à modelagem de rotores**. 2010. Universidade Estadual de Campinas, 2010.

CANALE, Lauralice De C. F.; TOTTEN, George E. Overview of distortion and residual stress due to quench processing. Part I: factors affecting quench distortion. **International Journal of Materials and Product Technology**, 2005.

COUPARD, Dominique et al. Residual stresses in surface induction hardening of steels: Comparison between experiment and simulation. **Materials Science and Engineering A**, v. 487, n. 1–2, p. 328–339, 2008.

DA SILVA ROCHA, ALEXANDRE; MENEZES NUNES, RAFAEL; MOLLER FERLAUTO, Eduardo. Evaluation of residual stress effects by means of material removal. **Estudos Tecnológicos**, v. 4, n. 3, p. 157–169, 2008.

DE SOUZA, T. F. et al. Comparison between neutron diffraction measurements and numerical simulation of residual stresses of a wire-drawing process. **Materials Research**, v. 16, n. 2, 2013.

DIAS, Vinicius Waechter. **INFLUÊNCIA DOS PROCEDIMENTOS DE CORTE SOBRE AS DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS REDONDAS TREFILADAS DE AÇO ABNT 1045**. Dissertação de mestrado. UFRGS/PPGE3M, 2013.

DIEHL, Carla Adriana Theis Soares et al. Experimental analysis of residual stresses in pre-straightened SAE 1045 steel. **Materials Research**, v. 20, n. 6, p. 1554–1562, 2017.

DING, Wenfeng et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 9–12, p. 2939–2968, 2017.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems**. Third Edit ed., 2007.

GRUM, Janez. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 114, n. 3, p. 212–226, 2001.

GRUM, Janez. Induction Hardening. In: **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. p. 220–249. 2002

GRUM, Janez. Influence of induction surface heating and quenching on residual stress profiles, followed by grinding. **International Journal of Materials and Product Technology**, 2007.

HASSEL, Peter A.; ROSS, Nicholas V. Induction Heat Treating of Steel. In: **ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating**. 10. ed.: ASM International, 1991. p. 164–202.

HEESS, K.; BESSERDICH, G.; DAMASCHEK, R.; EHLERS, M.; GRASEMANN, H.-J.; HOFERER, M.; KESSLER, O.; LÜBBEN, Th. ..; MAJOREK, A.; MISKIEWICZ, S.; SCHMITT, G.; THODEN, B.; VOLKMUTH, J.; WIEDMANN, D.; ZOCH, H. W. Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung. **Expert-Verlag**, 1997.

HIRSCH, Thomas Karl; DA SILVA ROCHA, Alexandre; NUNES, Rafael Menezes. Characterization of local residual stress inhomogeneities in combined wire drawing processes of AISI 1045 steel bars. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 1–4, p. 661–668, 2014.

K.-D., THOBEN. Distortion Engineering: Eine system-orientierte Betrachtung des Bauteilverzugs. **HTM. Härterei-technische Mitteilungen**, 2002.

KLEIN, D.; SEIFERT, M.; THOBEN, K. D. Taking the Distortion of component parts along a manufacturing chain into consideration during planning. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, 2009.

KO, Tae Jo; KIM, Hee Sool. Mechanistic cutting force model in band sawing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 1999.

KRISTOFFERSEN, Hans et al. Influence of variation in quenching conditions on hardness and residual stresses after induction hardening. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTORTION ENGINEERING, IDE2011 2011,

LEMOES, Guilherme Viera Braga. Análise De Tensões Residuais Em Eixos Automotivos Do Aço Din 38B3 Temperados Por Indução. 2012.

LIU, Mei et al. Effect of grinding-induced cyclic heating on the hardened layer generation in the plunge grinding of a cylindrical component. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2015.

LUIS, C. J.; LEÓN, J.; LURI, R. Comparison between finite element method and analytical methods

for studying wire drawing processes. **Journal of Materials Processing Technology**, 2005.

MENEZES, Mateus Sotelo et al. Análise De Uma Ferramenta De Trefilação a Frio Através Do Método De Elementos Finitos. **Proceedings of the Wire Drawing Seminar**, p. 1–9, 2017.

NAKAGIRI, Akikazu et al. Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment. **Wire Journal International**, v. 38, n. 8, p. 73, 2001.

NUNES, Rafael Menezes. **Estudo de distorções de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/PPGE3M, 2012.

PAECH, M. Factors relating to the wire straightening process and peripherals. **Wire Journal International**, v. 35, n. 12, p. 64–68, 2002.

PRINZ, C. et al. Characterization of segregations and microstructure and their influence on Distortion of low alloy SAE 5120 steel. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 40, n. 5–6, p. 368–373, 2009.

ROCHA, A. S.; NUNES, R. M.; HIRSCH, T. Changes in the axial residual stresses in AISI 1045 steel bars resulting from a combined drawing process chain. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, n. 3, p. 459–465, 2012.

SAGLAM, Haci. Tool wear monitoring in bandsawing using neural networks and Taguchi's design of experiments. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 55, n. 9–12, p. 969–982, 2011.

SANTINI, Alessandro. **Estudo do processo e dos parâmetros de corte no serramento da madeira por serra de fita**. Tese de doutorado. USP, 2000.

SOARES, Carla Adriana Theis. Análise das Tensões Residuais no Processo de Trefilação Considerando os Efeitos de Anisotropia.. Dissertação de mestrado, UFRGS/PPGE3M, 2012.

SOUZA, Tomaz Fantin De. **Metodologia De Otimização De Fieiras De Trefilação Visando A Redução De Tensões Residuais No Material Trefilado Através De Simulação Numérica E Sua Validação Experimental**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/PPGE3M, 2017.

STARK, P. et al. Process integrated distortion compensation of large bearing rings. **Mat.-wiss. u.Werkstofftech**, v. 43, n. 1–2, p. 56–62, 2012.

TOMAZ FANTIN DE SOUZA. **Simulações Computacionais Para Análise E Minimização Das Tensões Residuais No Processo De Trefilação**. Dissertação de mestrado. UFRGS/PPGE3M, 2011.

TOTTEN, GEORGE E.; INOUE, T.; HOWES, M. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. 2002

VASHISTA, Meghanshu et al. Surface integrity in grinding medium carbon steel with miniature electroplated monolayer cBN wheel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2010.

WANG, Z. Residual stress in the forming of materials. In: **ASM Handbook of residual stress and deformation of steel**. Ohio. p. 141. 2002

WESTERKAMP, Robert A. Shearing of Plate and Flat Sheet. In: **Metals Handbook. 14. Forming and Forging**. 9. ed.: ASM International, 1998. p. 1524–1537.

WISTREICH, J. The fundamentals of wire drawing. **Met. Rev.**, v. 3, p. 99–142, 1958.

YOSHIMURA, Hidenori; DEMIYA, Hisashi; MIHARA, Yutaka. Effect of Contacting Ratio on Roundness in Straightening Process of Steel Tube. **Tetsu-to-Hagane**, v. 95, n. 11, p. 801–806, 2009. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/tetsutohagane/95.801?from=CrossRef>>

YURGEL, Charles Chemale et al. Effect of using eletromagnetic stirring on AISI 1025 steel forged flanges. **International Journal of Material Forming**, v. 8, n. 1, p. 119–126, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12289-013-1153-8>>

ZOCH, H. W. From single production step to entire process chain-the global approach of distortion engineering. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 37, n. 1, p. 6–10, 2006.

ZOCH, H. W. Distortion engineering: Vision or ready to application? distortion engineering: Vision oder schon praxistauglich? **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, [s. l.], v. 40, n. 5–6, p. 342–348, 2009.

ZOCH, H. W. Distortion engineering - Interim results after one decade research within the Collaborative Research Center. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 43, n. 1–2, p. 9–15, 2012.

ZOTTIS, Juliana. **Modelagem E Análise Numérica De Variações Dos Parâmetros Não Controláveis Em Um Sistema De Trefilação De Barras**. Dissertação de mestrado. UFRGS, PPGE3M, 2013.