

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

INFLUÊNCIA DOS PROCEDIMENTOS DE CORTE SOBRE AS DISTRIBUIÇÕES DE
TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS REDONDAS TREFILADAS DE AÇO ABNT 1045

Vinicius Waechter Dias

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

INFLUÊNCIA DOS PROCEDIMENTOS DE CORTE SOBRE AS DISTRIBUIÇÕES DE
TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS REDONDAS TREFILADAS DE AÇO ABNT 1045

VINICIUS WAECHTER DIAS
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2013

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Dr. Eng. Rafael Menezes Nunes, UFRGS

Prof. Dr. Eng. Mário Wolfart Junior, IFRS

Prof. Dr. Eng. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M/UFRGS

Dedico esta dissertação a meu pai Ivan Carlos de Lima Dias e
minha mãe Iara Rejane Waechter Dias.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Alexandre da Silva Rocha pela orientação e oportunidades oferecidas ao longo deste período.

Ao IWT e toda a sua equipe pelo acolhimento e a possibilidade de realização de ensaios essenciais para a concretização deste trabalho. Especialmente para Dr.-Ing. Juan Dong pelo acompanhamento das atividades e ao M. Sc. Jérémy Epp pela coordenação e suporte.

Ao programa BRAGECRIM pela oportunidade de intercâmbio para pesquisa.

Aos colegas do Grupo de Engenharia de Superfícies do LdTM, em especial para Dr. Rafael Nunes, M. Sc. Giovanni Rocha e Eng. Guilherme Biasibetti.

Aos colegas e amigos M. Sc. Diego Belato e M. Sc. Guilherme Lemos pelas contribuições na produção científica e pelas discussões teóricas.

Aos amigos e família por estarem presentes durante esse período.

Em especial para o bolsista Marcelo Munhoz Reffatti, pelo companheirismo no período de intercâmbio e por todo o suporte nas realizações dos ensaios, apresentações e pesquisa desenvolvidos para este projeto.

Ao CNPq, FINEP e CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Métodos de Corte	4
2.1.1 Corte Cisalhante	4
2.1.1.1 Equipamentos de Corte (Tesoura)	8
2.1.1.2 Lâminas e Navalhas.....	9
2.1.1.3 Principais Parâmetros de Corte.....	9
2.1.1.4 Tensão, Deformação e Fratura.....	10
2.1.2 Corte Abrasivo.....	11
2.1.2.1 Serras	12
2.1.2.2 Discos Abrasivos	13
2.2 Tensões Residuais	14
2.2.1 Definições de Micro e Macro Tensões Residuais	16
2.2.2 Métodos de Medição	17
2.3 Trefilação.....	20
2.3.1 Trefilação Combinada	21

2.3.2	Parâmetros de Trefilação	24
2.3.2.1	Força de Trefilação	24
2.3.2.2	Ângulo de Fieira	24
2.3.2.3	Parâmetro Δ	25
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1	Preparação de amostras	26
3.2	Procedimentos de caracterização	30
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1.	Metalografia	35
4.2.	Perfis de microdureza	38
4.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	41
4.4.	Tensões Residuais	43
5.0	DISCUSSÃO GERAL.....	50
5.1	Metalografia	50
5.2	Microdureza.....	51
5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	54
5.4	Tensões Residuais	55
6.0	CONCLUSÕES	58
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXO A - “ENGENHARIA DE DISTORÇÃO” (PORTADORES DO POTENCIAL DE DISTORÇÃO).....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Rota de fabricação analisada na primeira etapa do projeto.....	2
Figura 1.2.	Rota de fabricação da segunda etapa do projeto BRAGECRIM.	2
Figura 2.1.	Etapas de corte por cisalhamento e evolução da força envolvida. Fonte: adaptado de BREITLING et al 1997.	5
Figura 2.2.	Representação gráfica das diferentes etapas no corte cisalhante. Fonte: adaptado de ASM INTERNATIONAL 1993.	6
Figura 2.3.	Tesoura de final aberto em C. a) Lâmina superior; b) Lâmina inferior. Embora as lâminas sejam retas, diversas geometrias podem ser utilizadas. Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL 1993.	8
Figura 2.4.	Movimento dos planos de uma discordância nos planos de escorregamento. Fonte: Adaptado de CALLISTER 2002.	11
Figura 2.5.	Relações entre temperatura, microestrutura e tensões. Fonte: Adaptado de Bhadeshia 2002.	15
Figura 2.6.	Somatório das tensões residuais com as tensões de serviço. Fonte: Adaptado de NUNES 2008.	16
Figura 2.7.	Representação esquemática do estado de tensões residuais, segundo a escola alemã (MACHERAUCH et al, 1973) (HAUK et al, 1991).	17
Figura 2.8.	Fieira de trefilação e as quatro zonas distintas. Adaptado de NUNES, 2007.	20
Figura 2.9.	Etapas do processo de trefilação combinada. Adaptado de ROCHA, 2008.	22
Figura 2.10.	Tensões trativas e compressivas atuando em elemento da barra em trefilação. Adaptado de DIETER, 1986.	23
Figura 2.11.	Trefilação e parâmetro Δ . Fonte: Adaptado de Souza, 2012.	25
Figura 3.1.	Rota de fabricação prévia a primeira etapa de corte.	27
Figura 3.2.	Vista lateral e frontal de um exemplo de corte com tesoura.	27
Figura 3.3.	Representação do processo de trefilação prévio ao corte e representação dos ângulos de referência. α equivale metade dos valores dos ângulos de trefilação descritos.	28

Figura 3.4.	Equipamento de corte com uso de serra fita.	29
Figura 3.5.	Fluxograma do processo de confecção de amostras.....	28
Figura 3.5.	Representação da amostra e suas regiões cortadas para a realização da caracterização metalúrgica.	30
Figura 3.6.	Posições observadas no microscópio eletrônico de varredura.	31
Figura 3.7.	Orientação do corte realizado (a) e direções dos perfis de microdureza realizados (b).	32
Figura 3.8	Representação das posições dos pontos de medidas para Raios-X.....	33
Figura 3.9.	Elementos principais do equipamento de difração de raios-X GE® Inspection Technologies, modelo Analytical X-ray MZ VI E.Fonte: NUNES, 2008.	34
Figura 4.1.	Metalografia da secção transversal das barras de aço AISI 1045 para (a) 15° e (b) 20°.....	36
Figura 4.2.	Secções longitudinais das amostras cisalhadas. (A) Fieira de 15° e (B) fieira de 20°.....	36
Figura 4.3.	Secções longitudinais das amostras no lado serrado. (A) Fieira de 15° e (B) fieira de 20°.....	37
Figura 4.4.	Perfis de microdureza média na amostra com ângulo 15°.	38
Figura 4.5.	Perfis de microdureza média na amostra com ângulo 20°.	39
Figura 4.6.	Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada por cisalhamento com ângulo de fieira de 20°.	39
Figura 4.7.	Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada por cisalhamento com ângulo de fieira de 15°.	40
Figura 4.8.	Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada com serra utilizando-se o ângulo de fieira de 20°.	41
Figura 4.9.	Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada com serra utilizando-se o ângulo de fieira de 15°.	41
Figura 4.10.	Fractografias em MEV da amostra com ângulo de trefilação de 20° e corte cisalhante (2b).	42
Figura 4.11.	Imagens obtidas através de MEV da superfície da amostra com ângulo de trefilação de 20° e corte abrasivo (2a).....	43
Figura 4.12.	Distribuição de tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da face cortada.	44
Figura 4.13.	Perfil de tensões residuais ao longo da superfície da barra para os 8 ângulos de referência.	45

Figura 4.14. Gráfico da distribuição de tensões residuais a 2 mm de distância da superfície da amostra com trefilação 15° e corte cisalhante.	45
Figura 4.15. Perfil de tensões residuais ao longo da superfície da barra para os 8 ângulos de referência.	46
Figura 4.16. Perfil de tensões residuais superficiais próximas a região cortada com serra e ângulo de trefilação 20°.	46
Figura 4.17. Medições lineares para os 4 principais ângulos de referência na amostra cortada com serra e trefilação de 20°.	47
Figura 4.18. Perfil de tensões residuais superficiais próximas a região cortada com serra e ângulo de trefilação 15°.	47
Figura 4.19. Medições lineares para os 4 principais ângulos de referência na amostra cortada por cisalhamento com trefilação de 15°.	48
Figura 4.20. Gráfico comparativo entre as tensões residuais superficiais na região próxima a face cortada através do corte cisalhante.	48
Figura 5.1 Comparação entre as metalografias das diferentes superfícies de corte para a amostra com ângulo de trefilação de 15°;	51
Figura 5.2. Durezas médias dos perfis medidos na amostra cisalhada com ângulo de trefilação de 20°.	52
Figura 5.3. Durezas médias dos perfis medidos na amostra cisalhada com ângulo de trefilação de 15°.	52
Figura 5.4. Durezas médias para os perfis medidos na amostra serrada com ângulo de trefilação de 20°.	53
Figura 5.5. Durezas médias para os perfis medidos na amostra serrada com ângulo de trefilação de 15°.	53
Figura 5.6. Comparação entre as durezas médias próximas as superfícies cortadas.	54
Figura 5.7. Comparação entre MEV da superfície cortada por cisalhamento (trefilação de 20°) e resultado de tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da superfície cortada.	55
Figura 5.8. Comparação entre as tensões residuais médias observadas em cada amostra.	56
Figura 5.9. Gráfico comparativo entre os perfis de tensões residuais dos diferentes ângulos de trefilação para o corte com serra.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química do material em comparação com a norma.	29
Tabela 3.2. Nomenclatura das amostras.	32
Tabela 3.3. Distância de cada ponto medido.	36
Tabela 3.4. Distribuição das amostras e quantidade de medições.	36
Tabela 4.1. Classificação e nomenclatura das amostras.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Materials
BRAGECRIM	Brasil Germany Cooperation Research In Manufacturing
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRC	Collaborative Research Center
DoE	Design of Experiment
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HRC	Hardness Rockwell C
HV	Hardness Vickers
IFRS	Instituto Federal do Rio Grande do Sul
IWT ;	Institut für Werkstofftechnik
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura;
PERC	Polimento e endireitamento por rolos cruzados;
SAE	Society of Automotive Engineers;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
XRD	X-Ray Diffraction

SÍMBOLOS

A	Área
A_1	Área final
A_c	Área a ser cisalhada
Cr K- α	Cromo – K – alpha
d_0	Diâmetro inicial
d_1	Diâmetro final
F	Força
F_c	Força de corte
h_0	Altura inicial
H_C	Comprimento da região cilíndrica de trefilação
H_p	Horse Power (Cavalos de potência)
l	Comprimento
M	Momento
r	Raio
S	Resistência ao cisalhamento do material
V	Velocidade da Lâmina
α	Ângulo alpha
γ	Ângulo de saída da fieira

Δ	Fator Delta
κ_{fm}	Tensão de Escoamento
μ	Atrito
$\sigma^{(x, y, z)}$	Somatório das tensões Residuais
σ_1	Tensão mais a direita no círculo de Mohr
σ_2	Tensão central no círculo de Mohr
σ_3	Tensão mais a esquerda no círculo de Mohr
σ_R	Tensão Residual
σ_S	Tensão de Serviço
σ_E	Tensão Residual Equivalente
$\sigma^{RS, I}$	Tensão Residual do Tipo I
$\sigma^{RS, II}$	Tensão Residual do Tipo II
$\sigma^{RS, III}$	Tensão Residual do Tipo III
τ_c	Tensão Cisalhante de Ruptura
τ_{max}	Tensão Cisalhante Máxima
ϕ_A	Deformação da Área
ψ	Ângulo psi.

RESUMO

Reduzir custos com aumento na qualidade do produto, esses conceitos apesar de parecerem conflitantes são a base para o desenvolvimento industrial atualmente. Os conceitos desenvolvidos através das teorias da “engenharia de distorção”, que leva em consideração o processo de fabricação como um todo e que cada etapa tem alguma influencia no produto final, aparecem como uma possível solução para parte destes problemas. Neste ponto o projeto de pesquisa “Investigação e aperfeiçoamento de um processo de manufatura desde a trefilação a frio até o endurecimento por indução” (*“Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening”*), fruto da colaboração internacional Brasil-Alemanha no projeto BRAGECRIM, tem como objetivo identificar os efeitos de diferentes etapas de fabricação na distorção de barras de aço ABNT 1045. O presente trabalho se insere dentro desta rota de fabricação ao analisar os efeitos de dois tipos diferentes de corte, cisalhante e abrasivo, com relação aos portadores de potenciais de distorção. Os resultados indicam que as influencias, dependendo do processo de corte, vão muito além do que a deformação de grão visível através de metalografias. Apresentando efeitos significativos, em termos de tensões residuais, até uma distância de aproximadamente 25 mm em relação à superfície cortada.

Palavras – chave: Corte Abrasivo; Corte Cisalhante; ABNT 1045; Tensões Residuais; Difração de Raios-X.

ABSTRACT

Reduce costs with increased product quality, although these concepts appear to be in conflict, currently they are the basis for industrial development. The concepts developed through theories of "Distortion Engineering", which takes into account the manufacturing process as a whole and that each step has some influence on the final product, appears as a probable solution to this problem. At this point the research project "Investigation and improvement of the manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening", the result of an international collaboration between Brazil and Germany called BRAGECRIM, aims to identify the effects of different manufacturing steps on the distortion of ABNT 1045 steel bars. The present work fits within the analyzed manufacturing route aiming to characterize the effects of two different types of cutting, shearing and abrasive, with respect to carriers of potential distortion. The results indicate that the cutting method influences, depending on the cutting process, goes beyond the grain deformation, visible through metallographic pictures, and a possible distortion. Presenting significant effects, in terms of residual stresses, at a distance of approximately 25 mm from the cut surface.

Keywords: Shear Cutting; Abrasive Cutting; ABNT 1045; Residual Stress; X-Ray Diffraction.

1.0 INTRODUÇÃO

O cenário industrial mundial vem enfrentando desafios para a produção que parecem ser conflitantes: produzir com o menor custo possível, mas com altos índices de qualidade. Isto pode ser atingido através da filosofia da “engenharia de distorção” que visa entender o processo de fabricação como um todo, identificando possíveis portadores de potencial de distorção e atuando sobre eles, consequentemente reduzindo distorções durante todas as etapas do processo bem como no produto final. Diminuindo distorções tem-se como resultado uma redução nos custos com retrabalho, desgaste de ferramental e ainda na vida em fadiga do produto, pois peças que sofrem processos de endireitamento após serem distorcidas apresentam uma distribuição de tensões residuais muito desfavoráveis em relação a peças que não passam por esses procedimentos.

A produção de eixos automotivos é um ótimo exemplo de um processo de manufatura repleto de etapas com potenciais carregadores de distorção. Por isso o projeto “*Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening*” (Investigação e aperfeiçoamento de um processo de manufatura desde a trefilação a frio até o endurecimento por indução) através do programa BRAGECRIM, de cooperação Brasil – Alemanha, que visa estudar os fenômenos ocorridos durante o processo de fabricação de eixos simplificados, que através da “engenharia de distorção” podem ser aplicados a processos reais de fabricação de eixos automotivos. Como este processo de fabricação é extenso e complexo, o projeto foi dividido em dois períodos: a fabricação das barras e a manufatura pós a fabricação. A primeira etapa do projeto é apresentada na Figura 1.1, onde já foram definidos e apresentados parâmetros que melhorem a produção das barras, ou seja, que apresentem melhores distribuições de tensões residuais para evitar distorções após o tratamento térmico. Para a segunda etapa do projeto usou-se os parâmetros aprimorados através do projeto e os parâmetros usuais de fabricação das barras com o intuito de avaliar se esta melhoria nos parâmetros iniciais acarretam melhorias reais no processo como um todo. Esta segunda etapa pode ser vista na Figura 1.2 e se aproxima a um processo de fabricação de um eixo automotivo.

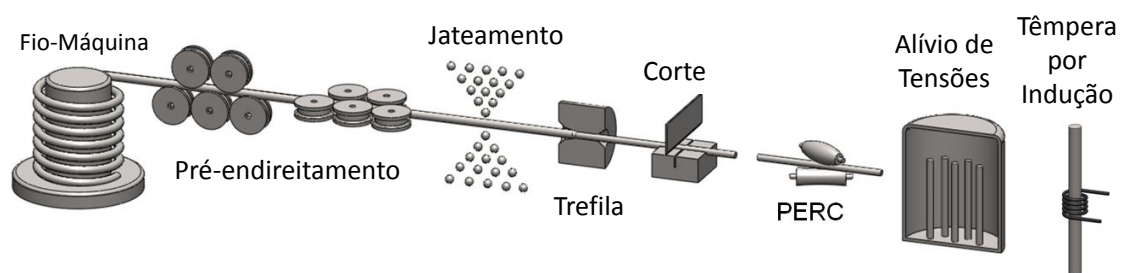


Figura 1.1. Rota de fabricação analisada na primeira etapa do projeto.

Uma parte comum em todos os processos de fabricação de eixos que pode afetar em toda a fabricação do componente é o processo de corte. Cortes com a utilização de serras (cortes abrasivos) apresentam boa precisão dimensional, mas necessitam de cuidados com a velocidade e lubrificação quando automatizados. Um método mais prático de corte e que não requer os mesmos cuidados na automatização é o corte por guilhotina ou tesoura (cortes cisalhantes), porém apresenta maiores problemas com distorção, pois as tensões envolvidas são maiores. Atualmente, de modo geral, a indústria se preocupa apenas com o resultado dimensional oriundo destes tipos de corte, eliminando posteriormente qualquer possível diferença dimensional através de usinagem (faceamento). Isto pode ser prejudicial, pois diferentes métodos de corte acarretam em diferentes comportamentos não só dimensionais como microestruturais, assim como em termos de tensões residuais.

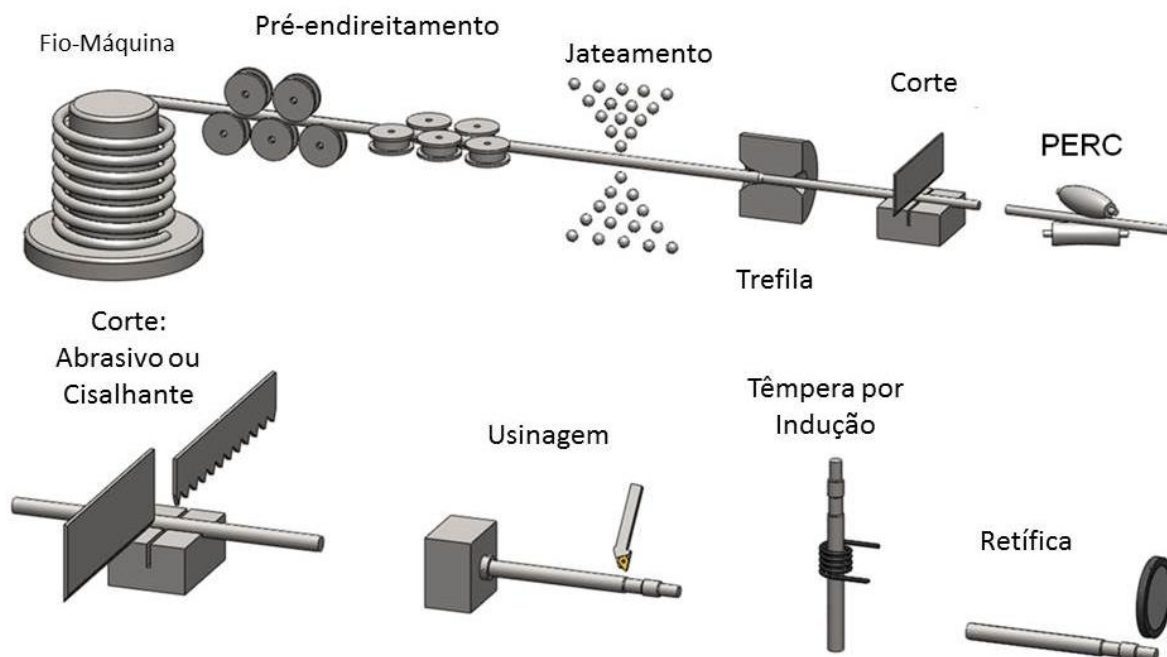


Figura 1.2. Rota de fabricação da segunda etapa do projeto BRAGECRIM.

Este trabalho visa identificar os “potenciais transportadores de distorção” na fabricação de eixos com relação ao processo de corte de barras anteriormente a usinagem. Tendo em vista que os diferentes métodos de corte são pouco investigados e não se possuem muitas informações sobre eles. Para tanto, foram realizados dois diferentes tipos de corte, um com o uso de serra fita, caracterizado como abrasivo, e outro com o uso de um equipamento de corte do tipo tesoura, caracterizado como cisalhamento. As avaliações realizadas para a caracterização dos potenciais transportadores de distorção foram as seguintes:

- Microestruturais;
- Perfis de dureza na barra e região afetada;
- Análises do corte através de MEV;
- Análise de tensões residuais através do método de difração de raios-X.

Somando-se todos os fatores envolvidos na caracterização foi possível obter um maior entendimento sobre os fenômenos ocorridos no processo de corte, podendo inclusive apresentar uma combinação de processos que seja mais vantajosa em termos de distorção e tensões residuais.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de Corte

O método de corte a ser selecionado depende da espessura, da temperatura do material a ser cortado e do acabamento e tolerância desejados (ASM INTERNATIONAL, 1993). Os métodos mais utilizados para o corte de barras são o cisalhamento, uso de serras e discos abrasivos além de corte a gás.

Para o setor industrial, o fator determinante do processo de corte a ser utilizado na fabricação de um componente é a qualidade da região cortada, e os processos que garantem uma melhor qualidade de corte são mais caros por necessitar de ferramentas e prensas mais sofisticadas. A investigação científica por métodos de otimização do processo de corte pode, portanto resultar em reduções de custos dos equipamentos necessários a fabricação. Além disso, métodos de produção modernos exigem supervisão constante de todos os fatores que influenciem na qualidade do produto final (SOUZA 2001).

O corte por disco e a gás possuem melhor acabamento e precisão que o corte por cisalhamento, embora este seja mais rápido. Este é o principal motivo para ele ser utilizado onde é necessária velocidade na aplicação do corte - como despontes em um laminador e o corte final de barras. Ainda são utilizados, principalmente para chapas, corte à água, laser, oxi-corte e plasma (SCHAEFFER & ROCHA, 2007).

2.1.1 Corte Cisalhante

O corte de aços por cisalhamento é caracterizado basicamente como ação de duas lâminas de corte sobre um material (barra, chapa, entre outros).

Qualquer metal que pode ser usinado pode também ser cisalhado - embora a necessidade de potência aumente com a resistência do metal de trabalho. Também o *design* da

lâmina é mais crítico e sua vida útil cai com o aumento da resistência deste metal (ASM INTERNATIONAL, 1993).

O corte de barras por cisalhamento ocorre em três diferentes etapas, Figura 2.1 (BREITLING et al, 1997):

1. Primeiramente, ocorre a deformação elástica do material.
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.

* Alguns autores, ASM INTERNATIONAL (1993), por exemplo, citam ainda a existência de mais duas etapas, chegando a um total de cinco etapas, ou zonas, demonstradas na Figura 2.2:

Zona de arredondamento (a); Zona cisalhada (b); Zona fraturada (c); Rebarba (d); Empenamento (e).

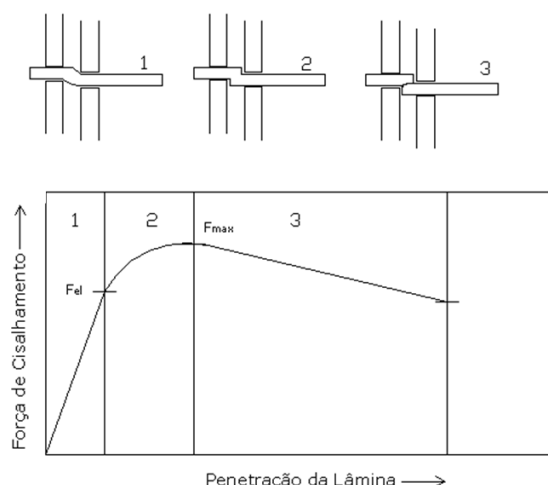


Figura 2.1. Etapas de corte por cisalhamento e evolução da força envolvida. Fonte: adaptado de BREITLING et al 1997.

Lâminas retas podem ser utilizadas para o corte de barras, embora ocorra considerável distorção, como mostra a Figura 2.2. Lâminas que acompanham a geometria da barra minimizam, mas não eliminam estas características. Além disso, a concentração de impactos é maior quando cisalhando com lâminas retas, especialmente no caso de barras de seção redonda.

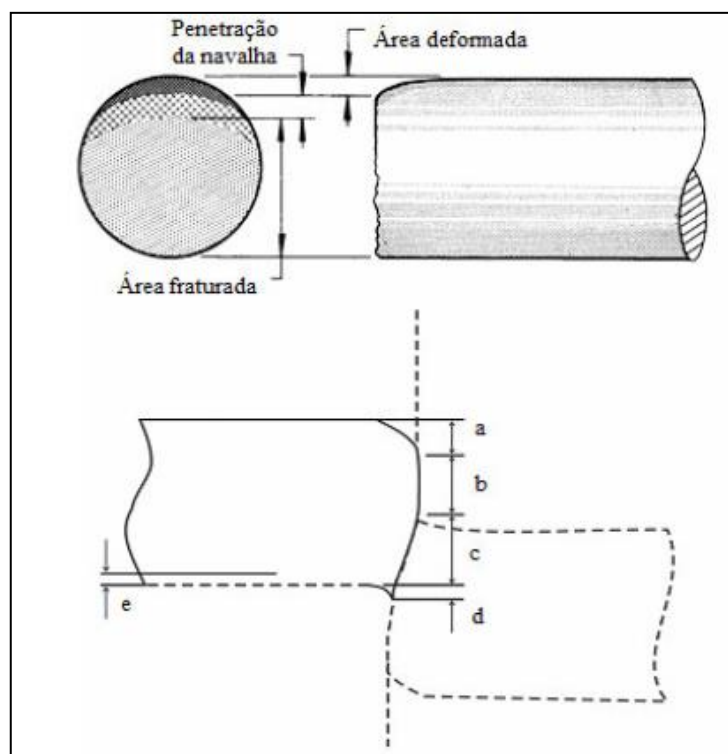


Figura 2.2. Representação gráfica das diferentes etapas no corte cisalhante. Fonte: adaptado de ASM INTERNATIONAL 1993.

A região de penetração da lâmina ou navalha fica caracterizada por ter uma aparência mais lisa quando comparada com a região fraturada, que tem a superfície mais rugosa.

A potência necessária em um processo de cisalhamento pode ser estimada através da fórmula apresentada na Equação 2.1:

$$hp = AVS / 33000 \quad \text{Equação 2.1.}$$

Onde A é a área a ser cisalhada (em polegadas quadradas), V é a velocidade da lâmina (em pés por minuto) e S é a resistência ao cisalhamento do material de trabalho (em libras por polegada quadrada). O número 33000 no divisor é pés-libras por minuto por hp. Para conversão do sistema inglês para o sistema métrico internacional o valor em hp deve ser multiplicado por 0,746, obtendo-se a potência em kilo watts. Pode ser necessário um

incremento de cerca de 25% no valor calculado para compensar fatores como a ineficiência do equipamento. Embora esta equação possa ser usada para estimar a potência necessária, ela é de confiança limitada por que não considera a ductilidade do material a ser cortado. A fórmula é baseada em aços baixo carbono; quando um aço de menor ductilidade que este for cisalhado, a penetração da lâmina será menor antes do rompimento (SCHAEFFER & ROCHA, 2007).

Para o cálculo da força uma abordagem simples é a multiplicação da tensão de ruptura ao cisalhamento pela área a ser cisalhada, descrita pela Equação 2.2:

$$F_c = \tau_c \cdot A_c \quad \text{Equação 2.2.}$$

Onde F_c é a força de corte, τ_c é a tensão de ruptura do material ao cisalhamento e A_c é a área a ser cisalhada. A tensão de ruptura ao cisalhamento geralmente fica entre 50 e 80% da tensão de ruptura do material, sendo função da liga e da microestrutura (SOUZA, 2001).

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 (ASM INTERNATIONAL, 1993).

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 (ASM INTERNATIONAL, 1993).

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 (SCHAEFFER & ROCHA, 2007). No material, uma folga menor causa uma zona cisalhada maior devido a estas 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 demonstrado 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).

2.1.1.1 Equipamentos de Corte (Tesoura)

O tipo de tesoura utilizada no corte de barras por cisalhamento no comprimento final desejado é a do tipo guilhotina. Há dois tipos de tesoura do tipo guilhotina: final aberto e final fechado. A Figura 2.3 mostra uma tesoura de final aberto em um lado com construção em C. Tesouras fechadas possuem basicamente a mesma forma, com a diferença de possuir suportes nas duas extremidades. A construção aberta tem a vantagem de permitir ao operador a visão das lâminas e sua condição. Em contrapartida, necessita de uma estrutura mais robusta para suportar os esforços e mais espaço instalação em comparação com uma tesoura fechada de mesma capacidade (ASM INTERNATIONAL, 1993).

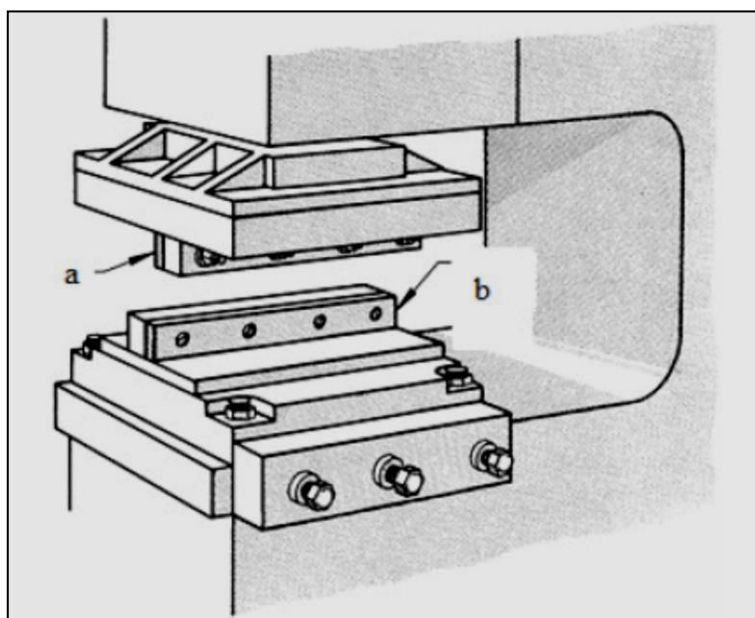


Figura 2.3. Tesoura de final aberto em C. a) Lâmina superior; b) Lâmina inferior. Embora as lâminas sejam retas, diversas geometrias podem ser utilizadas. Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL 1993.

2.1.1.2 Lâminas e Navalhas

As lâminas utilizadas nos processos de cisalhamento podem ser divididas nas para corte a frio e corte a quente. No corte a frio são utilizados principalmente os aços resistentes ao choque e impacto S2 e S5. Também são utilizados aços ao carbono ou aços ligados com endurecimento superficial. A dureza recomendada para estas lâminas fica entre 45 e 55 HRC, sendo mais recomendado utilizar uma dureza que provoque desgaste da lâmina do que uma que cause trincamento ou quebra. Para o cisalhamento a quente são utilizados aços ferramenta para trabalho a quente, principalmente H11, H12 e H13. Não há dados que afirmem a superioridade de algum destes aços em relação aos outros. Aços de mais alta liga como H21 e H25 podem ser utilizados, mas somente quando os apontados anteriormente terem se mostrado inadequados, já que eles possuem um custo mais alto. Aços ao carbono, geralmente com teor entre 0,03 e 0,04 %, também podem ser utilizados na condição de endurecidos na superfície (BOTH 2008).

Para o cisalhamento de barras redondas o mais adequado é a utilização de um par de lâminas onde cada uma tenha usinada em si o formato da metade da seção da barra. O ideal é que para cada bitola a ser cortada se utilize uma lâmina dimensionada para ela. Lâminas em que a barra seja posicionada no furo de corte com muita folga produzem distorção semelhante à observada em lâminas retas. Durante o corte, a lâmina superior se move para baixo enquanto a lâmina inferior permanece imóvel. No uso desta técnica é importante que seja usado um fixador para que as barras mantenham a sua posição, e que este fixador permita um leve movimento das barras no sentido axial. Isto é necessário para evitar duplo cisalhamento devido à rigidez do material (ASM INTERNATIONAL, 1993).

2.1.1.3 Principais Parâmetros de Corte

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 para se avaliar um processo de corte e o ferramental empregado são os seguintes: (ASM INTERNATIONAL, 1993) e (BREITLING et al, 1997) :

- 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.

2.1.1.4 Tensão, Deformação e Fratura

Como citado anteriormente, no contato da lâmina de corte com a barra ocorre um incremento da tensão atuante, que faz com que a barra passe pelos estágios de deformação elástica, plástica e rompimento (BOTH 2008).

Se um material sob uma carga recupera suas dimensões originais após a remoção desta, o comportamento é descrito como sendo elástico. Neste comportamento, a maioria dos materiais obedece à lei de Hooke, que estabelece que a deformação é diretamente proporcional à carga. A tensão para qual isto deixa de ocorrer e o material sofre uma deformação não recuperável é chamada de limite elástico ou tensão de escoamento. Acima deste limite, o material sofre deformação permanente chamada de deformação plástica (DIETER, 1988).

A passagem de um material do seu estado elástico para o estado plástico depende do estado de tensões, das condições do material, da temperatura e da velocidade de deformação (SCHAEFFER, 2004).

Tresca define como critério de escoamento, baseado em resultados experimentais, que a deformação plástica em um ponto material ocorre sempre que a tensão tangencial máxima atinge um determinado limite (JORGE & DINIS, 2005). Este valor é atingido quando a diferença entre a maior e a menor tensão aplicada sobre o corpo atinge o dobro do valor da tensão de cisalhamento, o que equivale à tensão de escoamento (SCHAEFFER, 2004), conforme Equação 2.3.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot \tau_{max} = \sigma_E \quad \text{Equação 2.3}$$

Para compreender os fatores que alteram a resistência mecânica de um material, alterando a forma como ele reage à deformação plástica e ocasionando a sua fratura, é importante primeiramente compreender o mecanismo pelo qual um material se deforma.

A deformação plástica pode ser explicada pelo movimento de um número significativo de discordâncias, que são defeitos na estrutura cristalina do material. Tais defeitos correspondem a distorções na rede cristalina dos materiais. Como exemplo, toma-se a Figura 2.4, que demonstra o movimento de uma discordância frente a uma tensão de cisalhamento. O plano de átomos que está causando a distorção na rede é o indicado pela letra “A”. Quando a tensão de cisalhamento é aplicada (a), o plano “A” é forçado para a direita. Na sequência o plano “A”, que é um plano extra inserido na rede cristalina, empurra a parte superior dos planos “B”, “C” e “D” e assim por diante, na mesma direção.

Se a força cisalhante for de magnitude suficiente, as ligações interatômicas do plano “B” são severamente alongadas no plano de cisalhamento (b), e a metade superior do plano “B” passa a ser o plano extra enquanto o plano A se liga com a metade inferior do plano “B”. Este processo ocorre repetidas vezes nos planos adjacentes (c) (CALLISTER, 2002).

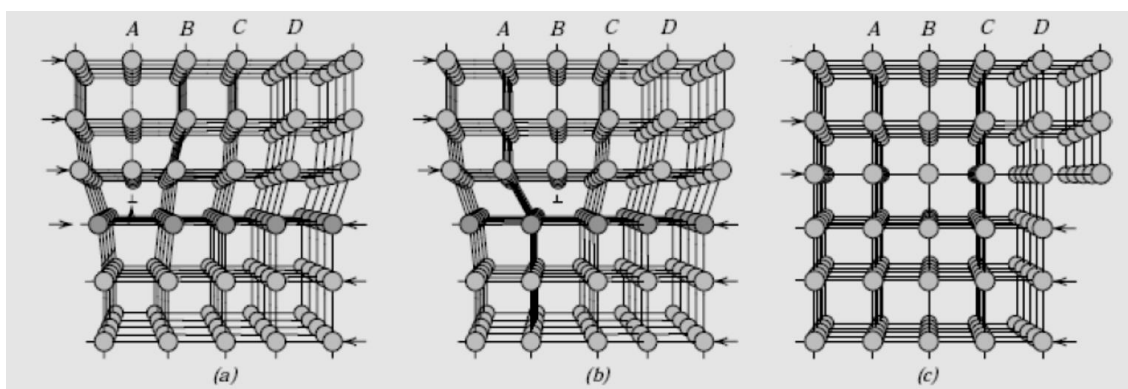


Figura 2.4. Movimento dos planos de uma discordância nos planos de escorregamento.

Fonte: Adaptado de CALLISTER 2002.

2.1.2 Corte Abrasivo

O corte por abrasão, ou abrasivo, é realizado pela fricção de uma ferramenta de corte no material a ser cortado. Neste tipo de corte, são arrancadas partículas do material a ser cortado (“cavacos”) com conseqüente aumento de temperatura da zona cortada devido ao atrito gerado entre a ferramenta de corte e o material. Quando a espessura da peça a ser cortada é muito grande, existe a necessidade de ser utilizado fluidos de refrigeração, caso

contrário poderá haver problemas microestruturais tanto na ferramenta de corte quanto no material a ser cortado, tamanho o aumento de temperatura alcançado. Este tipo de corte pode ser executado por dois tipos de equipamentos:

- Serras;
- Discos abrasivos.

2.1.2.1 Serras

Os aços podem ser cortados por todos os tipos de serras, manuais e mecanizadas, desde que estas apresentem propriedades mecânicas suficientes para efetuar o corte. Recomenda-se o uso de lâminas de corte de aço rápido para qualquer tipo de equipamento. O corte é efetuado em movimentos de ida e volta com amplitude e velocidade adequadas, com o retorno em vazio para evitar um rápido endurecimento da superfície a ser cortada. Recomenda-se o uso de lubrificante (óleo para serviços pesados solúvel em água, dentre outros) para qualquer tipo de serra utilizada, exceto para o caso de serra de fita de fricção de alta velocidade. Geralmente, são encontradas na indústria entre três tipos (MESQUITA 1997):

Serra Manual: *Utilizada para corte de peças finas e serviços não repetitivos. Recomenda-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 e do tipo de lâmina e do material a ser cortado. A lâmina deve ser resfriada por mistura de óleos para serviços pesados solúveis em água.*

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.

2.1.2.2 Discos Abrasivos

Os discos de corte são constituídos de partículas abrasivas impregnadas com aglutinantes especiais misturadas com resina de borracha. Em razão do controle granulométrico do abrasivo e elevada velocidade de corte, a sua utilização deve restringir-se às indicações prescritas pelos fabricantes.

Para a seleção do disco de corte mais adequado, deve-se considerar o tipo de material a ser cortado, a seção do corte, o acabamento desejado e os equipamentos de corte disponíveis (corte refrigerado ou a seco).

De uma maneira geral, os parâmetros que devem ser analisados são (MESQUITA 1997):

Material do disco x Material a ser cortado: *Como regra geral, especificam-se para o corte de materiais dúcteis, discos duros ou de grãos grossos e, para materiais mais duros, discos dúcteis ou de grãos mais finos. Discos fabricados com carbetto de silício (Sic) apresentam maior rendimento em materiais de baixa resistência à tração (ferro fundido cinzento, materiais não ferrosos ou não metálicos). Para os aços, especificam-se discos fabricados em óxido de alumínio (Al_2O_3) reforçados por duas telas laterais.*

Arco de contato disco/peça: *O arco de contato entre peça e disco de corte determina o comprimento do cavaco produzido. Cavacos grandes obstruem o caminho dos grãos abrasivos na periferia do disco e reduzem a ação de corte.*

Pressão de Corte: *Em peças de paredes finas a pressão unitária de corte aumenta, acarretando o desprendimento prematuro dos grãos abrasivos e acelerando o desgaste das faces do disco. Por este motivo, recomenda-se usar discos de durezas elevadas. Inversamente, em peças de paredes mais grossas, onde o arco de contato aumenta, a pressão unitária resultante será mais baixa, recomendando-se discos de durezas mais baixas.*

Acabamento: *As características de corte livre dependem do tamanho do grão abrasivo e do grau de dureza do disco, determinando a geração de calor e a rebarba produzida. Quanto mais elevado o calor gerado, mais rebarba é produzida pelo corte. Quanto mais fino é o disco, menor índice de rebarba ele produz, pela menor quantidade de material removido pelo corte e, conseqüentemente, menor geração de calor.*

Potencia da maquina de corte: *Quanto maior a potência disponível, maior poderá ser a pressão exercida, podendo-se empregar com êxito, discos de durezas mais elevadas obtendo maior economia.*

2.2 Tensões Residuais

Tensões residuais são as tensões elásticas existentes em um corpo sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero. Assim, plotando-se uma curva das tensões trativas e compressivas, presentes no material, a soma das áreas abaixo da curva será zero (LU 1996).

Estas tensões são uma consequência de interações entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura, mostrados na Figura 2.5. As características do material, ou relacionadas a ele, que influenciam no desenvolvimento de tensões residuais incluem condutividade térmica, capacidade calorífica, expansividade térmica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica e cinética de transformações, mecanismos de transformações, e plasticidade transformação (Totten 2002). São deformações plásticas não uniformes, que podem ser causadas por alterações microestruturais de diversos tipos, sejam elas químicas mecânicas ou térmicas. As propriedades de engenharia de materiais e componentes estruturais como a vida em fadiga, distorção, estabilidade dimensional, resistência à corrosão e fragilidade a fratura frágil podem ser consideravelmente influenciadas por tensões residuais. Tais efeitos usualmente trazem despesas consideráveis em reparos e restaurações de peças, equipamentos e estruturas (LEMOS 2012, ROCHA et al. 2011, ROSSINI 2011, NUNES 2008, ZOCH 2005).

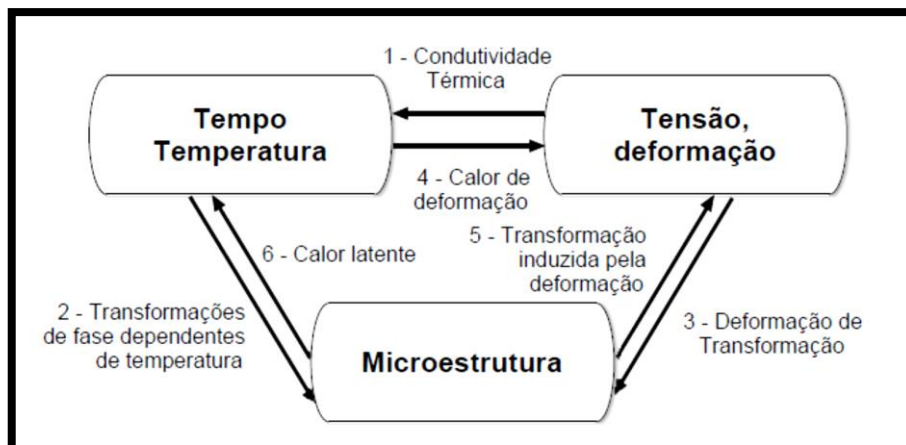


Figura 2.5. Relações entre temperatura, microestrutura e tensões. Fonte: Adaptado de Bhadeshia 2002.

Existem dois comportamentos de tensões residuais, isto é, trativo e compressivo. Invariavelmente, as tensões residuais trativas na superfície são prejudiciais, porque se somam às tensões de serviço e tendem a nuclear trincas, enquanto as compressivas produzem efeitos contrários, o que as tornam desejáveis em casos em que as peças são submetidas a solicitações cíclicas, fratura por fadiga. A Figura 2.6 exemplifica o somatório de tensões de serviço, uma flexão no caso, a um estado de tensões residuais, provando que a soma das tensões trativas (trabalho + residuais) podem ser prejudiciais ao material.

Portanto, a análise de tensões residuais é uma etapa fortemente recomendável no design de peças e elementos estruturais e na estimativa da sua confiabilidade em condições de serviço. No entanto, sabe-se que poucos fabricantes no Brasil fazem uma análise prévia das tensões residuais nos materiais. Também existe uma relação importante entre a vida em fadiga dos metais com as tensões residuais presentes no material onde em alguns casos pode ocorrer a fratura catastrófica devido ao não conhecimento ou controle adequado do perfil de tensões residuais envolvido. Embora o progresso do sucesso tenha sido alcançado no desenvolvimento de técnicas para a gestão de tensões residuais, um esforço considerável ainda é necessário para desenvolver métodos eficientes, com baixo custo de medição e tecnologias para a redistribuição benéfica de tensões residuais (ROSSINI et al. 2011).

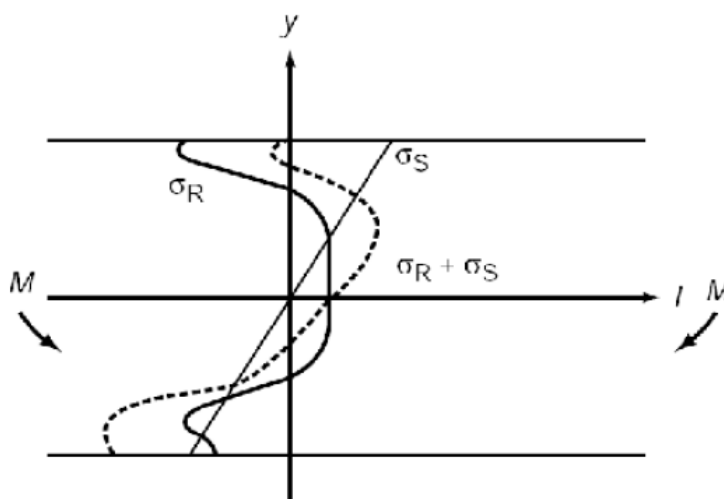


Figura 2.6. Somatório das tensões residuais com as tensões de serviço. Fonte: Adaptado de NUNES 2008.

2.2.1 Definições de Micro e Macro Tensões Residuais

Tipicamente, as tensões residuais são divididas entre macroscópicas e microscópicas:

i) **Macrotensões:**

São consideradas tensões macroscópicas ou macrotensões aquelas que se estendem sobre distâncias grandes em relação ao tamanho de grão do material (PREVÉY, 1986) Elas se apresentam de forma homogênea ao longo desta região (SUE AND SCHAJER, 1994). Em geral são as que despertam maiores interesses aos problemas relacionados com a engenharia, em função de sua ação sobre os materiais (BANIN JÚNIOR 2009). Macrotensões deformam vários grãos uniformemente em suas superfícies. As distorções uniformes nos reticulados cristalinos mudam a posição angular do pico de difração selecionado para medição de tensões residuais pela técnica de difração de raios-X (PREVÉY, 1986);

ii) **Microtensões:**

Tensões microscópicas ou microtensões são propriedades em escala da amostra, tais como percentual de deformação a frio ou dureza, que não possuem direção e resultam de deformações do reticulado cristalino. São associados com deformações do reticulado cristalino de ordem equivalente ao tamanho de grão associado. São dimensionados no ensaio de difração de raios-X através do “alargamento” do pico de

difração (PREVÉY, 1986). Dentro desta classificação de microtensões ocorre uma divisão entre microtensões homogêneas e heterogêneas. As tensões homogêneas levam em conta um ou mais grão, enquanto as heterogêneas levam em conta apenas a região interna de um grão (CAMPOS et al. 2006).

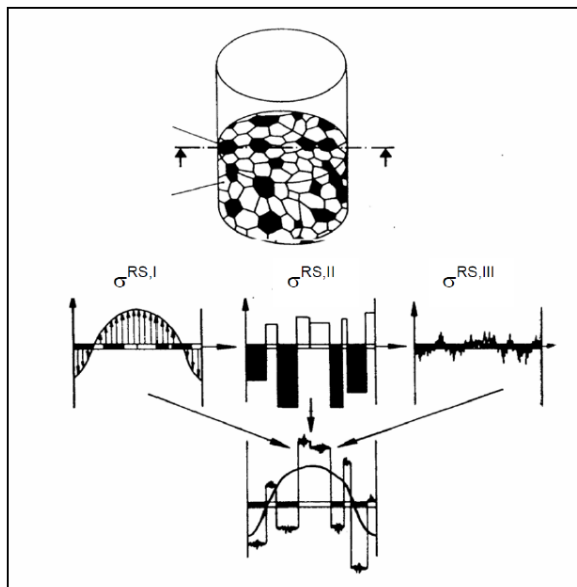


Figura 2.7. Representação esquemática do estado de tensões residuais, segundo a escola alemã (MACHERAUCH et al, 1973) (HAUK et al, 1991).

$\sigma^{RS,I}$ = homogênea ao longo de grande região do material (muitos grãos)

$\sigma^{RS,II}$ = homogênea ao longo de várias áreas (um ou alguns grãos)

$\sigma^{RS,III}$ = heterogênea ao longo de pequenas áreas (dentro de um grão)

A resultante é a Soma $\sigma^{(x,y,z)} = \sigma^{RS,I} + \sigma^{RS,II} + \sigma^{RS,III}$ em cada ponto x,y,z de uma amostra ou componente. Fonte: Adaptado de Campos et al. 2006.

Na Figura 2.7 observa-se que enquanto que $\sigma^{RS,I}$ pode ser identificada como tipo (i) macro tensões, e que $\sigma^{RS,III}$ pode ser interpretada como (ii) micro tensões do tipo I, a escola alemã ressalta a existência de um tipo intermediário ($\sigma^{RS,II}$), (CAMPOS et al. 2006).

2.2.2 Métodos de Medição

Como as tensões residuais são conhecidas como importantes “potenciais de distorção”, uma caracterização extensiva da distribuição de tensões residuais se torna necessária para o

entendimento de qualquer processo a ser estudado. Com o objetivo de se obter as informações requeridas, são utilizadas diversas técnicas para avaliação de tensões residuais que geralmente são complementárias. Todo o método tem suas vantagens, mas apresentam certas dificuldades (EPP 2011).

Até o momento, não existe um método universal de medida de tensões residuais capaz de resolver todos os problemas, a baixo custo, da melhor maneira possível. A técnica a ser utilizada deve ser relacionada com base numa série de parâmetros influenciados pelas características do componente e o tipo de medida efetuada. Estes parâmetros baseiam-se:

1. Na natureza do componente;
2. No tipo de tensões residuais presentes no componente;
3. No gradiente de tensões residuais;
4. Na geometria do componente;
5. Local onde a medida será realizada (em campo ou no laboratório);
6. No tipo de intervenção (método destrutivo ou não-destrutivo);
7. No tempo disponível para a medida e apresentação dos resultados;
8. Na precisão e repetibilidade do método;
9. No custo final da medida (MARTINS et al. 2004).

Os métodos destrutivos se baseiam na destruição do estado de equilíbrio de tensões residuais no material, podendo então medir-se o seu relaxamento, ou seja, o efeito das tensões residuais contidas no material. Todos os métodos destrutivos são sensíveis a tensão residual macroscópica. Já os métodos não destrutivos podem avaliar os diferentes tipos de tensões.

Entre os métodos mais conhecidos destacam-se:

▪ **Difração de Raios-X (XRD):**

Na medição de tensões residuais utilizando este método, é medida a deformação do reticulado cristalino e a tensão residual associada é determinada através das constantes elásticas, assumindo uma distorção elástica linear do plano cristalino apropriado (FRY et al 2000). Método geralmente não destrutivo pode ser combinado com remoção de camada, tornando-se então destrutivo.

▪ **Furo-Cego Incremental (Hole-drilling):**

Um dos métodos mais praticados mundialmente, utilizando uma fresa de precisão para a realização de um pequeno furo na superfície do componente a ser analisado. A deformação aliviada pelo furo é medida através de extensômetros (strain-gage) ou por sensores ópticos

(Martins 2004). *Método destrutivo, ou semi-destrutivo, pois, dependendo do tamanho do componente medido, o tamanho do furo pode ser considerado desprezível.*

- **Difração de Nêutrons:**

Assemelha-se a difração de raios-X. Para investigações com grandes profundidades em um componente, um dos melhores métodos disponíveis é o de difração de nêutrons. Ele permite a investigação em amostras de aço com diversos centímetros de profundidade, apesar de não oferecer uma boa resolução próximo a superfície. As análises de tensões residuais por difração de nêutrons por ângulo dispersivo é utilizada a diversas décadas e, portanto, já é bastante estabelecida (EPP 2011). Método não destrutivo, apesar de as amostras utilizadas com este método precisem ser avaliadas posteriormente para garantir a não radioatividade das mesmas após o uso da técnica.

- **Micromagnético:**

Necessita de uma calibração prévia com medições oriundas de outros métodos de medição, de preferência difração de raios-X. Utiliza as propriedades micromagnéticas dos materiais para definir as variações do estado de tensões (EPP 2011). Método não destrutivo e o mais rápido entre os citados.

As técnicas mecânicas, bem estabelecidas na tecnologia de materiais, foram melhoradas nos últimos anos com o desenvolvimento de novos métodos “semi não destrutivos”, com os quais pequenas superfícies, perto de regiões com estados materiais distintos, podem ser medidas. As técnicas de raios-X tem conseguido uma aplicação mais ampla porque o equipamento se tornou mais fácil de manusear, e as medições são menos demoradas. As técnicas de difração de nêutrons oferecem vantagens únicas em determinar tensões residuais no interior da secção transversal de partes estruturais (HAUK 1997). Novas técnicas não destrutivas têm sido estudadas nos últimos anos (MARTINS 2004 e MAGINA 2009). Sabe-se, entretanto que para uma melhor e mais completa avaliação da distribuição de tensões residuais em um componente mecânico, o ideal seria a utilização combinada destes métodos.

Os métodos e a teoria envolvida nestes tipos de análises são discutidos a diversos anos, sendo apresentados por diversos autores (LU 1996 e HAUK 1997), portanto uma discussão teórica sobre o assunto não se torna necessária.

2.3 Trefilação

Trefilação é um processo de transformação em metais utilizado para fabricar barras, arames e tubos em que uma força trativa faz com que uma barra, um arame ou um tubo de metal, normalmente com uma geometria circular, atravesse uma ferramenta cônica (denominada fieira), feita de um material duro causando redução de diâmetro (DIETER, 1988). A trefilação é utilizada como método de produção de fios há cerca de 1200 anos, existindo evidências de sua existência desde o início da utilização de metais como ouro e prata.

A forma final pode ser modificada pela geometria da fieira a qual define o percentual de redução. Usualmente, esta operação é conduzida à temperatura ambiente podendo ser realizada em diversos passes através de fieiras dispostas em sequência. Em alguns casos, operações de recozimento intermediário podem ser necessárias dependendo do grau de redução final desejado.

A redução no diâmetro da peça e, em sua maior parte, devida ao escoamento plástico (permanente) do material, que é causado por uma reação de compressão realizada pela ferramenta no metal enquanto este sofre a ação da força trativa (SOUZA, 2012).

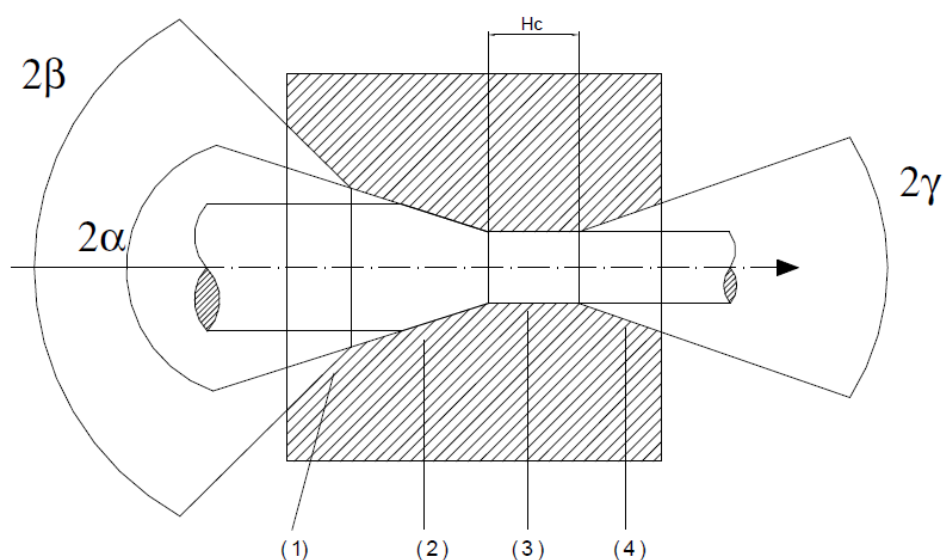


Figura 2.8. Fieira de trefilação e as quatro zonas distintas. Adaptado de NUNES, 2008.

Por sua vez, a força trativa é aplicada por um mecanismo do outro lado da fieira que a “puxará” realizando a força necessária para que essa barra a atravesse, realizando o trabalho

de redução de diâmetro. As velocidades de trefilação variam de 150 a 1500 mm/s (NEVES, 2003).

As grandes vantagens do processo de trefilação são o ganho de resistência mecânica no material, acabamento superficial e a alta velocidade do processo. A Figura 2.8 apresenta a fieira de trefilação e suas regiões.

Zona de entrada (1): região da fieira com um ângulo pouco maior que o ângulo de trefilação, isso facilita a lubrificação do processo e o guiamento da barra;

Zona de trabalho (2): região onde se situa o ângulo de trefilação, em que ocorre a reação da fieira a força trativa que impulsiona o metal a atravessar a fieira, essa reação promove o escoamento plástico do material. Local onde se define o semi-ângulo (α) e a redução da fieira e, por consequência, do diâmetro final do material em trabalho;

Zona de calibração (3): região cilíndrica de comprimento H_c , com ângulo zero, relacionada a estabilização dos parâmetros do material que foram modificados durante o processo de trefilação. Apesar de não causar redução de diâmetro, relaciona-se com a qualidade do produto final, removendo danos na superfície causados durante o escoamento plástico do material.

Zona de saída (4): região com ângulo de saída (γ) oposto ao ângulo de trefilação e ao ângulo de entrada. Esta região facilita a saída do produto final e permite o retorno elástico do material antes da saída completa da fieira, além de minimizar a possibilidade de abrasão, caso a trefilação pare ou a fieira esteja desalinhada.

2.3.1. Trefilação Combinada

A trefilação combinada foi desenvolvida com base em análises empírica de fabricantes europeus e japoneses, (NEVES, 2003) e de empresas produtoras de barras trefiladas para componentes automotivos. O processo de trefilação combinada é apresentado esquematicamente na Figura 2.9.

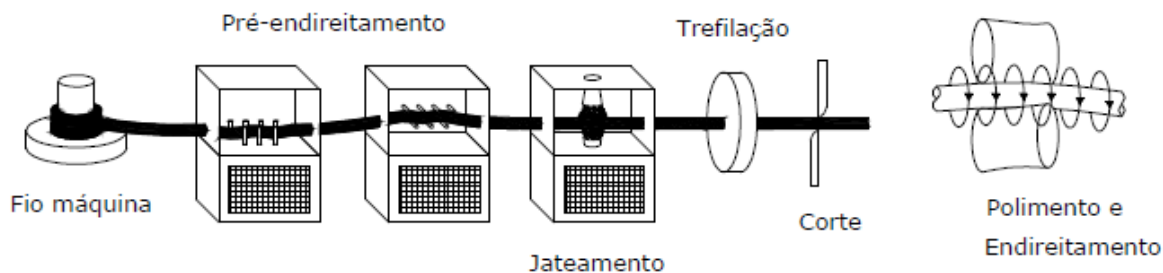


Figura 2.9. Etapas do processo de trefilação combinada. Adaptado de ROCHA, 2008.

As etapas do processo são conhecidas como:

- **Pré-endireitamento.**

O processo de pré-endireitamento consiste na passagem da barra por 7 rolos dispostos na posição horizontal e 6 rolos dispostos na posição vertical, com o objetivo de retirar a curvatura causada pela laminação a quente e pelo desbobinamento das barras. Apesar de ter sido pouco estudada, esta etapa tem extrema importância na qualidade do produto final, em função das deformações envolvidas (NASTRAN E KUZMAN, 2002).

- **Jateamento com granalha**

Consiste na formação de um jato de partículas pequenas que impacta na superfície do material para retirar os óxidos presentes formados durante a laminação a quente do material. As partículas utilizadas são feitas de aço, cerâmica ou plástico, o tamanho varia de 50 μm até 6 mm de diâmetro e as velocidades podem chegar a 150 m/s (SOUZA, 2011).

Cada esfera produz uma deformação plástica local com colisões sucessivas sujeitando a superfície do material a um carregamento cíclico. Essa deformação plástica gera esforços trativos no interior do material, o que produz tensões residuais compressivas na superfície.

Tensões compressivas na superfície das peças são muito importantes, pois causam aumento da vida em fadiga e uma redução do limite de escoamento. Este efeito pode ser anulado caso o componente seja submetido a carregamentos cíclicos (ZOCH, 2006).

- **Trefilação**

E o processo de trefilação propriamente dito, o qual já foi discutido no item 2.1 por ser o objeto deste estudo.

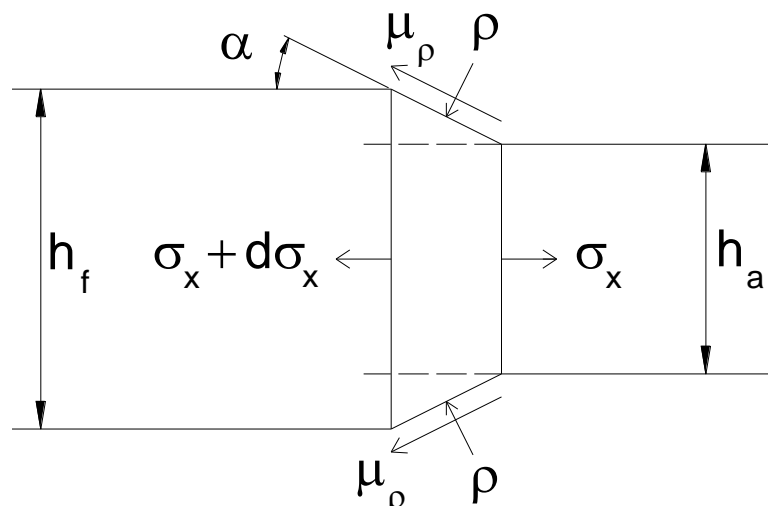


Figura 2.10. Tensões trativas e compressivas atuando em elemento da barra em trefilação. Adaptado de DIETER, 1988.

A deformação é alcançada através da combinação de tensões trativas e compressivas apresentadas na Figura 2.10, que são criadas pela força de tração na saída da fiação e pela geometria da mesma. Considerando as tensões principais representadas por σ_1 , σ_2 , σ_3 , podem ser utilizados diferentes critérios de falha (AKIKAZU ET. AL., 2001; WANG E GONG, 2002). O escoamento de um metal é determinado pela movimentação entre os grãos da microestrutura o que é regido pelas tensões cisalhantes. Portanto, o início da deformação plástica pode ser determinado pela tensão máxima cisalhante baseada no critério de Tresca apresentado na Equação 2.4.

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\sigma_0}{2}. \quad \text{Equação 2.4.}$$

Onde τ_{max} representa a tensão máxima cisalhante e σ_0 é determinado pelo limite de escoamento em um ensaio de tração uniaxial.

▪ Endireitamento com Rolos

Visando uma melhoria na qualidade do produto final, realiza-se a etapa final da trefilação combinada, que consiste no endireitamento e polimento da barra com a utilização de dois rolos hiperbólicos.

Durante o endireitamento com dois rolos, as tensões tendem a ser aliviadas gerando novamente tensões compressivas na superfície (WU et.al., 2000).

2.3.2 Parâmetros de Trefilação

2.3.2.1 Força de Trefilação

A força de trefilação é a que faz o material atravessar a fieira. Um parâmetro básico do processo que tem uma forte relação com a porcentagem de redução do material; quanto maior e a redução, maior a força necessária. Existe um limite máximo de porcentagem de redução que depende das características da máquina, das propriedades do material e da qualidade da lubrificação. Na prática, a redução de área por passe de trefilação esta na margem entre 30-35% (KIM et. al., 1997). Provavelmente seja o parâmetro mais estudado do processo de trefilação (ASAKAWA et. al., 2002).

Uma das formas mais tradicionais de se relacionar matematicamente a força trativa que provoca o deslocamento da barra dentro da fieira e expressa pela equação de Siebel (Equação 2.5), que calcula a força de tração necessária para que a barra atravesse a fieira:

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A}\right). \quad \text{Equação 2.5.}$$

2.3.2.2 Ângulo de Fieira

Para cada percentual de redução de área haverá um ângulo de fieira pelo qual a força trativa necessária para que a barra atravesse a fieira será mínima (VEGA ET. AL., 2009).

E interessante encontrar o ângulo de fieira que minimiza a força de trefilação, denominado semiângulo ótimo ($\alpha_{\text{ótimo}}$), o que permitira reduzir os gastos com energia, os valores das tensões envolvidas e o risco de rompimentos da barra. Para isso, deriva-se a Equação 2.5 em função do ângulo ótimo e iguala-se a zero, o que indicara matematicamente o ponto em que o trabalho realizado pela força de atrito e o trabalho realizado pela força de trabalho redundante são iguais, chegando a Equação 2.6, deduzida em SOUZA, 2011.

$$\alpha = \sqrt{\varphi_A \frac{2}{3} \mu}. \quad \text{Equação 2.6.}$$

2.3.2.3 Parâmetro Δ

Um importante dado da trefilação é o parâmetro Δ , mostrado esquematicamente na Figura 2.11 o qual consiste na razão entre o comprimento de redução (l) e o diâmetro médio na região de redução d_m , o qual é descrito em SOUZA 2011.

Na Figura 2.11 e pode-se visualizar também o efeito do parâmetro Δ .

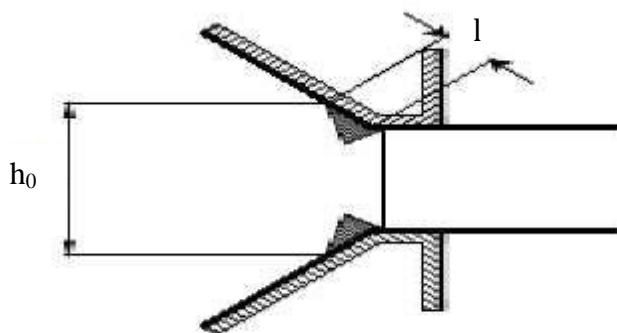


Figura 2.11. Trefilação e parâmetro Δ . Fonte: Adaptado de Souza, 2012.

$$\Delta = \frac{h_0}{l} = \frac{d_0 + d_1}{d_0 - d_1} \sin \alpha. \quad \text{Equação 2.7.}$$

Para o processo de trefilação de eixos simétricos, a redução é dada por:

$$\Delta = \frac{\sin \alpha (1 + (1-r)^{1/2})^2}{r}. \quad \text{Equação 2.8.}$$

Um valor de Δ (Equação 2.8) menor sugere uma longa zona de deformação e aumenta o contato com a fieira. Isto resulta em trabalho por atrito em excesso e geração de calor necessitando boa lubrificação e um menor coeficiente de atrito. Em compensação, estes valores menores possibilitam uma redução nos esforços para a fieira e maior durabilidade, além de diminuir o trabalho redundante e excesso de tensão no centro do material prevenindo defeitos internos. Diversos projetos comerciais de fieira sugerem o parâmetro delta próximo a 3 para minimizar as tensões de trefilação (SOUZA, 2011).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo divide-se em duas etapas:

3.1 Preparação de amostras: Apresentam-se os procedimentos, motivos e metodologia para a preparação e nomenclatura das amostras utilizadas neste trabalho.

3.2 Caracterização de amostras: Apresentam-se todos os métodos e técnicas utilizados nas análises desenvolvidas pelo trabalho.

3.1 Preparação de amostras

Como parte do projeto de pesquisa BRAGECRIM explicado anteriormente, as barras de aço ABNT 1045, conforme análise química apresentada na Tabela 3.1, com diâmetro de 20,25 mm utilizadas nesse trabalho são oriundas de um mesmo lote de fio-máquina. As mesmas passaram pelos processos dispostos na Figura 3.1, partindo de um mesmo fio-máquina e passando por processos de pré-endireitamento seguidos por um jateamento e posteriormente estas barras são trefiladas e cortadas em barras longas que passam pelo processo final de polimento por rolos cruzados (PERC), caracterizando assim o processo de trefilação combinada. Destes processos descritos variou-se apenas o ângulo de fieira utilizado na trefilação entre 20° (usual) e 15° (conforme demonstrado por SOUZA, 2011), pois conforme comprovado na primeira etapa do projeto (NUNES, 2012) variando estes ângulos há uma grande variação na distribuição das tensões residuais na barra. Antes do processo denominado PERC o fio-máquina é cortado em barras longas com 6 metros de comprimento, tamanho utilizado para a distribuição e venda do produto, portanto, é com essa forma que essas barras chegam a indústria de manufatura. Este corte é realizado pelo método cisalhante

com forma de tesoura, conforme demonstrado na Figura 3.2, salientando-se que a distância mostrada entre as lâminas é meramente ilustrativa.

Tabela 3.1. Composição química do material em comparação com a norma.

ABNT/SAE/AISI 1045	C	Mn	P máx.	S máx.
	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,04	0,05
Fieira 15°	0,48	0,871	0,025	0,035
Fieira 20°	0,47	0,867	0,024	0,034

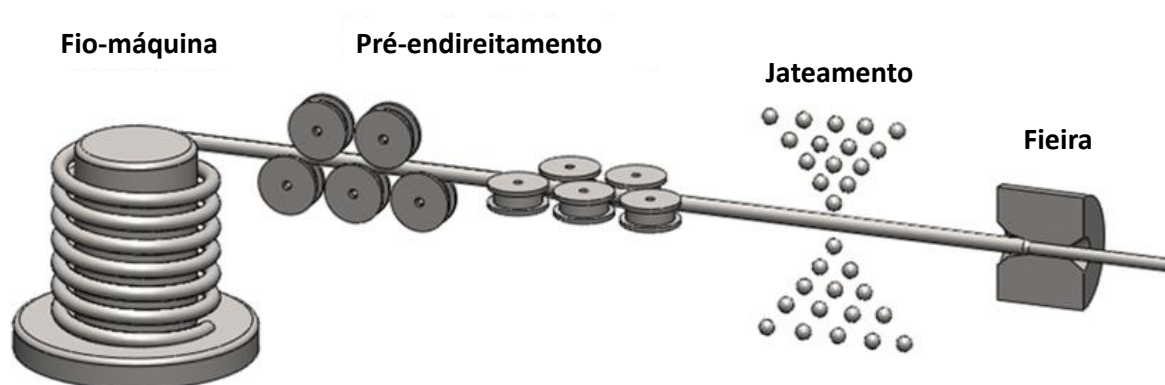


Figura 3.1. Rota de fabricação prévia a primeira etapa de corte.

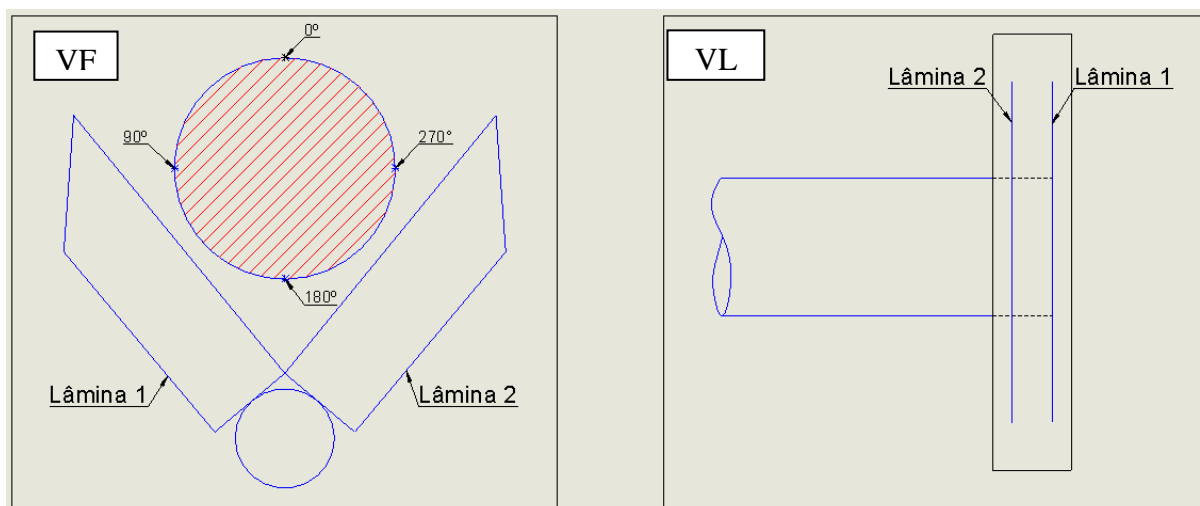


Figura 3.2. Vista lateral e frontal de um exemplo de corte com tesoura.

Como o processo de trefilação, por diversas razões, não é um processo completamente uniforme, principalmente pelo fato de o fio-máquina ser armazenado em rolos e necessitar de um pré-endireitamento antes de entrar no processo de trefilação, o projeto tem como iniciativa marcar a orientação da trefilação e um ângulo de referência, determinado de ângulo 0°, para

uma comparação entre os resultados das diversas análises e processos que se seguirão. Esta determinação pode ser observada na Figura 3.3.

Para este trabalho foi avaliado o corte por cisalhamento realizado na rota de fabricação das barras (tesoura) com o intuito de determinar as tensões envolvidas nas extremidades das barras longas (vendidas comercialmente), pois sua eliminação para uso industrial não segue critérios muito específicos. O corte com uso de serra-fita foi realizado de forma manual no equipamento mostrado na Figura 3.4 e como se pode observar, devido a haver uma extremidade da serra fixa enquanto o movimento da outra é controlada manualmente, esse tipo de corte possui certo ângulo em relação a referência de 0° na barra, que foi mantida virada para cima, assim como na rota de fabricação.

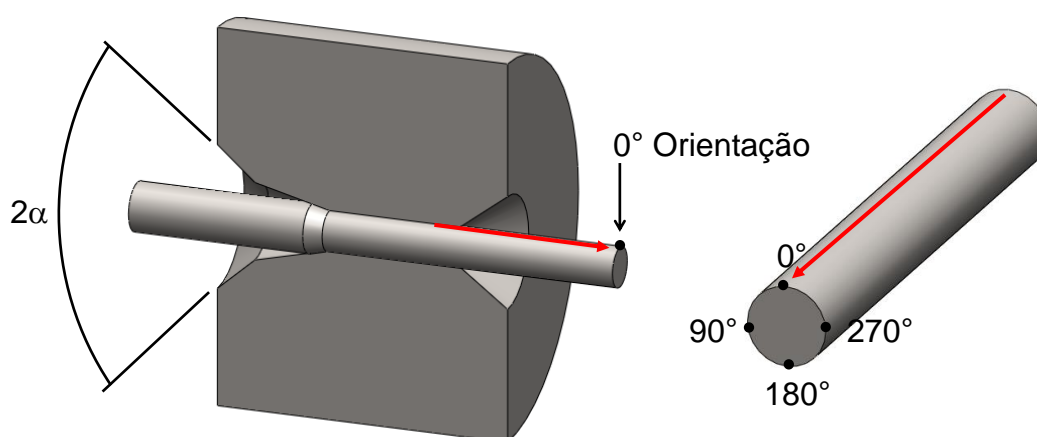


Figura 3.3. Representação do processo de trefilação prévio ao corte e representação dos ângulos de referência. α equivale metade dos valores dos ângulos de trefilação descritos.

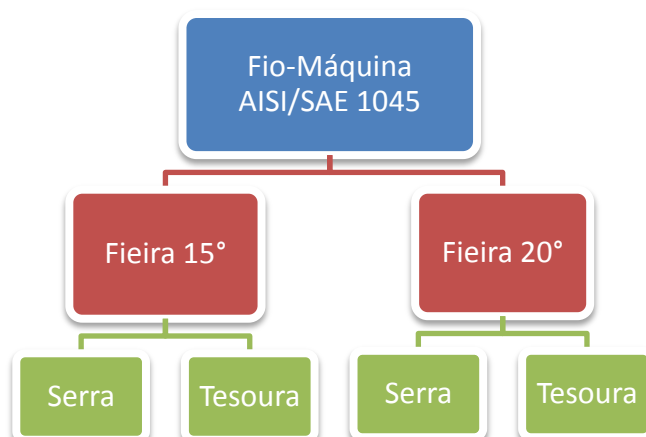


Figura 3.5. Fluxograma do processo de confecção de amostras.

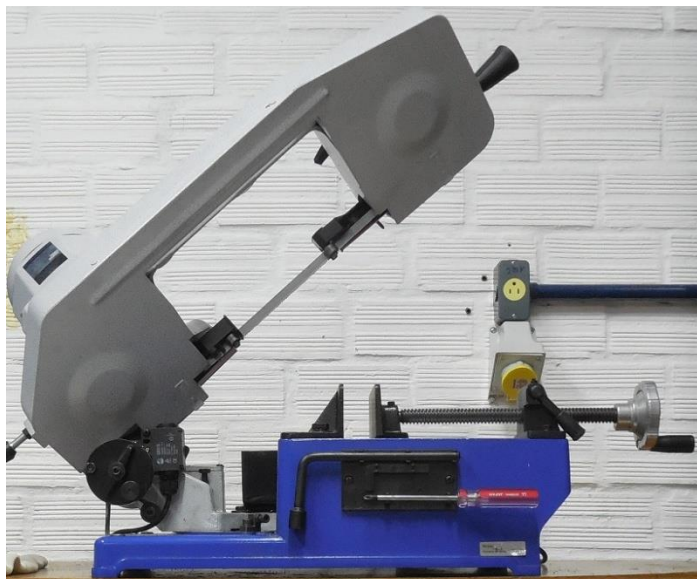


Figura 3.4. Equipamento de corte com uso de serra fita.

As amostras específicas para o presente trabalho foram retiradas a partir do lado final das barras de 6m produzidas, estas amostras, com aproximadamente 200 mm de comprimento. . Com isso as amostras confeccionadas possuem os diferentes tipos de corte na mesma amostra, por isso foram determinadas as faces de cada amostra através do seu tipo de corte específico. As amostras com a face serrada foram determinadas como face “a”, enquanto as amostras cisalhadas foram determinadas como face “b” (representado na Figura 3.5). Somados com os diferentes ângulos de trefilação, serão analisadas quatro (04) variações de parâmetros, conforme demonstrado na Figura 3.5. Portanto, gerando a nomenclatura referida na Tabela 3.2, que ainda conta com a classificação quanto a os tipos de corte (a ou b) e o tipo de análise.

Tabela 3.2. Nomenclatura das amostras.

Identificação	Ângulo de Fieira	Corte	Análise
1	20°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	XRD
2	20°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	Metalúrgica
3	20°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	Reserva
4	15°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	XRD
5	15°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	Metalúrgica
6	15°	Serra (a) + Cisalhamento (b)	Reserva

3.2 Procedimentos de caracterização

Com o término da confecção das amostras teve início a etapa de caracterização das mesmas. Através de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microscopia óptica e perfis de microdureza foram determinadas as propriedades dos materiais e a influencia dos cortes sobre elas. Paralelamente elas foram analisadas as tensões residuais superficiais resultantes de cada processo de corte através do método de difração de raios-X. Todas as análises apresentadas neste trabalho foram realizadas no *Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT)* – Bremen, Alemanha.

A primeira etapa de caracterização foi a metalúrgica, na qual foi utilizado MEV para caracterizar as superfícies fraturadas oriundas dos diferentes tipos de cortes. Para isso, as barras foram cortadas transversalmente a 20 mm da superfície a ser analisada, conforme Figura 3.5, para atender ao tamanho de amostra necessário para o uso do equipamento. Devido a uma análise prévia das superfícies, decidiu-se pela análise nos pontos de referência para a amostra cortada com serra e para as amostras cisalhadas os pontos de verificação necessitaram de uma pequena mudança em relação aos ângulos de referência, pois, conforme descrição anterior, o processo de corte foi realizado com uma inclinação em relação aos ângulos de referência (esses pontos e suas identificações podem ser verificados na Figura 3.7). A diferença de posição de medição entre as amostras também é justificada pelos diferentes resultados superficiais de cada processo, uma vez que o processo de corte abrasivo apresenta uma leve inclinação em relação a um corte totalmente perpendicular e o corte cisalhante apresenta um ângulo de corte bastante diferente de um corte perpendicular (observando a Figura 3.2 pode-se aproximar que o ângulo de entrada da lâmina de corte 1 é entre 90° e 135°). Uma amostra de 10 mm, logo abaixo da região cortada com serra (a) para avaliar a superfície do corte por serra foi retirada para a caracterização do material, sendo esta região considerada como representativa do centro da barra, pois não foi afetada pelo corte.

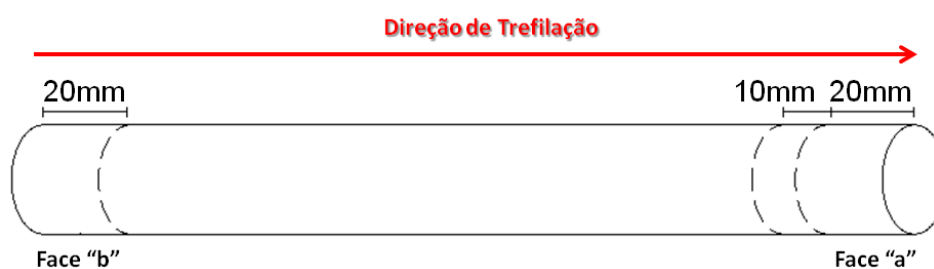


Figura 3.5. Representação da amostra e suas regiões cortadas para a realização da caracterização metalúrgica.

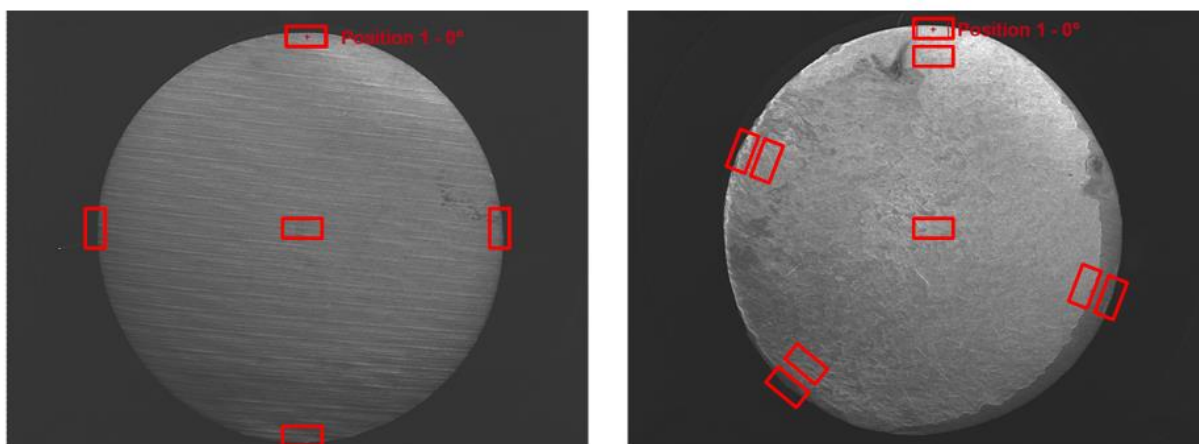


Figura 3.6. Posições observadas no microscópio eletrônico de varredura.

Os ensaios de microdurezas por indentação Vickers com carga de 1 Kgf (HV1), realizados nas amostras retiradas do centro das barras, e foram realizados em linhas transversais, seguindo as orientações angulares demonstradas anteriormente, sendo realizadas quatro (04) linhas de medição. Estas linhas se dão entre os ângulos: 0° - 180° ; 45° - 225° ; 90° - 270° ; 135° - 315° . Esta medição teve como verificar as diferenças entre as amostras com relação a seus ângulos de trefilação.

As amostras utilizadas para caracterização no MEV foram posteriormente cortadas longitudinalmente entre os ângulos de referência de 0° e 180° , conforme se demonstra na Figura 3.7 (a), para dar continuidade a caracterização metalúrgica das regiões afetadas. Estas amostras cortadas foram utilizadas para a realização de metalografias das diferentes regiões, além de perfis de microdurezas HV1 próximos às superfícies cortadas e longitudinalmente, conforme indicado na Figura 3.7 (b), tentando assim verificar se há influência do corte na dureza. Para esta análise foram realizados quatro (04) perfis de dureza:

- Paralelo a 0° ;
- Paralelo a 180° ;
- Próximo a superfície (0,1 mm de distância);
- Região central.

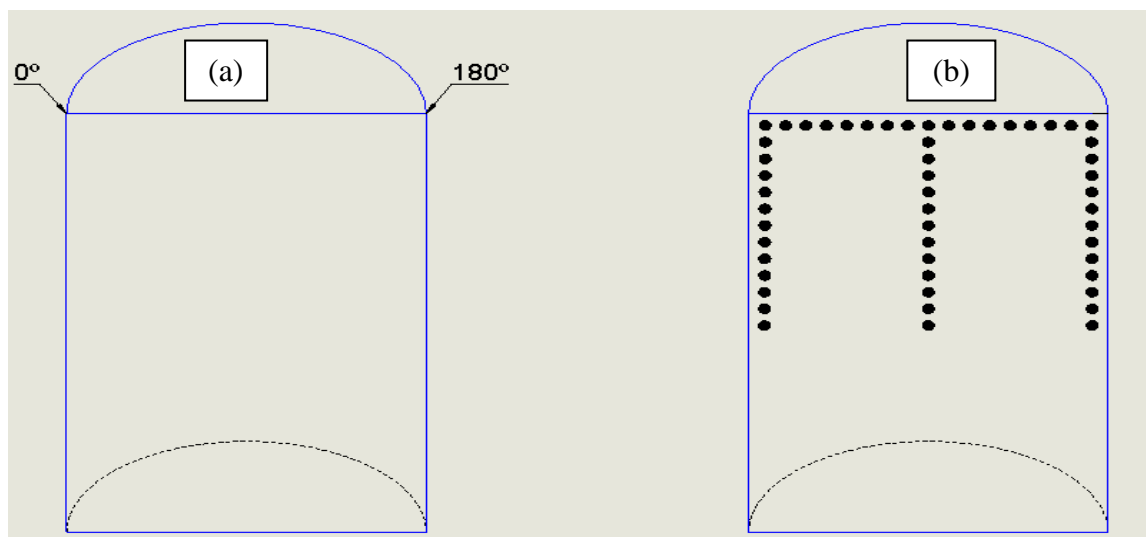


Figura 3.7. Orientação do corte realizado (a) e direções dos perfis de microdureza realizados (b).

Devido às qualidades apresentadas pelo método de difração de raios-X, o alto custo e dificuldade de uso da técnica de difração de nêutrons, além do fato do IWT/Bremen – Alemanha, parceiro internacional do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS, ser uma referência mundial na técnica de difração de raios-X, a mesma foi escolhida para a avaliação das tensões residuais neste trabalho. Esta técnica tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-x. Esta grandeza é medida através da posição angular da linha de difração. Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos. Portanto, se o ângulo de difração para um espécime livre de tensões for conhecido, pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise.

Como se trata de um aço ABNT 1045 que possui poucos elementos de liga e não sofreu nenhum processo termoquímico foi utilizada radiação Cr K- α variando, o ângulo de difração 2-Theta entre 153° e 159° e com variação do ângulo Ψ entre -45° a $+45^\circ$. Para o ensaio de Raios-X de caracterização superficial foram selecionados 8 ângulos diferentes para avaliação (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315°) com uma distância de 2 mm da superfície de corte. Nesta medição ao longo do perímetro foi utilizado um colimador (abertura do feixe) de 1 mm de abertura (diâmetro), que permite melhor precisão pontual. Posteriormente foram realizadas varreduras longitudinais em relação a superfície cortada, totalizando 14 pontos de medição para cada ângulo, conforme Tabela 3.3 e Figura 3.8, com colimador de 2 mm que possui uma precisão um pouco menor, mas avalia uma área maior.

Como este é um método de medição demorado, neste caso cada ponto medido levou em média 1h52min além da preparação e fixação das amostras, uma avaliação inicial foi realizada após as medições circulares na primeira distância da superfície (2mm) e determinado que para o lado do corte abrasivo apenas os ângulos 0° , 90° , 180° e 270° seriam medidos longitudinalmente também, pois este não apresentou grandes mudanças em relação as tensões residuais. Todas as avaliações realizadas na distância de 2mm foram realizadas manualmente, enquanto as medidas subsequentes, por utilizarem o mesmo colimador, foram realizadas automaticamente através de dois métodos, de forma linear (variando a posição Z para um determinado ângulo) e circular (variando os ângulos para uma determinada posição Z). A classificação destas amostras pode ser observada na Tabela 3.4.

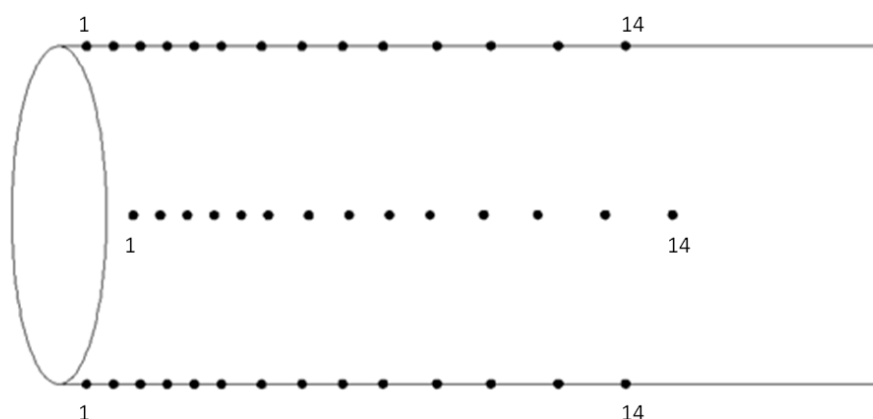


Figura 3.8 Representação das posições dos pontos de medidas para Raios-X.

Tabela 3.3. Distância de cada ponto medido.

Ponto	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

Com o uso desta metodologia, os resultados obtidos em termos de tensões residuais foram agrupados segundo a seguinte classificação:

- *Medição a dois (02) mm da face cortada. Um ponto a cada 45° ;*
- *Medições perpendiculares a face cortada para os diversos ângulos (os 4 principais para as amostras serradas e todos os 8 ângulos descritos para as amostras cisalhadas).*

Com base nesta classificação eles serão comparados e discutidos nos capítulos subsequentes.

Tabela 3.4. Distribuição das amostras e quantidade de medições.

Amostra	Superfície (2mm)	Longitudinal	Total de Medições
1a (abrasivo)	8 Pontos	4 Linhas	60 Pontos
1b (cisalhado)	8 Pontos	8 Linhas	112 Pontos
4a (abrasivo)	8 Pontos	4 Linhas	60 Pontos
4b (cisalhado)	8 Pontos	8 Linhas	112 Pontos

Conforme citado anteriormente, os processos de fabricação dessas barras não garantem dimensões uniformes e isso pode ser verificado inclusive pela geometria das mesmas, mostrada em trabalhos anteriores (NUNES 2012). Portanto, ao se configurar o equipamento para a medição de Raios-X há uma necessidade de se ajustar o vetor Y (podendo ser chamado de profundidade) para cada valor de altura (Z) que se deseja medir, a Figura 10 mostra o equipamento os reguladores de cada eixo. Para os diferentes métodos de medição foram também anotados as variações deste valor para possivelmente observar possíveis variações geométricas nas barras. No método linear o valor de Z foi zerado na distância 4 mm (primeira da medição automatizada) e no método circular o mesmo ocorreu para o ângulo 0°. Estes valores não possuem uma correta sensibilidade comparados a métodos mais apropriados como medições em scanners tridimensionais, portanto, serão apresentados em anexo apenas como forma ilustrativa das tendências geométricas das barras analisadas.

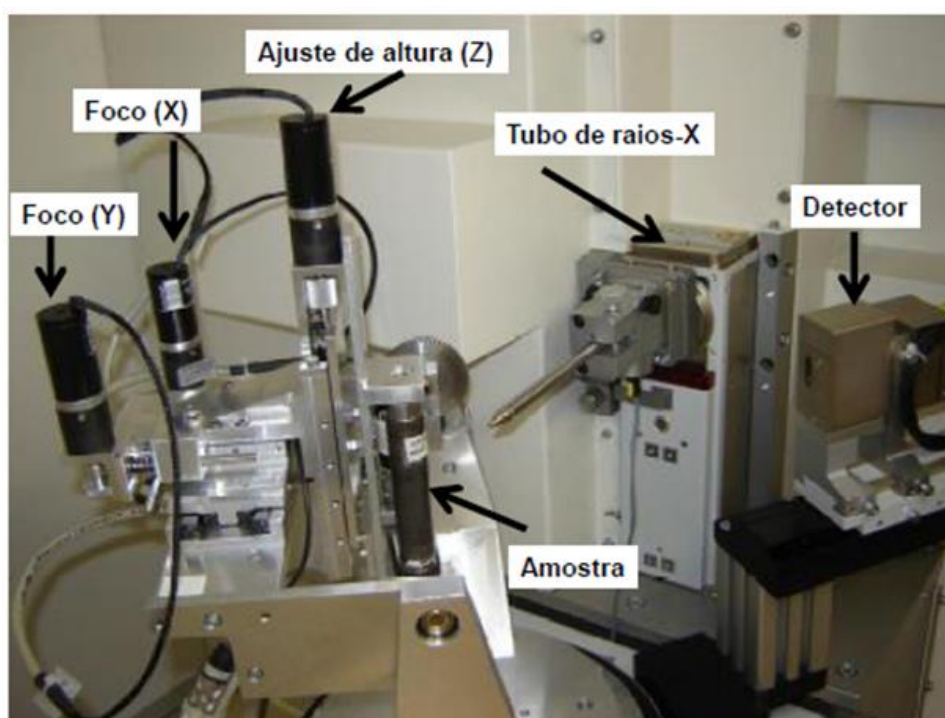


Figura 3.9. Elementos principais do equipamento de difração de raios-X GE® Inspection Technologies, modelo Analytical X-ray MZ VI E. Fonte: NUNES, 2008.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta todos os resultados relevantes do presente trabalho, bem como uma breve descrição do que pode ser observado nos mesmos.

Os resultados apresentados e posteriormente discutidos neste trabalho seguem a nomenclatura adotada e exposta no capítulo de procedimentos experimentais. A Tabela 4.1 resume as amostras que serão apresentadas no presente capítulo.

Tabela 4.1. Classificação e nomenclatura das amostras.

Amostra	Ângulo de Fieira (°)	Tipo de Corte
1a	20	Serra (Abrasivo)
1b	20	Tesoura (Cisalhante)
2a	20	Serra (Abrasivo)
2b	20	Tesoura (Cisalhante)
4a	15	Serra (Abrasivo)
4b	15	Tesoura (Cisalhante)
5a	15	Serra (Abrasivo)
5b	15	Tesoura (Cisalhante)

4.1. Metalografia

Todas as amostras utilizadas para metalografia apresentadas neste capítulo foram cortadas com uso de disco abrasivo, posteriormente lixadas por uma sequência de lixas com diversas granulometrias (200, 400, 600, 800 e 1200 mesh). Com o término deste processo as amostras foram polidas com uso de pasta de diamante 2 μm e foram expostas a um ataque químico com o uso do reagente Nital 4%.

A Figura 4.1 mostra as duas secções transversais das barras trefiladas pelos diferentes ângulos de fieira, 20° (4.1. B) e 15° (4.1. A), na região central da barra. Nelas pode ser observado o refino dos grãos nas regiões próximas a superfície enquanto nos núcleos apresentam segregações.

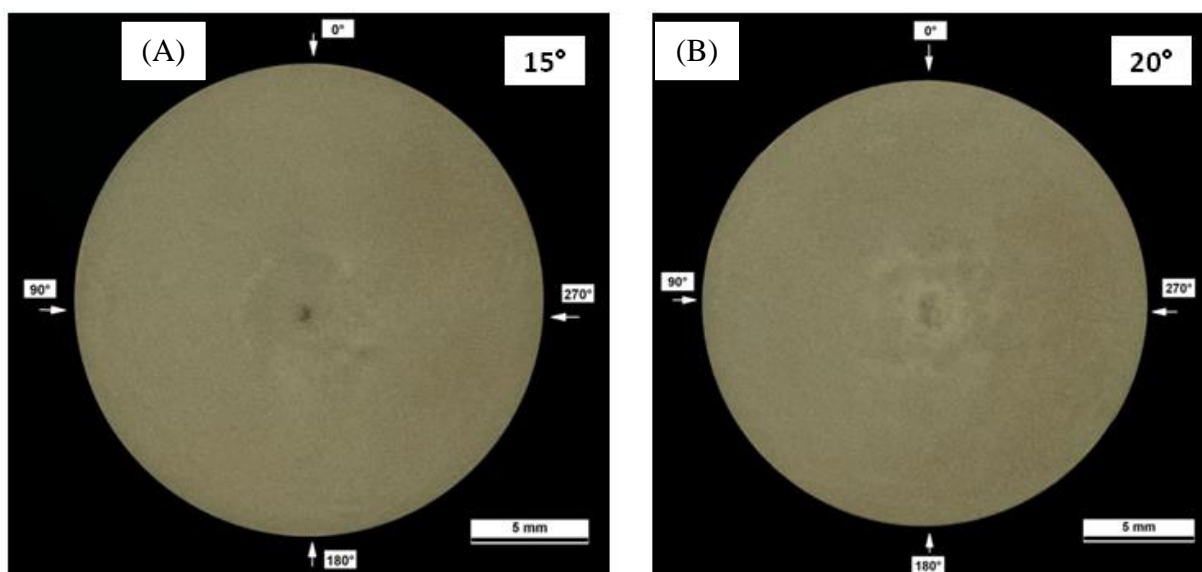


Figura 4.1. Metalografia da secção transversal das barras de aço AISI 1045 para (a) 15° e (b) 20° .

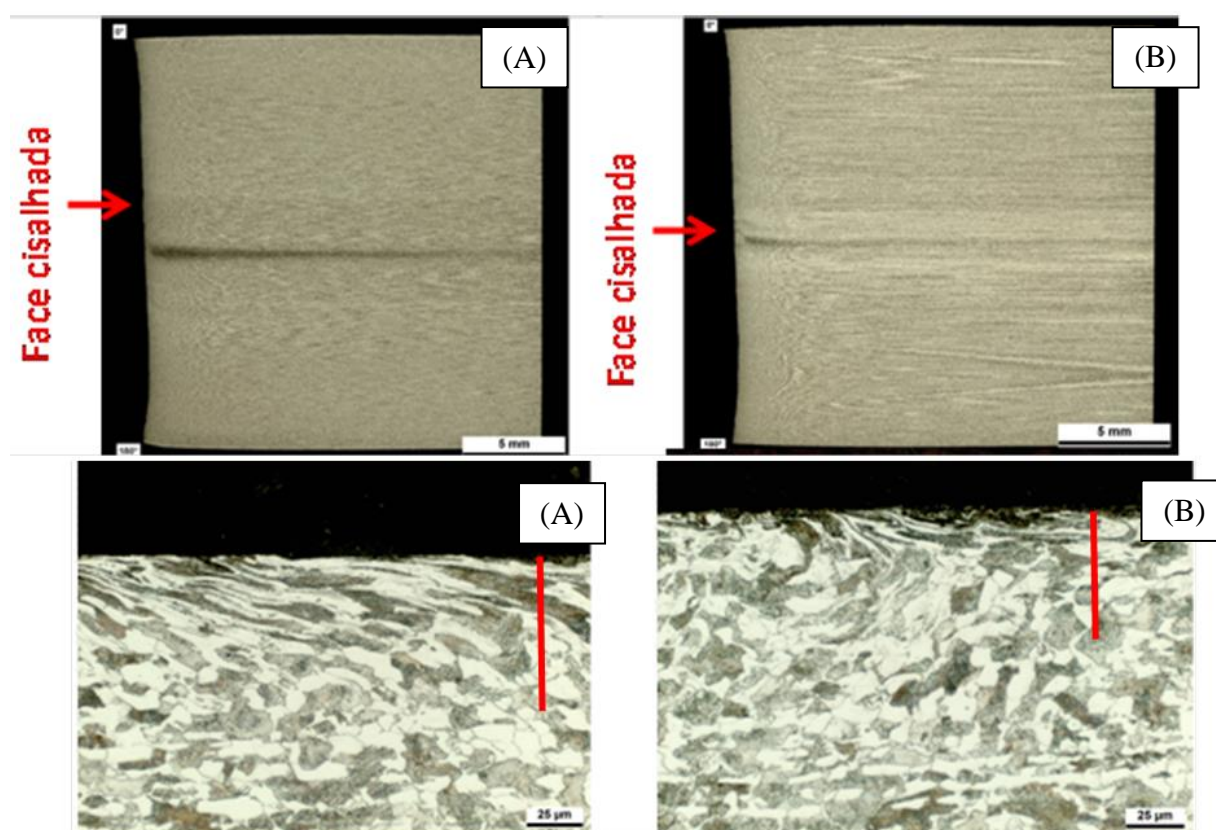


Figura 4.2. Secções longitudinais das amostras cisalhadas. (A) Fieira de 15° e (B) fieira de 20° .

A Figura 4.2 mostra a secção longitudinal das amostras cisalhadas bem como uma região próxima à superfície cortada para os dois ângulos de fieira 15° (A) e 20° (B), nelas observam-se as deformações no grão oriundas do processo de corte. Nestas metalografias

também observa-se que as segregações na região central da amostra com ângulo de fieira de 15° são maiores que nas amostras com ângulo de 20° . Estas podem ser justificadas pelos processos de fabricação deste aço como, por exemplo, um processo de lingotamento contínuo com pouco controle no resfriamento, gerando variações na nucleação de segregações ao longo das barras. Comparando as deformações pelo corte cisalhante entre os diferentes ângulos de fieira, pode-se observar uma maior deformação na amostra com menor ângulo de fieira (15°) de aproximadamente $75\ \mu\text{m}$ e para a amostra com ângulo de fieira de 20° este valor aproxima-se de $60\ \mu\text{m}$. Isto pode se justificar pelo processo de trefilação, o qual por exercer maiores forças na amostra com ângulo de fieira 20° acaba causando um endurecimento por deformação próximo a superfície desta amostra, conseqüentemente, a deformação posterior destes grãos até a sua ruptura será menor se comparada com uma amostra que não obteve endurecimento prévio similar.

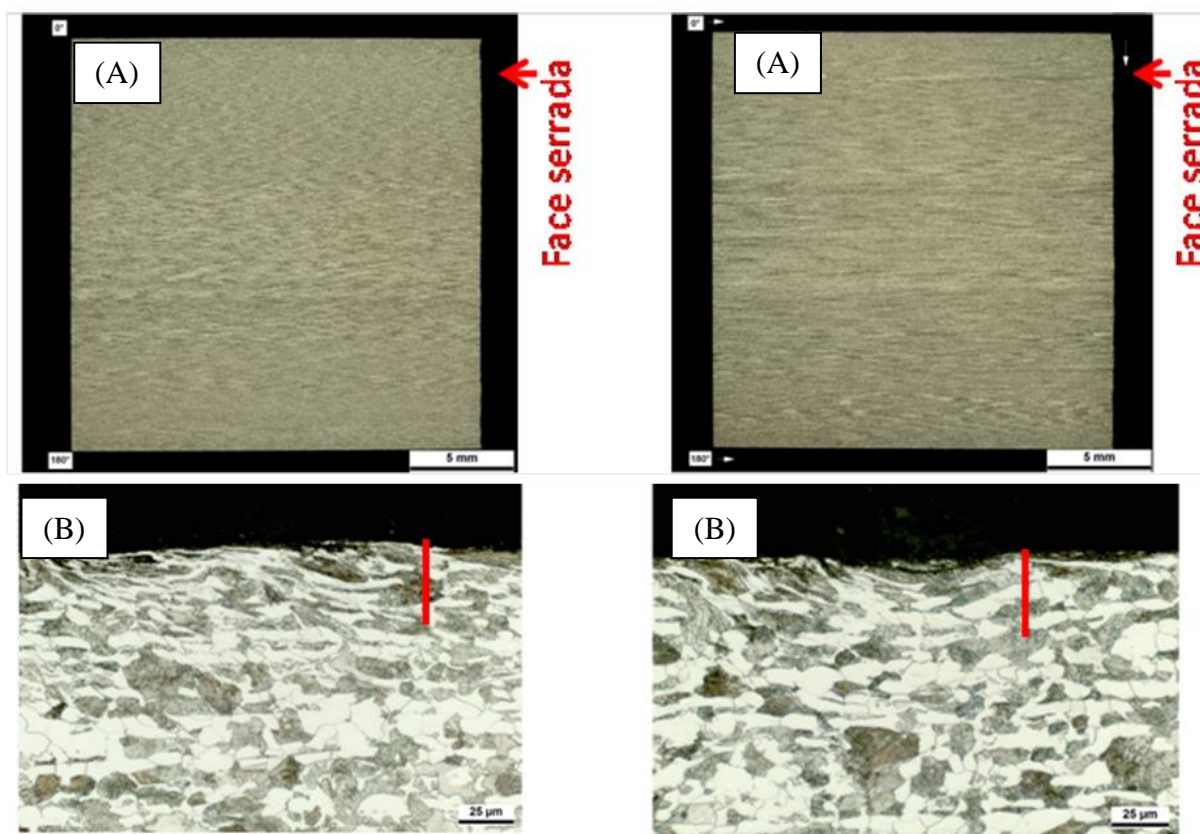


Figura 4.3. Secções longitudinais das amostras no lado serrado. (A) Fieira de 15° e (B) fieira de 20° .

A Figura 4.3 mostra a secção longitudinal das amostras serradas bem como uma região próxima à superfície cortada para os dois ângulos de fieira 15° (A) e 20° (B). Nelas se observa que a deformação de grão ocorre de forma menos severa e por uma região

significativamente menor, em torno de 30 μm na amostra com ângulo de trefilação de 15° e aproximadamente 40 μm na amostra com ângulo de trefilação de 20°. Neste caso, as amostras observadas com um maior aumento indicam uma maior deformação nas amostras com maior ângulo de trefilação (20°), isto pode ser justificado também pelo aumento da dureza neste material, que neste tipo de corte acaba por exigir uma maior força da serra de corte, acabando originando maiores deformações neste material.

4.2. Perfis de microdureza

Representou-se para as amostras da região central da barra por gráficos das médias das microdurezas em relação a sua posição através de uma linha de medição, conforme se descreveu no capítulo de procedimentos experimentais. A Figura 4.4 apresenta as distribuições dos perfis de microdureza na amostra com ângulo de trefilação de 15°, Já a Figura 4.5 apresenta a representação dos mesmos resultados para a amostra trefilada com ângulo de 20°. Estes resultados são considerados da região central da barra, a qual não sofreu influencia de nenhum dos tipos de cortes utilizados. Através delas podem ser observados os efeitos do encruamento próximos à superfície, este efeito inclusive é menos expressivo na amostra que passou pelo processo de trefilação com ângulo 15°, pois a mesma envolve menores tensões.

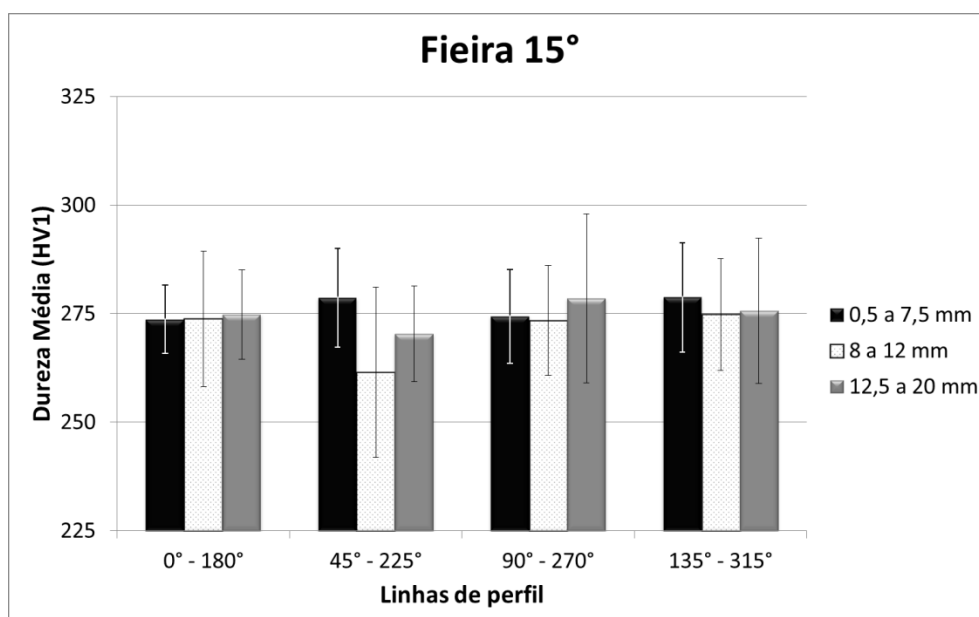


Figura 4.4. Perfis de microdureza média na amostra com ângulo 15°.

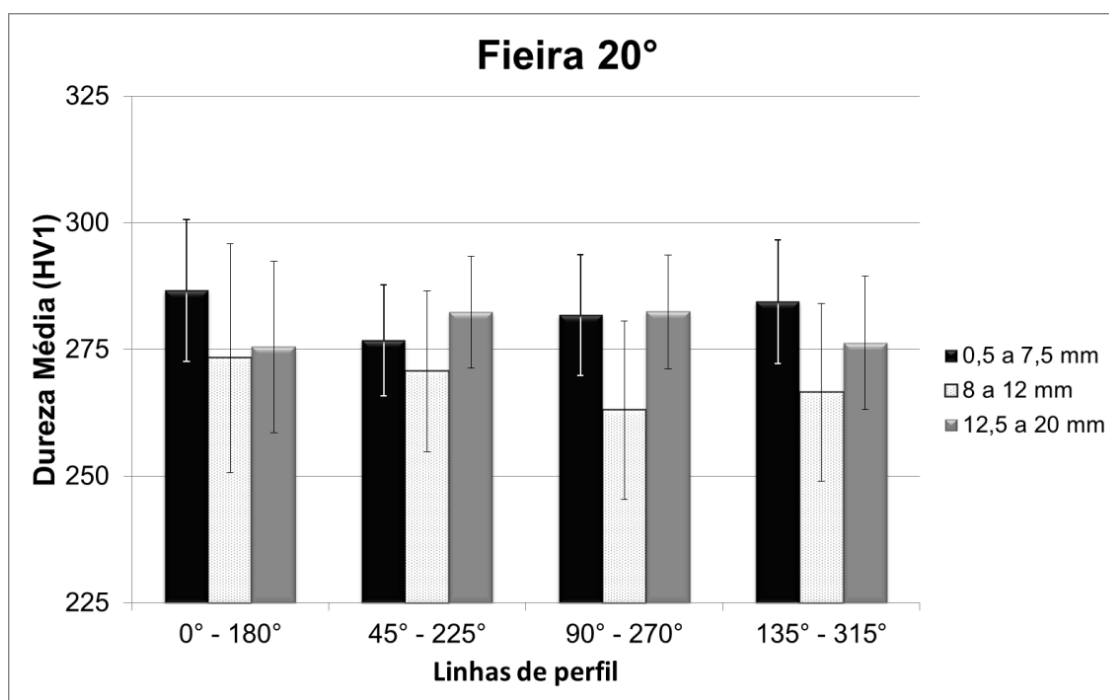


Figura 4.5. Perfis de microdureza média na amostra com ângulo 20°.

A Figura 4.6 apresenta as linhas de dureza medidas nas regiões demonstradas na Figura 3.8 b (procedimentos experimentais) para a amostra cisalhada com ângulo de fieira de 20° (2b) e a Figura 4.7 apresenta os resultados para a amostra cisalhada com ângulo de fieira de 15° (5b).

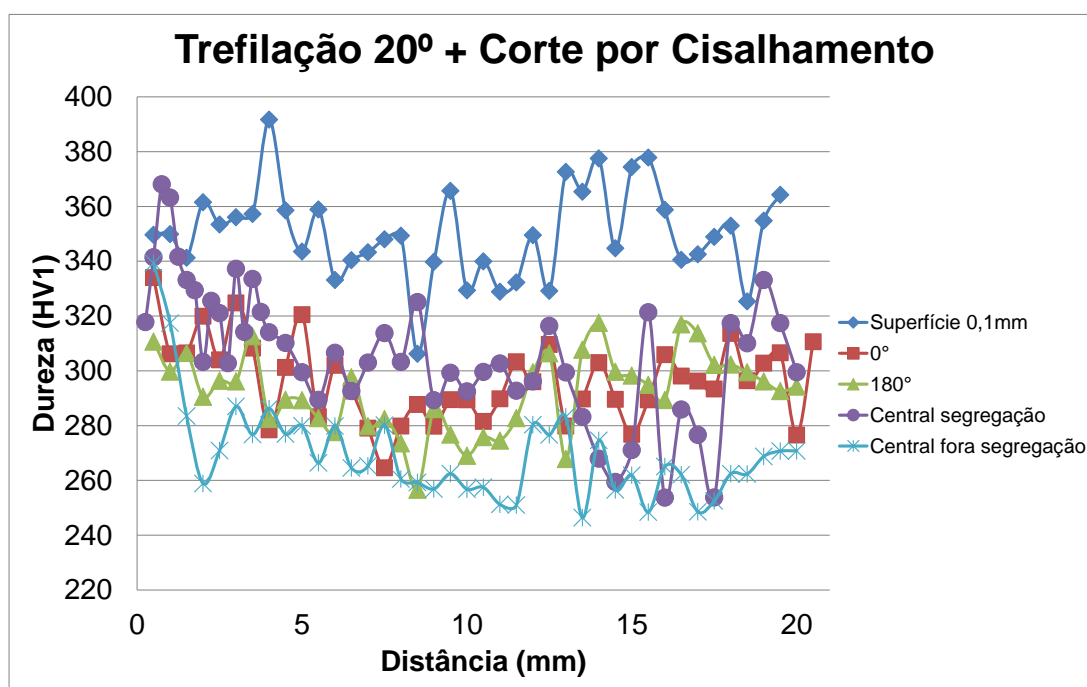


Figura 4.6. Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada por cisalhamento com ângulo de fieira de 20°.

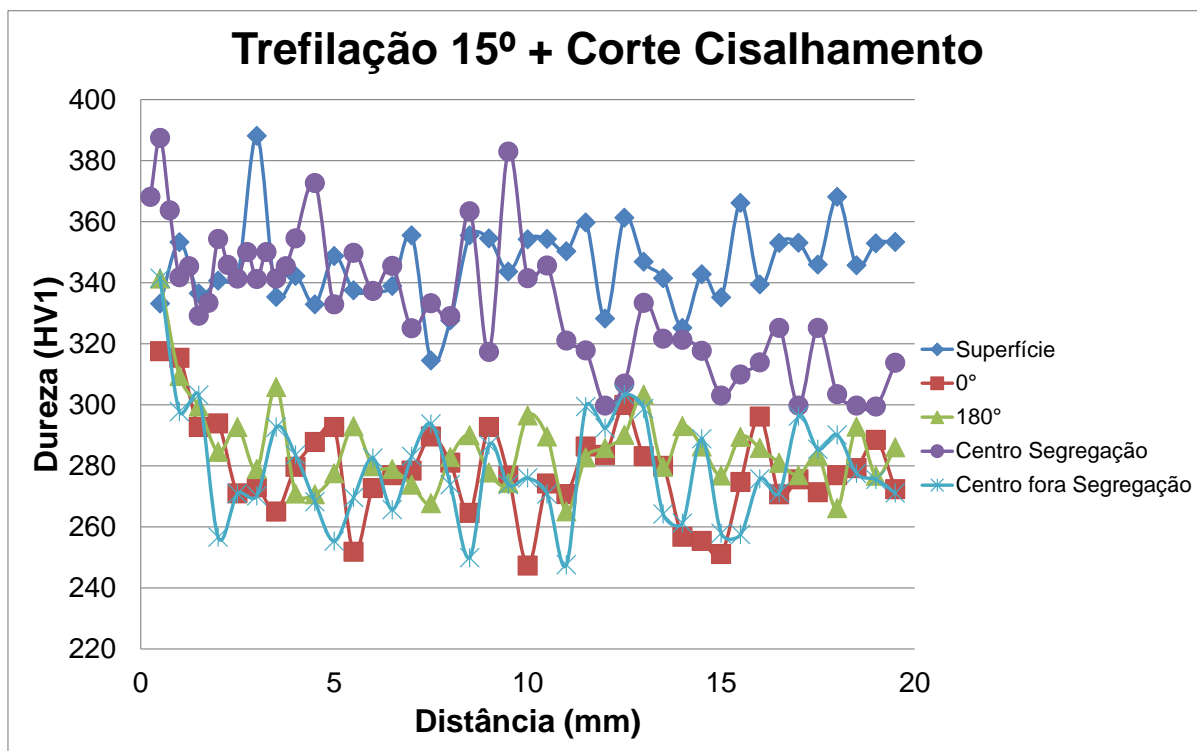


Figura 4.7. Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada por cisalhamento com ângulo de feira de 15°.

Verificaram-se em ambas as faces cortadas por cisalhamento, elevados valores de dureza superficial. Já na amostra com o ângulo de feira de 15° (5b) pode-se observar também elevada dureza na região de segregações, região esta medida após os resultados observados nas regiões centrais das amostras serradas apresentaram resultados anormais, variações muito grandes entre os picos de microdureza, com isto chegou-se a conclusão de que as segregações estavam influenciando diretamente nos resultados e, portanto, para as amostras com corte cisalhante medidas posteriormente, a região central foi dividida em duas: em cima das segregações e ao lado delas. Torna-se bastante evidente na observação dos resultados a diferença entre as durezas medidas entre a região central com segregações e na região sem.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os perfis de dureza medidos nas amostras serradas e com ângulos de feira de 20° (2a) e 15° (5a) respectivamente.

Também se verificou a oscilação, descrita anteriormente, na região central das amostras, principalmente na Figura 4.9, que representa a amostra com ângulo de feira de 15°, o qual apresentou uma região central com mais segregações.

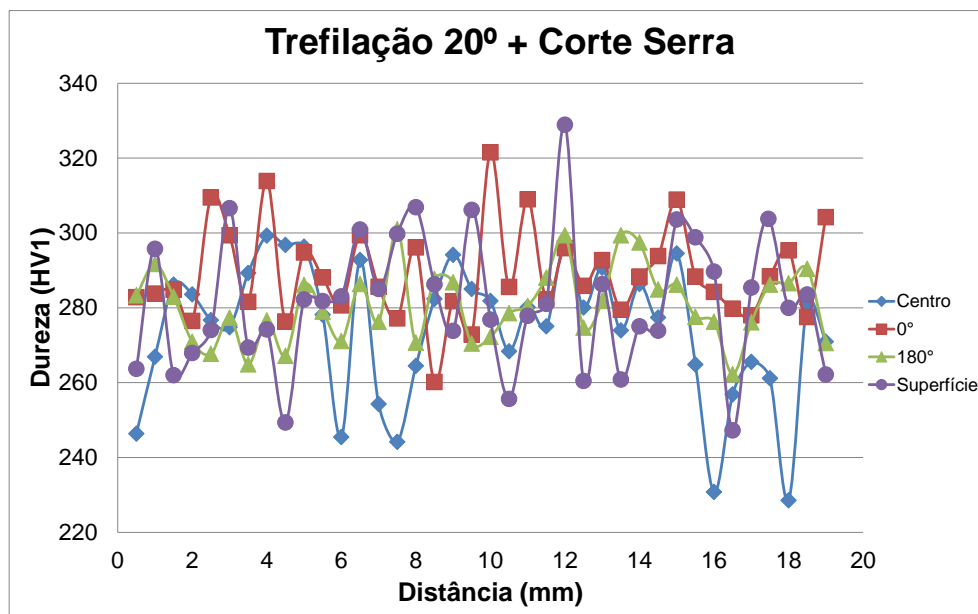


Figura 4.8. Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada com serra utilizando-se o ângulo de feira de 20°.

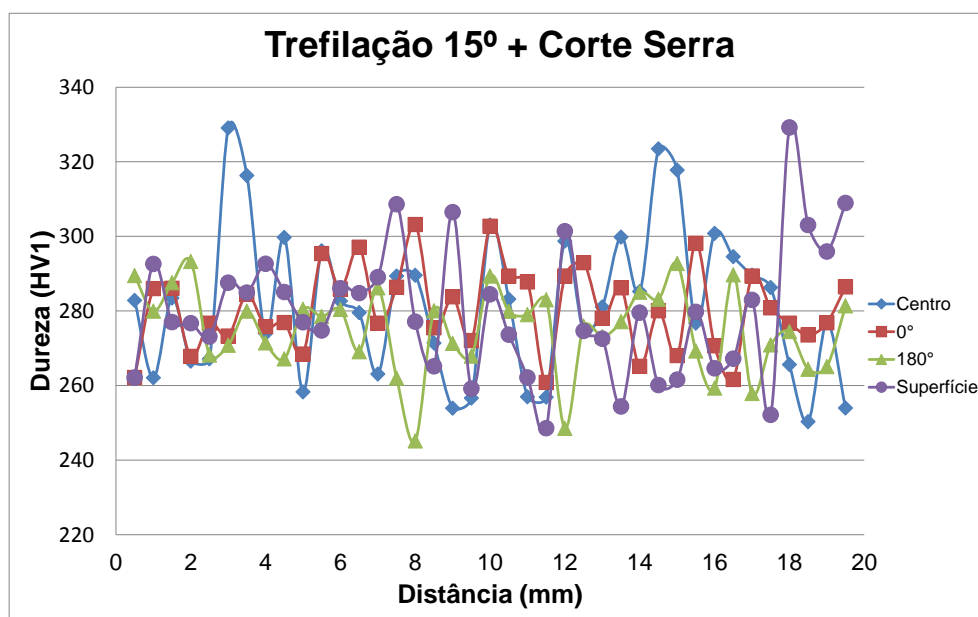


Figura 4.9. Perfil de microdureza das diferentes regiões de análise na amostra cortada com serra utilizando-se o ângulo de feira de 15°.

4.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização com MEV apresentou os seguintes resultados apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11. As imagens das amostras com diferentes ângulos de trefilação não

apresentaram variações significativas em relação às apresentadas a seguir, portanto serão disponibilizadas em anexo ao trabalho. Para a amostra cortada por serra (Figura 4.11), pode ser observada uma superfície com um acabamento muito semelhante ao longo de toda a superfície. É possível também observar os riscos realizados pela serra durante o corte, demonstrando uma inclinação em relação ao ângulo 0° , tal inclinação foi explicada anteriormente no capítulo de procedimentos experimentais. Para a amostra de corte cisalhante (Figura 4.10) é possível identificar as quatro principais zonas formadas durante o corte: (a) Zona de arredondamento, (b) zona cisalhada, (c) Zona fraturada e (d) Empenamento. É importante salientar que conforme informado na parte de procedimentos experimentais as amostras cisalhadas foram observadas em nove pontos, conforme explicado, e que os pontos apresentados no presente trabalho representam as zonas características de um corte do tipo cisalhante.

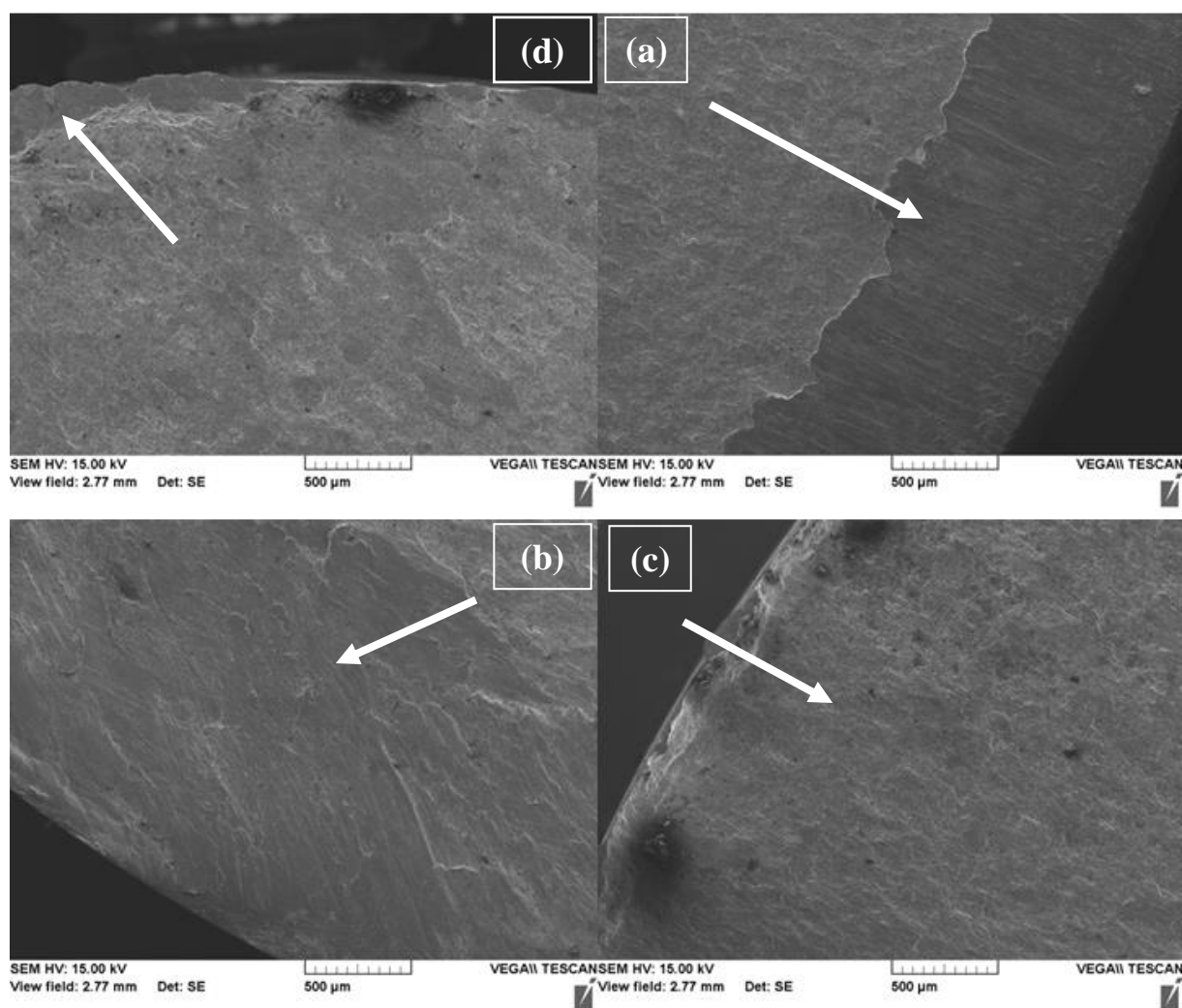


Figura 4.10. Fractografias em MEV da amostra com ângulo de trefilação de 20° e corte cisalhante.

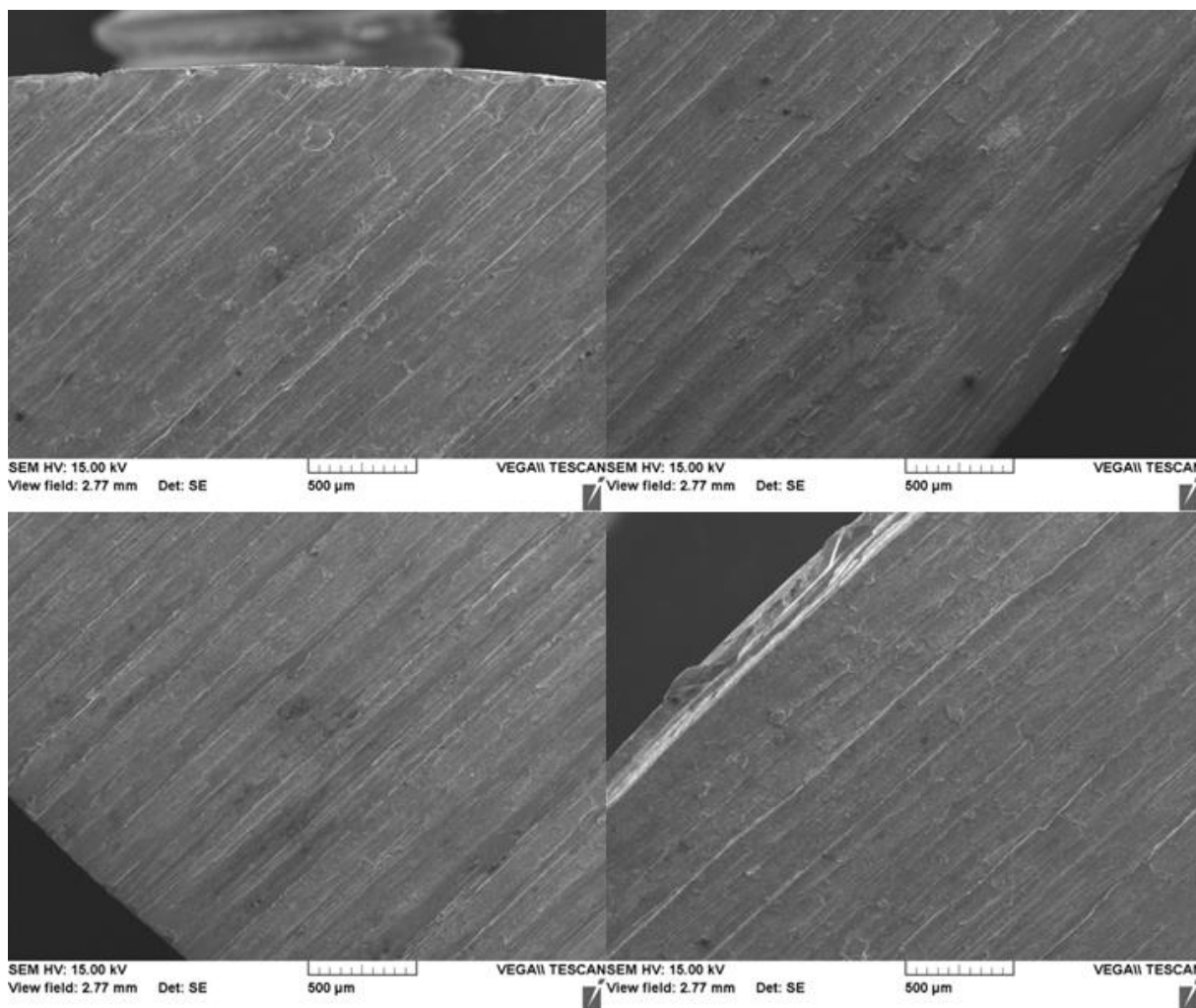


Figura 4.11. Imagens obtidas através de MEV da superfície da amostra com ângulo de trefilação de 20° e corte abrasivo.

4.4. Tensões Residuais

Os resultados de tensões residuais tiveram como origem as análises dos gráficos de intensidade de sinal obtidos através da técnica de difração de raios-X. Tal análise é feita pelo método de $\text{sen}^2 \Psi$ para obtenção do pico (FRY et al 2002). Obteve-se um valor médio por ponto medido e seu respectivo desvio padrão.

Todos os resultados das medições serão apresentados para os diferentes tipos de cortes e diferentes ângulos de trefilação anteriores ao corte. Os valores dos desvios padrões se apresentam somente com os gráficos das medições circulares próximos a superfície, pois para o restante dos gráficos apresentados a adição dos mesmos dificultaria a interpretação e identificação dos diferentes pontos de medição.

Todos os resultados presentes neste subtítulo seguem a metodologia estabelecida no capítulo de procedimentos experimentais e são apresentados para as amostras cisalhadas, conforme ângulo de trefilação (20° e 15° respectivamente), e posteriormente as amostras serradas, também seguindo a ordem dos ângulos de trefilação (20° e 15° respectivamente).

A Figura 4.12 representa a distribuição de tensões residuais superficiais a uma distância de 2 mm da face cortada para os oito ângulos de referência medidos na amostra cisalhada e trefilada com ângulo de 20° . Pode-se observar uma considerável redução das tensões residuais compressivas entre os ângulos de 90° e 135° .

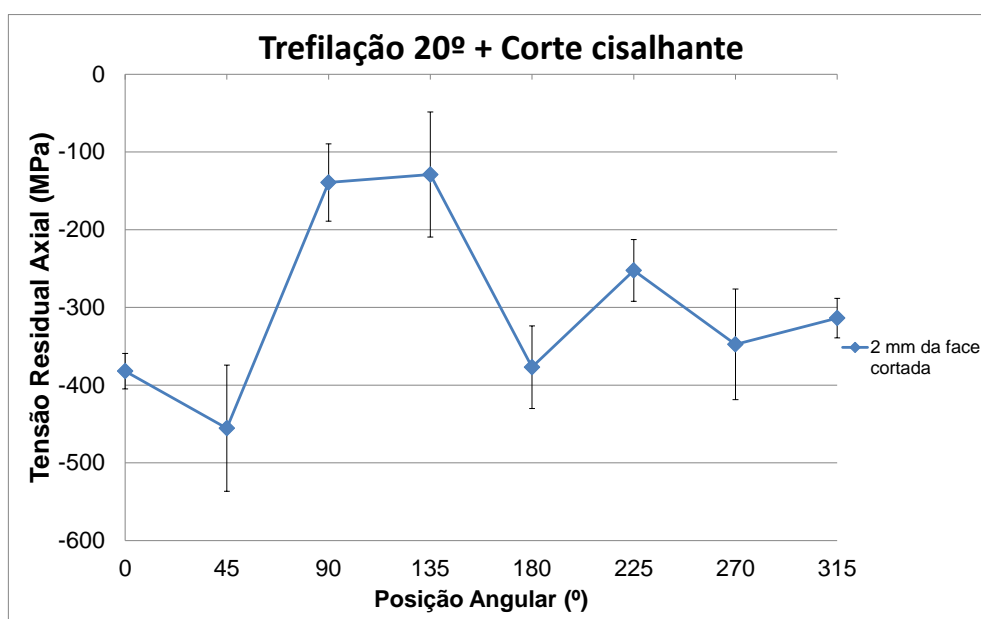


Figura 4.12. Distribuição de tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da face cortada.

A Figura 4.13 apresenta os perfis lineares para os diversos ângulos de medição. Neste gráfico é mais evidente a variação observada anteriormente, onde há um aumento das tensões compressivas logo após a região superficial, seguido de uma grande redução próxima a 20 mm de distância da superfície e se encaminha para uma estabilização após 35 mm.

A Figura 4.14 apresenta um perfil semelhante ao mostrado na Figura 4.12 (tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da superfície de corte), apenas sem a elevada redução nas tensões residuais compressivas entre os ângulos 90° e 135° .

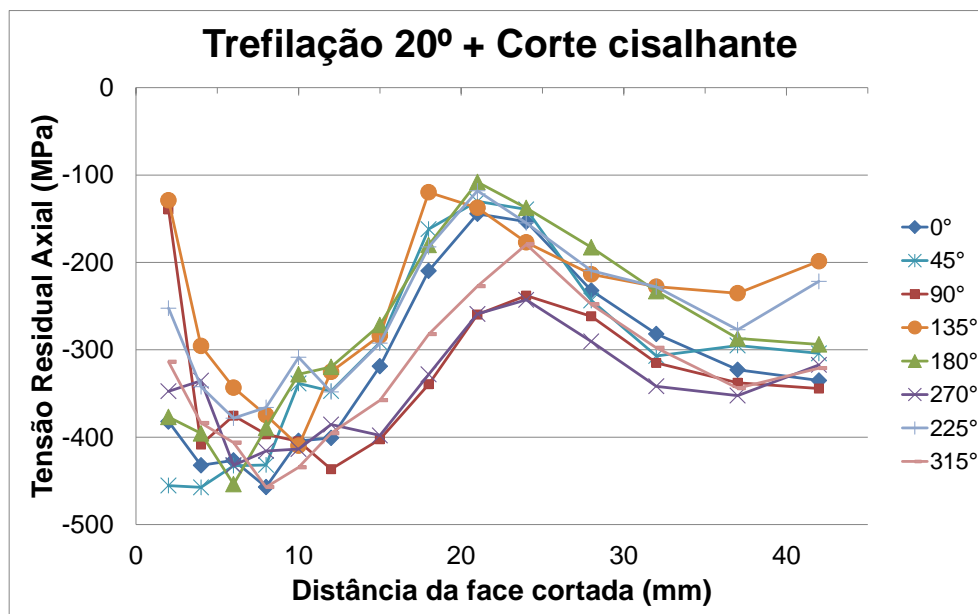


Figura 4.13. Perfil de tensões residuais ao longo da superfície da barra para os 8 ângulos de referência.

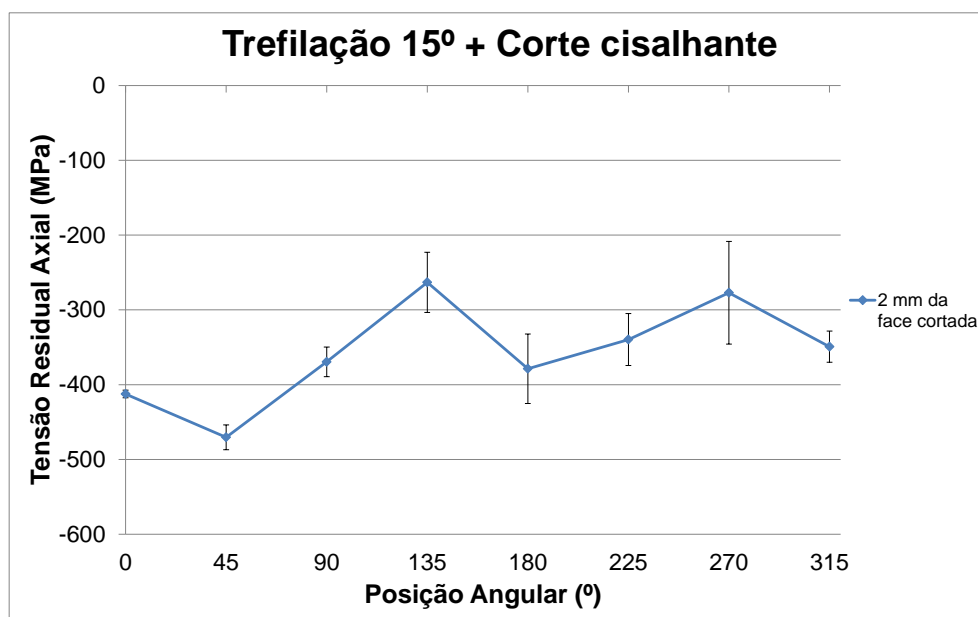


Figura 4.14. Gráfico da distribuição de tensões residuais a 2 mm de distância da superfície da amostra com trefilação 15° e corte cisalhante.

A Figura 4.15 apresenta os perfis lineares para os diversos ângulos de medição na amostra cisalhada com ângulo de fiara 15° (S4b). Neste gráfico é observada uma variação menor do que o equivalente para a amostra cisalhada e com ângulo de fiara de 20° (S1b), observada na Figura 4.14. Ambos os gráficos apresentam também uma variação semelhante para os ângulos opostos (0°-180° e 90°-270°) após 15 mm de distância do corte.

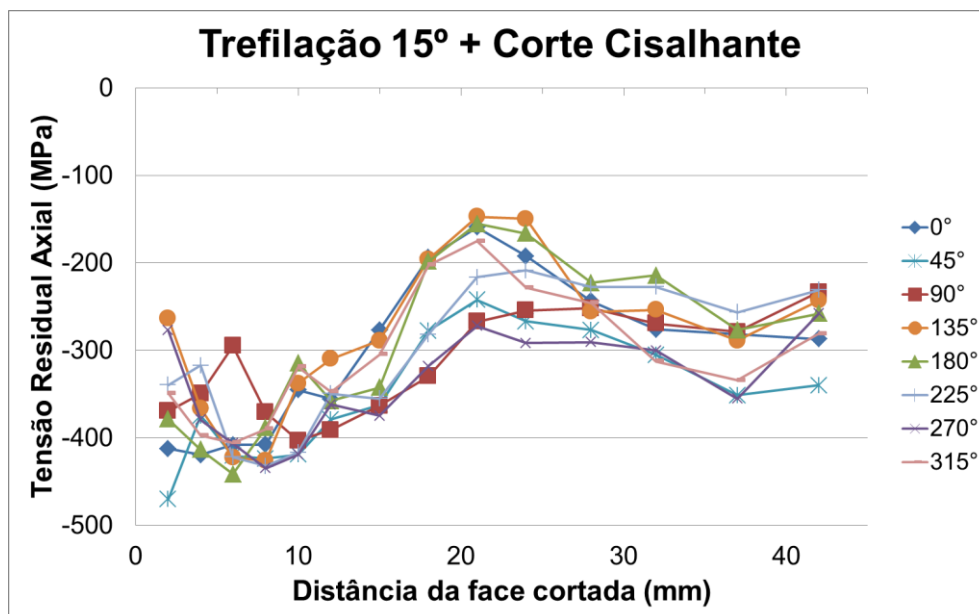


Figura 4.15. Perfil de tensões residuais ao longo da superfície da barra para os 8 ângulos de referência.

A Figura 4.16 apresenta a variação de tensões residuais a dois (02) milímetros de distância da superfície cortada através do uso de serra-fita com a barra trefilada com ângulo de 20°. Pode-se observar uma variação máxima de aproximadamente 100 MPa entre os ângulos medidos, acredita-se que esta variação deva-se mais ao processo anterior de corte do que possíveis variações neste processo.

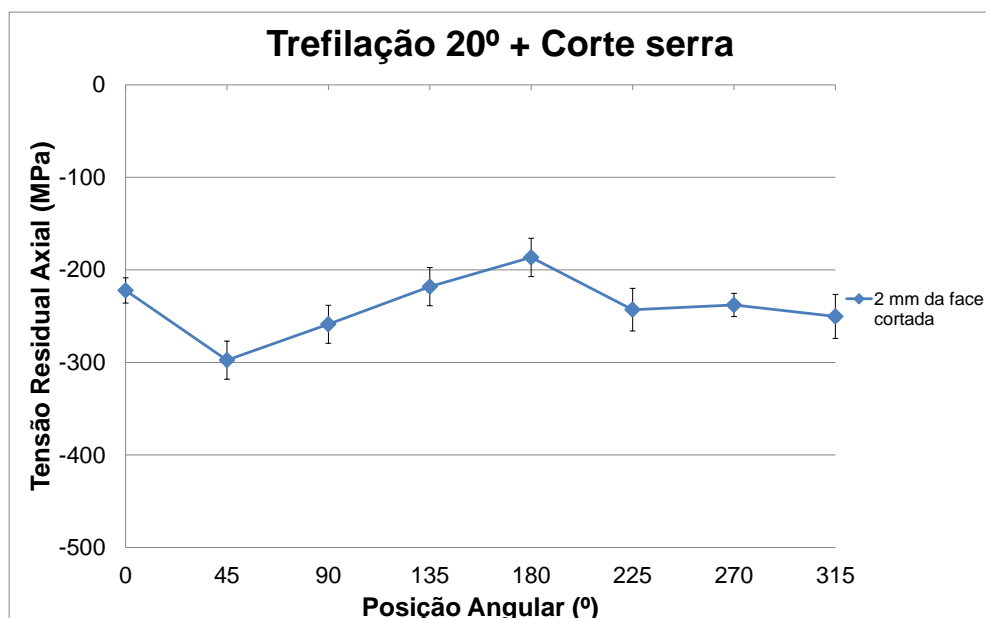


Figura 4.16. Perfil de tensões residuais superficiais próximas a região cortada com serra e ângulo de trefilação 20°.

A Figura 4.17 apresenta o perfil linear das tensões residuais superficiais medidas a partir de 2 mm de distância da superfície cortada com uso de serra-fita e ângulo de trefilação de 20°. Nela é possível observar um pequeno alívio de tensões próximo a superfície de corte.

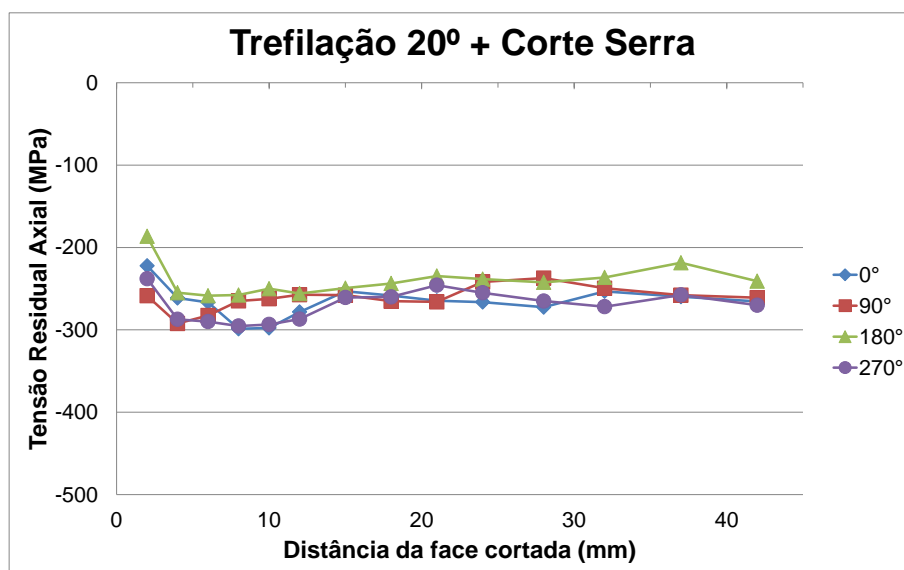


Figura 4.17. Medições lineares para os 4 principais ângulos de referência na amostra cortada com serra e trefilação de 20°.

A Figura 4.18 apresenta a variação de tensões residuais a dois (02) milímetros de distância da superfície cortada através do uso de serra-fita com a barra trefilada com ângulo de 15°. Assim como na amostra trefilada com ângulo de 20°, pode-se observar uma variação máxima de aproximadamente 80 MPa entre os ângulos medidos.

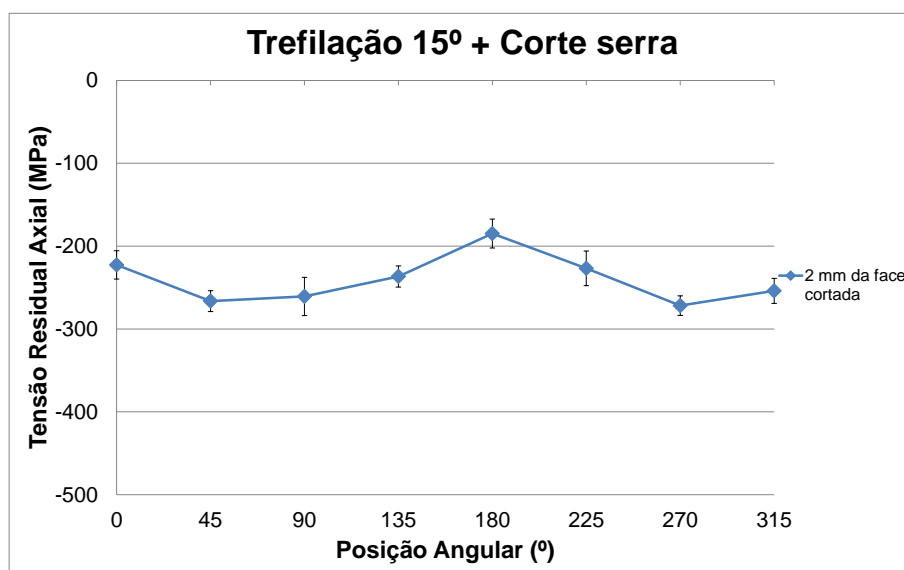


Figura 4.18. Perfil de tensões residuais superficiais próximas a região cortada com serra e ângulo de trefilação 15°.

A Figura 4.19 apresenta o perfil linear das tensões residuais superficiais medidas a partir de 2 mm de distância da superfície utilizando-se de serra-fita e ângulo de trefilação de 15°. Observa-se um pequeno alívio de tensões próximo a superfície de corte apenas para dois ângulos de medição. Nota-se também uma queda nas tensões residuais próximos a distância de 10 mm da superfície de corte, que pode ser justificada por uma possível heterogeneidade nos processos anteriores ao corte.

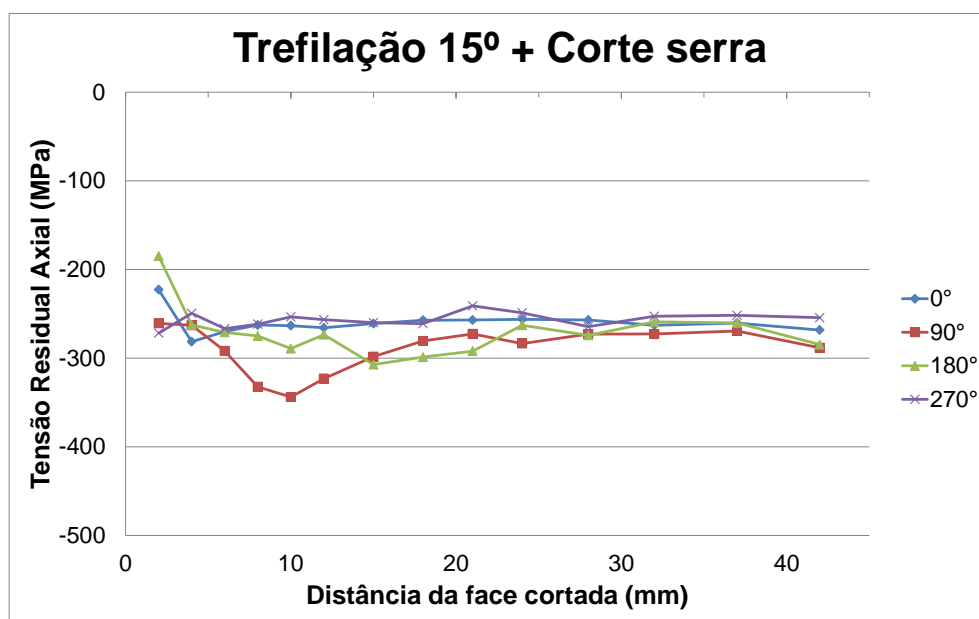


Figura 4.19. Medições lineares para os 4 principais ângulos de referência na amostra cortada por cisalhamento com trefilação de 15°.

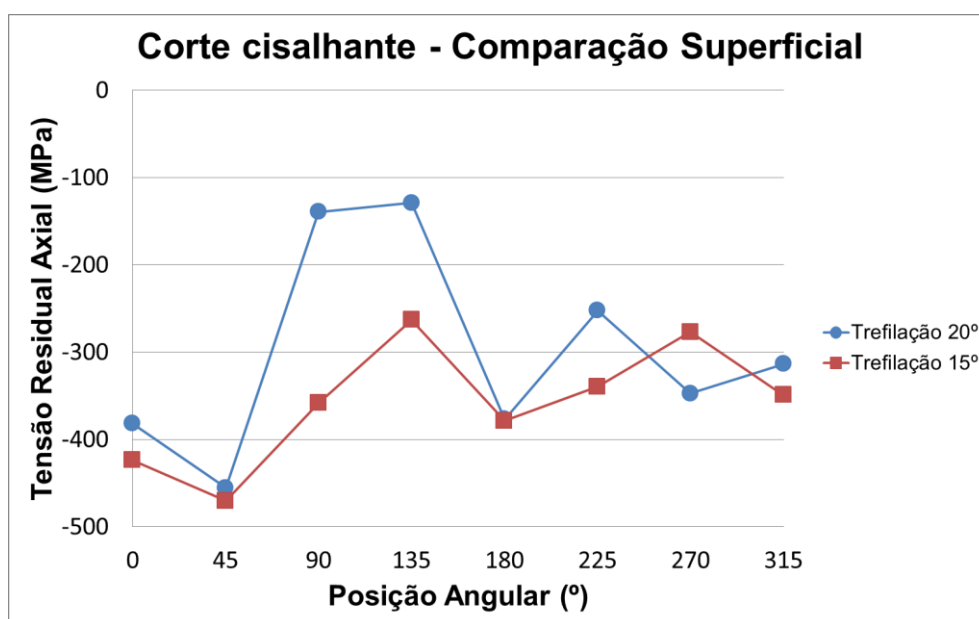


Figura 4.20. Gráfico comparativo entre as tensões residuais superficiais na região próxima a face cortada através do corte cisalhante.

A Figura 4.20 apresenta uma comparação entre as distribuições das tensões residuais próximas a superfície das amostras cisalhadas, onde se observa que ocorre uma maior amplitude na variação das tensões residuais superficiais na amostra trefilada com ângulo de feira de 20°.

5.0 DISCUSSÃO GERAL

5.1 Metalografia

As análises iniciais apontam um maior refino de grão nas amostras trefiladas com maior ângulo de trefilação, ou seja, 20°. Este efeito é justificado pelo fato de maiores deformações de grão decorrentes de um processo que necessita de maiores forças para a conformação do material (SOUZA 2011). Não se observa diferenças nas regiões centrais das amostras, pois este processo de trefilação envolve apenas deformações próximas à superfície das barras, devido a redução de secção de apenas 1,25 mm.

As análises metalográficas mostram também que há uma considerável diferença em termos de deformação de grão, comparando os diferentes processos de corte e ângulos de trefilação. Principalmente para o corte cisalhante que apresenta uma variação considerável entre os ângulos de trefilação e em comparação com o corte abrasivo. Tal variação pode ser justificada pelo próprio processo de trefilação, o qual para um ângulo de 20° apresenta uma maior força e, conseqüentemente, um maior endurecimento por encruamento, provado pelas análises de microdurezas. Este maior encruamento leva a uma menor deformação do grão no corte cisalhante, alcançando uma ruptura antes se comparando com o mesmo processo para o ângulo de 15°, o qual necessita menores forças de deformação e, conseqüentemente, menor encruamento. Já para o corte com o uso de serra, essa diferença entre os ângulos de trefilação apesar de menor está presente também. Comparando-se as microestruturas oriundas de cada processo de corte a diferença nas deformações de grão é bastante visível e justificada pelo próprio método de corte, conforme Figura 5.1. As deformações observadas no corte por cisalhamento chegam a até setenta e cinco (75) μm da superfície, enquanto para o corte abrasivo as mesmas chegam a no máximo a quarenta (40) μm .

É possível afirmar também que foram encontradas segregações no centro das barras, independente de processo, pois as mesmas são oriundas do processo de fabricação do aço (lingotamento contínuo). Isto pode ser prejudicial para o comportamento das barras com relação ao potencial de distorção (ROCHA 2012). Os efeitos metalográficos descritos aqui

podem ser confirmados pelos resultados das análises de microdurezas e serão discutidos no subtítulo 5.2.

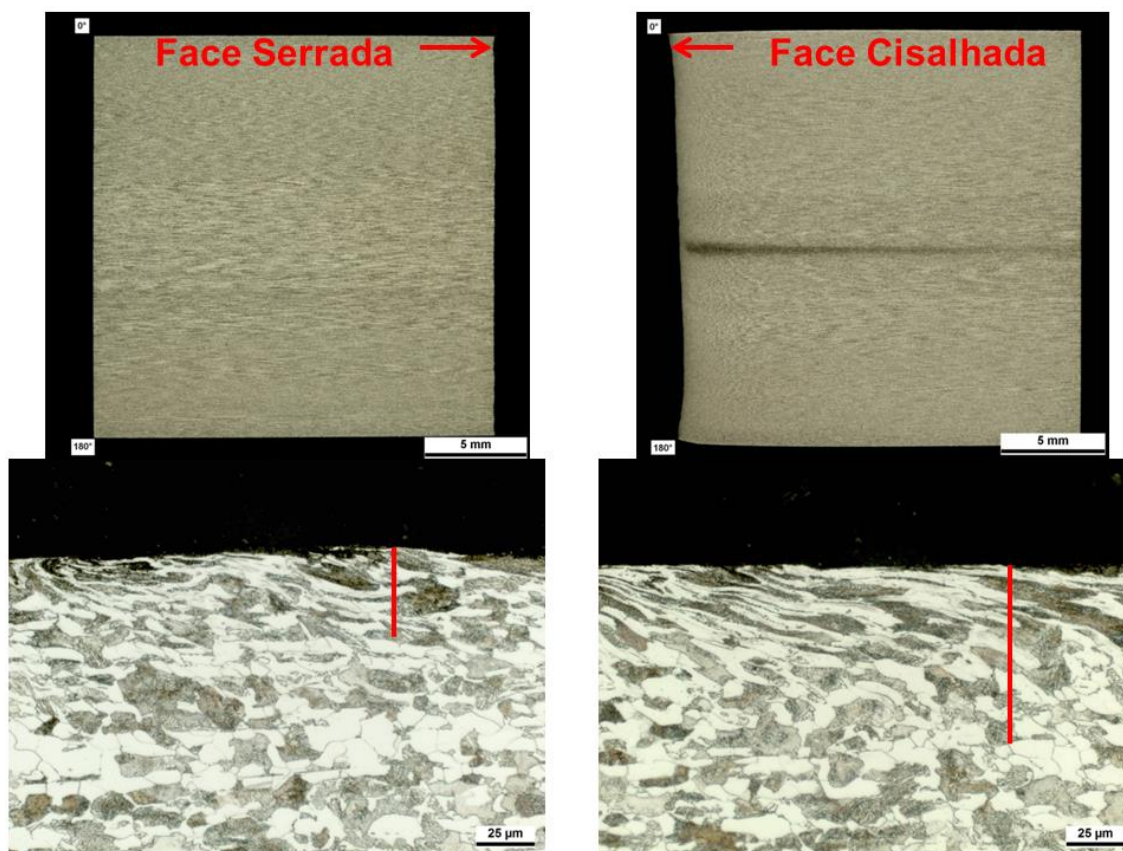


Figura 5.1 Comparação entre as metalografias das diferentes superfícies de corte para a amostra com ângulo de trefilação de 15°;

5.2 Microdureza

Os resultados de microdurezas, conforme citado anteriormente, explicam diversos comportamentos esperados e encontrados nas barras devido aos processos tanto de corte como de trefilação a qual as mesmas foram submetidas. A comparação entre as durezas médias obtidas nas regiões próximas às superfícies, as quais podem ser observadas nas Figuras 5.2 e 5.3 (durezas médias das amostras cisalhadas), revelam que as deformações plásticas a qual as barras cortadas por cisalhamento são submetidas aumentam consideravelmente a dureza superficial das mesmas, independente de qual processo de trefilação à barra foi submetida anteriormente, estes valores giram em torno de 350 HV1 (± 17 HV1). Tais valores podem representar maiores dificuldades no processo subsequente de usinagem, pois a elevada dureza aumenta o desgaste do ferramental.

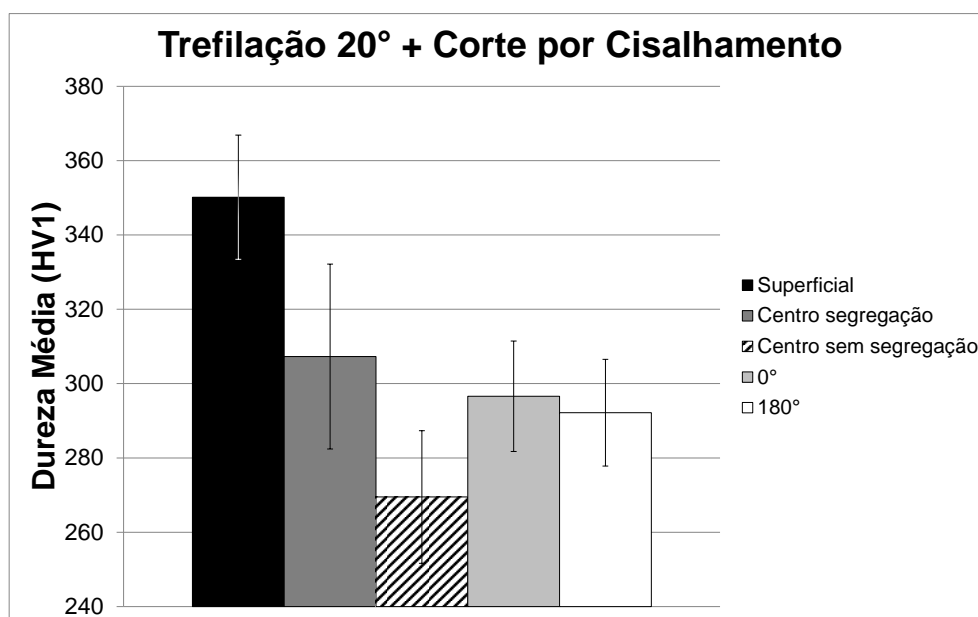


Figura 5.2. Durezas médias dos perfis medidos na amostra cisalhada com ângulo de trefilação de 20°.

Também é possível comentar sobre as médias de durezas obtidas nas regiões próximas aos ângulos 0° e 180° para os diferentes ângulos de fieira, no qual é visível as influencias citadas anteriormente do maior ângulo no endurecimento por encruamento das áreas próximas a superfície de trefilação no ângulo de fieira de 20°. Elas apresentam durezas médias maiores se comparadas com as mesmas regiões com menor ângulo de fieira.

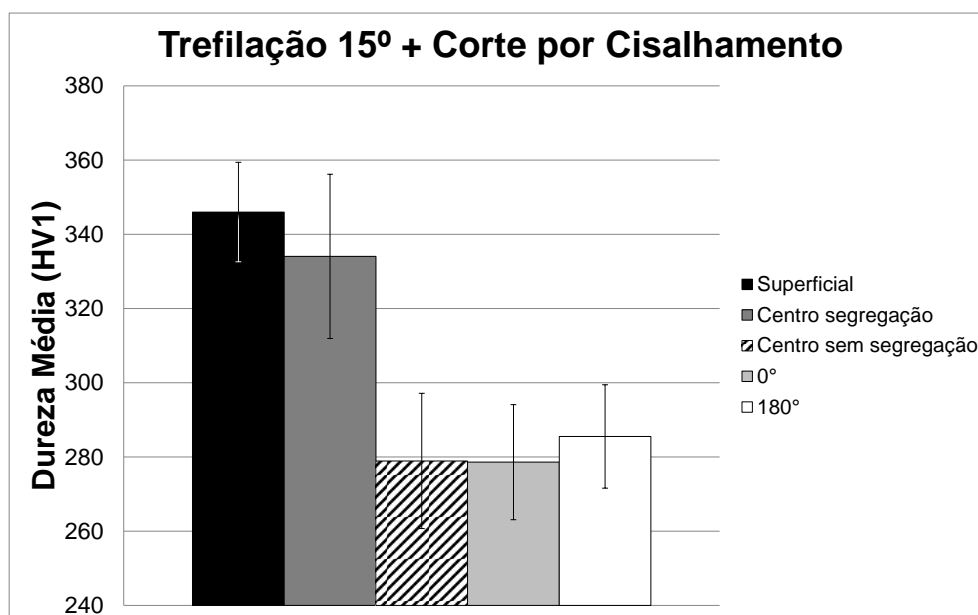


Figura 5.3. Durezas médias dos perfis medidos na amostra cisalhada com ângulo de trefilação de 15°.

Nas regiões centrais para as barras cortadas com serra (Figuras 5.4 e 5.5) o fato da presença de segregações nestas regiões não foi levado em conta na realização dos ensaios de dureza. Portanto, suas durezas médias se apresentam um pouco maiores que comparadas às durezas nas regiões centrais fora das segregações, medidas nas amostras cortadas por cisalhamento. E com relação as durezas próximas a região cortada, é possível verificar que esse tipo de corte não apresenta grande influência na dureza obtida.

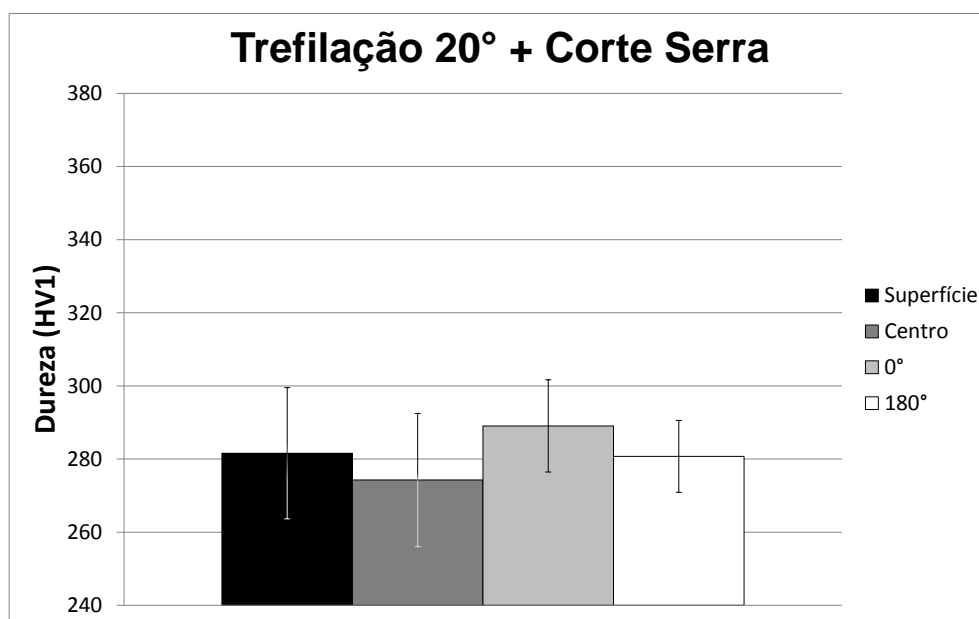


Figura 5.4. Durezas médias para os perfis medidos na amostra serrada com ângulo de trefilação de 20°.

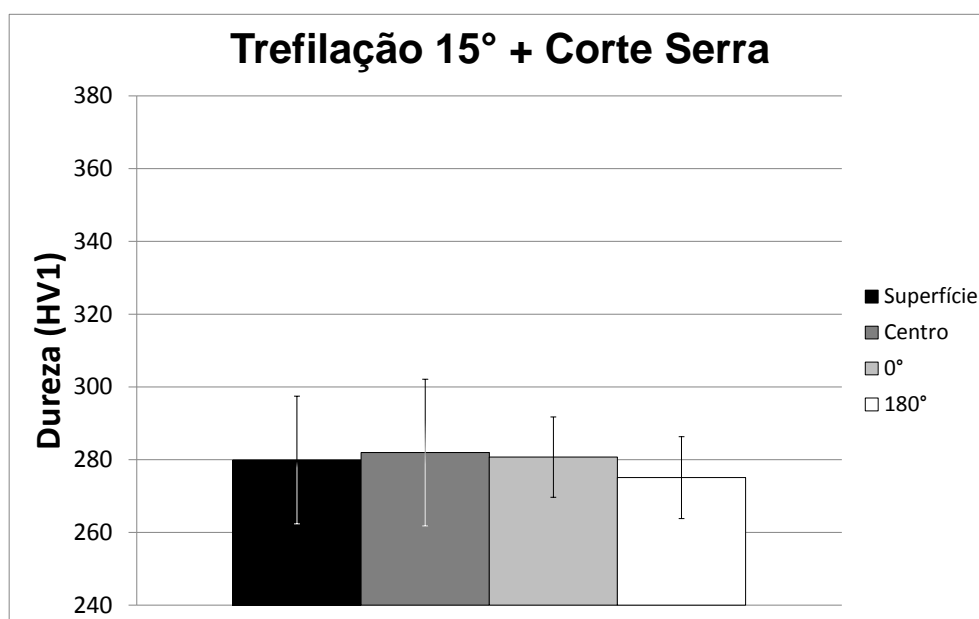


Figura 5.5. Durezas médias para os perfis medidos na amostra serrada com ângulo de trefilação de 15°

A Figura 5.6 apresenta uma comparação entre as durezas médias superficiais em todas as amostras medidas. Ao serem observadas pode-se concluir que o processo de corte cisalhante tem uma influência significativa no aumento da dureza superficial independente do ângulo de feira ao qual a mesma foi submetida. Para as amostras serradas, não foi possível observar nenhum aumento na dureza devido ao processo de corte.

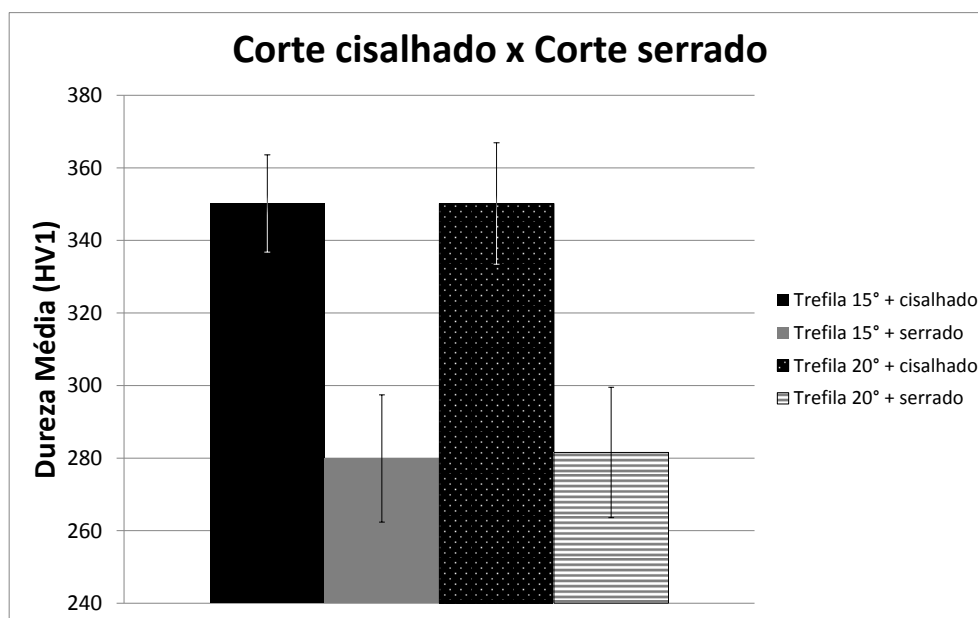


Figura 5.6. Comparação entre as durezas médias próximas as superfícies cortadas.

5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A avaliação das superfícies de corte através da microscopia eletrônica de varredura se apresenta conforme esperado, uma superfície mais homogênea para a amostra cortada com serra e uma superfície mais rugosa para a amostra cortada por cisalhamento. A amostra cisalhada possibilita também uma visualização de quatro zonas características para este tipo de corte, descritas pela literatura.

Observa-se também o ângulo formado pelas ferramentas de corte, tanto cisalhante quanto abrasiva, com relação a orientação de 0° da barra. No corte abrasivo ocorre uma pequena angulação, descrita anteriormente, observada como os riscos na amostra. Já para o corte cisalhante, observa-se o ângulo de entrada da navalha (entre os ângulos de medição de 90° e 135°, conforme demonstrado na Figura 5.5) através da zona de arredondamento, também conhecida como a zona de penetração da navalha.

Faz-se necessário um esclarecimento sobre os ângulos apresentados anteriormente e como de referência e os apresentados neste resultado. Como a amostra utilizada para o corte

cisalhante utilizou-se da parte final de uma barra, conforme descrito no capítulo de procedimentos experimentais, a sua vista frontal apresenta os ângulos de forma oposta ao descrito como de referência.

5.4 Tensões Residuais

A comparação entre as tensões residuais superficiais (Figura 5.8.) nas regiões superficiais próximas a região de corte mostram principalmente os efeitos do corte cisalhante e dos diferentes ângulos de trefilação. Quanto ao corte cisalhante, é possível também verificar na amostra 1b (20°) que a posição de entrada da lâmina de corte (entre os ângulos de medição de 90° e 135°) influencia diretamente na tensão residual apresentada. Isto pode ser verificado pela Figura 5.7. Este fato é mais evidente na amostra 1b (20°), pois a mesma possui maiores tensões residuais internas devido ao ângulo de trefilação conforme o fator Δ .

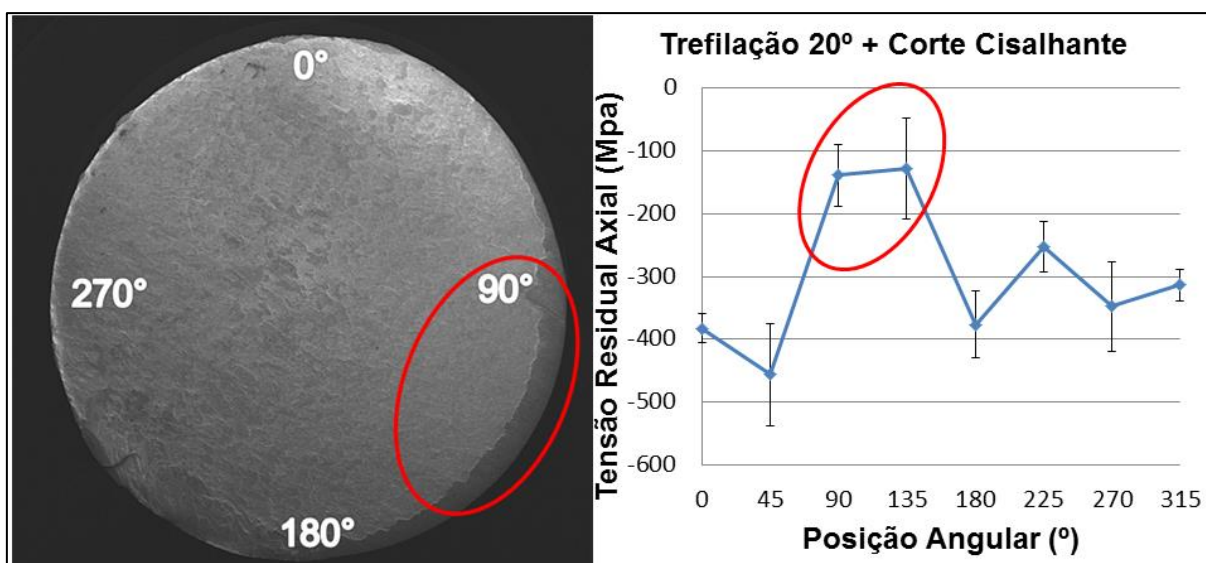


Figura 5.7. Comparação entre MEV da superfície cortada por cisalhamento (trefilação de 20°) e resultado de tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da superfície cortada.

Utilizou-se de gráficos circulares para as comparações superficiais e longitudinais em diversos ângulos para as comparações ao longo da amostra. A partir destes gráficos pode-se observar um comportamento semelhante entre as amostras com o mesmo tipo de corte (Cisalhante ou Abrasivo), variando apenas a influência do ângulo de fieira no comportamento entre elas. Para as amostras com o corte cisalhante, podem-se observar três (03) diferentes

zonas. A primeira, entre 0 e 12 mm, observa-se os efeitos diretos do corte cisalhante, variando os efeitos devido ao ângulo de entrada da lâmina de corte (conforme mostrado no capítulo resultados) . A segunda, entre 15 e 28 mm, observa-se o efeito da compensação das tensões, ou seja, com o aumento da compressão próximo a superfície ocorre uma tração nesta região. Isto pode ser exemplificado pelo comportamento da amostra com ângulo de fieira de 20° (1b), pois suas tensões compressivas próximas à superfície são maiores e suas tensões entre 18 e 28 mm são menores em comparação com a amostra com ângulo de fieira de 15° (4b). E a terceira, 28 a 42 mm, ainda observa-se os diferentes efeitos do corte, mas com uma tendência a uma aproximação das tensões nos diferentes ângulos de medição. Comparando-se diretamente as médias das tensões residuais superficiais nos cortes cisalhantes (Figura 4.20), observa-se também o efeito do ângulo de fieira na distribuição de tensões residuais após o corte, pois nota-se uma maior amplitude nas tensões residuais para a amostra com maiores deformações, fieira 20° (1b).

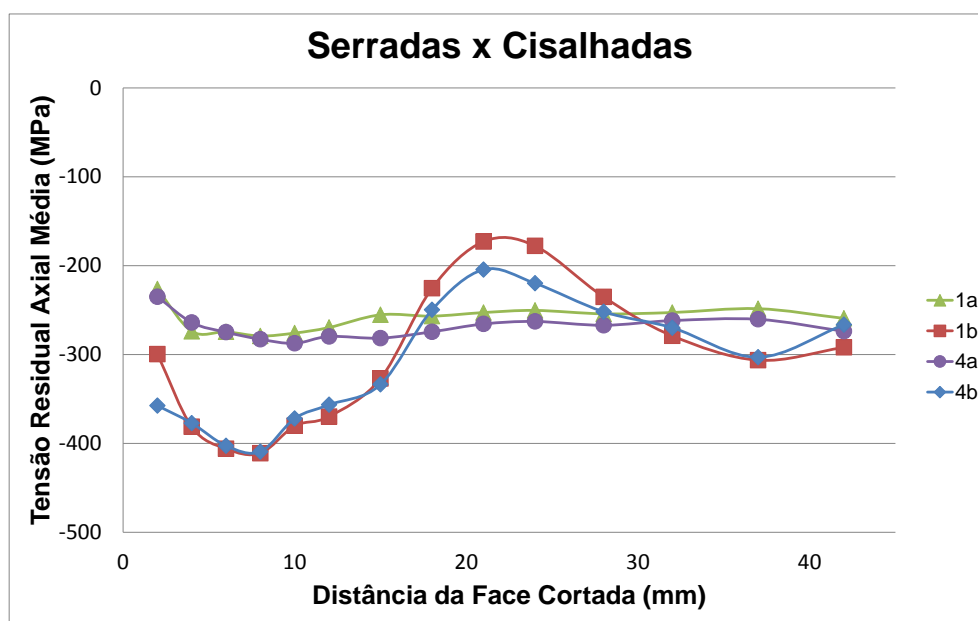


Figura 5.8. Comparação entre as tensões residuais médias observadas em cada amostra.

A comparação entre as tensões residuais medidas na zona próxima à superfície cortada através do corte com serra (a), mostra que a influência do corte, neste caso, é muito pequena, mas está presente. O gráfico apresentado na Figura 5.8 mostra as médias das tensões residuais medidas com estes cortes, e nele pode-se observar que uma possível influencia do método de corte se dá em no máximo 25 MPa em relação a média de tensões medida, portanto pode ser considerada quase nula, dada a magnitude das tensões envolvidas. Também é possível

verificar uma pequena diferença entre os processos de trefilação ao longo da distancia da superfície.

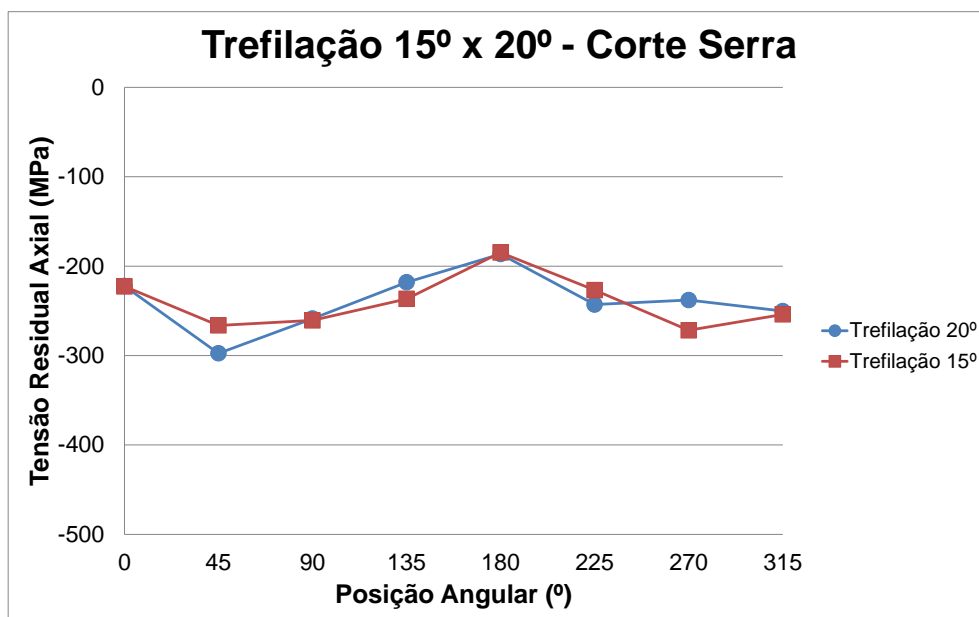


Figura 5.9. Gráfico comparativo entre os perfis de tensões residuais dos diferentes ângulos de trefilação para o corte com serra.

A Figura 5.9 apresenta uma comparação entre as médias de tensões residuais medidas e apresentadas ao longo deste trabalho. A análise das mesmas leva-se a conclusão da dimensão do tamanho da influência que o corte cisalhante possui em relação ao corte abrasivo. Este pequeno alívio de tensões próximo à superfície no corte abrasivo deve-se, provavelmente, ao fato de estar próximo da superfície livre do que ao processo de corte em si. Já para os cortes cisalhantes observa-se que apenas a 42 mm de distância da superfície cortada os efeitos do corte começam a se dissipar se comparados aos resultados das amostras serradas.

6.0 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados e discussão dos mesmos se apresentam neste capítulo as conclusões sobre o presente trabalho.

As deformações nos grãos oriundas do processo de corte observadas apresentam diferença de, aproximadamente, 50 μm entre os cortes cisalhados e os cortes abrasivos.

As medições de microdurezas permitiram observar uma elevada dureza na região próxima a superfície cortada por cisalhamento, o que pode ser prejudicial para um processo de usinagem (faceamento) posterior.

O corte cisalhante apresenta grandes variações nas tensões residuais superficiais, as quais ainda mostram valores significativos até 25 mm de distância da face cortada.

Até a distância máxima analisada de 42 mm foram encontradas heterogeneidades de aproximadamente 100 Mpa em termos de tensões residuais, que podem acarretar em problemas com distorções em processos futuros.

Com base na avaliação completa dos resultados apresentados neste trabalho é possível afirmar que o corte abrasivo, quando aplicado corretamente, se mostra uma técnica muito mais eficaz que o corte cisalhante, principalmente, em termos de tensões residuais.

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o perfil interno de tensões residuais através do uso da técnica de remoção química de camada e com o uso de técnicas complementares aos ensaios realizados no presente, como método do furo – cego e difração de nêutrons.

Realização de medições tridimensionais para avaliar as distorções resultantes dos processos de corte, combinado com uma usinagem (faceamento) na região afetada pelo corte (distorcida) em amostras dos diferentes cortes e avaliar as alterações em seus perfis de tensões residuais superficiais.

Aproveitando as amostras usinadas, realizar um tratamento térmico nas mesmas e avaliar a influência do estado de tensões gerado pelo corte na distorção final da amostra.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKIKAZU, N.; TAKAKI, Y.; MASZURI, K.; “**Behaviour of Residual Stress and Sawing Stress in Conical type and Touch-type die Drawing by FEM Simulation and Improvement**”. Wire Journal International, p:72, 2001

ASAWAKA, M.; SAZAKI, W.; SHSHIDO, S.; “**Effect of the Die Approach Geometry and Bearing on Residual Stress After Bar Drawing**”. Wire Journal International, p: 446-450, 2000.

ASM, International, **ASM Metals Handbook** Volume 14, Forming and Forging, 1993.

BANIN JÚNIOR, J.R. “**Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido**”. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2009.

BHADESSHIA, H. K. D. H., “Material Factors”. In: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002. p-3.

BOTH, G. B. **Análise do Processo de Corte por Cisalhamento a Quente do Aço AISI 52100**. Trabalho de diplomação. UFRGS, 2008.

BREITLING, J.; CHERNAUSKAS, V.; TAUPIN, E.; ALTAN, T. **Precision Shearing of Billets – Special Equipment and Process Simulation**, Journal of Materials Processing Technology 71, 1997.

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials science and engineering: An Introduction**. 5° Ed., 2002.

CAMPOS, M. et al. **Tensões residuais em aços avaliadas por difração de raios-x: Diferenças entre micro e macro tensões residuais**. Em: 3° Workshop de Textura, p. 115 – 131. São Paulo, SP, 2006

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. 3° Ed., 1988.

EPP, J., HIRSCH, T. **Overview of methods to characterize the Carrier of distortion potential “residual stresses”**. Em: 3rd International Conference on Distortion Engineering (IDE), Bremen, Alemanha, 2011.

FRY, T., FITZPATRICK, M.E., HOLDWAY, P., KANDIL, F.A., SHACKLENTON, J., SUOMINEM, L. “**Determination of Residual Stress by X-ray Diffraction**”. Measurement Good Practice Guide No. 52. National Physical Laboratory, UK, 2000.

HAUK, V.; HOUGARDI, H.; MACHERAUCH, E. **Residual Stress – Measurement, Calculation, Evaluation**. ASM International. DGM Informationsgesellschaft – Verlag, D-61440, p: 54, 1991.

JORGE, R.M.N.; DINIS, L.M.J.S. **Teoria da Plasticidade**. Apostila. Universidade do Porto, 2005

KIM, T.; KIM, B.; CHOI, J.; “**Predction of Die Wear in the Wire-Drawing Process**”. Journal of materials processing Technology, v.65, p:11-17, 1997

KLEIN, D., THOBEN, K–D., NOWAG, L., “**Using indicators to describe distortion along a process chain.**” Em: 1st International Conference on Distortion Engineering (IDE), p. 3 – 10. Bremen, Alemanha, 2005

KUNOW, S., PRINZ, C., VAN BENNEKOM, A., WILKE, F., HOFFMANN, F., ZOCH, H-W., KOHLMANN, R. “**Sources of distortion during the production of bar products and beyond**” Em: 2nd International Conference on Distortion Engineering (IDE), p. 17 – 19. Bremen, Alemanha, 2008

LEMOS, G. V. B., “**Análise De Tensões Residuais em Eixos Automotivos do Aço Din 38b3 Temperados por Indução**”, Dissertação de Mestrado. UFRGS/PPGE3M, 2012.

LU, J. “**Handbook of Measurements of Residual Stresses**”. SEM, Inc., p. 88, 1996.

NORASETHASOPON, S.; YOSHIDA, K., “**Influences of Inclusion Shape and Size in Drawing of Cooper Shaped-Wire**”. Journal of Materials Processing Technology, Vol 172, ed. 3, Março, 2006, p. 400-406.

MACHERAUCH, E.; WOHLFARTT, H.; WOLFSTIEG, U. **Härterei-Tech. Mitt.** p: 201-211, 1973.

MARTINS, C.O.D., STROHAECKER, T.R., ROCHA, A.S., HIRSCH, T.K. **Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100**. Matéria, vol 9, n° 1, pp 23 – 31, Rio de Janeiro, 2004.

MESQUITA, E. L. A., RUGANI, L. L. “**Conformação de aços inoxidáveis**”. ACESITA, p. 13 – 21. dezembro, 1997.

NASTRAN, M.; KUZMAN, K.; “**Stabilisation of Mechanical Properties of the Wire by Rolles Straightening**” Journal of Materials Processing Technology, v.125-126, p:711-719, 2002

NEVES, F.; “**Análise de Tensões Residuais em Tubos Trefilados de Aço ABNT 304**”. Tese de Doutorado, Unicamp, 2003

NUNES, R. M. “**Estudo dos Mecanismos de Distorção de Forma em uma Rota de Fabricação do Processo de Trefilação a Frio a Têmpera por Indução de Barras Cilíndricas em Aço ABNT 1045**” Tese de Doutorado: UFRGS/PPGE3M, 2012.

NUNES, R. M. **Análise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação Combinada do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós Processamento**. Dissertação de Mestrado: UFRGS/PPGE3M, 2008.

PREVÉY, S. P., “**X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques**” Em: Metals Handbook. Vol 10, pp 380 – 392. Metals Park, ASM, 1986.

ROCHA, A.; NUNES, R.; FERLAUTO, E.; “**Avaliação dos Efeitos de Tensões Residuais através da Remoção de Material**”. Estudos Tecnológicos, v.4, p:157-169, 2008

ROSSINI, N.S.; Dassisti, M.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. **Methods of Measuring Residual Stresses in Components**. Materials and Design. p: 572-588, 2011.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 2º edição, 2004.

SCHAEFFER, L.; ROCHA, A.S. **Laminação: Módulo de Treinamento Gerdau**, 2007.

SOUZA, J. H. C., Estudo **do Processo de Corte de Chapas por Cisalhamento**. Dissertação de Mestrado. UFRGS/PPGE3M, 2001.

SOUZA, T. F., **Simulações Computacionais para Análise e Minimização das Tensões Residuais no Processo de Trefilação**. Dissertação de Mestrado. UFRGS/PPGE3M, 2011

SUE, J.A., AND SCHAJER, G.S., “**Stress Determination for Coatings**.” Em: ASM Handbook, Vol. 5: Surface Engineering, ASM International, p. 647-653, 1994.

THOBEN, K.-D.; LÜBBEN, T.; CLAUSEN, B.; PRINZ, C.; SCHULZ, A.; RENTSCH, R.; KUSMIERZ, R.; NOWAG, L.; SURM, H.; FRERICHS, F.; HUNKEL, M.; KLEIN, D.; MAYR, P. “**Distortion Engineering**”: Eine systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs. HTM 57 (2002), p. 276 – 282.

TOTTEN, G., HOWES, M., INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**, ASM International, vol 1. Ohio, 2002.

VEGA, G.; HADDLE, A.; IMAD, A., “**Investigation of Process Parameters Effect on the Copper Wire Drawing**”. Materials and Design, v.30, p. 3308-3312, 2009.

VISHAY PRECISION GROUP. “**Measurements of Residual Stresses by Hole Drilling Strain Gage Method**.” Technical Notes – 503, nº 11053, Novembro 2010.

WANG, Z.; GONG, B.; “**Residual Stress in the Forming of Materials**”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, G.E. Totem, ASM International, p: 141, 2002

WU, A.; REN, J.; PENG, Z.; MURAKAWA, H.; UEDA, Y., “**Numerical Simulation of the residual Stress of Stellite Hard-Facing on Carbon Steel**”. Journal of materials processing Technology, v.101, p.70-75, 2000.

ZOCH, H-W. “**Distortion engineering: vision or ready to application?**” Em: 2nd International Conference on Distortion Engineering (IDE), p. 3 – 12. Bremen, Alemanha, 2008

ZOCH, H-W. “**From single production step to entire process chain – The global approach of distortion engineering**”. Em: 1st International Conference on Distortion Engineering (IDE), p. 3 – 10. Bremen, Alemanha, 2005

ANEXO A - “Engenharia de Distorção” (Portadores do Potencial de Distorção)

A crescente pressão na manufatura de componentes para reduzir custos, aumentar eficiência e produzir produtos de maior qualidade tem resultado em uma maior ênfase na eliminação, ou no mínimo na redução significativa, da distorção a qual pode aparecer durante diversas etapas do processo de produção. Distorção de componentes resulta em retrabalho, uma quebra no processo de automatização e eventualmente, se severo o suficiente, a rejeição do componente. Somado aos aspectos financeiros citados, até pequenas “quantidades” de distorção podem levar a redução da vida útil do componente além de outros problemas de qualidade (KUNOW et al 2008).

O gerenciamento ou controle de distorções é um dos fatores mais importantes na produção industrial nos dias de hoje. Atualmente, o entendimento de que as suas origens são dispersas ao longo de toda a cadeia produtiva é mais difundido, sendo que cada etapa do processo de fabricação pode afetar a distorção do produto final ou da etapa subsequente.

Através da metodologia da engenharia de distorção desenvolvida pelo *Collaborative Research Center (CRC) SFB 570 em Bremen – Alemanha*, demonstrada por ZOCH (2005 e 2008) é possível mapear as influências de cada etapa na distorção e potencial de distorção de um componente, podendo assim realizar ações que visam a minimização, ou controle, desses problemas de distorção.

A importância econômica da minimização da distorção em componentes manufaturados ainda é muito alta. Entre 20 e 40% dos custos da produção de anéis de rolamentos são utilizados na eliminação de distorções através de conformação “a duro”. Tendências modernas na fabricação de componentes como redução de tamanho ou diminuição de peso podem levar a um aumento sensível nestes percentuais (ZOCH 2005).

Até o momento, a simulação de processos de manufatura era limitada ao considerar os processos individualmente. Nesse pensamento, o material base da peça de trabalho ou da ferramenta é assumido como homogêneo e isotrópico. Isso inclui o histórico do material oriundo dos processos de conformação, tais como deformação de grão e tensões residuais

(KLEIN et al 2005). Nos últimos anos foi estabelecido um entendimento comum sobre como lidar com o fenômeno da distorção, tratando-o como um atributo do sistema, ver Figura A.1. Baseado no fato de que cada passo da manufatura contribui para a distorção final do produto, apenas uma visão global do processo de fabricação promete sucesso nesse aspecto, enquanto no passado as investigações focavam apenas em otimizar certos aspectos ou partes do processo.

A metodologia foi estabelecida levando em consideração três passos:

- Determinação das etapas de maiores influências na distorção para todo o processo de manufatura. Preferencialmente suportadas através de um método de planejamento estatístico de ensaios tipo DoE (Design of Experiment) (ZOCH 2005);
- Identificação dos chamados “portadores de potencial de distorção”, tipo padrões de segregação de carbono e outros mecanismos relacionados ao potencial de distorção geral. Cada parte da cadeia de produção deve ser considerada avaliada em como cada portador de potencial de distorção podem ser alterados. A modelagem e a simulação dos processos podem ajudar a detectar ou medir parâmetros que são difíceis de obter em ensaios práticos. Mais adiante as informações obtidas poderão servir de pré-requisitos para a generalização do processo, tornando possível a extrapolação para outras geometrias, materiais e processos (ZOCH 2005);
- Aplicação do conceito de “potencial de compensação”. Sua definição inclui todas as influências positivas em relação ao tamanho e forma do componente. Se os mecanismos de distorção identificados ao longo do processo de fabricação forem compreendidos, os “efeitos inversos” podem ser utilizados para corrigir ativamente as mudanças de forma observadas (ZOCH 2005);

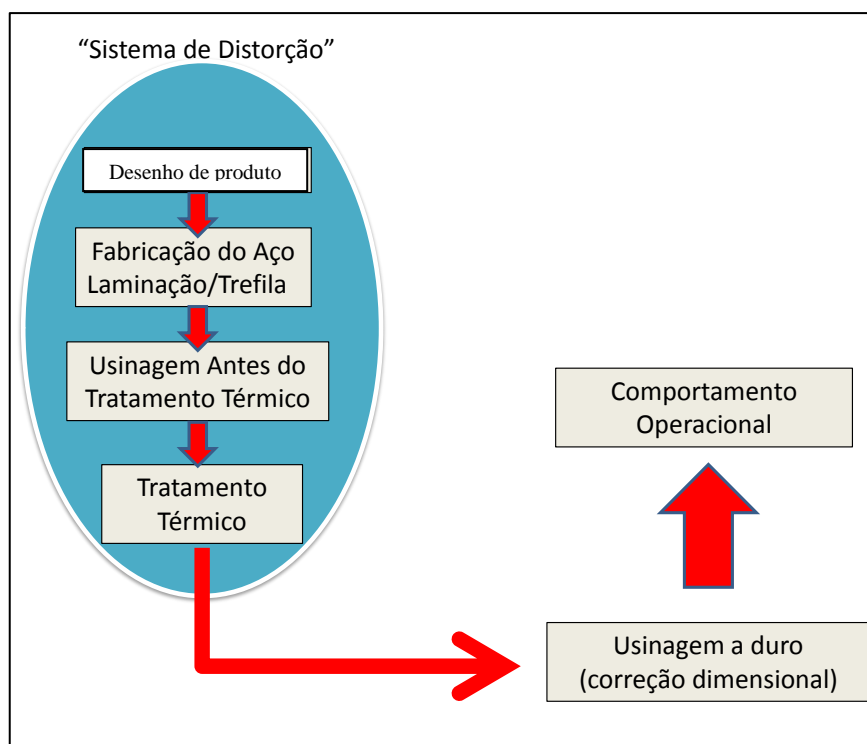


Figura A.1. Tratamento da distorção como um “sistema de atributos”. Fonte: Adaptado de ZOCH 2008.

A metodologia descrita por ZOCH (2005) tem se provado como uma ferramenta útil, não só para o entendimento dos mecanismos de distorção e suas interdependências, mas para minimizar a distorção final do componente. Como forma de simplificação de projeto, se utilizam para casos gerais, formas geométricas simplificadas como um cilindro para representar um eixo, um disco para representar engrenagens e um anel representando discos de rolamentos (ZOCH 2008). A Figura A.2 exemplifica a aplicação da metodologia da “engenharia de distorção”.

Em resumo, a abordagem apresentada pela metodologia de engenharia de distorção requer colaboração conjunta de todas as estruturas organizacionais na linha de produção. Uma otimização geral de custos de produção deve levar em conta desde a aquisição de material e desenho de produto até o tipo de tratamento térmico, bem como processos posteriores. O CRC se apresenta como um instrumento de aprendizado e projeto para futuras aplicações industriais. O projeto desenvolvido pelo LdTM em parceria com o IWT utiliza esta abordagem de engenharia de distorção aplicada para barras de aço em uma simulação de um componente mecânico do tipo eixo automotivo.

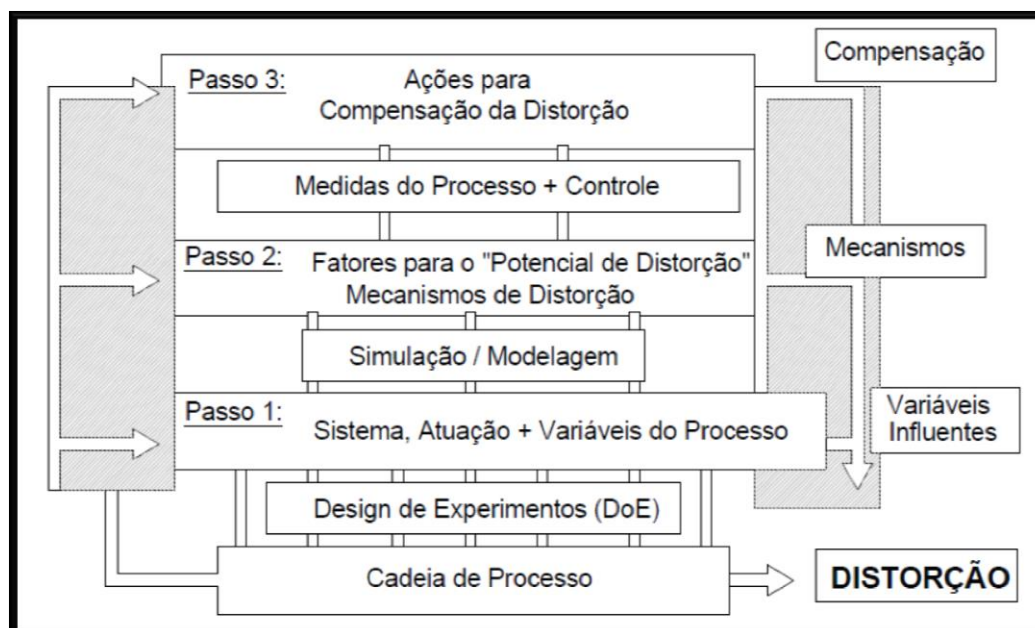


Figura A.2. Metodologia da engenharia de distorção. Fonte: Adaptado de ZOCH 2008.

Transportadores do Potencial de Distorção

O processo de fabricação do aço é a primeira etapa na produção em cadeia de um componente e, portanto qualquer avaliação sobre os potenciais de distorção devem começar por este processo. Quando identificando o processo inteiro de produção de um componente em termos de distorção, é possível identificar diversas possíveis fontes para distorção originárias da produção de barras de aço nas usinas. Alguns desses fatores e, mais importante, possibilidades de como reduzir distorções foram discutidas por KUNOW et al (2008). A maior influencia no potencial de distorção na produção de barras de aço se dá na parte de trabalho a frio. Os potenciais problemas em relação à conformação a frio vêm aumentando nos últimos anos devido à necessidade cada vez maior de um produto final (barras) com maior retidão ou retilidade. Quanto maior a necessidade de retilidade, pode acarretar na necessidade de um processo de endireitamento e o mesmo altera significativamente as tensões residuais (LEMOS 2012). Essas tensões residuais podem levar a uma nova distorção nos passos seguintes do processo ou redução da vida em fadiga de um componente.

Thoben et al. (2002) concluiu que níveis significativos de tensões residuais são gerados nos processos de conformação a frio, pois as deformações plásticas ocorrem a

temperaturas baixas com menores possibilidades de ocorrência de mecanismos de relaxação das tensões. Em especial, tensões residuais, podem inclusive gerar perda de matérias-primas ocasionadas por quebra de componentes durante tratamentos térmicos, em etapas posteriores do processo de fabricação ou ainda a quebra catastrófica do componente quando em serviço (NUNES 2012).

O objetivo de antecipar a distorção proveniente de toda a cadeia de produção para suportar o processo de seleção dos recursos de manufatura, ferramentas e passos de manufatura, assim como parâmetros ferramentais e de manufatura se torna cada vez mais necessário. Em um primeiro momento, uma aproximação para um modelo de prognóstico para distorção pode ser realizada. Na próxima etapa, após estabelecido um modelo apropriado, os parâmetros de processo podem ser alterados.

Um dos modelos utilizados na predição de distorção é o modelo de prognóstico da caixa preta, Figura A.3. Os dados de entrada do modelo caixa preta devem conter indicadores que sejam capazes de prever a distorção. Um indicador serve como um auxílio o qual se refere a certas condições ou desenvolvimentos. Enquanto um indicador pode ser observado diretamente, suas mudanças permitem conclusões sobre um fenômeno não observado diretamente. Indicadores são fatores qualitativos e quantitativos os quais servem como indexadores de critérios em ordem de facilitar uma avaliação. Eles podem ilustrar fatores simples como indicadores elementares ou indexar diversos fatores simples e suas interações como indicadores complexos. Uma importante característica dos indicadores é o fato de transformar sistemas complexos como a distorção em sistemas compreensíveis e perceptíveis. A profundidade de usinagem é um exemplo de indicador de distorção (KLEIN et al. 2005).

Entre os fatores conhecidos como potenciais carregadores de distorção estão as tensões residuais. Principais responsáveis pelas distorções de forma, como empenamento, entre outros, elas atuam diretamente na distorção do material e tem seus perfis alterados através de cada processo de transformação mecânica (ROCHA et al 2012). Portanto, a sua determinação ao longo da cadeia produtiva se torna essencial na avaliação da distorção de um componente mecânico.